

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAFES YAPILI MALZEMELERDE GERİNİM TABANLI YORULMA
ÖMRÜ HESABI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Arda İdris ÖZAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

NİSAN 2021



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAFES YAPILI MALZEMELERDE GERİNİM TABANLI YORULMA ÖMRÜ HESABI

Arda İdris Özay

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet Görgülüarslan

Tarih: Nisan 2021

Günümüzde, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların yüksek hafiflik kazandırması özelliğinden faydalanmak amacıyla kafes yapıların kullanımına odaklanılmış ve kafes yapıların statik dayanımlarının ortaya konulmasına ilişkin birçok çalışma yürütülmüştür. Fakat, aslında statik dayanım kadar büyük öneme sahip olmasına rağmen, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapı malzemelerin dinamik yük altındaki yorulma davranışlarını ortaya koyacak yöntemler henüz olgunlaşmamıştır. Literatürde bu alandaki yapılan araştırmalara bakıldığında, genel olarak deneysel çalışmaların ağırlıkta yürütüldüğü ve nümerik çalışmaların ise gerilme tabanlı ömür tespit yöntemleri ile gerçekleştirildiği görülmüştür. Deneysel çalışmaların yüksek maliyetli olması ve gerilme tabanlı nümerik hesaplamaların ise düşük çevrimli yorulma ömrü (DÇY) bölgesinde verimli bir hesaplama yöntemi olmadığı görülmüştür. Bu sebep ile, bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile Ti6Al4V malzemedan üretilmiş kafes yapıların gerinim tabanlı yorulma ömrü tespit metodu kullanılarak ömür analizlerinin gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan metodolojide, ilk olarak yorulma ömrü tespit edilecek kafes yapının birim hücre geometrisi modellenmiştir. Bu geometrinin gerilme-gerinim eğrisini elde etmek amacıyla statik basma yükü altında sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizden elde edilen gerilme-gerinim verisinden hesaplanan akma dayanımından başlayıp kademeli olarak azaltılarak elde edilen gerilme değerleri,

yorulma ömrü analizi için maksimum gerilme değerleri olarak tanımlanmıştır. Her bir gerilme değeri için kafes yapıya uygulanacak tekrarlı bir yükleme profili oluşturulmuştur. Bu oluşturulan her bir yükleme profili için, gerinim tabanlı Brown-Miller yöntemi kullanılarak yorulma ömür analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece, her bir gerilme değeri için yorulma ömrü hesaplanmış ve kafes yapının yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Aynı kafes yapı için literatürde sunulan deneysel yorulma ömür eğrisi sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu çalışmadaki nümerik ömür analizi ile elde edilen ömür değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan farkın sebebinin, kafes yapının yüzey kısımlarında eklemeli imalat sürecinden kaynaklı meydana gelen kusurlar olduğu öngörülmüştür. Bu kusurlardan dolayı meydana gelecek gerilme konsantrasyon katsayısı, yine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, Ti6Al4V alaşımı ve seçmeli lazer ergitme (SLE) ile üretilen tüm kafes yapı malzemelerin, katı kütle ömür verileri kullanılarak doğrudan yorulma ömrünü tahmin etmeye yönelik gerilme konsantrasyon katsayısı hesaplamak için analitik bir eşitlik ortaya konulmuştur. Bu eşitlik ile elde edilen, gerilme konsantrasyon değerine göre ömür analizleri farklı kafes yapıları için tekrarlanarak literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara göre, önerilen gerilme konsantrasyonu katsayısı hesaplama yöntemi ve birim hücre ile gerinim-tabanlı ömür tespit metodu kullanılarak yapılan kafes yapıların ömür analizlerinin, hem gerilme tabanlı metotlara göre daha doğru sonuç verdiği, hem de farklı kafes yapıları için deney sonuçları ile uyumlu gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Kafes yapılar, Gerinim tabanlı yorulma ömrü analizi, Seçmeli lazer ergitme, Ti6Al4V alaşımı

ABSTRACT

Master of Science

FATIGUE LIFE CALCULATION OF LATTICE STRUCTURE BY USING STRAIN BASED METHOD

Arda İdris Özay

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Recep Muhammet Görgülüarslan

Date: April 2021

Today, with the advancements of additive manufacturing techniques, to benefit from the great lightweight properties, the use of lattice structures has been focused and many studies have been carried out to reveal the static strength of the lattice structures. Although it is as important as the static strength, the methods that will carry out the fatigue behavior of the lattice structures produced by additive manufacturing methods under dynamic loads are not yet mature. It is seen from the literature that the studies related to this field are in general based on experimental investigations. A small number of studies that use numerical analyses are seen to be based on the stress-based life determination methods. However, it has been observed that the experimental studies are costly, and the stress-based numerical calculations are not efficient particularly in the low cycle fatigue life region. For this reason, in this study, the fatigue life determination of additively manufactured lattice structures from Ti6Al4V material is studied by using the strain-based fatigue life numerical method. In the methodology used in this study, first, the unit cell geometry of the lattice structure, for which the fatigue life is determined, is modeled. To obtain the stress-strain curve of this geometry, a finite element analysis is carried out under quasi-static compression

load. The stress values, which are determined by gradually decreasing starting from the yield strength calculated from the stress-strain data obtained from this analysis, are defined to be the maximum stress values for the fatigue life analysis. For each stress value, a repeated loading profile, which will be applied to the lattice structure, is created. For each loading profile, the fatigue life analysis has been carried out by using the strain-based Brown-Miller method. Thus, the fatigue life is calculated for each stress value and the fatigue life curve of the lattice structure is obtained. When compared to the experimental fatigue life curve results presented in the literature for the same lattice structure, higher fatigue life results are observed to be obtained from the numerical fatigue life analysis in this study. The reason for the difference is considered to be the surface defects on the lattice structure, which occurs due to the additive manufacturing process. The stress concentration factor due to these defects is determined using the finite element method. As a result of this study, an analytical equation is presented to calculate the stress concentration factor that will allow estimating the fatigue life of all lattice structures made of Ti6Al4V alloy and selective laser melting directly using the life data of the same size bulk metal. By considering the stress concentration factor value, the life analyses are repeated for different lattice types and compared with the experimental results in the literature. According to these comparisons, it is observed that the life analysis of the lattice structures by using the presented calculation method of stress concentration factor and the strain-based fatigue life method with the unit cell both produces more accurate results when compared with the stress-based methods and can be performed in agreement with the experiments for different lattice types.

Keywords: Additive manufacturing, Lattice structures, Strain-based fatigue life analysis, Selective laser melting, Ti6Al4V alloy.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Tezin Organizasyonu	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Eklemeli İmalat	5
2.1.1 Seçmeli lazer eğitme (SLE).....	6
2.1.2 Kafes yapılar	7
2.1.3 Kafes yapılarda yorulma ömrü	9
2.1.3.1 Kafes yapılarda yorulma ömrünün nümerik yöntemler ile tayini.....	9
2.1.3.2 Kafes yapılarda yorulma ömrünün deneysel yöntemler ile tayini	18
2.1.3.3 Kafes yapılarda yorulma ömrünün deneysel ve nümerik yöntemler ile tayini ve karşılaştırması	33
3. YORULMA ÖMRÜ TEORİSİ	41
3.1 Yorulma Ömrü Mekanığı	41
3.1.1 Yorulma yükü	42
3.1.2 Kararlı durum çevrimsel gerilme gerinim ilişkisi.....	43
3.1.3 Yorulma ömrü.....	46
3.1.4 Gerinim ömrü hesaplama yaklaşımı	47
3.1.5 Gerinim yorulma ömür parametrelerinin tahmini	50
3.1.6 Çentiğin malzeme davranışına etkisi	51
4. YORULMA ÖMÜR ANALİZ MODELİ	55
4.1 Kafes Yapı Yarı-Statik Analizleri	56
4.1.1 Kafes yapı tasarımı	56
4.1.2 Kalıpların tasarımı	58
4.1.3 Ağ örgüsü	59
4.1.4 Sınır şartları	59
4.1.5 Malzeme verisi	59
4.1.6 Kontak bölgesi sürtünme katsayısı	60
4.1.7 Yarı-statik analiz sonuçları	60
4.2 Kafes Yapı Yorulma Ömür Analizleri	61
4.2.1 Yorulma analiz yöntemi	61
4.2.2 Gerinim ömür malzeme parametreleri.....	68
4.2.3 Yorulma yükleme profili	68
4.2.4 Gerilme konsantrasyonunun belirlenmesi	69

5.	YORULMA ÖMÜR ANALİZ SONUÇLARI	77
5.1	EDOY Geometri Yorulma Ömür Analiz Sonuçları	78
5.1.1	Doğrudan EDOY kafes yapısı kullanılarak gerilme konsantrasyonu hesaba katılmadan EDOY ömür sonuçları	78
5.1.2	EDOY kafes yapısı ömür eğrisinde pürüzlülük gerilme konsantrasyonu ($K_{t(pürüzlülük)}$) hesaba katıldığında ömür sonuçları	80
5.1.3	Doğrudan katı kütle kullanılarak elde edilen ömür eğrisinde toplam gerilme konsantrasyonu katsayısı $K_{t(Toplam)}$ hesaba katılarak EDOY elde edilen kafes yapı ömür sonuçları	82
5.1.4	EDOY kafes yapı göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömür sonuçları.....	86
5.2	Gerilme Konsantrasyon Modelinin Farklı Kafes Yapılar için Uygulanması ...	88
5.2.1	Sekizyüzlü geometri için gerilme konsantrasyon yaklaşımının kullanımı	89
5.2.2	Dörtüzlü geometri için gerilme konsantrasyon yaklaşımının kullanımı..	92
5.2.3	Sekizyüzlü ve dörtüzlü kafes yapılar için göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömür sonuçları	95
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR		105
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: SLE prosesinin şematik gösterimi (Belle vd., 2013).	6
Şekil 2.2: Örnek kafes yapıları; (a)HMK, (b) HMKZ, (c) YMK, (d) YMKZ, (e) BK, (f) Oktet ve (g) elmas (Maconachie vd., 2019).	7
Şekil 2.3: Kafes yapılarda çubuk ve düğüm nokta sayısı (Ashby, 2006).	8
Şekil 2.4: Trabeküler kemiğinin karşılaştırmalı yorulma ömür sonuçları; düz çizgi (Schaffner vd., 2000), kesikli çizgi (X. D. E. Guo vd., 1994).	10
Şekil 2.5: Sinterlenmiş titanyum kafes yapının modifiye Goodman diyagramı Ryan vd. (2009).	11
Şekil 2.6: Dört farklı göreceli yoğunluktaki EDOY yorulma ömrü analiz sonuçları ve deneysel sonuç karşılaştırması (Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd., 2016).	13
Şekil 2.7: SE yöntemi ile elde edilen yorulma ömrü sonuçları (Zargarian vd., 2016) (a) Üç farklı kafes yapı için gerilme-ömür sonuçlarının logaritmik grafiği (b) Tüm değerlerin normalize edilerek elde edilen yorulma ömür eğrisi.	15
Şekil 2.8: Elmas kafes yapı deneysel (Amin Yavari vd., 2015) ve nümerik (Zargarian vd., 2019) yorulma ömrü karşılaştırması.	16
Şekil 2.9: Kafes yapıların yorulma ömrü karşılaştırması (Peng vd., 2020).	17
Şekil 2.10: Elmas kafes yapı, göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömrü sonuçları (Hrabe vd., 2011).	18
Şekil 2.11: Farklı malzemelerden imal edilmiş BK kafes yapıların göreceli yoğunluk değişimine bağlı yorulma oranı değişimi (Li vd., 2012).	19
Şekil 2.12: Elmas, KKSİY, ve EDOY birim hücrelerinin karşılaştırmalı yorulma ömür eğrisi (Amin Yavari vd., 2015).	20
Şekil 2.13: EIE ve SLE ile üretilmiş test numunelerinin yorulma ömrü (Günther vd., 2017).	21
Şekil 2.14: Elmas kafes yapının üretim tekniklerine bağlı yorulma ömrü değişimi (Van Hooreweder vd., 2017).	22
Şekil 2.15: SLE ve HIP tekniği ile üretilmiş kafes yapılarında yorulma ömrü (Wu vd., 2017)	22
Şekil 2.16: Sekiz yüzlü (a) Hücre gyroid (b) ve Sac gyroid (c) kafes yapılarının yorulma ömrü karşılaştırması (Speirs vd., 2017).	24
Şekil 2.17: E, KKSİY ve EDOY kafes yapılarının Co-Cr ve Ti6Al4V malzemelerine göre yorulma ömrü (Ahmadi vd., 2018).	25
Şekil 2.18: SLE ve EIE ile üretilmiş numunelerin yorulma ömrü karşılaştırması (Fousová vd., 2018).	26
Şekil 2.19: Üç farklı açıda üretilmiş EDOY (a, b, c), (a), (b) ve (c) kullanılarak oluşturulmuş test numunesi (d) ve iki birim hücreden oluşan (çekirdek ve kabuk) yüksek ömürlü kafes yapı (e) ve kademeli üretilen test numunesi analitik & nümerik yorulma ömrü karşılaştırma sonucu (S. Zhao vd., 2018).	27

Şekil 2.20: Basma (a) ve çekme (b) yükleri karşısında Gyroid formlu kafes yapı yorulma ömrü karşılaştırması – standart ve yoğunlaştırılmış lazer parametresine bağlı değişim (Kelly vd., 2019).....	28
Şekil 2.21: Elmas kafes yapıya uygulanan prosesler sonucunda yorulma ömründeki değişim (Karami vd., 2020).....	29
Şekil 2.22: Standart EDOY ve optimize edilmiş kafes yapılarının akma noktası ile normalize edilmiş yorulma ömrü karşılaştırması (Liu vd., 2020).....	30
Şekil 2.23: SLE ile üretilmiş ve harici SİP uygulanmış/uygulanmamış gözeneklilik oranları %33 ve %55 ve %84 olan kafes yapıların yorulma ömrü test sonuçları karşılaştırması(Wu vd., 2020).	31
Şekil 2.24: Silindirik yapı malzemelerin akma gerilmesi (σ_y) ile normalize edilmiş grafiği (Yáñez vd., 2020).	32
Şekil 2.25: SLE ile üretilmiş malzemesi CPG2Ti olan tüp formlu kafes yapı test numunesinin teorik ve deneysel ömür analiz sonuçları (Lipinski vd., 2013). ...	34
Şekil 2.26: Mikro-kafes, köpek kemiği formlu (Eklemeli İmalat IN718) ve askeri standartlar el kitabı verisi yorulma ömrü karşılaştırması (Huynh vd., 2016). ...	35
Şekil 2.27: Kübik birim hücreli kafes yapının farklı düğüm noktalarındaki gerilme konsantrasyon katsayısının (K_t) eleman sayısına bağlı değişimi (Dallago vd., 2019).....	36
Şekil 2.28: Kırılma yüzeyleri incelenerek tahmin edilen ömür ve test ile elde edilen ömür karşılaştırması (Sheridan vd., 2018).	37
Şekil 2.29: Gerilme tabanlı yorulma dayanım limiti tespit prosedürü (Refai vd., 2020).....	39
Şekil 3.1: Bir uçağın yer-hava-yer uçuş zarfı temsili (Ghasabi, 2018).	42
Şekil 3.2: Sabit genlikli tekrarlı yüklemenin temsili gösterimi (Ghasabi, 2018).	42
Şekil 3.3: Bauschinger etkisi (a) çekme yüklemesi (b) basma yüklemesi (c) çekme yüklemesi ve sonrasında basma yüklemesinin birbiri ardına uygulandığı durumlarda gerilme-gerinim ilişkisi.(Ghasabi, 2018).	44
Şekil 3.4: Stabil gerilme-gerinim Histerisiz çevrimi (Lee, 2011).	44
Şekil 3.5: Çevrimsel gerilme-gerinim eğrisinin oluşturulması (Masing, 1926).....	45
Şekil 3.6: Gerinim tabanlı ömür hesaplama yaklaşımı konsepti (Ghasabi, 2018).	47
Şekil 3.7: Toplam gerinim ömür eğrisi şematik gösterimi (Ghasabi, 2018).	48
Şekil 3.8: Üzerinde delik olan bir levha (Ghasabi, 2018).	52
Şekil 3.9: Alüminyum alaşımlı malzemede bir çentiğin, yorulma ömür davranışı üzerindeki etkisi ve K_t veya K_f kullanılarak tespit edilen yorulma dayanım limitindeki değişimin karşılaştırması (MacGregor vd., 1952).	53
Şekil 4.1: EDOY geometrisi.....	57
Şekil 4.2: EDOY çubuk yerleşim açıları (Babae vd., 2012).	57
Şekil 4.3: EDOY için farklı çubuk çapı ve uzunluklarında göreceli yoğunluk değerleri.....	58
Şekil 4.4: Sabit ve hareketli rijit levhalar.	58
Şekil 4.5: Eleman sayısı yakınsama analizleri.	60
Şekil 4.6: Hücre sayısı yakınsama analizleri.....	61
Şekil 4.7: BK geometrili kafes yapı yarı-statik analiz sonucu.	65
Şekil 4.8: HMK geometrili kafes yapı yarı-statik analiz sonucu.	65
Şekil 4.9: BK yorulma ömür analiz sonucu karşılaştırması.	67
Şekil 4.10: HMK yorulma ömür analiz sonucu karşılaştırması.	67
Şekil 4.11: Yorulma ömür analizi yükleme profili.	69

Şekil 4.12: EDOY yüzeyindeki gerilme dağılımı (MPa), maksimum gerilme ise kırmızı dikdörtgen içinde gösterilmiştir.....	70
Şekil 4.13: Yarı-statik analiz katı kütle boyutları (deforme olmamış) ve ağ örgüsü .	71
Şekil 4.14: Üretim kaynaklı gerilme konsantrasyonu tespit modeli (a) Sınır ve yükleme koşulları (b) kullanılan ağ örgüsü.....	73
Şekil 5.1: Doğrudan EDOY kafes yapısı kullanarak gerilme konsantrasyon katsayısı hesaba katılmadan yorulma ömrü analiz sonuçlarının üç farklı malzeme ve ortalama gerilme kullanılıp/kullanılmamasına bağlı değişimi.....	79
Şekil 5.2: Pürüzlülüğten dolayı gerilme konsantrasyon değeri ($K_{I(pürüzlülük)}$) hesaba katıldığı durumda yorulma ömrü analiz sonuçları	81
Şekil 5.3: Katı kütle ömür eğrisinde $K_{I(köşe)}$ hesaba katılarak EDOY kafes yapı yorulma ömür eğrisi hesabı.....	84
Şekil 5.4: Üretim kaynaklı kusurlar hesaba katılarak yorulma ömür eğrisi hesabı ...	85
Şekil 5.5: EDOY kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda belirlenen yorulma ömür eğrileri.....	87
Şekil 5.6: EDOY kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi.....	88
Şekil 5.7: Sekizyüzlü geometril kafes yapı boyutları	89
Şekil 5.8: Sekizyüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı gerilme-gerinim eğrisi.....	90
Şekil 5.9: Sekizyüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için nümerik ömür analizi sonucu belirlenen yorulma ömür eğrisi.....	90
Şekil 5.10: Sekizyüzlü kafes yapı için deneysel (D. Zhao vd., 2018) ve nümerik ömür analizi ile belirlenen yorulma ömür eğrileri.....	91
Şekil 5.11: Dörtüzlü geometril kafes yapı boyutları.....	92
Şekil 5.12: Dörtüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için gerilme-gerinim eğrisi	93
Şekil 5.13: Dörtüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için yorulma ömür eğrisi.....	93
Şekil 5.14: Dörtüzlü kafes yapı deneysel (D. Zhao vd., 2018) ve nümerik ömür analizi ile elde edilen yorulma ömür eğrileri.....	94
Şekil 5.15: Sekizyüzlü kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarda elde edilen yorulma ömür eğrileri.....	97
Şekil 5.16: Sekizyüzlü kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi.....	97
Şekil 5.17: Dörtüzlü kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarda elde edilen yorulma ömür eğrileri.....	98
Şekil 5.18: Dörtüzlü kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi.....	98



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Ti6Al4V malzeme verisi.....	59
Çizelge 4.2: Ti6Al4V Johnson-Cook malzeme modeli (Peng vd., 2020).....	64
Çizelge 4.3: Ti6Al4V malzeme gerinim ömür parametreleri (Peng vd., 2020).....	66
Çizelge 4.4: Ti6Al4V malzeme gerinim parametre değerleri.....	68
Çizelge 4.5: EDOY kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarında form kaynaklı gerilme konsantrasyonu değişimi.....	71
Çizelge 4.6: EDOY kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarında üretim kaynaklı gerilme konsantrasyonu ($K_{I(pürüzlülük)}$) değişimi.....	73



KISALTMALAR

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
BKZ	: Bakınız
BT	: Bilgisayar tomografisi
DÇY	: Düşük Çevrimli Yorulma (Low Cycle Fatigue)
DMLS	: Direk metal lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering)
EDOY	: Eşkenar dörtgenel onikiyüzlü (Rhombic Dodecahedron)
EIE	: Elektron Işınli Ergitme (Electron-Beam Melting)
ELI	: Ekstra düşük çatlak (Extra Low Interstitials)
FIP	: Crossland yorulma göstergesi (Crossland Fatigue Indicator)
HMK	: Hacim merkezli küp
HMKZ	: Dikey Z ekseninde çubuklar ile desteklenmiş HMK
IN	: INCONEL
KD	: Kimyasal dağlama
KKSY	: Kesilmiş küp sekizyüzlü (Truncated-cuboctahedron)
KLT	: Kesikli lazer tabanlı
KSP	: Kaba süreç parametreleri
LEKM	: Lineer elastik kırılma mekaniği (Linear Elastic Fracture Mechanics)
SB	: Kuşlama
BK	: Basit küp (Simple Cubic)
SE	: Sonlu elemanlar
SİP	: Sıcak izostatik presleme (High Isostatic Pressing)
SLE	: Seçmeli lazer ergitme (Selective Laser Melting)
SLS	: Seçmeli lazer sinterleme (Selective Laser Sintering)
SLT	: Sürekli lazer tabanlı
S-N	: Yorulma ömür eğrisi
SWT	: Smith Watson ve Topper
TS	: Tarama stratejisi
Ti	: Titanyum
YÇY	: Yüksek çevrimli yorulma (High Cycle Fatigue)
YMK	: Yüzey merkezli küp
YMKZ	: Düşey Z ekseninde çubuklar ile desteklenmiş YMK



SEMBOL LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

A	Johnson-Cook akma gerilmesi
a	Çubuk uzunluğu ölçüsü
B	Sertleşme pekleşmesi parametresi
b	Yorulma dayanım üssü
C	Gerinim oranı güçlendirme katsayısı
c	Yorulma süneklik üssü
D	Çap ölçüsü
d	Yarıçap ölçüsü
E	Elastik modül
e	Çentik ucu gerinim
F	Kuvvet
f	Frekans
F_{max}	Maksimum kuvvet
F_{min}	Minimum kuvvet
H	Yükseklik ölçüsü
Hz	Hertz
K'	Çevrimsel dayanım sabiti
K_f	Yorulma çentik faktörü
K_t	Gerilme konsantrasyonu
$K_{t(köşe)}$	Geometrik gerilme konsantrasyonu
$K_{t(pürüzlülük)}$	Üretim kaynaklı gerilme konsantrasyonu
$K_{t(Toplam)}$	Toplam gerilme konsantrasyonu
l	Çubuk boyu
M	Termal yumuşama sabiti
M_n	Maxwell numarası
n	Sertleşme pekleşmesi üssü
n_d	Düğüm sayısı
n'	Çevrimsel sertleşme pekleşmesi
N	Ömür sayısı
N_f	Evrilme sayısı
r	Çubuğun yarıçapı
R	Gerilme oranı
$R1$	X ekseninde dönme
$R2$	Y ekseninde dönme
$R3$	Z ekseninde dönme
SD	Çentik çapı
Sd	Çentik yarıçapı
s	Çubuk sayısı
T_m	Ergime sıcaklığı
T_i	Geçiş sıcaklığı

$U1$	X eksen
$U2$	Y eksen
$U3$	Z eksen
q	Çentik hassasiyet faktörü
w	Genişlik ölçüsü
σ	Gerilme
σ_a	Gerilme genliği
σ_ζ	Çentik ucu gerilme
σ_f	Kafes yapı yorulma dayanım limiti
σ_{of}	Katı kütle yorulma dayanım limiti
σ_{maks}	En büyük gerilme
σ_{min}	En küçük gerilme
σ_{ort}	Ortalama gerilme
σ_y	Akma gerilmesi
σ_f	Yorulma dayanım katsayısı
σ_y	Akma gerilmesi
ρ	Kafes yapı yoğunluk
ρ^*	Göreceli yoğunluk
ρ_0	Katı kütle yoğunluğu
ε	Gerinim
ε_f	Yorulma süneklik katsayısı
ε_e	Elastik Gerinim
ε_p	Plastik Gerinim
Δ	Delta (Değişim)
ΔS	Gerilme aralığı
$\Delta\gamma_{maks}$	Maksimum kayma gerinimi
α	Malzeme boyut sabiti
β	Neuber sabiti
θ	Açı
ζ	Referans gerinim oranı

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat yöntemlerinin, hafif ve yüksek dayanımlı parçalar üretebilme özelliği sayesinde, son yıllarda araştırmacıların odak noktası haline geldiği bilinmektedir. Özellikle de savunma, havacılık ve uzay çalışmaları için odak noktası haline gelen bu prosesler sayesinde artık herhangi bir destek yapısı ihtiyacı doğmadan kafes yapılar gibi karmaşık geometrili parçalar doğrudan üretilebilmektedir. Bu yapıların periyodik olarak çoğaltılması sayesinde yüksek dayanımlı ve muadillerine göre daha hafif parçalar elde edilebilmektedir. Fakat eklemeli imalat metotlarının henüz tam bir olgunluk seviyesine ulaşmamış olmasından dolayı üretilen parçaların hem statik hem de dinamik dayanımlarının incelenmesi üzerinde birçok araştırmacı çalışmaktadır. Bu yapıların, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen katı kütleli yapıların yerini alması sayesinde otomotivde karbon emisyonları azaltılabilecek, havacılıkta faydalı yük taşıma kapasitesi artırılabilir ve savunmada darbe emisyon kabiliyeti yüksek yapılar ortaya konulabilecektir. Tüm bu alanlara ışık tutması amacıyla da bu çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömürlerinin hesaplanmasına yönelik gerinim tabanlı bir yorulma ömrü hesaplama çalışması yürütülmüştür.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömrünün deneysel veya nümerik olarak hesaplamalarına ilişkin çalışmaların araştırmacıların odak noktası haline geldiği görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalara bakıldığında Hedayati, Hosseini-Toudeshky vd. (2016), Zargarian vd. (2019) ve Zargarian vd. (2016) taraflarından malzemesi Ti6Al4V olan “eşkenar dörtgen onikiyüzlü” (EDOY) (Rhombic dodecahedron) geometrili parçanın gerilme metodu kullanılarak yorulma ömrünün nümerik olarak hesapladığı, fakat malzemenin düşük çevrimli yorulma ömrü (DÇY) (Low Cycle Fatigue) bölgesinde deneysel ve nümerik sonuçlar arasında ciddi farklar olduğu gözlenmiştir. Diğer yandan Peng vd. (2020) ise yine malzemesi Ti6Al4V olan

EDOY geometrilik parçanın ömrünü gerinim metodu kullanarak nümerik olarak incelemiş fakat deneysel bir sonuç ile karşılaştırmamıştır. Neçemer vd. (2019) ise gerinim metodu ile deneysel ve nümerik analizler gerçekleştirerek nümerik ömür tayini yapmış fakat bu çalışmada hem bütün geometriyi modellemiş hem de gerilme konsantrasyon faktörünü hesaba katmamıştır. Literatürde geçen bu çalışmalarda da bahsedildiği üzere; literatürde eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömrünün gerinim tabanlı yöntemler ile hesaplanması konusunda bir boşluk olmasından dolayı; bu çalışmada malzemesi Ti6Al4V olan bir EDOY geometrisinden oluşan birim hücre kafes yapı ele alınarak gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Bu yorulma ömür hesaplama çalışmasında Brown-Miller yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca üretim kaynaklı meydana gelen çentiklerin yorulma ömrüne etkisi incelenmiş ve hem geometri kaynaklı hem de bu çentiklerin meydana getirdiği toplam gerilme konsantrasyonunun hesaplanmasına yönelik analitik bir eşitlik sunulmuştur. Burada sunulan toplam gerilme konsantrasyonu eşitliği sayesinde; eklemeli imalat prosesi ile üretilmiş ve malzemesi Ti6Al4V olan ve yorulma ömrü bilinen bir katı malzemeden doğrudan herhangi bir kafes yapının yorulma ömrü tayini yapılabilecektir.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu çalışmada; eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapıların, sonlu elemanlar (SE) yöntemleri kullanılarak yorulma ömrünün incelenmesi için çalışma yürütülmüştür. Yürütülen bu çalışma altı ana başlık altında sunulmuş olup; birinci bölümde çalışmanın amacı ve kapsamından bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise eklemeli imalat yöntemleri ile özellikle de seçmeli lazer ergitme (SLE) (Selective Laser Melting) imalat yöntemi ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömrünün tayini üzerine gerçekleştirilen; deneysel, nümerik ve deneysel ve nümerik karşılaştırmalı literatür çalışmaları üç alt başlıkta sunulmuştur. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise malzemelerin yorulma ömrünün analitik veya nümerik hesaplanmasının arka planındaki teoriden bahsedilmiş ve spesifik olarak gerinim yorulma ömür hesaplama metodu açıklanmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde; malzemesi Ti6Al4V olan bir EDOY birim hücre geometrisinin gerilme-gerinim geçmişini elde etmek için gerçekleştirilen yarı-statik analizlerden bahsedilmiş sonrasında bu gerilme-gerinim geçmişi kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler ile yorulma ömrünün nasıl

tespit edildiği sunulmuştur. Çalışmanın beşinci bölümünde ise nümerik analizlerden Hedayati, Hosseini-Toudeshky vd. (2016) tarafından elde edilen sonuçlar ile literatürde Amin Yavari vd. (2013) tarafından gerçekleştirilmiş deneysel sonuçların karşılaştırması sunulmuştur. Ayrıca, bu çalışma sonucu bir kafes yapının yorulma ömrünün doğrudan katı kütle yorulma ömrünü kullanarak hesaplanabilmesi için gerilme konsantrasyonu (K_{Toplam}) eşitliği sunulmuştur. Bu eşitliği doğrulamak amacıyla farklı kafes yapılar için D. Zhao vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bu çalışmada sunulan yöntem ile nümerik olarak zlm ve yöntemin doğrulandığı gösterilmiştir. Son bölüm olan altıncı bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çalışma sonlandırılmıştır.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Eklemeli İmalat

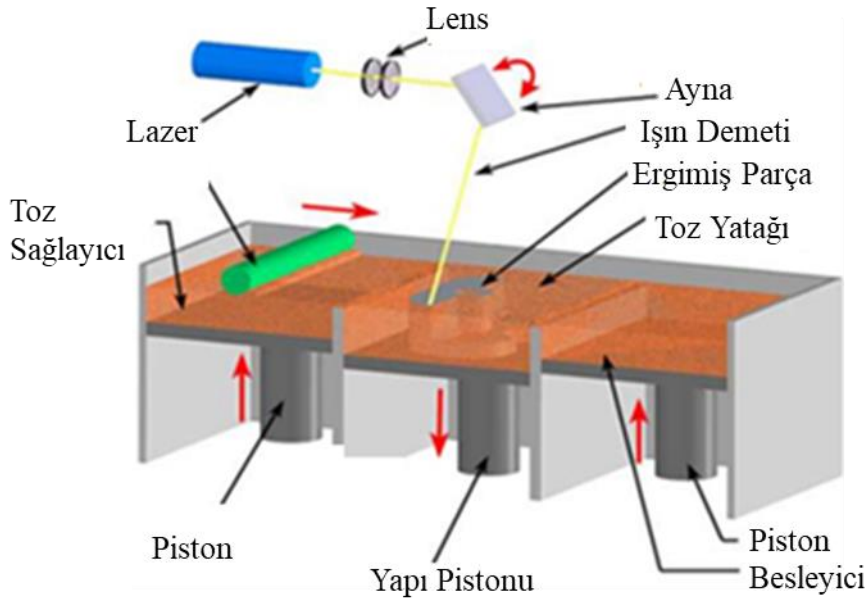
Eklemeli imalat yöntemleri, bir parçanın bilgisayarlı programlama yardımı ile katmanlar halinde örülerek 3 boyutlu geometrilerin elde edilebileceği bir üretim yöntemidir. Bu imalat yöntemleri 40 yıla yakın zamandır üzerinde çalışılarak günümüze kadar gelişim göstermiş ve ana imalat prosesleri arasında yerini almaya başlamış proseslerdir (Huang vd., 2013). Eklemeli imalat yöntemleri günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarına örnek olarak; medikal uygulamalar, havacılık ve otomobil endüstrileri, inşaat, kültürel miras ve hatta moda uygulamaları bile örnek gösterilebilir (Achillas vd., 2017). Geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında; tek bir makine ile kompleks parça imalatı sağlanması, hızlı prototipleme kabiliyeti ve esnek imalat olanağı sağlanması eklemeli imalat yöntemlerinin üstünlüklerini ortaya koymaktadır (Pereira vd., 2019). Ayrıca, standart imalat yöntemlerine göre düşük yatırım maliyeti gerektiren, benzer bir parçanın imalatı için daha az enerji sarfiyatı sağlayan ve geleceği büyük tehdit altına alan karbon ayak izi açısından güvenilir yani daha düşük seviyede sera gazı yayılımı ile üretim sağlayan proseslerdir (Frazier, 2014).

Eklemeli imalat proseslerinin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar; yüksek üretim ve malzeme maliyetleri, proses sonrası ilave operasyon ihtiyacı, parça inşa süreleri ve özellikle üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinin geliştirilmeye ihtiyaç duyulması olarak ortaya konmuştur (Costabile vd., 2016). Bu dezavantajların üstesinden gelmek adına özellikle üzerine yoğunlaşmış ve son yıllarda çok fazla araştırma yapılan SLE üretim metodunda (Seharing vd., 2020); üretilmiş parçanın mekanik özelliklerini etkileyecek 50'den fazla girdi parametresi üzerinde çalışmalar devam etmekte olup, bu yönde geliştirilen birçok yöntem karşın halen bir standardizasyon oluşturma ihtiyacı mevcuttur (Spears ve Gold, 2016). Hem mekanik özellikleri tespit etmek, iyileştirmek ve standardize etmek hem de proses parametrelerini optimize etmek için son zamanlarda birçok

araştırmacının odak noktası olan SLE prosesi (Zhang vd., 2013), bu tez çalışmasında da odak noktası olup SLE prosesi ile üretilmiş kafes yapılı malzemelerde dinamik yükler altında mekanik davranış özellikleri incelenmiştir.

2.1.1 Seçmeli lazer ergitme (SLE)

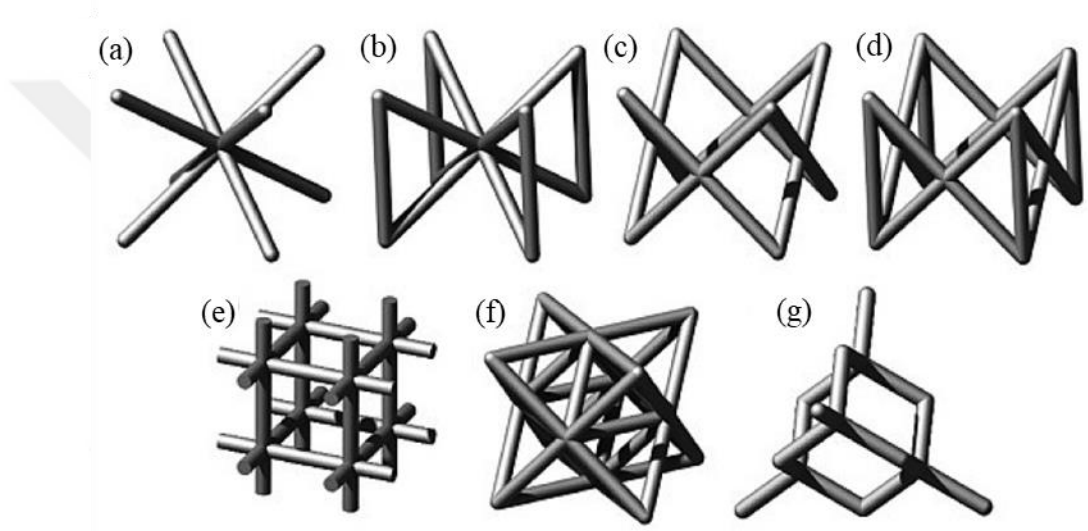
SLE prosesi hareketli bir lazer ışın demeti sayesinde tabla üzerine serili seçilmiş toz partikülleri ya da tanecikleri eritilerek ardışık kesitler halinde 3 boyutlu bir parçanın ilk katmanını oluşturması, sonrasında hareketli tablanın bir adım aşağı yönde ilerlemesi (bkz. Şekil 2.1) ve toz yataklarındaki tablaların bir adım yukarı çıkması ile oluşan kot farkının merdane vasıtası ile dağıtılmasının ardından lazer ışık demetinin bir sonraki katmanı eritmesi ile 3 boyutlu parça üretim tekniğidir. Bu işlem sırasında 3 boyutlu parça üretilirken, üretilmek istenilen geometriye göre parça yukarıda bahsi geçen katmanlar halinde adım adım inşa edilir (Belle vd., 2013). SLE prosesi üretim tekniği olarak hem serbest yüzey formlu karmaşık geometrilerin üretimi hem de yüksek çözünürlükte sık unsur barındıran kafes yapılı malzemelerin üretimini gerçekleştirme açısından olağan üstü bir potansiyele sahip olduğundan son zamanlarda araştırmacılar bu üretim tekniği ile periyodik gözenekli parçaların üretimine yoğunlaşmışlardır (Yan vd., 2012). Bu çalışmada da SLE prosesi ile üretilmiş kafes yapılarına odaklanılacaktır.



Şekil 2.1: SLE prosesinin şematik gösterimi (Belle vd., 2013).

2.1.2 Kafes yapılar

Genel olarak bilinen kafes yapıları malzemelerin geometrileri Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Burada gösterilen (a) hacim merkezli kübik (HMK), (b) dikey Z ekseninde çubuklarla desteklenmiş HMK (HMKZ), (c) yüzey merkezli kübik (YMK), (d) dikey Z ekseninde çubuklarla desteklenmiş YMK (YMKZ), (e) basit kübik (BK), (f) Oktet (Octet), (g) Elmas (Diamond) kafes türlerini temsil etmektedir. Bu geometrilerden oluşan parçaların ortak özelliği; hücresel olarak tasarlanan Şekil 2.2’deki geometrilerin düzenli bir şekilde tekrarlı işlenmesinden meydana gelmesidir (Maconachie vd., 2019).

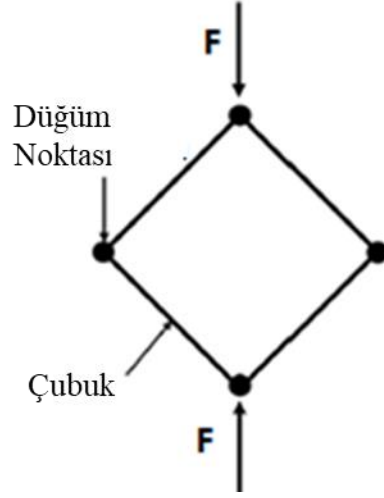


Şekil 2.2: Örnek kafes yapıları; (a)HMK, (b) HMKZ, (c) YMK, (d) YMKZ, (e) BK, (f) Oktet ve (g) elmas (Maconachie vd., 2019).

Kafes yapılarda geometrik farklılıkların oluşma sebebi; bu yapıların eğmeye karşı ya da germeye karşı dayanım sağlaması amacıyla tasarlanmalarına bağlıdır (Ashby, 2006). Bu geometriler incelendiğinde, eğme ve germe olarak tanımlanan iki hasar mekanizmasının Şekil 2.3’de gösterilen uygulanan yük (F) altındaki kafes yapının düğüm sayısına (s) ve çubuk sayısına (n_d) bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Eş. (2.1) ve Eş. (2.2) ile belirtilen Maxwell kriterine (M_n) göre Tan vd. (2017) kafes yapıları şu şekilde sınıflandırılmıştır; Eğer $M_n < 0$ ise eğilme dominant yapılar (bending dominated), eğer $M_n = 0$ ise germeye karşı dominant yapılar (stretching dominated) ve $M_n > 0$ ise bu tür yapılar aşırı rijit (over stiff) olarak sınıflandırılıp; statik olarak belirsiz yapılar olduğu ortaya konulmuştur.

$$M_n = s - 2n_d + 3 \text{ (2B (iki boyutlu) yapılarda)} \quad (2.1)$$

$$M_n = s - 3n_d + 6 \quad (3B \text{ (üç boyutlu) yapılarda)} \quad (2.2)$$



Şekil 2.3: Kafes yapılarda çubuk ve düğüm nokta sayısı (Ashby, 2006).

Kafes yapı malzemelerin, mekanik özelliklerinin tespiti için iki farklı analitik modelden birincisi Gibson vd. (1999) tarafından Ashby-Gibson model ve ikincisi Zhu vd. (1997) tarafından Zhu model olarak ortaya konulmuştur. Bu modellerin birbirinden farkı ise Ashby-Gibson modelinde hücre şekli, ölçüsü, köşe formu ve yüzeysel süreklilik gibi parametrelerin göz ardı edilmiş olmasıdır.

Kafes yapı malzemelerin statik yük altındaki mekanik özellikleri ve performansları hakkında birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar Maconachie vd. (2019) tarafından derlenerek bir veri seti oluşturulmuştur. Yine bu yapıların kırılma mekaniği ve sürekli ortamlar mekaniğine dair özellikleri son zamanların önemli araştırma konuları arasında yer almış ve bu alanda uzun bir yol kat edilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar, Quintana (2009) tarafından derlenerek literatüre sunulmuştur.

Araştırmalara bakıldığında da anlaşılacağı üzere son zamanlarda eklemeli imalat yöntemleri çok önemli bir odak noktası olmuş, ayrıca bu teknik ile üretilmiş malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerine dair ciddi bir veri tabanı oluşturulmuştur. Fakat eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş malzemelerin dinamik yük altındaki davranışları bir diğer ifade ile yorulma ömrü henüz net bir şekilde ortaya konulamamıştır. Çünkü kafes yapı malzemelerin yorulma ömrünün belirleneceği sistematik bir çalışmada; yorulma ömrünü etkileyen çok fazla sayıda bağımsız değişken (ör. yüzey faktörü, kesit ölçüsü değişimi, çentik etkisi, imalat yöntemi, örme yönü, örme hızı vb.) olmasından dolayı yapılacak test sayısı artmakta bu durumda da test süreleri çok uzun zaman almaktadır. Özellikle eklemeli imalat ile üretilen kafes

yapıların yorulma davranışı üzerine literatürde çalışmalar bulunsa da ömür hesaplama konusunda araştırılmaya ihtiyaç duyulan birçok konu mevcuttur. Bu nedenle, bu çalışmada eklemeli imalat yöntemleri ile elde edilmiş kafes yapılarında yorulma ömrü tespitine odaklanılmıştır.

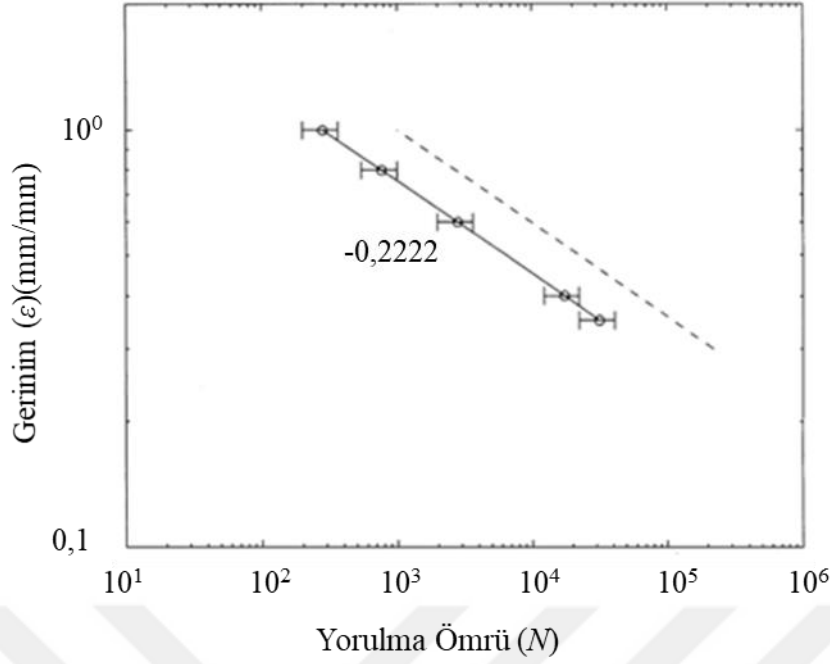
2.1.3 Kafes yapılarda yorulma ömrü

Kafes yapıların ömür tespiti amacıyla literatürde yürütülen deneysel, nümerik ve karşılaştırmalı çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar genel olarak bu üç kategoride özetlenmiş ve literatürde bu alanlardaki eksikler sonuç olarak sunulmuştur.

