T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ SIVI KRİSTAL EKRAN CAMLARININ YORULMA ÇATLAĞI YAKLAŞIMINA GÖRE ÖMÜR ANALİZİ

Serkan İDRİZ

Danışman
Doç. Dr. M.M.Fatih KARAHAN

MANİSA–2022

SERKAN İDRİZ	**DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ SIVI KRİSTAL EKRAN CAMLARININ YORULMA ÇATLAĞI YAKLAŞIMINA GÖRE ÖMÜR ANALİZİ**	**2022**

TEZ ONAYI

Serkan İDRİZ tarafından hazırlanan **" DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ SIVI KRİSTAL EKRAN CAMLARININ YORULMA ÇATLAĞI YAKLAŞIMINA GÖRE ÖMÜR ANALİZİ"** adlı tez çalışması 13.04.2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak savunulmuş ve **oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. M.M. Fatih KARAHAN Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç Dr. B. Burak ÖZHAN Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Engin YILDIRIM Karabük Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik / Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Serkan İDRİZ

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ II
ŞEKİLLER DİZİNİ III
TABLO DİZİNİ V
TEŞEKKÜR VI
ÖZET VII
ABSTRACT VIII
BÖLÜM 1 1
1. GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 4
BÖLÜM 2 7
2.1 LCD (Liquid Crystal Display) 7
2.2 Yorulma Çatlağı 9
2.2.1 Yorulma çatlağının büyümesi 11
2.3 İvme – Gerilme Dönüşüm Hesabı 14
2.4 Asal Gerilmelerin Hesaplanması 16
2.5 Paris-Erdoğan Denklemi ile Ömür Analizi 18
BÖLÜM 3 22
3.1Deneysel Çalışma 22
3.1.1Deney Düzeneği 23
3.1.2 Deneysel Verilerin Elde Edilişi 25
3.2 Analitik Yöntem 29
3.3 Sayısal Analiz 33
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 37
KAYNAKLAR 39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	Çatlak uzunluğu
c	Malzeme sabiti
d	Tane Boyutu
EPS	Expanded Polystyren Foam (Polistiren Köpük)
F	Yüzeye Uygulanan Kuvvet
HB	Brinnel sertlik değeri
k	Malzeme Sabiti
L	Çizik Boyu
LCD	Liquid Crystal Display
m	Malzeme sabiti
N	Çevrim sayısı
R	Gerilme Oranı
V	Başlangıç hızı
σa	Akma Dayanımı
$\boldsymbol{\sigma_g}$	Gerilme Genliği
σi	Malzeme Sabiti
$\boldsymbol{\sigma_o}$	Ortalama Gerilme
Δ	Statik yer değiştirme miktarı
ΔK	Dinamik gerilme şiddet faktörü
Ψ	Dinamik yer değiştirme miktarı
V´	Aşınan Malzeme Miktarı
Δσ	Gerilme değişimi
Q	Şekil Doğrultma Faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 LCD Segmentleri 1
Şekil 2.1 LCD sistem elemanları; 1. Arka Panel, 2. Polarizasyon Filtresi, 3. ITO Kaplamalı Cam, 4. Sıvı Kristal, 5. ITO Elektrodlu Cam, 6. Polarizasyon Filtresi .. 7
Şekil 2.2 LCD çalışma prensibi 7
Şekil 2.3 LCD üzerindeki elektrodlar 8
Şekil 2.4 Dislokasyonlar ve Plastik şekil değiştirimi 9
Şekil 2.5 Plastik şekil değiştirme 10
Şekil 2.6 Malzeme yüzeyindeki girinti (intrüzyon) ve çıkıntılar (ekstrizyon) 11
Şekil 2.7 Kupon testi, malzemelerin Wöhler eğrisini oluşturmak için kullanılır... 11
Şekil 2.8 Bir malzeme için Wöhler eğrisi: Yüksek genlikteki gerilme seviyelerinin sonucu olarak düşük çevrim sayıları ile hasar oluşmaktadır. 12
Şekil 2.9 Wöhler eğrisinde Çekme Dayanımı, Akma Dayanımı ve Yorulma Sınırı 12
Şekil 2.10 Akma ve Çekme Dayanımı statik gerilme-gerinim testinden belirlenebilir. 13
Şekil 2.11 Kuvvet-İvme denkliği 14
Şekil 2.12 Kuvvet-İvme denkliğinin başlangıç durumu koşulları 15
Şekil 2.13 Kuvvet-İvme denkliğinin x mesafesindeki koşulları 15
Şekil 2.14 İvme-Gerilim Dönüşümü 16
Şekil 2.15 Yorulma girdileri 19
Şekil 2.16 Çevrimsel yüke maruz kalan bir LCD 20
Şekil 2.17 ΔK – dA/dN grafiği 21
Şekil 3.1 Mikroskop altında incelenen LCD'ye ait çatlak 22
Şekil 3.2 MSR175 İvmemetre 23
Şekil 3.3 Uygulamada kullanılan kombi cihazı 24
Şekil 3.4 Uygulamada kullanılan ivmemetrenin cihaz içerisindeki konumu 24
Şekil 3.5 Cihaza ait paketleme koşulları 25
Şekil 3.6 veri filtreleme grafiği 26
Şekil 3.7 1. Anlık zaman için ivme zaman grafiği 27
Şekil 3.8 2. Anlık zaman için ivme zaman grafiği 27
Şekil 3.9 3. Anlık zaman için ivme zaman grafiği 28
Şekil 3.10 4. Anlık zaman için ivme zaman grafiği 28
Şekil 3.11 Çatlağın koordinat sistemi üzerindeki yeri 29
Şekil 3.12 3 Boyutlu LCD modeli 33

Şekil 3.13 Ansys Smart Crack Growth – Paris Denklemi 34
Şekil 3.14 Sinyal 1 Ansys simülasyon sonucu 34
Şekil 3.15 Sinyal 2 Ansys simülasyon sonucu 35
Şekil 3.16 Sinyal 3 Ansys simülasyon sonucu 35
Şekil 3.17 Sinyal 4 Ansys simülasyon sonucu 35

TABLO DİZİNİ

Tablo 1. İvmemetre ölçüm sonuçları ……..29
Tablo 2. 3 eksenli gerilme değerleri …….…….30
Tablo 3. 3 eksenli I sabitleri…… …….…….33
Tablo 4. 3 eksenli asal gerilme değerleri ..…….33
Tablo 5. ITO camın mekanik özellikleri…….34
Tablo 6. ANSYS ve analitik hesap kıyaslaması…….37
Tablo 7. ITO ve IZO Cam kıyaslaması …….…….38

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın **Doç. Dr. M.M.Fatih KARAHAN**'a, çalışmakta olduğum şirket olan BOSCH TERMOTEKNİK LTD. ŞTİ. deki tüm değerli çalışma arkadaşlarıma ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Serkan İDRİZ
Manisa, 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Doç. Dr. M.M.Fatih KARAHAN

Günümüz teknolojik ürünlerinin çalışma koşulları incelendiğinde sistem elemanlarının ömrünü etkileyen titreşimler birçok araştırma ve makalenin konusu olmuştur. Her ne kadar tasarımda kullanılan titreşim sönümleyiciler gelen titreşimlerin frekanslarını belirli miktarda azaltarak ürün ömrünü arttırmayı hedeflese de, sistem elemanlarına doğrusal (lineer) olarak etkiyen titreşimler belirli bir çevrimden sonra malzemede yorulmaya bağlı olarak kırılmayı da beraberinde getirmektedir.

Bu çalışma kapsamında kombilerde kullanılmakta olan, cihaz ile son kullanıcı arasındaki iletişimi sağlayan LCD'nin dinamik yükler altındaki ömür hesabı yapılmıştır. Yapılan hesaplamada LCD'ye etkiyen titreşimlerin ortam şartlarına göre belirlenmesi, çalışmanın gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple, sistem elemanının dinamik davranışını belirlemek için kombi cihazının nakliyesi esnasında maruz kaldığı titreşimler deneysel olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, mikroskop altında saptanan başlangıç çatlağının boyutu da belirlenmiştir.

Bulunan deneysel veriler ile ivme-gerilme dönüşüm denklemleri elde edilip başlangıç çatlağı bulunan malzemenin kaçıncı çevrim sonrasında plastik deformasyona maruz kalacağı analitik olarak hesaplanmıştır.

Sistemin sayısal olarak simulasyonu yapılıp bulunan değerler analitik veriler ile teyit edildikten sonra alternatif bir cam ile sayısal simulasyonlar tekrarlanarak aynı dinamik yükler altında sistem elemanının plastik deformasyona kaçıncı çevrimde ulaştığı bulunmuştur. Önerilen alternatif malzemenin ürün nakliye koşullarında ne kadar iyileştirme sağladığı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler:LCD, çatlak büyümesi, ivme-gerilme dönüşümü, Paris-Erdoğan denklemi, ömür analizi

2022, 54 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Serkan İDRİZ

Celal Bayar University
Faculty of Engineering/Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. M.M. Fatih KARAHAN

When the operating conditions of today's technological products are examined, vibration effects on the lifecycle of system elements have been the subject of many research and articles. Although the vibration dampers are used in many designs for increasing the product lifecycle by reducing the frequencies of the incoming vibrations by a certain amount, the vibrations acting on the system elements linearly bring about the breaking due to fatigue in the material after a certain cycle.

Within the scope of this study, the lifetime calculation of the LCD, which is used in combi boilers and provides communication between the device and the end user, has been made under dynamic loads. Determining the vibration affects on LCD according to the ambient conditions in the calculation is very important for giving more realistic results. Therefore, to determine the dynamic behavior of the system element, the vibrations that occur during transport have been recorded experimentally. However, the length of the initial crack detected under the microscope was also determined.

With the experimental data obtained, the acceleration-stress transformation equations were obtained, and lifecycle was calculated analytically to see the lifecycle of the material till plastic deformation.

After the numerical simulation of the system was made and the values found were confirmed with analytical data, numerical simulations were repeated with an alternative glass, and it was found in which cycle the system element reached plastic deformation under the same dynamic loads. It has been revealed how much improvement was achieved with alternative materials with existing product transport conditions.

Keywords: LCD, segment, crack propagation, acceleration-strain restructuring, Paris-Erdoğan equation, lifetime analysis

2022, 54 pages

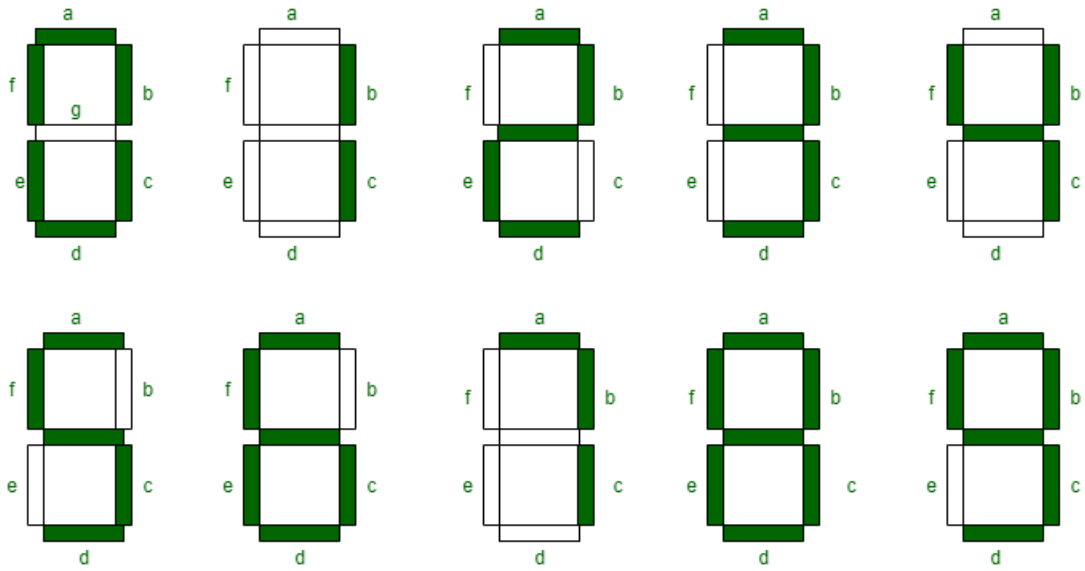
BÖLÜM 1

Bu bölümde tez çalışması kapsamında analiz edilecek çalışmaların neler olduğu, çalışma ile ilgili literatürde yapılmış araştırmaların neler olduğu aktarılmıştır.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinde, ürün ve son kullanıcı arasında iletişimi sağlayan temel araçlardan birisi de LCD'lerdir. Kullanıcı tarafından cihaza ait çalışma koşulları, bakım ayarları ve cihazda meydana gelen hatalar bu ekran üzerinden yansıtılmaktadır. Bu parça sektörde birçok farklı amaç ile kullanılırken kombi cihazlarında ise veri aktarımı sayesinde bir iletişim aracı olarak kullanılmaktadır.

