

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇOK EKSENLİ YORULMA DURUMUNDA EŞZAMANLI VE ASENKRON
YÜKLEMELER İÇİN HASAR VE ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Uğur BULCA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

ŞUBAT 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇOK EKSENLİ YORULMA DURUMUNDA EŞZAMANLI VE ASENKRON
YÜKLEMELER İÇİN HASAR VE ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Burak Uğur BULCA
(503181520)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ALTAY
Eş Danışman: Prof. Dr. Ata MUĞAN**

ŞUBAT 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503181520 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Burak Uğur BULCA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOK EKSENLİ YORULMA DURUMUNDA EŞZAMANLI VE ASENKRON YÜKLEMELER İÇİN HASAR VE ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ALTAY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Ata MUĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ERSOY
Akdeniz Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet MERAM
Karatay Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Aralık 2022**
Savunma Tarihi : **07 Şubat 2023**





Anneme,



ÖNSÖZ

Tüm çalışma sürecim boyunca gösterdikleri anlayış, ilgi ve sağladıkları bilgilerle bana her zaman destek olan danışmanlarım Prof. Dr. Ata MUĞAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ALTAY'a, sağladığı dokümanlar, deney verileri ve gösterdiği özel ilgi için Çekya Teknik Üniversitesi'nden Prof. Dr. Jan PAPUGA'ya ve son olarak hayatımın en zor günlerini geçirdiğim dönemlerde çalışmamı tamamlayabilmem için beni destekleyen, teşvik eden ve cesaretlendiren tüm arkadaşlarıma ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2022

Burak Uğur BULCA
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çok Eksenli Yorulma Hesabı İle Ömür Tahmini	2
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 Asenkron yükleme durumunda ömür kestirim yaklaşımları ve deneyler ...	3
1.2.2 Asenkron yükleme durumunda ömür tahmini yaklaşımları.....	6
1.2.3 Hasar tipleri, plastisite kavramları ve yaklaşım modelleri.....	14
1.3 Tezin Amacı	19
2. ÇOK EKSENLİ YORULMADA BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME BAZLI	
 ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİ	21
2.1 Manson-Coffin Yaklaşımı	24
2.1.1 Kritik düzlem yaklaşımı	27
2.1.2 Lokal plastisite düzeltmeleri için kullanılan metotlar	29
2.1.2.1 Neuber kuralı.....	29
2.1.2.2 Glinka metodu	29
2.1.2.3 Ramberg-Osgood denklemi	30
2.2 Ömür Kestiriminde Kullanılan Diğer Yardımcı Yöntemler.....	30
2.2.1 Rainflow çevrim sayma yöntemi	30
2.2.2 Miner-Palmgren kuralı	32
3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ ÇALIŞMALARI	33
3.1 Test Verileri.....	33
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme	37
3.3 Çok Eksenli Yorulma Hesabını Etkileyen Faktörler ve Çok Eksenli Yorulma	
Hesabı Yaklaşımları.....	38
3.3.1 Çok eksenli yorulmayı etkileyen faktörler.....	38
3.3.2 FEMFAT'ta çok eksenli yorulma hesabı yaklaşımları	39
3.3.2.1 Kritik düzlemde normal gerilme	39
3.3.2.2 Karakteristik malzeme kayma gerilmesi	39
3.3.2.3 Kritik düzlemde eşdeğer gerilme	39
3.3.2.4 Kritik düzlemde kritik bileşen.....	40
3.3.2.5 İşaretleli Von Mises gerilmesi	40
3.3.2.6 Maksimum ve minimum asal gerilme.....	40
3.3.2.7 Düzenlenmiş eşdeğer gerilme yaklaşımı.....	40
3.3.2.8 Kritik düzlemde ölçeklendirilmiş normal gerilme	41

4. ANALİZ SONUÇLARININ TEST VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI YORUMLANMASI.....	43
4.1 Ortalama Gerilme Etkisi Olmadan Senkron ve Asenkron Yüklemelerle Eğilme ve Burulma Zorlanması Durumu	44
4.2 Ortalama Gerilme Etkisi ile Senkron ve Asenkron Yüklemelerle Eğilme ve Burulma Zorlanması Durumu	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
5.1 Genel Yorumlar	57
5.2 Gelecek Çalışmalar.....	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65



KISALTMALAR

Düz.Eşd.Ger.	: Düzeltilmiş Eşdeğer Gerilme
FA	: Faz açısı
Ger.	: Gerilme
İşrt.	: İşaretli
KD	: Kritik düzlem
Mal.Kar.Kay.Ger.	: Malzeme Karakteristik Kayma Gerilmesi
Ölç.Norm.Ger.	: Ölçeklendirilmiş Normal Gerilme
PDMR	: Path Dependent Maximum Range (yörünge bazlı azami fark)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Sim02 No'lu deney, senkron eğilme + burulma yükü.	34
Çizelge 3.2 : Sim03 No'lu deney, 30° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü..	34
Çizelge 3.3 : Sim04 No'lu deney, 60° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü..	35
Çizelge 3.4 : Sim05 No'lu deney, 90° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü..	35
Çizelge 3.5 : Sim06 No'lu deney, senkron eğilme + burulma yükü.	36
Çizelge 3.6 : Sim07 No'lu deney, 90° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü..	36
Çizelge 3.7 : SAE 1050 malzeme özellikleri.	38
Çizelge 4.1 : Sim02 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	44
Çizelge 4.2 : Sim02 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	44
Çizelge 4.3 : Sim03 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	46
Çizelge 4.4 : Sim03 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	46
Çizelge 4.5 : Sim04 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	48
Çizelge 4.6 : Sim04 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	48
Çizelge 4.7 : Sim05 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	50
Çizelge 4.8 : Sim05 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	50
Çizelge 4.9 : Sim06 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	53
Çizelge 4.10 : Sim06 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	53
Çizelge 4.11 : Sim07 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.	55
Çizelge 4.12 : Sim07 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Haynes 188 çeliği numunesi .	3
Şekil 1.2 : Kritik düzlem yaklaşımı ve test sonuçlarının karşılaştırılması .	4
Şekil 1.3 : Ortalama gerilmenin parça ömrü üzerindeki etkisi .	5
Şekil 1.4 : Zamana bağlı eksenel ve kayma açısı değerleri .	7
Şekil 1.5 : Test verilerinin yeniden çizdirilmesi .	7
Şekil 1.6 : İyileştirilmiş Lu kriterinin diğer yöntemlerle karşılaştırılması .	9
Şekil 1.7 : Birim uzamaların Mohr çemberinde gösterilmesi .	9
Şekil 1.8 : a) Wang&Brown ve b) Bannatine&Socie kıyası .	11
Şekil 1.9 : Kritik düzlemin şematik gösterimi .	13
Şekil 1.10 : Gerilme parametresiyle düzenlenmiş Wöhler eğrileri .	14
Şekil 1.11 : Tip 1, Tip 2, ve Tip 3 hasar modları .	15
Şekil 1.12 : Birim şekil değiştirme bazlı yüklemde a) çevrimsel yumuşama, b) çevrimsel sertleşme. Gerilme tabanlı yüklemde c) çevrimsel yumuşama, d) çevrimsel sertleşme .	16
Şekil 1.13 : Bauschinger etkisi .	16
Şekil 1.14 : Döngüsel sürünme ve çevrim sayılarıyla ilişkisi .	17
Şekil 1.15 : Deney sonuçları ve Chaboche modeli kıyaslaması .	18
Şekil 1.16 : Eksenel sürünme hızı deney sonuçları ile Sehitoglu-Jiang modelinin karşılaştırılması .	19
Şekil 2.1 : Döngüsel ve sabit yüklem sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri .	22
Şekil 2.2 : Döngüsel çevrim durumunda histerezis eğrisi .	22
Şekil 2.3 : Elastik birim uzama genliği ve toplam ömür grafiği .	23
Şekil 2.4 : Plastik birim uzama genliği ve toplam ömür grafiği .	23
Şekil 2.5 : Manson-Coffin yaklaşımı ile birim uzama genliği-toplam ömür eğrisi .	25
Şekil 2.6 : Gerilme oranına göre düzeltilmiş Coffin-Manson eğrileri .	26
Şekil 2.7 : Kritik düzlem şematik gösterimi .	27
Şekil 2.8 : Neuber kuralının şematik olarak gösterimi .	29
Şekil 2.9 : Glinka ve Neuber yaklaşımlarının kıyaslanması .	30
Şekil 2.10 : Rainflow çevrim sayma yöntemi için temsili grafik .	31
Şekil 2.11 : Miner-Palmgren uygulaması (örnek) .	32
Şekil 3.1 : Test numunesi geometrik ölçüleri .	33
Şekil 3.2 : Deney numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi. .	37
Şekil 3.3 : Birim kuvvetler altında eğilme ve burulma analiz sonuçları. .	37
Şekil 3.4 : SAE 1050 çeliğinin yorulma eğrisi. .	38
Şekil 3.5 : Eşdeğer gerilme hesabının Mohr çemberine göre düzenlenmesi. .	41
Şekil 4.1 : Birim yük eğrilerinin gösterimi. .	43
Şekil 4.2 : Sim02 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları. .	45
Şekil 4.3 : Sim03 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları. .	47
Şekil 4.4 : Sim04 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları. .	49

Şekil 4.5 : Sim05 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.....	51
Şekil 4.6 : Sim06 kodlu deney ve ilgili analiz için yük eğrileri.....	52
Şekil 4.7 : Sim06 kodlu deney ve ilgili analiz için yük eğrileri.....	52
Şekil 4.8 : Sim06 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.....	54
Şekil 4.9 : Sim07 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.....	56



ÇOK EKSENLİ YORULMA DURUMUNDA EŞZAMANLI VE ASENKRON YÜKLEMELER İÇİN HASAR VE ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde, mühendislik alanında en çok karşılaşılan ve hasara sebebiyet veren problemlerin başında yorulma gelmektedir. Yorulma, tekrarlı veya değişken yüke maruz kalan yapıların hasara uğrama eğilimi olarak tanımlanabilir. Genellikle yorulma hasarı, malzemelerin akma dayanımlarının altında olan büyüklükteki yükler sebebiyle gerçekleşir. Tasarım yapılırken tekrarlı ya da değişken bir yükün varlığı, her zaman öncelikle yorulma etkisini göz önünde bulundurmayı gerektirir. Mühendisliğin faaliyet gösterdiği alanlara bakıldığında ise aslında birçok durumda yapıların bu tarz yüklerle maruz kalması kaçınılmazdır. Sektörel olarak bakıldığında havacılık, otomotiv, denizcilik, demiryolu taşımacılığı ve inşaat sektörü gibi kısacası hayatın her alanında karşılaşılabılır olan bu durum, özellikle dönen ve güç aktarması gereken her türlü mekanizma ve yapının öncelikli problemi olmuştur. Bu problem yalnızca teknik açıdan değil, gerek maliyet düşürme odaklı tasarımların geliştirilmesi, daha hafif ve kullanımı kolay ürünlere olan ihtiyaç ve ortaya çıkabilecek muhtemel kusurlar dolayısıyla insan hayatını doğrudan etkileyebilecek bir öneme sahiptir. Bu sebeple tasarım süreçlerinde, parçanın fonksiyonel olarak kullanılacağı süre boyunca tekrarlı yüklerle ne kadar ve hangi şiddette maruz kalacağı, bu parçanın ya da yapının ne kadarlık kullanım ömrüne ihtiyacının olduğu ve eğer gerekli ise düzenli bakım ve servis şartlarının nasıl olması gerektiğinin önceden belirlenmesi gerekmektedir.

Dönen ve güç aktaran yapıların maruz kaldıkları dış yükler, genellikle yapı üzerinde farklı yönde gerilmeler oluşturmaktadır. Tek eksenli yorulma deneyleriyle geliştirilmiş malzeme yorulma eğrileri ve çözüm yaklaşımları, bileşik gerilmeye maruz kalan yapıların ömür tahmini hesapları için yetersiz kalmaktadır. Özellikle yüklerin tesiri sırasında aralarında faz farkı bulunması yorulma hasarı hesaplarını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, çok eksenli yüklerle maruz kalan yapıların ömür tahmini konusu özel bir konu olarak ele alınmaktadır.

Tezin temel amacı ise mevcut bileşik gerilme durumlarında ömür tahmin yaklaşımlarını incelemek, literatürdeki tamamlanmış deney verileri yardımıyla ticari yazılımlar kullanılarak eşzamanlı ve faz farklı yükleme durumlarında en doğru sonuç veren yaklaşımı tespit etmek ve ömür tahmin yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını kıyaslayarak karşılaşılabilecek farklı problemler için takip edilebilir bir çözüm yöntemi sunmaktır.

Literatür araştırmasında, çok eksenli yorulma durumları için oldukça çeşitli ve geniş kaynaklar bulmak mümkündür. Bu yaklaşımlar birim şekil değiştirme bazlı, gerilme bazlı ya da enerji bazlı olacak şekilde sınıflandırılabilir. Yorulma konusunun karmaşık bir problem olmasından dolayı uzun yıllardır süren araştırmalar sonucunda net bir yargıya varılamamış olduğu gözükmemektedir. Bu yaklaşımların yanı sıra bileşik gerilme durumunda malzeme davranışlarını daha detaylı inceleyen ve daha isabetli ömür

tahmini yapılmasını sağlayan lokal plastisite yaklaşımları ve onların matematiksel modellerinden bahsedilmiş, karmaşık yükler için uygulanan Rainflow çevrim sayma yöntemi gösterilmiş ve toplam hasarın tespiti için kullanılan Miner-Palmgren kuralı açıklanmıştır.

Çalışma kapsamında, Prof. Dr. Jan Papuga'nın araştırmalarında yer alan deney verileri SolidWorks, Hypermesh, ABAQUS ve FEMFAT yazılımları yardımıyla bilgisayar ortamında modellenmiş ve farklı ömür tahmini yaklaşımlarıyla analiz edilmiştir. Ortalama gerilme değerinin sıfır olduğu senkron ve farklı faz açılarındaki asenkron yükleme sonuçları detaylıca incelenmiş, ayrıca ortalama gerilme varlığının yorulma ömrüne olan etkileri gerek senkron gerekse asenkron yükleme durumlarında karşılaştırılmıştır. FEMFAT yazılımı içerisinde, farklı bileşik gerilmeli yorulma durumları için kullanılan hesaplama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar deney verileriyle kıyaslanmıştır. Yaklaşımların ömür tahmini sonuçları üzerinden metotların isabetliliği ile güçlü ve zayıf yanları gösterilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar hakkında genel yorumlar ile çalışmanın gelişime açık yanları ele alınmıştır.



INVESTIGATION OF DAMAGE AND LIFE ESTIMATION METHODS FOR IN-PHASE AND OUT-OF-PHASE LOADING IN MULTIAXIAL FATIGUE

SUMMARY

Today, fatigue is one of the most common and damaging problems in engineering areas. Fatigue can be defined as the tendency of structures which are subjected to repeated or variable loads to initiate damage. Generally, these loads create stress which is below the yield strengths of the materials. During design process, the one of the most important parameters which must be into consideration is the presence of a repetitive or variable load which can be cause of fatigue failure. In engineering systems, it is inevitable for structures to be exposed to such loads in many cases.

Fatigue failures in engineering areas, which can be encountered in all areas of life such as aviation, automotive, maritime, railway transportation and construction, has become the primary problem of all kinds of mechanisms and structures that rotate and transmits power. This problem is not only important technically, but also has an importance that can directly affect human life due to possible failures which may arise. In addition, development of cost-reducing designs, the need for lighter and easier-to-use products can be counted as other reasons to prove importance of studies in the fatigue area. Therefore, during design processes, it is necessary to determine that how long and at which stress level the part will be exposed to repeated loads during the period of functional use, how long this part or structure will be required to maintain the functionality of the mechanism or structure, and if necessary, what should be frequency of regular maintenance and service conditions.

Rotating mechanisms and power-transmitting structures are exposed to external forces which are generally create stresses on the structure which is named as multiaxial loading. Material fatigue curves and fatigue life estimation approaches developed on uniaxial fatigue tests are insufficient for life estimation calculations of structures subjected to combined stresses. Especially depending on load timing, can be applied in-phase or out-of-phase, the phase angle between different load sources increases the complexity of fatigue life estimation calculation. Therefore, fatigue life estimation of structures which are subjected to multiaxial loads is considered as a special topic in solid mechanics.

The main purposes of the thesis is to examine the fatigue life estimation approaches in multiaxial loading, to determine the most accurate calculation approach in-phase and out-of-phase loading situations by using commercial software based on completed test results in the literature, and to compare the advantages and disadvantages of fatigue life estimation methods in multiaxial loading and to be able to select the most fitted fatigue life estimation method for different loading scenarios that may be encountered.

In the literature search, it is possible to find a wide variety of sources for multiaxial fatigue life estimation methods. These approaches include strain-based, stress-based or energy-based approaches. Due to the fact that the issue of multiaxial fatigue, especially in out-of-phase loading is a complex problem, it seems that a clear

judgement could not be reached yet as a result of many years of research. The main reason for this is the existence of many factors that can cause multiaxial fatigue damage. Loads with variable amplitudes, presence of mean stress, timing of loads from different axes (in-phase loading or the case of loads acting with a certain phase difference which is named as out-of-phase loading), geometry of the studied structure, roughness of the material used, chemical components, thermal factors, etc. These parameters are the main reasons which make very complex fatigue life estimation in multiaxial loading.

In general, a three-step process is followed in the multiaxial fatigue life estimation of structures which are exposed random loading. These processes are the determination of equivalent stress in the critical plane and the stress cycles resulting from multiaxial loading by cycle counting methods, the damage calculation for each cycle separately, and finally the summation of the calculated damage values in order to evaluate total damage status.

Considering the out-of-phase loading scenarios, which are the main subject of this thesis, results were obtained within the low cycle number limits as observed in the experiments. For this reason, it has been observed that strain-based approaches give more accurate results. In addition to these, considering that local plastic deformation factors are also effective, so that is another reason to explain a strain-based approach in this topic.

It has been observed that in the literature search, most of multiaxial fatigue life estimation approaches use the critical plane approach to define the most critical section that expected crack initiation location. Critical plane is defined as the plane which has maximum strain range values. According to material structure and loading type, materials have different failure modes and critical plane approach provides to estimate shear-based failure mode location. In order to achieve that, strain tensor, defined based on general coordinate system, is transformed to every possible plane which has same origin point to be able to catch maximum strain range.

Considering all information, a strain-based method Manson-Coffin Equation is explained in detail which is based on critical plane approach, uses both effect of elastic and plastic strains, defines a ratio which named critical stress ratio and provides best selection of critical plane and gives better results for both in-phase and out-of-phase loading cases.

In addition to multiaxial fatigue life estimation approaches, local plasticity corrections such as Neuber correction, Glinka method and Ramberg-Osgood equation for cycling hardening theory which examine the material behavior in more detail in the case of multiaxial loading and provide more accurate results for fatigue life estimation are explained. Rainflow cycle counting method is also explained which is used to count hidden closed and half cycles in loading history for complex loadings. Finally, the Miner-Palmgren rule which is used for determining the total damage by summing damage results from each cycle that are defined by Rainflow counting is explained.

Within the scope of the study, the experimental data which has been taken from studies of Mr. Jan Papuga from Czech Technical University were modeled and analyzed in computer aided engineering softwares such as SolidWorks, Hypermesh, ABAQUS and FEMFAT.

Within the scope of multi-axial fatigue life estimation studies, experiment data were found from the experiment with bending and torsional loads in the literature. Then, the

specimen used in these experiments was modeled as a solid body with the 3D design software SolidWorks, and static bending and static torsion analyses were completed under unit forces with the help of ABAQUS software. The resulting result files are defined in the FEMFAT software for defining the finite element model and transferring the stress tensors. Harmonic load curves were created in FEMFAT by considering the stress amplitude, mean stresses and phase angles performed in the test. The factors to be activated according to the relevant test scenario were determined, the survival probability was set to 50%, and the critical plane search parameters were determined. Experiments were selected especially including phase angle effect and also mean stress effect in order to understand the effects of different load scenarios on the total cycle life and also to be able to compare fatigue life estimation methods such as different conditions.

Firstly, the results of in-phase and out-of-phase loading with different phase angles has been examined and analyzed in detail, where the mean stress value is zero. The effects of mean stresses on the fatigue life have been investigated in both in-phase and out-of-phase loading conditions. The results obtained with the calculation methods used for different combined stress fatigue states in the FEMFAT software were compared with the experimental data. Also, each calculation approach has been explained in this study. The accuracy capability, strengths and weaknesses of the fatigue life estimation approaches in multiaxial loading are shown on the life estimation results.

For better evaluation of the analysis results, the fatigue curve of the relevant experiment was drawn by taking the average of the different life results determined for two different amplitude points with the help of the test. Error curves were created based on this data, and the error rates of the results were calculated based on these average values. Average cycle lives which are obtained in the test data and life cycle results from analysis with different methods, are compared on the tables. Also, for better representation of the results, dispersion of the test and analysis results is shown in graphs with error bands.

In the last part, general comments about the results obtained and the aspects of the study that are open to improvement are discussed. As mentioned in the literature, in case of multiaxial fatigue, the life of the structure decreases with the phase difference between the loads or the presence of the average stress effect. This situation was observed in the experiments and was determined by the analysis results.



1. GİRİŞ

Yorulma, büyüklüğü normal mukavemetinin altında kalan değişken ya da periyodik yüklere maruz kalan yapıların belli bir süre sonra çatlak oluşması ya da kırılması ile meydana gelen hasar olarak tanımlanabilir. Günümüzdeki mühendislik problemlerinin büyük çoğunluğunu yorulma kaynaklı hasarlar oluşturmaktadır. Özellikle hareket halinde yük iletilen tüm mekanik yapılarda yorulma hasarı tasarım aşamasında göze alınması gereken en önemli faktördür. Aynı zamanda yapılar üzerindeki büyük sıcaklık ya da iç basınç değişimleri de yorulmaya sebep olabilmektedir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, otomotivden havacılığa, inşaat sektöründen denizciliğe kadar, kısacası mühendisliğin olduğu her alanda yorulma durumu ile karşılaşılmaktadır.

Bu hasarın ortaya çıkmasını önleyebilmek için yorulma ile ilgili birçok farklı teorik hesaplama yöntemleri türetilmiş, çeşitli deneylerle malzemelerin yorulmaya sebep olabilecek olan yüklenme durumları incelenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Literatürdeki çalışmaların büyük kısmı tek eksenli yükleme durumları için oldukça detaylıdır. Ancak, akslar, krank milleri, türbin kanatları ve demiryolu tekerlekleri gibi yorulmaya maruz kalan birçok yapı aslında çok eksenli yüklere maruz kalmaktadır. Bu durum, çok eksenli yorulma durumundaki hasar kriterlerinin belirlenmesi için yapılması gereken çalışmalara olan ihtiyacı ortaya koymuştur [1]. Kullanım ve servis alanlarına bakıldığında bu hesaplamalar, tasarım sürecindeki katkılarının yanı sıra kullanım ömrünün ya da gerekli periyodik bakımların zamanlamaları hususunda belirleyici olduğundan, olumsuz sonuçlarının direkt insan hayatını etkileyebilecek kadar kritik olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, çok eksenli yorulma durumlarında kullanılan metotların hangi durumlarda birbirlerine göre daha avantajlı olduğu farklı parametreler baz alınarak incelenecek, literatürde yer alan bazı test ve deneyler aynı zamanda bilgisayar ortamında da simüle edilerek çok eksenli yorulma hesaplamaları için kıyaslama ve değerlendirmeler yapılacaktır.