2.1.3.1 Kafes yapılarda yorulma ömrünün nümerik yöntemler ile tayini

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş kafes yapılı malzemelerin nümerik yöntemler ile yorulma ömrü tayini için öncelikle statik yük altındaki davranışlarının tespitine ihtiyaç duyulmaktadır. Belirli bir yükleme altında malzemede meydana gelen gerilme geçmişi, dinamik analizlere aktarılarak tekrarlı yük sonucu malzemenin davranışı tespit edilmeye çalışılır. Bu amaç doğrultusunda literatürde yapılan sadece kafes yapılara özgün nümerik ömür tayini çalışmaları bu bölümde aktarılmıştır.

Schaffner vd. (2000) çalışmasında trabeküler kemik yapısının yorulma ömrünü modellemek için meydana getireceği iki boyutlu (2B) voronoi altıgen bal peteği geometrisinin SE yöntemi ile analizini gerçekleştirmiştir. Burada kullandığı yöntem, Makiyama vd. (2002) tarafından ömür hesaplamalarında kullanılan lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ile aynı olup sadece yorulma ömrünün tamamlandığı sınırı elastik modülün (E) %5'e düştüğü nokta olarak belirlemiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürden alınan (X. D. E. Guo vd., 1994) sonuçlar ile karşılaştırmış ve Şekil 2.4'da gösterildiği gibi gerinim değerinin değişimine bağlı ömür sonuçları olarak sunulmuştur. Schaffner vd. (2000) tarafından elde edilen sonuçlara göre aynı gerinime maruz kalan trabeküler kemik yapısının yorulma ömrünün daha düşük olacağı görülmektedir.

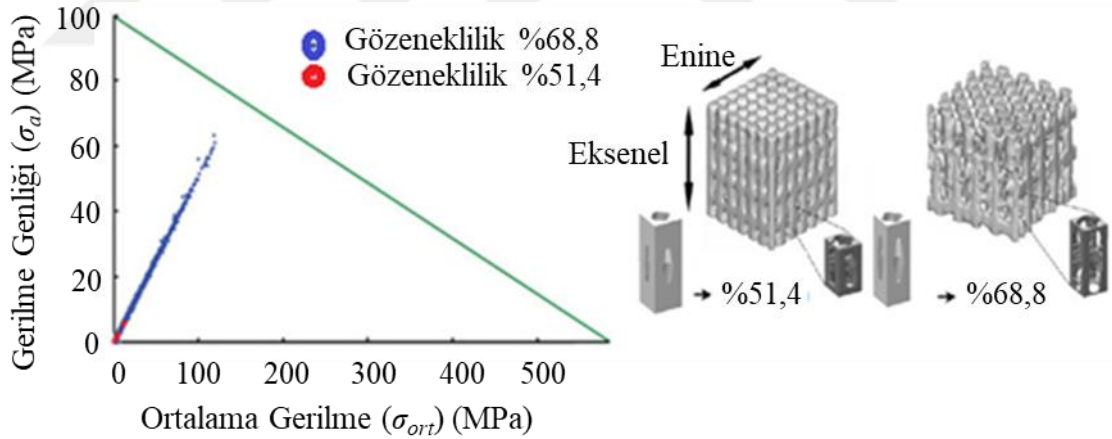


Şekil 2.4: Trabeküler kemiğinin karşılaştırmalı yorulma ömür sonuçları; düz çizgi (Schaffner vd., 2000), kesikli çizgi (X. D. E. Guo vd., 1994).

Makiyama vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın esas amacı; voronoi geometrili kafes yapılarında uygulanan gerilme genliğinin, göreceli yoğunluğun, başlangıç çatlak boyutunun ve şeklinin, hücre geometrisinin yorulma ömrüne etkisini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, osteoporotik trabeküler kemiklerinin yorulma ömrünü tayin etmek amacıyla voronoi geometrili bir kafes yapının LEKM tabanlı nümerik analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu nümerik analiz metodunun çalışma prensibi adım adım şöyledir; önce statik analiz sonucundan her bir çubuk yapısının üzerinde meydana gelen gerilme ve gerinim değerleri hesaplanır. Bu değerlerden yola çıkarak her bir çubuk için yine gerilme konsantrasyon faktörü hesaplanır. Daha sonrasında çatlak başlangıcının meydana geleceği tahmin edilen noktaya temsili bir çatlak oluşturulur ve LEKM yöntemi kullanılarak (Paris law) çatlağın ilerlemesi modellenir. Bu ilerleme sonucu bir çubuğun kırılması için gerekli yorulma ömrü sayısı hesaplanır ve kopma durumundan sonra o çubuk silinerek bir sonraki hasarlanmanın başlayacağı çubuk tespit edilir. Sonrasında yine aynı işlemler ile çatlak ilerlemesi ve çubuğun kopması için gerekli yorulma ömrü sayısı hesaplanır. Bu işlemler, yapının yük taşıyamaz (tokluk değerinin %90 düşmesi) hale gelmesi durumuna kadar tekrarlanır ve toplam çevrim sayısından yapının yorulma ömrü tespit edilir. Bu yöntem ile gerçekleştirilen çalışmada, voronoi yapısının yorulma ömrünü en çok etkileyen fenomenlerin başlangıç çatlak boyutu ve göreceli yoğunluk (ρ^*) olduğu ortaya

konulmuştur. Göreceli yoğunluk (ρ^*), periyodik bir kafes yapı hücresinde kafes yapısını oluştururken katı kütle yoğunluğunun (ρ), hücrenin tamamı dolu iken elde edilen toplam katı kütle yoğunluğuna (ρ_0) oranı olarak tanımlanmaktadır.

Ryan vd. (2009) malzemesi titanyum olan Şekil 2.5'te gösterilen iki farklı gözeneklilik oranı ile oluşturulan kafes yapıların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla deneysel ve nümerik çalışma yürütmüştür. Gözeneklilik tanımı, göreceli yoğunluk tanımının tersi olup, kafes yapı hücresi içinde bulunan boşluk yoğunluğunun hücrenin toplam katı kütle yoğunluğuna (ρ_0) oranı ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, kafes yapıların statik özelliklerin yanı sıra dinamik yük altındaki davranışını diğer bir ifade ile yorulma ömrünü de nümerik analiz yöntemi ile incelemiştir. Burada kafes yapının değişken yükleme altında modifiye Goodman ortalama gerilme değerlendirmesine göre malzemenin dinamik yük altındaki davranışının güvenli tarafta kalıp kalmayacağı Şekil 2.5'deki "Haigh diyagramı" çizilerek incelenmiştir. Bu çalışmadaki nümerik analizler sonucunda parçanın belirtilen yükleme altındaki yorulma ömrü ise Şekil 2.5'de gösterilen üçgen içerisinde kaldığı için 10^7 yorulma ömrü sayısı üstünde belirtilen yüke dayanacağı ortaya konmuştur.



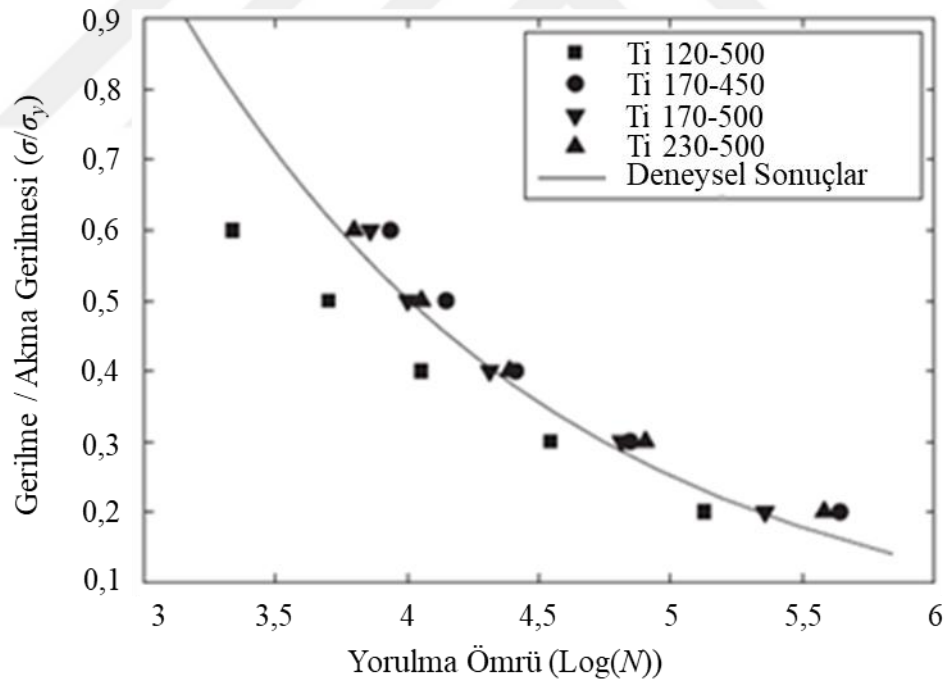
Şekil 2.5: Sinterlenmiş titanyum kafes yapının modifiye Goodman diyagramı Ryan vd. (2009).

Jamshidinia vd. (2013) dış uygulamalarında sıkça kullanılan, malzemesi Ti6Al4V olan elektron ışınli ergitme (EIE) (elektron beam melting) metodu ile üretilmiş ve düzgün sekizyüzlü geometriye sahip kafes yapıların akma noktası altında maruz kaldığı gerilmelerde bile hasarlanmasına sebep olacak, dinamik yüklere karşı malzemenin yorulma ömrünü hem deneysel (devam etmektedir) hem de nümerik hesaplamıştır. Buradaki amaç yükleme kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini görmektir.

Teorik hesaplamalar için Ansys WorkBench simülasyon programı kullanılmış ve bu programda gerilme tabanlı hesaplama yapılmıştır. Ansys programında otomatik gerilme tabanlı hesaplama yaparken Goodman ortalama gerilme teorisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaları devam etse de çalışmalarında sekizyüzlü kafes yapılı ve ucu yarım küresel hale getirilmiş numune 30° açılı tutularak yükleme yapılmış ve ISO 17801’de belirtilen en zorlayıcı şartlar altındaki ömrü tayin edilmek istenmektedir. Bu yüklemede, gerilme oranı $R=0,1$ basma-basma olacak şekilde ve maksimum 15 Hz yükleme hızında numuneler test edilmektedir. Deneysel çalışmalar henüz tamamlanmamış olsa da teorik sonuçlar incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerinin yorulma ömrüne etkisinin çok fazla olduğunu göstermiştir. Burada yüzey faktörü 0,81 değerinden 0,85 değerine çıktığında yorulma ömrünün 100 kat arttığını, fakat 0,85 değerinin üstünde ise katlanarak artış gösterdiğini öne sürmüştür.

Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) çalışmasında, SLE ile üretilmiş ve malzemesi Ti6Al4V olan EDOY geometrili kafes yapılarının yorulma ömrünün nümerik olarak hesaplanması için gerilme tabanlı yorulma analizi gerçekleştirmiştir. Buradaki gerilme tabanlı yorulma ömrü hesaplama algoritmasının arka planındaki hesaplama yöntemi şöyledir; ilk olarak Ansys programı ile kafes yapının yarı-statik analizleri gerçekleştirilir. Bu analizde, kafes yapı iki plaka arasında basma yüküne maruz bırakılarak, sabit plaka üzerinde meydana gelen tepki kuvveti ölçülür. Bu yük malzemenin kesit alanına bölünerek o malzemenin gerilme-gerinim eğrisi elde edilir. Bu eğriye göre kafes yapının akma noktasına erişmesini sağlayacak gerilme değerinden başlanılarak yorulma ömrü belirlenmeye başlanır. Sonrasında malzemede meydana gelecek gerilme değeri düşürülerek tekrar yorulma ömrü belirlenir ta ki yorulma dayanım limiti noktasına gelene kadar bu yük azaltılarak ömür belirleme işlemi yapılır. Yorulma ömrünü belirlerken ise malzemenin her bir düğüm noktasındaki eğilme ve aksenal gerilme değerleri alınır. Bu gerilme değerlerinin mutlak değeri alınarak yapıyı oluşturan her bir çubuğun yüzeyindeki 2 yönlü gerilme değerleri elde edilmiş olur. Gerilme konsantrasyon sabiti hesaba katılarak değerlendirilmeye devam edilir ve anlık gerilme değerinin meydana getirdiği hasar değeri belirlenir. Sonrasında her bir çevrim için meydana gelen hasar hesaplanmaya başlanır ve toplam hasar (Miner’s rule) bir olana kadar geçen yorulma ömür sayısı sayılır. Toplam hasar biri geçtiğinde bu hasarın meydana geldiği çubuk silinir ve elastik modül hesaplanır. Bu elastik modül başlangıç seviyesine göre %90 azalana

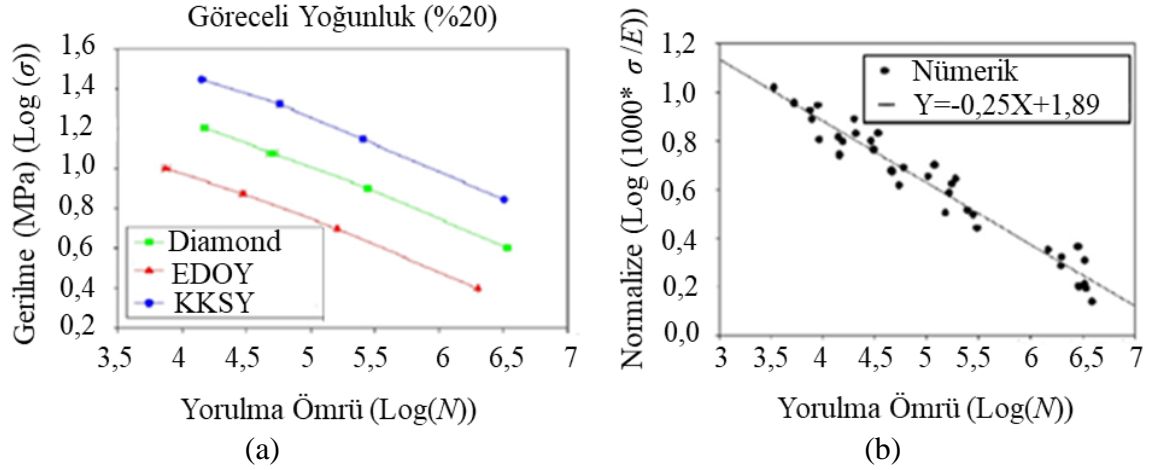
kadar çubuklar silinmeye devam edilir. Belirtilen değere eriştiğinde de toplam ömür değeri elde edilmiş olur. Bu çalışmada ortaya konulan algoritmayı doğrulamak için, dört farklı göreceli yoğunluk ile modellenen kafes yapı modellerinin yorulma ömür analizi sonuçları, Amin Yavari vd. (2013) tarafından elde edilen test sonuçları ile Şekil 2.6'da gösterildiği gibi karşılaştırmıştır. Bu testler 15Hz yükleme hızında ve gerilme oranı $R=0,1$ olacak şekilde basma-basma yük çevrimi ile gerçekleştirmiştir. Şekil 2.6'da verilen sonuçlarda, farklı göreceli yoğunluklardaki EDOY kafes yapılar, çubuk çapı ve kafes yapıdaki boşluk değerleri değiştirilerek elde edildiğinden bu iki değer belirtilmesi ile tanımlanmışlardır. Bu tanımlarda, Ti ifadesi Ti6Al4V malzemesini, ilk sayılar olan 120, 170, 170 ve 230 değerleri mikrometre cinsinden kafes yapıyı oluşturan çubukların çaplarını, ikinci sayılar olan 500, 450, 500 ve 500 ise kafes yapıdaki boşluk çapının mikrometre cinsinden değerini belirtmektedir. Bu çalışmada, gerilme değerinin yüksek olduğu durumlarda deneysel veri ile analiz sonuçları arasında göreceli sapma olduğu fakat gerilme değerinin düşük olduğu durumlarda iyi bir korelasyon sağladığını Şekil 2.6'da göstermiştir.



Şekil 2.6: Dört farklı göreceli yoğunlukta EDOY yorulma ömrü analiz sonuçları ve deneysel sonuç karşılaştırması (Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd., 2016).

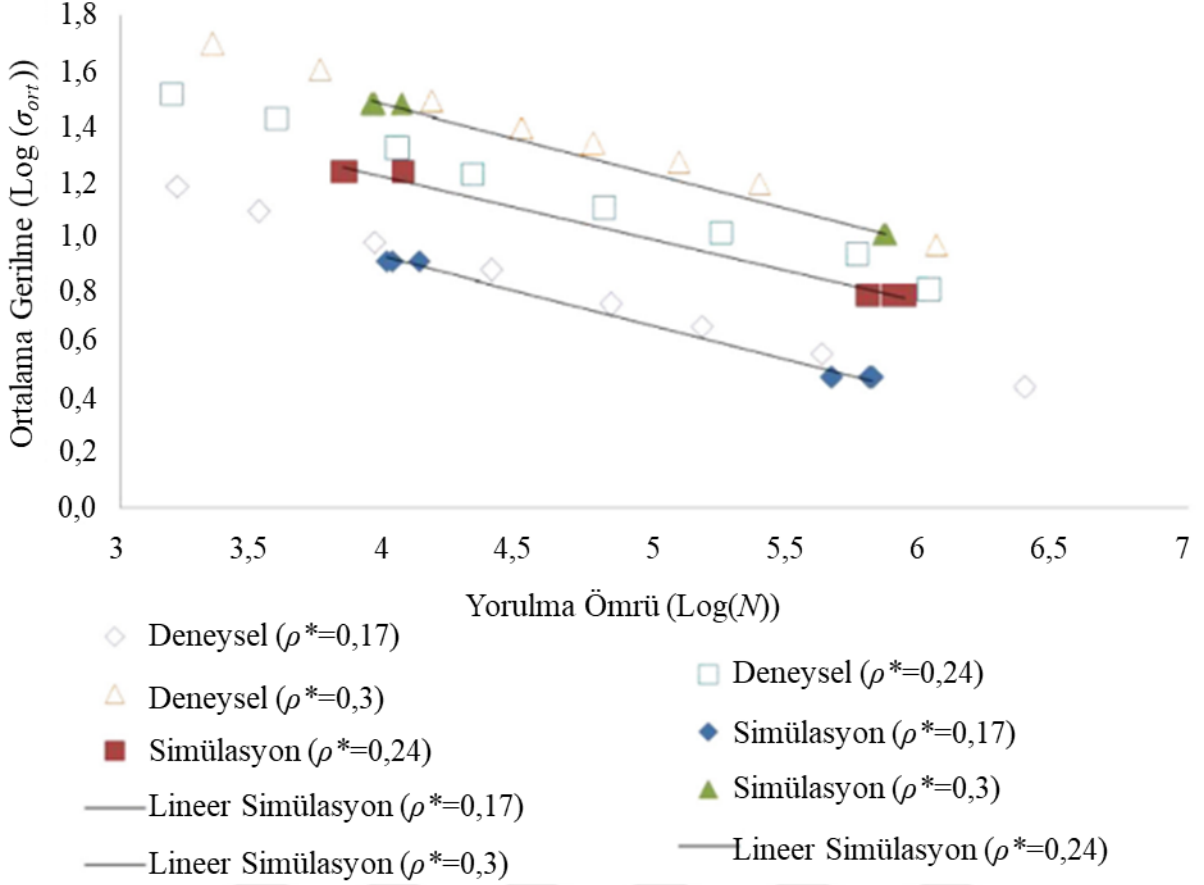
Zargarian vd. (2016) EIE ve SLE ile üretilmiş elmas, EDOY ve Kesilmiş Küp Sekizyüzlü (KKSŞ) (Truncated cuboctahedron) hücre geometriye sahip kafes yapıların sonlu elemanlar (SE) yöntemini kullanan Ansys programı ile yorulma ömrü

analizi hesaplaması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmanın SE analizlerinde gerilme ömrü yaklaşımı kullanmıştır. Yorulma simülasyonlarında Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) ile benzer yöntemi kullanmış fakat yorulma ömrünü çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve kırılması olarak üç ayrı aşamada incelemiştir. Bu yöntemde sırasıyla; birim hücreye gerilme uygulanır, Basquin's law (gerilme tabanlı yorulma ömrü) ve Soderberg ortalama gerilme teoremine göre çatlak başlangıç çevrim sayısı hesaplanır. Burada çatlak başlangıcının olduğu an ise Basquin's denkleminde hesaplanan her bir çevrimde meydana gelen lokal hasarların toplamının (Miner's rule) 1 olduğu durum olarak belirlenmiştir. Çatlağın başladığı çubuk için ayrı bir çatlak ilerleme analizi koşturulur. Sonrasında kalan diğer çubukların arda kalan ömürleri tespit edilir ve çatlak meydana gelene kadar analiz devam ettirilir. En son hücre rijitliğinin aniden değiştiği nokta o hücrenin yorulma ömrü sayısı olarak kaydedilir. Bu çalışmada üç farklı kafes yapı için elde edilen yorulma ömrü (N) simülasyon sonuçları, bu sonuçlara karşılık gelen gerilme (σ) değerleri için logaritmik olarak çizdirilmesi ile oluşan yorulma ömür eğrileri (S-N eğrileri olarak da tanımlanır) Şekil 2.7(a)'da verilmiştir. Bu eğrilere göre, göreceli yoğunluğun 0,2 olduğu durumda, KKSŞ yapısının en yüksek yorulma ömrüne EDOY yapısının ise en düşük yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Bu sonucun geometri ile ilişkilendirilmesi durumunda çubuk yarıçapı (r) ile çubuk boyu (l) arasındaki r/l oranının yüksek olduğu durumda yorulma ömrünün de yüksek olması gerektiği kanısına varılmıştır. Çünkü yüksek r/l oranı yüksek eylemsizlik demek ve bu da yük altında çubuğun daha düşük sehime maruz kalacağını ifade etmektedir. Bu çalışmadan çıkarılan diğer sonuç ise, Şekil 2.7(b)'de gösterildiği gibi üç farklı kafes yapı için gerilme (σ) değerleri, malzemenin elastik modülü (E) ile normalize edilerek çizdirildiğinde, yorulma ömrü ile normalize gerilme değeri arasında kafes yapı türünden bağımsız olarak genel bir ilişki oluşturulabilmesidir. Ek olarak, bu çalışmada, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için literatürden Amin Yavari vd. (2015); Hrabe vd. (2011); Li vd. (2012) tarafından elde edilen yorulma ömrü sonuçları ile karşılaştırma yapmıştır. Hrabe vd. (2011) deneysel yorulma ömrü tayini testlerinde 15 Hz frekans ve gerilme oranı 0,1 olacak şekilde basma-basma testleri kullanırken, Li vd. (2012) 15 Hz frekans ve gerilme oranı 0,1 ile testleri yürütmüş ve Amin Yavari vd. (2015) 15 Hz frekans ve gerilme oranı 0,1 olacak şekilde testlerini tamamlamıştır. Ayrıca bu çalışmada elde ettiği sonuçlardan yorulma kırılmasının yüklemeye 45^0 derece açı ile gerçekleştiği ortaya koyulmuştur.



Şekil 2.7: SE yöntemi ile elde edilen yorulma ömrü sonuçları (Zargarian vd., 2016) (a) Üç farklı kafes yapı için gerilme-ömür sonuçlarının logaritmik grafiği (b) Tüm değerlerin normalize edilerek elde edilen yorulma ömür eğrisi.

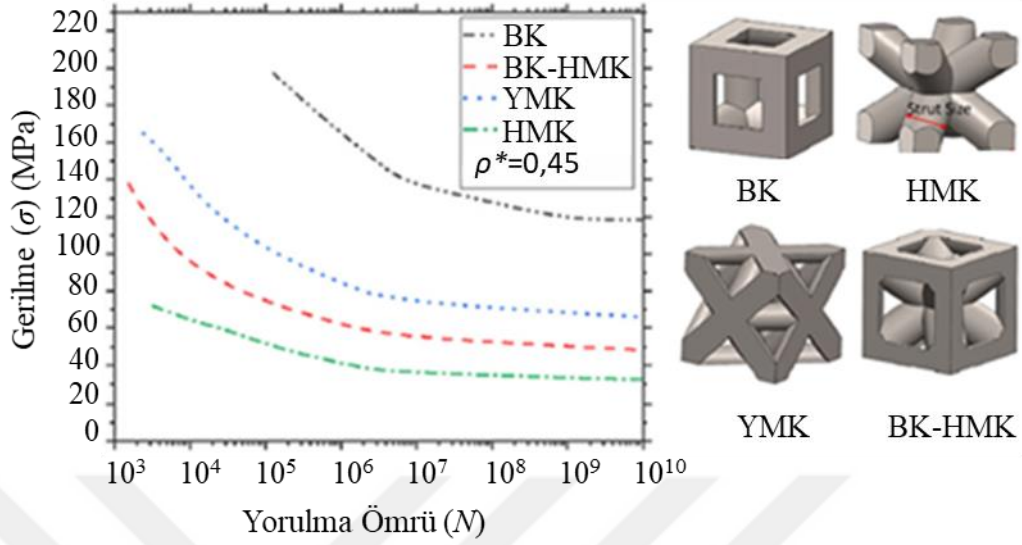
Zargarian vd. (2019) çalışmasında, EIE eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş malzemesi titanyum olan elmas, EDOY, KKSJ, kelvin geometrili kafes yapılarında yorulma ömrünü etkileyen faktörleri sonlu elemanlar analizi (Ansys) ile inceleyerek, literatürden elde ettiği deneysel yöntem ile karşılaştırmıştır. SE analiz çalışmalarında olaya dayalı (event-based) yorulma algoritması ile Soderberg ortalama-gerilme teorisini kullanarak yüksek çevrimli ömür değerlendirmesi yapmıştır. Bu çalışmada nümerik ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen nümerik analiz yöntemi Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen gerilme tabanlı ömür hesaplama yöntemi ile aynıdır. Bu yöntemde; kafes yapıya etkileyen ortalama gerilme baz alınarak Basquin’s kuralı ve soderberg ortalama gerilme teorisine göre her bir çevrimde meydana gelen hasar hesaplanır. Bu hasarlar Miner’s kuralına göre toplanarak gider. Bu birikimli hasar hesaplama işlemi kafes yapının rijitlik veya elastikiyet modülü %90 oranında azalana kadar çevrimsel olarak devam ettirilir ve hasar 1’e eşit olduğunda yükleme çevrimi durdurularak yorulma ömrü hesaplanmış olur.



Şekil 2.8: Elmas kafes yapı deneysel (Amin Yavari vd., 2015) ve nümerik (Zargarian vd., 2019) yorulma ömrü karşılaştırması.

Peng vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, kafes yapıların hem statik hem de dinamik yük altındaki mekanik özelliklerini tayin etmek için Abaqus programında sonlu elemanlar yöntemi ile yarı-statik ve dinamik analizler yürütmüştür. Bu çalışmada, malzemesi Ti6Al4V olan BK, HMK, YMK ve BK-HMK kafes yapılarının SE ile yorulma ömrü tayini fe-safe programı yardımıyla Brown-Miller yöntemini kullanarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 2.9'da sunulmuştur. Bu çalışmada, Ti6Al4V malzemesinden yapılmış kafes yapıların yorulma analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli köpek kemiği şeklindeki numuneden elde edilebilecek gerinim ömür parametreleri Edwards vd. (2013); Edwards ve Ramulu (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan alınmıştır. Fakat bu çalışmada Şekil 2.9'de gösterilen grafikte elde edilen yorulma ömür eğrilerinin deneysel doğrulanması gerçekleştirilmemesi, çalışmanın önemli bir eksikliğidir. Buna bağlı olarak simülasyonlarla belirlenen ömür verisi aslında sadece mükemmel bir geometri için belirlenmiş yorulma ömrünü göstermekte ve yorulma ömrünü etkileyecek örneğin

parçanın yüzey pürüzlülüğü, üretim kaynaklı hataları ve parçanın işleme yönü gibi tüm verileri göz ardı ederek tayin edilmiş olmaktadır.



Şekil 2.9: Kafes yapıların yorulma ömrü karşılaştırması (Peng vd., 2020).

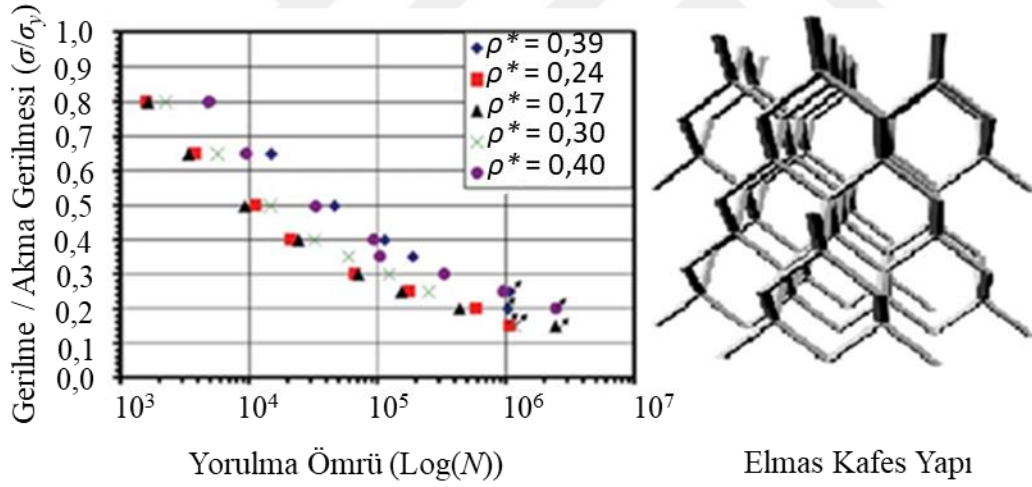
Bu kısımda bahsedilmiş tüm çalışmalar nümerik olarak incelenmiş fakat genel olarak gerilme tabanlı hesaplamalar içermektedir. Malzemelerin DÇY ömrü bölgesindeki yorulma davranışlarını incelemek için ise gerinim tabanlı yaklaşımların uygulanması gerektiği bilinmektedir. Bu çalışmalardan yalnızca Peng vd. (2020) gerinim tabanlı bir çözüm yapmış fakat bu çalışmanın da eksiği deneysel bir sonuçla karşılaştırma yapılmamış olmasıdır. Burada karşılaştırma yapıldığında, yüzey kusurlarının yorulma ömrüne etkisi dikkate alınmadığı için elde edilen nümerik sonuçların deneysel sonuçlar ile farklılık göstereceği öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Peng vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen gerinim tabanlı hesaplama yöntemi olan Brown-Miller ile kafes yapının yorulma ömrü analiz edilmiştir. Tezin özgün değeri olarak ise parçalarda meydana gelebilecek üretim kaynaklı kusurların dikkate alınması amacıyla bir gerilme konsantrasyon katsayısının hesaplanmış olması ve yorulma ömrünün bu gerilme konsantrasyonu sayesinde tespit edilmiş olmasıdır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, literatürdeki EDOY kafes yapı için verilen deneysel yorulma ömrü sonuçları ile doğrulanmış ve farklı kafes yapıları (sekizyüzlü ve dörtyüzlü) için aynı yöntemler kullanılarak elde edilen yorulma ömrü eğrileri sunulmuştur.

2.1.3.2 Kafes yapılarda yorulma ömrünün deneysel yöntemler ile tayini

Eklemeli imalat yöntemleri ile imal edilen kafes yapılarının yorulma ömrü tayini sırasında belirli bir yük baz alınarak ve bu yük tekrarlı bir şekilde test cihazına yerleştirilmiş numuneye uygulanarak parçayı koparıncaya ya da elastik modülü ~%90 düşünceye kadar tekrarlanması ile gerçekleştirilmektedir. Bu testlerde uygulanan yükün çevrim sayısı yorulma ömrü olarak temel alınmaktadır. Literatürde bu kapsamda yapılan çalışmalar bu bölümde aktarılmıştır.

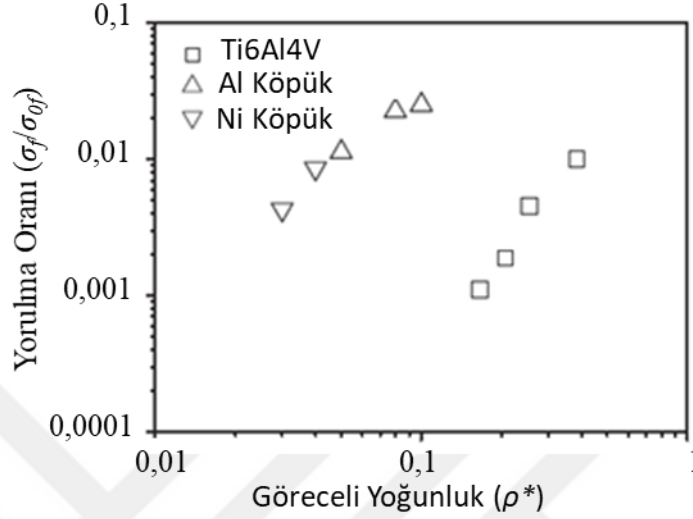
Hrabe vd. (2011) çalışmasında, EIE metodu ile üretilmiş elmas geometrili kafes yapı numunelerin yorulma ömrünü deneysel olarak belirlemek amacıyla gerilme oranı 0,1 ve yük uygulama hızı 15 Hz olan basma-basma yükü altında yorulma testi gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında Şekil 2.10'da görüldüğü gibi malzemenin yorulma ömrünün göreceli yoğunluk değeri ile doğru orantılı olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, bu çalışma sonucu kafes yapıdaki çubukların yüzey pürüzlülük değerlerinin yorulma ömrüne etkisinin çok önemli olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.10: Elmas kafes yapı, göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömrü sonuçları (Hrabe vd., 2011).

Li vd. (2012) küp geometrili malzemesi Ti6Al4V olan ve EIE ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömrünü tespit etmek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada her bir numune gerilme oranı 0,1 yük uygulama hızı ise 10 Hz olacak şekilde test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi BK geometrili kafes yapı için elde edilen yorulma oranı ile kafes yapının göreceli yoğunluk değişimi arasında Ashby-Gibson denklemi oryante edilerek korelasyon oluşturulmuş ve bu denklemdeki katsayı olan $n=0,27$ olduğu tespit edilmiştir. Bu

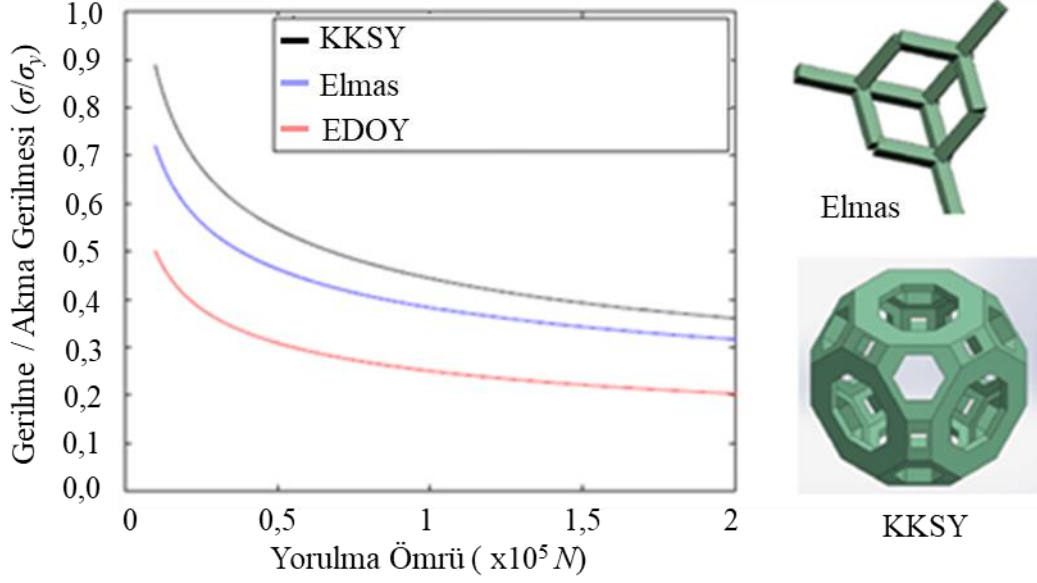
değer sayesinde farklı göreceli yoğunluk değerlerinde BK kafes yapılarının yorulma dayanım limit değeri Ashby-Gibson kullanılarak tespit edilebilecektir. Bu çalışmada kullanılan yorulma oranı ifadesi; kafes yapısının yorulma dayanım limitinin (σ_f), katı kütle yorulma dayanım limitine (σ_{of}) oranı olarak sunulmuştur.



Şekil 2.11: Farklı malzemelerden imal edilmiş BK kafes yapıların göreceli yoğunluk değişimine bağlı yorulma oranı değişimi (Li vd., 2012).

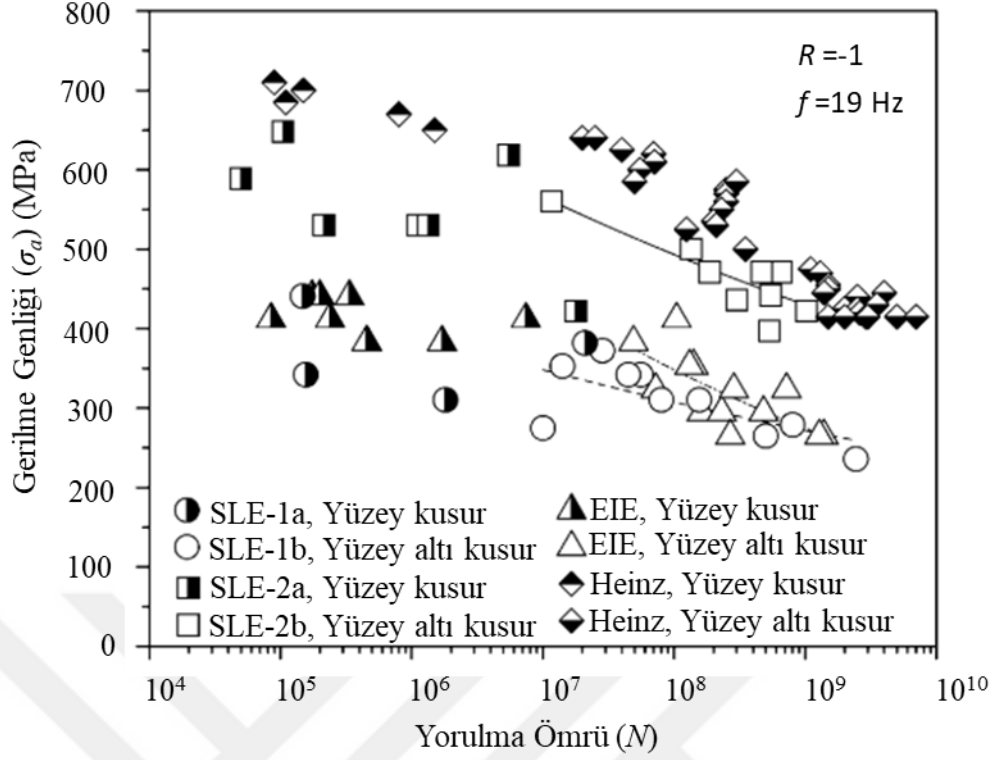
Amin Yavari vd. (2013), SLE eklemeli imalat yöntemi ile malzemesi Ti6Al4V olan EDOY kafes yapılı malzemeden 4 farklı göreceli yoğunluk oranına sahip numune üreterek, yorulma deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde basma-basma yük çevrimini, gerilme oranı 0,1 ve yükleme hızı 15 Hz olacak şekilde kullanmıştır. Bu deneylerin sonucunda, göreceli yoğunluk oranına bağlı ömür sonuçlarının değişimini incelemiş ve EDOY kafes yapının yorulma ömrünün, göreceli yoğunluktan bağımsız olacağı korelasyon katsayısını ortaya koymuştur.

Amin Yavari vd. (2015) SLE prosesi ile üretilmiş farklı göreceli yoğunluklarında, Ti6Al4V malzemelerinden üretilmiş elmas ve KKSİ birim hücrelerinin basma-basma yorulma ömrünü deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarını 25kN kapasiteli hidrolik test cihazı ile 15Hz basma hızı ve gerilme oranı 0,1 olacak şekilde tamamlamıştır. Bu çalışmasından, kafes yapılı malzemelerin yorulma ömrünün hücre topolojisine çok fazla bağımlı olduğu hatta göreceli yoğunluk oranına bağlı yorulma ömrünün aşırı değişkenlik gösterebileceğini öne sürmüştür. Bu yorulma ömrü test sonuçlarını eğriye oturtarak Şekil 2.12'deki gibi Amin Yavari vd. (2013) tarafından elde edilen EDOY kafes yapısının test sonuçları ile karşılaştırmalı sunmuştur.



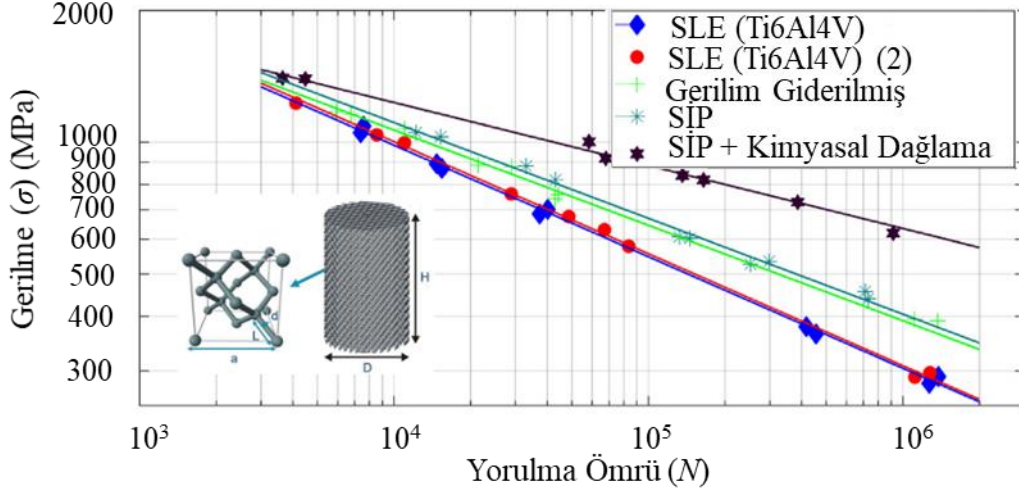
Şekil 2.12: Elmas, KKSU, ve EDOY birim hücrelerinin karşılaştırmalı yorulma ömür eğrisi (Amin Yavari vd., 2015).

Günther vd. (2017) çalışmalarında, EIE ve SLE ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan kafes yapıları malzemelerin yorulma ömrü farklarını ortaya koymak amacıyla deneysel çalışma yürütmüştür. Deneylerinde, servo-hidrolik bir test cihazında bas-çek (tam değişken yükleme) yorulma testini $R=-1$ ve 10 Hz yükleme hızını kullanarak gerçekleştirmiştir. Deney numunesi, klasik yorulma testlerinde kullanılan kemik şeklindeki geometridir. Sonuçlara göre SLE ve EIE ile üretilmiş kafes yapılarının ömür değerlerinin çok yakın olduğu, Şekil 2.13’de gösterildiği gibi ortaya konmuştur.



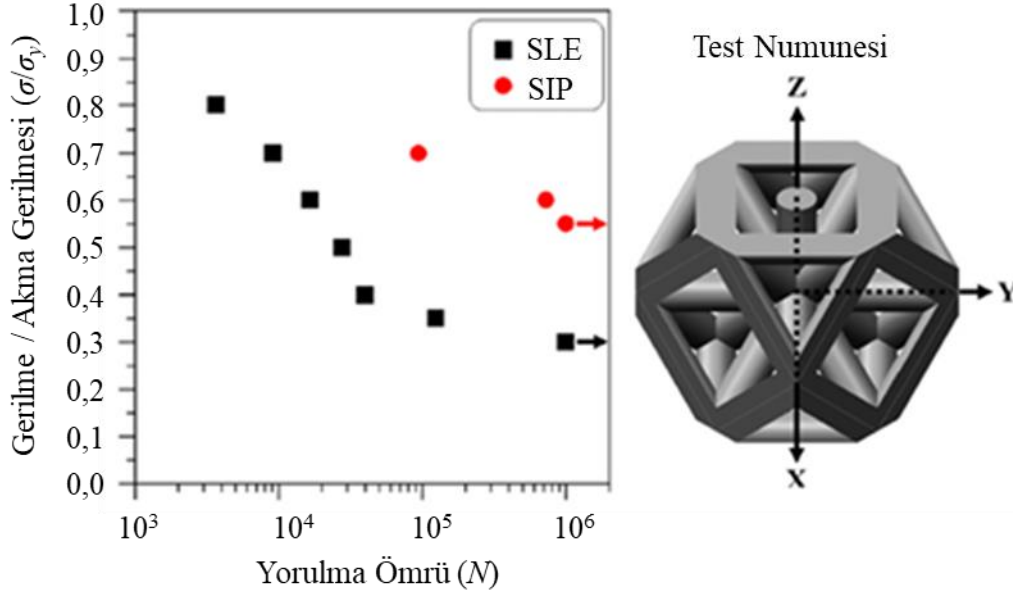
Şekil 2.13: EIE ve SLE ile üretilmiş test numunelerinin yorulma ömrü (Günther vd., 2017).