Cihaza ait verilerin rakam veya metin ile gösterilmesini sağlayan LCD'ler, bu bilgileri iç katmanlarında bulunan segmentler ile ekrana yansıtmaktadırlar.



Şekil 1.1 LCD Segmentleri

LCD üzerinde Şekil 1.1' de gösterildiği gibi rakamları veya metinleri oluşturabilmek için 7 farklı segment bulunmaktadır ve gelen akım hangi segment üzerindeyse segment içinde bulunan sıvı kristaller polarize olarak ışık geçirgenliğini aktif hale getirmektedir. Bu segmentler üzerinde meydana gelen hasarlar sonucu yanmama / çalışmama gibi hatalar oluşabilmektedir ve bu hata modu eksik segment olarak adlandırılmaktadır. Bu rakam veya metin olarak gösterilen hatalar, cihaza

yapılacak müdahalelerin yanlış olması ile sonuçlanmasına sebebiyet verebilmektedir. Çünkü, cihaz üzerindeki hatalar belirli rakamlar ve harfler ile ifade edilmektedir. Kombi cihazı üzerindeki sistem elemanlarından olan pompa, fan vb. bileşenlerdeki hatalar algoritma tarafından algılanarak LCD üzerinden kullanıcıya bildirilmektedir. Bu hata kodları, segmentlerden bir tanesinin çalışmamasından kaynaklı yanlış okunabilir veya hiç okunamayarak cihaza müdahalenin doğru bir şekilde ve zamanında yapılmasını geciktirebilir. Bu durum önemli bir kalite problemi olarak ortaya çıkabilecek ve farklı hataların tetiklenmesine sebebiyet verebilecektir.

Tekrarlı yüklere maruz kalan bir LCD'nin kırılması öncelikli olarak mikro çatlaklar şeklinde başlayıp ardından makro çatlaklara dönüşerek yayılmaya başlar ve kalıcı deformasyonu meydana getirir. Bu mikron seviyesindeki başlangıç çatlakları ise genellikle üretim hatalarından (çentikler, dislokasyonlar, yüzey pürüzlülükleri) kaynaklanmaktadır.

Tekrarlı yükler etkisiyle LCD üzerinde oluşacak gerilmelerin her biri farklı hasarlara sebebiyet vermektedir. Gerilme değerlerinin tekrarlı bir frekans ile sistem elemanı üzerine uygulandığı kabul edildiği takdirde genlik büyüdükçe uygulanan gerilmenin şiddeti de büyüyecektir. Hasar, kırılmaya sebebiyet veren tüm bu dinamik yüklerin birikmesinden kaynaklı olduğundan bu sistemsel etkileşime "kümülatif veya birikmiş hasarlardan kaynaklı yorulma" denilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, mikron seviyesinde başlangıç çatlakları olan kombi cihazına ait LCD'lerin dinamik yükler altındaki ömür hesabı incelenmiştir. LCD'nin cihaza monte edilmesinin ardından nakliye esnasında maruz kaldığı tekrarlı dinamik yüklerin tespit edilebilmesi için LCD'ye yakın bir noktaya titreşim dönüştürücü (transducer) yerleştirilerek sistemin ivme genlik değerleri elde edilmiştir.

Bulunan deneysel veriler ile ivme-gerilme dönüşüm denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemlerden LCD üzerindeki başlangıç çatlağının ucundaki gerilme değerleri bulunmuştur. LCD'nin maruz kaldığı bu gerilmeler altında yorulması, çevrim başına LCD üzerindeki çatlağın büyüme oranı bulunarak hesaplanmıştır. Bu çatlak büyüme oranı çatlak ucundaki dinamik gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak ifade edilip cam üzerindeki bu çatlağın büyümesi tanımlanmış ve camın yorulma ömrü hesaplanmıştır. Dinamik şartlar altındaki bu çatlağın büyümesini inceleyebilmek için ise Paris-Erdoğan denklemi kullanılmıştır [7].

P.C. Paris tarafından 1961’ de çatlak büyüme hızının gerilme şiddetine bağlı olabileceği yönünde başlatılan bu çalışma 1963 yılında F. Erdoğan’ın katkılarıyla detaylandırarak ilgili çalışma literatüre kazandırılmış ve bir çok sayısal analiz programının hesaplama prensiplerinde de kullanılmaktadır.

Deneysel olarak bulunan ivme değerleri kullanılarak Ansys ticari yazılımı ile sayısal benzetimler gerçekleştirilmiş ve çatlak ucuna etkiyen gerilme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme değerleri analitik veriler ile teyit edildikten sonra alternatif bir cam ile sayısal simulasyonlar tekrarlanarak aynı dinamik yükler altında sistem elemanının plastik deformasyona kaçıncı çevrimde ulaştığı bulunmuştur. Önerilen alternatif malzemenin ürün nakliye koşullarında ne kadar iyileştirme sağladığı ortaya konmuştur.

Yapılan ömür hesabından sonra, başlangıç çatlağının oluşmasını tetikleyen girdiler analiz edilerek hem cam yüzeyin üzerindeki başlangıç çatlağının oluşmasını önleyecek hem de aynı tekrarlı yükler altında malzemenin yorulma ömrünü arttıracak alternatif çözüm önerileri belirlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında Bölüm 2’de LCD’lerin hangi tasarım elemanlarından oluştuğu ve çalışma koşullarının neler olduğu detaylandırılarak anlatılmıştır. Ardından yorulmanın tanımı yapılarak, başlangıç çatlağının malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak dinamik yükler altında nasıl büyüdüğü ifade edilmiştir. Çatlak büyümesinin sistem elemanına etkiyen yüklerin çevrim sayısı ile ilişkisi kurularak, deneysel olarak elde edilen değerlerin ivme-gerilme dönüşüm hesaplamaları verilmiştir. Sistem elemanına etkiyen bu gerilmelerden kaynaklanan plastik deformasyonun kaçıncı çevrim sonrasında oluşacağını hesaplayabilmek için Paris-Erdoğan denkleminin nasıl kullanılacağı aktarılmıştır.

Bölüm 3’te teorik olarak ifade edilen bilgilerin deneysel olarak nasıl elde edildiği ve sayısal analizlerinin nasıl gerçekleştirildiği konusunda detaylı bilgiler verilmiş ve sayısal sonuç ile analitik sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur.

Bölüm 4’te analitik çalışmalar, önerilen alternatif cam malzemesi için de yeniden yapılmış ve mevcut tekrarlı yükler altında malzemenin ömründeki iyileştirme miktarı ortaya konulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Malzemelerde oluşan yorulma hasarlarının önceden belirlenebilmesi, yorulma kırılmalarını önleyebilmek için önem arz etmektedir. Yorulma kapsamındaki en kritik nokta ise dinamik yüklere maruz kalan malzemelerin gösterdikleri birikimli hasarlardır.

Literatürde yorulma analizi ile ilgili bir çok çalışma mevcuttur. Yorulma analizleri, mukavemet ve malzeme bilimi kapsamında detaylı incelendiği için bir çok araştırmacı teorik ve deneysel olarak bu alanda çalışmalar yapmıştır. Titreşim analizi; gerilme, gerinim ve kırılma mekaniği bu incelemelerin yapıldığı alanlardandır. Gerinim yaklaşımı, yorulmanın çevrim sayılarını karakterize etmekte olup, 10^5 çevrim ve bundan küçük çevrimleri kapsar. Gerilme ise parçanın toplam ömrü ile ilgilenir ve çatlak başlangıcı ya da çatlak ilerleyişini kapsamaz. Gerilme, literatürde High Cycle Fatigue (HCF) olarak bilinmektedir ve 10^5çevrim ve üzeri çevrimleri kapsar. Kırılma mekaniği ise, boyutu bilinen bir başlangıç çatlağını ve çatlağın ilerlemesini incelemektedir.

Çatlak ömrü, malzeme üzerindeki en büyük (maksimum) ve en küçük (minimum) gerilme çevrimlerine göre ikiye ayrılmaktadır. Sabit bir frekansta ise sabit genlikli yükleme aksi durumda ise değişken genlikli yükleme denmektedir. Pierron ve Fletcher (2019), dikdörtgen bir parçaya etki eden değişken yüklerin etkisi ile oluşacak ivme değerlerinden çok eksenli yükler için gerilmenin nasıl bulunacağını hesaplamışlardır. Bulunan bu gerilme analiz yöntemi ile ani yüklemelere maruz kalan malzemenin anlık olarak malzemenin mekanik özellikleri de göz önünde bulundurularak parça üzerindeki herhangi bir noktada meydana gelen gerilmeleri analiz edilebilmektedirler.

Değişken genlikli rastgele sıralanmış yükleme modelleri karışık fonksiyonlar olarak adlandırılmaktadır. Bu yüzden bazı durumlarda açıklanabilir model kullanılarak analitik fonksiyonlarla ortaya konulamazlar. Bundan dolayı yorulma analiz edilirken kırılma hesabına genellikle hasar birikimi teorisi de dahil edilmektedir [4].

Mekanik sistemler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar; sistem elemanının ömrünün, değişken gerilmenin genliğine bağlı olduğunu göstermiştir. Tahralı ve Saatçi (2003), yükün ve gerilmenin genliği ne kadar büyükse malzeme ömrünün de o kadar kısa olduğunu ve büyük gerilme genliklerinde yorulma ömrünün büyük bir kısmının çatlağın yayılması için harcandığını göstermişlerdir. Çentik içeren bir parçada ise bu oran daha da büyük olmaktadır. Gerilme genliği giderek küçülürse, elemanın kırılıncaya kadar dayanabileceği yük tekrar sayısının da arttığı gösterilmiştir.

Pegoretti ve Ricco (2002), benzer bir yorumu gerilme şiddeti üzerinden göstermiştir. Ortalama gerilme değeri arttıkça yorulma sınır değeri azalmaktadır. Diğer bir değişle aynı gerilme genliği için ortalama gerilme değeri arttıkça yorulma ömrü azalmakta, ortalama gerilme değeri azaldıkça yorulma ömrü de artmaktadır.

Literatürde yorulma kırılmalarıyla ilgili "gerilme-ömür" bağıntıları "Wöhler" eğrileri kullanılarak açıklanabilmektedir. Wöhler diyagramında düşey eksen değişken logaritmik gerilmeyi, yatay eksen ise logaritmik ölçekli hazırlanmış tekrarlı yük sayısını göstermekdir.

Önal ve Avcı (2009), yüzey çatlaklarının derinliğine ve şiddetine bağlı olarak farklı deneysel çalışmalarla çevrim sayısına bağlı çatlak formunun ne şekilde ilerlediğini Wöhler eğrileri ile ortaya koymuş ve yüzey çatlaklarının ilerleme hızına bağlı olarak çatlak formunun ne şekilde ilerlediğini incelemişlerdir.

Ancak bilindiği üzere belirsiz yükleme durumlarında yükleme şiddetlerindeki değişiklikler sabit düzenekler kullanılarak elde edilmiş olan Wöhler eğrilerinin kullanımını engellemektedirler. Çünkü bu eğriler sabit genlikli yüklemeler için bulunmuştur [4]. Dolayısıyla LCD kullanan firmaların birçoğu dinamik yüklemelere maruz kalan cihazlarının ömür hesabını yapabilmek adına birikimli hasar teorilerine gereksinim duymaktadırlar. Bu teorileri kullanabilmek için ise malzemenin zorlanmaya maruz kaldığı maksimum ve minimum gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir [5]. Bu değerlerin etkisi altında ömür, yorulma çatlağının artışını toplama prensibine dayandıran ve literatürde "Paris-Erdoğan Denklemi" olarak bilinen ampirik ifadelerden elde edilerek bulunmuştur [7].