1.1 Çok Eksenli Yorulma Hesabı İle Ömür Tahmini

Çok eksenli yorulma hasarı mühendislikte en çok karşılaşılan problemlerin başında gelmektedir. Konuyla ilgili olarak çok sayıda farklı hesaplama metodu geliştirilmiş ancak evrensel olarak kesin kabul gören bir yaklaşım henüz bulunamamıştır. Bunun başlıca sebebi ise, çok eksenli yorulma hasarına sebep olabilecek çok sayıda faktörün hesaba katılması gerekliliğidir. Değişken genlikteki yükler, ortalama gerilmenin mevcudiyeti, farklı eksenlerden gelen yüklerin zamanlaması (eş zamanlı yükleme ya da yüklerin belirli bir faz farkıyla tesir etmesi durumu), incelenen yapının geometrisi, kullanılan malzemenin pürüzlülüğü, kimyasal bileşenleri, termal etkenler vb. gibi parametreler çok eksenli yorulma hasarında ömür tahmini yapmayı zorlaştırmaktadır. Günümüzde ise, maliyet tasarrufları hedeflenerek daha düşük emniyet katsayısına sahip tasarımların çalışılmaya başlanmasıyla, çok eksenli yorulma durumu için ömür tahmini çalışmaları gittikçe önem kazanmıştır [2].

Birden çok eksenli yüklemeye altında kalan yapıların ömür hesabında genel olarak üç adımlık süreç takip edilir. Bu süreçler, çok eksenli yüklemeye sonucu oluşan gerilme verilerinin çevrim sayma metodlarıyla bileşenlerine ayrılması, her bir çevrim için ayrı ayrı hasar hesabının yapılması ve son olarak bulunan hasar değerlerinin toplanmasıdır. Yorulma ömrü tahmininin doğruluğu, yukarıdaki parametrelerin üçüyle de doğrudan ilişkilidir. İlk olarak, doğru çevrim sayma metodunun seçilerek rastgele olan gerilme geçmişini doğru analiz edilmelidir. İkinci olarak, yüklemeye koşullarına uygun yorulma hasarı parametresi belirlenmelidir. Bu parametreler; birim uzama tabanlı, gerilme tabanlı ve enerji tabanlı yaklaşımlar olarak 3 ana başlığa ayrılabilir. Son olarak hasar hesaplarının toplanarak yorulma durumu hakkında yorum yapılabilmesi için uygun bir toplama yöntemi seçilmelidir [3]. İlerleyen bölümlerde bu teorik yaklaşımlar ve yöntemler hakkında detaylı bilgiler verilecektir. Özellikle asenkron yüklemelerde farklı hasar tespit yaklaşımları deneysel sonuçlarla kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

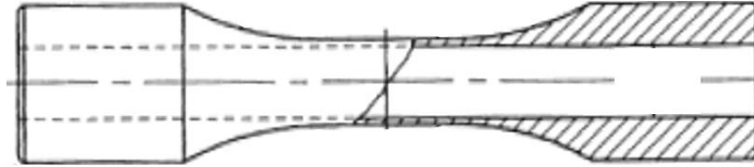
1.2 Literatür Araştırması

Çok eksenli yorulma ömrü hesapları için literatürde oldukça çok sayıda kaynak bulmak mümkündür. İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğu problem hakkında bir metod önerisi ile yapılan deney sonuçlarını içermektedir. Sonuçlar yaklaşımlarla kıyaslandığında faz farkı ile gelen yüklerle yapılan testlerde eşzamanlı tesir eden

yüklere göre, yorulma ömrünün önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bölümde çok eksenli yorulma durumunda yüklerin faz farkıyla geldiği durumlarda literatürde yapılan incelemeler, yaklaşımlar ve deneyler ele alınacaktır. Çalışmaların büyük kısmında takip edilen adımlara bakıldığında ilk olarak elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme değerleriyle bir eşdeğer büyüklük tespit edilerek yorulma ömür tahminleri ortaya konmaktadır. Çözüm yaklaşımları ile detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir. Ek olarak, konu ile ilgili olarak bilgisayar destekli mühendislik metotlarına ait detaylı çalışmaların az sayıda olması da dikkat çekmektedir.

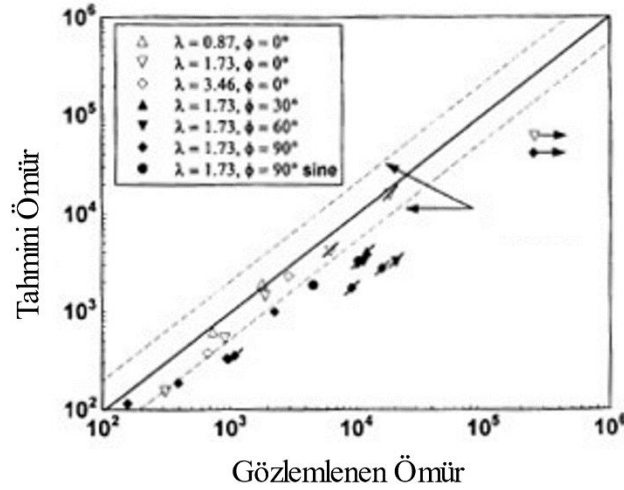
1.2.1 Asenkron yükleme durumunda ömür kestirim yaklaşımları ve deneyler

NASA çatısı altında yürütülen bir deney kapsamında, Haynes 188 çeliğinden üretilmiş ve Şekil 1.1’de gösterilen numunelerle 760°C sıcaklıkta, periyodik çekme ve burulma yükleriyle ömür testleri yapılmış ve sonuçları 4 adet çok eksenli yorulma ömür kestirimi metoduyla karşılaştırılmıştır [4]. Bu metotlar; von Mises Eşdeğer Birim Uzama Aralığı, Düzeltilmiş Çok Eksenlilik Faktörü, Düzeltilmiş Smith Watson-Topper Parametresi ve Fatemi, Socie ve Kurath tarafından geliştirilmiş Kritik Kayma Düzlemi Yaklaşımı’dır.



Şekil 1.1 : Haynes 188 çeliği numunesi [4].

Farklı yük oranlarındaki senkron test senaryolarının yanı sıra, asenkron durumlarda faz farkını 30°’lik aralıklarla artırarak yine farklı yük oranlarıyla testler tamamlanmıştır. Benzer çok eksenlilik durumlarında asenkron yüke maruz kalan numunelerin ömrünün çok daha kısa olduğu gözlemlenmiştir. Asenkron yükleme durumlarındaki malzeme sertleşmesinin, senkron denemelere göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, senkron ve asenkron tüm yükleme durumları için en geniş emniyet aralığının yani teorik sonuçlara göre en fazla sapmanın kritik düzlem yaklaşımında olduğu belirlenmiştir [4] (Şekil 1.2).



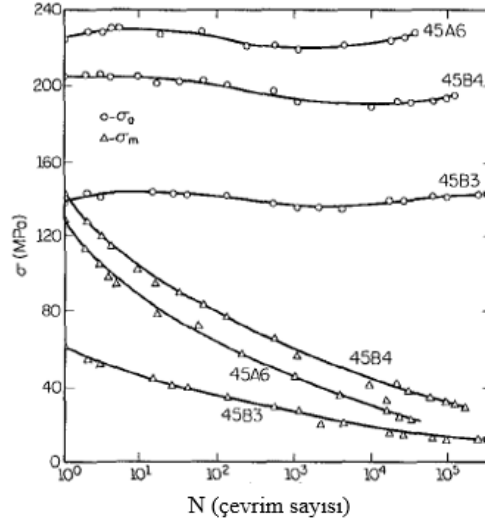
Şekil 1.2 : Kritik düzlem yaklaşımı ve test sonuçlarının karşılaştırılması [4].

Bannantine ve Socie (1992), geliştirdikleri birim şekil değiştirme bazlı ömür kestirim hesap yönteminin doğruluğunu kontrol etmek için eğilme ve burulma etkileri taşıyan yüklerle ve tamamen farklı senaryolarla çalışmalarını deneysel olarak da sürdürmüşlerdir. Deneylerde malzeme olarak 1045 çeliği kullanılmış ve test numuneleri senkron ve asenkron olacak şekilde değişken genlikli yüklere maruz bırakılmıştır. Numune üzerindeki birim uzama ölçümlerinden alınan verilerle ömür kestirim hesabı yapılmış ve asenkron yüklemelerde çok eksenli ömür hesaplarının gerçek durumdan ve senkron hesaplardan daha uzak olduğu gözlemlenmiştir [5].

Kanazawa ve diğ. (1977), yaptıkları deneysel çalışmada, çekme ve burulma zorlanmalarında, asenkron yükleme halindeki faz açısının çok eksenli yorulmaya olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu deneylerde yine boru şeklinde numuneler kullanılmıştır. Numuneler farklı faz açılarındaki asenkron yüklere maruz bırakılarak ömrü en çok kısaltan faktörler araştırılmıştır. Buna göre, kayma açısı değerlerinin aralığı ve maksimum kayma gerilmesi düzleminde normal birim uzama genliğinin yorulma ömrü üzerindeki en önemli iki parametre olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra, senkron yüklemeler ömrün en uzun olduğu durumları oluştururken, asenkron yük senaryolarında en kısa ömür değerleri 90°'lik faz farkının olduğu durumlarda gözlemlenmiştir [6].

Diğer testlerden farklı olarak, ortalama gerilme varlığının çok eksenli yorulma durumunda yapının ömrü üzerindeki etkilerini inceleyen Fatemi ve Kurath (1988), çekme ve burulma kombinasyonu ile yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçları kritik

düzlem yaklaşımıyla karşılaştırarak yorumlamışlardır [7]. Şekil 1.3'te verilen grafiğe bakıldığında ortalama gerilme faktörü barındıran yüklere maruz kalan numunelerin daha erken ya da daha düşük gerilmelerle hasara uğradığı gözlemlenmiştir.



Şekil 1.3 : Ortalama gerilmenin parça ömrü üzerindeki etkisi [7].

Yapılan test sonuçlarıyla, önerilen kritik düzlem yaklaşımı arasında bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, ortalama gerilmeler azaltılmazsa, yapının yorulma ömrü üzerinde oldukça büyük bir etkisi olduğu ve bu etkinin kritik düzlem yaklaşımıyla hesaplanabileceği belirtilmiştir [7].

Papuga (2011) ise çalışmasında, literatürde çok eksenli yorulma konusunda yayınlanmış birçok test datasını derleyerek, önerilmiş çözüm yaklaşımları hakkında detaylı karşılaştırmalar ve yorumlarda bulunmuştur. Papuga PCR olarak isimlendirilmiş ve Ruzicka ile ortak geliştirdiği [8] çözüm yaklaşımında kayma gerilmesi genliği ile doğrusal normal gerilme genliği kombinasyonuna ek olarak ortalama gerilme faktörünü de hesaba katmıştır. Literatürde yayınlandığı tarih itibarıyla en iyi sonuç veren çözüm metodudur [9].

Papuga'nın yaptığı yaklaşımlar arasındaki karşılaştırmaya göre, bu çalışmada kapsamında da bahsedilecek yöntemlerden biri olan Findley'in yaklaşımının kritik düzlem tespiti sırasında temel aldığı parametrenin en büyük kayma açısı değil, maksimum hasar olduğunu belirtmiş ve ortalama gerilmelerin olması durumunda bu yaklaşımla bulunan sonuçların ideal çözümden uzaklaşarak daha emniyetli sonuçlar verdiğini belirtmiştir [9]. İkinci olarak Susmel ve Lazzerin'in geliştirdiği yöntemin yüksek ortalama gerilmesine sahip burulma yüklerinde emniyetsiz sonuçlar verdiğini,

gevrek malzemelerle senkron yüklemelerde ve yüksek ortalama gerilme değerine sahip burulma yükü ve değişken eksenel yüklü senaryolarda daha emniyetli sonuçlara sahip olduğunu açıklamıştır. Son olarak Liu ve Zenner yönteminin çok fazla malzeme parametresine bağlı olduğunu ve özellikle iki eksenli yüklemelerde aşırı emniyetli sonuçlar verdiğini belirtmiştir [9].

1.2.2 Asenkron yükleme durumunda ömür tahmini yaklaşımları

Wang&Brown'un (1996) geliştirdiği çok eksenli yorulma durumunda gerilmelerden biri çekme diğeri burulma gerilmesi ise, ömür hesabı yaklaşımında bağıl eşdeğer birim uzamaya dayanan çok eksenli geri sayım yöntemi, Wang&Brown hasar parametresi ve birikmiş hasar hesabı içinse Miner kuralı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın temel prensibi, zamana bağlı tüm birim şekil değiştirme verileri üzerinden eşdeğer azami birim uzama değeri tespit edilerek, yük çevriminin başlangıç noktası olarak atanması ve tüm eşdeğer birim şekil değiştirme çevriminin bu noktanın referans alınması ile tekrar düzenlenmesidir. Daha sonra, referans olarak alınan bu noktaya göre bağıl eşdeğer birim uzama değerleri hesaplanır. Yeniden sıralanmış eşdeğer birim şekil değiştirme verileri için benzer işlemler tekrar uygulanır ve kalan çevrim sayımı için bir sonraki referans noktası tespit edilir. Tüm eşdeğer birim uzama verileri için bu adımlar tekrarlı bir şekilde devam ettirilir [10].

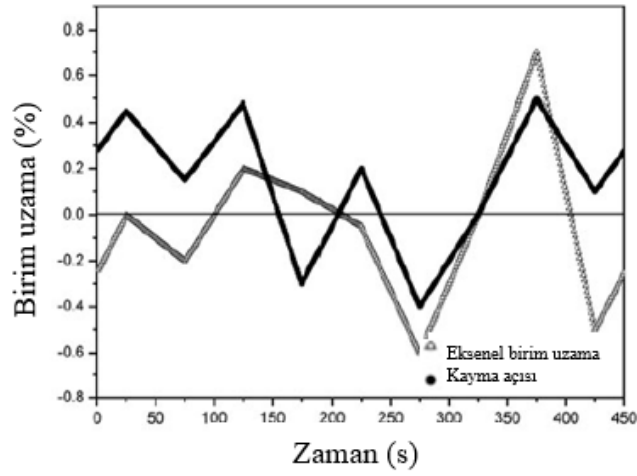
Birim şekil değiştirme bazlı hasar parametresi ise denklem 1.1'de verilmiştir:

$$\frac{(\Delta\gamma_{maks} / 2) + S(\epsilon_n^*)}{1 + \nu' + (1 - \nu')S} = \frac{\sigma_f' - 2\sigma_{n,ort}}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1.1)$$

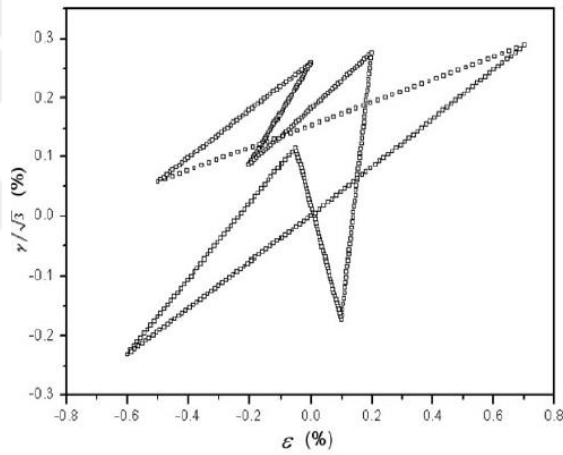
$\Delta\gamma_{maks}$, azami kayma açısı iken, ϵ_n^* iki dönüm noktası arasındaki normal birim şekil değiştirme farkıdır. S , kayma açısının çatlak ilerlemesinin üzerinde etki eden bir malzeme faktördür. ν' , efektif Poisson oranını temsil etmektedir. Son olarak, $\sigma_{n,ort}$ ise maksimum kayma açısının düzlem üzerindeki ortalama normal gerilme değerini temsil etmektedir. Geriye kalan diğer parametreler ise tek eksenli birim uzama bazlı ömür denkleminin sabitleridir [10].

Bir başka çalışmada ise PDMR adı verilen, Wang-Brown yönteminden farklı olarak Şekil 1.4'teki birim şekil değiştirme değerlerinin Şekil 1.5'te gösterildiği gibi normal

birim uzama ve kayma açısı düzleminde çizdirilmesi ile yeni bir çevrim sayma yöntemi geliştirilmiştir [3].



Şekil 1.4 : Zamana bağlı eksenel ve kayma açısı değerleri [3].



Şekil 1.5 : Test verilerinin yeniden çizdirilmesi [3].

Metotlar arasında prosedür benzerlik gösterse de eşdeğer birim şekil değiştirme tanımında ve çevrim sayma yönteminde küçük değişiklikler mevcuttur. Buradaki çalışmaya göre iki yöntem de çok eksenli asenkron yükleme durumunda kullanılabilir ancak PDMR metodunun mühendislik uygulamalarında daha iyi bir seçim olduğu vurgulanmıştır [3].

Bir başka çalışma kapsamında, gerilme invariantları baz alınarak ve minimum elips yaklaşımı kullanılarak, çok eksenli yorulma ömrü kestirimi için azami kayma gerilmesi genliği değerlendirme kriteri olarak kabul alınmıştır [12]. Crossland kriteri olarak adlandırılan bu hasar değerlendirme kriteri denklem 1.2 ve 1.3'teki gibidir:

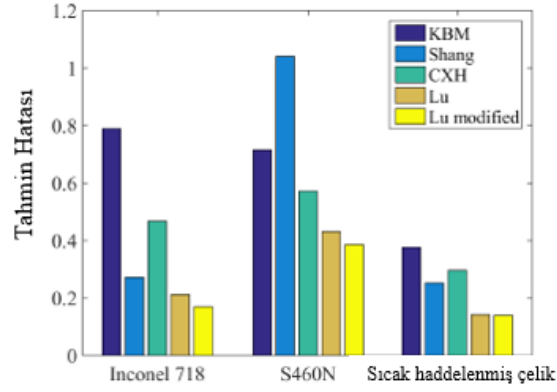
$$D_N = \frac{\sqrt{J_{2,a}} + k(N)P_{H\max} - \lambda(N)}{\lambda(N) - k(N)P_{H\max}} \quad (1.2)$$

$$\sqrt{J_{2,a}} \equiv \sqrt{\frac{1}{6} \left\{ (\sigma_{xx,a} - \sigma_{yy,a})^2 + (\sigma_{yy,a} - \sigma_{zz,a})^2 + (\sigma_{zz,a} - \sigma_{xx,a})^2 + 6(\sigma_{xy,a}^2 + \sigma_{yz,a}^2 + \sigma_{xz,a}^2) \right\}} \quad (1.3)$$

Denklem 1.3, gerilme deviyatörünün ikinci dereceden invariyanının genliğini göstermektedir. D_N , hasar parametresi, $P_{H\max}$ azami hidrostatik gerilme diğer parametreler ise ilgili çevrim sayısında malzemeye ait parametrelerdir [12].

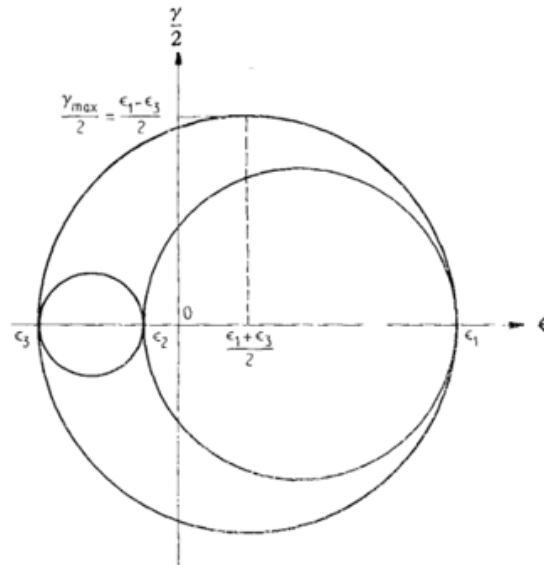
Takip edilen metodolojiye göre öncelikle sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir analizle gerilme tensörü elde edilir. Minimum sınırlandırılmış elips yaklaşımı kullanılarak bu verilerle efektif maksimum kayma gerilmesi genliği hesaplanır ve buradan hasar değerlendirme aşamasına geçilir. Çalışma kapsamında sinüs eğrili, trapez şekilli, senkron ya da asenkron yüklerle hesaplamalar yapılmış ve [11] numaralı kaynaktan alınan test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yapılan değerlendirmeye göre en büyük hata oranının %20'yi geçmediği belirtilmiştir. Bu sebeple bu metodolojinin güncel mühendislik uygulamalarında kullanılabilir olduğu söylenmektedir [12].

Lu ve diğ. (2018) ise Lu kriteri [13] olarak adlandırılan çok eksenli yorulma hesap kriterini geliştirerek tekrar yayınlamışlardır. Çalışmalarında, faz farkı tanımının sadece yükler için değil hasarın ortaya çıkış şekli için de geçerli olduğunu belirtmişler ve kriterlerini kayma tipi hasar için ayrı, normal yöndeki hasarlar için ayrı denklemlerle etmişlerdir. Bunun sebebini, malzemeye gelen normal ve kayma gerilmelerinin oranlarına ve malzemenin bu yüklerin yanıtına bağlı olarak, genel yaklaşımdakilerin aksine, gerçekte birden fazla kritik düzlem oluşturması olarak göstermişlerdir. Ek olarak, Lu kriterinde daha önce hesaba katılmamış olan ortalama gerilme faktörünü de hesaplarında kullanarak Şekil 1.6'da verildiği gibi test sonuçlarına göre daha isabetli kestirimler yapılmasını sağlayan yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır [14].



Şekil 1.6 : İyileştirilmiş Lu kriterinin diğer yöntemlerle karşılaştırılması [14].

Brown ve Miller'ın geliştirdiği bir teori ise çok eksenli yorulmada ömür hesabı yapılırken birim uzama verilerinin kullanılması gerekliliğine dayanmaktadır [15]. Bunun gerekçesi olarak, çok eksenli yorulma hasarının yapı üzerinde lokal olarak gözlemlenmesi, gerilme ya da yük kontrollü yaklaşımlarda akma dayanımından sonra doğru hesaplamaların zorluğu düşünüldüğünde birim uzama yaklaşımının daha kolay olması ve direkt olarak ölçülebilme şansındır. Yaptıkları çalışmada özetle maksimum kayma gerilmesi genliği ile kritik düzlem adı verilen maksimum kayma düzlemine dik çekme gerilmesi genliğinin Şekil 1.7'deki gibi Mohr çemberi üzerinde çizdirildiğinde birim şekil değiştirme durumları arasında ilişki olduğu vurgulanmış ve denklem 1.4'teki matematiksel ifade ile gösterilerek bu büyüklüklerin çok eksenli yorulma hasarı için temel parametreler olduğu belirtilmiştir [15].



Şekil 1.7 : Birim uzamaların Mohr çemberinde gösterilmesi [15].

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} = f \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right], \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3 \quad (1.4)$$

Asenkron çok eksenli yüklerin, birçok araştırmacı tarafından şiddet olarak eşdeğer ancak senkron şekilde gelen yüklere göre çok daha fazla ve hızlı hasar oluşturduğu belirtilmiştir [6,16]. Fatemi ve Socie (1988), hasarı arttıran en büyük sebebin çok eksenli periyodik yükler sonucunda sürekli konumu değişen asal eksenlerdeki gerilmeler olduğunu ifade etmiştir. Buradan yola çıkarak, Brown ve Miller'ın kritik düzlem yaklaşımına ek olarak asenkron yükler sebebiyle sürekli yönü değişen asal eksenlerdeki gerilmelerin sebep olduğu malzeme sertleşmesinin de hesaba katılması gerektiği vurgulanmıştır [2].