Van Hooreweder vd. (2017) malzemesi Ti6Al4V olan ve elmas tipi birim hücre geometrisine sahip SLE ile üretilmiş kafes yapıların, basma-basma yorulma testleri ile yorulma dayanım limiti tespiti üzerine çalışmıştır. Bu çalışmasında aynı, Wu vd. (2017) tarafından yürütülen çalışmada olduğu gibi üretim tekniklerinin yorulma ömrüne etkisini deneysel olarak incelemiş fakat testlerini basma hızı 15 Hz gerilme oranı 0,1 olacak şekilde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonuçları Şekil 2.14'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre SİP (sıcak izostatik presleme) (hot isostatic press) ve kimyasal dağlama prosesinin yorulma dayanım limitine olumlu yönde ve ciddi derecede etkisi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.14: Elmas kafes yapının üretim tekniklerine bağlı yorulma ömrü değişimi (Van Hooreweder vd., 2017).

Wu vd. (2017) kafes yapı malzemelerde gözeneklilik etkisinden dolayı yorulma ömürlerinin düşük olmasını vurgulayarak SİP tekniği ile bu gözeneklilik oranının azaltılması ve yorulma ömrünün artırılması için Şekil 2.15’de gösterilen kafes yapı geometrisi üzerinde çalışmış ve deneysel çalışmaları sonucunda ömür artışının olduğunu Şekil 2.15 göstermiştir. Deneysel çalışmalarını; ASTM E466 standardını kullanarak sinüs dalgalı basma-basma yük çevrimi ile yükleme gerilme oranı 0,1 ve yükleme hızı 10 Hz olacak şekilde gerçekleştirmiştir.

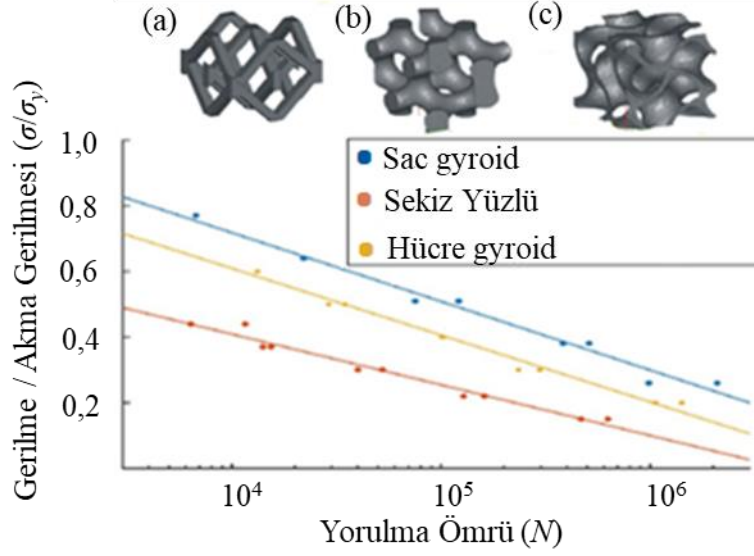


Şekil 2.15: SLE ve HIP tekniği ile üretilmiş kafes yapılarında yorulma ömrü (Wu vd., 2017)

Zhao vd. (2016) EIE metodu ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan BK, EDOY ve gyroid kafes yapılarının karşılaştırmalı yorulma ömrü tespitini yaparak, geometrinin yorulma üzerine etkisini araştırmıştır. Yorulma analiz çalışmalarını deneysel yürütmüş ve bu deneylerinde gerilme oranı 0,1 yük uygulama hızı 10 Hz olarak basma-basma yüksek çevrimli yorulma (YÇY) (High Cycle Fatigue) ömrü testi yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda kafes yapıyı oluşturan çubukta meydana gelecek yorulmanın ilk 2 aşamasının yani çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin yüzey pürüzlülüğü, yüzey kusurları ve eğilme/burkulma kaynaklı meydana gelen toplam deformasyonlardan kaynaklandığını ortaya koymuştur.

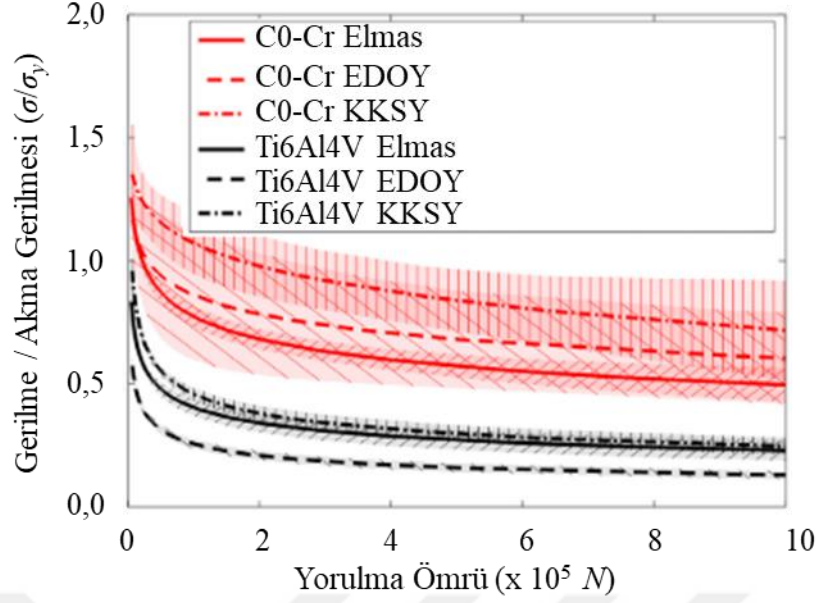
Bobbert vd. (2017) aynı üç katlı periyodik minimal yüzey (triplly periodic minimal surface) tasarım temeline sahip 4 farklı kafes yapının (ilkel, I-WP, Gyroid ve elmas) SLE prosesi ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V-ELI olan numunelerin yorulma ömrünü deneysel olarak incelemiştir. Deneylerini gerçekleştirirken; basma-basma yükleme şeklini, gerilme oranı 0,1 olacak şekilde 15 Hz yükleme hızı ve maksimum %60 akma yükünde uygulayarak tamamlamıştır. Bu deneyleri sonlandırdığı nokta ise numunelerin kırıldığı ya da 10^6 çevrim dayandığı an olarak belirtmiştir. Bu çalışmayı diğerlerinden ayırt eden özelliği ise kafes yapıların mekanik, topolojik ve sıvı geçirgenlik özelliklerinin hepsinin bir arada incelenmiş olmasıdır. Bu çalışmanın sonucunda yapıların yorulma dayanım limitinin belirtilen yapıların %60 akma gerilmesi kadar yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Speirs vd. (2017) çalışmasında, SLE prosesi ile üretilmiş ve malzemesi Nitinol (NiTi) olan Sekizyüzlü, Hüresel gyroid ve Sac gyroid geometrileri ile oluşturulmuş kafes yapıların yorulma ömrünü karşılaştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çalışmasını, sinüs formlu 0,1 basma-basma yükleme oranlı ve bu yükü uygulama hızı 15 Hz olan testler ile gerçekleştirmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirdiği bu testlerde ise testin tamamlanma noktası olarak, numunenin 10^7 çevrime ulaştığı ya da gerinim değerinin 1mm/s olduğu değeri tanımlanmıştır. Bu çalışmadan, Gyroid formlu yapıların klasik çubuk yapısına sahip EDOY gibi kafes yapılarına göre çok daha üstün mekanik özelliklere ve yorulma dayanım limitine sahip olduğunu Şekil 2.16'da ortaya koymuştur. Ömür çalışmalarını değerlendirirken yapıyı oluşturan çubukların kusur veya çentik barındırmasının veya bu kusurların yoğunluğunun çok etkili olduğunu belirtmiştir.



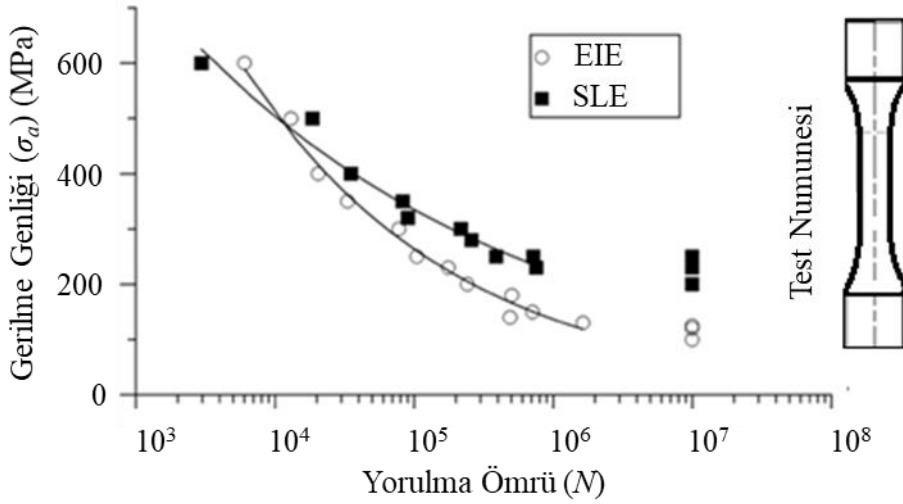
Şekil 2.16: Sekiz yüzlü (a) Hücre gyroid (b) ve Sac gyroid (c) kafes yapılarının yorulma ömrü karşılaştırması (Speirs vd., 2017).

Ahmadi vd. (2018) SLE prosesi ile üretilmiş kafes yapılarının topolojik formunun ve malzeme tipinin yorulma ömrüne etkisini deneysel çalışmalar ile incelemiştir. Deneysel çalışmalarında tüm numuneler 15 Hz hızında 0,1 gerilme oranında test edilmiş ve testler numunelerin rijitlik değeri %90 düştüğünde ya da 10⁶ çevrime ulaştığında sonlandırılmıştır. Bu çalışmalarda elmas, KKSİ ve EDOY geometrilerinden elde edilmiş kafes yapıların, Co-Cr ve Ti6Al4V malzemelerinden imal edilmesi durumundaki yorulma ömürlerini ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları Şekil 2.17’de gösterildiği gibi Co-Cr malzemeli KKSİ geometrili kafes yapının en yüksek yorulma dayanım limitine sahip olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 2.17: E, KKS Y ve EDOY kafes yapılarının Co-Cr ve Ti6Al4V malzemelerine göre yorulma ömrü (Ahmadi vd., 2018).

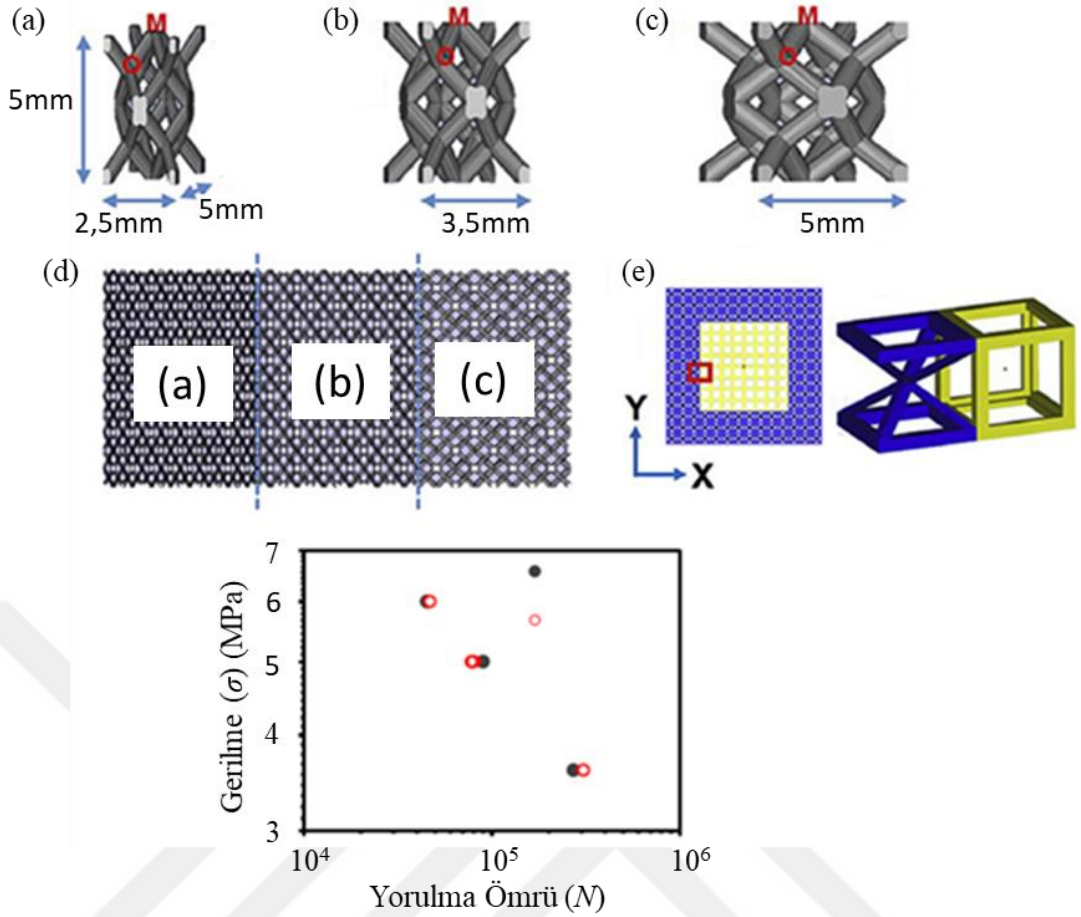
Fousová vd. (2018) SLE ve EIE prosesleri ile üretilmiş köpek kemiği formu ve malzemesi Ti6Al4V olan parçaların deneysel olarak ömür farklılığını incelemiş ve Şekil 2.18’de görüldüğü gibi SLE ile üretilmiş parçaların YÇY ömrü bölgesinde yarım kata kadar daha fazla yorulma dayanım limiti sağladığını göstermiştir. Bunun nedeninin EIE ile üretilmiş parçaların yüzey pürüzlülüğü ve parça iç kusurlarının daha fazla olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada kullandığı SLE ile üretilmiş deney numuneleri ısıtıl işlem görmüş fakat EIE ile üretilmiş numuneler tezgâhtan çıktığı gibi kullanılmıştır. Bu çalışmanın diğerlerinden en belirgin farkı ise deneylerde 100 Hz gibi yüksek bir yük uygulama hızında -1 (tam değişken) gerilme oranı ile testleri gerçekleştirmiş olmasıdır.



Şekil 2.18: SLE ve EIE ile üretilmiş numunelerin yorulma ömrü karşılaştırması (Fousová vd., 2018).

Yuan vd. (2018) EIE prosesi ile üretilmiş BK formlu malzemesi Ti6Al4V olan kafes yapılarında tavlama (annealing) prosesinin yorulma ömrü üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneylerinde numunelere 15 Hz hızında 0,1 gerilme oranı uygulayarak ömür tayini yapmıştır. Bu çalışması sonucunda tavlama operasyonu uygulanmış kafes yapılarının uygulanmayan yapılara göre 0,6 kat daha fazla yorulma dayanım limiti olduğunu ortaya koymuştur.

S. Zhao vd. (2018) EIE metodu ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan, Şekil 2.19’da gösterilen 3 farklı çubuk açısına sahip (a, b, c) EDOY ve bu 3 birim hücrenin yan yana sıralanarak çoğaltılmış versiyonu olan kademeli EDOY deney numunesinin (d) ve çekirdeği ile kabuk kısmı farklı birim hücrelerden oluşan kafes yapının (e) yorulma ömrünün deneysel olarak incelenmesi üzerine çalışmıştır. Deneysel çalışmada gerilme oranı $R=0,1$ yük uygulama hızı 10 Hz ve deney genel çerçevesi ASTM E466-07 kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 2.19’da (a), (b) ve (c) ile gösterilen birim hücrelerinden meydana getirilmiş kademeli EDOY (d) test numunesinin ömrünü, birim hücrelerin yorulma ömrünü kullanarak analitik olarak hesaplamamış ve sonuçları Şekil 2.19’da gösterildiği gibi tahmin etmeye çalışmıştır.

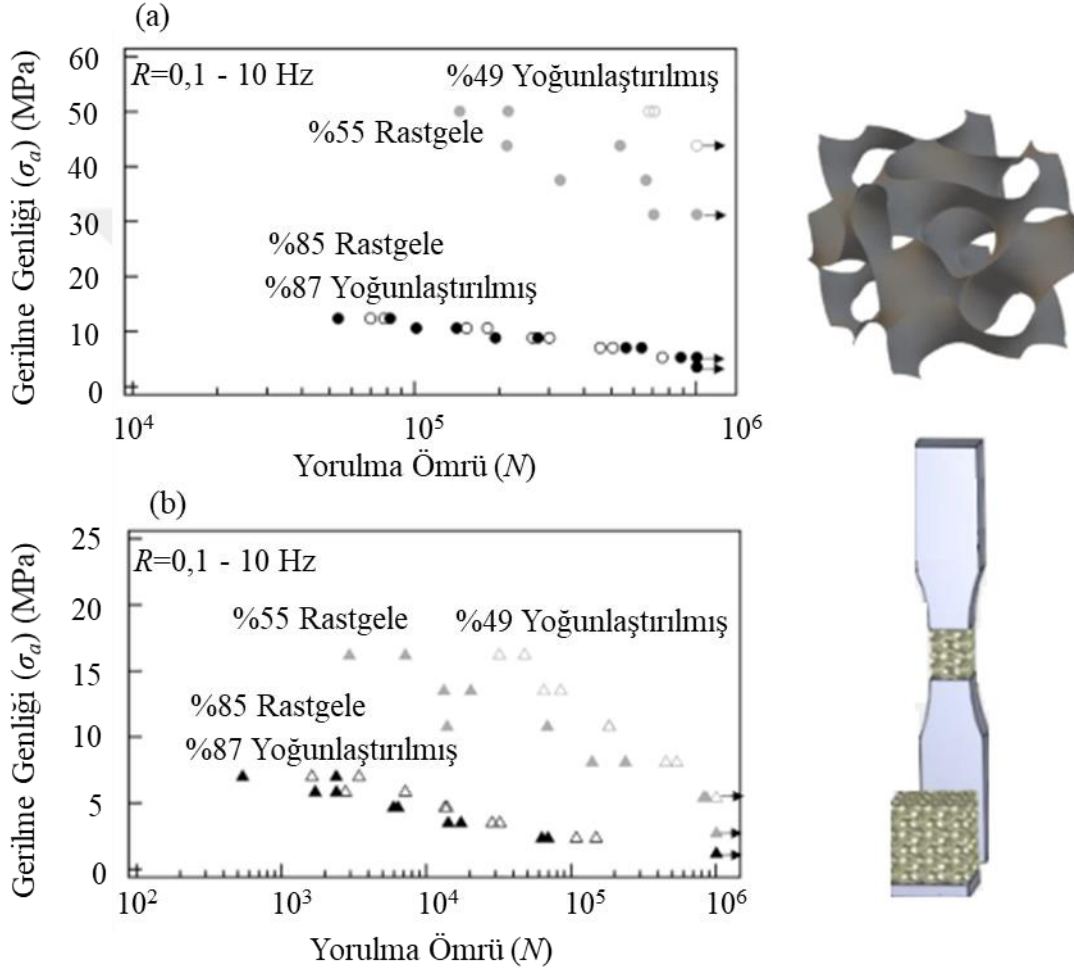


Şekil 2.19: Üç farklı açıda üretilmiş EDOY (a, b, c), (a), (b) ve (c) kullanılarak oluşturulmuş test numunesi (d) ve iki birim hücreden oluşan (çekirdek ve kabuk) yüksek ömürlü kafes yapısı (e) ve kademeli üretilen test numunesi analitik & nümerik yorulma ömrü karşılaştırma sonucu (S. Zhao vd., 2018).

D. Zhao vd. (2018) SLE prosesi ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan dörtyüzlü ve sekizyüzlü kafes yapılarından farklı göreceli gözenek ölçülerinde üreterek deneysel yorulma ömrü tespiti çalışması yürütmüştür. Buradaki amaç gözenek ölçüleri ve kafes tipinin yorulma ömrüne etkisini ortaya koymaktır. Deneysel çalışmalarında sinüs dalgası şeklinde 10 Hz yük uygulama hızında gerilme oranı $R=0,19$ olacak şekilde yükleme yapmış ve malzemenin rijitliğini %90 oranında kaybedene kadar testleri devam ettirerek gerçekleştirmiştir. Sekizyüzlü kafes yapının aynı boşluk ölçüsüne sahip dörtyüzlü kafes yapıya göre yorulma ömrü açısından çok daha üstün olduğu ve boşluk ölçüsü bir kafes yapıda ne kadar düşük ise yorulma ömrünün o kadar uzun olduğunu ortaya koymuştur.

Kelly vd. (2019) SLE prosesi ile üretilmiş ve malzemesi Ti6Al4V olan Şekil 2.20'de gösterilen Gyroid kafes yapının çekme ve basma yüklerine karşı yorulma ömründeki

değişim deneysel olarak incelenmiştir. Deneysinde ayrıca standart ve yoğunlaştırılmış lazer demetinin yorulma ömrüne etkisini de ortaya koymuştur. Deneysinde yük uygulama hızı 10 Hz ve gerilme oranı 0,1 olarak uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda; basma yükü ile çekme yükü etkisi karşılaştırıldığında yorulma ömrü açısından basma yükü uygulanmış numuneler %5 daha uzun çevrim ömür ortaya koyduğu yine Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Ayrıca yoğunlaştırılmış ışık demetinin yorulma ömrü açısından pozitif etkisi yine bu çalışma ile ortaya konulmuştur.



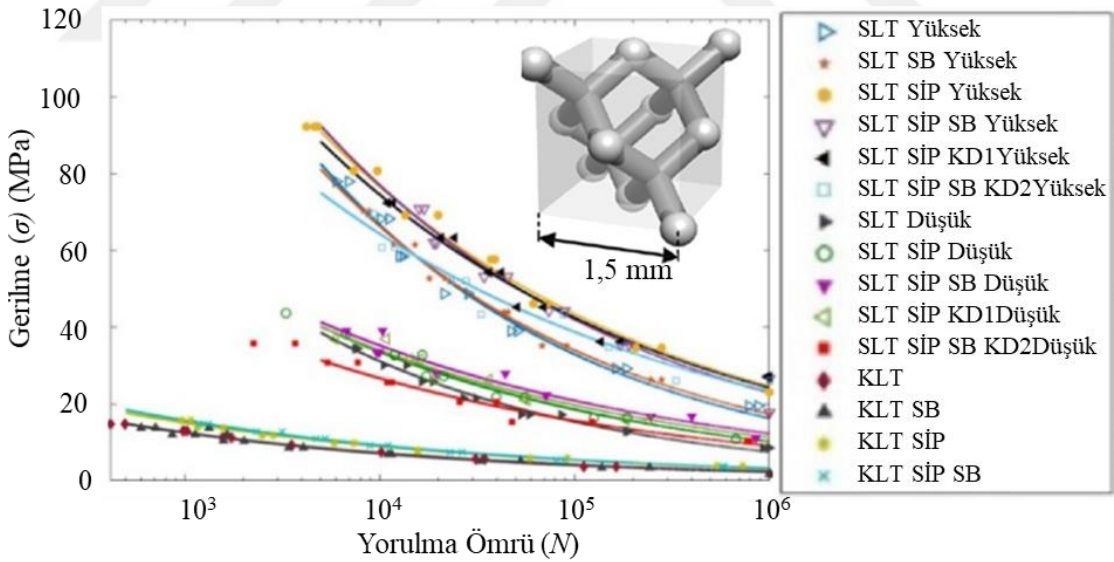
Şekil 2.20: Basma (a) ve çekme (b) yükleri karşısında Gyroid formlu kafes yapı yorulma ömrü karşılaştırması – standart ve yoğunlaştırılmış lazer parametresine bağlı değişim (Kelly vd., 2019).

Yang vd. (2019) SLE ile üretilmiş malzemesi 316L olan Gyroid tipi kafes yapılarında yorulma ömrünün deneysel olarak çalışmıştır. Çalışmasında, Gyroid geometrinin doğrudan SLE prosesi ile üretildikten sonraki yorulma ömrü ile kumlama yaparak elde ettiği yorulma ömrünü ortaya koymuştur. YÇY ömrü deneysinde numuneler sinüs dalgası şeklinde 20 Hz yük uygulama hızında $R=0,1$ gerilme oranı uygulanarak test

etmiştir. Test sonuçlarına bakıldığında kumlama prosesinin yorulma ömrünü DCY bölgesinde 5 kata kadar artırdığını ortaya koymuştur.

Savio vd. (2019) seçmeli lazer sinterleme (SLS) eklemeli imalat üretim yöntemi ile polyamid malzemelerden “subdivision” yöntemi kullanarak oluşturduğu 5 farklı kafes yapının; keskin köşeli kare, kare kesitli yuvarlatılmış hücre, yuvarlak kesit, yuvarlak kesit ve yuvarlatılmış radyus, catmull-clark mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada, deneysel olarak incelediği 5 farklı kafes yapının yorulma ömrünü yayımlamıştır. Bu testleri 2 Hz frekans ve gerilme oranı sıfır olacak şekilde çekme-çekme yük çevriminde gerçekleştirmiştir.

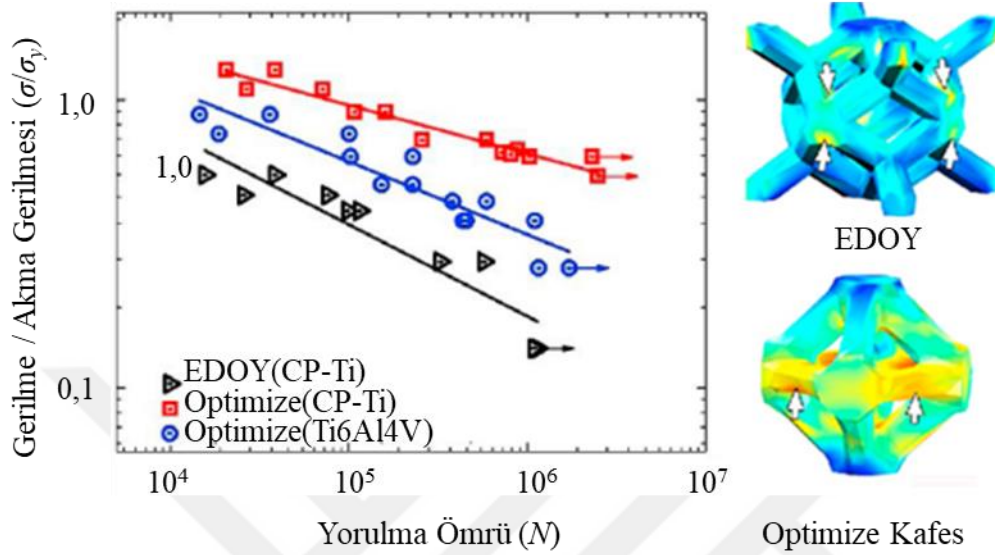
Karami vd. (2020) ve Ahmadi vd. (2019) malzemesi Ti6Al4V-ELI olan Elmas birim hücrelerine sahip ve SLE metodu ile üretilmiş kafes yapının yorulma ömrünü deneysel olarak tespit etmeye çalışmıştır. Deneylerinde; sürekli veya kesikli mod lazer (SLT veya KLT) ile üretimin ömre etkisini, SİP etkisini, kumlama (SB) ve kimyasal dağlama (KD) prosesinin yorulma ömrüne etkisini incelemiş ve Şekil 2.21’de olduğu gibi elde ettiği sonuçları göstermiştir. Bu deneylerde gerilme oranı 0,1 yük uygulama hızı 15 Hz olacak şekilde testlerini yürütmüştür.



Şekil 2.21: Elmas kafes yapıya uygulanan prosesler sonucunda yorulma ömründeki değişim (Karami vd., 2020).

Liu vd. (2020) malzemesi CP-Ti ve Ti 6Al4V olan hem EDOY geometrili hem de topoloji optimizasyonu yapılmış kafes yapıyı SLE metodu ile üreterek yorulma ömrünü deneysel olarak incelemiştir. Deneylerini gerilme oranı 0,1 ve yük uygulama hızı 10 Hz olacak şekilde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada elde ettiği sonuçlar;

topoloji optimizasyonu yaptığı kafes yapının düşük göreceli yoğunluklarında ($\sim 1,3 \text{ gr/cm}^3$) bile YÇY bölgesinde yaklaşık 10^5 çevrim daha fazla yorulma ömrü dayanımı sağladığını Şekil 2.22’de göstermiştir. Ayrıca çalışmasında kafes yapılarında yorulma ömrünü etkileyen ana etkinin birim hücre geometrisi olduğunu da belirtmiştir.

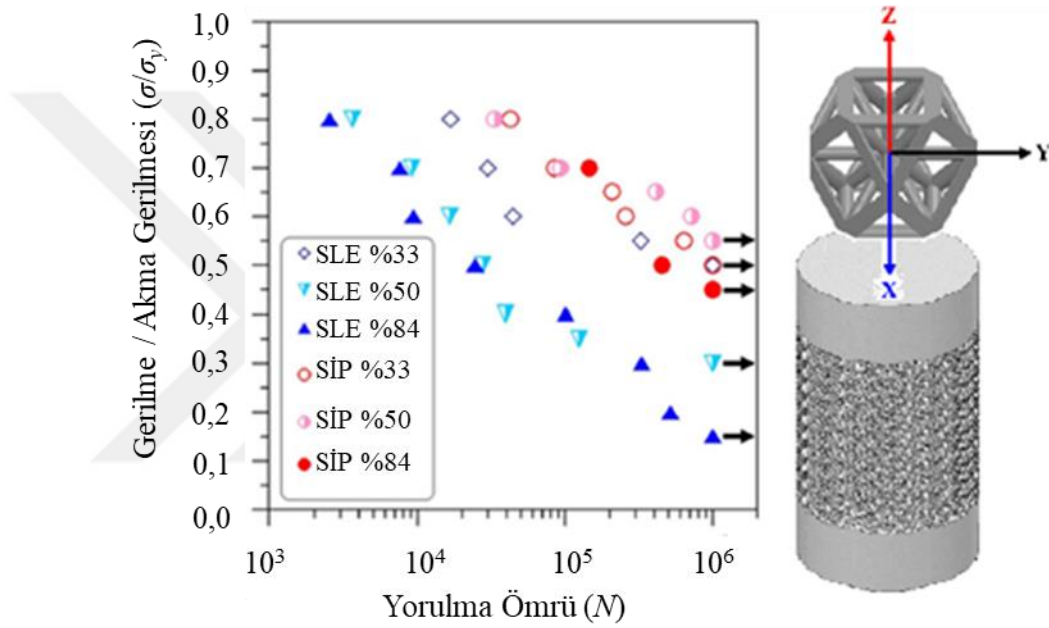


Şekil 2.22: Standart EDOY ve optimize edilmiş kafes yapılarının akma noktası ile normalize edilmiş yorulma ömrü karşılaştırması (Liu vd., 2020).

Wang vd. (2020) EIE metodu ile ürettikleri 3 farklı kademeye sahip EDOY geometrili kafes yapının basma yüküne karşın yorulma ömrünü belirlemek amacıyla çalışma yürütmüştür. Bu çalışmasındaki geometriler, Şekil 2.19’da gösterilen (a), (b) ve (c) diye kademeli olarak ayırt edilmiş ve bir numune üzerinde bu 3 kademe olacak şekilde tasarlanmış olan geometrilerdir. Kademelerin her biri aslında birim kafes yapının çubukları arasındaki açı değiştirilerek yapılmıştır. Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmada; 2 MPa ve 3,8 MPa gerilme altında gerilme oranı 0,1 ve yükleme hızı 10 Hz olacak şekilde testler icra edilmiştir. Çalışmasının sonucunda (a), (b) ve (c) kafes yapılarını bir araya getirerek oluşturduğu kademeli kafes yapının ömrünün beklentiyi karşılamadığını ortaya koymuştur.

Wu vd. (2020) SLE prosesi ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan Küp-sekizyüzlü formlu kafes yapıların, basmaya karşı performansını incelemek amacıyla; SİP uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere yorulma ömrü testi yapmıştır. Deneysel çalışmalarını; sinüs dalga formlu 10 Hz yük uygulama hızı ile $R=0,1$ (basma-basma) gerilme oranı ile akma noktasının %80-%15 aralığında gerçekleştirmiş ve test sonuçlarında yorulma ömrünün tayini için parçanın %95 rijitlik kaybettiği durum ya

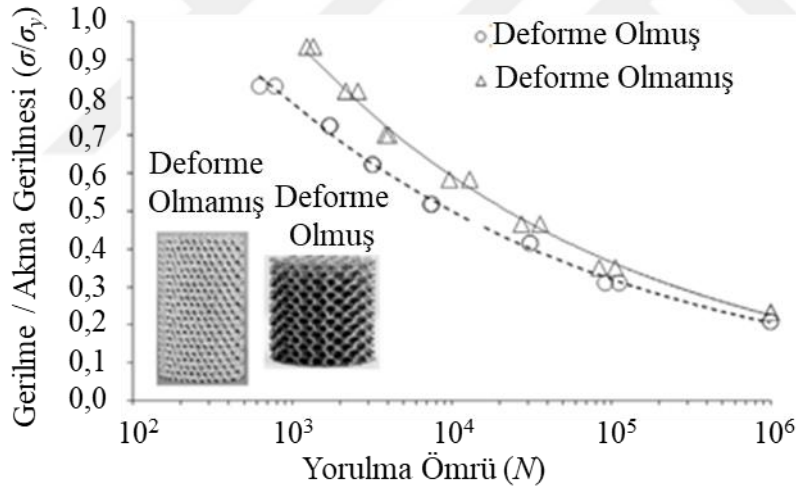
da 10^6 çevrimi tamamladığı durum olarak belirlemiştir. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında; SİP prosesinin, yapının kırılma davranışında bir değişikliğe sebep olmamasına rağmen yorulma ömrü açısından birkaç kat pozitif yönde etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Şekil 2.23’de gösterilen ömür sonuçlarına bakıldığında da DÇY bölgesinde SİP prosesinin etkisi kayda değer olsa bile YÇY bölgesine doğru etki çok yüksek derecede arttığı gözlenmiştir. Bunun nedenini de SİP prosesi ile malzemenin yapısında bulunan alfa-martenzit mikroyapısının alfa+beta laminer yapıya dönüşmesinden kaynaklı çentik hassasiyetinin giderilmesi ile kaynaklı olduğu açıklanmıştır.



Şekil 2.23: SLE ile üretilmiş ve harici SİP uygulanmış/uygulanmamış gözeneklilik oranları %33 ve %55 ve %84 olan kafes yapıların yorulma ömrü test sonuçları karşılaştırması(Wu vd., 2020).

Xiong vd. (2020) SLE ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan bal peteği formu kafes yapıların mekanik ve yorulma ömrü performanslarını ortaya koymak amacıyla hem deneysel hem de tavşan üzerinde canlı ortam deney çalışmaları yürütmüştür. Deneysel çalışmalarını; 15 Hz yük uygulama hızı ile $R=0,1$ (basma-basma) gerilme oranı ve akma noktasının %80-%20 aralığında gerçekleştirmiştir. Test sonuçlarında yorulma ömrünün tayini için parçanın %90 rijitlik kaybettiği durum ya da 10^6 çevrimi tamamladığı durum olarak belirlemiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre SLE ile üretilmiş Ti64-ELİ malzemesinin çene uygulamasında kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

(Yánez vd., 2020) çalışmasında, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş Gyroid formlu kafes yapıları malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmasındaki esas amaç, kafes yapıları deforme olduktan sonra düğüm noktalarındaki radyuslu geçiş bölgelerinde meydana gelebilecek değişimin çentik hassasiyeti kazanması durumunda yapının yorulma ömrüne etkisini incelemektir. Bu çalışmada kullanılan kafes yapıları Ti6Al4V-ELI malzemesinden EIE metodu ile %90 gözeneklilik oranına sahip olarak üretilmiştir. Yorulma testleri, sinüs formlu yükleme koşulunda 15 Hz yük uygulama hızı ile $R=0,1$ (basma-basma) gerilme oranı ile gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde ömrün belirlendiği nokta rijitlik değerinin %90'a düştüğü anı olarak ya da yorulma ömrü sayısının 10^6 olduğu zaman olarak düşünülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuç, DÇY bölgesinde normal silindirik numunenin ömür değerleri kısmi olarak daha yüksek olsa da gerilme değerleri %50-20 aralığında yani DÇY'den YÇY'ye geçiş kısmında hemen hemen aynı ömre sahip olduğu Şekil 2.24'de olduğu gibi ortaya konmuştur.



Şekil 2.24: Silindirik yapıları malzemelerin akma gerilmesi (σ_y) ile normalize edilmiş grafiği (Yánez vd., 2020).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kafes yapılarının yorulma ömrü tespitinde genellikle deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Fakat deneysel çalışmalar hem çok uzun sürmekte hem maliyeti yüksek hem de her üretilmiş parçanın üretim kusurlarındaki farklılıktan dolayı çok tekrarlı deney ihtiyacı doğmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ömür tespiti yapmak için deneysel yöntemleri tercih etmek durumu zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı literatürde genellikle, bir parça eklemeli imalat yöntemi ile üretildikten sonra tomografisi çekilerek geometrideki kusurlar tespit

edilmeye çalışılmakta ya da istatistiksel değerlendirmeler yapılarak (rastgele dağılım veya gaussian dağılım) standart tasarlanan parçaya kusur verisi ekleyerek simülasyonlar gerçekleştirilmekte ve nümerik olarak ömür tayini yapılmaktadır. Bu yöntemler ile elde edilen ömür yaklaşımı aynı kafes yapıdan tekrar üretildiğinde elde edilen parçalara veya diğer kafes yapılarına yaygınlaştırılmamaktadır.

Tüm bu gösterilen çalışmalar farklı üretim teknikleri ve malzemelerle üretilen farklı tür kafes yapıların, farklı dinamik yükler altındaki yorulma ömürlerini tayin etmek amaçlı yapılmış deneysel çalışmalardır. Fakat bu deneysel verilerin nümerik modellemelerde kullanılması için yöntemler önerilmemesi bu çalışmaların önemli bir eksikliğidir.

2.1.3.3 Kafes yapılarda yorulma ömrünün deneysel ve nümerik yöntemler ile tayini ve karşılaştırması

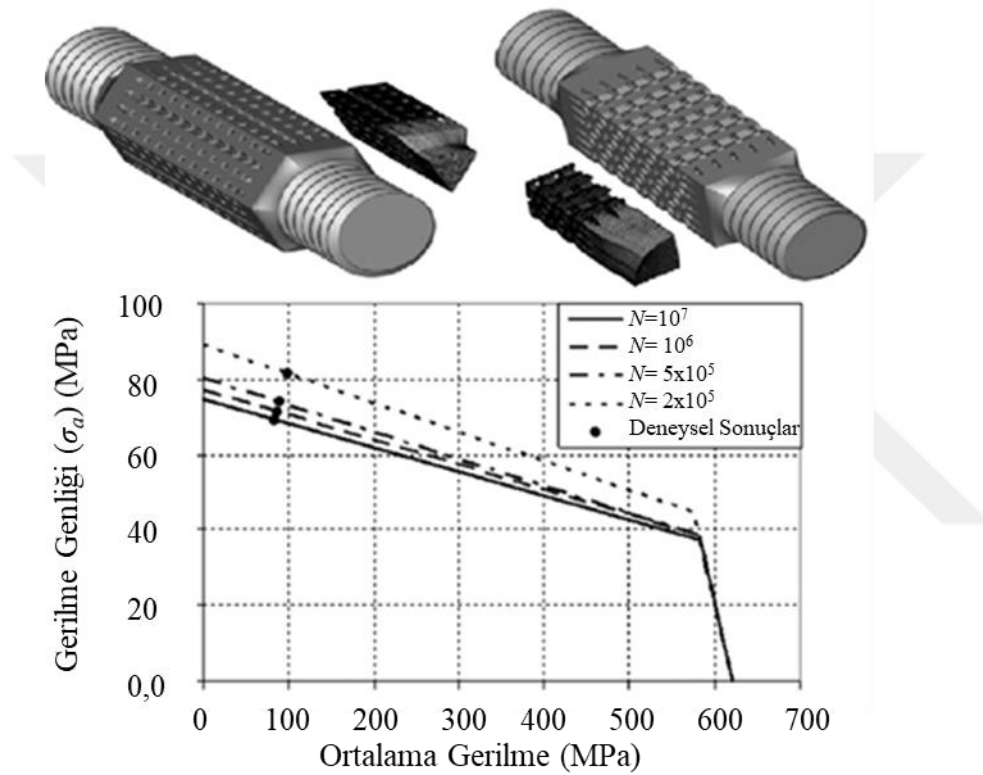
Bu bölümde hem deneysel hem de nümerik çalışmaların bir arada yürütüldüğü ve karşılaştırmalı sonuçların elde edildiği uygulamalara odaklanılmıştır.

X. D. E. Guo vd. (1994) çalışmasında 2 boyutlu altıgen bal peteği geometrilik kafes yapının yorulma ömrünün tespiti için nümerik bir yöntem kullanmış ve sonuçlarını deneysel olarak doğrulamıştır. Bu nümerik yöntem gerilme tabanlı bir çözüm yöntemi olup Makiyama vd. (2002); Schaffner vd. (2000) taraflarından kullanılan ile bire bir aynıdır. Bu yöntemde, yorulma ömrünün tamamlandığı nokta için elastik modülün %10'a düştüğü durumu kabul etmişlerdir. Bu yöntem ile elde ettiği sonlu elemanlar analizi yorulma ömrü sonuçlarının, deneysel sonuçlar ile korelasyonunun sağlandığı gösterilmiştir.

L. P. Guo vd. (2009), eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş üçgen kafes yapıları yüksek çözünürlükte tarayarak 2 boyutlu mesoscopic yapısını oluşturduktan sonra nümerik yorulma ömrü tayini üzerine çalışmıştır. Bu ömür tayini sırasında “mesoscopic model” oluşturmuş ve bu model üzerinden elde ettiği gerilme değerleri ile Fortran kodu üzerinde ömür analizi yürütmüştür. Çalışmalarını deneysel sonuçlar ile kıyasladığında yakın sonuçlar elde ettiği bu nedenle de yönteminin kullanılabilir olduğunu öne sürmüştür.

Lipinski vd. (2013) çalışmasında Şekil 2.25'te gösterilen SLE ile ürettiği boru şeklindeki malzemesi CPG2Ti olan kafes yapının yorulma ömrünü hem teorik hem de deneysel olarak incelemiştir. Teorik analiz olarak gerilme tabanlı hesaplama yaparken

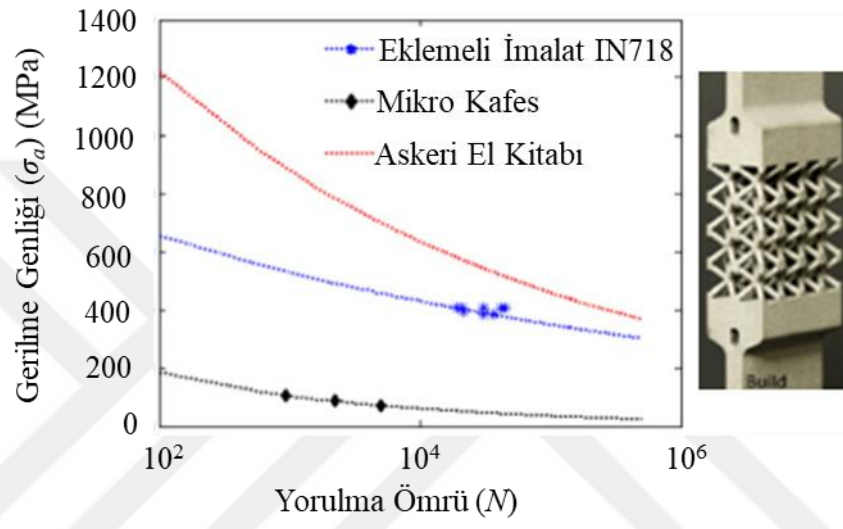
gerilme genliğini kullanarak modifiye edilmiş Goodman teorisinden ömür hesaplamalarını gerçekleştirmiş ve malzemenin Haigh diyagramını çıkarmıştır. Bu çalışmadaki deneylerde, gerilme oranı 0,1 ve yük uygulama hızı ise numunelerde meydana gelen gerinim değerine bağlı olarak 2-20 Hz aralığında değişken bir şekilde uygulanmıştır. Şekil 2.25'te gösterilen sonuçlara bakıldığında deneysel ve nümerik analizin birbirini doğruladığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, CPG2Ti malzemesinin ömür değerlendirmesi için gerilme tabanlı yöntemlerin elverişli olduğu ortaya konulduğu görülmektedir.



Şekil 2.25: SLE ile üretilmiş malzemesi CPG2Ti olan tüp formulu kafes yapı test numunesinin teorik ve deneysel ömür analiz sonuçları (Lipinski vd., 2013).

Jamshidinia vd. (2015) Ti6Al4V malzeme ile EIE metodu vasıtasıyla üretilmiş sekizyüzlü kafes yapı malzemenin yorulma ömrü tespiti için nümerik ve deneysel çalışma yürütmüştür. Nümerik çalışmalarında, DÇY tespiti yaparken Coffin-Manson fakat YÇY ömrü tespitinde Basquin metodu kullanılmasını ve kararsız geçiş bölgesinde ise Toplam Gerinim Ömür yöntemi kullanılmasını önermiştir. Ortalama gerilme teorisine göre Goodman, Soderberg ve Gerber değerlendirildiğinde ise EIE ile üretilmiş parçalarda Soderberg ortalama gerilme teorisinin deneysel sonuçlara yakın sonuçlar sunduğu ortaya konulmuştur.