Paris ve Erdoğan (1963), bu denklemi kullanarak birçok malzemenin kritik çatlak boyuna ulaşıncaya kadar ömür analizinin nasıl yapılacağını inceleyip bahsi geçen Paris–Erdoğan denklemini literatüre kazandırmışlardır.

Bu denklem, yorulma çatlağının büyüme oranını veren bir çatlak büyüme denklemidir. Gerilme şiddet faktörü, bir çatlak ucu etrafındaki yükü karakterize eder ve çatlak büyüme oranı deneysel gerilme yoğunluğu aralığının bir fonksiyonu olarak gösterilir. İlgili faktörler bir grafiğe döküldüğünde ise 3 bölgeye sahip bir grafik oluşmaktadır. Paris-Erdoğan denklemi 2. Bölgenin karakteristiği ile ilgilidir. Bu ifadenin kullanılacağı bölgeyi sınırlayan sınır şartları çatlağın henüz yayılmaya başlamamış olduğu 1. Bölge ile, son kırılmanın başladığı 3. Bölge arasındadır.

Demir (2020), çatlak içeren plakalardaki yorulma davranışını malzeme sabitlerini kullanarak ele almış ve yukarıda bahsi geçen grafik ile de çatlak ilerleme oranını elde etmiştir. Bu grafik ile farklı hasar modellerinin birbiri ile uyum sağladığını göstermiştir.

Paris-Erdoğan denkleminin integre edilmesi ile çatlak boyunun kritik uzunluğa ulaştığı noktadaki yük tekrar sayısı elde edilebilmektedir. Motis ve diğ. (2017) , farklı geometrilere sahip plakalar ile yapılan deneylerde Paris denklemini kullanmış ve köşe çatlaklarının yorulma çatlakları üzerinde hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğunu elde etmişlerdir.

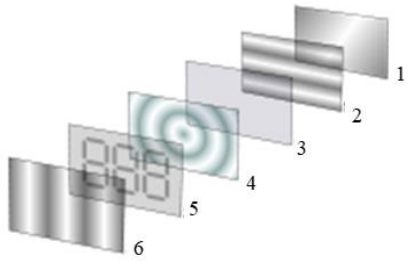
Ülkemizde LCD alanında yeni teknolojik gelişmeler ve ileri düzey mühendislik araçlarının kullanımı sınırlı düzeydedir. Ancak üretilmekte olan tüm teknolojik aletlerde haberleşme ünitesi olarak kullanılan LCD'lere olan talebin artması ile LCD'lerde oluşabilecek her türlü hatanın önlenebilmesi için bu alanda yapılan araştırma çalışmalarının arttırılması gerektiği açıkça görülmektedir.

BÖLÜM 2

Bu bölümde, ilk olarak LCD'nin katmanları ve bu katmanların çalışma prensipleri detaylı şekilde ele alınacaktır. Daha sonra, tezimizin konusu olan çatlakların çevrimsel (tekrarlı) yüklerin etkisi ile yorulma kırılması teorilerinden bahsedilecektir. Son olarak, tezimizin konusu olan olan problemin fiziksel modeli elde edilecektir.

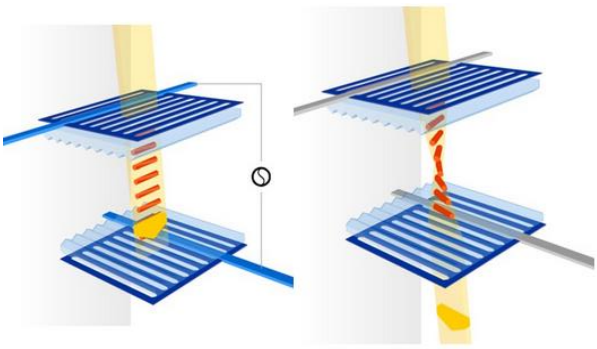
2.1 LCD (Liquid Crystal Display)

LCD, elektrikle kutuplanan sıvının ışığı tek fazlı geçirmesi ve önüne eklenen bir kutuplanma filtresi ile gözle görülebilmesi ilkesine dayanan bir görüntü teknolojisidir.



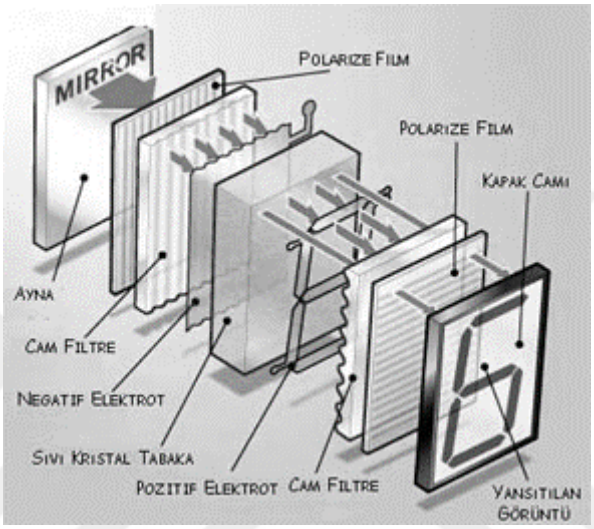
Şekil 2.1 LCD sistem elemanları; 1. Arka Panel, 2. Polarizasyon Filtresi, 3. ITO Kaplamalı Cam, 4. Sıvı Kristal, 5. ITO Elektrodlu Cam, 6. Polarizasyon Filtresi

LCD katmanları Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi bir araya geldiklerinde paneller meydana gelir. Panellerin çalışma prensibi en basit haliyle, üzerindeki özelleşmiş hücrelerin iyon katmanı tarafından şekillendirilmesi ve elektrik akımıyla görüntü oluşturulması şeklindedir.



Şekil 2.2 LCD çalışma prensibi

Herhangi bir elektrik alan uygulanmadan önce sıvı kristaller Şekil 2.2' de gösterildiği gibi kristaller, 90° kıvrık olacak şekilde sıralanmışlardır. Böylece kristaller arasından geçen ışığın kutuplanmasının yön değiştirmesi sağlanır ve ekran gri görünür. Yeterince yüksek bir voltaj uygulandığında sıvı kristaller kıvrık olmayacak şekilde sıralanırlar ve sıvı kristal katmanından geçişi sırasında ışığın kutuplanma yönü değişmez. Bu durumda ışık ikinci filtreye dik biçimde kutuplanır ve katmanı geçemediği için o piksel siyah görünür.



Şekil 2.3 LCD tasarım elemanları

İlgili elektrik akımı Şekil 2.3' te gösterildiği gibi polarize filmlerin iç yüzeyinde bulunan elektrodların yardımı ile elektrik devresini oluşturmaktadır. Elektrodların yapışık olduğu camlar üzerinde herhangi bir çizik, darbe vb. dış etkilerden dolayı oluşan hasarlar meydana geldiğinde, elektrik akımının devre üzerinden iletimi sağlanamayacak ve bunun sonucunda, hazne içerisindeki kristal sıvıda bulunan kristallerin de kutuplanması gerçekleşmeyecektir. Bu durumda, arka panelden gelen ışık ön cama iletilemeyecek ve LCD görevini yerine getiremeyecektir.

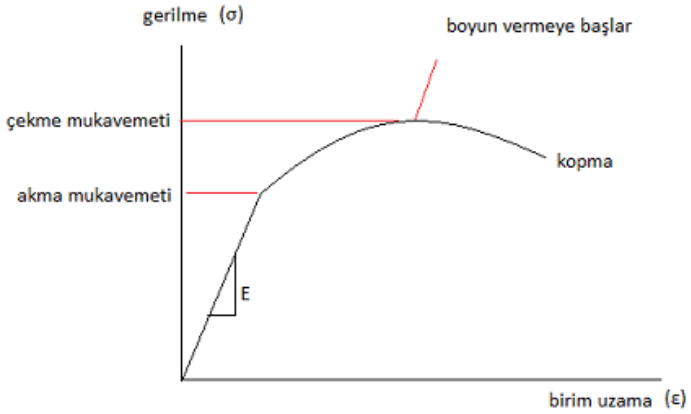
Bu doğrultuda ürünün maruz kaldığı dış yükler iki aşamada incelenmiştir. Aşamalardan ilki, başlangıç çatlaklarının oluşumu, ikincisi ise oluşan başlangıç çatlaklarının süreç içerisinde nasıl büyüyerek eksik segment hatasına sebebiyet verdiği şeklindedir.

2.2 Yorulma Çatlağı

Yorulma, dinamik yükleme altında parçanın dayanımındaki azalma olarak tanımlanabilir. Yorulmaya bağlı oluşabilecek çatlaklar çoğu malzemede yükün etki ettiği noktadaki malzemeye ait tekillik veya süreksizliklerin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Tekillikler yapısal (kalıntı veya ikinci faz parçacıklar gibi) veya geometrik (basamaklar, dislokasyonlar gibi) olabilir.

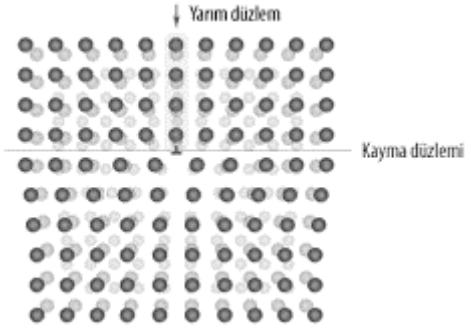
Yüzeydeki yorulma çatlaklarının başlangıcı, yüzeydeki plastik deformasyonun daha kolay olması ve kayma basamaklarının yüzeyi oluşturduğu gerçeğine dayanabilir. Kayma çatlakları tek başlarına bir yorulma çatlağı başlatabileceği gibi yapısal veya geometrik hatalarla etkileşime de girebilirler [11].

Plastik şekil değişimi için taneciklerin bulunduğu kafesin bir bölümünün, komşu atomlarla bağlarını koparıp kayma düzlemi boyunca ötelenmesi gerekir. Bunun için hesaplanan teorik kuvvetler (yani tüm bağların aynı anda kopması için) çok büyüktür. Oysa deneysel olarak bulunan değerler bu teorik kuvvetlerin çok altındadır. Bunun nedeni dislokasyonların adım adım ilerleyerek çok daha düşük kuvvetlerle kalıcı şekil değişimini sağlamasıdır [3].



Şekil 2.4 Gerilme – Yer Değiştirme grafiği

Dolayısıyla kristal yapılarda şekil değişimi için Şekil 2.5'te belirtilen dislokasyonların varlığı çok önemlidir. Dislokasyonların hareketi ile bütün bağların koparılmasına gerek kalmadan çok daha düşük zorlamalar ile şekil değişimleri gerçekleşir. Bu hareketi bir solucan ilerlemesine benzetilebilir.



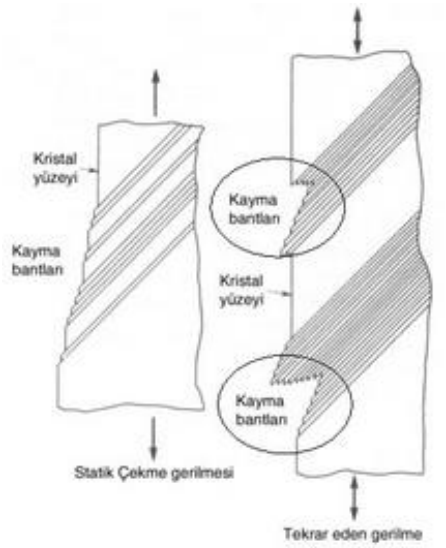
Şekil 2.5 Plastik şekil değiştirme

Dislokasyon hareket mekanizması, kristal yapıya sahip malzemelerde kalıcı şekil değişiminin nasıl oluştuğunu açıklamaya yardım eder. Çizgisel hata veya kusur olarak tanımlanan dislokasyonlar, malzemenin iç yapılarında bulunmaktadır. Ayrıca etkiyen gerilmeler altında yeni dislokasyonlar ortaya çıkar. Dışarıdan mekanik bir zorlama olursa malzemede ortaya çıkan kayma gerilmeleri dislokasyonları hareketlendirir ve şekil değişimi oluşur [2].