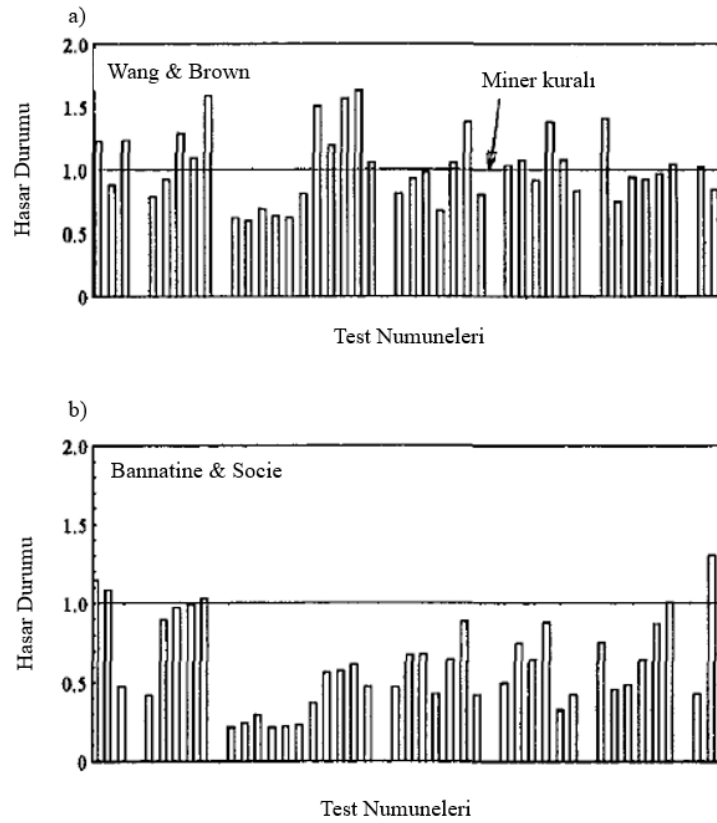
Bannantine ve Socie (1992), değişken genlikli çok eksenli yüklere maruz kalan yapılar için bir ömür kestirimi yöntemi geliştirmişlerdir. Tek eksenli değişken genlikli yüklerde başarılı sonuçlar veren birim uzama bazlı yaklaşımı temel olarak almışlardır. Gerilme ve birim şekil değiştirme datalarını kullanarak azami hasar gören yüzeyi bularak bu yüzeyi kritik düzlem olarak tanımlamışlardır ve hasar hesaplamaları veya ömür kestirimi bu yüzey üzerinden yapılmıştır [5].

Bu yaklaşımı uygularken izledikleri yöntem genel anlamda Wang-Brown yöntemine benzemekte ancak temel olarak aldıkları parametre gerilme değil birim uzama verileridir. İlk olarak elde edilen birim şekil değiştirme verileri, gerilme değerlerine dönüştürülür. Kritik düzlem yaklaşımıyla hasarın en yüksek olacağı kritik düzlem ve burada yapılacak eşdeğer gerilme hesaplarından sonra Rainflow çevrim sayma yöntemiyle gelen yükler çevrimlerine ayrılır ve her bir çevrimin ortalama, genlik değerleri ve tekrar sayısı bulunur. Çevrim tespiti tamamlandıktan sonra her bir çevrim için hasar hesabı yapılır ve ömür kestirimi tamamlanmış olur [5].

Wang ve Brown (1996), bir başka çalışmalarında kendi yöntemleri ile Bannantine ve Socie'nin ortaya koyduğu yaklaşımı karşılıklı olarak değerlendirmiştir. İki teori de kritik düzlem yaklaşımını esas almakta ancak Wang ve Brown yeni bir çevrim sayma yöntemi geliştirirken Bannantine ve Socie yerel birim uzama yaklaşımını detaylandırmıştır. Dikkat çeken bir diğer konu ise Bannantine ve Socie'nin çalışmasında, hasar oluşumundan sonra çatlakların kritik düzleme dik bir doğrultuda ilerlemesi yaklaşımı benimsendiğinden dallanan çatlakların ömüre olan etkisi hesaba katılamazken, Wang-Brown yaklaşımını kritik düzlemin sürekli yön değiştirmesi hesaba katıldığı için, değişken ve karmaşık yüklemelerde daha iyi sonuçlar vermesi

mümkündür. Her iki metot da T-gerilmeleri, çatlak oluşumundaki şekil değişimlerini ve bileşik hasar durumlarını hesaba katamadığı için her iki yöntemde de ömür kestirimleri olması gerekenden daha büyük olarak bulunmaktadır [10].

Yine aynı çalışmanın ikinci kısmında ise deneysel verilerle kıyaslama yapılmıştır. Deneylerde boru şeklindeki numunelerden kullanılmış ve numuneler senkron değişken genlikli yükleme, asenkron değişken genlikli yükleme ve son olarak çok eksenli rastgele yüklere maruz bırakılmıştır. Aynı yükler için bu iki yaklaşımla yapılan hesaplamaların sonuçları Şekil 1.8’de verilmiştir [17].



Şekil 1.8 : a) Wang & Brown ve b) Bannatine & Socie kıyası [17].

Her iki yöntemin de ulaştığı sonuçlar senkron ve değişken genlikli yüklerde gerçek sonuçlarla 1.5 emniyet faktörü aralığında benzerlik göstermektedir. Asenkron yüklerde Bannantine ve Socie yöntemi daha avantajlıyken, rastgele çok eksenli yük durumlarında Wang&Brown yöntemi hesaplama kolaylığı ve daha isabetli sonuçlar vermesi sebebiyle daha iyi bir tercih olarak görülmektedir [17].

Brown-Miller ve Fatemi-Socie, yukarıda da anlatıldığı üzere kayma hasarı mekaniklerinin daha baskın olduğu malzeme sınıfları için kritik kayma düzlemi yaklaşımını geliştirmişlerdir. Ancak dökme demir ya da 304 paslanmaz çelik gibi

çatlak ilerlemesi maksimum çekme gerilmesi yönünde olan malzemeler için alternatif bir model ihtiyacı gözükmemektedir. Smith ve diğ. (1970) ise birim şekil değiştirme değişimlerini ve maksimum gerilmeyi birlikte içeren bir ömür hesap yöntemi geliştirmişlerdir. Smith-Watson-Topper yöntemi olarak da adlandırılan bu yaklaşım tek eksenli yorulma hesaplarında ortalama gerilme etkisini hesaba katmak için de kullanılmaktadır [18]. Hasar mekaniği çekme gerilmesine bağlı olan malzemeler için senkron ve asenkron çok eksenli yorulma durumunda ömür hesabı için de bu yöntem kullanılmaktadır. Smith-Watson-Topper yöntemi ile ömür hesabı için denklem 1.5'te verilen bağıntı kullanılır.

$$\sigma_{n,\max} \frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (1.5)$$

Bu yaklaşımdaki gerilme parametresinin ortalama gerilmenin ve asenkron yükleme halinde malzeme üzerinde meydana gelecek sertleşmenin tanımlanması açısından önem taşımaktadır [18].

Şu ana kadar incelenen yaklaşımların yanı sıra, çok eksenli yorulma durumundaki yapıların ömür kestirim hesabında ele alınması gereken bir diğer önemli parametre ise ortalama gerilmenin varlığıdır. Fatemi ve Socie'nin [2] kritik düzlem yaklaşımını ortaya koyarken ortalama gerilme etkisini de hesaba dâhil eden bağıntısı denklem 1.6'da verilmiştir.

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_N^{\max}}{\sigma_y}\right) = \text{sabit} \quad (1.6)$$

Bu bağıntıda maksimum normal gerilme değeri malzemenin akma dayanımına bölünerek birim uzamanın boyutsuz özelliğine indirgenmiştir. k ise, malzemeye dayalı bir sabittir. Findley, ortalama gerilme etkisini incelemek için çekme-burulma veya eğilme etkileriyle özellikle yüksek çevrim sayılı yorulma üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çok eksenli yorulma durumunda, öncelikli etken olarak değişken kayma gerilmesini öne sürmüş, bununla birlikte kritik kayma düzlemindeki normal gerilmenin yorulma üzerinde doğrusal bir etkisi olduğunu belirtmiştir [19].

Socie ve diğ. de, Inconel 718 çeliği için eksenel çekme ve burulma yükü kombinasyonu ile yaptıkları çalışmada ortalama gerilme faktörünü lineer olarak hesaba dâhil etmişlerdir. Kandil, Brown ve Miller'ın ortaya koyduğu kritik düzlem

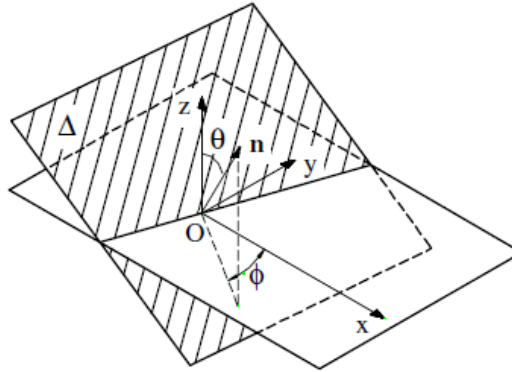
yaklaşımını düzenleyerek kayma düzlemine dik gelen normal ortalama gerilme faktörünü de hesaba dâhil etmişler ve matematiksel olarak denklem 1.7’de gösterildiği gibi ifade etmişlerdir [20].

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} + \frac{\sigma_{no}}{E} = \text{sabit} \quad (1.7)$$

Susmel ve Lazzarin (2003), gerilme tabanlı bir yaklaşımla çok eksenli yorulma ömrü hesaplarını geliştiren yeni bir parametreyi literatüre sokmuşlardır. Bu parametrenin kullanım amacı ise çok eksenli gerilme durumlarında ömür tahmini yaparken, ortalama gerilme etkisinin, çentik varsa çentik etkisinin ve aynı zamanda asenkron yüklerdeki faz farkının etkisinin genelleşmiş yorulma ömrünü sınırlayan K_f faktörüyle kullanılarak hesaplanmasıdır. Temel yaklaşımda maksimum kayma gerilmesi genliği ve maksimum kayma gerilme genliğinin olduğu düzleme dik maksimum normal gerilme değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Kritik düzlem üzerinde bu değerlerin birbiriyle oranını ifade eden bu parametre denklem 1.8’de verilmiştir [21].

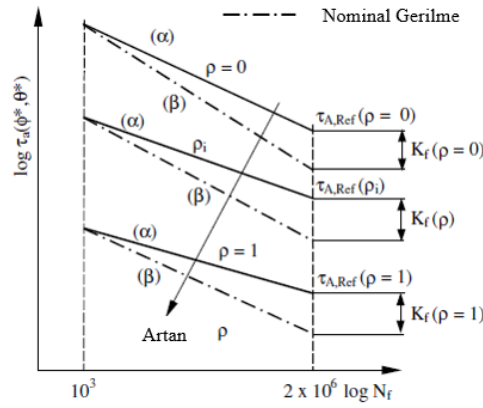
$$\rho = \frac{\sigma_{n,\max}}{\tau_a} (\phi^*, \theta^*) \quad (1.8)$$

Burada ρ gerilme parametresi, $\sigma_{n,\max}$ kritik düzleme normal maksimum gerilme değeri ve τ_a maksimum kayma gerilmesi genliğidir [21]. Parantez içindeki ifade gerilmelerin olduğu düzlemin koordinatları olarak verilmiştir. θ kritik düzlem normalinin z eksenine yaptığı açı, ϕ ise normalin, xy düzlemi üzerinde, x eksenine yaptığı açı olarak ifade edilebilir. Daha anlaşılır olması açısından kritik düzlemin şematik gösterimi Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9 : Kritik düzlemin şematik gösterimi [21].

Önerilen parametre ile ortalama gerilme etkisi ve asenkron yük durumlarında faz farkının etkisinin birlikte hesaba katıldığı açıklanmıştır. Tek eksenli yorulma deneyleriyle çizdirilmiş ve ömür tahminleri için kullanılan Wöhler eğrilerinin modifiye edilerek yeni eğrilerle ömür tahmini yapılabilmesi için gerilme parametresi kullanılır. Yazarlar bunun için yeterli sayıda istatistiki veri oldukça bu yöntemin her durumda kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Aşağıda modifiye edilmiş Wöhler eğrilerine örnek Şekil 1.10'da verilmiştir [21].



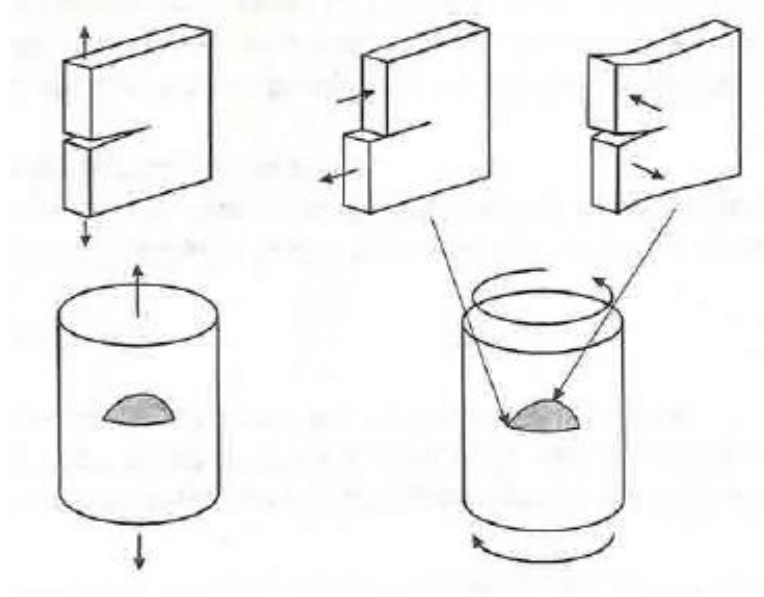
Şekil 1.10 : Gerilme parametresiyle düzenlenmiş Wöhler eğrileri [21].

Normalde çok çevrimli yorulma hesaplarında kullanılan bu yöntemin yeterli veri olduğu sürece plastisite etkisine rağmen düşük çevrimli yorulma hesaplarında da kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu yöntemin dezavantajı ise ortalama gerilmeye karşı yüksek hassasiyeti bulunan malzemelerde iyi sonuçlar vermemesidir. Eğer kritik düzlem üzerinde çok yüksek ortalama gerilme değerleri varsa bu yöntemle gerçek yorulma ömrüne yakın sonuçlar almak mümkün değildir [21].

1.2.3 Hasar tipleri, plastisite kavramları ve yaklaşım modelleri

Yukarıda anlatılan ömür kestirimlerinin neden her durumda kullanılmasının uygun olmadığına daha iyi anlaşılabilmesi için hasar tiplerinden ve kinematik sertleşme yaklaşımlarından da bahsedilmesi önem arz etmektedir.

Çatlak oluşumu malzemenin en dış yüzeyinden başlar, gelen yükün cinsine ve malzemenin yanıtına göre farklı yollardan ilerler. Şekil 1.11'de 3 farklı hasar tipi gösterilmektedir.

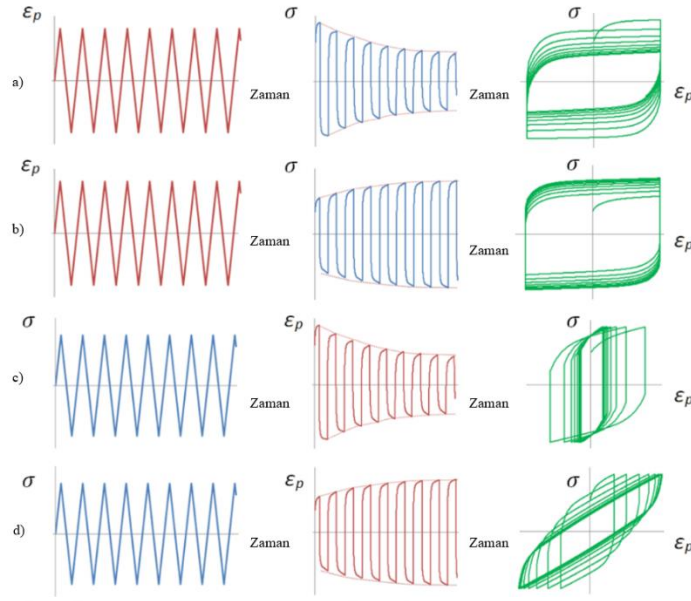


Şekil 1.11 : Tip 1, Tip 2, ve Tip 3 hasar modları [22].

En solda açılma şeklinde gözüken hasar Tip 1 olarak adlandırılır ve çekme kuvvetinin sonucunda oluşur. En sık görülen hasar çeşididir. Burulma yükleri ise Tip 2 ve Tip 3 hasarlara neden olabilmektedir. Tip 2, yüzey üzerindeki kayma yükünden kaynaklanır ve yüzeyde gözlemlenebilir. Tip 3 ise, yüzeyden dışarıya doğru kopma şeklinde gözüktür. Çatlak ilerlemelerine bakıldığında Tip 2 yine yüzey boyunca ilerlerken, Tip 3 şeklindeki bir çatlak derinlere doğru ilerlemektedir [22].

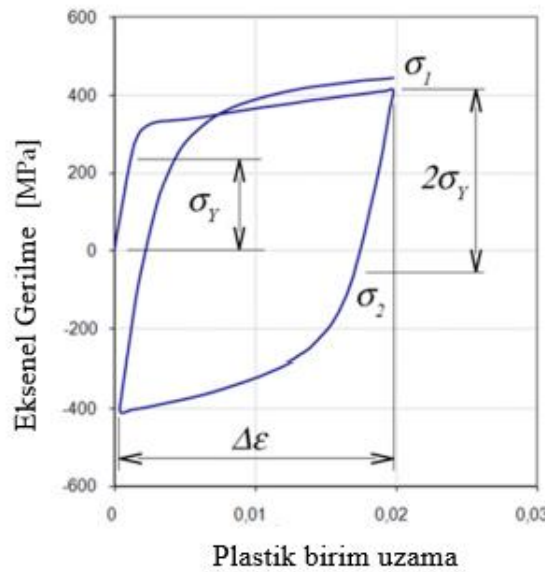
Çok eksenli yorulma hasarı yaklaşımlarına genel olarak bakıldığında, özellikle asenkron yükleme koşullarında düşük çevrimli yorulma sınırında kalındığı, farklı yönlerden, farklı faz açılarıyla gelen yüklerin asal eksenleri sürekli değiştirdiği, bunun sonucunda da malzeme sertleşmesinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple malzeme sertleşmesi, yerel plastisite gibi kavramların da ne oldukları ve bu yaklaşımları nasıl etkiledikleri incelenmelidir.

Çevrimsel sertleşme ya da çevrimsel yumuşama, malzemenin yüklenmeye karşı verdiği mikro yapısal cevapların çevrim devam ettikçe sertleşme ya da yumuşama olarak değişmesidir. Çevrimin ilk başlarında bu etki daha çok görülürken, çevrim sayısı arttıkça doyma noktasına ulaşır. Şekil 1.12’de birim uzama ve gerilme tabanlı çevrimsel yüklerde sertleşme ve yumuşama durumlarını gösteren eğriler verilmiştir [23].



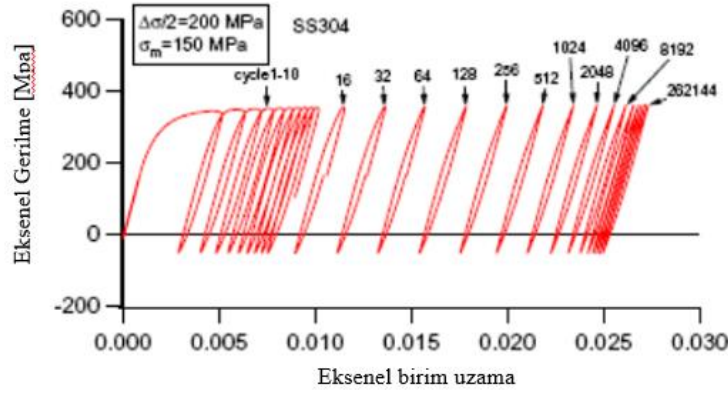
Şekil 1.12 : Birim şekil değiştirme bazlı yüklemde a) çevrimsel yumuşama, b) çevrimsel sertleşme. Gerilme tabanlı yüklemde c) çevrimsel yumuşama, d) çevrimsel sertleşme [23].

Burada gözlenen histerezis oluşma durumu Bauschinger etkisi olarak adlandırılmaktadır ve akma dayanımını geçen yüklere karşı başlayan plastik şekil değişiminin sonunda malzeme yapısında meydana gelen değişimler sebebiyle ilk yönde uygulanan gerilmeye aksi yönde gerilme uygulandığında akma sınırının düştüğünü ve tekrar ilk yöndeki gerilme zorlanması durumunda bu sefer sertleşmeden dolayı akma sınırının yükseldiği gözlemlenmiştir [23]. Bauschinger etkisi Şekil 1.13'te daha detaylı gösterilmektedir.



Şekil 1.13 : Bauschinger etkisi [23].

Plastik şekil değiştirmeyeyle ilgili bahsedilmesi gereken bir diğer durum ise döngüsel sürünmedir. Bu kavram çevrimsel yük devam ettikçe plastik şekil değiştirmenin birikmesini tanımlamaktadır. Bu kavramın büyüklüğü yalnızca deneysel çalışmalarla gözlemlenebilir ve sadece ortalama gerilme etkisinin bulunduğu çevrimsel yüklemelerde meydana gelmektedir [24]. Metallerde sıklıkla gözlemlenebilen bu durum malzemeden malzemeye farklılıklar göstermektedir. Şekil 1.14'te döngüsel sürünme örneğine ait bir grafik gösterilmiştir.



Şekil 1.14 : Döngüsel sürünme ve çevrim sayıları ile ilişkisi [24].

Malzemelerin şekil değiştirme davranışlarının karakterize edilmesi özellikle sıcak koşullarda çalışacak parçaların tasarımları açısından önem taşımaktadır. Elastik-plastik şekil değiştirmelerin anlaşılması da yine ömür hesaplarının doğruluğu için oldukça önemlidir. Malzemelerin elastik olmayan davranışlarının tespit edilip anlaşılması için birleştirilmiş Chaboche modeli geliştirilmiştir [25]. Bu model yukarıda bahsedilen döngüsel sertleşme/yumuşama, döngüsel sürünme ve Bauschinger etkisi gibi plastik şekil değiştirme kavramlarının malzeme özelinde tanımlanabilmesini sağlamaktadır [25].

Akma düzleminin ilerlediği sertleşme durumu kinematik sertleşme olarak tanımlanmaktadır. Sertleşmeleri ifade eden modeller arasındaki en büyük fark $\underline{X}$ şeklinde ifade edilen ters gerilme tensörünün varlığıdır ve Chaboche modeli, kinematik sertleşmeyi ifade eden modellerden birisidir [24].

Chaboche modeli, Armstrong-Fredrick modelinin (denklem 1.9) kapsamının ve esnekliğinin genişletilmiş halidir. Temel fikri doğrusal olmayan birden çok modelin süperpozisyonundan oluşmaktadır ve denklem 1.10'da matematiksel olarak ifade edilmiştir [24].