Huynh vd. (2016) çalışmasında, IN718 malzemeden doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) (Direct metal laser sintering) metodu ile hücresel mikro-kafes yapı üretmek yorulma ömrü tayinini deneysel olarak gerçekleştirmiştir. Çalışmasında elde ettiği sonuçları aynı malzemeden katı kütle metal yorulma ömrü ile ve askeri el kitabında yer alan literatür verileri ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Çalışması sonucu, kafes yapıların yorulma ömrü tamamlandığında kırılma yüzeylerinin, kafes yapının merkezine yakın lokasyonlarında aynı kumlamamanın yapılamadığı bölgelerde gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

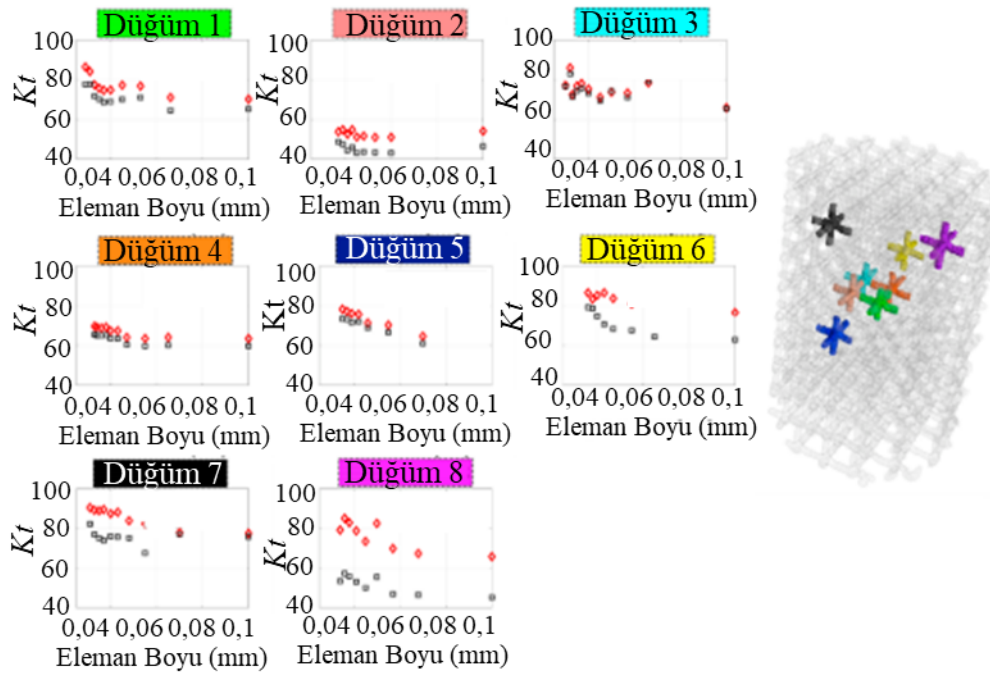


Şekil 2.26: Mikro-kafes, köpek kemiği formu (Eklemeli İmalat IN718) ve askeri standartlar el kitabı verisi yorulma ömrü karşılaştırması (Huynh vd., 2016).

Boniotti vd. (2019) SLE prosesi ile üretmiş olduğu malzemesi AlSi7Mg olan 3 farklı birim kafes yapının, BK, HMK ve YMK kombinasyonlarını kullanarak gerçekleştireceği yorulma testi için numuneler üretmiştir. Bu numunelerin yorulma dayanım limit değerini tespit etmek ve parça üzerindeki kusurların parçanın ömrüne etkisini incelemek için hem deneysel hem de nümerik yöntem kullanmıştır. Deneysel çalışmasında, 3 nokta eğilme testi uygulamış ve bu testte gerilme oranı $R=0,1$ ve yük uygulama hızı 50 Hz olarak kullanmıştır. Testlerinin tamamlanma noktasını ise yorulma ömrünün 10^7 olduğu değeri belirtilmiştir. Nümerik analizlerinde amaç yorulma dayanım limitini tespit etmek olduğu ve 10^7 yorulma ömür sayısının, dayanım ömrü olarak atanmasından dolayı; çok yönlü YÇY ömrü için lokal gerilme kriterini kullanarak dayanım hesabı yapmıştır. Bu kriteri kullanırken parçanın her bir düğüm noktasında meydana gelen eşlenik von Mises gerilmeyi baz almıştır. Sonrasında eşdeğer ortalama gerilme hesabı yapıp Goodman ortalama gerilme düzeltmesi uygulayarak gerilme tabanlı hasar hesaplaması gerçekleştirmiştir. Bu prosedürü 10^7

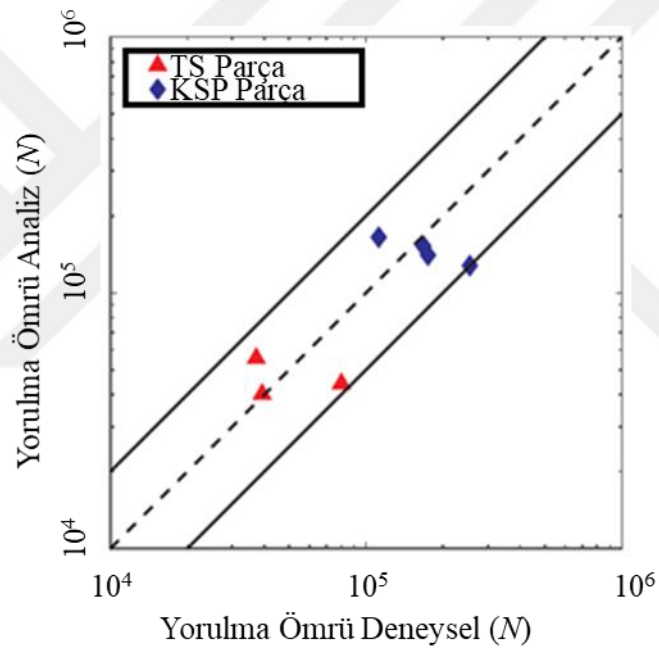
yorulma ömür sayısı boyunca tekrarlayıp hasar olup olmadığına bakarak yorulma ömrü tespiti yapmıştır.

Dallago vd. (2019) SLE yöntemi ile üretilmiş Şekil 2.27’de gösterilen kübik birim hücreli kafes yapıda üretim kaynaklı oluşabilecek hata sayısının ve yoğunluğunun malzemenin yorulma ömrüne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada, deneyler sırasında yük uygulama hızı 120 Hz ve tam değişken yükleme diğer bir ifade ile $R=-1$ olarak numuneler test edilmiştir. Çalışmasının esas çıkarımı ise çubukların birleşim noktalarında gerilme dağılımı sonuçlarının sonlu elemanlar analizinde çok fazla olduğu görülürken deneysel çalışmalarda o kadar da fazla olmadığını gözlemlenmemiş olmasıdır. Ayrıca, çalışmada üretilmiş kafes yapısındaki her bir düğüm noktası için hesapladığı gerilme konsantrasyonu (K_t) değerinin iki farklı durum için eleman sayısına bağlı nümerik analiz sonuçlarını Şekil 2.27’de gösterildiği gibi sunmuştur. Buradaki iki farklı hesaplama yönteminden birincisi, bir düğüm noktası bölgesini alıp periyodik sınır şartları tanımlaması yaparak SE sonucuna ulaşmak (Şekil 2.27’de kırmızı renkli sonuçlar) ikincisi ise kafes yapı numunenin tamamını modelleyerek numunenin kendi sınır şartlarını kullanarak SE sonuçlarını (Şekil 2.27’de siyah renkli sonuçlar) elde etmektir. Burada K_t değeri üretilmiş pürüzlü yüzey geometrisinde meydana gelen gerilmenin pürüzsüz yüzey gerilmesine oranıdır.



Şekil 2.27: Kübik birim hücreli kafes yapının farklı düğüm noktalarındaki gerilme konsantrasyon katsayısının (K_t) eleman sayısına bağlı değişimi (Dallago vd., 2019).

Sheridan vd. (2018) çalışmasında, toz yataklı lazer ergitme imalat yöntemi ile üretilen malzemelerin doğası gereği sahip oldukları gözenekliliği baz alarak bu parçaların mekanik özelliklerini tayin etmeye çalışmıştır. Bilgisayar Tomografisi (BT) (Computer Tomography) analizleri ile bir başka ifade ile tarama stratejisi (TS) kullanılarak gözeneklilik miktarları ölçülerek bir malzemedeki gözeneklilik miktarı/boyutu gibi fenomenlerin ömre etkisi incelenmiş ve deneysel çalışmalar sonucunda kırılma yüzeyleri incelenerek kaba süreç parametreleri (KSP) hesaplaması yaparak malzemenin ömür tayini yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu elde edilen karşılaştırmalı ömür grafiği Şekil 2.28’de sunulmuştur. Bu sonuçlardan, kırılma yüzeylerini inceleyerek elde ettiği sonuç ile deneysel sonuç arasındaki fark doğrudan görülebilmektedir.

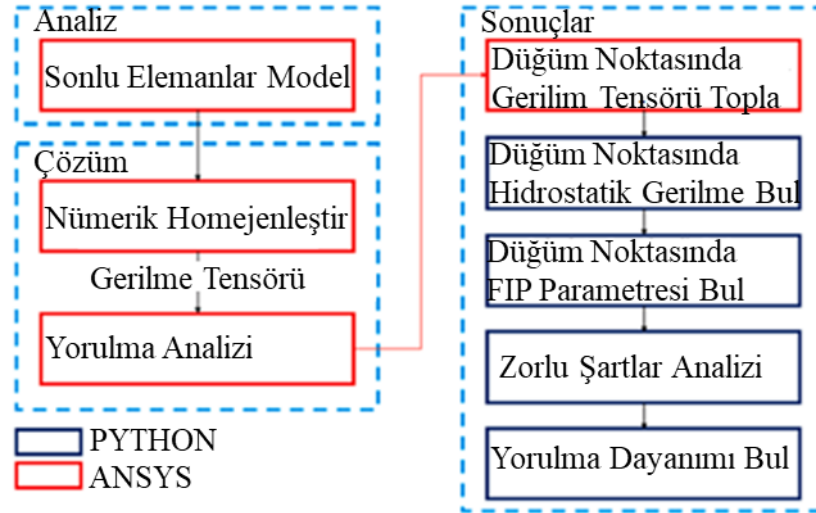


Şekil 2.28: Kırılma yüzeyleri incelenerek tahmin edilen ömür ve test ile elde edilen ömür karşılaştırması (Sheridan vd., 2018).

Neçemer vd. (2019) girintili (Re-entrant) ökzetik kafes yapıya sahip Al-alışımlı 7075-T651 malzemenin, toplam yorulma ömrünü çıkartmak amacıyla çatlak oluşum ve ilerleme safhalarını nümerik modellemiş ve elde ettiği sonuçları deneysel olarak da doğrulamıştır. Nümerik analiz çalışmasının ilk kısmı olan çatlak oluşum safhasını modellerken ilk olarak elastik-plastik malzeme davranışını Abaqus’de yarı-statik analiz yöntemi ile modelledikten sonra yorulma ömrü için “Gerinim-Ömür” yaklaşımını kullanarak fe-safe ticari yazılımında modellerini analiz etmiştir. Bu çalışmasında Asal gerinim model (Principal Strain Model) ve Morrow ortalama

gerilme yöntemi kullanarak ilk çatlak oluşum zamanını tespit etmiştir. Çatlak ilerleme ömrü tespiti için ise Paris denkleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu denklemin çözümü için parçada meydana gelen en büyük çekme gerilmeleri esas alınmıştır. Deneysel çalışmalarında ise $R=0,1$ yükleme oranı ($F_{maks}=1000N$ ve $F_{min}=100 N$) ve yük uygulama hızı $0,02$ Hz olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında deneysel ve nümerik toplam ömrü değerlerinde %1,5 kadar küçük bir fark olduğu gözlemlenmiş ve ömür tayini için gerinim tabanlı yorulma ömrü yöntemlerinin kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Refai vd. (2020) çalışmasında, SLE metodu ile üretilmiş kafes yapılı malzemelerin çok yönlü gerilmeye tabi tutulduğu durumlar için YÇY ömrünün tespitini gerilme tabanlı nümerik ömür hesaplama yöntemi olan “Crossland’s Criterion” kullanarak gerçekleştirmiş ve bu değerleri deneysel olarak da doğrulamıştır. Yorulma ömür hesaplamalarında kullandığı gerilme tabanlı yorulma ömrü tespit yöntemi ile malzemesi Ti6Al4V olan 33 farklı geometrideki birim hücrenin yorulma dayanım limitini tespit etmiştir. Fakat sadece Oktet ve Gyroid formlu kafes yapılarının ömrünü deneysel olarak doğrulamıştır. Deneysel çalışmalarını; oda sıcaklığında, gerilme oranı $0,1$ ve yük uygulama hızı 80 Hz (Oktet için) veya 100 Hz (Gyroid için) olacak şekilde gerçekleştirmiştir. Testin tamamlanma kriteri numunenin 10^6 yorulma ömrü sayısına dayandığı ya da herhangi bir safhada, numunenin iki parçaya ayrıldığı durum olarak belirlenmiştir. Nümerik çalışmasındaki prosedür ise Şekil 2.29’da gösterildiği gibidir. Bu prosedüre göre; ilk olarak birim hücrenin statik analizinden elde edilen çok yönlü gerilme değerlerinin her bir tensörü için gerilme tabanlı geleneksel yorulma ömrü tespiti gerçekleştirilir. Sonrasında yorulma ömrünün tamamlandığı andaki birim hücre modelinin her bir düğüm noktasındaki maksimum hidrostatik gerilme ve değişken sekizyüzlü kayma gerilmesi ortaya konularak “Crossland’s Fatigue Indicator” parametresi (FIP) hesaplanmaya çalışılır. Sonrasında FIP parametresinin yalnızca en yüksek %5 değerleri alınarak ortalama bu geometri için yorulma dayanım limiti ortaya konulur. Zorlu şartların etkisi katıldıktan sonra yorulma ömür tespiti yapılmaktadır.



Şekil 2.29: Gerilme tabanlı yorulma dayanım limiti tespit prosedürü (Refai vd., 2020).

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen kafes yapılı malzemelerin gerinim tabanlı yorulma ömrü tespiti konusunda eksik olduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda literatüre katkı sağlayacak çalışmanın; Brown-Miller yöntemi (gerinim tabanlı ömür hesap yöntemi) ile kafes yapılı malzemelerin yorulma ömür analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Brown-Miller yönteminin belirlenmesinin sebebi yorulma ömür eğrisini oluşturmak için ihtiyaç duyulan DCY ve YÇY ömür hesabını, temelinde yatan gerinim tabanlı malzeme verisinden çıkartarak ortaya kayabilme üstünlüğüdür (Peng vd., 2020).

Genellikle, katı bir malzemenin basma veya çekme dayanımını, malzemenin göreceli yoğunluğuna göre çizdirdikten sonra bir eğri oturtularak malzemenin bütün göreceli yoğunluğundaki dayanımını belirlemek için Ashby Gibson modeli (Gibson vd., 1999) kullanılması yaygındır. Literatürde statik yük dayanımını belirlemek için kullanılan Ashby Gibson modelinin; malzemenin göreceli yoğunluğuna bağlı yorulma ömrü dayanım limitinin belirlenmesi için kullanılması literatüre farklı bir bakış açısı daha kazandırmış olacaktır. Yorulma ömrünün göreceli yoğunluğa göre değişimi sonuçları Eş. (2.3) ile verildiği gibi karşılaştırılmış ve bir “C” ve “n” katsayısı elde edilmiştir.

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_{0f}} = C \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (2.3)$$

σ_f , kafes yapılı malzeme yorulma dayanım limiti, σ_{0f} , katı malzeme yorulma dayanım limiti, C, kafes geometri sabiti, ρ , kafes yapı yoğunluğu, ρ_0 , katı malzeme yoğunluğu, n, kafes yapılı malzemenin ömür korelasyon katsayısını temsil etmektedir.

Burada elde edilen yorulma ömrünün göreceli yoğunluğa göre değişim sonuçları deneysel yöntem ile doğrulandığında her göreceli yoğunluğa göre yorulma ömrü eğrisi doğrudan çıkarılmış olacaktır.

Yorulma ömrü belirlemek için gerçekleştirilecek numerik analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark; üretim kaynaklı meydana gelen kusurların yorulma ömrüne etkisini göstermektedir. Bu fark yorulma ömrünün tespitinde kullanılan yüzey faktörünün tespiti amaçlı kullanılmalıdır. Bu çalışmada nümerik analizler sonucu elde edilen yorulma ömür eğrileri, literatürde verilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu verilerin arasındaki fark, üretim kaynaklı kusurların doğurduğu çentik etkisi neticesinde meydana gelen gerilme konsantrasyonu olarak ifade edilmiştir. Bu konsantrasyon değeri EDOY kafes yapı geometrisi için üretilmiş olup literatürde daha önce tespit edilmemiştir. Bu katsayı tespitine yönelik yöntem sayesinde kafes yapıların yorulma ömrü doğrudan nümerik yöntemler ile tespit edilebilecektir.

Bu çalışmanın bir sonraki bölümü olan Bölüm 3'te yorulma ömrü hesaplamaları için kullanılan teorik alt yapı sunulmuştur.

3. YORULMA ÖMRÜ TEORİSİ

3.1 Yorulma Ömrü Mekanîği

Malzemelerin yorulma ömrünü belirlemek için dört ana ömür hesaplama yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler;

- (i) Nominal gerilme-ömür modeli,
- (ii) Lokal gerinim-ömür modeli,
- (iii) Yorulma çatlak büyümesi modeli,
- (iv) Lokal gerinim-ömür modeli ile yorulma çatlak büyümesi modelinin kombinasyonu ile oluşturulan; makroskopik çatlak başlangıç ve bu çatlağın ilerlemesinin bir arada modellenmesidir.

Bu yukarıda belirtilen dört ana metot içinden gerilme-ömür yöntemi yaklaşık 160 yıldır kullanılmakta olup, diğer yöntemler ise 1960'lardan buyana kullanılmaktadır.

(i) ile verilen gerilme ömür modelinde, yorulma ömrü tahmini nominal gerilmeler kullanılarak ve bunları çentikli ve çentiksiz elemanlardaki yerel yorulma dayanım limitleri ile ilişkilendirerek yapılır.

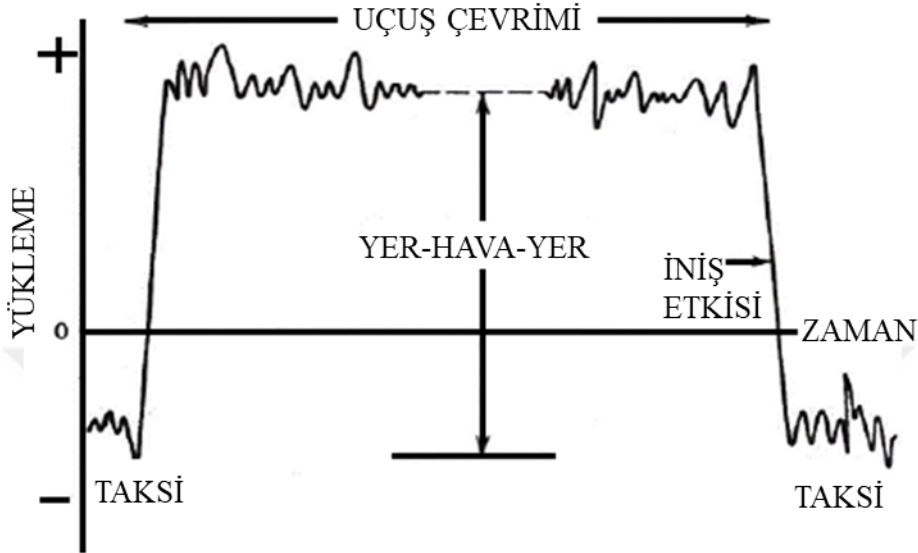
(ii) ile verilen gerinim ömrü ise, bir çentikte meydana gelen lokal gerilmeler ve gerinimler için doğrudan hesaplanır. Bu lokal gerilmeleri veya gerinimleri nominal gerilme/gerinimden hesaplamak için de birkaç yöntem mevcuttur.

(iii) ile verilen yorulma çatlağı büyüme modeli, kırılma mekaniği teorisini kullanır ve çatlak oluşumundan itibaren çatlağın belirli bir boyaya gelene kadarki ya da malzemenin kırılması için gerekli çevrim sayısını tahmin etmek için kullanılır.

(iv) ile verilen iki aşamalı yöntemde ise çatlak başlangıç ömrü ve çatlak büyüme ömrü tahmini ayrı ayrı yapılır ve ardından toplam yorulma ömrünü elde etmek için toplanır (Stephens vd., 2001).

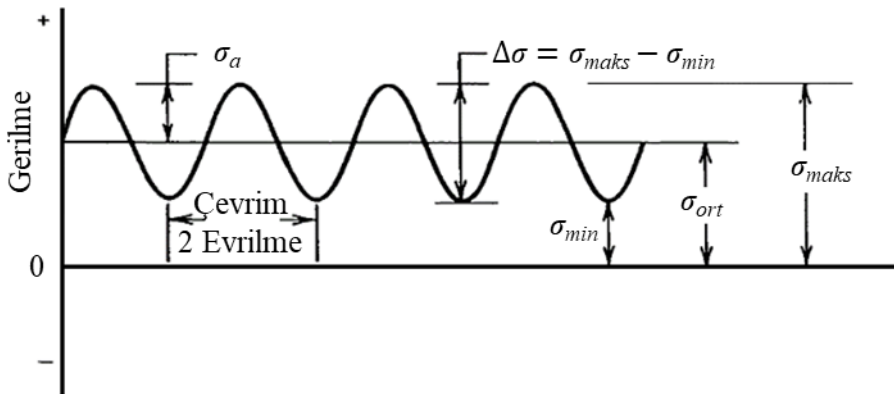
3.1.1 Yorulma yükü

Gerçek hayattaki yapılar bazı durumlarda basit ve tekrarlayıcıdır, bazılarında ise karmaşık ve rastlantısaldır. Karmaşık ve rastgele yüklemeye örnek olarak Şekil 3.1'de gösterilen bir uçağın yer-hava-yer çevrimi gösterilebilir.



Şekil 3.1: Bir uçağın yer-hava-yer uçuş zarfı temsili (Ghasabi, 2018).

Gerçek hayatta bazı durumlarda parçaların yüklemeye geçmişleri sabit ve tekrarlayan bir genlikte olabilir. Bu tür yüklemeler malzemelerin dinamik yük altındaki davranışını karakterize etmek için de kullanılır. Sabit genlikli çevrimsel yüklemeyi karakterize etmek için gerilme parametreleri aşağıda tanımlanmıştır, ayrıca bu yüklemenin şematik gösterimi de Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Sabit genlikli tekrarlı yüklemenin temsili gösterimi (Ghasabi, 2018).

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (3.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.3)$$

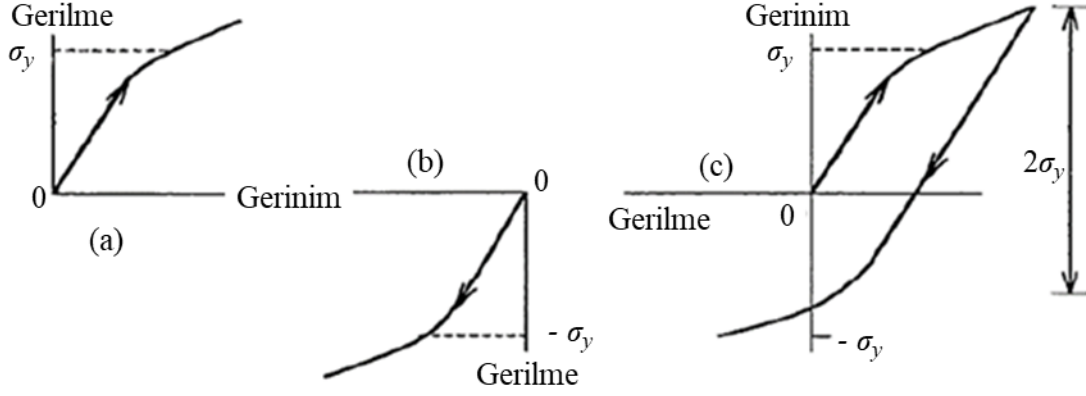
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \quad (3.4)$$

Burada tekrarlı yükleme çevrimindeki gerilme aralığı $\Delta\sigma$, en büyük gerilme σ_{maks} , en küçük gerilme σ_{min} , gerilme genliği σ_a , ortalama gerilme σ_{ort} ve gerilme oranı R ile ifade edilmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde çekme gerilmesi pozitif, basma gerilmesi negatif alınır. $R=0$ ve $R=-1$ değerleri malzemelerin yorulma ömürlerini belirlemek için gerçekleştirilen yorulma testlerinde en çok kullanılan değerlerdir. Buradaki $R=-1$ değeri yüklemenin tam değişkenli yani $\sigma_{min}=-\sigma_{max}$ olduğunu göstermektedir. $R=0$ tip yüklemelerde yapılan ise gerilmenin sıfırdan maksimum yüklemeye çıkılıp yine sıfıra inilerek periyodik bir yükleme yapılmasına dayanır. Sabit genlikli yüklemelerde, bir çevrim iki evrilme sayısına eşittir. Değişken genlikli yüklemelerde çevrim yerine, evrilme sayısı kullanılır (Stephens vd., 2001).

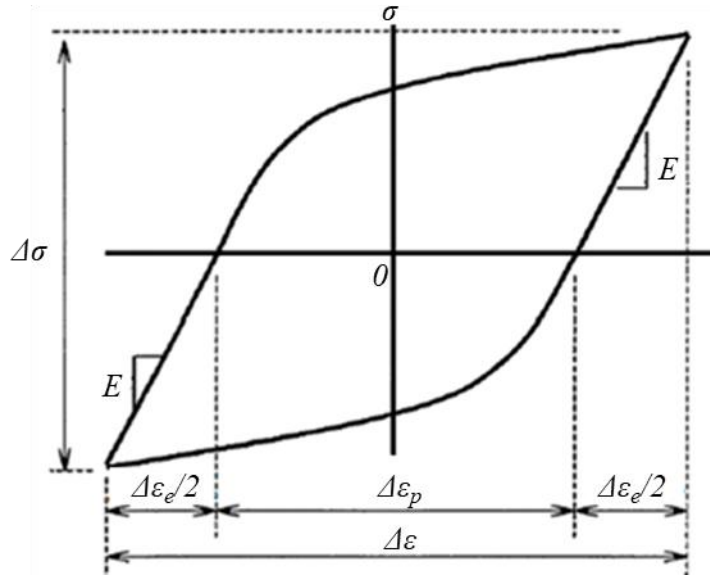
3.1.2 Kararlı durum çevrimsel gerilme gerinim ilişkisi

Bauschinger (1886) çalışmasında, bir malzemenin tekdüze çekme testi sonucu elde edilen mekanik özellikleri ile çevrimsel çekme testi uygulandığında elde edilen mekanik özelliklerinin birbirinden farklı olduğunu gözlemlemiştir. Yaptığı bu deneylerde, çevrimsel yükleme gerçekleştirildiğinde bu yüklemeden dolayı bir miktar plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu meydana gelen plastik deformasyondan dolayı ise malzemenin akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Şekil 3.3'de, çekme yükü uygulandığında meydana gelen akma gerilmesinin belirli bir seviyede olduğu görülmektedir. Fakat çevrimsel yükleme uygulandıktan sonra diğer bir ifade ile sırasıyla çekme yükünden sonra basma yükü uygulandığında bu akma noktasının düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, metallerin gerilme-gerinim davranışı tek bir plastik gerinimin tersine çevrilmesiyle değiştirilebilir olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3: Bauschinger etkisi (a) çekme yüklemesi (b) basma yüklemesi (c) çekme yüklemesi ve sonrasında basma yüklemesinin birbiri ardına uygulandığı durumlarda gerilme-gerinim ilişkisi.(Ghasabi, 2018).

Çoğu metal için sabit gerinim aralığı ($\Delta\epsilon$) kontrollü testlerin ilk çevrimlerindeki, gerilme-gerinim ilişkisi hızlı yumuşama veya sertleşmeden sonra kararlı hale gelir (çevrimsel sertleşme ve yumuşama, deformasyona karşı artan ve azalan direnci gösterir), bu nedenle yorulma ömrü ile karakterize edilebilir kararlı durum davranışı elde edilmiş olur. Bu davranış Histeresiz çevrimi olarak adlandırılan; bir malzemenin çevrimsel olarak kararlı gerilme-gerinim tepkisini gösteren eğrisi olup Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Stabil gerilme-gerinim Histeresiz çevrimi (Lee, 2011).

Burada, yükleme ve sonrasında çekme yükü altındaki bir malzemede meydana gelen elastik ve plastik işin toplamı Histeresiz çevriminin altında kalan alana eşittir. Buda toplam gerinim aralığı ($\Delta\epsilon$) ve toplam gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) ile tanımlanır.

Histeresiz çevrimi genellikle toplam yorulma ömrünün yarısında alınır. Elastik gerinim bileşeni ve plastik olanın ($\Delta\varepsilon_e$, $\Delta\varepsilon_p$) toplamı, Eş. (3.5) ile ifade edildiği gibi toplam gerinim aralığını verir (Lee, 2011);

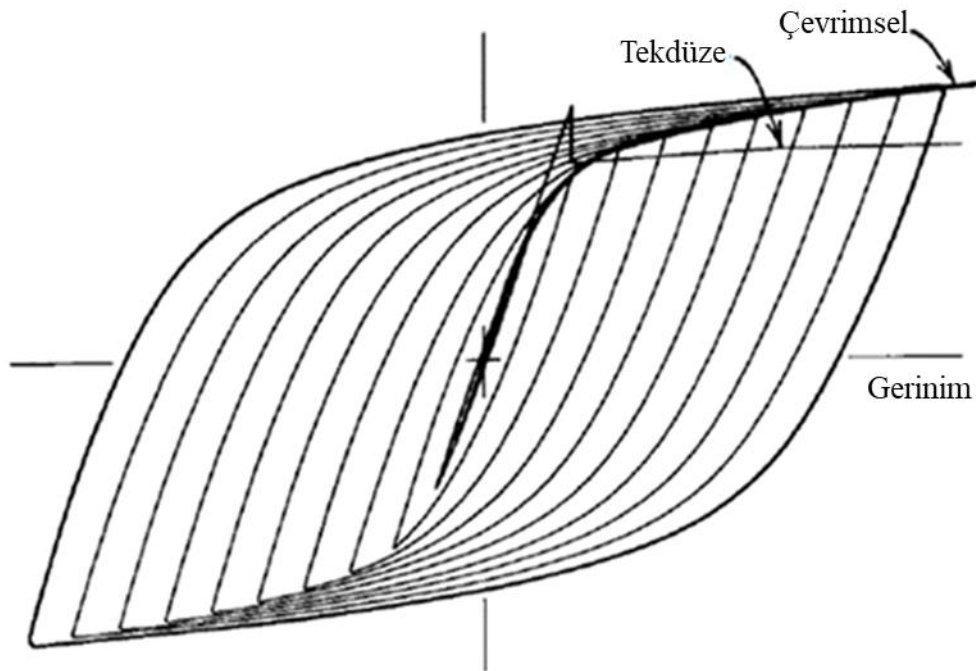
$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^e + \Delta\varepsilon^p = \frac{\Delta\sigma}{E} + \Delta\varepsilon^p \quad (3.5)$$

Burada Eş. (3.5) toplam gerinim genliğini ifade ederken, E ise elastik modülü göstermektedir.

Bir dizi çeşitli gerinim aralığı, testinden meydana gelen histeresiz çevrimleri alındıktan sonra çevrim uçlarının aynı σ - ε koordinatları üzerinde grafiğini çizersek, Şekil 3.5'de gösterildiği gibi bir çevrimsel gerilme-gerinim eğrisi oluşturulur. Meydana gelen bu eğri Ramberg-Osgood denklemini temsil etmektedir;

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \quad (3.6)$$

Eş. (3.6)'da belirtilen K' çevrimsel dayanım sabitini ve n' çevrimsel sertleşme pekleşmesini ifade etmektedir.



Şekil 3.5: Çevrimsel gerilme-gerinim eğrisinin oluşturulması (Masing, 1926).

Literatürde, gerilme-gerinim eğrisinin, çevrimsel gerilme-gerinim eğrisini oluşturan denklem ile de temsil edilebileceğine dair çalışma gerçekleştirilmiştir (Masing, 1926). Fakat bu varsayım yalnızca homojen malzemeler için geçerli olduğu vurgulanmıştır.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad (3.7)$$

Eş. (3.7)'de gösterilen ε_a^e ve ε_a^p elastik ve plastik gerinim genlik değerlerini ifade etmektedir. Bu Eş. (3.7), gerinim aralığı ($\Delta\varepsilon$) ve gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) düşünülerek yeniden yazıldığında;

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\Delta\varepsilon^e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon^p}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'} \quad (3.8)$$

Eş. (3.8) sadeleştirildiğinde de Eş. (3.9)'daki formunu alır;

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{2E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'} \quad (3.9)$$

3.1.3 Yorulma ömrü

Malzemelerin yorulma ömrü üç aşamada tamamlanmaktadır. Bunların ilki olan çatlak başlangıcı gerçekleştiikten sonra ikincisi olan belirli bir kritik ölçüye kadar çatlakların ilerlemesi ve son olarak da ani kırılma ile yorulma ömrünün belirtilen bu üç aşaması tamamlanmış olur. Gerilme ömrü yaklaşımı bu üç aşamayı da kapsayarak malzemenin yorulma ömrünü belirleyen geleneksel bir yöntemdir. Gerilme ömrü yaklaşımı günümüze kadar geliştirilmiş neredeyse tüm ampirik ya da analitik yöntemleri desteklemekle birlikte çok sayıda malzeme verisine haiz olması ile bilinmektedir. Fakat son yıllarda ömür hesaplama çalışmalarında bu üç yöntemi birbirinden ayırarak veya kırılma mekaniği tabanlı yöntemleri kullanarak yorulma ömrü tayini yapılması konusuna odaklanılmıştır (Collins vd., 2015).

S-N eğrisi olarak da tanımlanan yorulma ömür eğrisi üzerinde, indüklenen çevrimsel gerinimlere göre iki çevrimsel yükleme alanı tanımlanır. Yükleme nispeten düşükse, indüklenen çevrimsel gerilmeler çoğunlukla elastik bölgededir ve yüksek sayıda çevrim veya uzun ömür elde edilir. Bu alan, YÇY bölgesi olarak adlandırılır. Öte yandan, çevrimsel yükler nispeten yüksek olduğunda, her çevrim sırasında önemli seviyelerde indüklenmiş plastik gerinimler vardır. Sonuç olarak hasara kadar olan çevrim sayısı düşük ve ömür kısadır. Bu alan, DÇY bölgesi olarak adlandırılır.

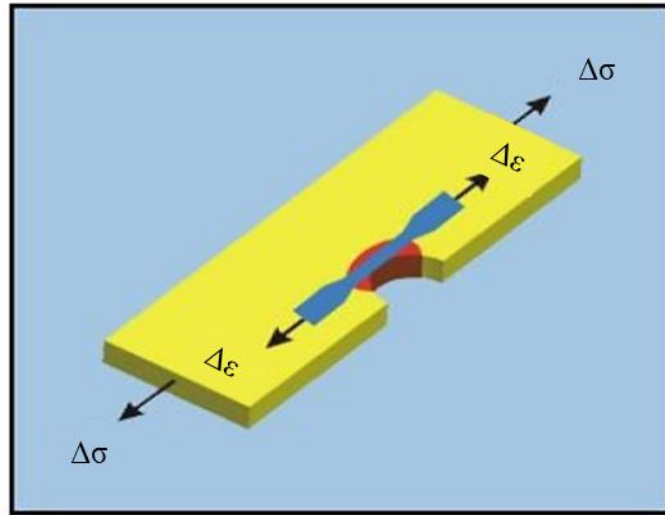
YÇY bölgesindeki düşük indüklenen plastik gerilmeler nedeniyle, gerilme ömrü yaklaşımı bu alandaki ömrü tahmin etmek için uygulanabilir, ancak yüksek seviyelerde plastik gerilmelerin varlığına göre düşük çevrim yorgunluğunda gerilme

ömrü yöntemi uygun değildir. Bu nedenle, DÇY bölgesinde yorulma ömrünü tahmin etmek için, bir sonraki bölümde tartışılacak olan gerinim ömür hesaplama yaklaşımı uygulanabilir.

3.1.4 Gerinim ömrü hesaplama yaklaşımı

Günümüzde yorulma ömür tayini problemlerinde gerinim temelli ömür hesaplama yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü gerinim ölçülebilir ve DÇY problemlerinin çözümlemesinde diğer yöntemlere göre doğru sonuçlar vermektedir. Özellikle de çentikli malzemelerin yorulma ömrü tespitinde en yaygın kullanıma sahip metot da gerinim tabanlı yöntemlerdir.

Gerinim ömür tespit yöntemi; esasen Şekil 3.6'da gösterilmiş parçaya uygulanan gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) yerine parçada meydana gelen lokal gerinim aralığı ($\Delta\epsilon$) değerinden yola çıkarak ömür hesabı yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde, Şekil 3.6'da gösterildiği parçanın ömrünü hesaplayabilmek için çentiğin olduğu bölgede meydana gelen gerinim değerleri ve bu bölgenin malzeme özellikleri alınarak, yüzeyi parlatılmış deney yorulma numunesine bahsi geçen veriler aktarılmış varsayılır. Bu deney numunesinin üstünde meydana gelen gerinim değerinin tekrarlı bir şekilde uygulanması sonucu çatlak başlangıcına kadar maruz kaldığı çevrim sayısı hesaplanarak gerinim tabanlı yorulma ömrü belirlenmiş olunur.



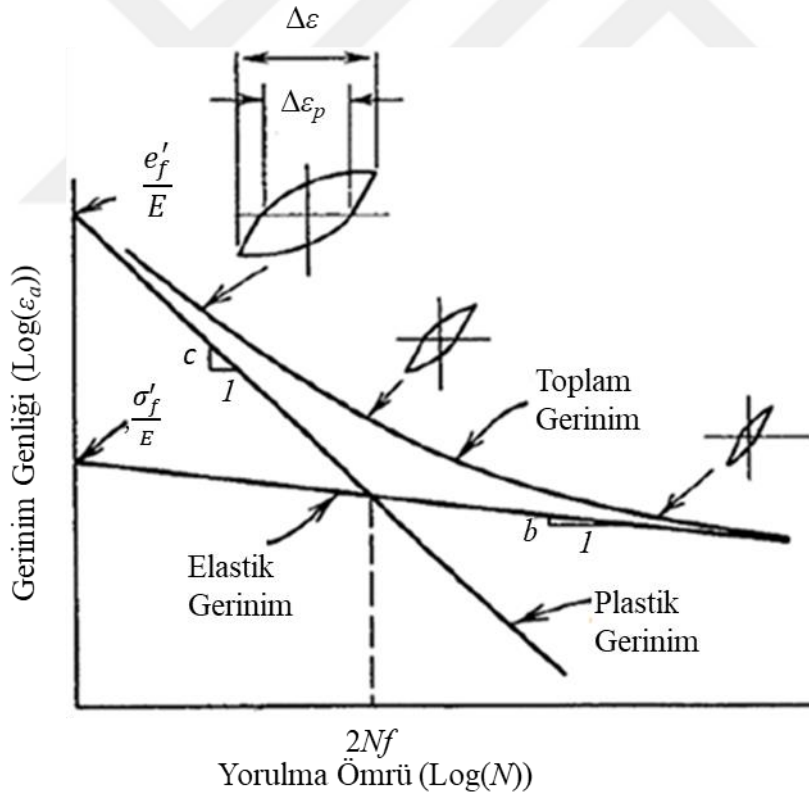
Şekil 3.6: Gerinim tabanlı ömür hesaplama yaklaşımı konsepti (Ghasabi, 2018).

Bu konseptin yardımıyla, düz numunenin çentikli kökünde gerilme-zaman geçmişi ve gerilme-ömrü yorulma özellikleri biliniyorsa, çevrimsel yükleme altında bir bileşenin yorulma çatlak başlama ömrünü hesaplamak mümkündür. Daha sonra, kırılma

mekaniği konseptlerini kullanarak, bileşenin kalan yorulma çatlak büyüme ömrünü belirlemek basittir. Gerinim tabanlı yaklaşıma lokal gerinim yaklaşımı da denir. Çünkü, yorgunluk hasarı hesaplamaları lokal gerinimlerin doğrudan değerlendirilmesiyle yapılır.

Malzemelerin yorulma ömrünün çoğunluk kısmında Histerezis çevrimleri baskın olabilir ve elastik ya da plastik gerinim genlikleri, Histeresiz eğrisinin oluşumuna kadar düşüş gösterebilir. Hasarlanma için çevrim sayısı 10 ila 10^6 arasında olabilir. Çoğu ömür çevrimi yaklaşık 10^5 'ten az olduğundan, gerinim ömrü yorulmasına düşük çevrim yorulma da denir.

Şekil 3.7'de gösterilen gerinim ömrü yorulma eğrileri, Log-Log ölçeklerinde çizilmiştir. Bu şekilde N , hasara kadar olan çevrimlerin sayısıdır ve $2N$, hasara giden evrilme sayısıdır. Gerinim ömrü eğrileri için en önemli hasar kriteri olarak, tespit edilebilir çatlakın görüldüğü çevrim sayısı kabul edilebilir.



Şekil 3.7: Toplam gerinim ömür eğrisi şematik gösterimi (Ghasabi, 2018).

Şekil 3.7'den anlaşılacağı üzere toplam gerinim genliğinin, kararlı durum histerezis çevrimleri üzerindeki elastik ve plastik gerinim bileşenleri olarak ikiye ayrıldığı görülebilir. Hem elastik hem de plastik eğrileri düz çizgiler olarak tahmin etmek

mümkündür. Belirli bir ömürde (N) elastik ve plastik gerilmeleri toplayarak, toplam gerinim hesaplanabilir. Plastik gerinim bileşeni, büyük gerinimlerde ve kısa ömürlerde (DÇY) baskındır ve elastik gerinim bileşeni, küçük gerinimlerde ve uzun ömürlerde (YÇY) baskındır. Şekil 3.7'den, σ'_f/E ve ϵ'_f/E , sırasıyla elastik bileşen ve plastik bileşen için $2N_f = 1$ 'deki iki düz çizginin kesişim yerleridir. Burada; b ve c , sırasıyla elastik ve plastik gerinim eğrilerinin eğimleridir. Bu bilgilerin doğrultusunda, küçük düz aksenal numunelerin gerinim ömür verilerinin denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon^e}{2} + \frac{\Delta\epsilon^p}{2} = \frac{\Delta\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3.10)$$

Bu denklemde sırasıyla; parçada meydana gelen gerinim aralığı $\Delta\epsilon$, gerinim genliği ϵ_a , elastik gerinim genliğindeki değişim $\Delta\epsilon^e$, plastik gerinim genliğindeki değişim $\Delta\epsilon^p$ olarak ifade edilmiştir. Ayrıca; $\Delta\sigma'_f$ yorulma dayanım katsayısının değişimini, E elastik modülü, N , yapının yorulma ömrünü ifade eden çevrim sayısını, b yorulma dayanım üssünü, ϵ'_f yorulma süneklik katsayısını, c yorulma süneklik üssünü ifade etmektedir.

Eş. (3.10)'u verilen bir gerinim genliği ile N_f değerini elde etmek için çözmek istediğimizde; gerinim genliği setini iteratif olarak çözebilecek bir tekniğe veya sayısal ya da grafiksel çözümlere ihtiyaç duyulur.

Eş. (3.10)'un ilk bölümü; yorulma ömrünü elastik gerinimle ilişkilendiren Basquin (1910) tarafından önerilen ömür eşitliğidir ve bu eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3.11)$$

Bu denklemde σ_a , gerilme genliğini ifade etmektedir.

Eş. (3.10)'un ikinci kısmı, yorulma ömrünü plastik gerinim ile ilişkilendiren ve Manson (1953), Coffin (1962) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilen Manson-Coffin eşitliğidir;

$$\frac{\Delta\epsilon^p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3.12)$$

Elastik ve plastik gerinim ömrü eğrilerinin kesişme noktasına geçiş yorulma ömrü denir. Bu ömür, gerinimlerin elastik ve plastik bileşenleri eşit olduğunda ve şu şekilde ifade edildiğinde oluşur:

$$2N_t = \left(\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f}\right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (3.13)$$

Geçiş yorulma ömründen daha az olan ömür, gerinimlerin çoğunlukla plastik olduğu DÇY rejimindedir. ($2N_t$) 'den büyük ömürler ise gerinimlerin esas olarak elastik olduğu YÇY rejimindedir.

Çentiksiz düz numunelerin gerinim ömrü testinde; hasarlanmanın malzeme üzerinde 0,25 ila 5 mm'lik yorulma çatlakları uzunluğuna erişinceye kadarki geçen çevrim sayısı anlamına geldiği ortaya konmuştur. Ancak bu aralık büyük olduğu için 1 mm yorulma çatlaklarının uzunluğu o malzemenin ömrünün tayin edildiği hasar boyutu olduğu ortaya konulmuştur (Stephens vd., 2001).