Dislokasyonlar özellikle metal kafeslerinde kolay ilerlemektedirler. Kafes içindeki tüm atomlar elektronlarını ortak olarak kullandıkları için, dislokasyonların olduğu bölgede çatlak ilerlemesi sonrası kristalin elektrik yükü bakımından bir değişime uğraması söz konusu değildir. Bir malzemenin kalıcı şekil değişimi olmasını zorlaştırmak (akma dayanımını arttırmak) için alınması gereken en etkin önlem, dislokasyonların bulunduğu bölgede çatlak ilerlemesinin engellenmesidir.

Tane sınırları dislokasyonu engeller. Tanelerin boyutu küçüldükçe dislokasyonların hareketi zorlaşır. Bu yüzden dislokasyonlar ince taneli malzemelerde kaba taneli malzemelere göre daha zor hareket ederler ve bu durum dayanımı arttırır. Kafes içindeki yabancı atomlar kristal yapının çarpılmasına ve dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasına neden olur. Daha önce kalıcı şekil değişimine uğramış ve kafesi içinde çok yoğun dislokasyon bulunan malzemelerde ise dislokasyonlar birbirlerinin hareketini engeller.

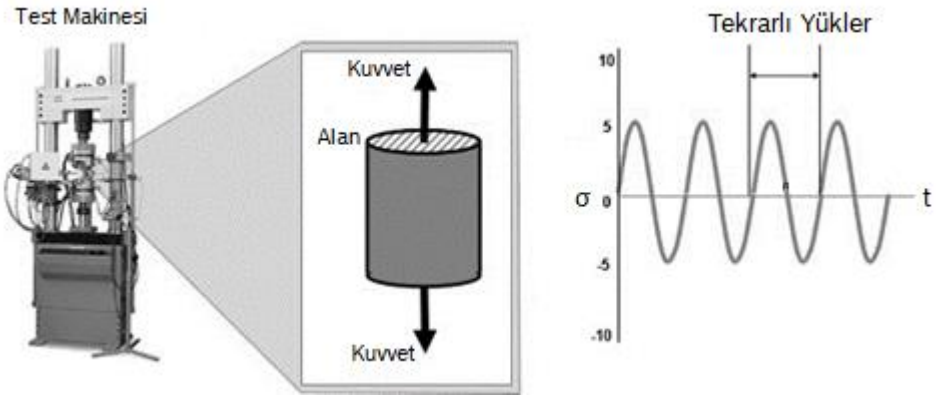
Kristal yapıya sahip metal malzemelerde, malzemelerin birçok dislokasyınlara bağlı davranışı Şekil 2.6’ da belirtildiği gibi kolaylıkla açıklanabilir.



Şekil 2.6 Malzeme yüzeyindeki girinti (intrüzyon) ve çıkıntılar (ekstrizyon)

2.2.1 Yorulma çatlağının büyümesi

Bir malzemenin yorulma ömrü, çatlak boyunun kritik boya kadar büyümesine yardımcı olan yük tekrarı sayısı ile belirlenir. Bilindiği üzere yorulma ömrü klasik yaklaşımda Wöhler eğrisi ile çıkarılmaktadır. Günümüzde bu eğriler kupon test makinesi kullanarak geliştirilmektedir. Küçük bir parça, makineye yerleştirilir ve parçada bir çatlak veya arıza meydana gelinceye kadar döngüsel bir gerilmeye maruz bırakılır. Bu sayede malzemelerin tekrarlı yüklerin çevrim sayısına bağlı grafiği Şekil 2.7' de gösterildiği gibi oluşturularak bu tekrarlı yükler altında malzemenin dayanıklılığının ölçülüp kırılmanın oluştuğu gerilmenin kaçıncı çevrime denk geldiği kolaylıkla analiz edilebilmektedir.



Şekil 2.7 Kupon testi

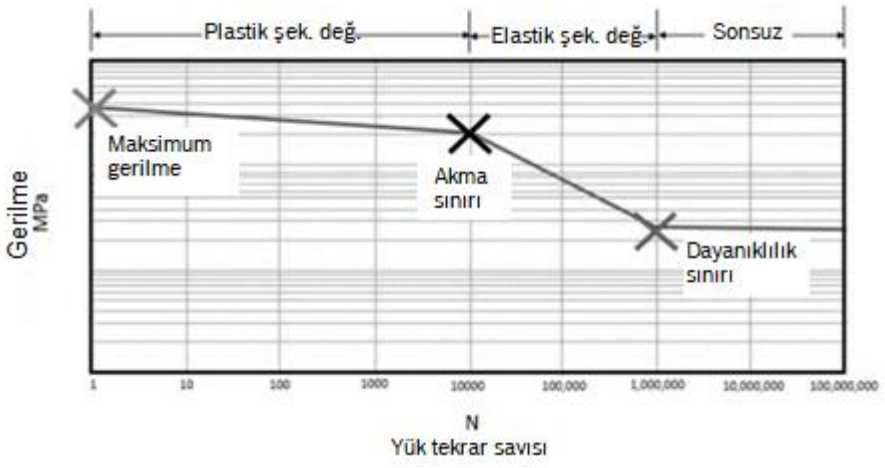
Birçok malzeme, Wöhler eğrisini geliştirmek için farklı gerilme seviyelerinde test edilmelidir. Şekil 2.8 klasik bir Wöhler eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.8 Wöhler eğrisi

Çoğu Wöhler eğrisi genellikle sol üstten sağ alt kısma doğru eğimlidir. Bu durum, yüksek seviyeli genlik çevrimlerinin, düşük seviyeli genlik çevrimlerine kıyasla hasara karşı daha az sayıda çevrim sayısına sahip olduğunu gösterir.

Bir Wöhler eğrisi farklı alanlar içerebilir: Şekil 2.9'da gösterildiği gibi plastik bölge, elastik bölge ve sonsuz ömür bölgesinden oluşur.

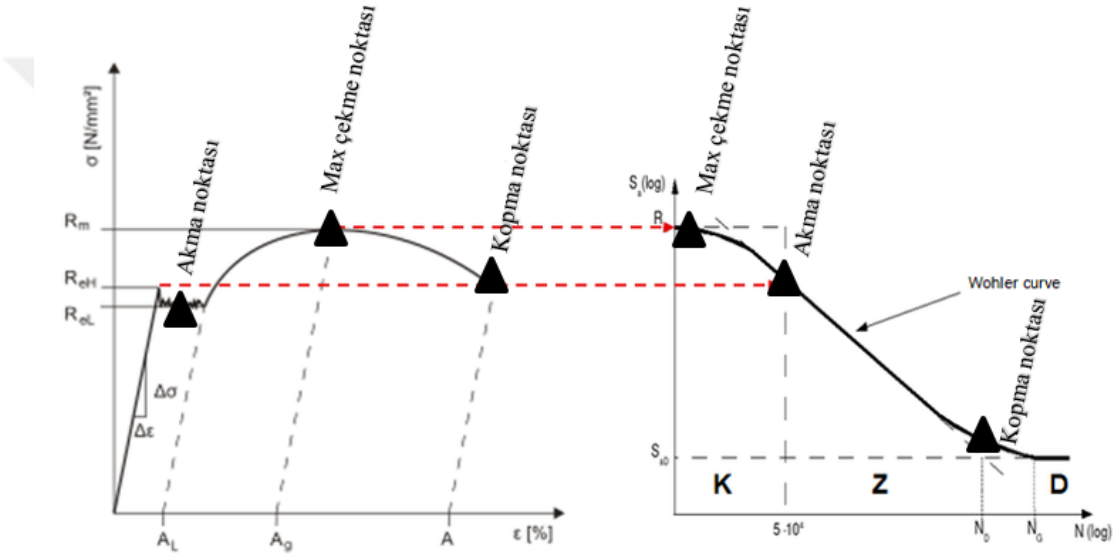


Şekil 2.9 Wöhler eğrisinde çekme dayanımı, akma dayanımı ve yorulma sınırı

Plastik, elastik ve sonsuz yaşam bölgelerini ayıran 3 anahtar kavram vardır:

- **Çekme Dayanımı:** Bir çevrimde hasara uğraması için gereken gerilme seviyesi
- **Akma Dayanımı:** Elastik ve plastik bölgeyi ayırma noktası
- **Yorulma Sınırı:** Tüm çevrimler bu gerilme seviyesi genliğinin altındaysa, hiçbir hasar meydana gelmez

Wöhler eğrisi üzerindeki değerlerin birçoğu, bir malzeme kuponu üzerinde statik bir gerilme-gerinim testi yapılarak bulunabilir (bakınız Şekil 2.7).



Şekil 2.10 Akma ve Çekme Dayanımının Wöhler Eğrisi üzerinde gösterilişi

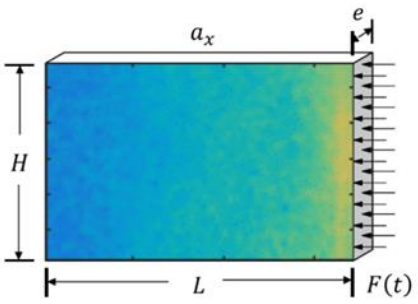
Örneğin Çekme Dayanımı gerilme değeri malzemenin bir çevrimde hasara uğradığı noktadır. Akma Dayanımı ise plastik ve elastik bölgeyi ayıran noktadır. Wöhler eğrisi ile gerilme / yerdeğiştirme grafikleri Şekil 2.11' de olduğu gibi kıyaslandığında hangi çevrimde malzemenin elastik şekil değiştirmeye başladığı hangi çevrimde ise plastik değiştirmenin gerçekleştiği açıkça görülebilmektedir.

2.3 İvme – Gerilme Dönüşüm Hesabı

Yapılan deneysel çalışmada yol boyunca parçaya etki eden yükler ivmeölçer ile kayıt altına alındığından ivme-gerilme dönüşümünün hesaplanması gerekmektedir. Kayıt altına alınan 3 eksenli ivme değerleri Pierron ve Fletcher'ın çalışmaları ile geliştirilen gerilme hesaplama prensibinden yola çıkılarak cisme uygulanan ivme değerlerinin parça üzerindeki herhangi bir noktada yarattığı gerilme değeri bulunmuştur.

Standart hesaplamalarda malzemelerin mekanik özelliklerinin zamana bağlı değişimi kolaylıkla ifade edilebilirken; bu metot çarpma, kaza veya patlama gibi hızlı/geçici yüklemeler altındaki belirli bir yapının davranışının gerilme tepkimesinin incelenmesi ile bulunabileceği prensibine dayandırılmaktadır. Bu sayede klasik gerilme/yerdeğiştirme yaklaşımında belirli bir alana etkiyen kuvvetin yarattığı gerilme hesaplanırken, gerilme ölçümü yaklaşımı ile yüzeye etkiyen ivme veya diğer yüklerin yüzeyden belirli bir mesafe uzaklıkta yarattığı gerilme miktarları hesaplanabilmektedir [10].

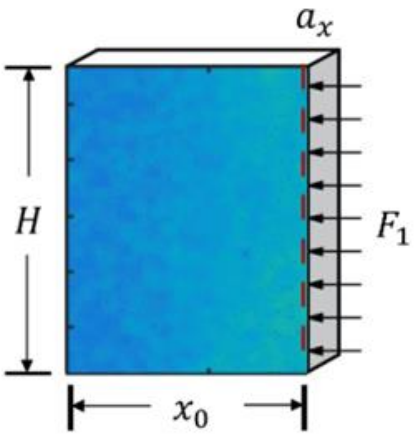
Pierron ve Fletcher yaptıkları çalışmada ivmenin belirli bir nokta üzerinde oluşturduğu gerilme değerini hesaplarken Newton'un ikinci yasası olaran bilinen "Hareket Yasası" ndan yola çıkmışlardır. Bu yasada bir cisme etki eden kuvvetler dengelenmediğinde cismin ivmeleneceği belirtilmektedir. Bu ivme, cisme etki eden net kuvvete ve cismin kütlesine bağlıdır. Bu kanun kullanılarak, kütlesi bilinen bir cismin üzerine bilinen bir ivme etki ettiğinde kuvvet hesaplanabilmektedir [13].