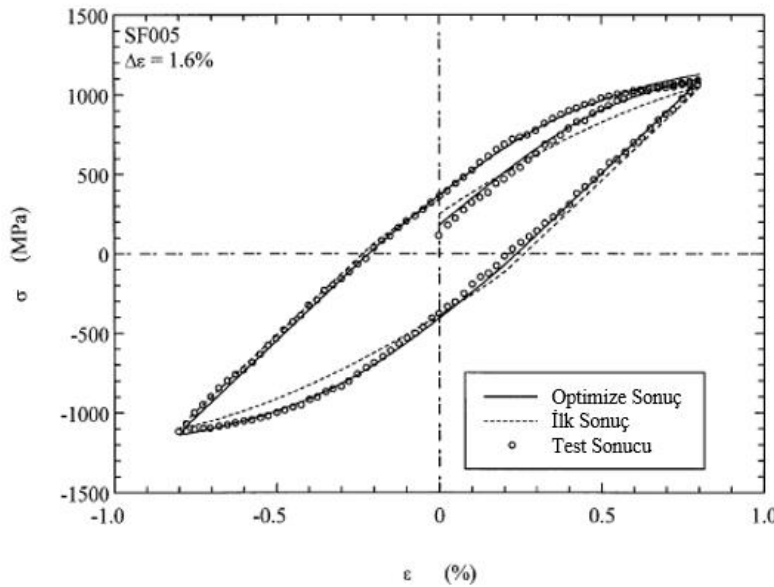
$$d\underline{X} = \frac{2}{3} C d\underline{\varepsilon}^p - \gamma \underline{X} d\underline{\varepsilon}_{eq}^p \quad (1.9)$$

Denklem 1.9'ta görüldüğü üzere, $\underline{X}$ ters gerilme tensörünü, $\underline{\varepsilon}^p$ ona bağlı plastik birim şekil değiştirmeyi, ε_{eq}^p ise eşdeğer plastik birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. C ve γ terimleri ise malzemeye bağlı olarak bulunması gereken parametrelerdir [24].

$$d\underline{X} = \sum_{i=1}^n d\underline{X}_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{2}{3} C d\underline{\varepsilon}_i^p - \gamma \underline{X}_i d\underline{\varepsilon}_{eq}^p \right) \quad (1.10)$$

Denklem 1.10'da da görüldüğü üzere birden çok doğrusal olmayan parçalar kullanılarak sertleşme eğrisinin daha iyi yakalanması amaçlanmaktadır [24].

Bunu gözlemleyebilmek adına [26] numaralı kaynakta anlatıldığı üzere, tek eksenli birim uzama tabanlı zorlanma uygulanması ile Chaboche modelinin deneyde elde edilen birim uzama verilerine yakınsayabilmesi için parametre tahminleri yürütülmüş ve modelin Bauschinger etkisi, döngüsel sürünme gibi etkileri de taşıdığını gösteren sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 1.15).

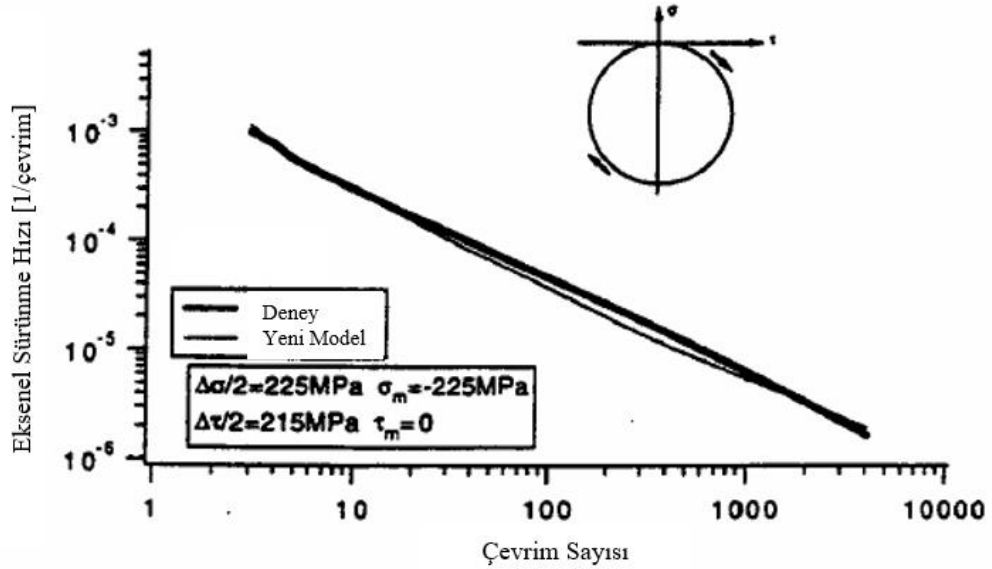


Şekil 1.15 : Deney sonuçları ve Chaboche modeli kıyaslaması [26].

Sehitoglu ve Yang (1996) ise yine çalışmalarında sertleşme/yumuşama ya da döngüsel sürünme hesaplarının bazı malzemeler için yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Bunun üzerine Armstrong-Fredrick modelini baz alarak akma yüzeyine aksi yöndeki gerilmeler için bir sınır getirilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Sehitoglu ve Yang modeline göre, senkron ve asenkron yüklemelerde, döngüsel sürünme değişim hızının

uzun vadede yavaşlayacağı ve neredeyse sabit olacağı tahmin edilmektedir. Bu zamana bağlı davranışı ifade edebilmek için önceki yükleme durumundan bir hafıza yüzeyi tanımlanır ve deviyatrik gerilme uzayından maksimum gerilme seviyesi belirlenir. Esas model içindeki parametreler bu değerlerle birlikte tekrar hesaplanırsa döngüsel sürünme davranışına daha yakın sonuçlar elde edilecektir [27].

[28] numaralı kaynakta yazarlar kendi geliştirdikleri Sehitoglu-Jiang modeli için deneysel çalışmalar yapmışlar ve önerdikleri modelle sonuçları kıyaslamışlardır. Sonuçlara bakıldığında, tek eksenli ya da çok eksenli yüklemelerde en iyi döngüsel sürünme sonuçlarının bu modelle elde edildiğini savunmuşlardır. Şekil 1.16'da çok eksenli yükleme senaryosuna ait deney sonuçlarından bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 1.16 : Eksenel sürünme hızı deney sonuçları ile Sehitoglu-Jiang modelinin karşılaştırılması [28].

1.3 Tezin Amacı

Bu çalışmada, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yorulma probleminin özel bir kolu olan çok eksenli yükleme durumlarındaki ömür tahmini yaklaşımları ele alınmıştır. Özellikle endüstride, tasarlanan parçaların ya da yapıların gerek servis ömrü açısından kullanıcıların bilgilendirilmesi ve garanti kapsamlarının belirlenmesi, gerekse fonksiyonlarını taahhüt edilen süreler ya da ön görülen kullanım koşulları içerisinde düzgün bir şekilde sürdürebilmesi için yorulma ömrünün önceden tahmin edilebilmesi oldukça önemlidir. Yorulma ömrü ne kadar başarılı bir şekilde tahmin edilebilir olursa tasarımların maliyetinin düşmesi, daha hafif

ve modüler tasarımların ortaya çıkması mümkün olacak, aynı zamanda geliştirilen ürünün fonksiyonelliğinin korunmasını, bakım masraflarının asgari seviyeye indirilmesini ve hepsinden önemlisi beklenmedik şekilde insan hayatını tehlikeye sokacak hasarlarla karşılaşılma ihtimalini en aza indirecektir. Bu sebeplerle çok eksenli yorulma durumunda ömür kestirimi bu tezin temel konusu olarak ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında literatürde yapılan önceki araştırmalar incelenmiştir. Teorik yaklaşımların yanı sıra birçok çalışmada test ve deneylerle de bu problemin altında yatan sebepler gözlemlenmiş ve bu çalışmalar bir sonraki teorik çalışmalar için birer kaynak oluşturmuştur. Literatürde gözlemlenen en önemli eksiklik birçok çalışma tamamlanmış olmasına rağmen çok eksenli yorulma için özellikle de asenkron yükleme koşullarında ömür tahmini için yapılan hesapların senkron yüklemeler kadar gerçek sonuçlara yakın değerlere ulaşamamış olmasıdır. Bir diğer göze çarpan eksiklik ise problem özelinde bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarından faydalanılarak yapılan çalışmaların azlığıdır.

Bu çalışmada amaç, özellikle asenkron yükleme durumlarında, literatürde sonuçları gözlemlenmiş farklı teorik yaklaşımların ve test verilerinin, bir de bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarıyla denenerek kullanıma uygunluğunu değerlendirmek, literatürde tek bir çalışma altında incelenemeyen ve yorulma ömrüne etki eden diğer faktörlerin etkilerini de dahil ederek metotlar arası kıyaslamalar yapmak ve karşılaşılan problemin türüne göre seçilecek en uygun metodu belirlemektir.

2. ÇOK EKSENLİ YORULMADA BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME BAZLI ÖMÜR KESTİRİM YÖNTEMLERİ

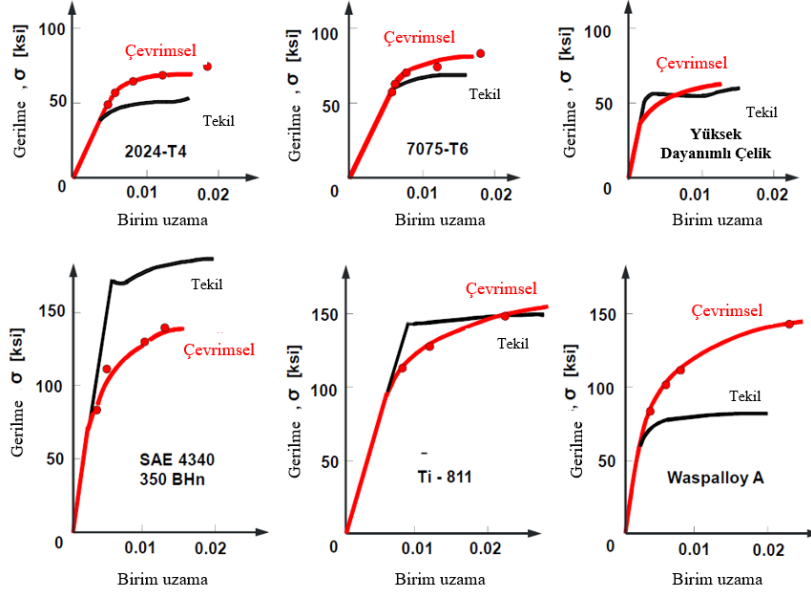
Literatür özetinde anlatıldığı üzere çok eksenli yorulma durumlarında gerek gerilme tabanlı gerekse birim şekil değiştirme tabanlı ve aynı zamanda ikisinin de birlikte kullanıldığı enerji tabanlı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tezin konusu olan asenkron yük senaryoları düşünüldüğünde deneylerde gözlemlendiği şekilde çoğunlukla düşük çevrim sayısı sınırları içerisinde sonuçlar alınmıştır. Bu sebeple birim uzama tabanlı yaklaşımların daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra, yerel plastik şekil değişimi faktörlerinin de etkili olduğu düşünüldüğünde bu başlıkta birim şekil değiştirme tabanlı bir yaklaşım olan Manson-Coffin yaklaşımı ele alınacaktır.

Mühendislikte kullanılan yapılar ve parçalar düşünüldüğünde genelde hepsi zorlanma sonucu gerçekleşecek şekil değişiminin elastik bölgede kalmasına yönelik tasarlanmalarına rağmen gerilme yoğunlaşmasına sebep olan faktörlerden dolayı lokal olarak plastik şekil değişimine uğrarlar [29]. Bunun en önemli sebeplerinden birisi ise tasarımda çentik etkisine neden olacak detayların bulunmasıdır.

Lokal birim şekil değiştirme yaklaşımı ise gerilme birikmesi ile meydana gelen deformasyonları dikkate alarak deney sonuçlarıyla elde edilen verileri ilişkilendirir. Bu birikmeye sebep olan çentik bölgesi etrafında lokal gerilme ve birim şekil değiştirme verileri tespit edilmelidir. Hasar hesabı ise her bir çevrim için ayrı ayrı hesaplanmalı ve daha sonra toplanarak değerlendirilmelidir [29].

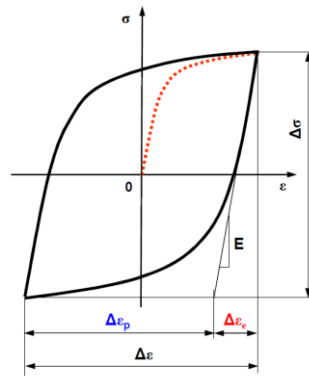
Bu yöntemde de diğer metotlara benzer şekilde önce dış yükler belirlenmeli, daha sonra incelenen parçanın bu yüklere olan yanıtı incelenerek en kritik bölgesi tespit edilmeli ve burada lokal gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri hesaplanmalıdır. Rainflow çevrim sayma yöntemiyle tepe-vadi şeklinde gerilme verileri tekrar düzenlendikten sonra her bir çevrim için ayrı ayrı hasar hesabı yapılmalı daha sonra Miner-Palmgren kuralı ile hasar tespiti gerçekleştirilmelidir [29].

Bu yöntem kullanılırken malzemenin sertleşme karakteristiği ve gerilme-birim şekil değiştirme grafiği hakkında bilgi edinilmiş olması, ek olarak kullanılacak faktörlerin doğru yorumlanması için gereklidir. Literatür özetinde de anlatıldığı gibi, malzemelerin sertleşme karakteristikleri farklıdır ve döngüsel yüklerin mevcudiyeti ile malzemelerin karakteristik özellikleri gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerindeki farklılıkları açıklamaktadır. Şekil 2.1’de farklı malzemeler için döngüsel yükler ve sabit yüklerle elde edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



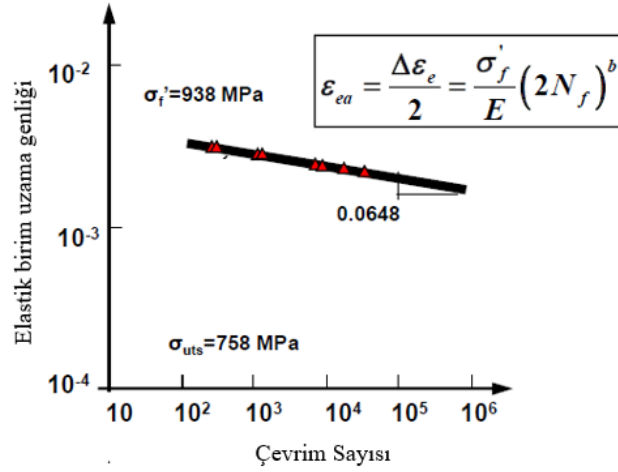
Şekil 2.1 : Döngüsel ve sabit yükleme sonucu gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri [29].

Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi bazı malzemeler tekrarlayan yüklerin etkisi altında döngüsel sertleşme belirtileri gösterirken bazıları döngüsel yumuşamaya meyillidir. Şekil 2.2’de ise döngüsel yükleme sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini ifade eden histerezis eğrisi temsili olarak gösterilmiştir.



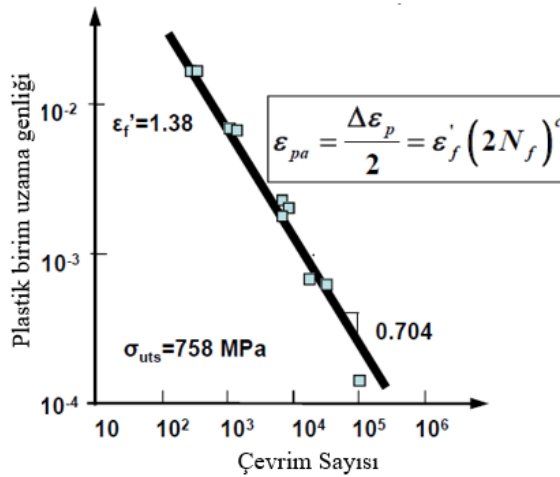
Şekil 2.2 : Döngüsel çevrim durumunda histerezis eğrisi [29].

Bu sebeple, mekanik bir parçanın birim uzama-ömür eğrisi çıkartılırken elastik birim şekil değiştirme ve plastik şekil değiştirme genliklerine bağlı ömür eğrilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Örnek olarak aşağıda RQC-100 çeliğine ait grafikler Şekil 2.3'te elastik birim şekil değiştirme genliği – toplam ömür ve Şekil 2.4'te plastik birim şekil değiştirme genliği – toplam ömür eğrileri ile bu eğrileri sağlayan bağıntılar verilmiştir.



Şekil 2.3 : Elastik birim uzama genliği ve toplam ömür grafiği [29].

Burada E, elastisite modülünü, ϵ_e ve ϵ_p sırasıyla elastik ve plastik birim şekil değiştirmeyi, σ'_f ve b, malzemeye ait iki parametreyi, N_f ise hasar gerçekleşene kadarki çevrim sayısı cinsinden toplam ömrü temsil etmektedir [29].



Şekil 2.4 : Plastik birim uzama genliği ve toplam ömür grafiği [29].

Özetle, döngüsel yüklerle malzeme karakteristiğindeki değişimi tanımlayabilmek ve gerinme ile çevrim cinsinden ömür arasındaki ilişkinin doğru tespit edilmesi çok eksenli yorulma hesaplarında oldukça büyük önem taşımaktadır.

2.1 Manson-Coffin Yaklaşımı

Manson ve Coffin 1950’de birbirlerinden bağımsız olarak, yukarıda da daha önce bahsedildiği gibi ilk olarak plastik birim şekil değiştirme ve hasar dayanımı arasında denklem 2.1’de gösterildiği gibi logaritmik eksenlerde lineer olacak bir bağıntı türetmişlerdir [29].

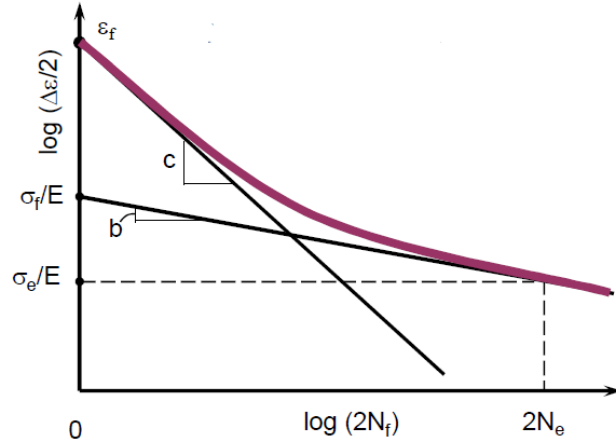
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.1)$$

Burada $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$, plastik birim şekil değiştirme genliğini, N_f malzemenin hasara uğrayana kadar dayanabileceği çevrim sayısını, ε'_f ve c ise malzemenin yorulma sünekliğini temsil eden parametreleri temsil etmektedir [29].

Metalik malzemelerin yorulmaya karşı direnci hem elastik hem de plastik bölgeyi içerdiği için en genel haliyle Manson-Coffin yaklaşımına ait bağıntı, denklem 2.2’de verilmiştir [30].

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c + \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2.2)$$

Bu denklemde ise E, elastisite modülünü, ε'_f , c, σ'_f ve b, malzemeye ait dört parametreyi, N_f ise çevrim sayısı cinsinden ömrü temsil etmektedir. İfadenin daha iyi anlaşılabilmesi adına plastik ve elastik birim uzama genliği – ömür arasındaki ilişkinin logaritmik eksenlerde çizilmiş grafiği ise şekil 2.5’te verilmiştir.

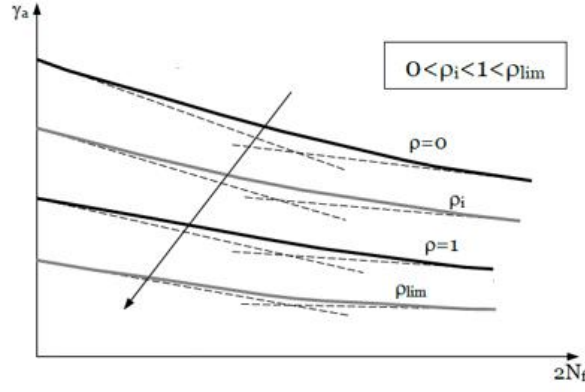


Şekil 2.5 : Manson-Coffin yaklaşımı ile birim uzama genliği-toplam ömür eğrisi [29].

Manson-Coffin yöntemi, birim şekil değiştirme tabanlı kritik düzlem yaklaşımı ile birlikte, kritik düzlem üzerindeki gerilme ve birim uzama verileri baz alınarak çok eksenli yorulma hesabı için hem sabit hem de değişken genlikli yükleme durumlarında kullanılabilir. Bunun için öncelikle çok eksenlilik derecesini ve yükler arasındaki orantısızlığı ifade edebilecek bir kavram olarak kritik düzlem gerilme oranı (denklem 2.3) tanımlanmalıdır [31].

$$\rho = \frac{\sigma_{n,m} + \sigma_{n,a}}{\tau_a} = \frac{\sigma_{n,max}}{\tau_a} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki ifadede ρ , kritik düzlem gerilme oranını, τ_a , kritik düzleme göre kayma gerilmesi genliğini, $\sigma_{n,m}$, $\sigma_{n,a}$, $\sigma_{n,max}$ değerleri de sırasıyla kayma düzlemine dik olacak şekilde ortalama normal gerilme, normal gerilme genliği ve maksimum normal gerilmeyi temsil eder. Yorulma zorlanmalarında, gelen yüklerin karmaşıklığından bağımsız olarak her zaman maksimum kayma gerilmesi genliği değerini taşıyan en az iki adet kritik düzlem bulunur [31]. Bunlar arasından seçim yapabilmek için kritik düzlem gerilme oranına bakılır ve daha büyük orana sahip düzlem seçilerek ömür kestirim hesabı bu düzlem üzerinden devam ettirilir. Kritik düzlem gerilme oranı değiştikçe, Manson-Coffin denklemi üzerinde belirlenmesi gereken sabitler de değişmekte ve yeni eğriler meydana gelmektedir (Şekil 2.6). [31] numaralı kaynakta yazarlar bu durumu düzeltilmiş Manson-Coffin yaklaşımı olarak adlandırmaktadırlar.



Şekil 2.6 : Gerilme oranına göre düzeltilmiş Coffin-Manson eğrileri [31].

Yukarıda görülen eğriler Manson-Coffin yaklaşımıyla matematiksel olarak denklem 2.4'teki gibi ifade edilebilir:

$$\gamma_a = \frac{\tau_f'(\rho)}{G} (2N_f)^{b(\rho)} + \gamma_f'(\rho) \cdot (2N_f)^{c(\rho)} \quad (2.4)$$

τ_f' , γ_f' , b ve c malzeme sabitleri Tresca hipotezine göre tek eksenli çekme ve burulma yönündeki Manson-Coffin eğrilerinden, yani kritik gerilme oranının 1 ve 0 değerlerini aldığı durumlar kullanılarak türetilebilir (denklem 2.5 ve denklem 2.6) [31].

$$\gamma_a = (1 + \nu_e) \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (\text{tek eksenli gerilme, } \rho = 1) \quad (2.5)$$

$$\gamma_a = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma_f' (2N_f)^{c_0} \quad (\text{burulma durumu, } \rho = 0) \quad (2.6)$$

Denklem 2.5, 2.6 ve 2.3 birlikte kullanıldığında parametrelerin tespiti için aşağıdaki bağıntılar elde edilir. Bir başka malzeme parametresi olan c için denklem 2.9'daki bağıntının aynısı c için de kullanılabilir.

$$\frac{\tau_f'(\rho)}{G} = \rho(1 + \nu_e) \frac{\sigma_f'}{E} + (1 - \rho) \frac{\tau_f'}{G} \quad (2.7)$$

$$\gamma_f'(\rho) = \rho(1 + \nu_p) \varepsilon_f' + (1 - \rho) \gamma_f' \quad (2.8)$$

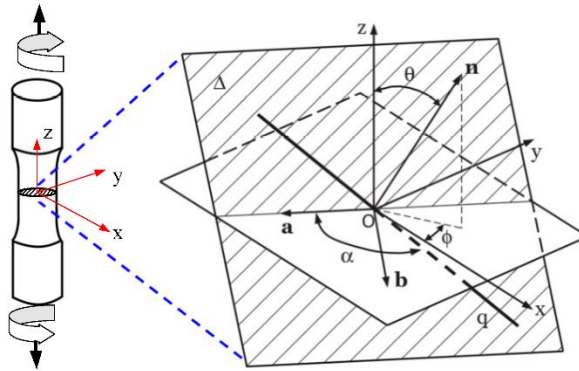
$$b(\rho) = \frac{b \cdot b_0}{(b_0 - b)\rho + b} \quad (2.9)$$

Manson-Coffin yaklaşımı bilgisayar destekli çalışmalar için yatkın olmakla birlikte gerek sabit genlikli kompleks yüklerle gerekse değişken genlikli kompleks yük senaryolarıyla çalışmaya uygundur [31]. Metodoloji olarak kritik düzlemin belirlenmesinden sonra eşdeğer maksimum kayma açısı genliği ve kritik düzleme dik normal gerilme bileşenlerinin tespitinden sonra eşdeğer yükler belirlenir. Detayları daha sonra verilecek olan Rainflow çevrim sayma yöntemi ve Miner-Palmgren kuralı ile yorulma ömrü değerlendirmesini takip etmektedir. Burada dikkat edilecek husus, eşdeğer yükler belirlenirken sonuçların daha isabetli olması için yine ilerideki başlıklarda açıklanacak olan gerilme-birim şekil değiştirme ilişkilerindeki düzeltme kurallarının da hesaba katılmasıdır. Bu kurallar döngüsel sürünme, malzeme sertleşmesi gibi önceden bahsedilen lokal plastisite durumlarını içermektedir [31].