Gerinim tabanlı yaklaşım hem DÇY hem de YÇY rejimlerini kapsar ve her biri için uygulanabilir. Küçük plastik gerinimlerin mevcut olabileceği uzun ömürlü durumlarda, bu yaklaşım Eş. (3.10)'deki plastik gerinim terimi ihmal edilerek kullanılabilir. Eş. (3.10), bu şekilde gerinim ömrü denklemi Basquin'in Eş. (3.11) denklemine indirgenmiş olur (Stephens vd., 2001).

3.1.5 Gerinim yorulma ömür parametrelerinin tahmini

DeneySEL gerinim ömrü yorulmasına ilişkin veri bulunmadığında, bir malzemenin çevrimsel yorulma davranışını tahmin etmek mümkündür. Bir Log-Log ölçeği kullanıldığında, gerilme aralığına, $\Delta\sigma / 2$, uyan doğrusal en küçük karelerin kesişme noktası ve eğimine karşı denk gelen hasar evrilme sayısı, $2N_f$, yorulma dayanım katsayısı, σ'_f ve yorulma dayanım üssü, b , değerlerini elde etmeyi sağlar.

Yukarıdaki tahmine benzer şekilde, bir Log-Log ölçeği kullanılarak, doğrusal en küçük karelerin kesişme noktası ve eğimi, plastik gerinim genliğine, $\Delta\varepsilon_p/2$, karşı denk gelen hasar evrilme sayısı, $2N_f$, yorulma süneklik katsayısı, ε'_f ve yorulma süneklik üssü, c değerlerine ulaşmayı sağlar. Plastik gerinim genliğinin belirlenmesi iki yolla yapılabilir, biri doğrudan stabil $\sigma=0$ 'daki kararlı histerezis çevrimlerinin genişliğinin yarısından ölçmek, diğeri ise aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplamaktır (Stephens vd., 2001).

$$\frac{\Delta\varepsilon^p}{2} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} - \frac{\Delta\sigma}{2E} \quad (3.14)$$

Çevrimsel dayanım sabiti K' ve çevrimsel sertleştirme pekleşmesi sabiti n' değerlerini elde etmek için, plastik gerinim aralığına karşı ($\Delta\varepsilon$), stabil gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) verileri aynı grafikte çizdirilir. Burada DCY ömrü parametreleri kullanarak; K' ve n' değerleri tespit edilebilir;

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{\frac{b}{c}}} \quad (3.15)$$

$$n' = \frac{b}{c} \quad (3.16)$$

3.1.6 Çentiğin malzeme davranışına etkisi

Yorulma çalışmalarındaki kilit noktalardan biri çentiklerin etkisidir. Çentikler, malzemelerin üretimleri sırasında meydana gelen süreksizliklerden kaynaklanır ve yüzeyi boyunca homojenliğini yitirmesine sebep olmaktadır. Bu bölgelerin önemli olmasının sebebi ise çentiğin olduğu bölgelerde gerilme ve gerinim yığılmalarının meydana gelmesi nedeniyle malzemenin hem statik hem de dinamik yüklere karşı dayanımının düşmesine sebep olmaktadır.

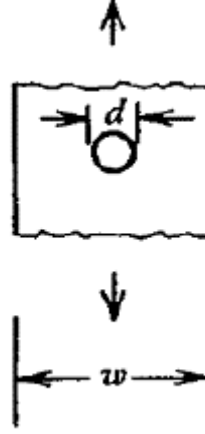
3.1.6.1 Gerilme konsantrasyonu “ K_t ”

Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin konsantrasyonu çentiklerde meydana gelir ve $\sigma/\varepsilon = \text{sabit} = E$ olduğu sürece, bu konsantrasyon K_t ile karakterize edilir ve şu şekilde tanımlanır;

$$K_t = \frac{\sigma_\zeta}{\sigma} = \frac{e}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

Bu eşitlikte, σ_ζ ve e sırasıyla çentikteki yerel gerilme ve gerinimi, σ ve ε ise nominal gerilme ve gerinimi temsil etmektedir.

Şekil 3.8’de delikli bir plaka gösterilmektedir. Burada delik çapı, d ve levha eni, w ile gösterilmektedir. Nominal gerilme, yükün bu plakanın net kesit alanına bölünmesi olarak tanımlanır. Net alan, çentik dikkate alınmayan kesit alanıdır.



Şekil 3.8: Üzerinde delik olan bir levha (Ghasabi, 2018).

Gerilme konsantrasyon faktörünün hesaplanması için kullanılan yöntemler;

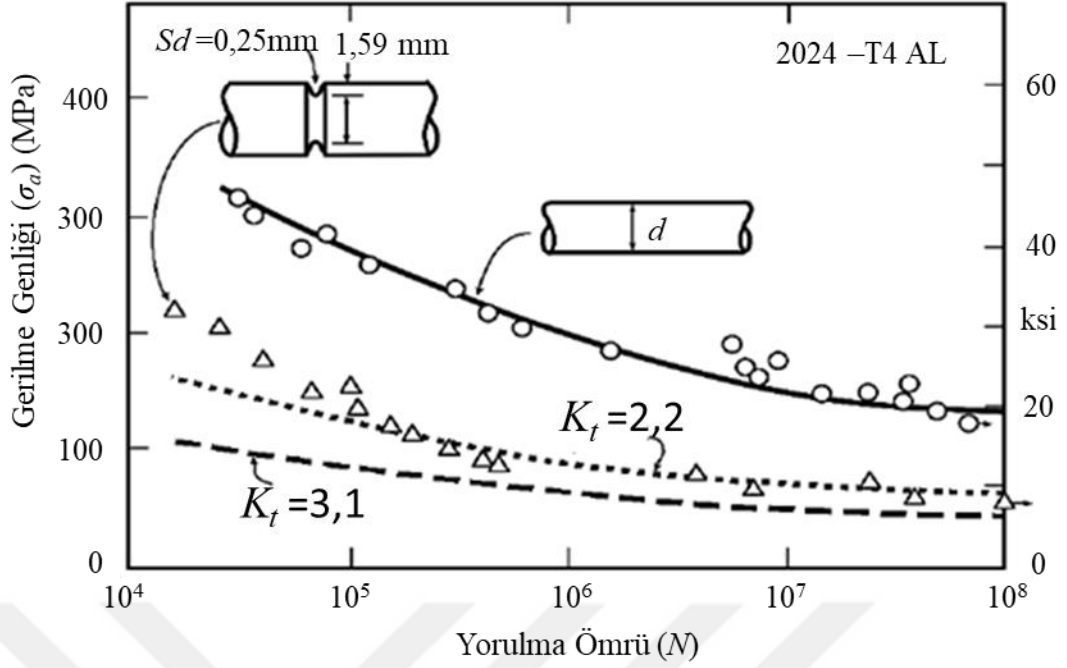
- Elastisite teorisi
- Nümerik çözümler
- Deneysel ölçümler (foto-elastisite ve gerinim ölçerler)

En yaygın olarak kullanılan yöntem ise nümerik hesaplamalar olup sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar analizlerinde, doğru sonuçlar elde etmek için çentik ucunun etrafında çok sıkı bir ağ örgüsü atılması gerekir.

3.1.6.2 Yorulma çentik faktörü “ K_f ”

Şekil 3.9’da çentiksiz ve çentikli bir numunenin gerilme-ömrü eğrisini gösterilmektedir. Burada, çentikli durumlarda belirli bir ömür için gerilme genliğinin azaldığı görülebilir. Bu azalma K_t faktörü ile belirlenmelidir. Ancak yine Şekil 3.9’dan görüldüğü üzere, deneysel veriler incelendiğinde K_t faktörünün YÇY bölgesinde beklenenden daha az etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, özellikle uzun ömürler için ($N \geq 10^6$) gerçek azalma, K_f faktörü ile karakterize edilir ve buna yorgunluk çentik faktörü denir. K_f aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$K_f = \frac{\text{Çentiksiz numunenin yorulma dayanım limiti}}{\text{Çentikli numunenin yorulma dayanım limiti}} \leq K_t \quad (3.18)$$



Şekil 3.9: Alüminyum alaşımlı malzemede bir çentiğin, yorulma ömür davranışı üzerindeki etkisi ve K_t veya K_f kullanılarak tespit edilen yorulma dayanım limitindeki değişimin karşılaştırması (MacGregor vd., 1952).

Burada, büyük çentik ucu yarıçapı Sd için, K_f değeri K_t değerine eşit olacaktır, ancak küçük çentik yarıçapı için (daha düşük K_f ve daha uzun yorulma başlama ömrü ve daha az hasar) fark büyük olacaktır. Bu farkın nedeni, lokal akma davranışı veya gerilme alanı yoğunluğu teorisi ile açıklanabilir (Yao, 1993; Qylafku, 1999; Pluvinaige, 2002). Çevrimsel davranışın neden olduğu çentik kökündeki akma, özellikle daha kısa ömürlerde çentik kökü gerilmesini azaltır. Bu açıklama, yerel akma teorisi tarafından önerilmektedir ve gerilme alanı yoğunluğu teorisi, çentik kökünün yüzeyindeki maksimum gerilme yerine, çentik kökünde malzemenin sonlu bir hacmi üzerinde etkili olan ortalama bir gerilmenin yorulma ömrünü kontrol ettiğini varsaymaktadır. Bu değer K_t kullanılarak hesaplanır. Bu ortalama gerilme, maksimum yüzey gerilmesinden daha düşüktür (Stephens vd., 2001).

3.1.6.3 Çentik hassasiyet faktörü “ q ” ve “ K_f ” ampirik tahmini

Çentik hassasiyet faktörü, q , şu şekilde ifade edilebilir:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (3.19)$$

Bu denklemde ifade edilen q değeri 0 ($K_f = 1$, çentik etkisi yok) ile 1 ($K_f = 0$, tam çentik etkisi) arasındadır. Peterson (1974) aşağıdaki gibi q için tahmini bir formül önermiştir:

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{Sd}} \quad (3.20)$$

α , malzemenin boyutlarına bağlı sabit ve Sd , çentik kökündeki yarıçapı ifade etmektedir.

Eş. (3.19) ile Eş. (3.20) birleştirildiğinde, K_f 'yi doğrudan α cinsinden hesaplamak için bir formül elde edilir;

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{\alpha}{Sd}} \quad (3.21)$$

q ve K_f için başka bir ampirik ilişki Neuber tarafından önerilmiştir;

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{Sd}}} \quad (3.22)$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{Sd}}} \quad (3.23)$$

Eş. (22) ve (23)'de gösterilen β , Neuber malzeme sabitidir.

4. YORULMA ÖMÜR ANALİZ MODELİ

Eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömrünün nümerik olarak hesaplanması için ilk olarak kafes yapı 3 boyutlu tasarım programları kullanılarak modellenir. Sonrasında bu kafes yapı SE yöntemi kullanılarak yarı-statik analizlere tabi tutulur. Bu analizlerden elde edilen ve parçada meydana gelen gerilme-gerinim bilgileri yorulma ömür analiz modeline aktarılarak burada gerinim tabanlı yorulma ömür çalışmaları gerçekleştirilir. Her bir gerilme değeri için yorulma analizleri tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilerek o kafes yapısına özgün yorulma ömür eğrisi çıkartılır.

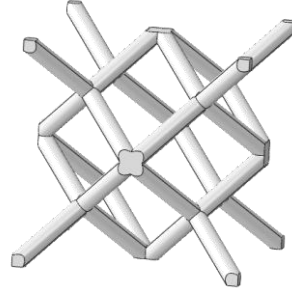
Çalışmanın bu bölümünde, tez kapsamında kullanılan gerinim tabanlı yorulma ömür analizi metodolojisi anlatılmıştır. Bu metodoloji anlatılırken, literatürde gerilme tabanlı ömür analizi ile Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından incelenen, deneysel olarak da Amin Yavari vd. (2013) tarafından yorulma ömür eğrisi verilmiş EDOY kafes yapı üzerinden açıklamalar yapılmıştır. Bölüm 4.1’de bu metodolojinin ilk adımı olan kafes yapı için yarı-statik sonlu elemanlar analizi süreci anlatılmıştır. Bölüm 4.2’de ise kafes yapının Brown-Miller yöntemi kullanılarak yorulma ömür analizlerinin metodolojisi anlatılmıştır. Bu bölümün devamında, kafes yapıların yorulma ömür hesaplamalarını doğrudan birim hücre boyutlarındaki katı kütle yapının ömür değerinden hesaplayabilecek yenilikçi bir gerilme konsantrasyon katsayısı eşitliğinin nasıl türetildiği gösterilmiştir. Ayrıca, Bölüm 4.2’de; modellemeler sırasında, kafes yapıların gerinim tabanlı yorulma ömrü hesaplamalarında kullanılacak Brown-Miller yönteminin efektif kullanılabildiğini gösterme amacıyla literatürde Peng vd. (2020) tarafından yapılan çalışma tekrarlanmıştır. Buradaki amaç; yöntemin doğru kullanıldığını göstermek olduğu için bahsi geçen çalışmadaki veriler birebir kullanılarak aynı sonuçların elde edilebildiği gösterilmiştir.

4.1 Kafes Yapı Yarı-Statik Analizleri

Kafes yapıların yorulma ömür analizlerini gerçekleştirebilmek için yarı-statik analizlerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun en temel nedeni; basma veya çekme yükü altında kafes yapının her bir düğüm noktasında meydana gelebilecek lokal gerilme ve gerinimlerin tespit edilme ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Çünkü yorulma ömür analizlerinde kullanılacak ve parçaya tekrarlı bir şekilde uygulanacak yükleme profili, yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen lokal gerilme ve gerinim değerleridir. Bu tekrarlı yüklemeler aynı zamanda kafes yapının yorulma ömür eğrisini oluşturmak için kullanılan gerilme değeri olarak da kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda kafes yapıların yarı-statik analizlerini gerçekleştirmek için SE yöntemini kullanan Abaqus simülasyon programında yarı-statik analiz modeli oluşturulmuştur. Bu model altı basamakta oluşturulup sırasıyla, (1) kafes yapının 3 boyutlu tasarımı, (2) kafes yapıyı sıkıştırmak için kullanılacak alt ve üst kalıpların oluşturulması, (3) sonlu elemanlar analizi ile gerçek ortamı simüle etmek için gerekli sınır şartlarının oluşturulması, (4) parçaya uygulanacak yüklemenin belirlenmesi, (5) ağ örgüsü, malzeme verisinin belirlenmesi ve simülasyon programına aktarılması ve (6) kafes yapı ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayısının belirlenmesinden oluşmaktadır. Bu adımların hepsi aşağıdaki alt başlıklarda anlatılmıştır.

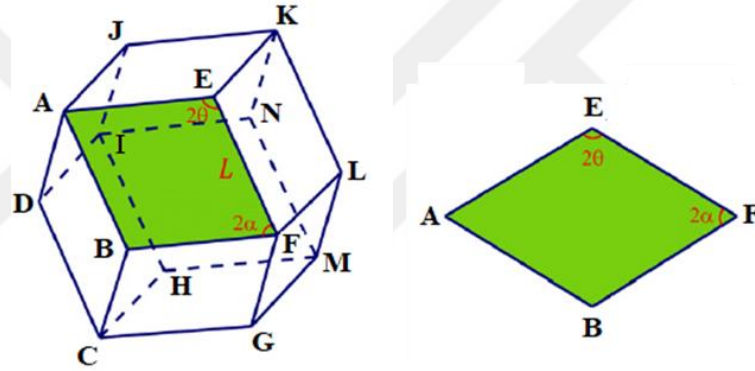
4.1.1 Kafes yapı tasarımı

Bu çalışmada örnek olarak kullanılacak kafes yapı Eşkenar dörtgenel onikiyüzlü (EDOY) olarak belirlenmiştir. Bu geometrinin seçilmesinin ana sebebi; çalışmanın sonucunda ömür analizlerinden elde edilen sonuçların literatürden elde edilen nümerik ve deneysel ömür sonuçları ile karşılaştırılacak olmasıdır. Bu karşılaştırma için literatürde EDOY geometrisini kullanarak hem nümerik analizler Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilmiş hem de bu geometri ile deneysel ömür tayini Amin Yavari vd. (2013) tarafından yürütülmüş olması, EDOY geometrisi üzerine yoğunlaşılmasının ana sebebi olmuştur. Ayrıca bu geometri kullanılarak; birim hücre yöntemi ile ömür analizlerinin gerçekleştirilmesi sırasında gerinim metodu ile ömür tayini için, gerilme konsantrasyon tespitinin literatürde yapılmamış olmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, 3 boyutlu modellemesi gerçekleştirilen EDOY hücre geometrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: EDOY geometrisi.

EDOY geometrisi oluşturulurken çubuk çapı $120 \mu\text{m}$ ve gözenek çapı $0,5 \text{ mm}$ olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ölçülerdeki bir EDOY hücrenin bulunduğu kübik hücrenin kenarları $1,52 \text{ mm}$ 'dir. Geometriyi oluşturmak için ihtiyaç duyulan iç açılar ise Şekil 4.2'de gösterildiği gibi $2\alpha=70,53^\circ$ ve $2\theta=109,47^\circ$ olarak belirlenmiştir (Babae vd., 2012).

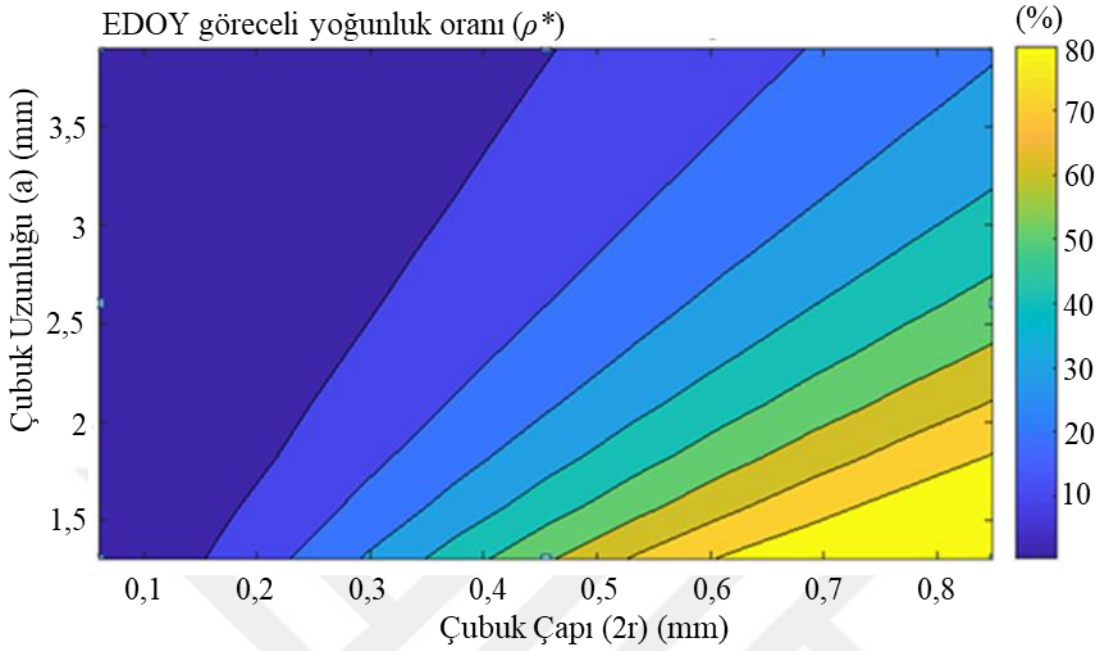


Şekil 4.2: EDOY çubuk yerleşim açıları (Babae vd., 2012).

Kafes yapılar, katı kütle ile arasındaki yoğunluk oranlarına göre bir başka ifade ile göreceli yoğunluk değerleri ile ifade edilirler. Bu çalışmada kullanılan EDOY geometrisinin çubuk çapı ve çubuk uzunluğunun değişimine göre göreceli yoğunluk değişim grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.1'de verilen hücrede tüm çubuklar aynı uzunlukta ve çapta olduğundan dolayı sadece tek bir çubuk uzunluğuna ya da çapına bağlı olarak göreceli yoğunluk ifade edilebilmiştir.

EDOY kafes yapının GY değerini hesaplayabilmek için Eş. (4.1) kullanılmıştır (Hedayati, Sadighi, vd., 2016). Bu eşitlikte göreceli yoğunluk değeri (ρ^*), çubuk yarıçapı (r), ve çubuk uzunluğu (a) ile ifade edilmiştir.

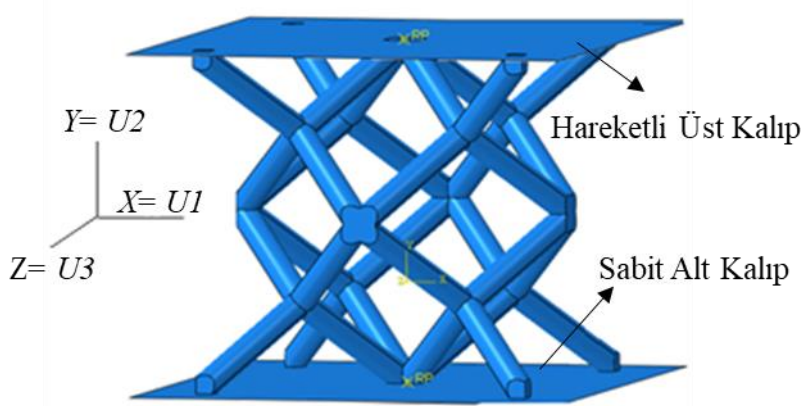
$$\rho^* = \frac{3\sqrt{3}}{2}\pi\left(\frac{r}{a}\right)^2 - \frac{27\sqrt{2}}{4}\left(\frac{r}{a}\right)^3 \quad (4.1)$$



Şekil 4.3: EDOY için farklı çubuk çapı ve uzunluklarında göreceli yoğunluk değerleri.

4.1.2 Kalıpların tasarımı

Kafes yapının tek eksenli basma testini, yarı-statik analiz modeli oluşturularak simüle ederken; kafes yapıyı sıkıştırabilmek için alt ve üstte iki adet levhaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu levhalardan bir adeti sabit (alt) diğeri ise hareketli (üst) levha olarak tasarlanmıştır. Burada levhaların deformasyonu kafes yapının deformasyonu ile kıyaslandığında göz ardı edilebilecek kadar düşük olduğundan dolayı kalıplar rijit olarak Şekil 4.4’de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4.4: Sabit ve hareketli rijit levhalar.

4.1.3 Ağ örgüsü

Bu modelde, kafes yapı deforme olabilir olarak tanımlanmış ve C3D10 dörtyüzlü (tetrahedral) ikinci dereceden elemanlar kullanılarak modellemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada eleman boyutu yakınsama analizleri gerçekleştirmek için 0,5mm, 0,25mm ve 0,125mm boyutlu üç farklı boyutta elemanlar ile analizler tekrarlanmıştır.

4.1.4 Sınır şartları

Yarı-statik analizlerin gerçekleştirilmesi için oluşturulan ve Şekil 4.3'te gösterilen modelin birinci adımında sınır şartları $U1 = U2 = U3 = R1 = R2 = R3 = 0$ olarak kabul edilmiştir. Fakat ikinci adımında ise kafes yapıda meydana gelmesi istenilen toplam gerinim değerinin %0,1 olması için, EDOY hücrenin uzunluğu 1,52 mm olduğundan, rijit levhaya (kalıp) $U2 = -0,152$ mm deplasman verilerek ikinci sınır şartı tanımlanmıştır.

4.1.5 Malzeme verisi

Bu modelleme çalışmasında Ti6Al4V-ELI malzemesinin verileri Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) çalışmasından elde edilmiş olup, kullanılan değerler Çizelge 4.1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1: Ti6Al4V malzeme verisi.

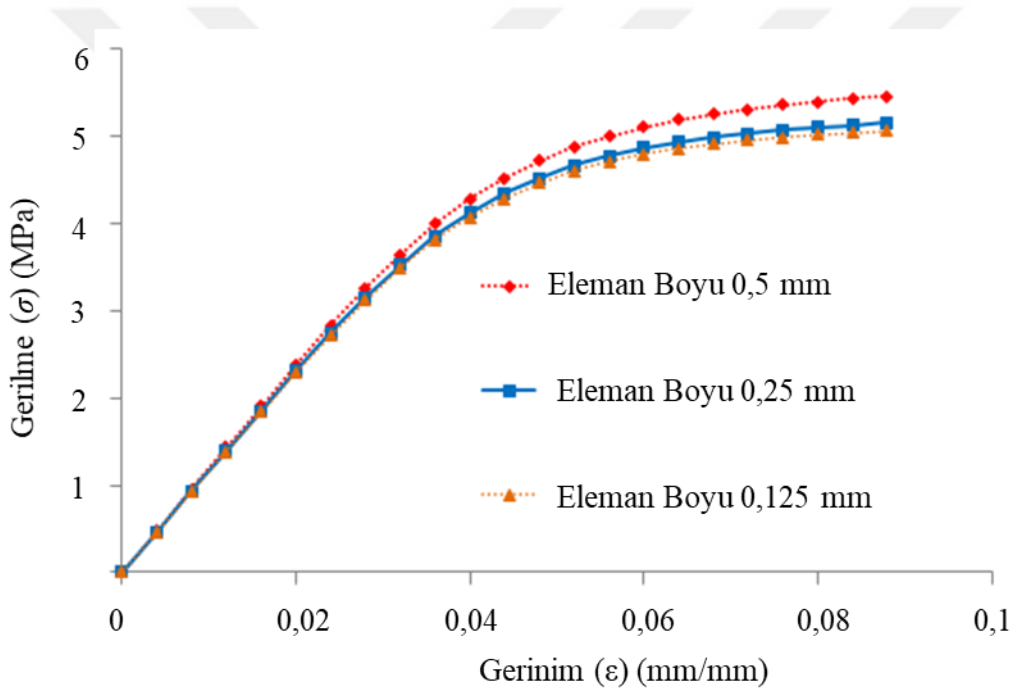
Özellikler	Değeri
Elastik Modül	122,3 GPa
Poisson 's Oranı	0,342
Plastik Bölge Eğimi	1,25 GPa
Akma Gerilmesi	1000 MPa
Maksimum Çekme Dayanımı	1,2 MPa

4.1.6 Kontak bölgesi sürtünme katsayısı

Kalıplar ile kafes yapı arasındaki sürtünmeyi modelleyebilmek için; teğetsel sürtünme modeli kullanılmış olup sürtünme katsayısı 0,3 olarak belirlenmiştir.

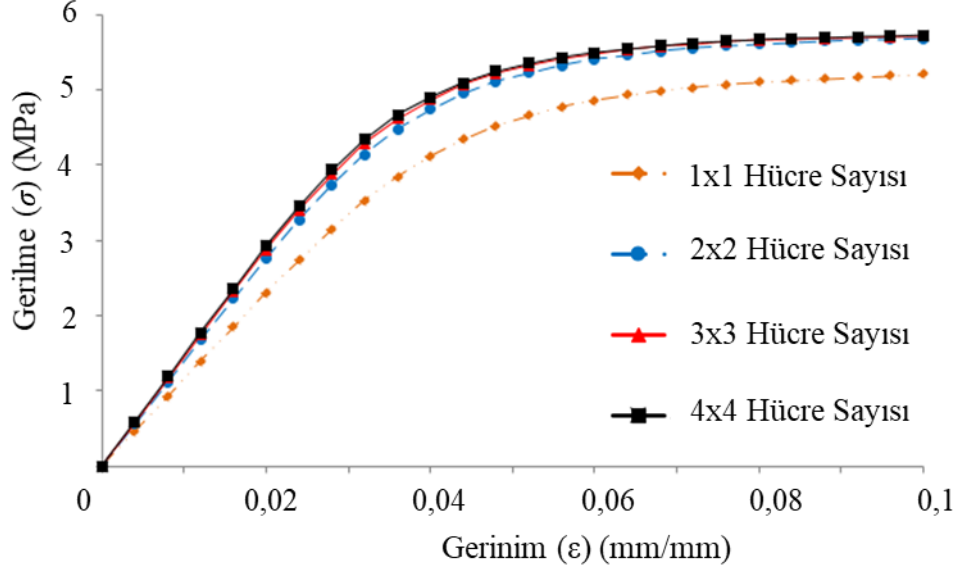
4.1.7 Yarı-statik analiz sonuçları

Sonlu elemanlar modeli hazırlandıktan sonra ilk olarak eleman sayısının değişimine bağlı malzemenin gerilme-gerinim eğrisindeki meydana gelen değişim sonuçları 3 farklı eleman boyu için elde edilmiş ve Şekil 4.5’de sonuçlar gösterilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde; eleman boyutunun 0,25 mm’nin altında olduğu durumlarda gerilme-gerinim eğrisindeki değişimin %1’in altında olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, sonlu elemanlar analizlerinde 0,25 mm boyutlu elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 4.5: Eleman sayısı yakınsama analizleri.

Eleman sayısı yakınsama analizlerinden sonra EDOY geometrisinin dört farklı hücre sayısı için sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre 2x2 ve daha yüksek hücre sayılarında (EDOY) analiz sonuçlarının artık hücre sayısından bağımsız hale geldiği gerilme-gerinim eğrisinin yaklaşık %0,5 gibi ufak bir değişime maruz kalmasından anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6: Hücre sayısı yakınsama analizleri.

Bu analizlerden, elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ve her bir düğüm noktasındaki; gerilme-gerinim geçmişi, ömür analizi için fe-safe programına aktarılmıştır.

4.2 Kafes Yapı Yorulma Ömür Analizleri

Bu bölümde, kafes yapının yorulma ömrünü belirleyebilmek için ortaya konulan ömür analiz modelinin nasıl oluşturulduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada kafes yapının yorulma ömür analizleri fe-safe programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. fe-safe programında ömür analiz modeli kurulması dört ana basamaktan oluşmaktadır; (1) yorulma analiz yönteminin belirlenmesi, (2) Ti6Al4V malzemedeki yapılmış köpek kemiği formu (dog-bone shape) yorulma test numunesinden elde edilmiş malzeme özelliklerinin programa aktarılması, (3) yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim geçmişinin programa aktarılması, (4) üretim kaynaklı kusurlardan dolayı ve parçanın geometrisinden kaynaklı parça üzerinde oluşan gerilme konsantrasyonunun belirlenmesi ve yorulma ömür modeline aktarılmasıdır.

4.2.1 Yorulma analiz yöntemi

Bu çalışmada, gerçekleştirilen ömür analizlerinde gerinim tabanlı yorulma analiz metodu kullanılmıştır. Gerinim tabanlı yöntemlerin seçilmesinin en büyük sebebi, gerinimin ölçülebilir olması ve DÇY problemlerinin çözümlemesinde diğer yöntemlere göre doğru sonuçlar vermesidir. Özellikle çentikli malzemelerin yorulma

ömrü tespitinde en yaygın kullanıma sahip metot da gerinim tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemin DÇY bölgesinde diğer metotlara göre daha verimli çalışmasının sebebi ise yöntemin doğası gereği hesaplamalarında lokal gerinim değerlerini kullanmasıdır. Bir malzemenin, yorulma ömür eğrisinin DÇY ömrü bölgesinde ömrünü sonlandırmasının sebebi ise malzemelerin üzerinde meydana gelen gerinimlerin baskın olmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Ayrıca, çentikli parçalarda gerinim tabanlı metotların ömür hesaplama kapasitesinin diğer metotlara göre daha iyi olmasının sebebi ise çentik bölgelerinde gerilme konsantrasyonundan dolayı plastik deformasyonun oluşması ve bu nedenle de gerinimin ömrü belirlemede baskın olmasından dolayı bu metotların avantajlı olduğu görülmüştür (Ghasabi, 2018).

Malzemelerin yorulma ömrünü tahmin etmek için birçok gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplama yöntemi vardır. Fakat sünek metaller için yorulma ömrünün en gerçekçi tahminini ve kırılğan metaller için makul derecede yorulma ömrü tahminini gösteren Brown-Miller teorisi olduğu bilinmektedir. Ayrıca bu yöntemde göre maksimum yorulma hasarının kayma gerinim düzleminde meydana geldiği ortaya konulmuştur (Brown ve Miller, 1973). Bu nedenle de bu yöntemde, malzemenin hasarı hem kesme geriniminin hem de bu düzleme normal olan gerinimlerin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Brown-Miller gerinim-ömür Eş. (4.2)'de gösterildiği gibidir;

$$\frac{\Delta\gamma_{maks}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = 1.65 \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + 1.75 \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (4.2)$$

Eş. (4.2)'de gösterilen $\Delta\gamma_{maks}$, kayma gerinimin maksimum değişimini ve $\Delta\epsilon_n$ normal gerinimin maksimum değişimini göstermektedir. Eş. (4.1) ile gösterilen Brown-Miller ifadesine bakıldığında Eş. (3.10) ile gösterilen gerinim tabanlı hesaplama yönteminden türetildiği açıkça görülmektedir. Brown-Miller formülünün üstünlüğünün kaynağı ise kayma ve normal gerinimleri bir arada hesaba katmış olmasıdır. Tüm bu sebeplerden dolayı bu çalışmada yorulma ömür analiz modelini oluştururken gerinim tabanlı Brown-Miller yöntemi seçilerek ilerlenmiştir.

Bu çalışmadaki amaç EDOY geometrili kafes yapının ömrünü gerinim tabanlı metotlar ile nümerik olarak tespit etmek ve literatürde gerçekleştirilmiş gerilme tabanlı nümerik analiz yöntemleri ile Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından ve deneysel çalışmalar ile Amin Yavari vd., (2013) tarafından tespit edilmiş ömür verileri ile

karşılaştırmak olduğu için bu çalışmalarda belirtildiği gibi tüm analizlerde $R = 0,1$ olarak kullanılmıştır. Fakat yorulma ömür değerleri genellikle ortalama gerilme etkilerini ortadan kaldırmak için $R = -1$ değerlerinde yani tam değişken yükleme altındaki şart için gerçekleştirilir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada Morrow ortalama gerilmesi kullanılarak her bir ömür analizi tekrardan gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçlarında; Morrow ortalama gerilme yöntemi kullanılarak ve kullanılmadan çözülmüş sonuçlar ayrı ayrı verilmiştir. Morrow ortalama gerilme yöntemi kullanıldığında ömür hesaplama eşitliği Eş. (4.3) ile gösterildiği gibi ortalama gerilme etkisini hesaba katacak şekilde form değiştirir.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4.3)$$

4.2.1.1 Brown-Miller yöntemi ile ömür analizi sonuçlarının doğrulanması

Çalışmanın bu bölümünde Brown-Miller yönteminin doğru bir şekilde kullanıldığını göstermek amacıyla; literatürde Peng vd., (2020) tarafından gerçekleştirilmiş çalışma takip edilerek, BK ve HMK kafes yapıların Brown-Miller yöntemi ile yorulma analizleri yine Peng vd., (2020) çalışmasında geçen veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Buradaki amaç, Brown-Miller yöntemi ile hesaplama yapılırken bu çalışmalardaki veriler kullanıldığında aynı sonuçların elde edilebildiğini göstermek olduğu için Peng vd. (2020) çalışmasındaki analiz basamakları sırasıyla takip edilerek önce yarı-statik analizler tekrarlanmış ve sonrasında dinamik analizler ile BK ve HMK geometri kafes yapılarının yorulma ömürleri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır.

Yöntem doğrulama çalışması BK ve HMK geometrileri ile yapıldığından dolayı öncelikle bu geometrilerin 3 boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme sırasında, BK geometrisini oluşturan birim hücre boyutları sırasıyla eni, boyu ve yüksekliği 2x2x2 mm, çubuk yarı çapı 0,53 mm ve çubuk boyu 2 mm olarak tasarlanmış ve bu tasarıma göre ise göreceli yoğunluğu (ρ^*), %45 olarak elde edilmiştir. HMK geometrisini oluşturan birim hücre boyutları sırasıyla eni, boyu ve yüksekliği 4x4x4 mm, çubuk yarı çapı 0,72 mm ve çubuk boyu 4 mm olarak tasarlanmış ve bu tasarıma göre ise göreceliği yoğunluğu (ρ^*), %,47,625 olarak elde edilmiştir.

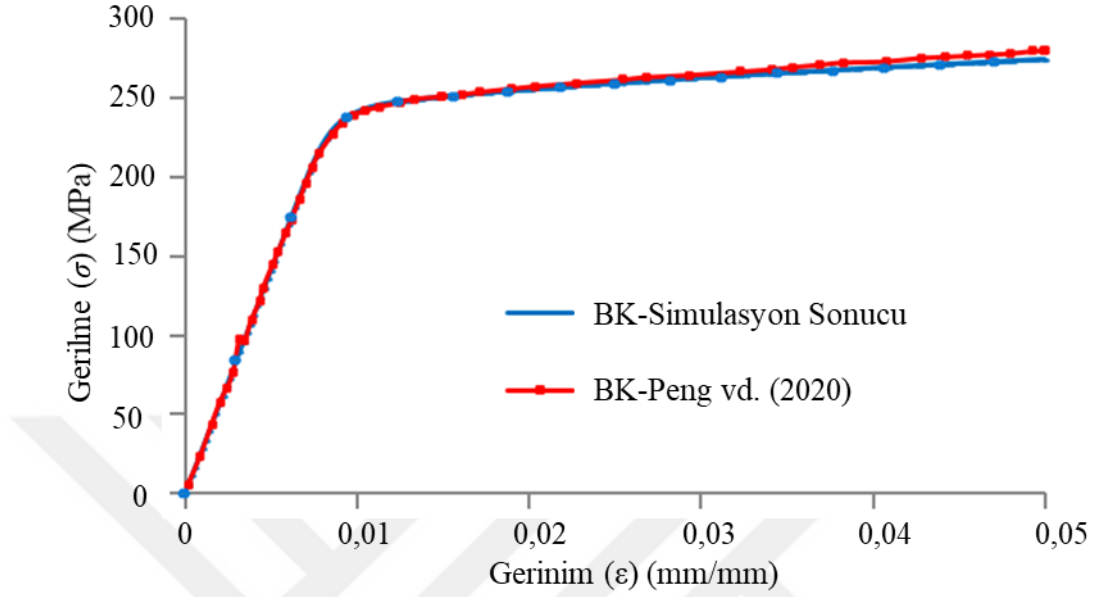
Kafes yapı tasarımı sonrasında basma testini Abaqus programında simüle etmek amacıyla üst taraftaki hareketli, alt taraftaki sabit olacak 2 düz rijit levha ve bu kalıplar arasında kafes yapının sıkıştırılacağı yarı-statik analiz modeli kurularak BK ve HMK geometrilerinin statik yük altındaki davranışları simüle edilmiştir. Bu yarı-statik analizler sırasında, kullanılan malzeme verisi Çizelge 4.2’de gösterilmiştir (Peng vd., 2020). Bu veri Johnson-Cook malzeme verisi olarak simülasyon programına girilmiştir.

Çizelge 4.2: Ti6Al4V Johnson-Cook malzeme modeli (Peng vd., 2020).

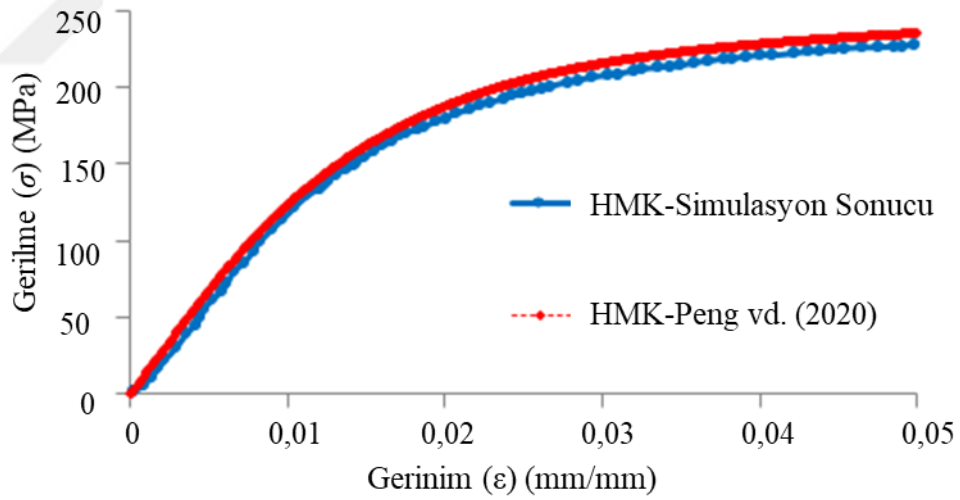
Parametre	Değer
Özkütle, ρ (kg/m ³)	4430
Elastik modül, E (GPa)	113,8
Poisson oranı, ν	0,342
Johnson-Cook akma gerilmesi, A (MPa)	1098
Sertleşme pekleşme parametresi, B (MPa)	1092
Sertleşme pekleşme üssü, n	0,93
Termal yumuşama sabiti, M	1,1
Gerinim oranı güçlendirme katsayısı, C	0,014
Referans gerinim oranı, ζ ($s-1$)	1
Ergime sıcaklığı, T_m (K)	1878
Geçiş sıcaklığı, T_t (K)	715

Kafes yapıyı sıkıştırmak için kullanılan levhalar ile yapı arasında teğetsel kontak tipi seçilerek sürtünme katsayısı 0,3 olarak girilmiştir. Yükleme ise kafes yapıda %5 oranında gerinim oluşturacak deplasman miktarı olarak tanımlanmıştır. Bu analizde tek deforme olabilen parça kafes yapı olduğu için bu yapı, C3D10 dörtyüzlü (ikinci derece) elemanlardan 20 bin adet kullanılarak modellenmiştir.

Yarı-statik analiz sonuçlarına bakıldığında Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi Peng vd. (2020) tarafından yapılan analizler ile örtüşen sonuçlar alındığı görülmektedir.



Şekil 4.7: BK geometrili kafes yapı yarı-statik analiz sonucu.



Şekil 4.8: HMK geometrili kafes yapı yarı-statik analiz sonucu.

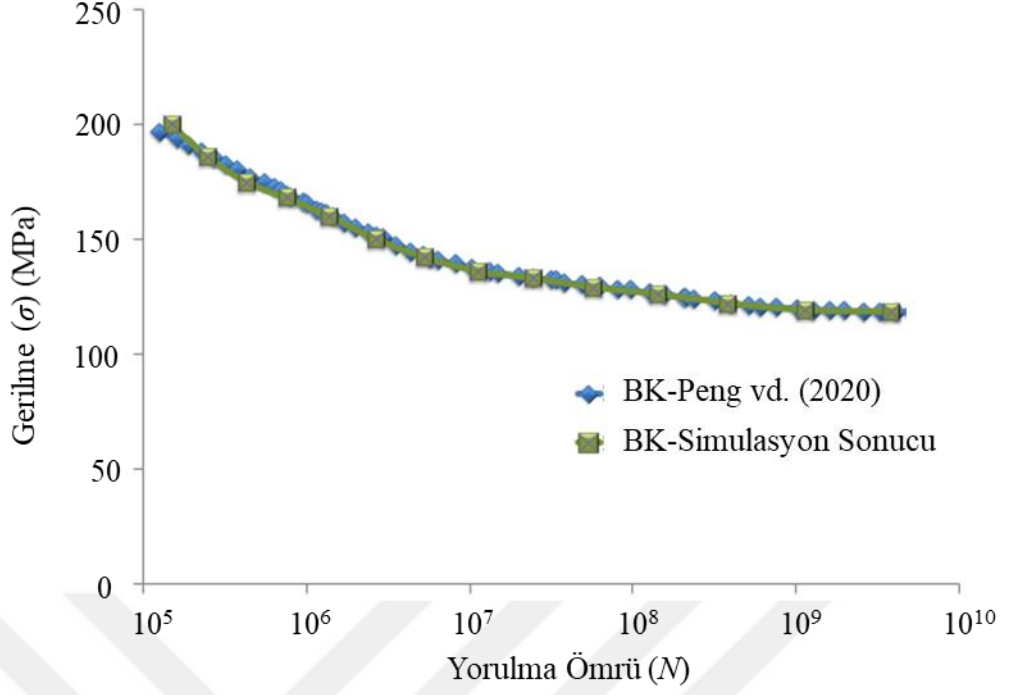
Yarı-statik analizler tamamlandıktan sonra dinamik analizleri gerçekleştirmek üzere fe-safe programında yorulma ömür modeli oluşturulmuştur. Yorulma ömür analiz modeli sırasıyla; (i) yorulma analiz yönteminin (Brown-Miller) seçilmesi, (ii) yarı-statik analiz sonuçlarının programa aktarılması, (iii) gerinim ömür parametreleri girilerek malzemenin yorulma ömür özelliklerinin belirlenmesi ve (iv) yükleme profilinin belirlenerek modelin tamamlanması ile dört ana aşamada tamamlanmıştır.

Yorulma ömür modelini oluştururken, ilk başta ömür hesaplama yöntemi olarak Brown-Miller kullanılmıştır. Peng vd. (2020) çalışmasında elde ettiği nümerik analiz sonuçlarını herhangi bir deneysel ömür analiz sonuçları ile karşılaştırmadığı için gerilme konsantrasyon parametresi kullanmayı göz ardı etmiştir. Bu nedenle gerilme konsantrasyon değerini ifade eden değer $K_{t(Toplam)} = 1$ olarak belirlenmiştir. İkinci olarak, yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim değerleri fe-safe programında oluşturulan bu ömür analiz modeline aktarılmıştır. Burada programa aktarılan gerilme-gerinim değerleri sayesinde aynı zamanda parçaya uygulanacak yükleme profili belirlenmiştir. Yükleme profili oluşturulurken ilk olarak malzemenin akma noktasında meydana gelen gerilme değeri ve gerilme oranı (R) 0,1 alınarak bir sinüs dalgası formunda yükleme profili oluşturulmuştur. Bu yüklemeye malzemenin yorulma ömrü belirlendikten sonra malzemenin yorulma dayanım limiti kadar $0,05 * \sigma_y$ adım aralıklarla yükleme profili oluşturulmuştur. Ömür analizinin son adımı olan gerinim ömür parametreleri ise Çizelge 4.3’de gösterildiği gibidir.