Şekil 2.11 Malzeme yüzeyine etki eten kuvvetler

$$\boldsymbol{F(t) = ma(t)} \tag{1}$$

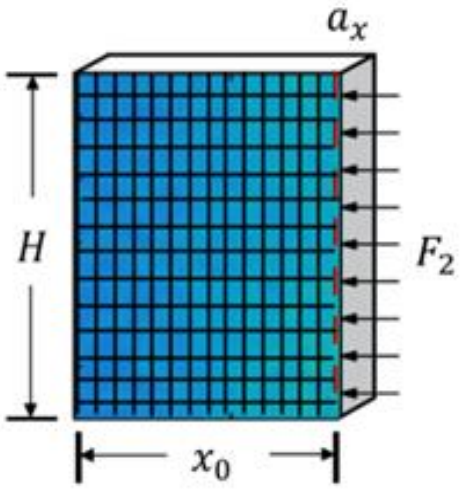
Yüzeye uygulanan F kuvveti, a ivmesinin etkisiyle m kütleli bir cisim üzerinde Denklem (1)' de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 2.12 Kuvvet-İvme denkliğinin başlangıç durumu koşulları

$$\mathbf{F_1 = eH\sigma_x(x_0)^y} \quad (2)$$

F kuvveti, Şekil 2.12'de belirtildiği gibi "e" kalınlığına ve "H" yüksekliğine sahip bir cismin x_0 mesafesinde yarattığı σ_x kullanılarak Denklem (2)'deki gibi bulunmaktadır.

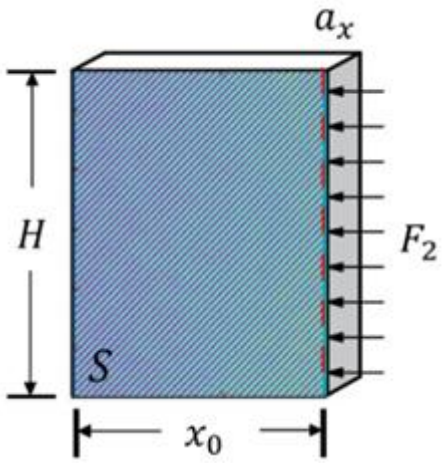


Şekil 2.13 Kuvvet-İvme denkliğinin x mesafesindeki koşulları

$$\mathbf{F_2 = \rho e x_o H \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} a_x(i)} \quad (3)$$

Tekrarlı yüklerin etki ettiği düzlem üzerindeki kuvvet ise **ρ** malzeme yoğunluğuna, a ivmelenme etkisine bağlı olarak Denklem (3)'te yazıldığı gibi bulunmaktadır.

Kuvvet dengesinden dolayı ivme-gerilme dönüşüm denklemi aşağıdaki gibi çıkmaktadır.



Şekil 2.14 İvmenin etki ettiği yüzeyde oluşan gerilmeler

$$\overline{\boldsymbol{\sigma_{xx}(x_0)}}^{y} = \boldsymbol{\rho x_0 \overline{a_x}}^{s} \quad (4)$$

2.4 Asal Gerilmelerin Hesaplanması

Sisteme uygulanan gerilme değerleri, gerilme tansörü analizi ile incelendiğinde bir gerilme durumunda meydana gelen bileşenler aşağıdaki matriste belirtildiği gibi bulunmuştur. Bunlardan 3 tanesi etki ettiği yüzeye dik olan normal gerilme değerlerini verirken geriye kalan 6 tanesi ise kayma gerilmelerini vermektedir.

$$\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Asal düzleme etki eden s asal gerilmenin x,y,z eksenleri üzerindeki bileşenlerini (S*x*, *Sy* ve *Sz*) kuvvet dengesinden yola çıkarak, cisim üzerine etki eden gerilmenin eksenler üzerindeki normal ve kayma bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\boldsymbol{s_x = a_{11}\sigma_x + a_{21}\tau_{xy} + a_{31}\tau_{xz}} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{s_y = a_{11}\tau_{xy} + a_{21}\sigma_y + a_{31}\tau_{yz}} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{s_z = a_{11}\tau_{xz} + a_{21}\tau_{yz} + a_{31}\sigma_z} \quad (8)$$

Yukarıdaki bileşenleri S cinsinden yazıldığında ;

$$\boldsymbol{s_x = sa_{11}} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{s_y = sa_{21}} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{s_z = sa_{31}} \quad (11)$$

Bu değerler denklem (6,7,8) da yerine yazıldığında ;

$$\boldsymbol{(s-\sigma_x)a_{11} - \tau_{yx}a_{21} - \tau_{zx}a_{31} = 0} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{-\tau_{xy}a_{11} + (s-\sigma_y)a_{21} - \tau_{zy}a_{31} = 0} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{-\tau_{xz}a_{11} - \tau_{yz}a_{21} + (s-\sigma_z)a_{31} = 0} \quad (14)$$

Denklem (15)'te yer alan determinantın çözümü ile aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{s-\sigma_x} & \boldsymbol{-\tau_{yx}} & \boldsymbol{-\tau_{zx}} \\ \boldsymbol{-\tau_{xy}} & \boldsymbol{s-\sigma_y} & \boldsymbol{-\tau_{zy}} \\ \boldsymbol{-\tau_{xz}} & \boldsymbol{-\tau_{yz}} & \boldsymbol{s-\sigma_z} \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

Determinant çözüldüğünde ise ;

$$\boldsymbol{s^3 - (\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)s^2 + (\sigma_x\sigma_y+\sigma_y\sigma_z+\sigma_x\sigma_z-\tau_{xy}^2-\tau_{yz}^2-\tau_{xz}^2)s -}$$
$$\boldsymbol{(\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2)} = 0 \quad (16)$$

S katsayılarının önündeki sabitler aşağıdaki gibi isimlendirilmektedir.

$$\boldsymbol{I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2)} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{I_3 = (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2)} \tag{19}$$

Elde edilen bu sabitler Denklem (16)'da yerine yazıldığında Denklem (20) elde edilmektedir.

$$\boldsymbol{s^3 - I_1 s^2 + I_2 s - I_3 = 0} \tag{20}$$

Denklem (20), asal gerilmelerin üçüncü dereceden bir denkleme sahip olduğunu göstermektedir.

2.5 Paris-Erdoğan Denklemi ile Ömür Analizi

Oluşan başlangıç çatlağının dinamik yükler altında büyümesi ile ilgili yapılacak analizde yüklemede kullanılacak bazı ifadeler incelenerek parça kırılasıya kadar kaç çevrim daha aynı yüklere maruz kalabileceğinin analizi yapılacaktır.

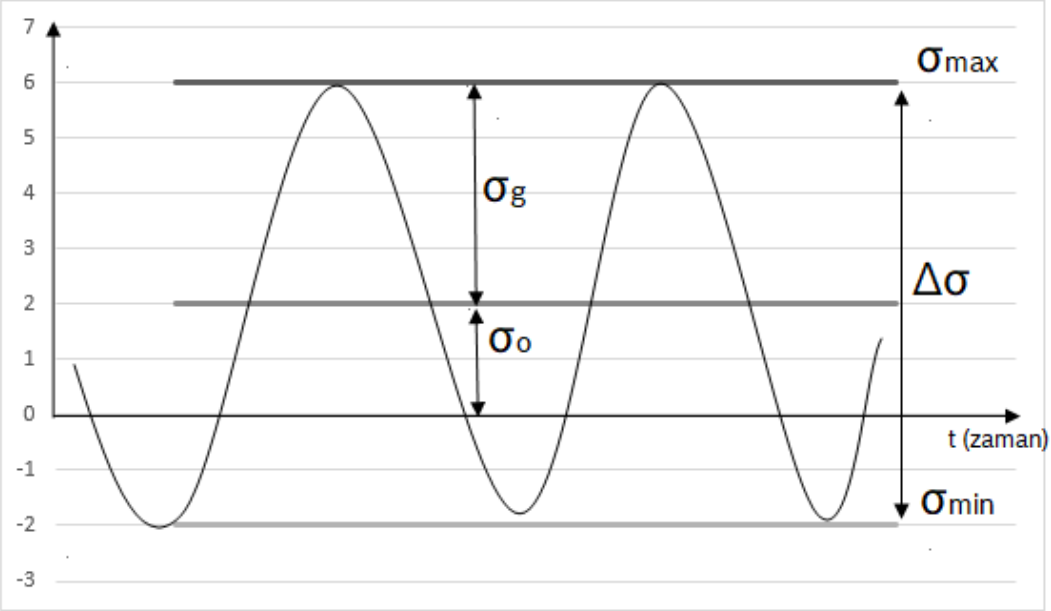
Gerilme farkı (Δσ), maksimum ve minimum değerler arasındaki farktır. Maksimum ve minimum değerlerin ortalamasını almak ise ortalama gerilme (σ_o) değerini verir. Gerilme farklarının yarısı ise gerilme genliğini (σ_g) verir. Maksimum ve minimum gerilmelerin oranı ise gerilme oranını (R) vermektedir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \tag{21}$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \tag{22}$$

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \tag{23}$$

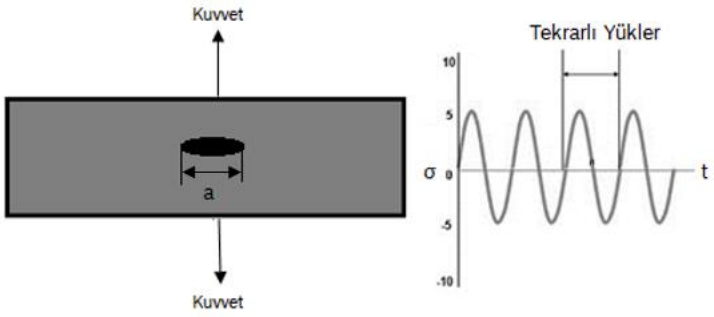
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \tag{24}$$



Şekil 2.15 Tekrarlı Yükler

Yorulma çatlağı büyümesi ile ilgili çalışmalar için gerilme değişimi (Δσ) ve gerilme oranının (R) bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler Şekil 2.15' te belirtildiği gibi çevrimli yükün grafiğe dökülmesi ile kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Böylece çevrim başına oluşan çatlak büyüme oranı $\frac{da}{dN}$, artık çatlak ucundaki dinamik gerilme şiddeti faktörü olan ΔK'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Böylece, çatlak büyüme adımlarını tanımlamak için uygun sınır şartlarını sağlayan bir matematiksel denklemin kullanılmasıyla malzemenin yorulma ömrü (hasar başlangıcına kadar yapılan çevrim sayısı) hesaplanabilir. Bu denklem dinamik şartlar altında çatlak büyümesi olarak bilinen Paris Denklemi ile açıklanabilir.

Çatlak uzunluğu a olan bir LCD'nin, maksimum ve minimum gerilme değerleri arasında sabit genlikli bir yüke maruz kaldığını varsayalım.



Şekil 2.16 Tekrarlı yüke maruz kalan LCD

$$\frac{\mathbf{da}}{\mathbf{dN}} = \mathbf{c}(\Delta\mathbf{K})^{\mathbf{m}} \quad (25)$$

Burada a çatlak uzunluğu, N çevrim adedi, ΔK dinamik gerilme şiddet faktörü ve C ve m ise malzemeye, çevreye bağlı amprik sabitlerdir. m değeri malzemenin izotropluğuna bağlı olarak boyuna ve enine yüklemelerden etkilenmektedir. Dinamik gerilme şiddet faktörü ΔK, Denklem (26)'daki gibi hesaplanır.

$$\Delta\mathbf{K} = \mathbf{Q}.\Delta\boldsymbol{\sigma}\sqrt{\boldsymbol{\pi}\mathbf{a}} \quad (26)$$

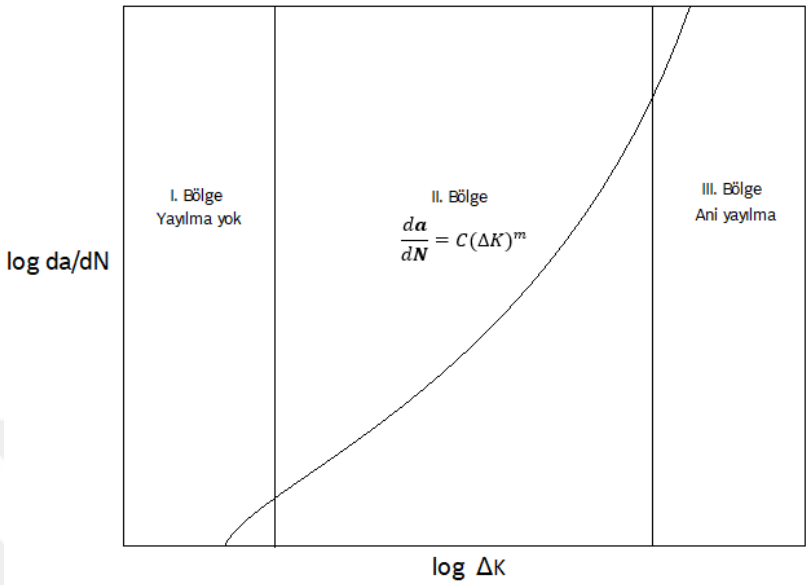
K niceliği, çatlak uzunluğu, uygulanan yük ve geometriye bağlıdır. Burada Q şekil doğrultma faktörünü temsil etmektedir.