Manson-Coffin yöntemi hem senkron hem de asenkron yükler için olumlu sonuçlar vermektedir [31].

2.1.1 Kritik düzlem yaklaşımı

Literatür özetinde de görüleceği üzere gerek gerilme tabanlı gerekse birim uzama tabanlı olsun, ömür hesap yaklaşımlarında en çok baz alınan yöntemlerden biri kritik düzlem yaklaşımıdır. Kritik düzlem, genel olarak yapı üzerinde maksimum kayma açısı değişiminin görüldüğü yüzey olarak tanımlanmaktadır [32]. Bu düzlemin tespiti ve maksimum kayma gerilmesinin nasıl hesaplandığına bakılırsa;



Şekil 2.7 : Kritik düzlem şematik gösterimi [39].

Şekil 2.7’de olduğu gibi merkezi O noktası, genel eksen takımı ise x-y-z olan ve dış kuvvetlere maruz kalan bir parça tanımlanmaktadır. Gelen yükler sonucunda bu parça üzerinde meydana gelen birim şekil değişimi tensörü O noktasına göre denklem

2.10'daki gibi yazılabilir. Burada $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ ve ε_{zz} normal birim şekil değiştirmeleri, γ_{xy} , γ_{xz} , ve γ_{yz} kayma açılarını temsil etmektedir [32].

$$[\varepsilon(t)] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(t) & \varepsilon_{xy}(t) & \varepsilon_{xz}(t) \\ \varepsilon_{yx}(t) & \varepsilon_{yy}(t) & \varepsilon_{yz}(t) \\ \varepsilon_{zx}(t) & \varepsilon_{zy}(t) & \varepsilon_{zz}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{xy}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{xz}(t) \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx}(t) & \varepsilon_{yy}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{yz}(t) \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{zy}(t) & \varepsilon_{zz}(t) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Yine Şekil 2.7'de görüldüğü üzere malzeme üzerinde normal birim vektörü n olan, ϕ ve θ kadar döndürülmüş herhangi bir Δ düzlemi tanımlandığı varsayılmaktadır. ϕ n vektörünün x-y düzlemi üzerindeki izdüşümü ile x eksenini arasındaki açı, θ ise n ve z eksenini arasındaki açıdır. Böylece merkezi yine O noktası olan a-b-n eksenlerine sahip yeni bir koordinat düzlemi tanımlanmış olur. Yeni eksen takımının oryantasyonunu gösteren birim vektörler ise denklem 2.11'de gösterildiği gibi olacaktır [32].

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta)\cos(\phi) \\ \sin(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix}; \quad a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi) \\ -\cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\phi) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ -\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Yine Şekil 2.7'de gösterilen, O noktasından geçen ve Δ düzleminde uzanan ve a ekseniniyle α açısını yapan q doğrultusunun birim vektörü de denklem 2.12'de verilmiştir [32].

$$q = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\sin(\phi) + \sin(\alpha)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -\cos(\alpha)\cos(\phi) + \sin(\alpha)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -\sin(\alpha)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Yukarıda verilen tanımlar ve dönüşümler aracılığıyla, q yönünde zamana bağlı olarak birim şekil değiştirme değerleri denklem 2.13'teki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\gamma_q(t)}{2} = \begin{bmatrix} q_x & q_y & q_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{xy}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{xz}(t) \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx}(t) & \varepsilon_{yy}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{yz}(t) \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx}(t) & \frac{1}{2}\gamma_{zy}(t) & \varepsilon_{zz}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

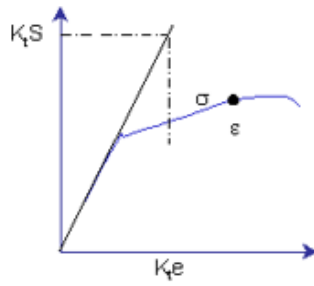
Bu yöntem kullanılarak, maksimum kayma açısı değişiminin olduğu düzlem bulunabilir ve yorulma hesapları için kullanılabilir.

2.1.2 Lokal plastisite düzeltmeleri için kullanılan metotlar

2.1.2.1 Neuber kuralı

Neuber kuralı, plastik şekil değiştirmenin olduğu durumlarda elastik olarak hesaplanan gerilmenin ya da birim şekil değiştirmenin gerçek gerilme ya da gerçek birim şekil değiştirme değerine dönüştürülmesi (Şekil 2.8) için kullanılan bir bağıntıdır [33]. Matematiksel olarak ifadesi denklem 2.14’te verilmiştir. $K_t S$ ve $K_t e$, sırasıyla elastik bölgede hesaplanan gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerini temsil etmektedir.

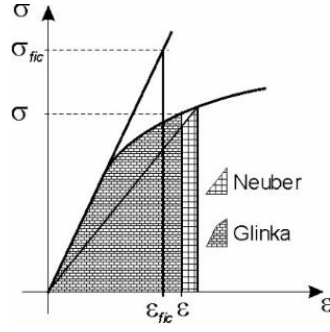
$$K_t S \cdot K_t e = \sigma \cdot \varepsilon \quad (2.14)$$



Şekil 2.8 : Neuber kuralının şematik olarak gösterimi [33].

2.1.2.2 Glinka metodu

Glinka metodu da Neuber kuralında ifade edilen gerçek gerilme ya da gerçek birim şekil değiştirme değerini hesaplamak için kullanılan bir metottur ancak hesaplama yöntemi olarak şekil değiştirme enerjisini kullanır [34]. Yaklaşımlar arasında kıyaslama görsel olarak Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 : Glinka ve Neuber yaklaşımlarının kıyaslanması [34].

Matematiksel ifadesi ise denklem 2.15'teki gibidir [34].

$$\frac{1}{2} \sigma_{fic} \varepsilon_{fic} = \int \sigma \cdot d\varepsilon \quad (2.15)$$

2.1.2.3 Ramberg-Osgood denklemi

Ramberg-Osgood denklemi ise diğerlerinden farklı olarak döngüsel yüklemelerde oluşan sertleşme durumlarında gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini açıklayan bir denklemdir [30].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da verilen ifadede K' ve n' malzemeye bağlı parametrelerdir.

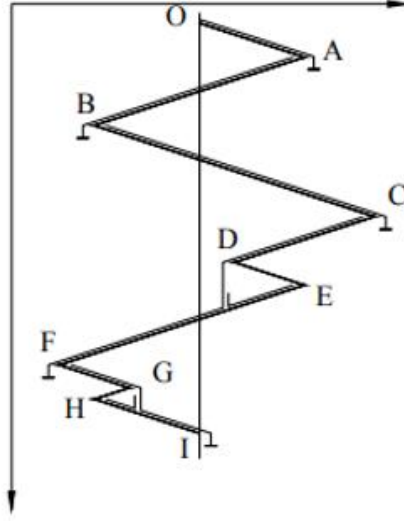
2.2 Ömür Kestiriminde Kullanılan Diğer Yardımcı Yöntemler

2.2.1 Rainflow çevrim sayma yöntemi

Yorulma hesaplarında zaman bağlı değişken genlikli yüklerin varlığı, hesapları karmaşık hale getirmektedir. Literatürde çok farklı çevrim sayma yöntemleri bulunmaktadır ancak gerilme-birim şekil değiştirme tabanlı verilerde en çok kullanılan yöntem Rainflow çevrim sayma yöntemidir. Gerilme-birim şekil değiştirme düzleminde bu eğri çizdirilirse kapalı döngüler oluşturan histerezis eğrileri meydana gelir. Bu yöntemle birlikte her bir kapalı döngü, ilgili büyüklükte sabit bir genlik olarak düşünülebilir [35].

Rainflow sayma yönteminde de karmaşık döngüleri ayrıştırmak için farklı metotlar uygulanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında tapınak çatısı yönteminden

bahsedilecektir. Örnek olması amacı ile Şekil 2.10’da zaman bağılı temsili bir grafik gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Rainflow çevrim sayma yöntemi için temsili grafik [38].

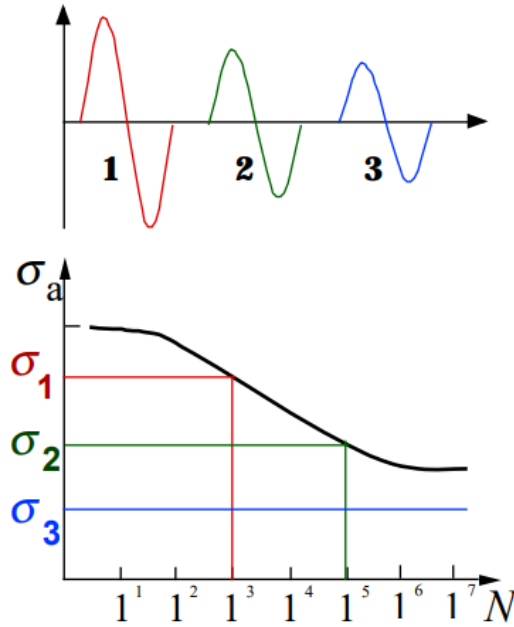
Örnekte gösterilen birim şekil değiştirme - zaman grafiği sadeleştirilmiş veri gibi düşünülebilir. Daha karmaşık verilerde öncelikle histerezis filtresi uygulanır. Daha sonra eğer tepe ve dip değerler arasında veri noktaları varsa bunlar da çıkartılabilir, çevrim sayımını etkilemeyecektir. Sadece tepe ve dip noktaları kaldığı andan itibaren öncelikle zaman eksenine göre ilk tepe noktasından başlanılarak bir sonraki dip noktasına ilerlenir. Bir sonraki tepe noktası, referans noktasından büyük ya da eşit ise sayma işlemi durdurulur. Eğer küçükse dip noktasından yatay bir çizgi çizilir. Eğer bu yatay çizgi veri eğrisiyle kesişirse gerçek eğri takip edilir ve bir sonraki tepe noktasına bakılarak referans tepe noktasından daha büyük bir tepe noktasına gelene kadar işlem devam eder. Bu adımlar sırasıyla tüm tepe noktaları için uygulanır ve her bir çizgi ayrı bir sekans olarak başlangıç ve bitiş değerleriyle kaydedilir [38].

Benzer sayma işlemi dip noktaları için de yapılır. Bu sefer işlemler referans dip noktasından daha küçük bir dip noktası bulunana kadar yapılır ve her bir sekans yine başlangıç ve bitiş değerleriyle kaydedilir. Bu sekansların her biri yarım çevrim sayılır [38].

Başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki delta değerleri aynı olan çevrimlerin sayıları toplanır ve her bir çevrim için bulunan değerler sabit genlikmiş gibi kabul edilerek yorulma hesapları yapılabilir.

2.2.2 Miner-Palmgren kuralı

Miner-Palmgren kuralı farklı genliklerde çevrimsel yüklere maruz kalan yapıların hasar durumlarını hesaplayabilmek için uygulanan bir kuraldır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Miner-Palmgren uygulaması (örnek) [36].

Temel olarak her bir çevrimden kaynaklanan hasar değerlerinin lineer olarak toplanmasıyla malzemenin ya da parçanın hasar durumunu yorumlayabilmeyi sağlamaktadır. Genel kural denklem 2.17'deki gibi yazılabilir [36]. Toplam değer 1'den küçükse malzemenin hasara uğramayacağı söylenebilir.

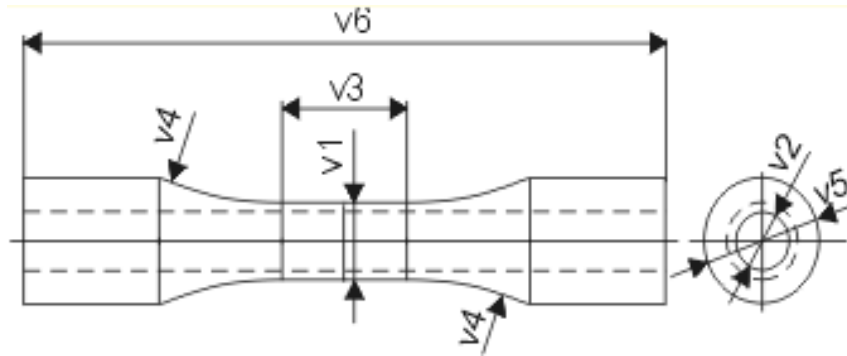
$$D = \sum_{i=1}^N D_i = \frac{n_i}{N_i} < 1 \quad (2.17)$$

3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu başlıkta, çalışma kapsamında gerçekleştirilen bilgisayar destekli analizler sırasında izlenen adımlar anlatılacaktır. Genel hatlarıyla özetlenirse, literatürde halihazırda tamamlanmış senkron ve asenkron yüklemeleri içeren test çalışmaları baz alınarak aynı koşullar bilgisayar ortamında modellenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu aşamada SolidWorks, Hypermesh, ABAQUS ve FEMFAT isimli ticari yazılımlar kullanılmıştır.

3.1 Test Verileri

Aşağıda çizelgeler ile değerleri verilen test verileri [37] numaralı kaynaktan alınmıştır. Deneyler eğilme ve burulma zorlanmaları ile senkron ve farklı faz açılarıyla birlikte asenkron senaryolarla gerçekleştirilmiş, ek olarak ortalama gerilme etkisinin yine hem senkron hem de asenkron yükleme durumunda yarattığı etkinin de gözlemlenmesi mümkün kılınmıştır. Deneylerde kullanılan numuneye ait geometrik ölçüler Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Malzeme olarak ise SAE 1050 çeliği kullanılmıştır.



Şekil 3.1 : Test numunesi geometrik ölçüleri [37].

Yukarıda harflendirilerek gösterilen ölçüler şu şekilde tanımlanabilir: boyun çapı, v_1 : 35 mm, iç çap v_2 : 32 mm, boyun bölgesi uzunluğu v_3 : 30 mm, v_4 eğrilik yarıçapı: 60 mm, sabitleme bölgesi dış çapı v_5 : 50 mm ve toplam uzunluk v_6 : 130 mm’dir.

Testlere ait veriler Çizelge 3.1’den başlayarak sırasıyla senkron yükleme, 30 (Çizelge 3.2), 60 (Çizelge 3.3) ve 90 (Çizelge 3.4) derecelik faz farklarıyla asenkron yükleme

testleri ve eğilme yüküne ortalama gerilme eklenerek senkron (Çizelge 3.5) ve 90 derecelik faz farkıyla asenkron yükleme (Çizelge 3.6) verileri ayrı ayrı tablolarda verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Sim02 No’lu deney, senkron eğilme + burulma yükü.

Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0201	7520	446	0	0	256	0	0
Sim0202	11223	446	0	0	256	0	0
Sim0203	11682	446	0	0	256	0	0
Sim0204	13042	445	0	0	256	0	0
Sim0205	16255	446	0	0	256	0	0
Sim0206	17788	445	0	0	256	0	0
Sim0207	21732	445	0	0	256	0	0
Sim0208	25001	445	0	0	256	0	0
Sim0209	94958	345	0	0	198	0	0
Sim0210	137531	345	0	0	198	0	0
Sim0211	143150	345	0	0	198	0	0
Sim0212	178420	345	0	0	198	0	0
Sim0213	185710	345	0	0	198	0	0
Sim0214	203219	345	0	0	198	0	0
Sim0215	229160	345	0	0	198	0	0
Sim0216	258423	344	0	0	198	0	0

Çizelge 3.2 : Sim03 No’lu deney, 30° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü.

Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0301	13537	393	0	0	226	0	30
Sim0302	17552	393	0	0	226	0	30
Sim0303	18086	393	0	0	226	0	30
Sim0304	19203	393	0	0	226	0	30
Sim0305	19591	393	0	0	226	0	30
Sim0306	19986	393	0	0	226	0	30
Sim0307	33599	393	0	0	226	0	30
Sim0308	29460	343	0	0	197	0	30
Sim0309	31594	343	0	0	197	0	30
Sim0310	64857	343	0	0	197	0	30
Sim0311	67501	343	0	0	197	0	30
Sim0312	73854	344	0	0	198	0	30
Sim0313	79203	344	0	0	198	0	30
Sim0314	97690	344	0	0	198	0	30
Sim0315	107952	344	0	0	198	0	30

Çizelge 3.3 : Sim04 No’lu deney, 60° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü.

Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0401	8750	393	0	0	226	0	60
Sim0402	13854	393	0	0	226	0	60
Sim0403	15157	393	0	0	226	0	60
Sim0404	17784	392	0	0	226	0	60
Sim0405	18325	392	0	0	226	0	60
Sim0406	19072	392	0	0	226	0	60
Sim0407	21285	392	0	0	225	0	60
Sim0408	22155	392	0	0	225	0	60
Sim0409	65497	318	0	0	183	0	60
Sim0410	68851	318	0	0	183	0	60
Sim0411	77319	318	0	0	183	0	60
Sim0412	96695	318	0	0	183	0	60
Sim0413	99637	318	0	0	183	0	60
Sim0414	134450	317	0	0	183	0	60
Sim0415	150065	317	0	0	182	0	60
Sim0416	167494	317	0	0	182	0	60

Çizelge 3.4 : Sim05 No’lu deney, 90° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü.

Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0501	13151	394	0	0	226	0	90
Sim0502	13965	394	0	0	226	0	90
Sim0503	16066	394	0	0	227	0	90
Sim0504	16890	394	0	0	227	0	90
Sim0505	17232	394	0	0	227	0	90
Sim0506	17757	394	0	0	227	0	90
Sim0507	20225	394	0	0	227	0	90
Sim0508	27587	393	0	0	226	0	90
Sim0509	42991	344	0	0	198	0	90
Sim0510	48967	344	0	0	198	0	90
Sim0511	51484	343	0	0	197	0	90
Sim0512	60427	343	0	0	197	0	90
Sim0513	66789	343	0	0	197	0	90
Sim0514	68826	343	0	0	197	0	90
Sim0515	95768	344	0	0	198	0	90
Sim0516	99680	344	0	0	198	0	90

Çizelge 3.5 : Sim06 No'lu deney, senkron eğilme + burulma yükü.

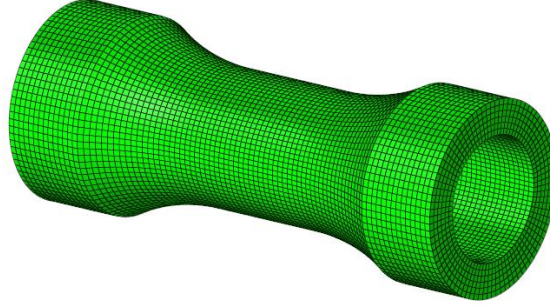
Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik, ortalama gerilme			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0601	23186	338	338	0	194	0	0
Sim0602	24133	338	338	0	194	0	0
Sim0603	29483	338	338	0	194	0	0
Sim0604	32587	338	338	0	194	0	0
Sim0605	33918	338	338	0	194	0	0
Sim0606	35659	338	338	0	195	0	0
Sim0607	37116	338	338	0	195	0	0
Sim0608	44445	338	338	0	195	0	0
Sim0609	77858	293	293	0	169	0	0
Sim0610	98018	293	293	0	169	0	0
Sim0611	108338	294	294	0	169	0	0
Sim0612	115045	294	294	0	169	0	0
Sim0613	132355	294	294	0	169	0	0
Sim0614	146291	294	294	0	169	0	0
Sim0615	153800	294	294	0	169	0	0
Sim0616	209768	294	294	0	169	0	0

Çizelge 3.6 : Sim07 No'lu deney, 90° faz farkı, asenkron eğilme + burulma yükü.

Numune No	Çevrim Sayısı	Eğilme - harmonik, sabit genlik, ortalama gerilme			Burulma - harmonik, sabit genlik		
		Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]	Genlik [MPa]	Ortalama Gerilme [MPa]	Faz Açısı [°]
Sim0701	9678	336	336	0	193	0	90
Sim0702	10073	336	336	0	193	0	90
Sim0703	14301	335	335	0	192	0	90
Sim0704	14885	335	335	0	192	0	90
Sim0705	17297	335	335	0	192	0	90
Sim0706	19505	335	335	0	192	0	90
Sim0707	23124	335	335	0	193	0	90
Sim0708	24311	335	335	0	193	0	90
Sim0709	29496	293	293	0	169	0	90
Sim0710	35317	295	295	0	169	0	90
Sim0711	40630	295	295	0	169	0	90
Sim0712	43145	295	295	0	169	0	90
Sim0713	48653	295	295	0	169	0	90
Sim0714	50136	295	295	0	169	0	90
Sim0715	52709	295	295	0	169	0	90
Sim0716	92341	294	294	0	169	0	90

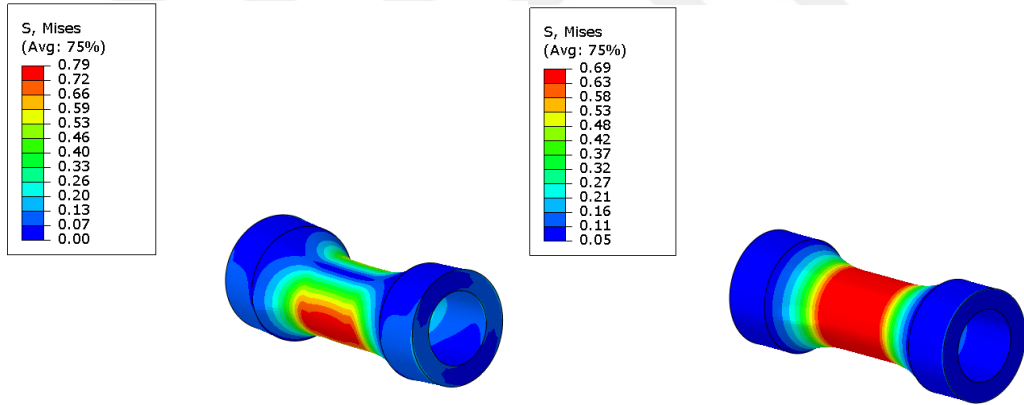
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme

Yukarıda geometrik özellikleri verilen test numunesi bilgisayar ortamında Şekil 3.2’de görülebileceği üzere altı yüzlü ve sekiz düğüm noktalı, ortalama boyu 1,5 mm olan kübik elemanlar kullanılarak Hypermesh yazılımı kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 3.2 : Deney numunesinin bilgisayar ortamında modellenmesi.