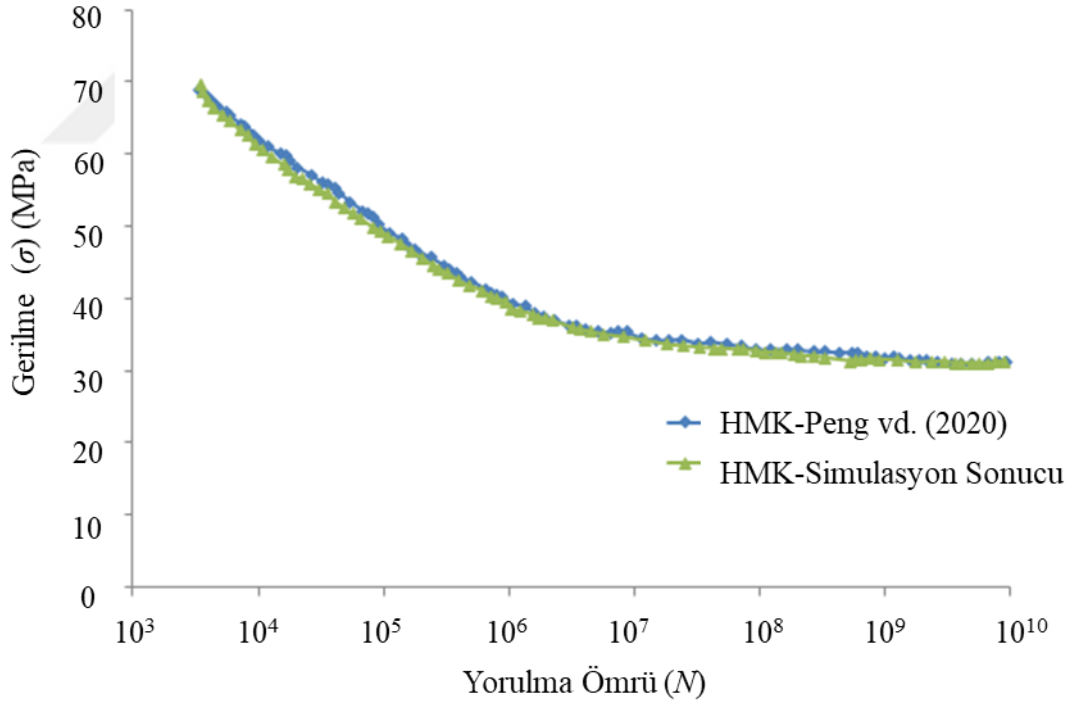
Çizelge 4.3: Ti6Al4V malzeme gerinim ömür parametreleri (Peng vd., 2020).

Malzeme Verisi	$\sigma'f$	$\epsilon'f$	b	c	K'	n'
Seeger malzeme verisi (Meggiolaro ve Castro, 2004)	1552,5 (MPa)	0,35	-0,095	-0,69	2315 (MPa)	0,1376

Yorulma ömür modeli ilk olarak yukarıda bahsedildiği gibi malzemenin akma noktasındaki gerilme değeri alınarak $R=0,1$ değerindeki yük profili için tespit edilmiştir. Sonrasında bu yükleme değeri $0,05 * \sigma_y$ aralıklar ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, uygulanan yüklemeye karşı gelen yorulma ömür sayıları elde edilmiştir. Tüm bu tekrarlı analizler, yorulma ömür dayanım noktasına kadar tekrarlandığında da malzemenin yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Bu çalışmada BK ve HMK geometrileri için gerçekleştirilen bu ömür analiz sonuçları Peng vd. (2020) tarafından elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında aşağıdaki Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de gösterildiği gibi bire bir örtüşen sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9: BK yorulma ömür analiz sonucu karşılaştırması.



Şekil 4.10: HMK yorulma ömür analiz sonucu karşılaştırması.

Bu analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere Brown-Miller yönteminin efektif bir şekilde kullanılabildiği ve sonraki bölümlerde ömür hesaplama yöntemi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

4.2.2 Gerinim ömür malzeme parametreleri

Brown-Miller metodu literatürdeki nümerik sonuçlarla doğrulandıktan sonra, yine literatürde bulunan deneysel çalışma sonuçları ile de doğrulanması hedeflenmiştir. Bunun için, deneysel sonuçların verildiği başka bir çalışmadaki kafes yapı (EDOY) ve malzeme (Ti6Al4V) türü kullanılmıştır. Ömür analizlerinde kullanılmak üzere Ti6Al4V malzemeden yapılmış köpek kemiği formulu yorulma test numunesinden elde edilmiş deneysel gerinim ömür parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Modelin oluşturulması için gerekli deneysel gerinim ömür malzeme parametreleri (Benedetti vd., 2018), (Meggiolaro ve Castro, 2004) ve (Dowling, 2013) çalışmalarından alınarak 3 farklı malzeme verisi için ömür analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede farklı çalışmalarda verilen malzeme verilerinin sonuçlara getirdiği farklılıklar incelenmiştir. Bu malzeme verileri Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

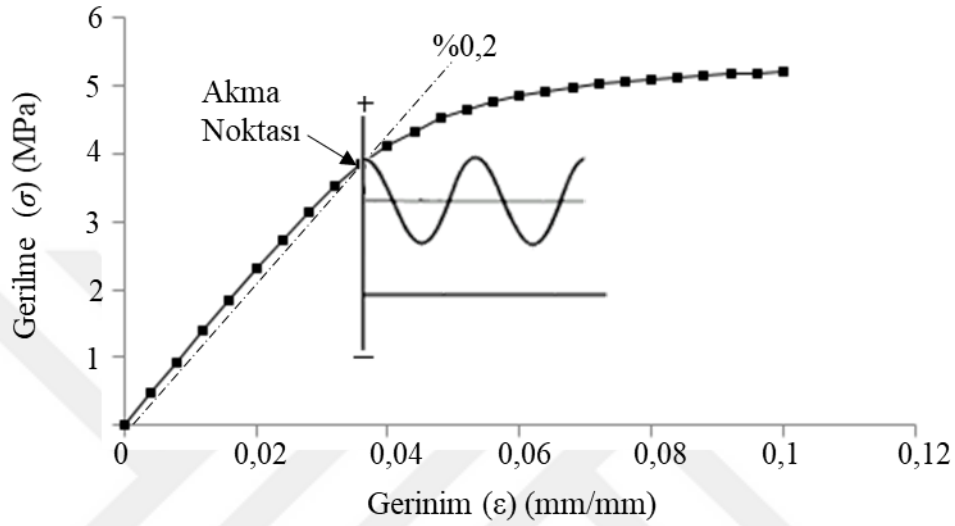
Çizelge 4.4: Ti6Al4V malzeme gerinim parametre değerleri.

Malzeme Verisi	$\sigma'f$ (MPa)	$\epsilon'f$	b	c	K' (MPa)	n'
Seeger malzeme verisi (Meggiolaro ve Castro, 2004)	2004	0,35	-0,095	-0,69	2315	0,137
(Benedetti vd., 2018)	3120	13.35	-0,186	-1,47	1875	0,105
(Dowling, 2013)	2030	0,841	-0,104	-0,68	1772	0,106

4.2.3 Yorulma yükleme profili

Yorulma ömür analizinin üçüncü adımı ise yükleme profilinin oluşturulmasıdır. Burada Şekil 4.11'de gösterildiği gibi yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen, gerilme gerinim geçmişinin akma noktasına denk gelen gerilme değeri, yorulma analizinde kullanılacak yükleme profili için maksimum gerilme değeri olarak alınarak sinüs dalgası şeklinde tekrarlı yük elde edilmektedir. Burada maksimum gerilme değeri uygulanmak istenen yüklemeyi belirlerken, minimum gerilme değeri ise gerilme oranı ile belirlenmektedir. Bu çalışmada, elde edilen ömür değerleri literatürdeki Amin Yavari vd. (2013) çalışmasından alınacak deneysel veri ile

karşılaştırılacağından dolayı ve bu çalışmalarda gerilme oranı $R=0,1$ olarak kullanıldığı için uygulanacak yüklemde minimum değer bu orandan elde edilmiştir. Burada belirtilen yükleme profili ile bir kez malzemenin ömrü belirlendikten sonra yine Şekil 4.11’de gösterilen akma noktasından aşağıya doğru $0,05*\sigma_y$ aralıklarda inerek her bir ayrı yükleme değeri için analiz tekrarlanmış ve bu yük değerlerinde elde edilen ömür sonuçlarından yorulma ömür eğrisi oluşturulmuştur.



Şekil 4.11: Yorulma ömür analizi yüklem profili.

4.2.4 Gerilme konsantrasyonunun belirlenmesi

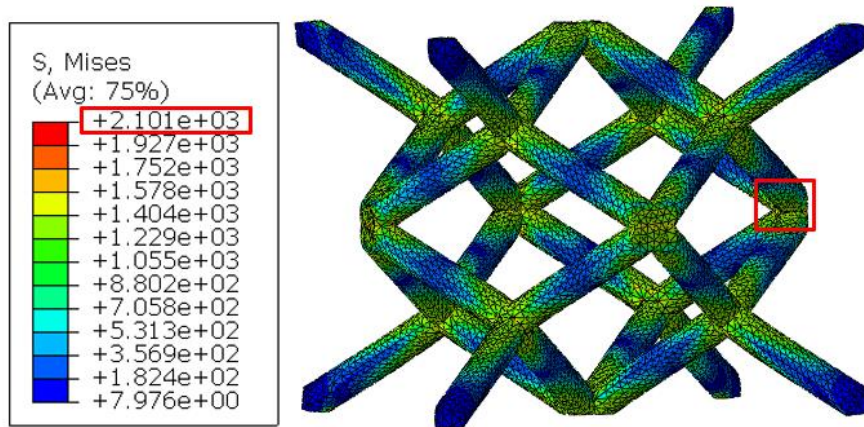
Katmanlı imalat sürecinde, çubukların enine kesitinde oluşan düzensizlikler, gözenekli yapıların yapısal rijitliğini ve dayanıklılığını sadece çok küçük alanlarda kesitler oluşturdukları için değil, aynı zamanda gerilme yoğunlaşmasına neden oldukları için de azaltır. Çubuk yüzeylerinin pürüzlülüğü, yerel heterojenlikler ve gerilme konsantrasyonları ile sonuçlanır. Katmanlı imalat ile üretilmiş bir kafes yapının farklı çubuklarında pürüzlülüğün rasgele dağılımından dolayı, yapının farklı yerlerindeki gerilme konsantrasyon faktörleri çok farklı olabilir (Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd., 2016). Verilen çalışmadaki bahsi geçen gerilme konsantrasyon sabiti yalnızca üretilmiş bir kafes yapının yüzeyinde meydana gelen kusur nedeni ile pürüzsüz bir yüzey üretilmesi durumundaki yorulma ömür değeri arasındaki farkı hesaplamaya yaramaktadır. Fakat bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak, toplam gerilme konsantrasyonunu ($K_{t(Toplaml)}$) oluşturan iki farklı gerilme konsantrasyon sabiti hesaplanması amaçlanmıştır. Bu toplam gerilme konsantrasyon yapısının bir tanesi kafes yapının tipine bağlı olarak elde edilecek maksimum gerilme konsantrasyonu

($K_{t(köşe)}$), diğeri ise eklemeli imalat proseslerinden kaynaklanan kusurların oluşturacağı gerilme konsantrasyonu ($K_{t(pürüzlülük)}$) ifade edecektir. Bu iki katsayının oluşturduğu toplam gerilme konsantrasyon katsayısının kullanım amacı; malzemesi Ti6Al4V olan ve SLE ile üretilmiş kafes yapıların bütün tipleri için her seferinde yeniden yorulma ömür analizlerini gerçekleştirmek oldukça meşakkatli olacağından dolayı kafes yapı ile aynı birim hücre boyutlarına sahip katı kütle ömür sonuçlarından, doğrudan kafes yapının yorulma ömür eğrisini hesaplamaktır.

4.2.4.1 Kafes yapı tipine bağlı gerilme konsantrasyonu ($K_{t(köşe)}$) hesaplama

Bu bölümde; malzemesi Ti6Al4V olan ve SLE ile üretilmiş kafes yapılarının tamamında sadece kafes yapı geometrisinden dolayı yüzeyinde oluşacak gerilme konsantrasyonu hesaplayabilen bir eşitlik ortaya konulması amaçlanmıştır.

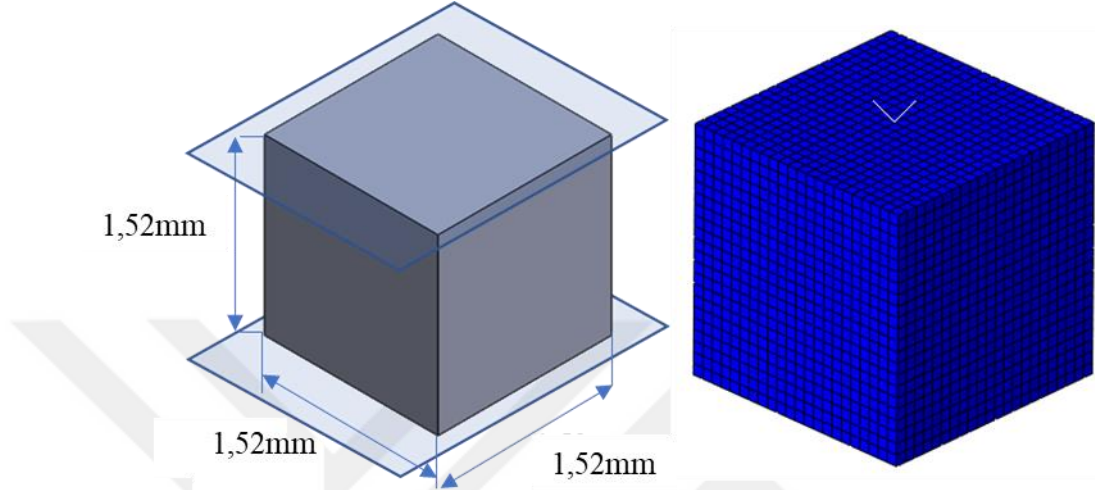
Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak yarı-statik analizleri gerçekleştirilen EDOY birim hücresi ele alınmıştır. EDOY geometrisinin yarı-statik analiz sonuçlarından parçada meydana gelen en büyük lokal gerilme değeri Şekil 4.12’de gösterildiği gibi 2101 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12: EDOY yüzeyindeki gerilme dağılımı (MPa), maksimum gerilme ise kırmızı dikdörtgen içinde gösterilmiştir.

İkinci olarak da EDOY geometrisi ile birim hücre boyutu açısından aynı ölçülere sahip bir katı kütle yarı-statik analize tabi tutulmuştur. Bu analizde C3D10 altıgen ağ yapısı kullanılmış olup, bir elemanın en x boy x yükseklik boyutu 0,07 mm’dir. Geometriye atanan malzeme verisi Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kontak tanımlaması ve sınır şartları EDOY’un yarı-statik analizleri ile aynı olup sırasıyla; teğetsel sürtünme modeli 0,3 sürtünme katsayısı ve alt kalıp sabit fakat üst kalıp yalnızca düşey ekseninde hareket

edebilir olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.13’de gösterildiği gibi katı kütle yapısı iki plaka (üstte hareketli ve altta sabit) arasında 0,152 mm yer değiştirme verilip sıkıştırılarak sabit plakada meydana gelen tepki kuvveti 2021 N olarak hesaplanmıştır. Bu tepki kuvveti katı kütle yapının kesit alanına bölünerek katı kütle yapıda meydana gelen gerilme 875 MPa hesaplanmıştır.



Şekil 4.13: Yarı-statik analiz katı kütle boyutları (deforme olmamış) ve ağ örgüsü

Burada kafes yapında meydana gelen maksimum gerilme ile katı kütle yapıda meydana gelen normal gerilme oranlandığında $K_{t(köşe)} = 2,4$ olarak hesaplanmıştır.

Aynı çalışma farklı göreceli yoğunluğa sahip EDOY geometriler için de gerçekleştirildiğinde Çizelge 4.5’teki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.5: EDOY kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarında form kaynaklı gerilme konsantrasyonu değişimi.

	Çubuk Boyu	Çubuk Çapı	Kesit Alanı	Maksimum Gerilme	Katı Kütle Gerilmesi	Boy/Çap	Gerilme Konsantrasyonu
	L (mm)	D (mm)	A (mm ²)	Gerilme (MPa)	Normal Gerilme (MPa)	L/D	$K_{t(köşe)}$
T120_500	0,66	0,12	0,7904	2100	875	5,5	2,4

T170_450	0,66	0,17	0,7904	1566	875	3,882	1,7
T170_500	0,71	0,17	2,6896	1643	1217,6	4,176	1,3
T230_500	0,77	0,23	3,2041	1637	1217,5	3,347	1,3

Çizelge 4.5 ile elde edilen değerler kullanılarak ikinci derece bir eğri türetilmiş ve Eş. (4.4) ile verilen çubuk çapı ve çubuk boyu değerlerine bağlı olarak kafes yapının yüzeyinde meydana gelen gerilme konsantrasyonu hesaplamak için kullanılacak eşitlik türetilmiştir.

$$K_{t(köşe)} = 0,1927\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1,259\left(\frac{L}{D}\right) + 3,478 \quad (4.4)$$

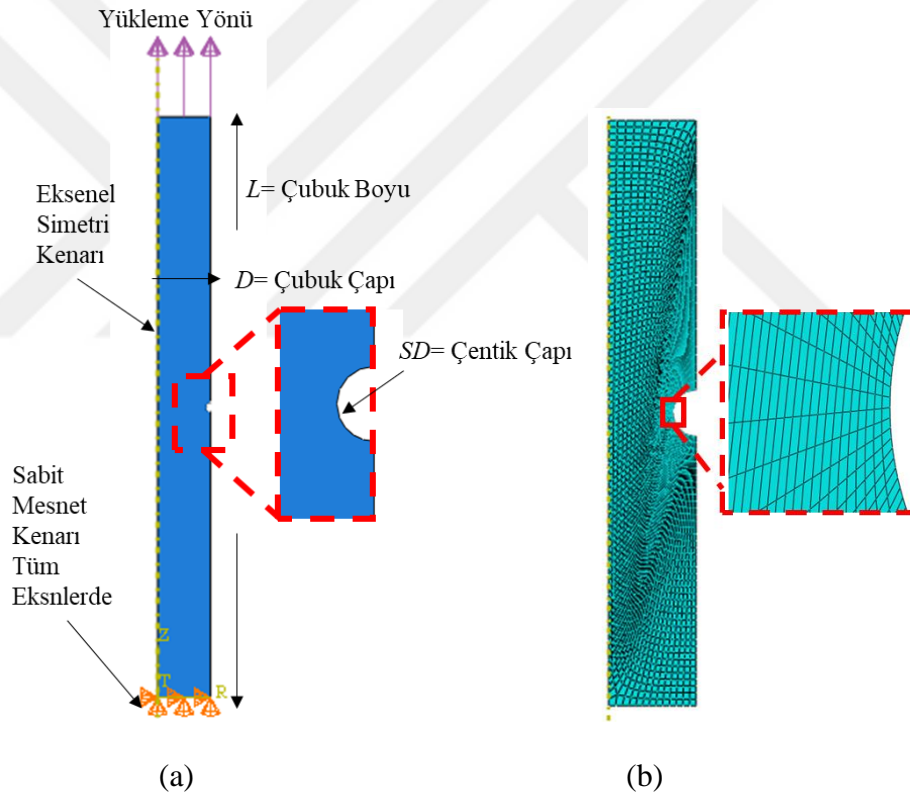
4.2.4.2 Üretim kaynaklı meydana gelen gerilme konsantrasyonu ($K_{t(pürüzlülük)}$) hesaplama

Bu bölümde, eklemeli imalat yöntemlerinin doğası gereği parça yüzeyinde meydana gelebilecek yüzey pürüzlülüklerinin neden olduğu gerilme konsantrasyonu ($K_{t(pürüzlülük)}$) değerinin hesaplanabileceği bir eşitlik türetilmesi amaçlanmıştır. Bu eşitliğin türetilmesi için örnek bir çubuk geometrisi (eksenel simetri modeli) alınarak üzerine temsili bir kusur eklenmiş ve bu kusurun oluşturduğu referans bir çentik ile Şekil 4.14(a)'da gösterildiği gibi modellenmiştir.

Modelleme sırasında, farklı göreceli yoğunluk değerindeki EDOY kafes yapılarını temsil eden çubuk boyu L , çubuk çapı D ve çentik çapı SD Çizelge 4.6'da gösterilen verilerden alınmıştır. Çubuk geometrik olarak modellenirken 2B eksenel simetri yaklaşımı yapılmıştır. Eksenel simetri kenarı Şekil 4.14(a)'da gösterilmiş olup bu yaklaşımın uygulama amacı sadece simülasyonları hızlandırmaktır. Gerilme konsantrasyonu hesaplarken çok sık eleman sayısına ihtiyaç olduğu için 3B modelleme ile çözüm süresi çok uzamaktadır. Aynı analizlerin farklı çentik çaplarında tekrarlı olması da analiz sürelerini artıracığı için 2B eksenel simetri yaklaşımının makul olduğu düşünülmüştür. Modelde malzeme verisi olarak Çizelge 4.2'de verilen

Ti6Al4V malzeme özellikleri kullanılmış ve Şekil 4.14(a)'da gösterilen yükleme yönünde 100 MPa çekme yükü uygulanmıştır. Çekme yükünü uygulayabilmek için çubuk, Şekil 4.14(a)'da gösterilen sabit mesnet kenarından tüm yönlerde sabitlenmiştir. Bu modelde deforme olabilir olarak tanımlanan çubuk parçasına yapısal ikinci dereceden dörtgen elemanlar (CAX4R) (Şekil 4.14(b)) atanmış ve çentik etrafında kullanılan en küçük elemanın bir kenar uzunluğu $0,1 \mu\text{m}$ 'dir.

Bu geometri, yukarıda belirtilen şartlarda yarı-statik analize tabi tutularak yüzeyinde meydana gelebilecek maksimum gerilme tespit edilmeye çalışılmıştır. Çentik ucunda okunan en büyük gerilme değeri ile nominal gerilme değeri (çubuğa uygulanan yükün nominal boyutunda meydana getireceği gerilme) oranlanarak $K_{t(\text{pürüzlülük})}$ değeri elde edilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Üretim kaynaklı gerilme konsantrasyonu tespit modeli (a) Sınır ve yükleme koşulları (b) kullanılan ağ örgüsü.

Bu model üretim prosesi kaynaklı oluşabilecek tüm çentik boyutlarını kapsayacak şekilde 4 farklı çentik çapı ve 4 farklı göreceli yoğunluğa sahip EDOY kafes yapı için gerçekleştirilmiş ve sonuçları Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6: EDOY kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarında üretim kaynaklı gerilme konsantrasyonu ($K_{t(\text{pürüzlülük})}$) değişimi.

	Çubuk Boyu	Çubuk Çapı	Çentik Çapı	Pürüz/Çap	Gerilme Konsantrasyonu
	<i>L (mm)</i>	<i>D (mm)</i>	<i>SD (mm)</i>	<i>SD/D</i>	<i>K_t(pürüzlülük)</i>
T120_500-001	0,66	0,12	0,01	0,083	1,075
T120_500-002	0,66	0,12	0,02	0,167	1,33
T120_500-004	0,66	0,12	0,04	0,333	1,75
T120_500-006	0,66	0,12	0,06	0,5	2,4
T170_450_001	0,66	0,17	0,01	0,058	1
T170_450_002	0,66	0,17	0,02	0,117	1,205
T170_450_004	0,66	0,17	0,04	0,235	1,485
T170_450_006	0,66	0,17	0,06	0,353	1,82
T170_500-001	0,71	0,17	0,01	0,058	1
T170_500-002	0,71	0,17	0,02	0,117	1,225
T170_500-004	0,71	0,17	0,04	0,235	1,51
T170_500-006	0,71	0,17	0,06	0,353	1,825
T230_500-001	0,77	0,23	0,01	0,043	1
T230_500-002	0,77	0,23	0,02	0,087	1,155
T230_500-004	0,77	0,23	0,04	0,174	1,38
T230_500-006	0,77	0,23	0,06	0,26	1,56

Çizelge 4.6'daki değerler kullanılarak, eklemeli imalat yöntemlerinin doğası gereği üretim sırasında meydana gelebilecek kusurların sebep olacağı gerilme konsantrasyonunu hesaplayabilmek için birinci dereceden bir eşitlik türetilmiştir. Burada verilen Eş. 4.5'te verilen SD parçada meydana gelebilecek çentiğin çapını, D ise çubuk çapını göstermektedir.

$$K_{t(\text{pürüzlülük})} = 2,876\left(\frac{SD}{D}\right) + 0,876 \quad (4.5)$$

4.2.4.3 Toplam gerilme konsantrasyonu ($K_{t(\text{Toplam})}$) hesaplama

Bir kafes yapının yorulma ömrünü, aynı birim hücredeki katı kütle yapının ömür değerinden tahmin etmek için gerekli toplam gerilme konsantrasyonu katsayısı ise Eş. (4.4) ve Eş. (4.5) ile verilen ifadelerin çarpımı ile bulunmaktadır. Bunun sebebi, bir kafes yapının yüzeyinde hiçbir kusur ya da pürüz olmadan üretilmesi mümkün olsaydı kafes yapının yorulma ömrünü, doğrudan onun geometrisine özgün gerilme konsantrasyonunu ($K_{t(\text{köşe})}$) kullanarak hesaplayabilirdik. Ancak gerçekte üretilmiş parçaların yüzeyinde kusur olacağından dolayı bu kusurların meydana getirdiği gerilme konsantrasyonunu ($K_{t(\text{pürüzlülük})}$) hesaba katarak ömür hesaplamamız gerekmektedir. Burada bahsedilen nedenlerden dolayı bu iki eşitliğin çarpımından türetilen toplam gerilme konsantrasyonu Eş. (4.6) ile gösterilmiştir.

$$K_{t(\text{Toplam})} = \frac{SD}{D} \left(0,554 \left(\frac{L}{D} \right)^2 - 3,62 \left(\frac{L}{D} \right) + 10 \right) + \frac{L}{D} \left(0,169 \left(\frac{L}{D} \right) - 1,1 \right) + 3,04 \quad (4.6)$$

Bu bölümde, üç farklı K_t hesaplama eşitliği sunulmuştur:

- 1) Eş. (4.4) ile verilen K_t değeri ($K_{t(\text{köşe})}$) yalnızca bir kafes yapının kendi geometrisinden kaynaklanan gerilme konsantrasyon değeri olup, bir kafes yapının ömrünü doğrudan katı kütle yapı ömür eğrisinden hesaplamak için kullanılır. Fakat Eş. (4.4) tek başına kullanıldığında kafes yapı üzerinde meydana gelebilecek üretim kaynaklı kusurlar göz ardı edilmiş olacaktır.
- 2) Eş. (4.5) ile verilen K_t değeri ($K_{t(\text{pürüzlülük})}$) bir kafes yapının kendi geometrisi ile yorulma ömrü hesaplandıktan sonra üretim kaynaklı yüzeyinde olacak

kusurları hesaba katmak için kullanılır. Bir kafes yapının kendi geometrisi ile yorulma ömür hesabı yapıldığında, eğer Eş. (4.5) kullanılmaz ise elde edilen yorulma ömür eğrisi mükemmel yüzeyle kusursuz geometrilerin ömür değerlerini ifade eder.

Eş. (4.6) ile verilen K_t değeri ($K_{t(Toplam)}$) yalnızca bir kafes yapının yorulma ömür eğrisini doğrudan katı kütle yorulma ömür eğrisi üzerinden hesaplamak için kullanılır. Bu eşitlik sayesinde katı kütle yorulma ömür değeri kullanılarak doğrudan SLE prosesi ile üretilmiş kafes yapının üretim kaynaklı kusurlarını dahi hesaba katarak elde edilmek istenilen yorulma ömür eğrisine ulaşılabilir.



5. YORULMA ÖMÜR ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, Bölüm 4 ile gösterilen Brown-Miller gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplama modelinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Esasen iki ana başlık altında aktarılan sonuçlardan; Bölüm 5.1'de EDOY geometrili kafes yapının, Brown-Miller yorulma ömür analiz yöntemi kullanılarak elde edilen yorulma ömür eğrileri sunulmuştur. Bu sonuçlar, Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen nümerik ve Amin Yavari vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı ömür analiz sonuçları ise (i) hiç gerilme konsantrasyonu hesaba katmadan doğrudan kafes yapı ömür analiz sonuçları, (ii) kafes yapı ömür eğrisinde Eş. (4.5) ile verilen pürüzlülük gerilme konsantrasyonu katsayısı ($K_{t(pürüzlülük)}$) hesaba katarak hesaplanan ömür analiz sonuçları ve (iii) doğrudan katı kütle ömür eğrisine, hem Eş. (4.4) ile verilen kafes yapı gerilme konsantrasyon katsayısının ($K_{t(köşe)}$) hem de Eş. (4.5) ile verilen pürüzlülük gerilme konsantrasyon katsayısının ($K_{t(pürüzlülük)}$) beraber kullanılması ile elde edilen ve Eş. (4.6) ile verilen toplam gerilme konsantrasyon katsayısını ($K_{t(Toplam)}$) hesaba katarak hesaplanan kafes yapı ömür analiz sonuçları olmak üzere üç alt başlıkta sunulmuştur. Ayrıca, gerinim tabanlı yorulma ömür hesabından elde edilen sonuçların deneysel veriler ile iyi bir korelasyon sağlaması sonucunda EDOY geometrili kafes yapının farklı göreceli yoğunluk değerleri için Ashby-Gibson eğrisi türetilmiş ve her bir göreceli yoğunluğa karşı gelecek yorulma dayanım limit değeri türetilmiştir.

Bölüm 5.2'de ise Brown-Miller yöntemi ve Eş. (4.6) ile elde edilen toplam gerilme konsantrasyonu katsayısı ($K_{t(Toplam)}$) kullanılarak farklı tipteki kafes yapıların da yorulma ömür eğrisinin doğrudan katı kütle ömür eğrisinden elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu amaçla, D. Zhao vd. (2018) tarafından deneysel sonuçları verilen Sekizyüzlü ve Dörtüzlü kafes yapı ömürleri, bu tez çalışmasında önerilen Brown-Miller yöntemi ve $K_{t(Toplam)}$ değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar, (i) sekizyüzlü kafes yapı ömür analiz sonuçları ve (ii) dörtüzlü kafes yapı ömür analiz sonuçları olarak verilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu sonuçlar sayesinde; malzemesi Ti6Al4V olan ve SLE ile üretilmiş

kafes yapıların yorulma ömür eğrilerinin doğrudan katı kütle analiz sonuçlarından elde edilebilir olduğu gösterilmiştir.

5.1 EDOY Geometri Yorulma Ömür Analiz Sonuçları

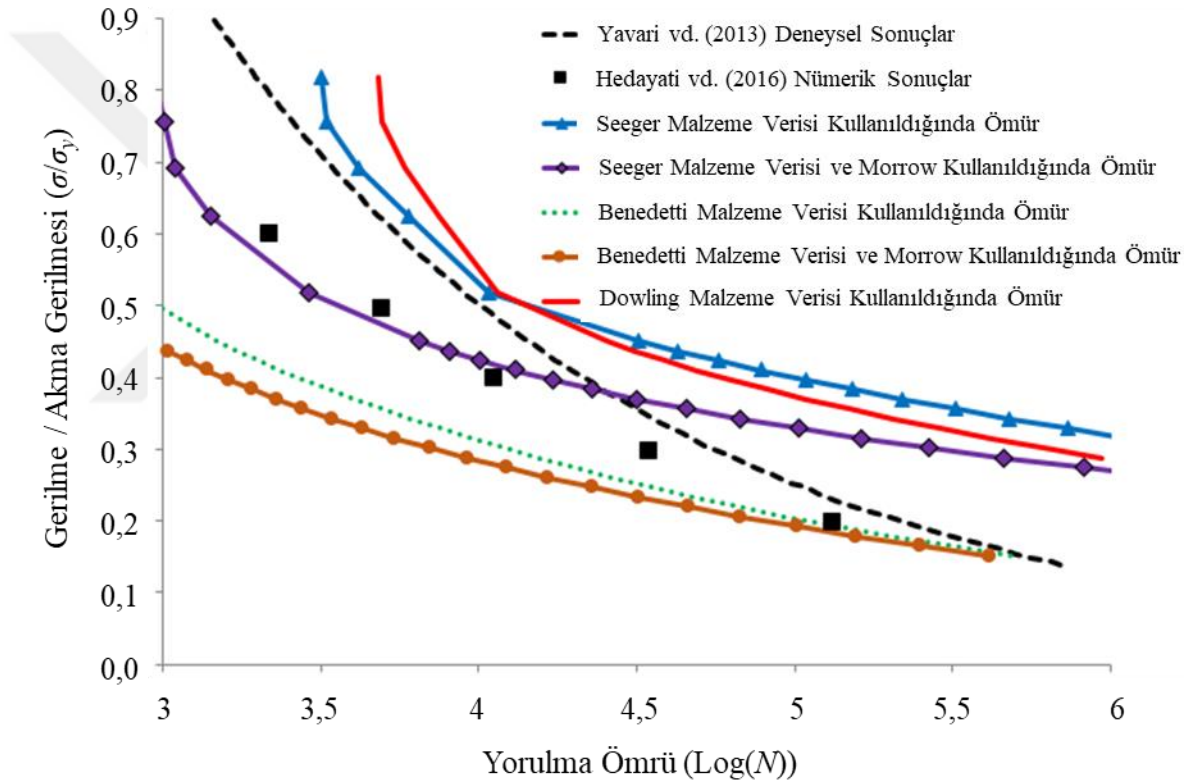
Bu bölümde sunulan nümerik analiz sonuçları dört ana başlık altında verilmiştir; 5.1.1’de doğrudan EDOY kafes yapı kullanarak ömür tahmini için gerilme konsantrasyon katsayısı kullanılmadan elde edilen sonuçlar, 5.1.2’de doğrudan EDOY kafes yapısı ile elde edilen yorulma ömür eğrisinde Eş. (4.5) ile verilen $K_{t(pürüzlülük)}$ kullanılarak elde edilen sonuçlar, 5.1.3’te doğrudan katı kütle ömür eğrisinde hem Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ hem de Eş. (4.5) ile verilen $K_{t(pürüzlülük)}$ değerlerinin beraber hesaba katıldığı, Eş. (4.6) ile verilen $K_{t(Toplam)}$ gerilme konsantrasyon katsayısı kullanarak kafes yapı yorulma ömrünün hesaplanmasına dayalı sonuçlar ve 5.1.4’te ise bu $K_{t(Toplam)}$ gerilme konsantrasyon katsayısı ile hesaplama sayesinde EDOY kafes yapının farklı göreceli yoğunlukları için elde edilen yorulma dayanım limit değerleri için Ashby-Gibson eğrisi sonuçları verilmiştir.

5.1.1 Doğrudan EDOY kafes yapısı kullanılarak gerilme konsantrasyonu hesaba katılmadan EDOY ömür sonuçları

EDOY geometrili kafes yapının, gerçekleştirilen yorulma ömür analizlerinde ilk olarak gerilme konsantrasyonu göz ardı edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç eklemeli imalat yöntemleri ile yüzey pürüzlülüğü olmayan mükemmel geometrili parçalar imal edildiğinde yorulma ömür eğrisini görebilmek ve gerinim parametrelerinin yorulma ömür eğrisine olan etkisini gözlemleyebilmektir. Bu amaç doğrultusunda Çizelge 4.4’te gösterilen üç farklı gerinim ömür parametresi kullanılarak malzemenin yorulma ömür eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 5.1’de gösterildiği üzere, yorulma ömrü analizleri üç farklı malzeme için ortalama gerilme (Morrow) metodu uygulayarak ve uygulamayarak ikili kombinasyonlarda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.1’de, sadece kare noktalar ile gösterilen değerler Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçlarıdır. Kesikli çizgiler ile gösterilen sonuçlar ise Amin Yavari vd. (2013) tarafından aynı kafes yapı için gerçekleştirilen deneysel sonuçlardır. Sırasıyla düz çizgi (kırmızı) ve üçgen noktalı düz çizgi (mavi) ortalama gerilme kullanılmadan Dowling, (2013) ve Seeger

Meggiolaro ve Castro, (2004) malzeme verileri kullanılarak bu tez çalışmasında önerilen metodoloji ile elde edilen yorulma ömür eğrilerini göstermektedir. Eşkenar dörtgen noktalı düz çizgi (mor) ise, Seeger Meggiolaro ve Castro, (2004) malzeme datası ve Morrow ortalama gerilmesi kullanılarak önerilen metodoloji ile elde edilen sonuçlardır. Benedetti vd. (2018) tarafından elde edilmiş malzeme verisi ile gerçekleştirilen ömür analizlerinden ise noktalı eğri (yeşil) ve daire noktalı düz çizgi (turuncu) ile gösterilen yorulma ömür eğrileri elde edilmiştir. Burada noktalı eğri (yeşil) ortalama gerilme kullanılmadan çözülmüş analiz sonuçları iken daire noktalı düz çizgi (turuncu) ise Morrow ortalama gerilmesi kullanılarak gerçekleştirilmiş analiz sonuçlarıdır.



Şekil 5.1: Doğrudan EDOY kafes yapısı kullanarak gerilme konsantrasyon katsayısı hesaba katılmadan yorulma ömrü analiz sonuçlarının üç farklı malzeme ve ortalama gerilme kullanılıp/kullanılmamasına bağlı değişimi.

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde öncelikli olarak Morrow ortalama gerilme yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların (eşkenar dörtgenli düz çizgi (mor) ve daire noktalı düz çizgi (turuncu)), kesikli çizgi (siyah) ile gösterilen deneysel sonuçlardan oldukça uzakta olduğu görülmektedir. Bu nedenle, Morrow ortalama gerilme yönteminin kullanılmasına ihtiyaç duyulmadığı görülmüştür. Bu durum doğrudan

Amin Yavari vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen testlerin $R=0,1$ 'de basma-basma tekrarlı yapılmasından açık bir şekilde anlaşılmış olsa bile analiz sonuçları ile bu durum doğrulanmış olmaktadır.

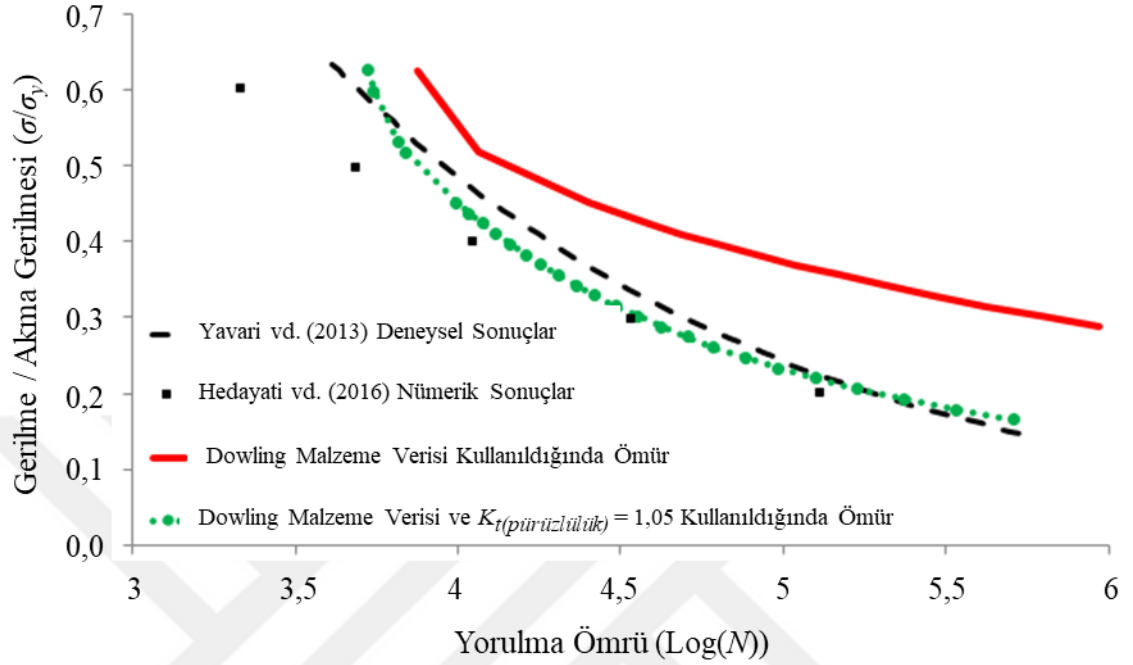
Şekil 5.1'deki analiz sonuçlarına bakıldığında; sırasıyla düz çizgi (kırmızı) ve üçgen noktalı düz çizgi (mavi) ile gösterilen Morrow ortalama gerilme kullanılmadan Dowling, (2013) ve Seeger Meggiolaro ve Castro, (2004) malzeme verileri kullanılarak elde edilen ömür eğrilerinin diğer eğrilere göre Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçları ve Amin Yavari vd., (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlarıyla eğri trendi bakımından daha tutarlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, Ti6Al4V malzemeden yapılan kafes yapıların yorulma ömür analizlerinde Seeger Meggiolaro ve Castro, (2004) ve Dowling, (2013) malzeme verilerinin kullanılabilceğini göstermektedir.

Fakat analiz sonuçları değerlendirildiğinde bu malzeme verileri ile elde edilen yorulma ömür eğrisi hem Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçlarından ve Amin Yavari vd., (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlarından genel büyüklük bakımından daha yukarıda olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, bu bölümdeki analiz çalışmalarında gerilme konsantrasyonun göz ardı edilmesidir. Gerilme konsantrasyonu göz ardı edilerek malzemelerin yüzeyinde üretim kaynaklı meydana gelebilecek kusurlar göz ardı edilmiş olmaktadır. Bu durumda da mükemmel yüzeyli kafes yapılarının ömür sonuçları deneysel verilerden Şekil 5.1'de gösterildiği kadar yukarıda çıkmaktadır.

5.1.2 EDOY kafes yapısı ömür eğrisinde pürüzlülük gerilme konsantrasyonu ($K_{t(pürüzlülük)}$) hesaba katıldığında ömür sonuçları

Bu bölümde, kafes yapının yorulma ömür eğrisinin nümerik olarak hesaplanması sırasında; $K_{t(pürüzlülük)}$ yüzey pürüzlülük değeri hesaba katıldığında değişimi sunulmuştur. Bölüm 4'ün son kısmında üç farklı K_t hesaplama eşitliği verilmiştir. Bu eşitliklerden yalnızca Eş. (4.5) ile verilen K_t değeri ($K_{t(pürüzlülük)}$); bir kafes yapının kendi geometrisi ile yorulma ömrü hesaplandıktan sonra üretim kaynaklı yüzeyinde olacak kusurları hesaba katmak için kullanılabilceği belirtilmişti. Bu nedenle; bu bölümde amaç EDOY geometrisi ile yapılan ömür analiz sonuçlarına $K_{t(pürüzlülük)}$ etkisini eklemek olduğu için Eş. (4.5) kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. $K_{t(pürüzlülük)}$ değerini hesaplamak için kullanılan değerler; çentik çapı $SD = 7,3 \mu\text{m}$ ve çubuk çapı

$D = 120 \mu\text{m}$ 'dir (Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd., 2016). Bu parametreler kullanıldığında gerilme konsantrasyon değeri $K_{t(\text{pürüzlülük})} = 1,05$ olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen ömür eğrisi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Pürüzlülükten dolayı gerilme konsantrasyon değeri ($K_{t(\text{pürüzlülük})}$) hesaba katıldığı durumda yorulma ömrü analiz sonuçları

Analiz sonuçlarına bakıldığında, Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçları ve Amin Yavari vd., (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel sonuçlar sırasıyla kare noktalar ve kesikli düz çizgiler ile gösterilen yorulma ömür eğrileridir. Düz çizgi (kırmızı) ile gösterilen eğri ise Dowling, (2013) tarafından türetilmiş malzeme verileri kullanıldığında elde edilen sonuçlardır. Dairesel noktalı kesik çizgiler (yeşil) ile gösterilen eğri ise Dowling, (2013) malzeme verisi ve gerilme konsantrasyonu değerinin 1,05 olarak kullanıldığı durumdaki sonuçlardır. Bu sonuçlara bakıldığında, Amin Yavari vd. (2013) tarafından ortaya konulan deneysel sonuçlara en yakın olan sonucun yuvarlak noktalı kesik çizgiler (yeşil) ile gösterilen yorulma ömür eğrisi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, gerinim metodu kullanılarak yani Brown-Miller yöntemi ile Dowling, (2013) tarafından türetilmiş malzeme verisi ve Eş. (4.5) gerilme konsantrasyon değeri kullanılarak elde edilen yorulma ömür eğrisinin, gerilme yöntemi ile yapılan hesaplamalara göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle de DÇY ömrü bölgesinde deneysel veri ile sağlanan korelasyonun yüksek olduğu

gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 5.2'den anlaşılacağı üzere DÇY ömrü bölgesinden YÇY ömrü bölgesine geçiş kısmında analiz sonuçları ile Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) nümerik analiz sonuçlarının neredeyse aynı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. YÇY ömrü bölgesinde ise analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile yakın sonuçlar göstermektedir. Burada yorulma ömür eğrisi boyunca analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında farklılığın olmasının sebebi ise deneysel çalışmaların çok tekrarlı yapılması nedeniyle elde edilen tüm deney noktalarındaki sonuçlara oturtulan bir eğrinin deneysel sonuç olarak sunulmuş olmasıdır. Bu sebep dolayısıyla farklılıkların yorulma ömür eğrisi boyunca yukarıda ve aşağıda çıkması normal karşılanmıştır. Bu analiz sonuçlarından eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş kafes yapıların yorulma ömür eğrilerinin; gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplama metodu olan Brown-Miller yönteminin, Dowling (2013) malzeme verisinin ve Eş (4.5)'de verilen gerilme konsantrasyon denkleminin birlikte kullanıldığı durumlarda daha doğru hesaplanabileceği ortaya konulmuştur.