Denklem (26), Denklem (25)'in içine yazıldıktan sonra denklemin her iki tarafının integrali alınarak malzemenin ömrünü veren ifade Denklem (27) ve (28) elde edilir.

$$\mathbf{N} = \int_{\mathbf{ai}}^{\mathbf{ac}} \frac{\mathbf{da}}{\mathbf{C}(\Delta\mathbf{K})^{\mathbf{m}}} \quad (27)$$

$$\boldsymbol{N} = \frac{\boldsymbol{a_c}^{(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{m}}{\mathbf{2}})} - \boldsymbol{a_i}^{(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{m}}{\mathbf{2}})}}{\boldsymbol{C}(\boldsymbol{Q}\Delta\boldsymbol{\sigma}\sqrt{\boldsymbol{\pi}})^{\boldsymbol{m}}.(\mathbf{1}-\frac{\boldsymbol{m}}{\mathbf{2}})} \quad (28)$$

Logaritmik incelemede çatlağın büyüme oranı $\frac{da}{dN}$ 'nin çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü ΔK'ya göre grafiği Şekil 2.17' deki gibi çizilirse aşağıdaki bir eğri elde edilecektir.



Şekil 2.17 ΔK – dA/dN grafiği

Bölge I : logΔKr ile başlar ve eğrinin eğilimi lineer oluncaya kadar devam eder. Bu bölgenin altında çatlak yayılımı olmaz. Bu bölge çatlak oluşum bölgesidir.

Bölge II : Kararsız çatlak yayılmasını gösterir çünkü $\frac{da}{dN}$ şiddetle büyümektedir ve burada eğri lineerdir.

Bölge III : Plastik kırılmanın olduğu bölgedir. Çatlak aniden kırılır.

BÖLÜM 3

Bu bölümde, kurulan deney düzeneği ile kombi cihazının nakliyesi esnasında LCD'ye etki eden tekrarlı yüklerin analizi ele alınacaktır. Başlangıç çatlağına sahip bir LCD'nin tekrarlı yükler altındaki davranışının analitik ve sayısal yöntemlerle incelenerek ömür hesabı yapılacaktır.

3.1 Deneysel Çalışma

LCD'nin ömür analizinin yapılabilmesi için Bölüm 2.5'te de belirtildiği üzere LCD üzerindeki başlangıç çatlaklağının uzunluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Başlangıç çatlaklarının uzunluğunun saptanabilmesi için daha önce herhangi bir cihaz üzerinde kullanılmamış olan LCD, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi mikroskop altında incelenerek başlangıç çatlağı incelenmiştir.



Şekil 3.1 Mikroskop altında incelenen LCD'ye ait çatlak

Yapılan ölçümlerde başlangıç çatlağının uzunluğu 0.01 mm olarak bulunmuştur. LCD'nin kritik çatlak boyu ise LCD'nin mekanik özelliklerine bağlı olarak Tablo 5'te de belirtildiği gibi 0.02 mm'dir.

Çatlak boyunun kritik noktaya ulaşmasında önemli bir rol oynayan titreşimlerin ölçümü için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışma için kombi cihazı üzerinde LCD'ye yakın bir bölgeye ivme transdüseri yerleştirilerek cihaz paketlenmiştir. Daha sonra Manisa'dan Mardin'e nakliyesi esnasında LCD üzerinde oluşan titreşimler kayıt altına alınmıştır.

3.1.1 Deney Düzeneği

Nakliye esnasındaki titreşim değerlerinin kayıt altına alınması için yapılacak deneysel çalışmada deney düzeneklerine ait bilgiler aşağıda belirtilmiştir.

- **LCD ;**

LCD tipi : TN / Negatif Gri
Polarize Modu : Aktarıcı
Çalışma sıcaklığı : -10°C ~ 60°C
Depo saklama sıcaklığı : -20°C ~ 70°C
Çalışma voltajı : 3.3 ±0.2 V

- **İvmemetre;**



Şekil 3.2 MSR175 İvmemetre

İvmemetre tipi : Accelerometer MSR175
Ölçüm ekseni : 3-eksen
Veri kaydedici : maksimum ±15g eşik ivmesi ile veri kaydetme yeteneği

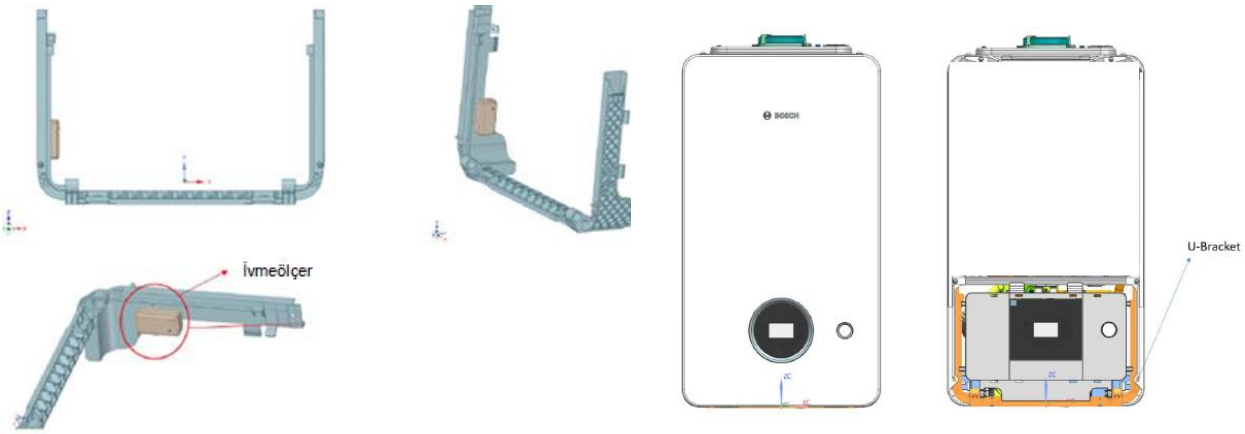
- **Deneysel çalışmada kullanılacak kombi cihazı**

Yol süresi boyunca titreşim değerlerini kayıt altına alabilmek için Şekil 3.3'te gösterilen cihazın kullanılmasına karar verilmiştir.



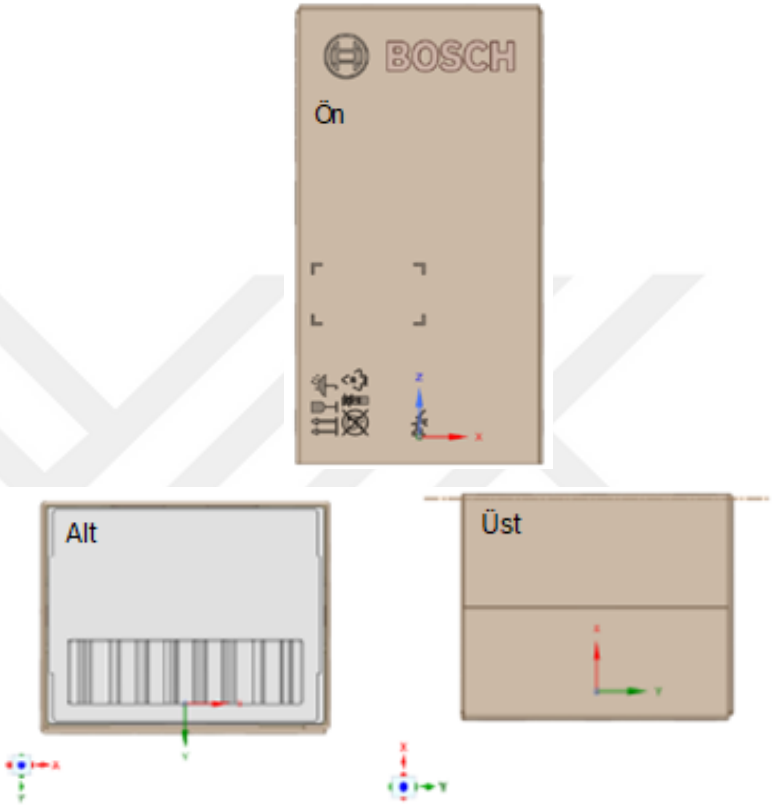
Şekil 3.3 Uygulamada kullanılan kombi cihazı

Cihaz, Manisa'dan Mardin'e gitmek üzere yola çıkmadan önce cihaza etki edecek titreşimleri kayıt altına alabilmek için yukarıda belirtilen ivmemetre, Şekil 3.4'te gösterilmekte olan, cihazın iç kısmında bulunan ve LCD ekranının bulunduğu elektronik kartın mesnetler ile bağlı olduğu U-braket üzerine monte edilmiştir.



Şekil 3.4 Uygulamada kullanılan ivmemetrenin cihaz içerisindeki konumu

İvmemetre montajı yapılan cihaz, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi paketlenmiştir. Paketleme tasarımı; naylon kaplama, EPS köpük, karton kutu gibi paketleme elemanlarına sahiptir. Naylon poşet cihazı çizikten korurken, EPS köpüğü sönümleyici eleman olarak davranır ve gelen titreşimlerin büyük bir bölümünü emer. Karton kutu ise cihazı sağlam tutarak yapısal bütünlüğü artırmaktadır.



Şekil 3.5 Cihaza ait paketleme koşulları

Hazırlanan bu test düzeneğine sahip cihaz araca yüklenerek Mardin'e gönderilmiş olup yol boyunca ivmemetre üzerinden titreşim verileri alınmıştır.

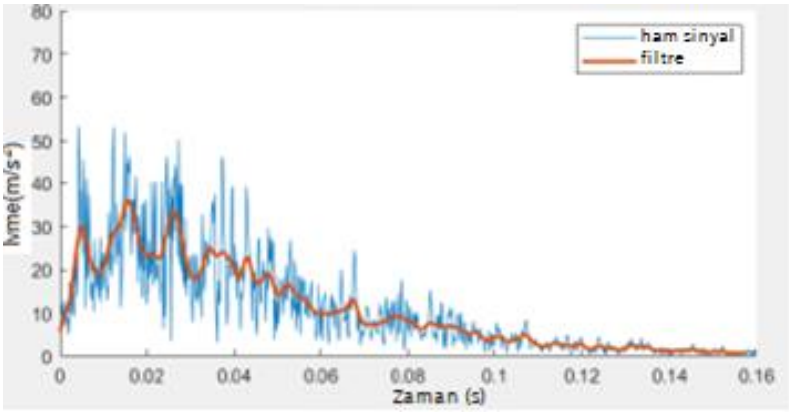
3.1.2 Deneysel Verilerin Elde Edilişi

İdeal bir ivmemetre, anlık doğrusal ivmelenmenin ve yerçekimsel ivmelenme alanının yanı sıra bazı ilave gürültüleri de ölçmektedir. Ölçüm sinyalindeki bu gürültü veya yükten bağımsız meydana gelen ani pikler ölçüm verilerini doğru okumayı neredeyse imkansız hale getirir. Dolayısı ile kaydedilen verilerin filtrelenmesi gerekmektedir.

Filtreler, iletim hattındaki bir sinyalin frekansa bağlı olarak genlik özelliklerini değiştiren bir sinyal işleme devresidir. İletilen bir sinyal içerisindeki istenmeyen frekans bileşenini yok etmek ve var olması istenen frekans değerlerinin de iletimini sağlamak amacıyla elektronik devre tasarımlarında sıklıkla yer alırlar.