Alın yüzeylerinden biri sabitlenerek, diğer uç bölgesinden eğilme ve burulma için ayrı ayrı olacak şekilde birim kuvvetler tanımlanmış ve ABAQUS yazılımı kullanılarak iki ayrı sonuç dosyası elde edilmiştir. (Şekil 3.3)

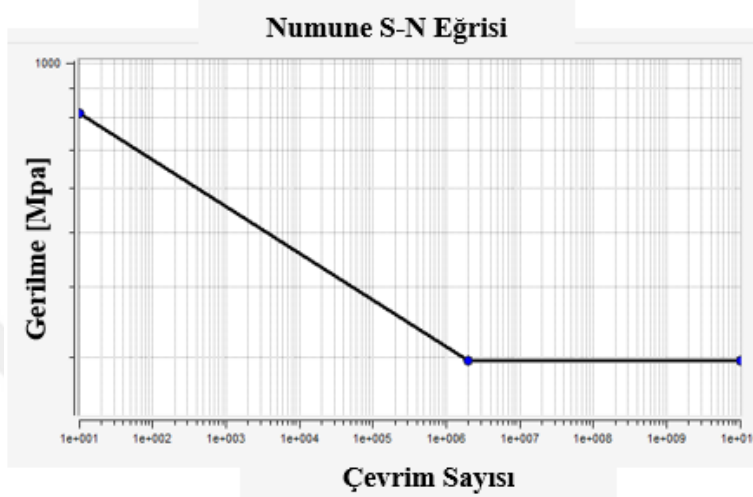


Şekil 3.3 : Birim kuvvetler altında eğilme ve burulma analiz sonuçları.

Analizler için test numune malzemesi olan SAE 1050 çeliği kullanılmıştır. Statik analiz için kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.7’de, yorulma hesapları için tanımlanan yorulma eğrisi ise Şekil 3.4’te verilmiştir. Yorulmaya yönelik yük tanımlamaları FEMFAT içerisinde yapılmıştır. FEMFAT, birim yük sonucu elde edilen gerilme tensörlerinin farklı test senaryoları ve gerilme değerleri için baz model kullanımıyla ölçeklendirilmesine imkan tanımaktadır. Böylece harmonik genlikli, senkron ve asenkron yük tanımları ile bunlar arasındaki faz farkı her test senaryosu için ayrı ayrı tanımlanabilmektedir.

Çizelge 3.7 : SAE 1050 malzeme özellikleri.

Elastisite Modülü	Poisson Oranı	Akma Dayanımı (Çekme)	Kopma Dayanımı (Çekme)	Akma Dayanımı (Kayma)	Kopma Dayanımı (Kayma)
[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
211000	0.3	335	650	193	375



Şekil 3.4 : SAE 1050 çeliğinin yorulma eğrisi.

Statik analiz modeli, testlerdeki yükleme senaryoları ve malzeme bilgilerinin tanımlanmasıyla çalışmanın yorulma hesaplama bölümüne geçilmiş ve bu aşamada FEMFAT yazılımı kullanılmıştır. FEMFAT, çalışma alanlarının fazla olması sebebiyle içerisinde birden çok modül bulundurmaktadır ve çok eksenli yorulma hesapları için bu çalışmada ChannelMAX modülü kullanılmıştır. ChannelMAX modülünde çok eksenli yorulmayı etkileyebilecek faktörlerin aktivasyonu ve yorulma ömrü hesabında seçilecek yaklaşımın kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir.

3.3 Çok Eksenli Yorulma Hesabını Etkileyen Faktörler ve Çok Eksenli Yorulma Hesabı Yaklaşımları

3.3.1 Çok eksenli yorulmayı etkileyen faktörler

Çok eksenli yorulma hesaplarında yazılım içerisinde tanımlanan bazı parametreler ömür tahmin sonuçlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Bunlardan birincisi ortalama gerilme düzenlemesidir. FEMFAT, farklı yük kanallarında tanımlanan gerilme geçmişlerini süperpoze ederek bileşkelerini almakta ve bu değerlerin kritik düzlem üzerindeki tepkilerinden yola çıkarak yorulma ömrünü hesaplamaktadır. Tanımlanan

yük geçmişleri, özellikle yükler asenkron olarak yani belirli bir faz farkıyla tanımlanmışsa FEMFAT bu bilgileri Rainflow çevrim sayma yöntemini de hesaba katarak tek bir eşdeğer ortalama gerilme ve genlik değerine dönüştürmektedir. Literatürde de bahsedildiği gibi yük geçmişini çevrimlere ayırarak yorulma hesabını gerçekleştirmekte ve Miner kuralı ile toplam hasar değerini belirlemektedir.

İkinci önemli parametre ise istatistiksel etkilerdir. Bu bölümde kullanıcılar için güvenilirlik etkisinin de hesaba katılması mümkün olmaktadır. Test sonuçları ardından oluşturulan yorulma eğrileri genellikle %50 güvenilirlikle çizdirilirler. Bu çalışmada da test ile doğru kıyaslama yapılabilmesi için bu değer yazılım içerisinde tanımlanmıştır.

Son önemli parametre ise yükleme sırasında asal eksenlerin yön değiştirme durumunun hesaba katılmasıdır. Özellikle farklı faz açılarında yapılan yüklemelerde kritik düzlemdeki asal gerilme oranları sabit kalmamaktadır. Bu faktörün aktif hale getirilmesi, asal gerilmeleri orantılı olan yük senaryolarında sonucu etkilememekle birlikte, özellikle asenkron yüklemelerde gerçeğe yakın sonuçlar alınmasını sağlamaktadır.

3.3.2 FEMFAT'ta çok eksenli yorulma hesabı yaklaşımları

3.3.2.1 Kritik düzlemde normal gerilme

Bu parametre ile kritik düzlemdeki normal gerilme değeri eşdeğer gerilme olarak kabul edilmektedir. Kayma etkisinin büyük olduğu durumlarda dezavantajlıdır ve çok gevrek malzemelerde kullanılması önerilir.

3.3.2.2 Karakteristik malzeme kayma gerilmesi

Kayma gerilme etkisinin daha çok olduğu durumlarda kullanılabilir, çok sünek malzemeler için önerilmektedir ancak kayma gerilme değerlerinin işaretinin değiştiği bölgelerde gerilme geçmişinde süreksizliklere neden olabilmektedir.

3.3.2.3 Kritik düzlemde eşdeğer gerilme

Bu yöntemde kritik düzlemdeki eşdeğer gerilme tespit edilir ve yorulma hesaplarında kullanılır. Çok sünek ya da çok gevrek olmayan malzemeler için önerilmektedir. Normal gerilme değerlerinin işaret değiştirmesiyle, özellikle büyük değerlerde ön gerilme koşulları da mevcutsa yük geçmişinde süreksizlikler oluşabilir. [9] numaralı

kaynakta anlatılan Papuga hasar kriterine benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bu yöntemin gerilme bazlı değil de [10] numaralı kaynaktaki birim uzama bazlı versiyonu olarak Wang & Brown'un yaklaşımıyla benzer yönleri mevcuttur.

3.3.2.4 Kritik düzlemde kritik bileşen

Sadece kritik düzlem değil, kritik gerilme bileşeni de aranmaktadır. Bu sebeple analiz süresi oldukça uzama eğilimindedir, tüm geometriye uygulanmasındansa, filtreleme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Kritik düzlem üzerindeki hem normal hem de kayma gerilmeleri ve onların tüm kombinasyonları yorulma hesaplarında değerlendirilir. En kapsamlı ve güvenilir yöntem olarak gösterilmektedir. Detayları tam olarak bilinmemekle birlikte, [18], [19] ve [20] numaralı kaynaklardaki yöntemlere ait karma kabul yaklaşımlarının kullanılmış olabileceği düşünülmektedir.

3.3.2.5 İşaretli Von Mises gerilmesi

Kritik bölge tespitinin hızlı yapılmasının istendiği ve çok yüksek isabetli ömür tahminine ihtiyaç duyulmadığı durumlarda işaretli Von Mises gerilmesi yorulma faktörü olarak baz alınabilmektedir. Tüm kesit düzlemlerinde yorulma döngüsünün hesaplanmıyor olması çözüm süresini kısaltmaktadır. Özellikle sünek malzemelerde tercih edilebilmektedir. İşaretin kullanım amacı Rainflow çevrim sayma yönteminde çevrimlerin tespit edilebilmesidir. Özellikle yüksek derecede orantısız yüklemelerde yük geçmişinde süreksizlikler oluşabilir, yine de genellikle en emniyetli sonuçları veren yaklaşımlardan biridir.

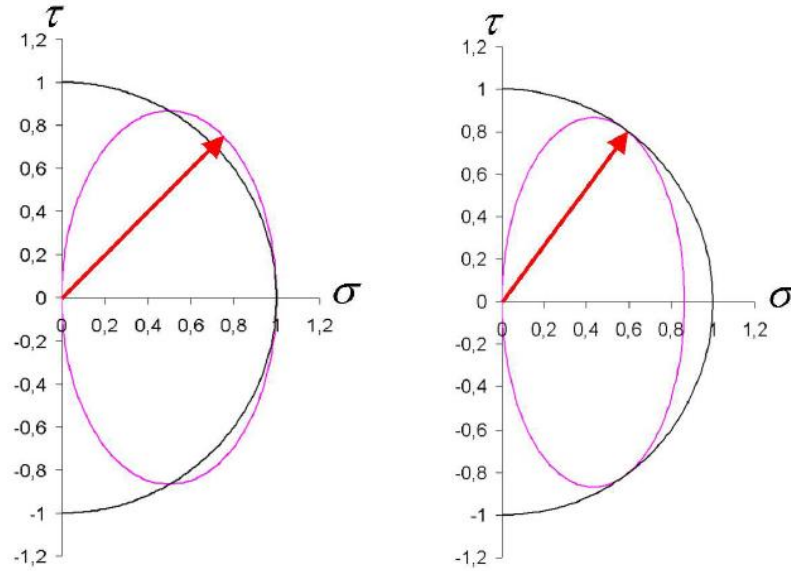
3.3.2.6 Maksimum ve minimum asal gerilme

Yöntemsel olarak işaretli von Mises gerilmesine çok benzemektedir ancak ondan en büyük farkı gevrek malzemeler için kullanılabilir olmasıdır. Yine aynı şekilde sonuç isabetinin çok büyük önem arz etmediği ve çözüm süresinin kısa olması beklendiği durumlarda kullanılabilir. Tüm yük geçmişi boyunca esas alınan kriter en büyük asal gerilmedir. Yine işaretli von Mises gerilmesi yaklaşımı gibi emniyetli sonuçlar sunmaktadır.

3.3.2.7 Düzenlenmiş eşdeğer gerilme yaklaşımı

Daha önce bahsedilen eşdeğer gerilme yaklaşımı, çekme dayanımının kayma dayanımına oranını hesapları içinde tanımlamaktadır. Ancak bu değerin 1.414'ten

büyük olduğu durumlarda, Şekil 3.5'te de gösterildiği gibi normal-kayma gerilmesi düzleminde çizilen yük geçmişi kayma gerilmesi sebebiyle eliptik bir hal almış ancak normal gerilme ekseninden taşmaktadır. Eşdeğer gerilme hesaplanırken seçilmesi gereken kritik düzlem orijin noktasına en uzak olan ve elips üzerinde kırmızı ok ile gösterilen konum olarak belirlenmektedir. Ancak, bu konumun aynı zamanda normal gerilme eksenini de kesişmesi gerekmektedir. Aksi halde hesaplanan eşdeğer gerilme olması gerekenden daha büyük bir değer olarak bulunacaktır. Çekme dayanımı ve kayma dayanımı oranıyla ilgili terimin yeniden düzenlenmesiyle eşdeğer gerilme daha isabetli bir şekilde hesaplanabilmektedir. [12] ve [13] numaralı kaynaklarda açıklanan, sırasıyla Crossland ve Lu kriteri olarak isimlendirilen yaklaşımlarla benzerlikler göstermektedir.



Şekil 3.5 : Eşdeğer gerilme hesabının Mohr çemberine göre düzenlenmesi.

3.3.2.8 Kritik düzlemde ölçeklendirilmiş normal gerilme

Bu yöntemde ise asal gerilmeler tüm yük geçmişi için hesaplanır ve en büyük asal gerilme ile en küçük asal gerilme arasında bir oran belirlenir. Bu oran kayma yükünün baskın olduğu durumda -1 ve çekme yükünün baskın olduğu durumda ise 1 değerini alır. Bu orana bağlı olarak geliştirilen bir faktör, gerilme tensörüyle çarpılarak, kayma gerilmesinden doğacak etkilerin daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Yine normal gerilme yaklaşımı gibi arka planda kritik düzlem yaklaşımı uygulanmaktadır. Yaklaşım olarak [2] numaralı kaynakta anlatılan, Fatemi & Socie yöntemine benzetilmektedir.

FEMFAT yazılımı genel olarak literatürde yer alan kritik düzlem yaklaşımını benimsemekte, bazı eşdeğer gerilme belirleme yaklaşımları da yine literatür araştırmasındaki yöntemlerle benzerlik göstermektedir. Bunun yanı sıra, kayma ve normal gerilme oranına göre tanımlanan katsayılar, S-N eğrisinin faktörlere göre yeniden düzenlenmesi gibi yöntemler de [21] numaralı kaynaktaki Susmel & Lazzarin yaklaşımıyla benzeştirilebilir. Yine ek olarak, yazılım içerisinde yer alan hesap faktörlerinin de bu çalışma içerisinde detaylıca anlatılan yerel plastisite etkileri, Rainflow çevrim sayma yöntemi, döngüsel sertleşmenin yorulmaya etkisi gibi durumları göz önüne almak için hazırlandığı anlaşılmaktadır. Bu yönlerden de [29] numaralı kaynakta anlatılan Manson-Coffin yaklaşımıyla uyumlu olduğu söylenebilir.

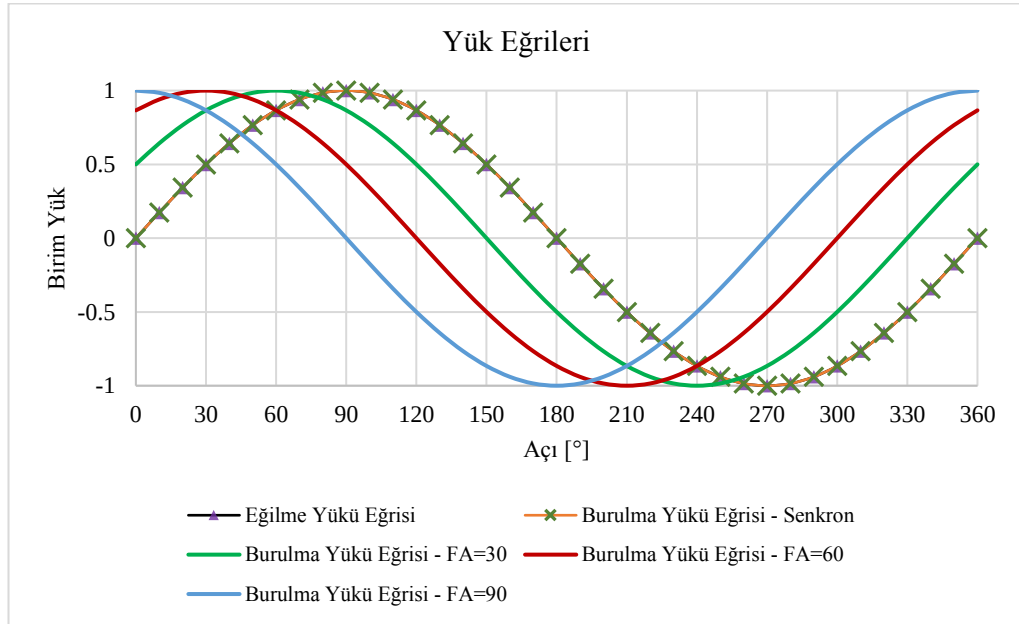
Özetle, çok eksenli yorulma ömür tahmini çalışmaları kapsamında öncelikle literatürden bulunan eğilme ve burulma yükü ile yapılan deneylerden örnek veriler seçilmiştir. Daha sonra bu deneylerde kullanılan numune 3 boyutlu tasarım yazılımı olan SolidWorks ile katı cisim olarak modellenmiş ve Hypermesh yazılımı ile sonlu elemanlar analizi için hazır hale getirilmiştir. Ardından, ABAQUS yazılımı yardımıyla birim kuvvetler altında statik eğilme ve statik burulma analizleri tamamlanmıştır. Elde edilen sonuç dosyaları, sonlu elemanlar modelinin tanımlanması ve yorulma hesabında kullanılacak olan gerilme tensörlerinin aktarılması için FEMFAT yazılımının içerisinde tanımlanmıştır. Testte gerçekleştirilmiş genlik, ortalama gerilme ve faz açıları göz edilerek harmonik yük eğrileri FEMFAT içerisinde oluşturulmuştur. İlgili test senaryosuna göre aktive edilecek faktörler belirlenmiş, sonuç güvenilirliği %50 olarak ayarlanmış ve kritik düzlem arama parametreleri belirlenmiştir. Analiz çalışmaları kapsamında yukarıda detayları belirtilen her bir yaklaşım için bütün test senaryolarının tanımları ayrı ayrı tamamlanmıştır. Analiz sonuçları ve karşılaştırmalı grafikler bir sonraki başlıkta verilecektir.

4. ANALİZ SONUÇLARININ TEST VERİLERİYLE KARŞILAŞTIRMALI YORUMLANMASI

Bu bölümde yapılan analiz çalışmaları bir önceki başlıkta verilen test verileriyle birlikte kıyaslanarak yorumlanacak, senkron ve asenkron yükleme durumlarında hangi yaklaşımların diğerlerine göre avantajlı olduğu, ortalama gerilme mevcudiyetinin ve harmonik yükler arasında faz farkı bulunmasının sonuçları nasıl etkilediği grafikler üzerinde gösterilecek ve detaylı sonuçlar çizelgeler aracılığıyla sayısal veriler şeklinde sunulacaktır.

Yorumlar yapılırken test üzerinde çalışılan iki farklı genlik noktası için bulunan farklı ömür sonuçlarının ortalamaları alınarak ilgili deneye ait yorulma eğrisi çizdirilmiştir. Hata eğrileri bu veri baz alınarak oluşturulmuş ve bulunan sonuçların hata oranları da yine bu ortalama değerler baz alınarak hesaplanmıştır.

Yük tanımlarının ve asenkron yükleme şeklinin daha iyi anlaşılması açısından tüm çalışma boyunca bahsedilen ve analizlerde kullanılacak olan yük eğrileri Şekil 4.1’de birim sinüs eğrileri kullanılarak tek bir grafik içerisinde temsilen gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Birim yük eğrilerinin gösterimi.

4.1 Ortalama Gerilme Etkisi Olmadan Senkron ve Asenkron Yüklemelele Eğılme ve Burulma Zorlanması Durumu

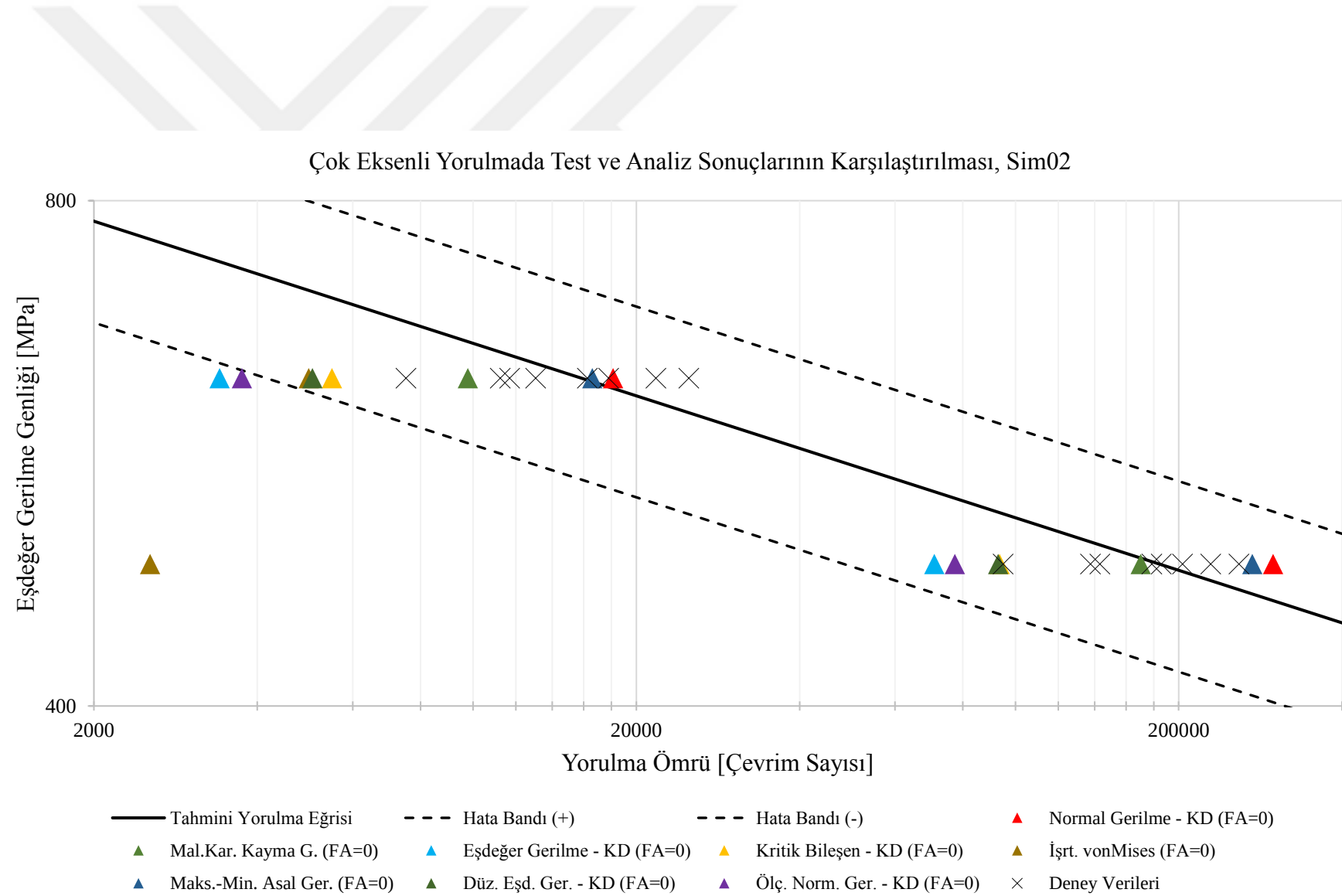
Detaylı sonuçları bir önceki başlıkta verilen deneylerden ilki Sim02 kodlu harmonik, senkronize eğılme ve burulma zorlanması senaryosudur. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 4.2’de verilmiştir. Yine Çizelge 4.1’de farklı yaklaşımlara ait analiz sonuçlarının çevrim ömrü cinsinden sayısal değerleri, Çizelge 4.2’de ise yüzde olarak hata oranları tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.1 : Sim02 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	627	18116	9778	3410	5494	4978	16591	5057	3749
	Ort.Ömür	15530								
2	Eş.Ger.	486	298730	170140	70872	93567	2540	273411	92937	77369
	Ort.Ömür	178821								

Çizelge 4.2 : Sim02 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	627	17	37	78	65	68	7	67	76
	Ort.Ömür	15530								
2	Eş.Ger.	486	67	5	60	48	99	53	48	57
	Ort.Ömür	178821								



Şekil 4.2 : Sim02 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

Sonuçlar incelendiğinde senkron eğilme ve burulma durumunda en iyi sonuçların malzeme karakteristik kayma gerilmesi, kayma düzleminde normal gerilme ve asal gerilme tabanlı yaklaşımlarla elde edildiği gözükmemektedir. Diğer tüm yaklaşımlarda daha emniyetli sonuçlar ortaya çıkmıştır. Yük uygulama süresi boyunca asal gerilmeler arasındaki oranın bozulmaması, asal eksenin yön değiştirmemiş olması hem kritik düzlem yaklaşımıyla hem de asal gerilme tabanlı yaklaşımla uyumlu sonuçlar elde edilmesinin sebebini açıklamaktadır. Sünek bir malzeme olan SAE 1050 çeliğinin bu özelliği sebebiyle de kayma gerilmesi ve malzeme karakteristiğini baz alan metodun iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Sim03 kodlu deneyde ise benzer yük senaryosunda ancak yüklerin aralarında 30° faz farkı bulunmaktadır. Analiz sonuçları tablo olarak Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilirken grafik gösterimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sim03 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