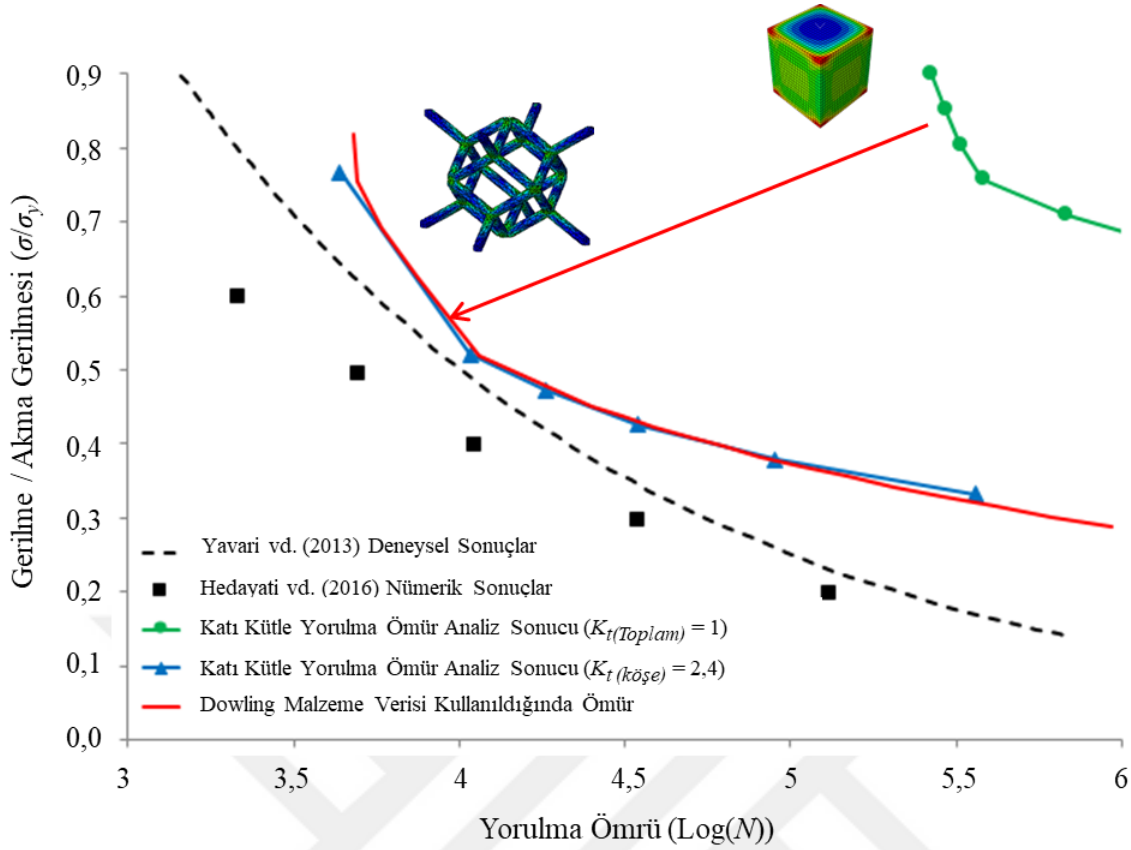
5.1.3 Doğrudan katı kütle kullanılarak elde edilen ömür eğrisinde toplam gerilme konsantrasyonu katsayısı $K_{t(Toplam)}$ hesaba katılarak EDOY elde edilen kafes yapı ömür sonuçları

Bölüm 5.1.2'de, EDOY geometrisinin gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplamalarında Brown-Miller yöntemi ve Eş. (4.5) ile verilen $K_{t(pürüzlülük)}$ değerleri kullanılarak yorulma ömür eğrileri elde edilmiştir. Önceki bölümlerde ömür hesaplamalarda yalnızca $K_{t(pürüzlülük)}=1,05$ değerinin kullanım amacı; gerçekleştirilen analizlerde EDOY geometrisinin kendisinin kullanılmış olması ve analizlerde üretim kaynaklı kusurların hesaplanmasına odaklanılmış olmasıdır. Bu bölümde ise Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ ve Eş. (4.6) ile verilen $K_{t(Toplam)}$ değerleri kullanılarak EDOY geometrisinin yorulma ömür eğrisi doğrudan katı kütle yorulma ömür eğrisinden hesaplanması amaçlanmıştır. Bu hesaplamada ilk olarak katı kütle yorulma ömür analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında katı kütle yorulma ömür eğrisine Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ değerinin etkisi eklenerek üretim kaynaklı kusurları göz ardı edilmiş yani mükemmel yüzeyli EDOY için yorulma ömür eğrisi doğrudan katı kütle ömür eğrisinden elde edilmiştir. Sonrasında, başlangıçtaki katı kütle ömür eğrisine bir de Eş. (4.6) ile verilen $K_{t(Toplam)}$ değerinin etkisi eklenerek bu sefer de kafes yapısının yüzeyinde oluşabilecek üretim kaynaklı kusurları hesaba katılarak yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak EDOY kafes yapının yorulma ömür

eğrisinin doğrudan katı kütle yorulma ömründen hesaplanabilir olup olmadığına bakılmıştır.

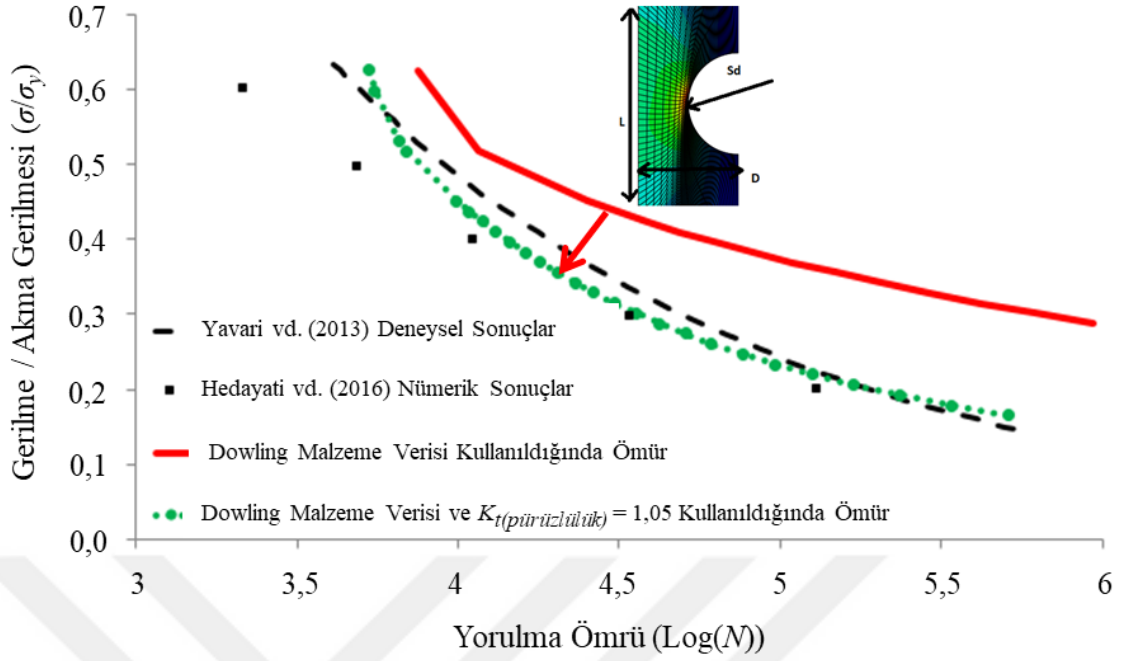
Bu bölümde, ilk olarak, Şekil 5.3'te yuvarlak noktalı düz çizgi ile gösterilen katı kütle yorulma ömür eğrisi, Brown-Miller yöntemi ve Dowling, (2013) malzeme verileri kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında bu yorulma ömür eğrisine Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ etkisi eklenerek üçgen noktalı yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Burada $K_{t(köşe)}$ değeri 2,4 olarak hesaplanmış ve bu değer için $L = 0,66$ mm ve $D = 120$ μ m olarak alınmıştır. Bu değerler Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016)'nin çalışmasında belirttiği ve bu çalışmada da kullanılan EDOY kafes yapı için ölçülerdir.

Şekil 5.3'te elde edilen sonuçlara bakıldığında, katı kütle ömür sonuçlarına Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ etkisi eklendiğinde (Şekil 5.3 üçgen noktalı düz çizgi) Bölüm 5.1.1'de verilen doğrudan EDOY kafes yapı yorulma ömür eğrisi (Şekil 5.3 düz çizgi) ile aynı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçların çok yakın çıkması beklenen bir durumdur; çünkü katı kütle ömür eğrisine $K_{t(köşe)}$ katsayısının eklenme amacı zaten EDOY kafes yapı yorulma ömrünü katı kütle üzerinden tahmin edebilmektir. Dolayısıyla, bu sonuçlar, kafes yapı yorulma ömür eğrisinin doğrudan katı kütle ömür eğrisinden $K_{t(köşe)}$ katsayısı kullanılarak elde edilebileceğini göstermiştir.



Şekil 5.3: Katı kütle ömür eğrisinde $K_{t(köşe)}$ hesaba katılarak EDOY kafes yapı yorulma ömür eğrisi hesabı

Şekil 5.3'teki sonuçlarda bir kafes yapının yüzeyinde meydana gelen üretim kaynaklı kusurların oluşturduğu gerilme konsantrasyonu hesaba katılmadan belirlenen ömür eğrilerinin doğruluğu gösterilmişti. Şimdi ise üretim kaynaklı kusurların oluşturduğu gerilme konsantrasyonu (Eş. (4.5) ile sunulan $K_{t(pürüzlülük)}$) değerinin etkisi incelenmiştir. Kafes yapının mükemmel yüzeyli, yani kusursuz geometrinin yorulma ömür eğrisi elde edildikten sonra $K_{t(pürüzlülük)}$ eklenerek, üretilmiş bir geometrinin yorulma ömrü hesaplanmış olur. Bu amaç doğrultusunda, Şekil 5.4'te düz çizgi (kırmızı) ile gösterilen üretim kaynaklı kusurların hesaba katılmadığı, yani pürüzsüz EDOY geometri için hesaplanmış yorulma ömür eğrisine $K_{t(pürüzlülük)} = 1,05$ olarak eklenerek kesikli yuvarlak noktalı (yeşil) eğri ile gösterilen yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Burada $K_{t(pürüzlülük)}$ değerinin 1,05 olarak hesaplanması için kullanılan değerler; EDOY kafes yapının ölçüleri olan çubuk çapı $D = 120 \mu\text{m}$ ve çentik çapı $SD = 7,3 \mu\text{m}$ 'dir (Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd., 2016). Elde edilen bu eğri (yeşil), Şekil 5.4'te siyah kesikli çizgi ile gösterilen ve Amin Yavari vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel eğri ile yakın çıkmıştır.



Şekil 5.4: Üretim kaynaklı kusurlar hesaba katılarak yorulma ömür eğrisi hesabı

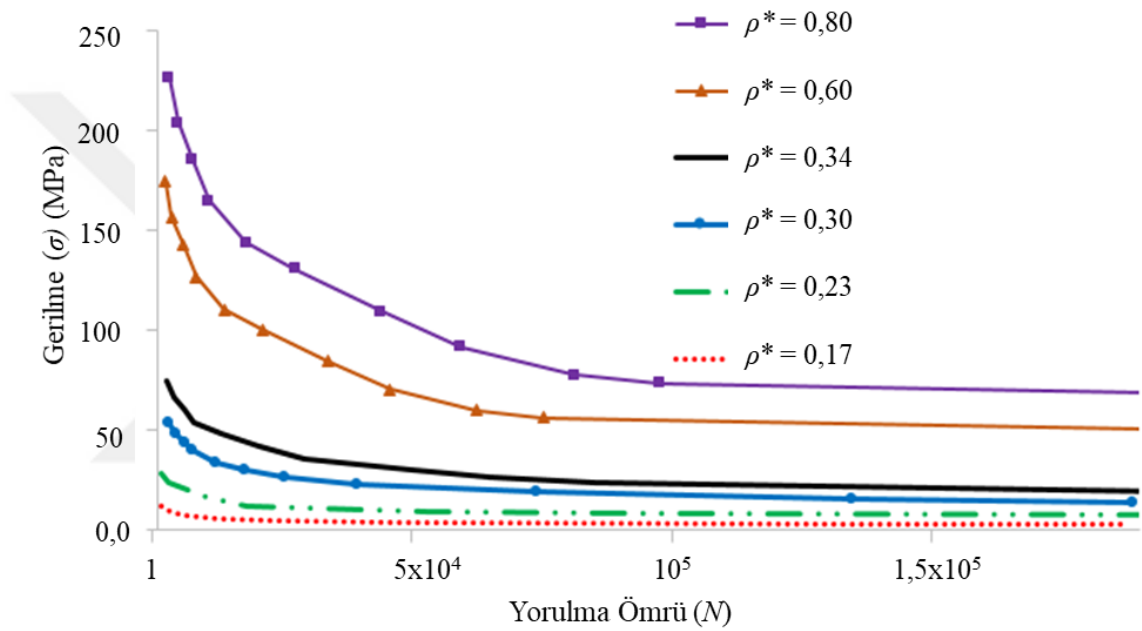
Şekil 5.3'teki sonuçlarda da katı kütleden $K_{t(köşe)}$ hesaba katılarak elde edilen yorulma ömür eğrisi, doğrudan EDOY kafes yapı ile elde edilen yorulma ömür eğrisi ile çok yakın olduğundan dolayı katı kütle yorulma ömür eğrisinde $K_{t(köşe)}$ ve $K_{t(pürüzlülük)}$ beraber hesaba katıldığında elde edilecek yorulma ömür eğrisi ile Şekil 5.4'te gösterilen $K_{t(pürüzlülük)}$ hesaba katılarak elde edilen yorulma ömür eğrisi de birbirine çok yakın çıkacaktır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde EDOY kafes yapının yorulma ömür eğrisinin, doğrudan katı kütle yapı ömründen hesaplanmasının iki basamakta gerçekleştirilebileceği görülmüştür. İlk aşamada, katı kütle ömür eğrisine Eş. (4.4) ile verilen $K_{t(köşe)}$ değeri etkisi eklendiğinde pürüzsüz bir EDOY için hesaplanan yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Bu sonuçlara Eş. (4.5) ile verilen $K_{t(pürüzlülük)}$ değeri eklendiğinde ise EDOY kafes yapının üretim kaynaklı kusurları dahil edilmiş yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca katı kütle kullanılarak yorulma ömür eğrisi hesaplama, kafes yapı kullanılarak hesaplama maliyetinden çok daha düşüktür. Bu sebeple, doğrudan katı kütle ile yorulma ömür eğrisi hesaplayıp sonra $K_{t(köşe)}$ ve $K_{t(pürüzlülük)}$ değerlerinin çarpımı olan $K_{t(Toplam)} = K_{t(köşe)} \times K_{t(pürüzlülük)}$ hesaba katıldığında kafes yapının yorulma ömür eğrisinin deneylerle tutarlı bir şekilde hesaplanabilir olduğu ortaya konulmuştur.

5.1.4 EDOY kafes yapı göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömür sonuçları

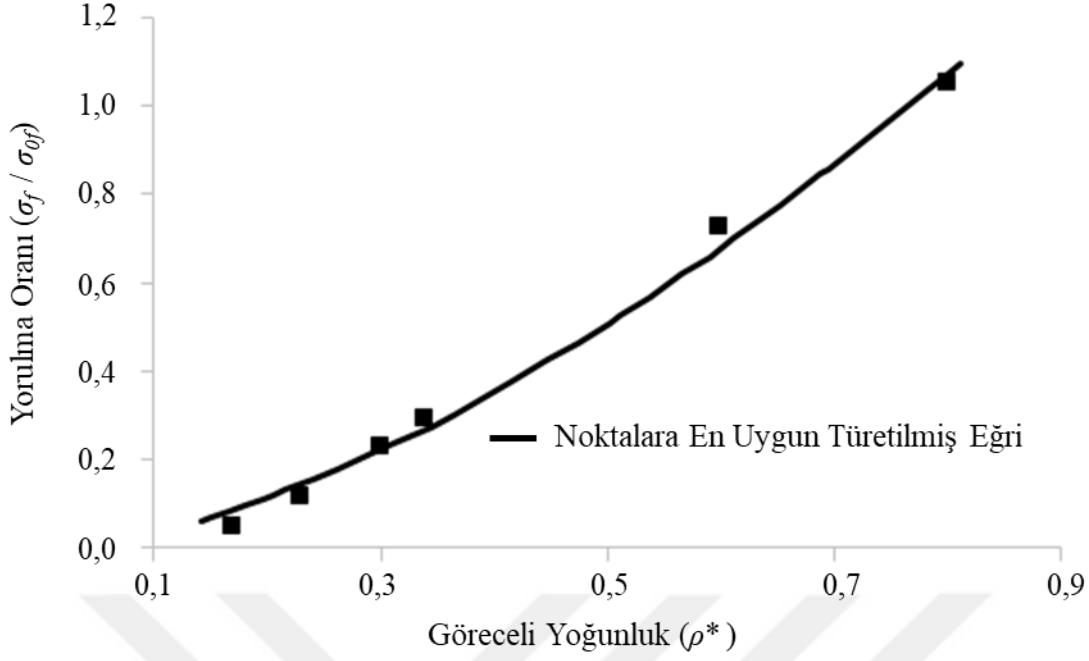
Önceki bölümlerde gerçekleştirilen EDOY geometrili kafes yapının yorulma ömür hesaplama çalışmaları, EDOY kafes yapı göreceli yoğunluğunun %17 olduğu durum için yapılmıştır. Fakat kafes yapılarda aynı geometrik yapının farklı göreceli yoğunluk değerlerinde tasarlanması sonucu yorulma ömrünün değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle kafes yapıların bütün göreceli yoğunluk değeri için yorulma ömürlerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada, kafes yapıların her bir göreceli yoğunluğunda ayrı ayrı yorulma ömrü hesaplamak yerine belirli aralıklardaki göreceli yoğunluk değerlerinde yorulma ömür eğrisi elde ederek Eş. (2.3)'de verilen Ashby-Gibson eğrisi için “*n*” ve “*C*” sabiti tespit edilmiştir. Bu amaçla, farklı göreceli yoğunluk değerleri için, Şekil 5.5'te gösterilen yorulma ömür eğrileri, önerilen metodoloji ile elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, göreceli yoğunluk arttıkça yorulma ömür eğrisi yukarı doğru çıkmaktadır. Bir başka deyişle, yoğunluğun artması, yorulma ömrünü artırmaktadır. Bu beklenen bir durumdur; çünkü göreceli yoğunluk arttıkça kafes yapı içerisinde daha fazla malzeme bulunacak kafes yapının dayanımı artacaktır.

Ashby-Gibson eğrisini yorulma analizlerinde kullanmak için yorulma oranının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yorulma oranı, kafes yapısının yorulma dayanım limitinin (σ_f), katı kütle yorulma dayanım limitine (σ_{of}) oranıdır. Yorulma oranını belirlemek için bu iki değeri bilmek gerekmektedir. Şekil 5.5'de elde edilen göreceli yoğunluk ile EDOY kafes yapı yorulma ömür eğrisi değişim grafiği kullanılarak, EDOY kafes yapının her bir göreceli yoğunluğuna ait yorulma dayanım limiti belirlenmiştir. Yorulma dayanım limiti belirlenirken, yorulma ömür grafiğinin özellikle YÇY bölgesinde değişmediği ya da grafiğin düzleştiği nokta belirlendi ve bu noktaya denk gelen gerilme değeri grafikten okunmuştur. Bu değerler; $\rho^*=0,80$ olduğunda yorulma dayanım limiti 65 MPa, $\rho^*=0,60$ olduğunda yorulma dayanım limiti 45 MPa, $\rho^*=0,34$ olduğunda yorulma dayanım limiti 18 MPa, $\rho^*=0,30$ olduğunda yorulma dayanım limiti 14 MPa, $\rho^*=0,23$ olduğunda yorulma dayanım limiti 7 MPa, $\rho^*=0,17$ olduğunda yorulma dayanım limiti 3 MPa olduğu Şekil 5.5'den görülmektedir. İkinci parametre olan katı kütle yapının yorulma dayanım limiti (σ_{of}) ise Şekil 5.3'te yeşil renk ile gösterilen katı kütle yorulma ömür grafiğinin değişmediği yani düzleştiği noktanın denk geldiği gerilme değeri olarak alınmış ve bu değer $\sigma_{of}=620$ MPa (Şekil 5.3'te $\sigma/\sigma_y=0,62$ olarak okunmuştur ve Çizelge 4.1'den $\sigma_y=1000$ MPa olduğu bilinmektedir) olarak belirlenmiştir. Yorulma oranı, bahsi geçen göreceli

yoğunluk değerindeki kafes yapının yorulma dayanım limit değerinin, katı kütle yorulma dayanım limit değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir. Yorulma oranı, Eş. (2.3)'de verilen Ashby-Gibson eşitliğinde yerine konulmuş ve Şekil 5.6'da göreceli yoğunluğa karşı grafiksel gösterim ile verilmiştir. Şekil 5.6'da gösterildiği gibi bu noktalardan geçen bir eğri oturtulmuştur. Noktalara uyarlanan bu eğri için elde edilen “ n ” ve “ C ” katsayıları sayesinde tüm göreceli yoğunluk değerlerindeki kafes yapıların yorulma ömrü tespit edilebilmektedir. Bu eğri sayesinde, Eş. (2.3)'te verilen Ashby-Gibson eşitliği kullanılarak ömür tahmini yapmak için gerekli katsayılar $C=0,153$ ve $n=1,59$ olarak bulunmuştur.



Şekil 5.5: EDOY kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda belirlenen yorulma ömür eğrileri



Şekil 5.6: EDOY kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi

5.2 Gerilme Konsantrasyon Modelinin Farklı Kafes Yapılar için Uygulanması

Önceki bölümde (Bölüm 5.1) SLE prosesi ile üretilmiş EDOY kafes yapının yorulma ömür eğrisini doğrudan katı kütle yorulma ömür değerinden elde etmek için önerilen hesaplama yöntemi açıklanmıştır. Bu yöntemde; ilk olarak katı kütle yorulma ömür eğrisi Brown-Miller gerinim tabanlı yorulma ömür yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve Eş. (4.6) ile verilen $K_{t(Toplam)}$ gerilme konsantrasyonu hesaplama eşitliği kullanılarak hem kafes yapısı geometrisinden gelen hem de üretim kaynaklı meydana gelebilecek kusurların etkisi dikkate alınarak EDOY kafes yapı için yorulma ömür eğrisi elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile literatürden Amin Yavari vd. (2013) tarafından EDOY kafes yapı için elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

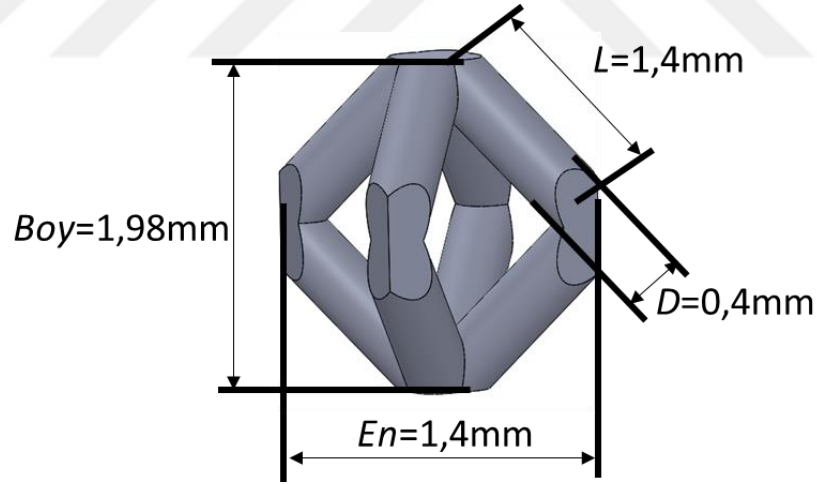
Önceki bölümde yapılan yorulma ömür eğrisi hesaplama yönteminin hem farklı kafes yapıları için de geçerli olduğunu göstermek hem de yöntemin farklı kafes yapılar için uygulanması amacıyla; bu bölümde, sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapılar için de aynı hesaplama yöntemini kullanarak yorulma ömür eğrileri elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda D. Zhao vd. (2018) tarafından yürütülen sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapıların yorulma ömür eğrilerinin deneysel olarak hesaplandığı çalışmalar, bu tez

çalışmasında nümerik olarak tekrarlanmış ve karşılaştırmalar sırasıyla Bölüm 5.2.1 ve 5.2.2’de yapılmıştır.

Son olarak, Bölüm 5.2.3’te sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapıların farklı göreceli yoğunluklarındaki yorulma ömür dayanım limiti değerini Ashby-Gibson yöntemi ile tespit etmek için ihtiyaç duyulan katsayılar tespit edilmiş ve sunulmuştur.

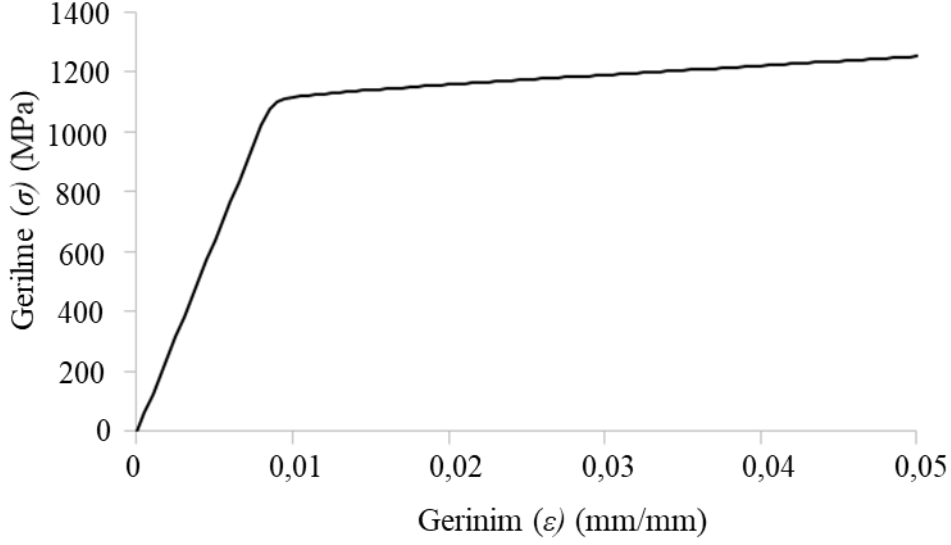
5.2.1 Sekizyüzlü geometri için gerilme konsantrasyon yaklaşımının kullanımı

Bu çalışmada belirtilen, SLE prosesi ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan sekizyüzlü geometrili kafes yapının deneysel yorulma ömür sonuçları aynı birim hücre boyutlarındaki katı kütlenin ömür değerleri kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada bahsi geçen sekizyüzlü geometri Şekil 5.7’de gösterilen ölçülere sahiptir. Doğrulama çalışmasında amaçlanan ise Şekil 5.7’de gösterilen kafes hücre ile aynı boyutlara (en x boy x yükseklik) sahip katı kütle oluşturularak bu katı kütlenin ömrünü hesaplamak ve sonrasında Eş (4.6)’da belirtilen toplam gerilme konsantrasyonu formülünü kullanarak katı kütle ömründen doğrudan kafes yapının yorulma ömür eğrisi sonuçlarını elde etmektir.



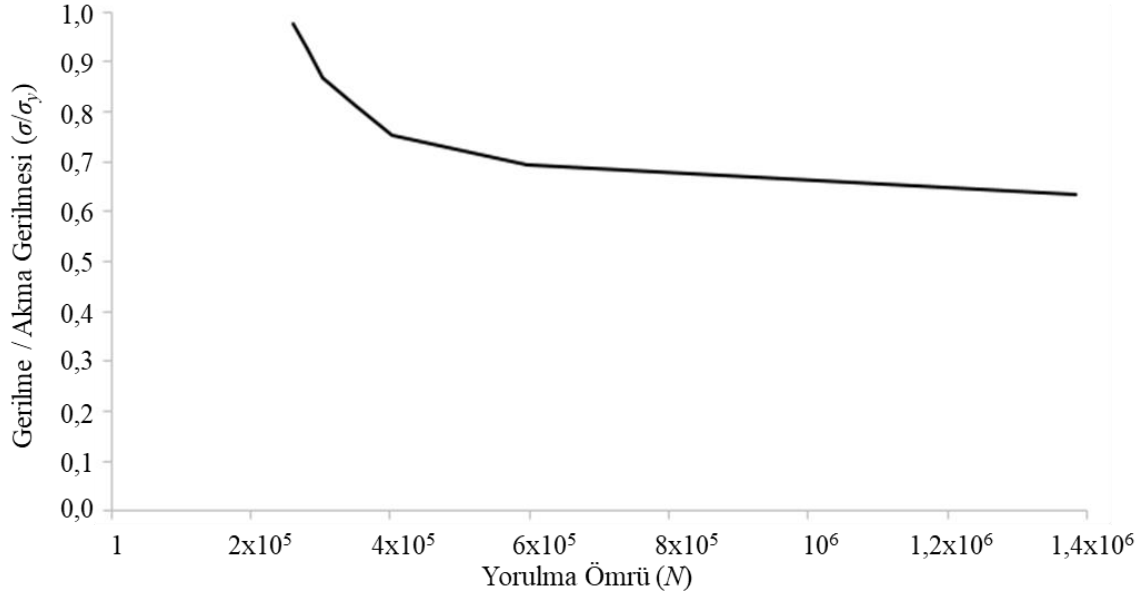
Şekil 5.7: Sekizyüzlü geometrili kafes yapı boyutları

Bu doğrulama çalışmasında ilk olarak Şekil 5.7’de gösterilen birim kafes hücrenin en boy ve yüksekliğindeki katı kütle yapı yarı-statik analize tabi tutularak Şekil 5.8’de gösterilen gerilme-gerinim eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.8: Sekizyüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı gerilme-gerinim eğrisi.

Yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim geçmişi dinamik analiz modeline aktarılmış ve ömür analizleri gerçekleştirilmiştir. Ömür analizleri sırasında Brown Milller gerinim tabanlı ömür hesaplama yöntemi Dowling, (2013) malzeme verisi (gerinim parametreleri) kullanılmıştır. Bu analiz sonucundan elde edilen yorulma ömür eğrisi Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

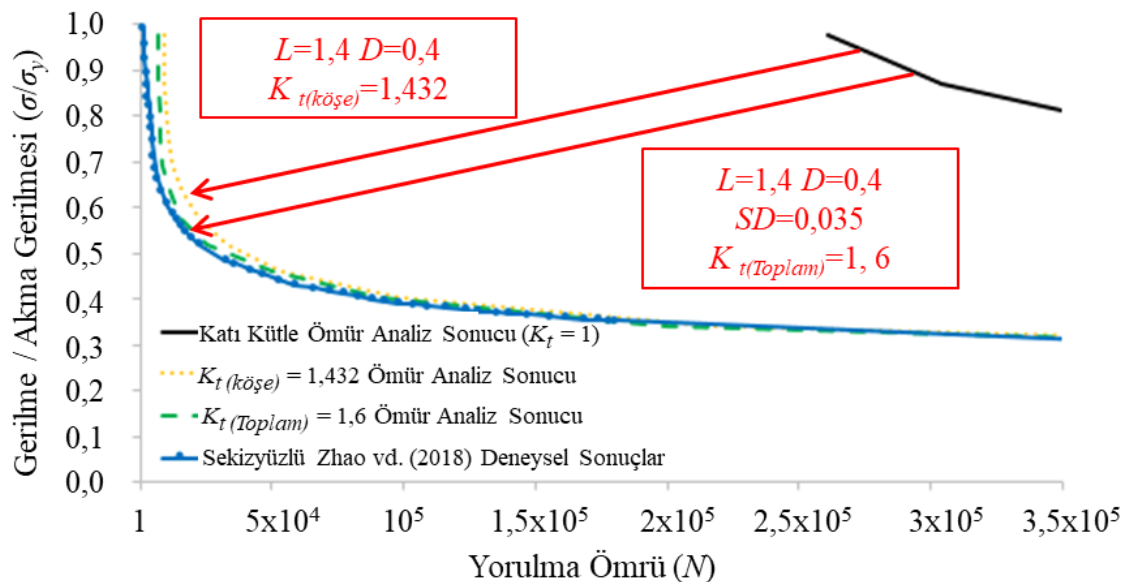


Şekil 5.9: Sekizyüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için nümerik ömür analizi sonucu belirlenen yorulma ömür eğrisi.

Katı kütle için yorulma ömür eğrisine, ilk olarak kafes yapının şeklinden kaynaklanan gerilme konsantrasyonu ($K_{I(köşe)}$) etkisi eklenmiş ve bu hesaplama ile katı kütle yorulma

ömür eğrisinden, doğrudan yüzeyinde kusur bulunmayan sekizyüzlü kafes yapı yorulma ömrü tespit edilmiştir. Bu hesaplamayı yapabilmek için Eş (4.4) ile $K_{t(köşe)}=1,432$ hesaplanmıştır. $K_{t(köşe)}$ değerinin hesaplanması sırasında D. Zhao vd. (2018) tarafından belirtilen çubuk boyu (L) 1,4 mm ve çubuk çapı (D) 0,4 mm alınmıştır. Şekil 5.10'da katı kütle yorulma ömür eğrisi düz siyah çizgi ile gösterilirken, $K_{t(köşe)}$ değeri ile hesaplanan yüzeyi kusursuz bir sekizyüzlü kafes yapının yorulma ömür eğrisi nokta-nokta sarı çizgi ile gösterilmiştir. Sekiz yüzlü kafes yapının üretim kaynaklı kusurlarının da hesaba katıldığı yorulma ömür eğrisini doğrudan katı kütle ömür sonuçlarından elde etmek amacıyla; Eş (4.6) ile verilen $K_{t(Toplam)}=1,6$ değeri baz alınarak hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplama sırasında $K_{t(Toplam)}$ değerini hesaplamak için çubuk boyu $L = 1,4$ mm çubuk çapı $D = 0,4$ mm ve çentik çapı $SD = 0,035$ olarak alınmıştır. Sekizyüzlü kafes yapının $K_{t(Toplam)}$ değeri kullanılarak elde edilen ve üretim kaynaklı kusurları barındıran yorulma ömür eğrisi ise Şekil 5.10'da kesikli çizgi (yeşil) ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar D. Zhao vd. (2018) tarafından yürütülen deneysel yorulma ömür sonuçları (Şekil 5.10 dairesel noktalı düz çizgi (mavi)) ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.10 ile gösterilen sonuçlardan, kafes yapıların ömrünün doğrudan katı kütle ömür eğrisine Eş. (4.6) uygulanarak tahmin edilmesi için ortaya konulan yöntemin deneysel sonuçlar ile yüksek korelasyon sağladığı görülmüştür.

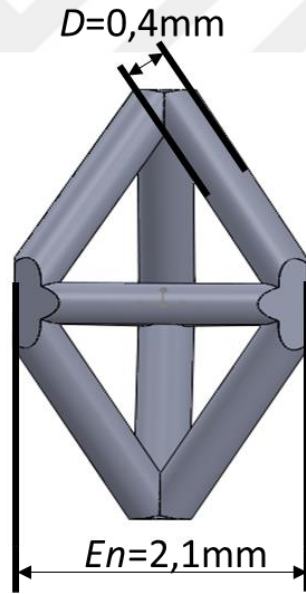


Şekil 5.10: Sekizyüzlü kafes yapı için deneysel (D. Zhao vd., 2018) ve nümerik ömür analizi ile belirlenen yorulma ömür eğrileri.

5.2.2 Dörtüzlü geometri için gerilme konsantrasyon yaklaşımının kullanımı

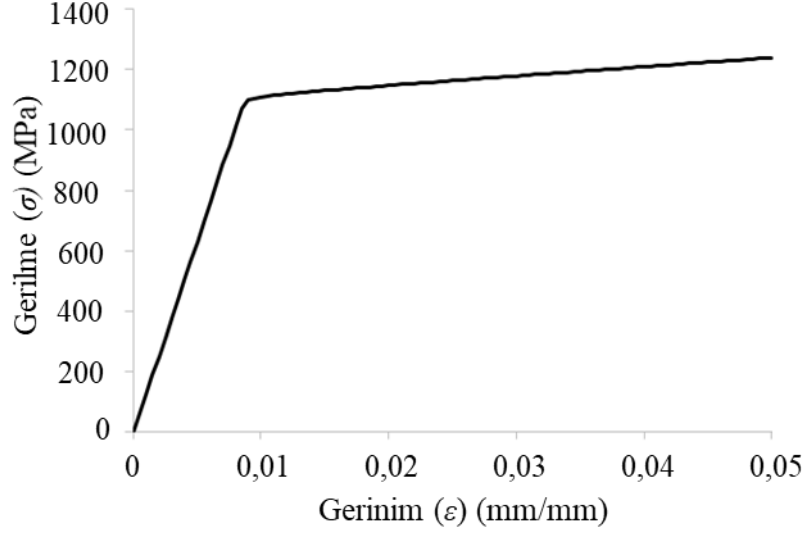
Bu çalışmada belirtilen, SLE prosesi ile üretilmiş malzemesi Ti6Al4V olan dörtüzlü geometriye sahip kafes yapının deneysel yorulma ömür sonuçları aynı birim hücre boyutlarındaki katı kütle için ömür değerleri kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada bahsi geçen dörtüzlü kafes yapı Şekil 5.11’de gösterilen ölçülere sahiptir. Doğrulama çalışmasında amaçlanan ise Şekil 5.11’de gösterilen kafes hücre ile aynı boyutlara (en x boy x yükseklik) sahip katı kütle oluşturarak bu katı kütle için ömrünü hesaplamak ve sonrasında Eş (4.6)’da belirtilen toplam gerilme konsantrasyonu formülünü kullanarak katı kütle ömründen doğrudan kafes yapının yorulma ömür eğrisi sonuçlarını elde etmektir.

Çalışmada ilk olarak dörtüzlü geometrisi Şekil 5.11’de gösterildiği ölçülerde oluşturulmuştur.



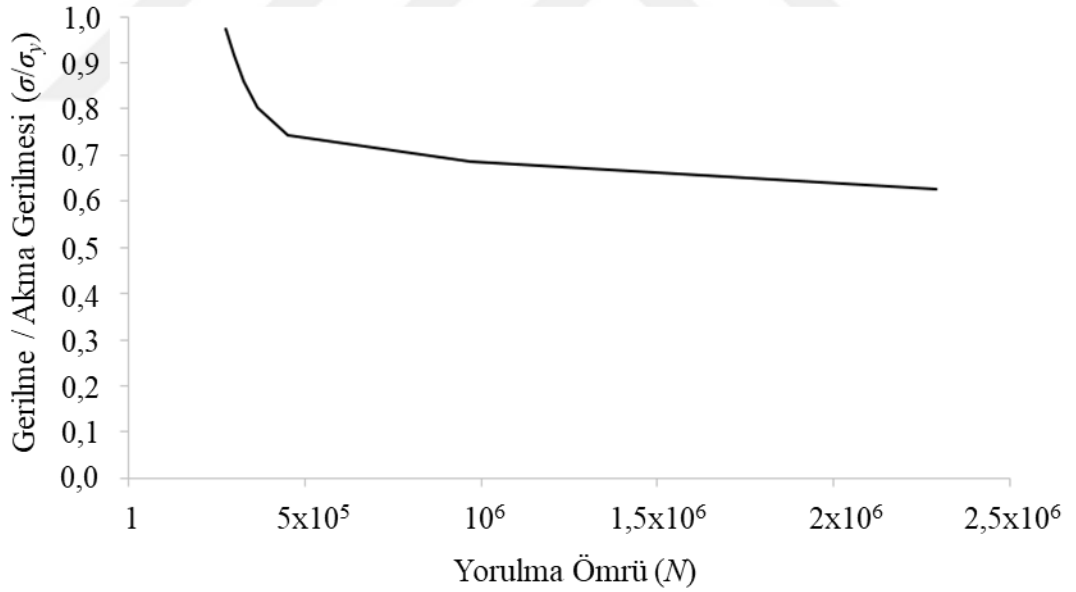
Şekil 5.11: Dörtüzlü geometri kafes yapısının boyutları

Tasarımı gerçekleştirilen dörtüzlü geometriye sahip kafes yapısının boyutlarındaki (en x boy x yükseklik) katı kütle, yarı-statik analize tabi tutulmuş ve bunun sonucunda Şekil 5.12’de gösterilen gerilme-gerinim eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 5.12: Dörtüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için gerilme-gerinim eğrisi

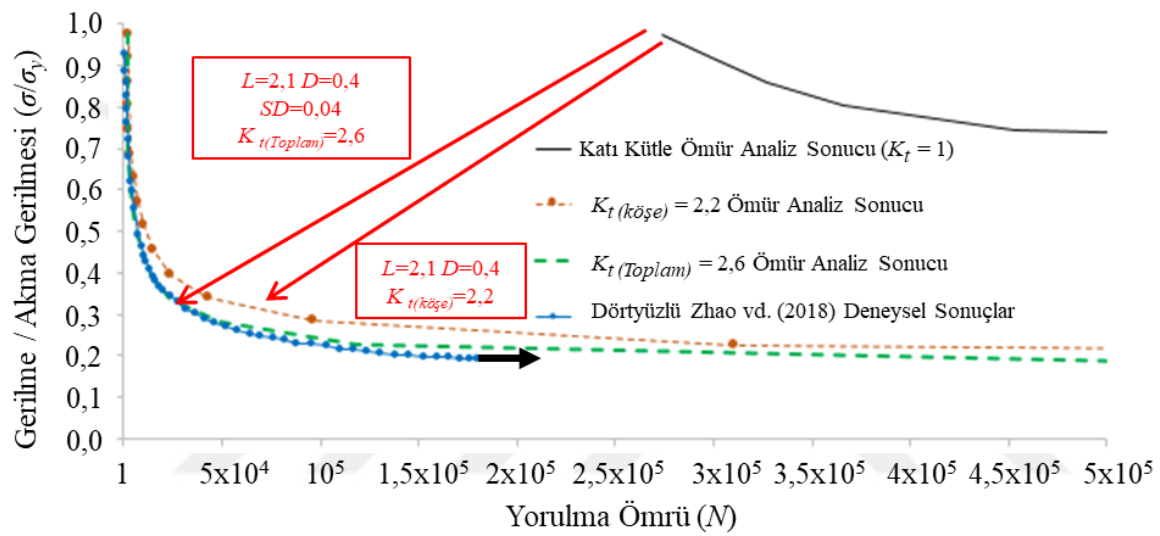
Yarı-statik analiz sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim geçmişi dinamik analize aktarılarak katı kütle yapının yorulma ömrü eğrisi Şekil 5.13'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.13: Dörtüzlü kafes yapı için kullanılacak katı kütle yapı için yorulma ömür eğrisi

Katı geometrinin yorulma ömür analiz sonuçları Eş. (4.4) ve Eş. (4.6) ile gösterilen gerilme konsantrasyon katsayıları ile hesaplandığında yorulma ömür sonuçları Şekil 5.14'de gösterildiği gibi olmaktadır. Burada noktalı kesikli çizgiler (turuncu) ile gösterilen kusursuz yüzeyli dörtüzlü kafes yapının yorulma ömür eğrisi Eş. (4.4) ile

hesaplanan $K_{t(köşe)}=2,2$ kullanılarak, doğrudan katı kütle ömür eğrisinden hesaplanmıştır. $K_{t(köşe)}$ değerinin hesaplanması sırasında çubuk boyu $L=2,1$ mm ve çubuk çapı $D=0,4$ mm olarak alınmıştır (D. Zhao vd., 2018). Dörtüzlü kafes yapının üretim kusurları göz önünde bulundurularak hesaplanan yorulma ömür eğrisi ise Şekil 5.14'te gösterilen kesikli düz çizgi (yeşil) ile gösterilen yorulma ömür eğrisidir. Bu yorulma ömür eğrinin hesaplanması sırasında katı kütle ömür sonuçlarına $K_{t(Toplam)}=2,6$ değerinin etkisi eklenerek elde edilmiştir. $K_{t(Toplam)}$ değerini hesaplarken çubuk boyu $L=2,1$ mm, çentik çapı $SD=0,04$ mm ve çubuk çapı $D=0,4$ mm olarak alınmıştır (D. Zhao vd., 2018).