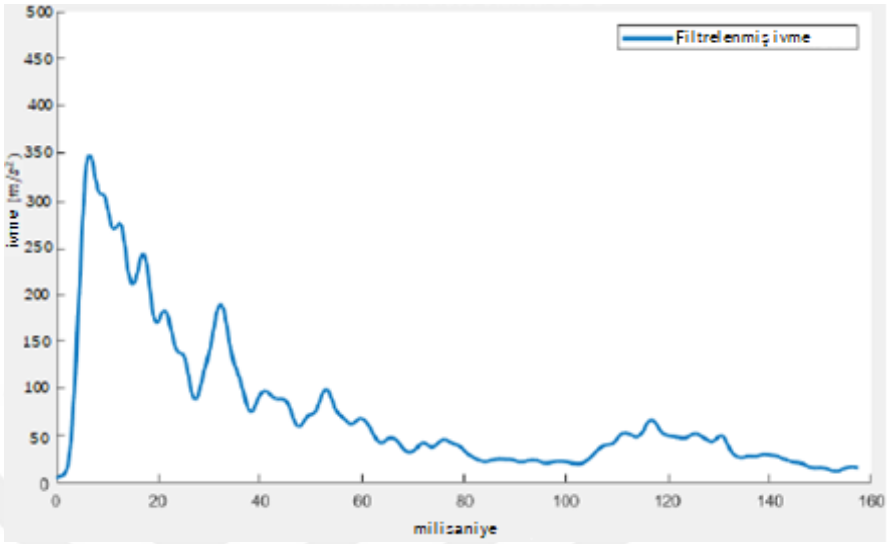
Nakliye esnasında 4 farklı zaman diliminde tespit edilen maksimum ivme değerleri "Butterwoth" filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. Butterworth, standart filtre çeşitleri içerisinde geçiş bandı en düz ve dalgalanmanın neredeyse hiç olmadığı bir filtredir. Bu sebeple maksimum düzlüklü filtre cevabı olarak da anılır. Alçak geçiren Butterworth filtre, filtrenin merkez frekansında dik bir grafik verir. Ayrıca filtrenin derecesi (eleman sayısı) arttıkça bu grafiğin dikliği artarak ideal filtreye yaklaşır. Bu sebeple dalgalanma miktarının önemli olduğu analog devrelerde Butterworth filtreler tercih edilmektedir.

Alçak geçirgenliği sayesinde kesim frekansından yüksek ve tekrarsız olan frekanslar zayıflatılarak geçişleri engellenmekte olup kesim frekansından küçük olan frekansları da tekrarlılığına bakarak geçiren bir filtre kullanılmıştır. Bu filtre frekans spektrumunu biçimlendirmek için kullanılmaktadır. Bu yüzden, veri dönüştürücü uygulamalarında kenar yumuşatma filtresi olarak kullanılır. Bu çalışma kapsamında elde edilen ivme değerleri degredasyon ile sadeleştirilmiştir.

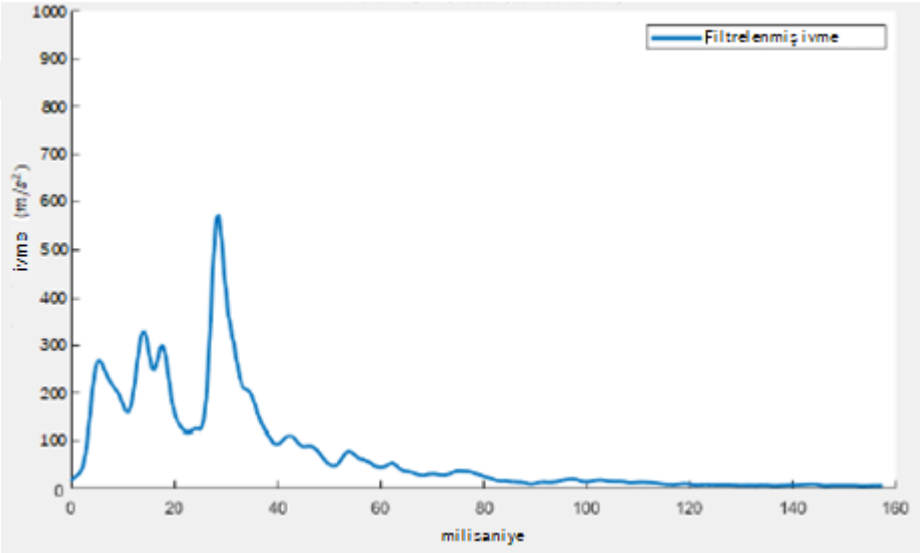


Şekil 3.6 veri filtreleme grafiği

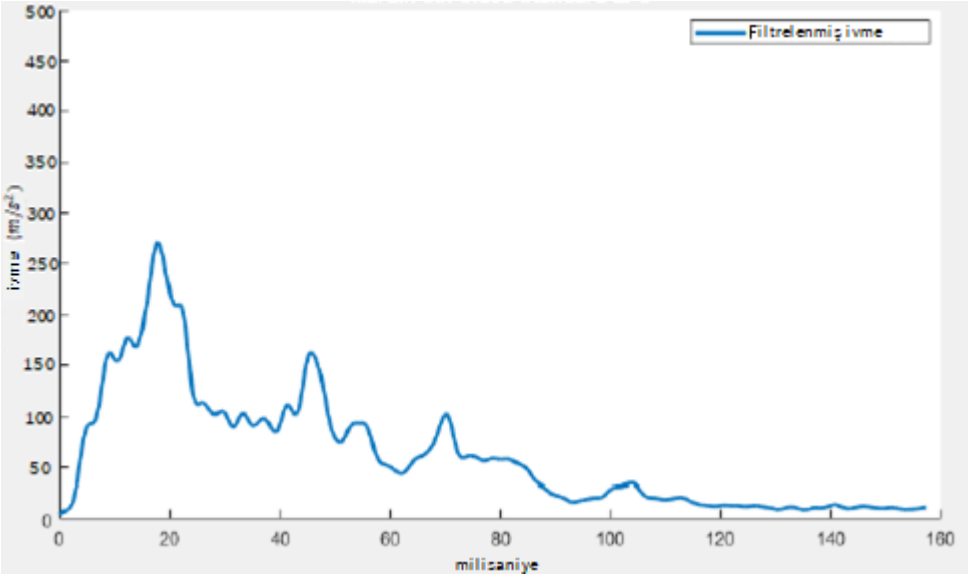
Nakliye esnasında 4 farklı zaman diliminde elde edilen maksimum ivme değerlerini ifade eden Butterworth filtresi ile filtrelenmiş dalga formu grafikleri şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10 ‘da gösterilmiştir.



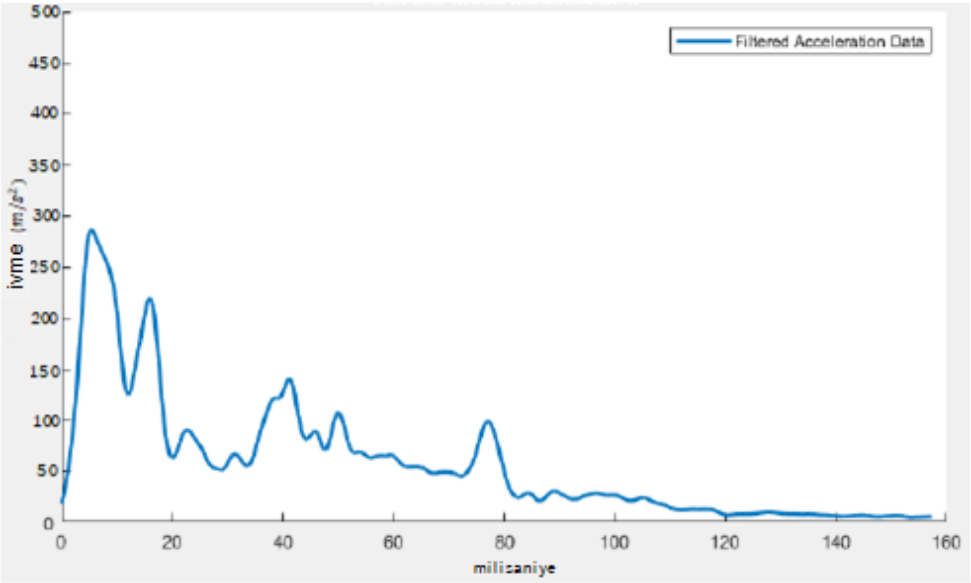
Şekil 3.7 1. Anlık değer için ivme zaman grafiği



Şekil 3.8 2. Anlık değer için ivme zaman grafiği



Şekil 3.9 3. Anlık değer için ivme zaman grafiği



Şekil 3.10 4. Anlık değer için ivme zaman grafiği

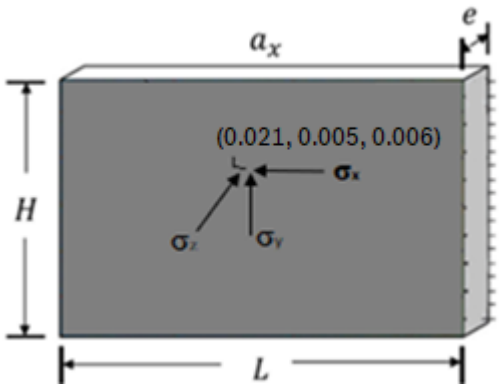
Yapılan bu incelemelerde elde edilen veriler filtrelendiğinde görülen 4 farklı zaman dilimnde tespit edilen maksimum ivme değerleri Tablo 1'de olduğu gibidir.

Tablo 1. İvmemetre ölçüm sonuçları

	Titreşim İvme Genlik Değerleri			
	1. Anlık Değer	**2. Anlık Değer**	**3. Anlık Değer**	**4. Anlık Değer**
Mardin	339,38 $\frac{m}{s^2}$	265,2 $\frac{m}{s^2}$	582,75 $\frac{m}{s^2}$	281,29 $\frac{m}{s^2}$

3.2 Analitik Yöntem

Deneysel olarak tespit edilen 4 farklı zaman dilimindeki titreşim değerlerinin Şekil 4.7' de LCD üzerindeki konumu verilen başlangıç çatlağının ucunda yarattığı ve Denklem (4)' e göre çatlağın büyümesine neden olan gerilme değerleri Tablo (2)' de verilmektedir.



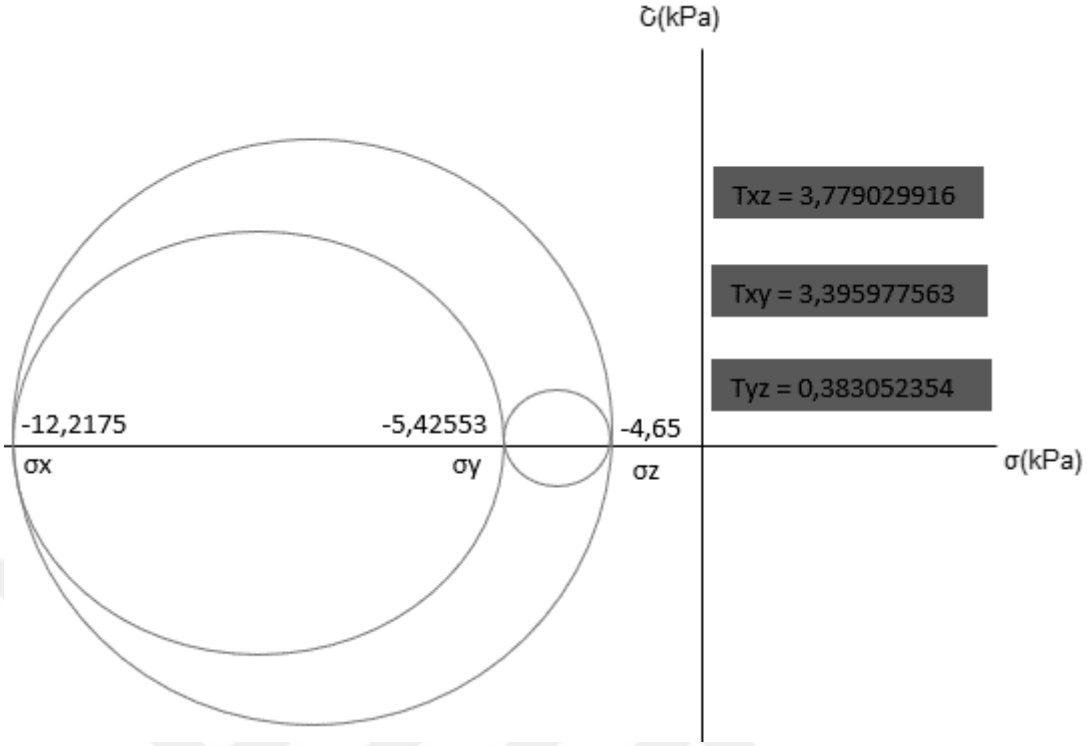
Şekil 3.11 Çatlağın koordinat sistemi üzerindeki yeri