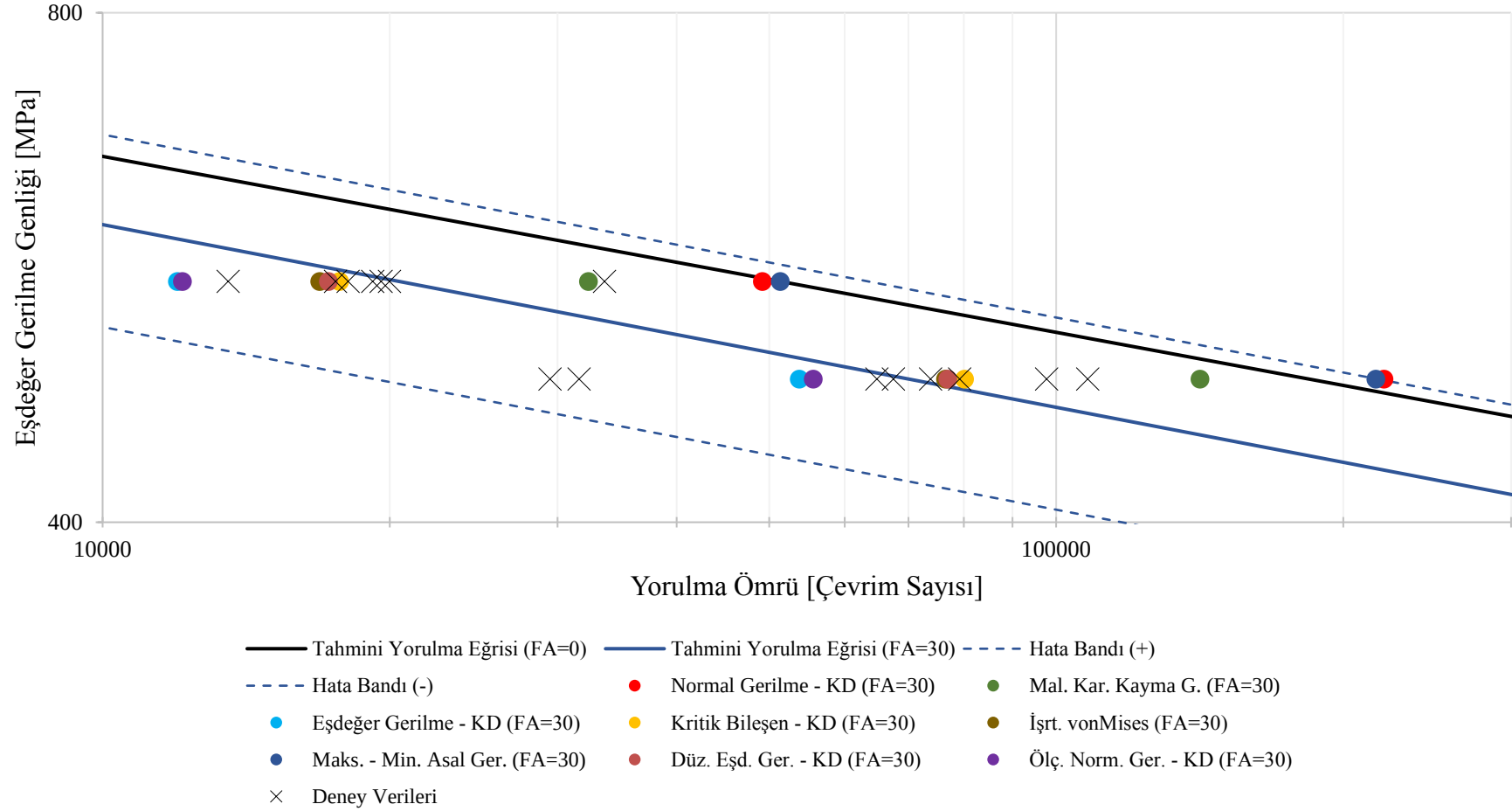
Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	555	49188	32317	11971	17710	16882	51361	17241	12121
	Ort.Ömür	20222								
2	Eş.Ger.	486	220588	141443	53763	80150	76511	216294	76923	55607
	Ort.Ömür	69014								

Çizelge 4.4 : Sim03 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	555	143	60	41	12	17	154	15	40
	Ort.Ömür	20222								
2	Eş.Ger.	486	220	105	22	16	11	213	11	19
	Ort.Ömür	69014								

30°'lik faz farkıyla yapılan deneylerin ortalamasına bakıldığında özellikle eşdeğer gerilmenin aynı olduğu ikinci deney noktasında, senkron yüklemeye göre ortalama ömür sayılarında düşüş olduğu görülmektedir. Durumun daha iyi açıklanabilmesi için Şekil 4.3'te senkron yükleme sonuçlarına göre çizilen tahmini ömür eğrisi de tekrar çizdirilmiş bulunmaktadır. Bu sonuçlar gerek deneyde gözlemlenen sonuçlarla, gerekse literatürde açıklanan beklentilerle paralellik göstermektedir.

Çok Eksenli Yorulmada Test ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Sim03 - Faz Açısı:30



Şekil 4.3 : Sim03 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

Bir önceki deneyde iyi sonuç veren kritik düzlemde normal gerilme ve asal gerilme yaklaşımlarının faz farkı oluşmasıyla birlikte ortalamadan en uzak sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Bu senaryoda en iyi sonuçlar kritik düzlemde kritik bileşen ve düzenlenmiş eşdeğer gerilme yaklaşımlarıdır. Kritik bileşen metodunda, kesme düzlemlerindeki her yük kombinasyonu ile hesap yapıyor olmasının avantajı burada açıkça görülmektedir. Yine eşdeğer gerilme yaklaşımına bir önceki başlıkta açıklanmış olan elips denkleminin düzenlenmesiyle deney sonuçlarıyla daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. En emniyetli sonuçlar ise kritik düzlemde eşdeğer gerilme yaklaşımı ile elde edilmiştir.

Sim03 kodlu deneyde ise benzer yük senaryosunda ancak yüklerin aralarında 60° faz farkı bulunmaktadır. Analiz sonuçları tablo olarak Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilirken grafik gösterimi Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

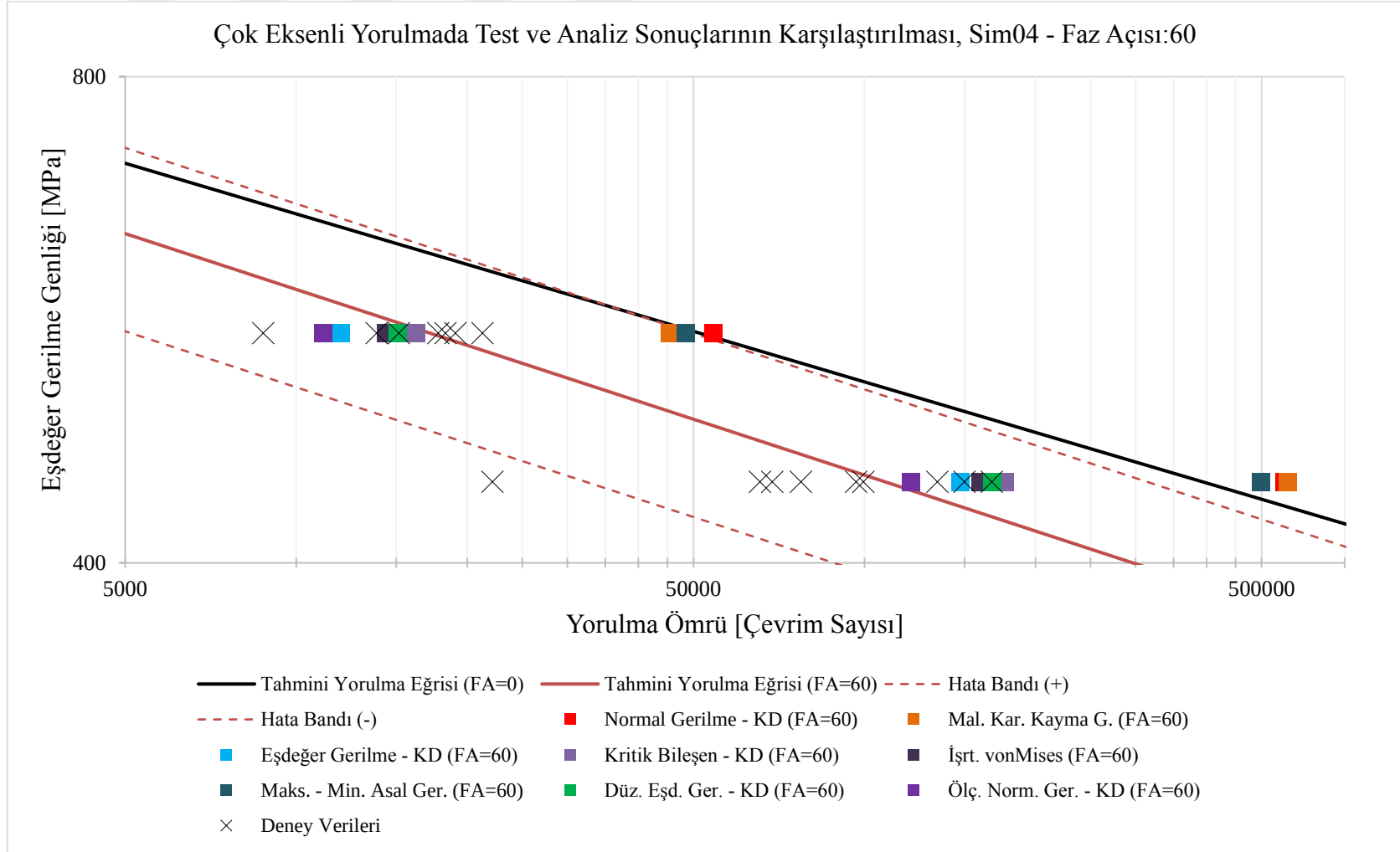
Çizelge 4.5 : Sim04 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger. 555	54259	45365	11971	16234	14395	48512	15075	11148
	Ort.Ömür 17048								
2	Eş.Ger. 449	548747	556174	147638	176263	159830	498256	167504	120870
	Ort.Ömür 107501								

Çizelge 4.6 : Sim04 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger. 555	218	166	30	5	16	185	12	35
	Ort.Ömür 17048								
2	Eş.Ger. 449	410	417	37	64	49	363	56	12
	Ort.Ömür 107501								

Bu deney sonuçlarına bakıldığında faz farkının 60°’ye çıkmasıyla ortalama ömür değerinin 1 numaralı deney noktasına göre daha da düştüğü gözlemlenmektedir. Yine Sim03 kodlu deneyle paralellik gösterecek şekilde kritik düzlemde çalışan kritik bileşen, düzeltilmiş eşdeğer gerilme yaklaşımı ve ölçeklendirilmiş normal gerilme yaklaşımları testlerle paralel sonuçlar vermektedir. Buna ek olarak işaretli von Mises gerilmesinin baz alındığı yaklaşımın da iyi sonuçlar vermesi göze çarpmaktadır.



Şekil 4.4 : Sim04 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

Sim05 kodlu deneyde faz farkı 90°'ye çıkarılmıştır. Analiz sonuçları tablo olarak Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilirken grafik gösterimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Sim05 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	555	49685	23697	23511	22901	24077	49694	23511
	Ort.Ömür	20652							
2	Eş.Ger.	486	222552	102354	102354	102076	104493	222552	102354
	Ort.Ömür	70277							

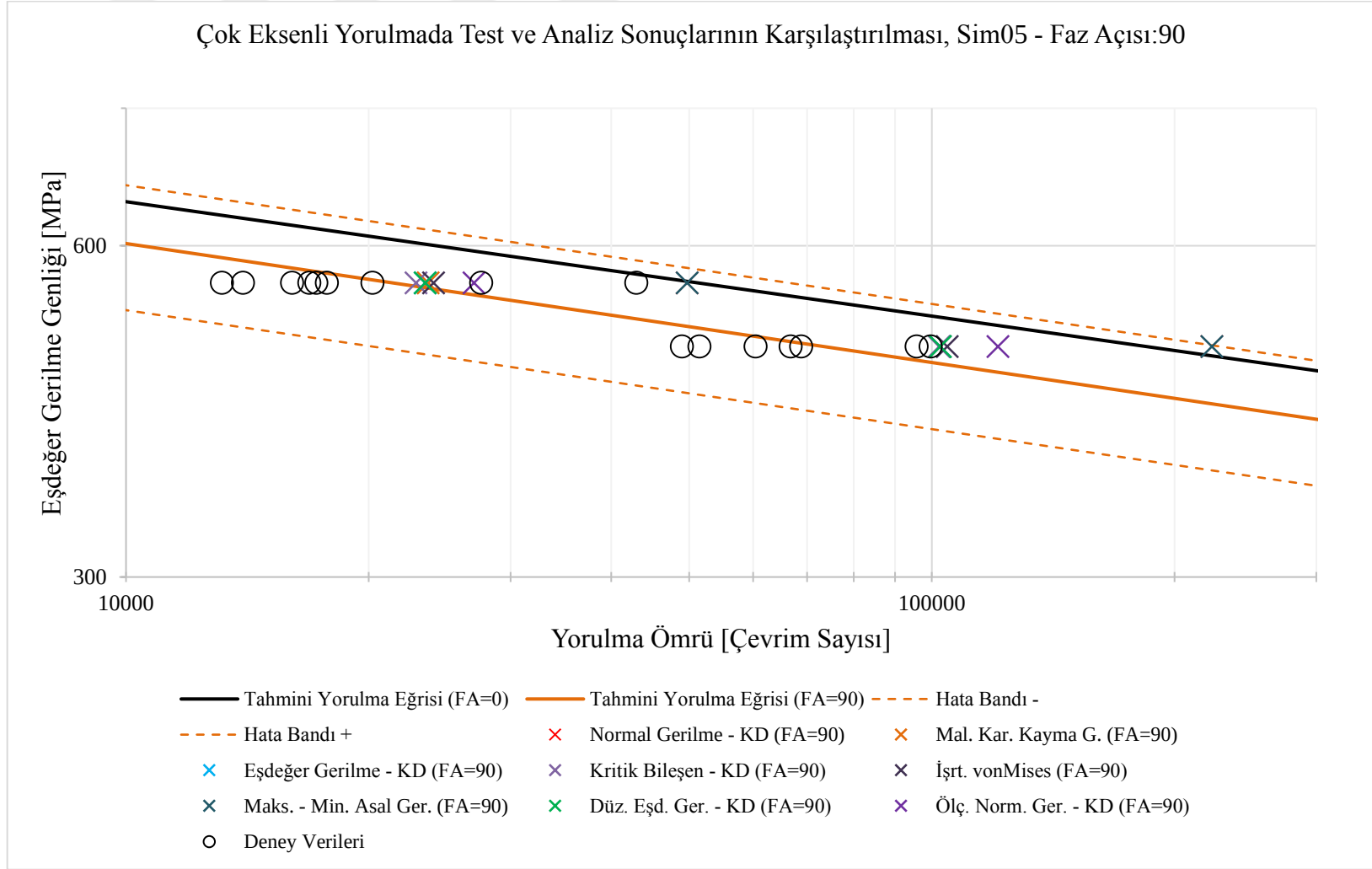
Çizelge 4.8 : Sim05 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. von Mises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	555	141	15	14	11	17	141	14
	Ort.Ömür	20652							
2	Eş.Ger.	486	217	46	46	45	49	217	46
	Ort.Ömür	70277							

Bu deneyin sonuçları incelendiğinde ise yine asenkron yükleme sonucu olarak eşzamanlı yüklemeye göre ortalama ömür değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Başka dikkat çeken bir nokta ise tüm simülasyon sonuçlarının belirli bir hata payı içerisinde kalsa da deney verilerine göre daha büyük yorulma ömrüne sahip olmasıdır. Bu durum faz farkı 90° olduğunda yapılan hesaplamaların daha emniyetsiz olduğu anlamına da gelmektedir. Özellikle yüksek çevrimli yorulma problemlerinde farkın daha çok büyüdüğü belirlenmiştir.

Yöntemler arasındaki karşılaştırmalarla ilgili olarak, diğer asenkron yük senaryolarında olduğu gibi kritik düzlemde kritik bileşen yaklaşımının yine test sonuçlarıyla en uyumlu yaklaşım olduğu görülmektedir.

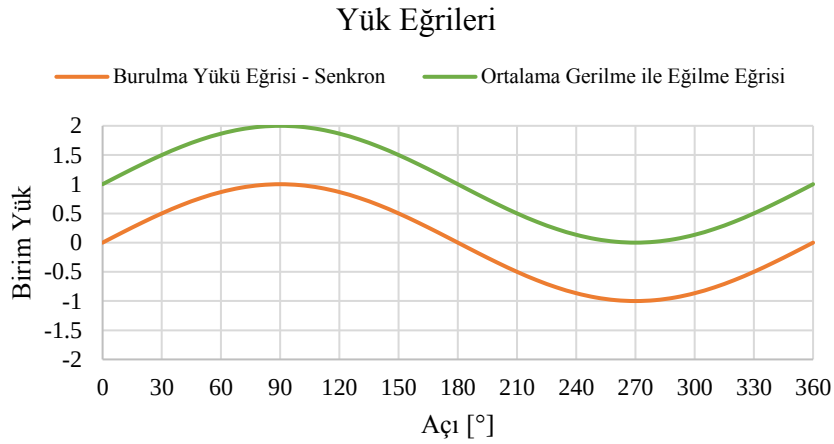
Kritik düzlemde normal gerilme yaklaşımının ve asal gerilmelerin temel alındığı yaklaşımın asenkron yüklemelerle uyumlu çalışmadığı bir kez daha tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 : Sim05 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

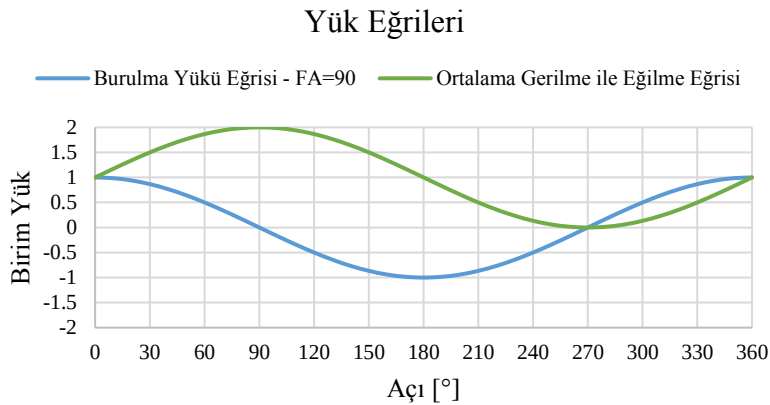
4.2 Ortalama Gerilme Etkisi ile Senkron ve Asenkron Yüklemelerle Eğilme ve Burulma Zorlanması Durumu

Detaylı sonuçları yine bir önceki başlıkta verilen deneylerden ilki Sim06 kodlu harmonik, senkronize eğilme ve burulma zorlanması senaryosudur. Birim yükler için yük eğrileri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Sim06 kodlu deney ve ilgili analiz için yük eğrileri.

Sim06 ve Sim07 kodlu deneylerde eğilme yükü pozitif ortalama gerilme etkisi taşımaktayken burulma yükü aynı bırakılmıştır. Bu sonuçlar kendi aralarında ortalama gerilme etkisi varken faz farkının çok eksenli yorulma durumunda ömrü nasıl etkilediğinin anlaşılmasına yardımcı olmakta, aynı zamanda bir önceki deney grubundan Sim02 ve Sim05 ile karşılaştırılabilir olmasıyla da ortalama gerilme etkisinin senkron ve asenkron yükleme durumlarında ömrü nasıl etkilediği konusunda fikir vermektedir. Sim07 kodlu deney için yük eğrileri ise Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Sim06 kodlu deney ve ilgili analiz için yük eğrileri.

Sim06 kodlu deney ortalamaları ve ilgili analiz sonuçlarını gösteren tablolar ise Çizelge 4.9’da, hata oranlarını içeren tablo ise Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Sim06 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	476	46189	37903	3662	31884	3842	20478	10604	10316
	Ort.Ömür	32566								
2	Eş.Ger.	413	250627	186567	18394	138825	18856	105263	50531	50599
	Ort.Ömür	130184								

Çizelge 4.10 : Sim06 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

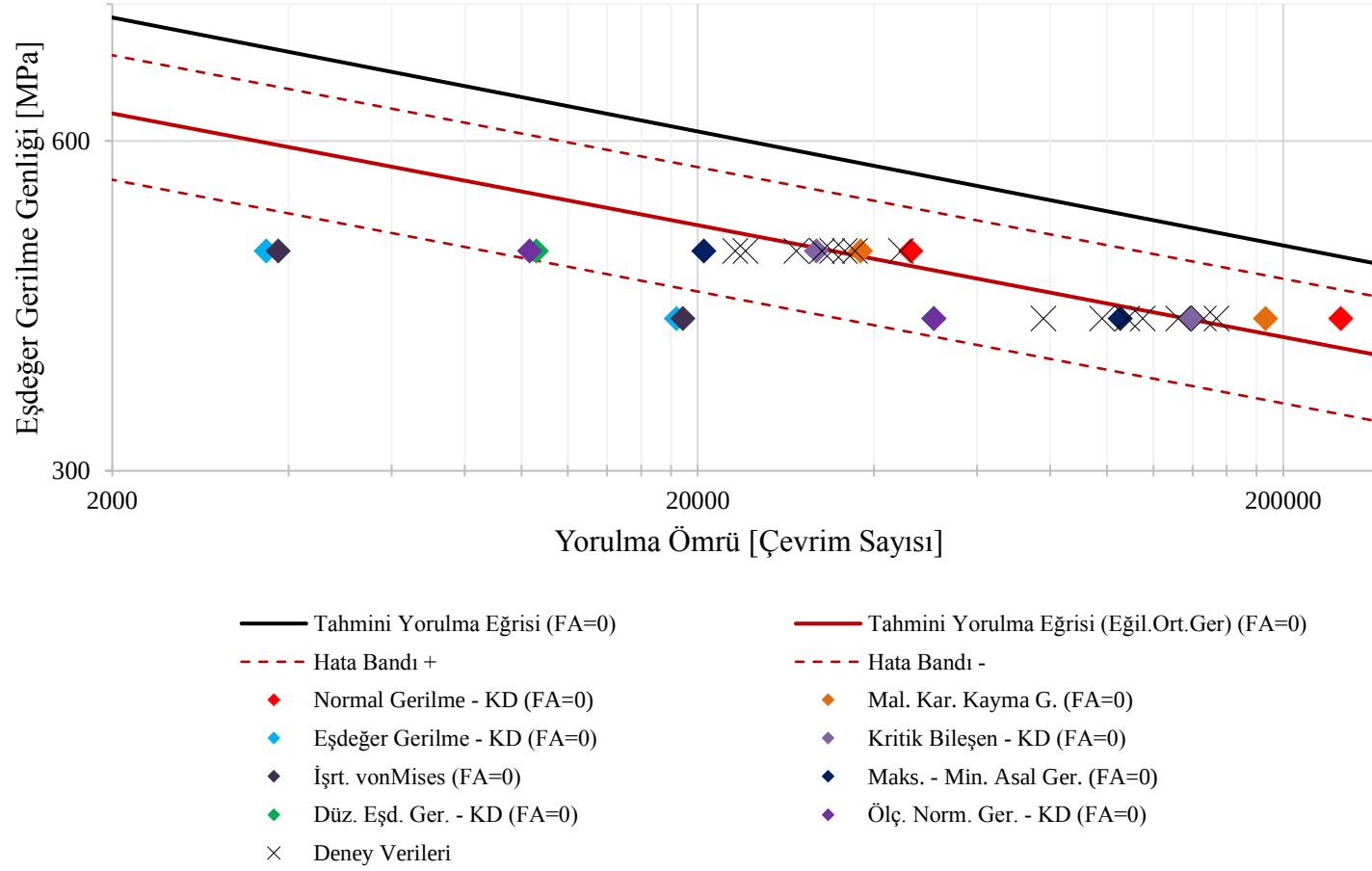
Deney Noktası	Deney Verileri		Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger.	476	42	16	89	2	88	37	67	68
	Ort.Ömür	32566								
2	Eş.Ger.	413	93	43	86	7	86	19	61	61
	Ort.Ömür	130184								

Deney sonuçlarına bakıldığında ortalama gerilme etkisi bulunan senkron yüklemelerde en iyi sonuç veren yöntemin kritik düzlemde kritik bileşen yaklaşımı olduğu açıkça görülmektedir. Deney sonuçlarının grafik üzerindeki gösterimi ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Deney verilerinin ve analiz sonuçlarının detaylı olarak gösterildiği grafikte, ortalama gerilme mevcudiyetinin yorulma ömrü sonuçları üzerinde olumsuz etki yarattığı tespit edilmiştir. Yine mavi ve kahverengi renklerle gösterilen eşdeğer gerilme ve işaretli von Mises yaklaşımları en emniyetleri sonuçları vermiş ancak deney verilerinden oldukça uzak sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Sim02 kodlu deney ile kıyaslandığında ise sadece ortalama gerilmenin etkisiyle en yakın sonuçları tespit eden yaklaşım yönteminin farklı olduğu görülmüştür. Örneğin, kritik düzlemde normal gerilme ve asal gerilme tabanlı yaklaşımların Sim06’da iyi sonuçlar veremiyor olması, yüklemenin aslında senkron olmasına rağmen sabit kalan ortalama gerilme yüzünden asal gerilmeler arasındaki oranın yük süresi boyunca değiştiğini göstermektedir.