Şekil 5.14: Dörtüzlü kafes yapı deneysel (D. Zhao vd., 2018) ve nümerik ömür analizi ile elde edilen yorulma ömür eğrileri.

Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere, bu çalışmada önerilen gerilme konsantrasyonu hesaplama yöntemi ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar (Şekil 5.14'de gösterilen noktalı düz çizgi (mavi)) ile iyi bir korelasyon sağlamaktadır. Aradaki fark özellikle DÇY bölgelerinde ölçülemeyecek kadar küçük olup YÇY bölgelerinde ise kabul edilebilir seviyededir. Bu farkın kabul edilebilir olmasının en büyük sebebi ise deneysel yürütülen yorulma ömür çalışmaları çok tekrarlı yapılmakta ve bu deneysel çalışmalardan elde edilen yorulma ömür eğrisi tekrarlı sonuçların ortalaması olarak verilmektedir. Bu nedenle özellikle yorulma ömrü için verilen deneysel sonuçlara %5 oranında yakın nümerik sonuçların yeterli olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmanın sonucunda, tez kapsamında önerilen; gerinim tabanlı Brown-Miller yorulma ömür hesaplama yöntemi ve gerilme konsantrasyonu $K_{t(Toplam)}$ değeri birlikte

kullanılarak bir kafes yapının yorulma ömür eğrisinin doğrudan katı kütle yorulma ömür sonuçlarından elde edilebileceği görülmüştür.

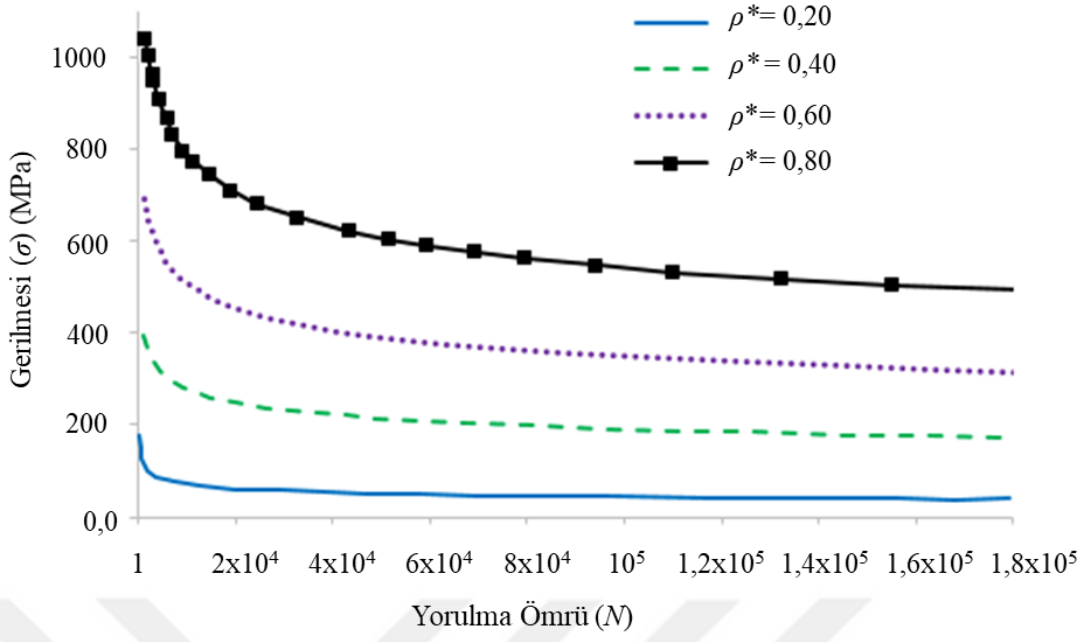
5.2.3 Sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapılar için göreceli yoğunluğa bağlı yorulma ömür sonuçları

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen sekizyüzlü ve dörtyüzlü geometri kafes yapıların yorulma ömür hesaplama çalışmaları, literatürde verilen deneysel verilerle karşılaştırabilmek için literatürde kullanılan göreceli yoğunluk değerlerinde sırasıyla %20 ve %15 için gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ise, sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapıların farklı göreceli yoğunlukları için yorulma ömrünü hesaplamak amacıyla Ashby-Gibson eğrileri belirlenmiştir. Bu amaçla, sekizyüzlü ve dörtyüzlü kafes yapılar için de aynı Bölüm 5.1’de yapıldığı gibi her bir göreceli yoğunluğunda ayrı ayrı yorulma ömrü hesaplamak yerine belirli aralıklarda göreceli yoğunluk değerinde ömür eğrileri elde ederek Eş. (2.3)’de verilen Ashby-Gibson eğrisi için “ n ” ve “ C ” sabitleri tespit edilmiştir.

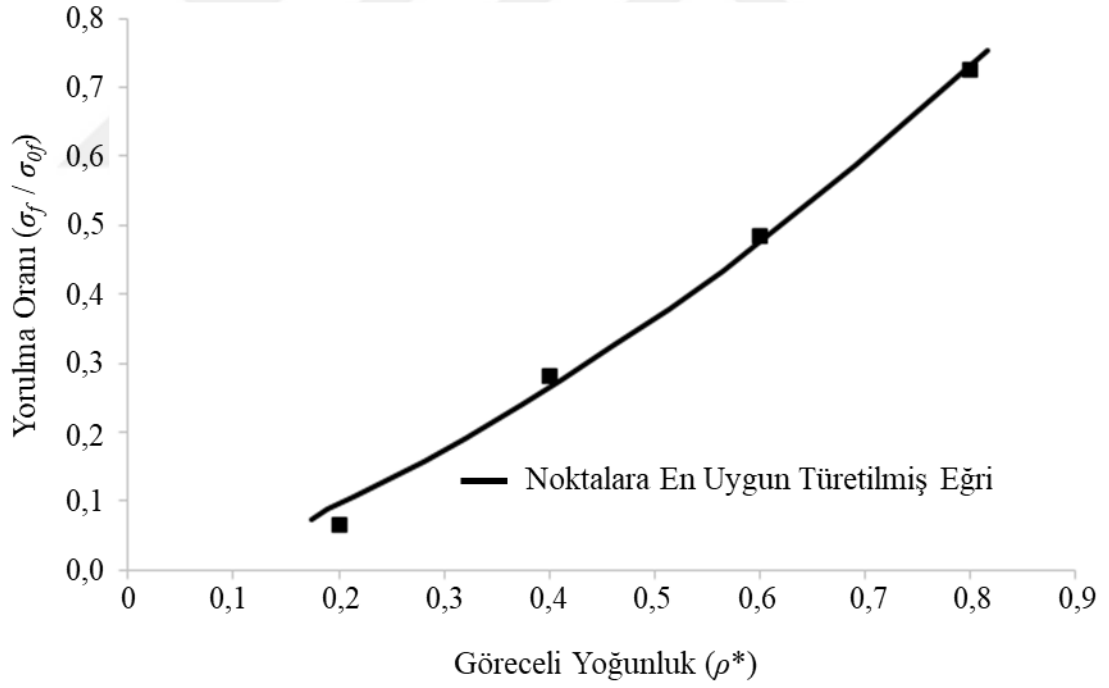
Sekizyüzlü kafes yapı için farklı göreceli yoğunluk değerlerinde Şekil 5.15’te gösterilen yorulma ömür eğrileri önerilen metodoloji kullanılarak elde edilmiştir. Göreceli yoğunluk değerinin artışı ile kafes yapı yorulma dayanım limitinin (σ_f) arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 5.15’teki bu eğrilerden sekizyüzlü kafes yapının her bir göreceli yoğunluk değeri için yorulma dayanım limiti belirlenmiştir. Yorulma dayanım limiti belirlenirken, yorulma ömür grafiğinin özellikle YÇY bölgesinde değişmediği ya da grafiğin düzleştiği nokta belirlendi ve bu noktaya denk gelen gerilme değeri grafikten okunmuştur. Bu değerler sekizyüzlü kafes yapının; $\rho^*=0,80$ olduğunda yorulma dayanım limiti 450 MPa, $\rho^*=0,60$ olduğunda yorulma dayanım limiti 300 MPa, $\rho^*=0,40$ olduğunda yorulma dayanım limiti 175 MPa, $\rho^*=0,20$ olduğunda yorulma dayanım limiti 40 MPa olduğu Şekil 5.5’den görülmektedir. İkinci parametre olan katı kütle yapının yorulma dayanım limiti (σ_{of}) ise Şekil 5.9’da gösterilen katı kütle yorulma ömür grafiğinin değişmediği yani düzleştiği noktanın denk geldiği gerilme değeri olarak alınmış ve bu değer $\sigma_{of}=620$ MPa olarak belirlenmiştir. Yorulma oranı, bahsi geçen göreceli yoğunluk değerindeki kafes yapının yorulma dayanım limit değerinin, katı kütle yorulma dayanım limit değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir. Yorulma oranı, Eş. (2.3)’de verilen Ashby-Gibson eşitliğinde yerine konulmuş ve Şekil 5.16’da göreceli yoğunluğa karşı grafiksel

gösterim ile verilmiştir. Şekil 5.16’da gösterildiği gibi bu noktalardan geçen bir eğri oturtulmuştur. Noktalara uyarlanan bu eğri için elde edilen “ n ” ve “ C ” katsayıları sayesinde tüm göreceli yoğunluk değerlerindeki sekiz yüzlü kafes yapıların yorulma ömrü dayanım noktası tespit edilebilmektedir. Bu eğri sayesinde Ashby-Gibson eşitliği kullanılarak yorulma oranı ve dolayısıyla kafes yapının yorulma dayanım limitini tahmin etmek için Eş. (2.3)’te gerekli katsayılar $C=1,016$ ve $n=1,471$ olarak bulunmuştur.

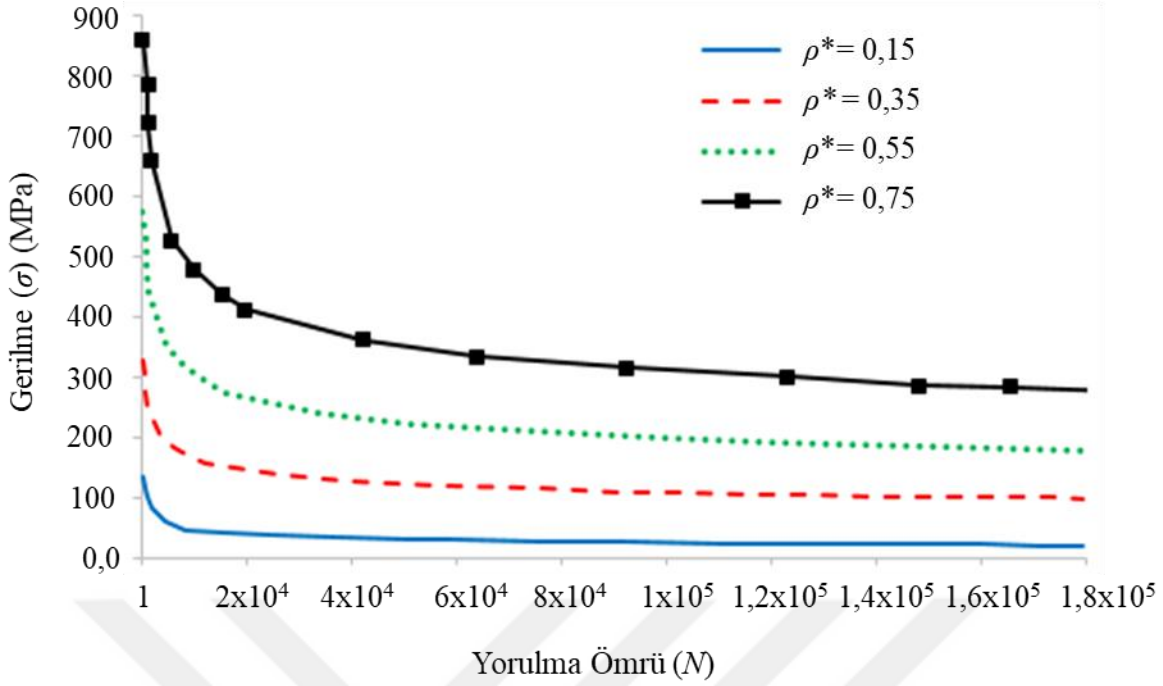
Dörtüzlü kafes yapı için de farklı göreceli yoğunluk değerlerinde Şekil 5.17’te gösterilen yorulma ömür eğrileri yine önerilen metodoloji ile elde edilmiştir. Şekil 5.17’deki bu eğrilerden dörtüzlü kafes yapının her bir göreceli yoğunluk değeri için yorulma dayanım limiti (σ_f) belirlenmiştir. Yorulma dayanım limiti belirlenirken, yorulma ömür grafiğinin özellikle YÇY bölgesinde değişmediği ya da grafiğin düzleştiği nokta belirlendi ve bu noktaya denk gelen gerilme değeri grafikten okunmuştur. Bu değerler sekizyüzlü kafes yapının; $\rho^*=0,75$ olduğunda yorulma dayanım limiti 260 MPa, $\rho^*=0,55$ olduğunda yorulma dayanım limiti 170 MPa, $\rho^*=0,35$ olduğunda yorulma dayanım limiti 100 MPa, $\rho^*=0,15$ olduğunda yorulma dayanım limiti 20 MPa olduğu Şekil 5.5’den görülmektedir. İkinci parametre olan katı kütle yapının yorulma dayanım limiti (σ_{of}) ise Şekil 5.13’te gösterilen katı kütle yorulma ömür grafiğinin değişmediği yani düzleştiği noktanın denk geldiği gerilme değeri olarak alınmış ve bu değer $\sigma_{of}=620$ MPa olarak belirlenmiştir. Yorulma oranı, bahsi geçen göreceli yoğunluk değerindeki kafes yapının yorulma dayanım limit değerinin, katı kütle yorulma dayanım limit değerine oranlanmasıyla elde edilmiştir. Yorulma oranı, Eş. (2.3)’de verilen Ashby-Gibson eşitliğinde yerine konulmuş ve Şekil 5.18’de göreceli yoğunluğa karşı grafiksel gösterim ile verilmiştir. Şekil 5.18’de gösterildiği gibi bu noktalardan geçen bir eğri oturtulmuştur. Ashby-Gibson eşitliği kullanılarak yorulma oranı ve dolayısıyla kafes yapının yorulma dayanım limitini tahmin etmek için Eş. (2.3)’te gerekli katsayılar $C=0,621$ ve $n=1,356$ olarak bulunmuştur.



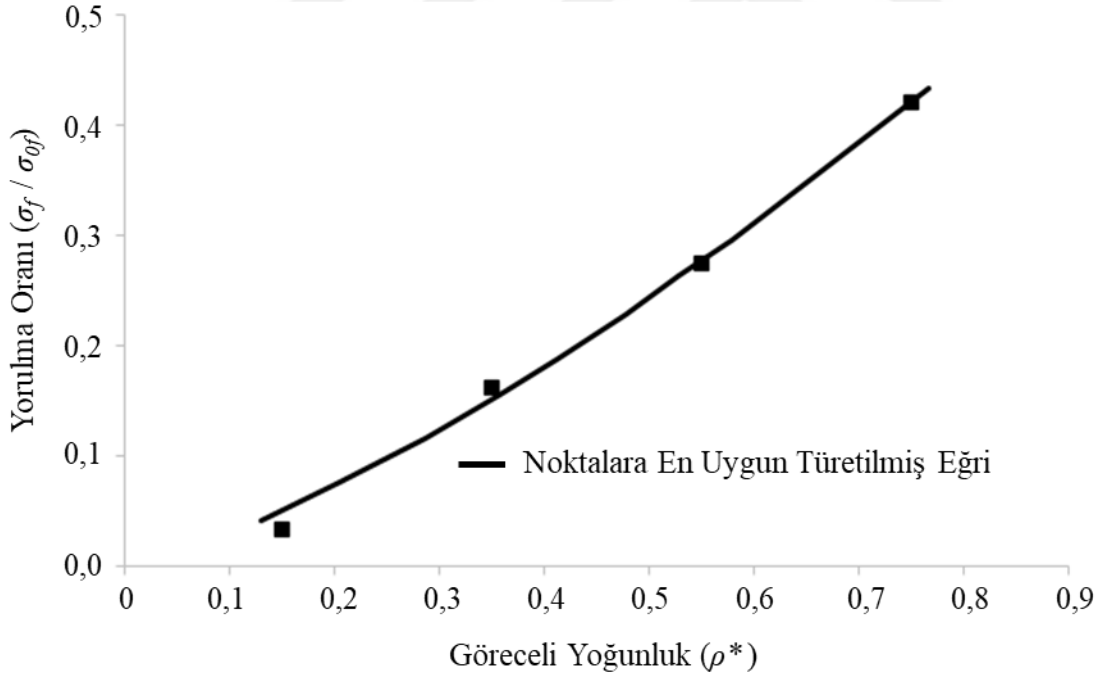
Şekil 5.15: Sekizyüzlü kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarda elde edilen yorulma ömür eğrileri.



Şekil 5.16: Sekizyüzlü kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi.



Şekil 5.17: Dörtüzlü kafes yapının farklı göreceli yoğunluklarda elde edilen yorulma ömür eğrileri.



Şekil 5.18: Dörtüzlü kafes yapı için farklı göreceli yoğunluklarda yorulma oranını tanımlayan Ashby-Gibson eğrisi.

Elde edilen bu sonuçlar ile sekizyüzlü ve dörtüzlü kafes yapıların farklı göreceli yoğunluklarındaki yorulma ömür dayanım limiti doğrudan Ashby-Gibson katsayıları kullanılarak tespit edilebilecektir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada özet olarak, eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların yorulma ömür eğrileri nümerik yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada Brown-Miller gerinim tabanlı yorulma ömrü hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Brown-Miller yönteminin doğru bir şekilde kullanıldığını göstermek amacıyla ilk olarak Peng vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen nümerik hesaplamalar tekrarlanarak aynı sonuç elde edildiği gösterilmiştir. Çalışmanın esas amacı gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplama yöntemlerinin, gerilme tabanlı hesaplama yöntemlerine karşı üstün olduğunu göstermek olduğundan dolayı Amin Yavari vd. (2013) tarafından Ti6Al4V malzeme ile SLE tekniği ile üretimi gerçekleştirilen EDOY geometrili kafes yapıların deneysel yorulma ömür çalışması ve Hedayati, Hosseini-Toudeshky, vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen gerilme tabanlı yorulma ömrü hesaplama çalışmaları, nümerik olarak gerinim tabanlı yöntem olan Brown-Miller ile çözümlenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu gerinim tabanlı nümerik yorulma ömür hesaplama yönteminin, gerilme tabanlı yorulma ömrü hesaplama yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Nümerik analizler sırasında; bir kafes yapısının yorulma ömrünü, doğrudan katı kütleden yapılmış malzemenin yorulma ömründen hesaplayabilmek için gerilme konsantrasyon eşitliği sunulmuş ve EDOY kafes yapısının yorulma ömür eğrisi bu eşitlik sayesinde hesaplanabilmiştir. Burada ortaya konulan gerilme konsantrasyonu hesaplama eşitliğini farklı kafeslerde doğrulamak için D. Zhao vd. (2018) tarafından Sekizyüzlü ve Dörtüzlü geometrili kafes yapılar için gerçekleştirilen deneysel yorulma ömür çalışması, nümerik olarak hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Gerçekleştirilen bu analiz çalışmaları neticesinde aşağıda sunulmuş olan 5 sonuç elde edilmiş ve literatüre burada belirtilen katkılar sağlanmıştır;

- (i) Kafes yapıların sadece bir birim hücre modeli ile yarı-statik ve yorulma ömür analizleri gerçekleştirilerek, Hedayati, Hosseini-Toudeshky vd.

(2016) ve Zargarian vd. (2016) taraflarından yapılan tüm kafes yapı modellemesine göre nümerik analiz süreleri kısaltılmıştır. Bu çalışmanın, literatürde tek birim hücre kullanarak analiz yapan Peng vd. (2020)'nin çalışmasından farklı gerinim tabanlı yorulma ömür hesaplamalarında üç farklı gerilme konsantrasyonun ($K_{t(köşe)}$, $K_{t(pürüzlülük)}$ ve $K_{t(Toplam)}$) kullanılarak birim hücre analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu yaklaşım ile hesaplama maliyetleri düşürülerek gerinim tabanlı yorulma ömür analiz sonuçları sunulmuştur.

- (ii) Çalışmada eklemeli imalat ile üretilmiş Ti6Al4V kafes yapıların yorulma ömür eğrilerinin gerinim tabanlı Brown-Miller yöntemi ve önerilen $K_{t(pürüzlülük)}$ eşitliğinin kullanılarak hesaplanabileceği gösterilmiştir. Literatürden alınan deneysel sonuçlar ile yapılan kıyaslama sonucunda gerinim tabanlı yöntem ile elde edilen kafes yapısı yorulma ömür eğrilerinin, gerilme tabanlı hesaplama yöntemlerine göre daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.
- (iii) Bu çalışma sonucunda, 3 farklı gerilme konsantrasyonu ($K_{t(köşe)}$, $K_{t(pürüzlülük)}$ ve $K_{t(Toplam)}$) hesaplama eşitliği ortaya konulmuştur. Bu eşitliklerden ilki olan $K_{t(köşe)}$, yüzeyinde üretim kusurları barındırmayan (pürüzsüz) kafes yapının yorulma ömür eğrisini doğrudan katı kütle ömür analiz sonuçlarından elde etmek amacıyla kullanılabilir. İkinci eşitlik olan $K_{t(pürüzlülük)}$, tasarlanmış bir kafes yapısının yorulma ömür eğrisini elde ettikten sonra eklemeli imalat kaynaklı yüzeyinde meydana gelen kusurların hesaba katılması durumunda kullanılabilir. Üçüncüsü ise $K_{t(Toplam)}$, bir kafes yapısının yüzey kusurları dahil yorulma ömür eğrisini, doğrudan katı kütle ömür analiz sonuçlarından elde etmek amacıyla kullanılabilir.
- (iv) Bu çalışma sonucunda elde edilen bu 3 farklı gerilme konsantrasyon ($K_{t(köşe)}$, $K_{t(pürüzlülük)}$ ve $K_{t(Toplam)}$) hesaplama eşitliği literatürde daha önce bulunmayan ve bu tez kapsamında literatüre sunulmuş özgün çıktılardır. Bu çalışma sonucu ortaya konulan üç farklı gerilme konsantrasyon eşitliği ($K_{t(köşe)}$, $K_{t(pürüzlülük)}$ ve $K_{t(Toplam)}$) EDOY, Sekizyüzlü ve Dörtüzlü kafes yapıların yorulma eğrilerinin hesaplanmasında kullanılmış ve elde edilen nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında sunulan gerilme konsantrasyon

hesaplama eşitliklerinin farklı kafes yapıların yorulma eğrilerini hesaplamak için de kullanılabileceği gösterilmiştir.

- (v) Tez kapsamında önerilen ve literatürdeki deneysel çalışmalar ile doğrulanan nümerik ömür hesaplama metodu kullanılarak, EDOY, Sekizyüzlü ve Dörtüzlü kafes yapıların, belirli aralıklar ile göreceli yoğunluk değişimine bağlı yorulma ömür eğrileri hesaplanmıştır. Bu üç kafes yapısının, farklı göreceli yoğunluklarda elde edilen yorulma ömür eğrilerinden yorulma dayanım limitleri tespit edilmiştir. Hesaplanan yorulma dayanım limitleri Ti6Al4V katı malzemenin yorulma dayanım limitine oranlanarak yorulma oranları belirlenmiş ve farklı göreceli yoğunluklar için aralarındaki fonksiyonel ilişki belirlenmiştir. Bu fonksiyonel ilişki için Ashby-Gibson eşitliği (Eş. (2.6)) göreceli yoğunluk ve yorulma oranı verisine uyarlanarak “*C*” ve “*n*” katsayıları tespit edilmiştir. Bu katsayılar sayesinde EDOY, Sekizyüzlü ve Dörtüzlü kafes yapıların tüm göreceli yoğunlukları için yorulma dayanım limiti doğrudan tespit edilebilecektir.

Bu çalışma sonucunda, 3 farklı kafes yapı içi ayrı ayrı türetilen *C* ve *n* katsayıları literatürde daha önce bulunmayan ve bu tez kapsamında literatüre sunulmuş özgün çıktılardır.

Gerçekleştirilen tez çalışması, aşağıda belirtilen öneriler doğrultusunda gelecekte yeni çalışmalara ön ayak olacaktır;

- (i) Bu çalışmada önerilen gerinim tabanlı nümerik yorulma analizi yöntemi literatürden alınan deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Bunlara ek olarak, SLE yöntemi ile farklı kafes yapılarda numuneler üretilerek, yorulma testleri yapılabilir ve bu sayede doğrulamalar yapılan deneysel çalışmalar ile genişletilebilir.
- (ii) SLE ile üretilen kafes yapıların yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla yorulma ömür performansı, lazer gücü ve hızı gibi SLE proses parametrelerinin değerlerinin değişimi ile farklılık gösterebilmektedir (Karami vd., 2020). O yüzden, farklı proses parametre değerlerinde üretimler ve testler gerçekleştirilip, önerilen gerilme konsantrasyonu eşitlikleri elde edilen

verilere göre güncellenebilir ve bu sayede proses parametre değerlerinin yorulma ömrüne etkisi nümerik analizlere dahil edilebilir.

- (iii) Bu tezde önerilen yöntem kullanılarak hafifliğinden dolayı özellikle havacılık alanında yaygın olarak tercih edilen Al₂Si₁₀Mg alaşımı gibi SLE ile üretilen farklı malzemeler için de kafes yapıların yorulma ömür eğrileri doğrudan hesaplanabilir.
- (iv) Bu çalışmada, EDOY kafes yapı yorulma analizlerinde, gerinim ömür hesaplama yöntemleri ile en çok kullanımı tercih edilen Morrow ortalama gerilme teorisi kullanılarak Şekil 5.1’de görüldüğü gibi yorulma eğrisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, EDOY kafes yapı yorulma ömrü belirlemek için tatbik edilen yükleme tipi basma-basma ve $R=0,1$ olmasına rağmen Şekil 5.1’de elde edilen sonuçtan görüldüğü gibi Morrow ortalama gerilme etkisi sanki çekme kalıntı gerilmesi bırakıyormuş gibi yorulma ömür eğrisini aşağı yönde çekmektedir. Ancak, EDOY kafes yapı basma-basma yüküne maruz kaldığı için basma kalıntı gerilmesi meydana gelmesi gerektiğinden dolayı yorulma ömür eğrisinin yukarı yönlü hareket etmesi beklenmektedir. Bu sonucun sebebi araştırıldığında, literatürde de Morrow ortalama gerilme teorisi kullanılarak elde edilen sonuçlarda her zaman parçada çekme kalıntı gerilmesi meydana geliyormuş gibi yorulma eğrisini aşağı yönlü hareket ettirecek şekilde hesaplama yaptığı belirtilmiştir (Kumbhar ve Tayade, 2014). Ayrıca, Morrow ortalama gerilmesinin daha çok YÇY ömrü bölgesinde etkili olmasından dolayı DÇY ömür bölgesinde göz ardı edilmesi gerektiği literatürde bahsedilmiştir (Stephens vd., 2001). Bu sonuçlar doğrultusunda tezde kullanılan ömür hesaplama çalışmalarında, ortalama gerilme teorisinin etkileri hesaba katılmadan elde edilen nümerik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yeterince yakın olmasından dolayı ortalama gerilme etkisi göz ardı edilmiştir. Fakat, kafes yapısının basma-çekme gibi zıt yönlü yüklemelere maruz kaldığı durumlarda ya da bu tip tersinir yüklemelerde ortalama gerilmenin çekme yönünde yüksek olduğu durumlarda, ortalama gerilme yönteminin etkisinin incelenmesi gerekebilir. Çünkü böyle bir durumda kalıntı gerilme miktarı çekme yönünde fazla olacak ve yorulma ömrünü etkileyecektir. Kafes yapıların yorulma ömür hesaplamalarında “ortalama gerilme teorisinin” etkisini

gösterecek yeterli çalışma olmadığı literatürde de ortaya konulmuştur (Krijger vd., 2017). Bu amaç doğrultusunda, Morrow, Manson and Halford veya SWT (Smith Watson ve Topper) gibi ortalama gerilme hesaplama yöntemleri bu tez kapsamında önerilen hesaplama yöntemi ile kullanılarak yorulma ömür eğrisi oluşturulabilir. Dolayısı ile, yorulma ömür eğrisinin hesaplanması sırasında; Morrow yönteminin kullanımı YÇY bölgesinde, Manson and Halford yönteminin kullanımı DÇY bölgesinde ve tamamen tersinir yükleme olan $R=-1$ durumunda ise SWT yönteminin kullanımı ile yüksek hassasiyetli sonuçlar elde edilebilir. Bunun için tez kapsamında önerilen yorulma hesaplama yönteminde yalnızca yükleme profili değiştirilerek ve ömür hesaplama programlarında (fe-safe vb.), programın içerisinden uygun ortalama gerilme yöntemi seçilerek analizler gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Achillas, C., Tzetzis, D., Raimondo, M. O.** 2017. "Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies". *International Journal of Production Research*, 55(12), 3497–3509.
- Ahmadi, S. M., Hedayati, R., Li, Y., Lietaert, K., Tümer, N., Fatemi, A., Zadpoor, A. A.** 2018. "Fatigue performance of additively manufactured meta-biomaterials: The effects of topology and material type". *Acta Biomaterialia*, 65, 292–304.
- Ahmadi, S. M., Kumar, R., Borisov, E. V., Petrov, R., Leeﬂang, S., Li, Y., ... Popovich, V. A.** 2019. "From microstructural design to surface engineering: A tailored approach for improving fatigue life of additively manufactured meta-biomaterials". *Acta Biomaterialia*, 83, 153–166.
- Amin Yavari, S., Ahmadi, S. M., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A.** 2015. "Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 43, 91–100.
- Amin Yavari, S., Wauthle, R., Van Der Stok, J., Riemsﬂag, A. C., Janssen, M., Mulier, M., Zadpoor, A. A.** 2013. "Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting". *Materials Science and Engineering C*, 33(8), 4849–4858.
- Ashby G.** 2006. "*The Properties Of Foams And Lattices*", Physical and Engineering Sciences, 2006, 364.1838: 15-30.
- Babae, S., Jahromi, B. H., Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A.** 2012. "Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures". *Acta Materialia*, 60(6–7), 2873–2885.
- Basquin, O. H.** 1910. "*The Exponential Law Of Endurance Tests*". ASTM, Vol.10, 625.
- Bauschinger, J.** 1886. "*On the change of position of the elastic limit of iron and steel under cyclic variations of stress*". Mitt. Mech.-Tech. Lab., Munich, 1886, 13.1.
- Belle, L. V. A. N., Vansteenkiste, G., Boyer, J.** 2013. "*Investigation of residual stresses induced during the selective laser melting process*", 557, 1828–1834.
- Benedetti, M., Fontanari, V., Bandini, M., Zanini, F., Carmignato, S.** 2018. "Low- and high-cycle fatigue resistance of Ti-6Al-4V ELI additively manufactured via selective laser melting: Mean stress and defect sensitivity". *International Journal of Fatigue*, 107(August 2017), 96–109.
- Bobbert, F. S. L., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, S. M., Weinans, H., Zadpoor, A. A.** 2017. "Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties". *Acta Biomaterialia*, 53, 572–584.
- Boniotti, L., Beretta, S., Patriarca, L., Rigoni, L., Foletti, S.** 2019. "Experimental and numerical investigation on compressive fatigue strength of lattice structures of AlSi7Mg manufactured by SLM". *International Journal of Fatigue*, 128(July), 105181.
- Brown, M. W., Miller, K. J.** 1973. "*Applied mechanics group a theory for fatigue*

- failure under multiaxial stress-strain conditions*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 187.1, 745–755.
- C. W. MacGregor and N. Grossman.** 1952. "National advisory committee for aeronautics". *Journal of the Franklin Institute*, 222(4), 511–512.
- Coffin, L. F.** 1962. "*Experimental Support For Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue*". vol. 84 No.4, Ed., ASME.
- Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., Pham, D.** 2016. "Cost models of additive manufacturing: A literature review". *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), 263–282.
- Dallago, M., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., Benedetti, M.** 2019. "On the effect of geometrical imperfections and defects on the fatigue strength of cellular lattice structures additively manufactured via Selective Laser Melting". *International Journal of Fatigue*, 124(November 2018), 348–360.
- De Krijger, J., Rans, C., Van Hooreweder, B., Lietaert, K., Pouran, B., Zadpoor, A. A.** 2017. "Effects of applied stress ratio on the fatigue behavior of additively manufactured porous biomaterials under compressive loading". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70(December 2016), 7–16.
- Dowling, N. E.** 2013. "*Mechanical Behaviour of the Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*". Pearson Education Limited, 4th Edition, 751.
- Edwards, P., O’Conner, A., Ramulu, M.** 2013. "Electron beam additive manufacturing of titanium components: Properties and performance". *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 135(6), 1–8.
- Edwards, P., Ramulu, M.** 2014. "Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V". *Materials Science and Engineering A*, 598, 327–337.
- Fousová, M., Vojtěch, D., Doubrava, K., Daniel, M., Lin, C. F.** 2018. "Influence of inherent surface and internal defects on mechanical properties of additively manufactured Ti6Al4V alloy: Comparison between selective laser melting and electron beam melting". *Materials*, 11.4, 537.
- Frazier, W. E.** 2014. "Metal additive manufacturing: A review". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
- G. Qylafku, V.** 1999. "Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats". *Int. J. Fatigue*, 21(8), 753–760.
- Ghasabi, A. A.** 2018. "*Fatigue pre-cracking life estimation for fracture toughness test specimens*", Master's Thesis, METU, Ankara.
- Gibson, L. J.; Ashby, M. F.** 1999. "*Cellular Solids: Structure & Properties*". Cambridge university press 28.4: 270-274.
- Günther, J., Krewerth, D., Lippmann, T., Leuders, S., Tröster, T., Weidner, A., ... Niendorf, T.** 2017. "Fatigue life of additively manufactured Ti-6Al-4V in the very high cycle fatigue regime". *International Journal of Fatigue*, 94, 236–245.
- Guo, L. P., Carpinteri, A., Roncella, R., Spagnoli, A., Sun, W., Vantadori, S.** 2009. "Fatigue damage of high-performance concrete through a 2D mesoscopic lattice model". *Computational Materials Science*, 44(4), 1098–1106.
- Guo, X. D. E., McMahan, T. A., Keaveny, T. M., Hayes, W. C., Gibson, L. J.** 1994. "Finite element modeling of damage accumulation in trabecular bone under cyclic loading". *Journal of Biomechanics*, 27(2), 145–155.
- Hedayati, R., Hosseini-Toudeshky, H., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., Zadpoor, A. A.** 2016. "Computational prediction of the fatigue behavior of additively manufactured porous metallic biomaterials". *International Journal of*

Fatigue, 84, 67–79.

- Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., Zadpoor, A. A.** 2016. "Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials". *Materials and Design*, 89, 9–20.
- Hrabe, N. W., Heintz, P., Flinn, B., Körner, C., Bordia, R. K.** 2011. "Compression-compression fatigue of selective electron beam melted cellular titanium (Ti-6Al-4V)". *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 99 B(2), 313–320.
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., Hou, L.** 2013. "Additive manufacturing and its societal impact: A literature review". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), 1191–1203.
- Huynh, L., Rotella, J., Sangid, M. D.** 2016. "Fatigue behavior of IN718 microtrusses produced via additive manufacturing". *Materials and Design*, 105, 278–289.
- J. Collins, H. Busby, and G. S.** 2015. "*Mechanical Design Of Machine Elements And Machines*", Wiley, Ed., Second, 246–248.
- Jamshidinia, M., Kong, F., Kovacevic, R.** 2013. "The numerical modeling of fatigue properties of a bio-compatible dental implant produced by Electron Beam Melting® (EBM)". *24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013, (August)*, 791–804.
- Jamshidinia, M., Wang, L., Tong, W., Ajlouni, R., Kovacevic, R.** 2015. "Fatigue properties of a dental implant produced by electron beam melting® (EBM)". *Journal of Materials Processing Technology*, 226, 255–263.
- Karami, K., Blok, A., Weber, L., Ahmadi, S. M., Petrov, R., Nikolic, K., ... Popovich, V. A.** 2020. "Continuous and pulsed selective laser melting of Ti6Al4V lattice structures: Effect of post-processing on microstructural anisotropy and fatigue behaviour". *Additive Manufacturing*, 36(June), 101433.
- Kelly, C. N., Francovich, J., Julmi, S., Safranski, D., Guldberg, R. E., Maier, H. J., Gall, K.** 2019. "Fatigue behavior of As-built selective laser melted titanium scaffolds with sheet-based gyroid microarchitecture for bone tissue engineering". *Acta Biomaterialia*, 94, 610–626.
- Kumbhar, S. V., Tayade, R. M.** 2014. "A Case Study on Effect of Mean Stress on Fatigue Life". *International Journal of Engineering Development and Research*, 2(1), 304–308.
- Lee, Y.-L. et al.** 2011. "*Metal Fatigue Analysis Handbook: Practical Problem-Solving Techniques For Computer-Aided Engineering*", Elsevier, 142–150.
- Li, S. J., Murr, L. E., Cheng, X. Y., Zhang, Z. B., Hao, Y. L., Yang, R., Medina, F.** 2012. "Compression fatigue behavior of Ti – 6Al – 4V mesh arrays fabricated by electron beam melting", 60, 793–802.
- Lipinski, P., Barbas, A., Bonnet, A. S.** 2013. "Fatigue behavior of thin-walled grade 2 titanium samples processed by selective laser melting. Application to life prediction of porous titanium implants". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 28, 274–290.
- Liu, Y. J., Ren, D. C., Li, S. J., Wang, H., Zhang, L. C., Sercombe, T. B.** 2020. "Enhanced fatigue characteristics of a topology-optimized porous titanium structure produced by selective laser melting". *Additive Manufacturing*, 32.
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M.** 2019. "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges". *Materials & Design*, 183, 108137.
- Makiyama, A. M., Vajjhala, S., Gibson, L. J.** 2002. "Analysis of crack growth in a 3D voronoi structure: A model for fatigue in low density trabecular bone".

- Journal of Biomechanical Engineering*, 124(5), 512–520.
- Manson, S. C. W. M. and N. G.** 1953. "Behavior of materials under conditions of thermal stress". National Advisory Committee for Aeronautics, 2933, 9-75.
- Masing, G.** 1926. "Eigenspannungen and Verfestigung beim Messing". *2nd international congress for applied mechanics*, 332–335.
- Meggiolaro, M. A., Castro, J. T. P.** 2004. "Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions". *International Journal of Fatigue*, 26(5), 463–476.
- Nečemer, B., Kramberger, J., Vuherer, T., Glodež, S.** 2019. "Fatigue crack initiation and propagation in re-entrant auxetic cellular structures". *International Journal of Fatigue*, 126(January), 241–247.
- Peng, C., Tran, P., Nguyen-Xuan, H., Ferreira, A. J. M.** 2020. "Mechanical performance and fatigue life prediction of lattice structures: Parametric computational approach". *Composite Structures*, 235(October 2019), 111821.
- Pereira, T., Kennedy, J. V., Potgieter, J.** 2019. "A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job". *Procedia Manufacturing*, 30, 11–18.
- Peterson, R. E.** 1974. "Stress Concentration Factors". New York: John Wiley and Sons, 38, 243-247.
- Pluinage, H. A. and G.** 2002. "Theoretical and numerical aspects of the volumetric approach for fatigue life prediction in notched components". *Int. J. Fatigue*, 25(1), 67–76.
- Quintana, I.** 2009. "Fracture Mechanics of brittle lattice materials", 2009. PhD Thesis. University of Cambridge, Cambridge.
- Refai, K., Brugger, C., Montemurro, M., Saintier, N.** 2020. "An experimental and numerical study of the high cycle multiaxial fatigue strength of titanium lattice structures produced by Selective Laser Melting (SLM)". *International Journal of Fatigue*, 138(October 2019), 105623.
- Ryan, G., McGarry, P., Pandit, A., Apatsidis, D.** 2009. "Analysis of the mechanical behavior of a titanium scaffold with a repeating unit-cell substructure". *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 90 B(2), 894–906.
- Savio, G., Rosso, S., Curtarello, A., Meneghello, R., Concheri, G.** 2019. "Implications of modeling approaches on the fatigue behavior of cellular solids". *Additive Manufacturing*, 25(August 2018), 50–58.
- Schaffner, G., Guo, X. D. E., Silva, M. J., Gibson, L. J.** 2000. "Modelling fatigue damage accumulation in two-dimensional Voronoi honeycombs". *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(4), 645–656.
- Seharing, A., Azman, A. H., Abdullah, S.** 2020. "A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts". *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6), 1–21.
- Sheridan, L., Scott-Emuakpor, O. E., George, T., Gockel, J. E.** 2018. "Relating porosity to fatigue failure in additively manufactured alloy 718". *Materials Science and Engineering A*, 727(March), 170–176.
- Spears, T. G., Gold, S. A.** 2016. "In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing". *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5(1), 16–40.
- Speirs, M., Van Hooreweder, B., Van Humbeeck, J., Kruth, J. P.** 2017. "Fatigue behaviour of NiTi shape memory alloy scaffolds produced by SLM, a unit cell design comparison". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70(October 2016), 53–59.

- Stephens, Ralph I., et al.** 2000. "*Metal Fatigue in Engineering*" (second). JOHN WILEY & SONS INC., 59–117.
- Tan, X. P., Tan, Y. J., Chow, C. S. L., Tor, S. B., Yeong, W. Y.** 2017. "Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants : A state-of-the-art review on manufacturing , topological design , mechanical properties and biocompatibility". *Materials Science & Engineering C*, 76, 1328–1343.
- Van Hooreweder, B., Apers, Y., Lietaert, K., Kruth, J. P.** 2017. "Improving the fatigue performance of porous metallic biomaterials produced by Selective Laser Melting". *Acta Biomaterialia*, 47, 193–202.
- Wang, Q. S., Li, S. J., Hou, W. T., Wang, S. G., Hao, Y. L., Yang, R., Misra, R. D. K.** 2020. "Mechanistic understanding of compression-compression fatigue behavior of functionally graded Ti–6Al–4V mesh structure fabricated by electron beam melting". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103.
- Wu, M. W., Chen, J. K., Lin, B. H., Chiang, P. H.** 2017. "Improved fatigue endurance ratio of additive manufactured Ti-6Al-4V lattice by hot isostatic pressing". *Materials and Design*, 134, 163–170.
- Wu, M. W., Chen, J. K., Lin, B. H., Chiang, P. H., Tsai, M. K.** 2020. "Compressive fatigue properties of additive-manufactured Ti-6Al-4V cellular material with different porosities". *Materials Science and Engineering A*, 790(June), 139695.
- Xiong, Y., Wang, W., Gao, R., Zhang, H., Dong, L., Qin, J., Li, X.** 2020. "Fatigue behavior and osseointegration of porous Ti-6Al-4V scaffolds with dense core for dental application". *Materials and Design*, 195, 108994.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Raymont, D.** 2012. "Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32–38.
- Yáñez, A., Fiorucci, M. P., Cuadrado, A., Martel, O., Monopoli, D.** 2020. "Surface roughness effects on the fatigue behaviour of gyroid cellular structures obtained by additive manufacturing". *International Journal of Fatigue*, 138(May), 105702.
- Yang, L., Yan, C., Cao, W., Liu, Z., Song, B., Wen, S., Yang, S.** 2019. "Compression–compression fatigue behaviour of gyroid-type triply periodic minimal surface porous structures fabricated by selective laser melting". *Acta Materialia*, 181, 49–66.
- Yao, W.** 1993. "Stress field intensity approach for predicting fatigue life", *International Journal of Fatigue*, 15(3), 15.3: 243-246.
- Yuan, W., Hou, W., Li, S., Hao, Y., Yang, R., Zhang, L. C., Zhu, Y.** 2018. "Heat treatment enhancing the compressive fatigue properties of open-cellular Ti-6Al-4V alloy prototypes fabricated by electron beam melting". *Journal of Materials Science and Technology*, 34(7), 1127–1131.
- Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S.** 2016. "Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures". *Materials Science and Engineering C*, 60, 339–347.
- Zargarian, Ali, Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S., Zamani, D.** 2019. "On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100(May 2018), 225–232.
- Zhang, B., Liao, H., Coddet, C.** 2013. "Microstructure evolution and density behavior of CP Ti parts elaborated by Self-developed vacuum selective laser melting system". *Applied Surface Science*, 279, 310–316.
- Zhao, D., Huang, Y., Ao, Y., Han, C., Wang, Q., Li, Y., Zhang, Z.** 2018. "Effect

of pore geometry on the fatigue properties and cell affinity of porous titanium scaffolds fabricated by selective laser melting". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 88(April), 478–487.

Zhao, S., Li, S. J., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., Misra, R. D. K. 2016. "The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 59, 251–264.

Zhao, S., Li, S. J., Wang, S. G., Hou, W. T., Li, Y., Zhang, L. C., Murr, L. E. 2018. "Compressive and fatigue behavior of functionally graded Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting". *Acta Materialia*, 150, 1–15.

Zhu, H. X., Knott, J. F., Mills, N. J. 1997. "Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetra decahedral cells". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(3), 319–343.