Çok Eksenli Yorulmada Test ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Sim06 - Faz Açısı:0



Şekil 4.8 : Sim06 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

Sim07 kodlu deney ise eğilme yükünde ortalama gerilme etkisi sürerken burulma yükünün 90° faz farkıyla etki ettiği yük senaryosu ile yapılmıştır. Bu senaryoya ait yapılan analizin sonuçları ve hata oranları sırasıyla Çizelge 4.11 ve 4.12’de, sonuçların grafik üzerinde gösterimi ise Şekil 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Sim07 kodlu deney için yapılan analiz sonuçları.

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger. 476 Ort.Ömür 16647	417362	168539	4492	171331	399255	421467	7452	396616
2	Eş.Ger. 413 Ort.Ömür 49053	3083565	715990	22288	732938	2946955	3081664	37092	2904163

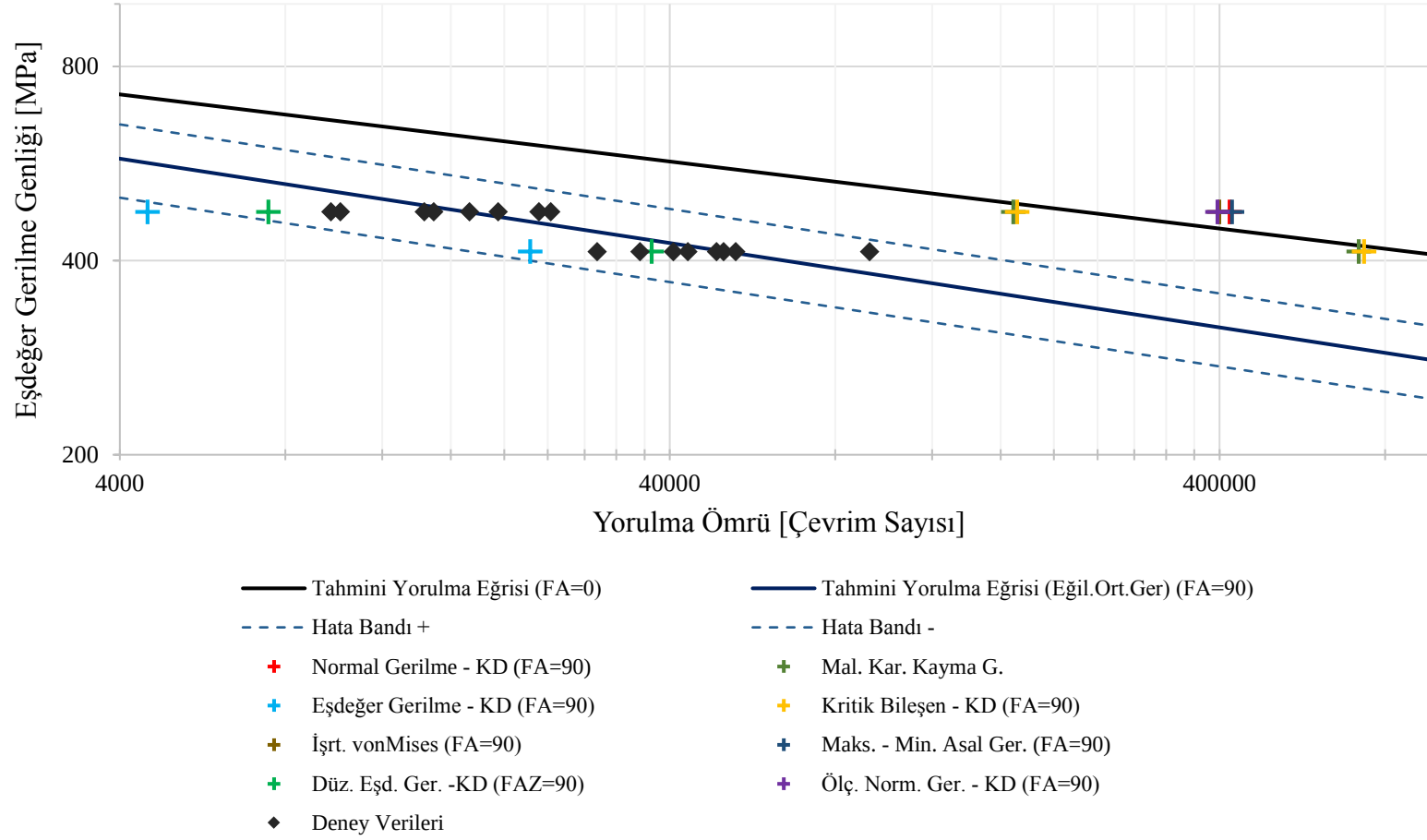
Çizelge 4.12 : Sim07 kodlu analiz sonuçlarının hata oranları (%).

Deney Noktası	Deney Verileri	Normal Gerilme	Mal. Kar.Kay. Ger.	Eşdeğer Gerilme	Kritik Bileşen	İşrt. vonMises	Max - Min. Asal Ger.	Düz. Eşd. Ger.	Ölç. Norm. Ger.
1	Eş.Ger. 476 Ort.Ömür 16647	2407	912	73	929	2298	2432	55	2283
2	Eş.Ger. 413 Ort.Ömür 49053	6186	1360	55	1394	5908	6182	24	5820

Yine literatürde de anlatıldığı ve çalışma süresince beklenildiği gibi yükler arasındaki faz farkının mevcudiyeti ortalama ömrü düşürmüştür. Bu senaryoda, hata oranları oldukça yüksek olarak gözükmemektedir. Çözüm olarak kullanılabilecek tek yöntemin kritik düzlemde düzenlenmiş eşdeğer gerilme yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Sim07’nin ortalama gerilme etkisi hariç olan benzer deneyi olan Sim05 sonuçlarına bakıldığında bu yöntemin yine iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yaklaşım bir önceki başlıkta açıklandığı gibi, eşdeğer gerilme hesaplanırken normal ve kayma gerilme büyüklükleri arasındaki oranı bir faktör olarak kullanmaktadır. Faz farkının 90° olduğu durumlarda kritik düzlem yaklaşımıyla birlikte düzenlenmiş eşdeğer gerilme yaklaşımını kullanmak, yük uygulandığı süre boyunca hasar etkilerini en doğru şekilde hesaplanmasını sağlayacaktır.

Özetle, birbirinden farklı senaryosu bulunan 6 farklı deney grubu verileri incelenmiş, test senaryolarının simülasyonları bilgisayar ortamında tamamlanmış ve her bir durum için elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Daha genel yorumlar bir sonraki başlıkta verilecektir.

Çok Eksenli Yorulmada Test ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Sim07 - Faz Açısı:90



Şekil 4.9 : Sim07 kodlu deney için karşılaştırmalı analiz sonuçları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mühendislik problemlerinde sıklıkla karşılaşılan çok eksenli yorulma durumlarında ömür kestirim yöntemleri hakkında araştırmalar yapılmış, literatürdeki farklı yaklaşımlar incelenmiş, yine literatürde yapılan deney çalışmaları toplanarak aynı senaryolar bilgisayar ortamında modellenmiş ve sonuçlar analiz edilerek mevcut şartlarda daha avantajlı olan yaklaşım modelleri tespit edilmiştir. Deney grubu seçilirken özellikle farklı faz açılarıyla yükleme yapılan senaryoların olmasına dikkat edilmiş ve faz farkının ömür sonuçlarına olan olumsuz etkisi analiz yöntemleriyle de doğrulanmıştır.

5.1 Genel Yorumlar

Çok eksenli yorulma durumlarında literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş ve birbirlerinden farklı ve her yükleme senaryosu için kullanılamayan yöntemler olduğu görülmüştür. Bu yöntemler genel olarak birim uzama tabanlı, gerilme tabanlı ya da enerji yaklaşımını içeren yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Teorik yaklaşımların yanı sıra mühendislik uygulamaları sırasında çalışmaların doğruluğunu artıracak plastisite yaklaşımları ve rastgele yüklere maruz kalan yapıların yorulma ömrünün hesaplanmasını mümkün kılan Rainflow ve Miner yöntemlerinden de bu çalışma kapsamında bahsedilmiştir. Literatür özetinden genel olarak anlaşılabileceği üzere birim şekil değiştirme tabanlı ömür kestirim yaklaşımlarının özellikle de düşük çevrim sayılı yorulma durumlarında daha başarılı sonuçlar verdiği bilinmektedir.

Bu çalışma kapsamında, literatürde bulunan eğilme ve burulma kombinasyonu ile gerçekleştirilen ve çevrim sayıları büyük çoğunlukta 10000 çevrimin üzerinde, yani yüksek çevrimli yorulma durumunda olduğu kabul edilebilir olan bir deneyin verileri bilgisayar ortamında Solidworks, Hypermesh, ABAQUS ve FEMFAT yazılımları yardımıyla modellenmiştir. Analiz sonuçları FEMFAT içerisindeki genellikle gerilme tabanlı yorulma ömrü yaklaşımları arasında kıyaslamalar yaparak yorumlanmıştır. Buradan elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir:

- 1- Literatürde bahsedildiği gibi çok eksenli yorulma durumunda yapının ömrü, yükler arasındaki faz farkıyla veya ortalama gerilme etkisinin mevcudiyetiyle azalmaktadır. Bu durum deneylerde gözlemlenmiş ve analiz sonuçlarıyla da tespit edilmiştir.
- 2- Senkron yüklemelerde iyi sonuç veren kritik düzlemde normal gerilme ve asal gerilme tabanlı ömür hesaplama yaklaşımlarındaki hata oranı asenkron yüklemeye senaryolarında yükselmiş ve yorulma ömrü tahmini açısından başarısız olmuştur. Bunun en önemli sebebi, kritik düzlem yaklaşımının uygulanırken seçilen eşdeğer gerilme hesaplarındaki düzeltmelere ihtiyaç duyulması ve kritik düzlemin ve yorulma ömrü tespiti için kritik nokta tespitinin yöntemlerde farklılıklar göstermesidir.
- 3- Sonuçlara genel olarak bakıldığında asenkron yüklemeye durumlarında mümkün olan en yakın sonuçları veren yaklaşım kritik düzlemde kritik bileşen yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın en büyük avantajı, tüm yük anlarında olası tüm kritik düzlemlerde olası tüm yük kombinasyonlarını değerlendirerek yorulma ömrünü hesaplamasıdır. Bu sebeple de çözüm süresi dezavantajı ortaya çıkmaktadır.
- 4- Asenkron yüklemelerde en düşük yorulma ömrü ortalaması faz farkının 60° olduğu deney grubunda gözlemlenmiştir.
- 5- Tüm grafiklere bakılırsa çoğunlukla en emniyetli sonuçları veren yöntem kritik düzlemde eşdeğer gerilme yöntemidir.

Bu tez çalışması sayesinde, günlük hayatta karşılan mühendislik problemlerinde çok eksenli yorulma durumlarında farklı senaryolar için hangi yaklaşımların kullanılabilir olduğu, bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları, bulunan sonuçların doğruluk derecelerinin tespiti açısından önemli sonuçlar elde edilmiştir.

5.2 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla birlikte, çok eksenli yorulma durumunda probleme nasıl yaklaşılması gerektiği ve elde edilecek sonuçların doğruluğuyla ilgili bazı yorumlar ortaya konmuştur. Ancak bu çalışma yapılırken elde edilen sonuçların ve çıkarımların sınırlı veriler üzerinden yapıldığı unutulmamalıdır.

Çalışma kapsamını genişletebilmek ve daha detaylı çıkarımlarda bulunabilmek adına, bu çalışmada takip edilene benzer adımlar uygulanarak daha farklı yük senaryolarında elde edilen sonuçlar incelenebilir. Farklı yük senaryolarına örnek vermek gerekirse, senkron ve asenkron yükleme durumlarında normal ve kayma gerilmelerinin birbirlerine oranı ve yorulma ömrü arasındaki bir ilişki olup olmadığı incelenebilir. Ek olarak, yüklerin sinüs eğrisi şeklinde değil de başka formlarda tanımlanmasıyla yorulma ömrü arasında bir ilişki varsa, her bir farklı durumda öne çıkan çözüm yaklaşımının hangisi olduğu tespit edilebilir. Ancak, bunların hepsinin doğru yorumlanabilmesi için oluşturulan her yük senaryosunun aynı zamanda test edilmesi de gerekmektedir. Yine çalışma kapsamını büyütecek bir başka geliştirme alanı ise yüklerin tamamen rastgele ve değişken genlikli olduğu yük durumlarıdır.

Daha önce de belirtildiği üzere deneylerdeki verilerin büyük bir çoğunluğunun yüksek çevrimli yorulma sınırları içerisinde olması, hesaplarını tamamen gerilme tabanlı yaklaşımlarla yapan FEMFAT yazılımının kullanılması açısından bir sakınca doğurmamaktadır.

Literatürde ağırlıklı ön plana çıkan birim uzama tabanlı yaklaşımların ve yerel plastisite etkilerinin de detaylı incelenebilmesi için düşük çevrimli yorulma bölgesinde, birim şekil değiştirme tabanlı yaklaşımların yazılımlaştırılmasıyla çalışma kapsamı genişletilebilir.

Son olarak yorulma durumunun malzeme odaklı gerçekleştiği düşünülürse, tüm olası geliştirme fikirlerine ek olarak, aynı çalışmalar farklı malzemeler ile yürütülerek çok eksenli yorulma durumunda muhtemel malzemelerin farklı yük senaryolarında birbirlerine göre avantajları ve olası tüm durumlara en uygun çözüm yöntemi de tespit edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Pereira, M.V.S., Darwish, F.A., Feiferis, A., Castro, T.L.** (2019). Multiaxial fatigue criteria applied to motor crankshaft in thermoelectric power plants. MATEC Web Conf. 300 04003. doi: 10.1051/mateconf/201930004003
- [2] **Fatemi, A. & Socie, D.F.** (1988). A Critical Plane Approach To Multiaxial Fatigue Damage Including Out-Of-Phase Loading. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 11:149-165. doi: 10.1111/j.1460-2695.1988.tb01169.x
- [3] **Chen, H., Shang, D.G., Liu, E.T.** (2011). Multiaxial fatigue life prediction method based on path-dependent cycle counting under tension/torsion random loading. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 34. doi: 10.1111/j.1460-2695.2011.01572.x
- [4] **Kalluri, S. & Bonacuse, P.** (1991). In-phase and out-of-phase axial-torsional fatigue behavior of Haynes 188 at 760 C. Adv. Multiaxial Fatigue, ASTM STP. 1191. doi: 10.1520/STP24800S.
- [5] **Bannantine, J. A. and Socie, D. F.** (1992). A Multiaxial Fatigue Life Estimation Technique. Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques, ASTM STP 1122, M. R. Mitchell and R. W. Landgraf, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 249-275.
- [6] **Kanazawa, K., Miller, K. J., and Brown, M. W.** (1977). Low-Cycle Fatigue Under Out-of-Phase Loading Conditions. ASME. J. Eng. Mater. Technol. July 1977; 99(3): 222–228. doi: 10.1115/1.3443523
- [7] **Fatemi, A., and Kurath, P.** (1988). Multiaxial Fatigue Life Predictions Under the Influence of Mean-Stresses. ASME. J. Eng. Mater. Technol. October 1988; 110(4): 380–388. doi: 10.1115/1.3226066
- [8] **Papuga, J. & Ružička, M.** (2008). Two new multiaxial criteria for high cycle fatigue computation. International Journal of Fatigue - INT J FATIGUE. 30. 58-66. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.02.015.
- [9] **Papuga, J.** (2011). A survey on evaluating the fatigue limit under multiaxial loading. International Journal of Fatigue - INT J FATIGUE. 33. 153-165. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2010.08.001.
- [10] **Wang, C. H., and Brown, M. W.** (1996). Life Prediction Techniques for Variable Amplitude Multiaxial Fatigue—Part 1: Theories. ASME. J. Eng. Mater. Technol. July 1996; 118(3): 367–370. doi: 10.1115/1.2806821
- [11] **Liu, J., & Zenner, H.** (1993). Berechnung der Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung — Teil 1. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 24, 240-249.

- [12] **Li, B., Santos, J.L.T., Freitas, M.D.** (2001). A computerized procedure for long-life fatigue assessment under complex multiaxial loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24: 165-177. doi: 10.1046/j.1460-2695.2001.00389.x
- [13] **Lu, C., Melendez J., Martínez- Esnaola J. M.** (2018). A universally applicable multiaxial fatigue criterion in 2D cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 2018, 110: 95-104.
- [14] **Lu, C., & Melendez, J., Martínez-Esnaola, J. M.** (2018). Multiaxial fatigue criterion considering the influence of out-of-phase failure and loading condition. *International Journal of Fatigue*. 114. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.006.
- [15] **Brown M.W., Miller K.J.** (1973). A Theory for Fatigue Failure under Multiaxial Stress-Strain Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1973;187(1):745-755.
- [16] **Socie, D.** (1987). Multiaxial Fatigue Damage Models. *ASME. J. Eng. Mater. Technol.* October 1987; 109(4): 293–298. doi: 10.1115/1.3225980
- [17] **Wang, C. & Brown, M.** (1996). Life Prediction Techniques for Variable Amplitude Multiaxial Fatigue—Part 2: Comparison With Experimental Results. *Journal of Engineering Materials and Technology-transactions of The Asme - J ENG MATER TECHNOL*. 118. 371-374. doi: 10.1115/1.2806822.
- [18] **Smith, K.N., Topper, T. & Watson, P.** (1970). A stress–strain function for the fatigue of metals. *J Materials*. 5. 767-778.
- [19] **Findley, W. N.** (1953). Combined Stress Fatigue Strength of 76S-T61 with Superimposed Mean Stresses and Corrections for Yielding. Technical Note 2924, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [20] **Socie, D. F., & Shield, T. W.** (1984). Mean Stress Effects in Biaxial Fatigue of Inconel 718. *ASME. J. Eng. Mater. Technol.* July 1984; 106(3): 227–232. doi: 10.1115/1.3225707
- [21] **Lazzarin, P. & Susmel, L.** (2003). A stress-based method to predict lifetime under multiaxial fatigue loadings. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26: 1171-1187. doi: 10.1046/j.1460-2695.2003.00723.x
- [22] **Socie D.F. & Marquis G.B.** (2000). *Multiaxial Fatigue*.
- [23] **Halama, R., Sedlak, J., Sofer, M.** (2012). Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity. doi: 10.5772/35902.
- [24] **Dahlberg M.,& Segle, P.** (2010). Evaluation of models for cyclic plastic deformation. (Rapor No: 2010:45) İsveç: Swedish Radiation Safety Authority
- [25] **Zhan Z., Wang J., Chen X.** (2012). Study on the Evaluation of Material Parameters in the Basic Chaboche Model for a Nimonic Alloy 75. *International Conference on Future Information Technology and Management Science & Engineering Lecture Notes in Information Technology*, Vol.14

- [26] **Tong, J., Zhan, Z.-L., Vermeulen, B.** (2004). Modelling of cyclic plasticity and viscoplasticity of a nickel-based alloy using Chaboche constitutive equations. *International Journal of Fatigue*. 26. 829-837. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.01.002.
- [27] **Jiang, Y. & Sehitoglu, H.** (1996). Modeling of Cyclic Ratchetting Plasticity, Part I: Development of Constitutive Relations. *Journal of Applied Mechanics*. 63. doi: 10.1115/1.2823355.
- [28] **Jiang, Y. & Sehitoglu, H.** (1996). Modeling of Cyclic Ratchetting Plasticity, Part II: Comparison of Model Simulations With Experiments. *Journal of Applied Mechanics-transactions of The Asme - J APPL MECH*. 63. doi: 10.1115/1.2823356.
- [29] **Glinka, G.** (2010). The Local Stress-Strain Fatigue Method. [Powerpoint sunumu].
- [30] **Glinka, G.** (1985). A notch stress-strain analysis approach to fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics - ENG FRACTURE MECH*. 21. 245-261. doi: 10.1016/0013-7944(85)90014-1.
- [31] **Wang, Y. & Susmel, L.** (2015). The Modified Manson-Coffin Curve Method to estimate fatigue lifetime under complex constant and variable amplitude multiaxial fatigue loading. *International Journal of Fatigue* (2015), doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.10.005
- [32] **Wang, Y. & Susmel, L.** (2015). Critical plane approach to multiaxial variable amplitude fatigue loading. *Frattura ed Integrita Strutturale*. 9. 345-356. doi: 10.3221/IGF-ESIS.33.38.
- [33] **Url-1** <https://efatigue-dev.altair.mediag.com/glossary/?word=neubers_rule> erişim tarihi 05.12.2022.
- [34] **Url-2** <<https://www.pragtic.com/PragTicHelp/files/%7BB9F34587-25D4-49A8-BC57-459EFAB0E190%7D.htm>> erişim tarihi 05.12.2022.
- [35] **Shinde, V., Jha, J., Tewari, A., Miashra, S.** (2018). Modified Rainflow Counting Algorithm for Fatigue Life Calculation. doi:10.1007/978-981-10-6002-1_30.
- [36] **Ekberg, A.** (n.d). *Palmgren–Miners’ Rule* [Powerpoint sunumu]. Şuradan alındı <http://www.am.chalmers.se/~anek/teaching/fatfract/98-4.pdf>
- [37] **Simbürger, A.** (1975). *Festigkeitsverhalten zäher Werkstoffe bei einer mehrachsigen phaseverschobenen Schwingbeanspruchung mit körperfesten und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen*. [Doktora Tezi], Darmstadt Teknik Üniversitesi, Darmstadt.
- [38] **Benasciutti, D.** (2004). *Fatigue analysis of random loadings*. [Doktora Tezi], Ferrara Üniversitesi, Ferrara.
- [39] **Zhou, J., Huang H.Z., and Li, H.** (2018). A Novel Energy-Critical Multiaxial Fatigue Life Prediction for Low Cycle Fatigue under Mixed-Mode Loading. *Metals* 8, no. 12: 1066. <https://doi.org/10.3390/met8121066>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Burak Uğur BULCA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017- Halen AVL Türkiye, Analiz Mühendisi