Tablo 2. 3 eksenli gerilme değerleri

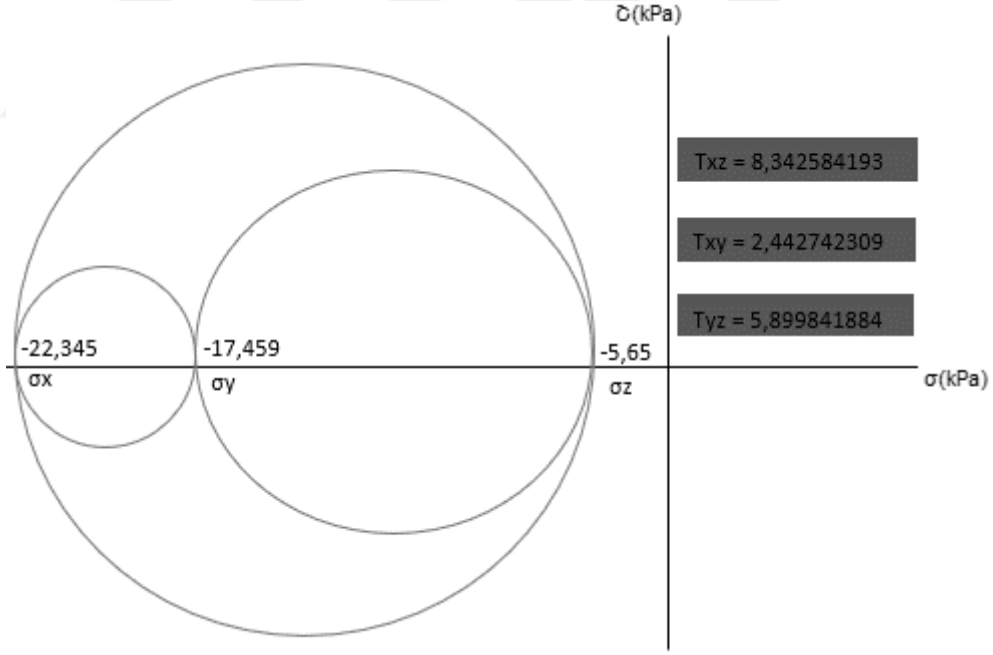
	1. Anlık Değer	**2. Anlık Değer**	**3. Anlık Değer**	**4. Anlık Değer**
$\sigma_1\ (kPa)$	-4,65942	-17,4596	6,593522	12,07933
$\sigma_2\ (kPa)$	-5,42553	-5,65996	8,13829	-3,11465
$\sigma_3\ (kPa)$	-12,2175	-22,3451	0,142202	-9,60519

Tablo 2' de 4 farklı zaman dilimi için bulunan normal gerilme değerleri MOHR çemberinde kullanılarak kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Ardından Bölüm 2.4'te bahsedilen asal gerilme analizi yapılarak çatlak ucundaki maksimum asal gerilme değerleri hesaplanmıştır.

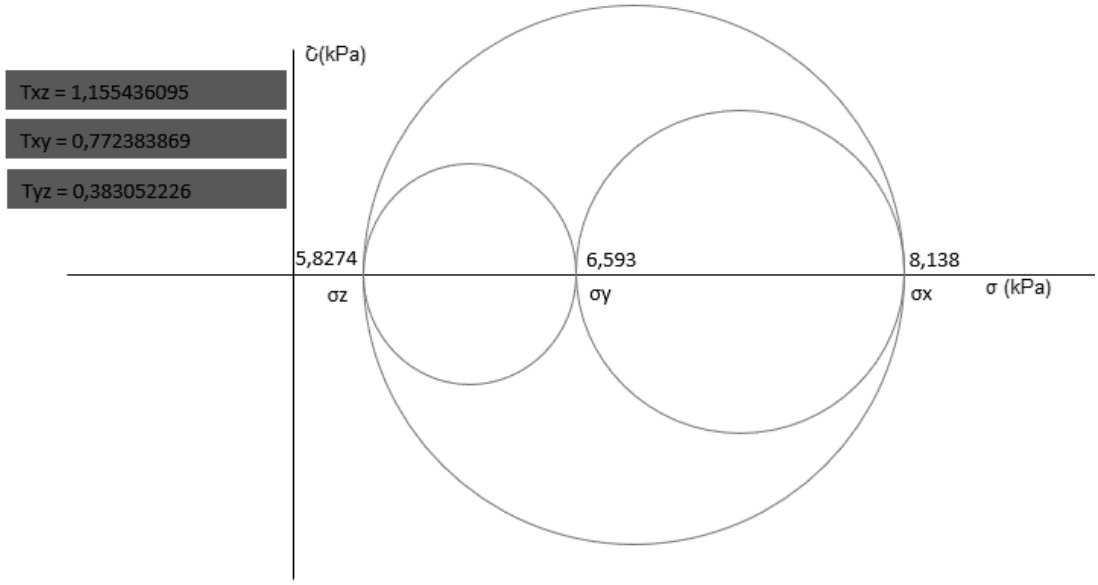
1. **Anlık Değer:**



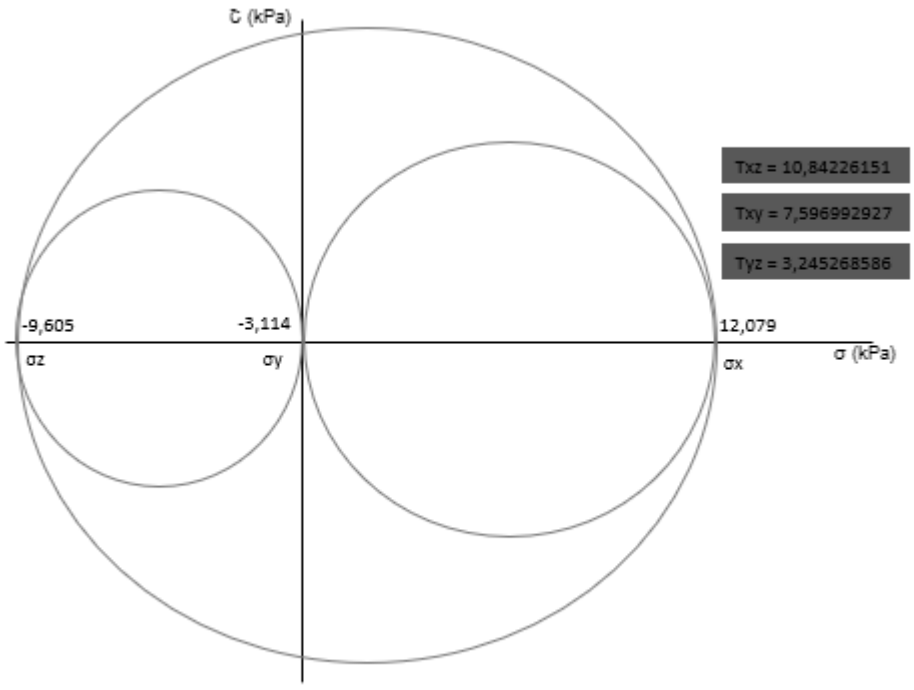
2. **Anlık Değer:**



3. Anlık Değer:



4. Anlık Değer:



Bulunan tüm kayma gerilme değerleri Denklem (25,26,27)' de yerine konulduğunda $\boldsymbol{I_1, I_2, I_3}$ katsayıları aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

Tablo 3. 3 eksenli I sabitleri

	1. Anlık Değer	**2. Anlık Değer**	**3. Anlık Değer**	**4. Anlık Değer**
$\boldsymbol{I_1}$	-22,30243101	-45,4647	14,87401	-0,64051
$\boldsymbol{I_2}$	122,5320434	505,0578	28,76906	-309,531
$\boldsymbol{I_3}$	-70,01363013	228,9991	298,074	-1006,06

Her sinyal için bulunan I katsayıları Denklem (20)'de yerine yazılarak asal gerilmeler elde edilmektedir.

Tablo 4. 3 eksenli asal gerilme değerleri

	1. Anlık Değer	**2. Anlık Değer**	**3. Anlık Değer**	**4. Anlık Değer**
σ_1 (kPa)	-13,78	-24,227	8,705	18,741
σ_2 (kPa)	-7,879	-21,673	6,868	-16,033
σ_3 (kPa)	-0,645	0,436	4,985	-3,348

Bulunan asal gerilme değerleri, Bölüm 3.1'de belirtilen 0,01mm başlangıç çatlak boyu ve 0,02mm kritik çatlak boyu Denklem (28)' de yerine yazılmıştır. Denklem (28)' de kullanılan c ve m amprik sabitleri ise literatürde yapılan araştırmalar sonucu $\boldsymbol{1.10^{-6}}$ **ve 1** olarak varsayılmıştır. Yapılan akademik araştırmalar, fiberglas camların c ve m amprik sabitlerini 2.10^{-5} ve 4.03 olarak ortaya koymaktadır [14]. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ITO cama amprik sabitler ise ITO camın dayanımının fiberglas camdan daha zayıf olduğu bilindiğinden dolayı fiberglas sonuçlarından daha düşük değerler alınarak ilerlenmiştir. Q değeri ise Denklem (26) kullanılarak elde edildikten sonra Denklem (28) çözülerek çevrim sayısı aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{0{,}02}^{\frac{1}{2}} - \mathbf{0{,}01}^{\frac{1}{2}}}{\mathbf{1.10^{-6}((1{,}12)(42{,}968)\sqrt{\pi})^{-1}.(\frac{1}{2})}} = 940 \text{ bulunur.}$$

ITO camın Tablo 4'te verilen asal gerilmeler altında 940 çevrim sonrasında plastik deformasyona uğrayarak kırılacağı hesaplanmıştır. Bu kırılma sonrasında LCD'nin segmentleri kalıcı deformasyona uğrayacağından segmentlere gelen elektrik akımı, segment içerisindeki kristal sıvıyı polarize edemeyecek ve ışık geçirgenliği aktive edilemeyecektir. Bu durum, Bölüm 1'de bahsedilen eksik segment hatalarının oluşumuna sebebiyet verecektir.

3.3 Sayısal Analiz

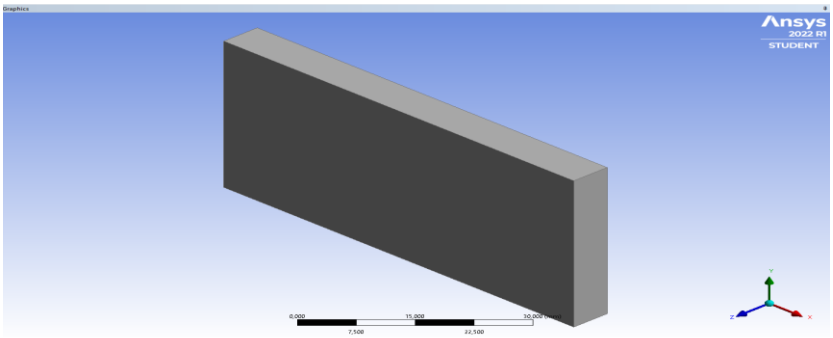
Bu bölümde, Tablo 2'de ivme-gerilme dönüşümü ile bulunan gerilme değerleri kullanılarak ANSYS programında "Smart Crack Growth (Çatlak Büyüme Analizi)" analiz metodu ile başlangıç çatlağının ucunda etkiyen asal gerilme değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır. Bulunan sayısal değerler analitik olarak bulunan maksimum asal gerilmeler ile karşılaştırılıp doğruluğu teyit edilmiştir.

Analizde LCD üretiminde kullanılan ITO kaplamalı cama ait mekanik özellikler Tablo 5'teki gibi tanımlanmıştır.

Tablo 5. ITO Camın Mekanik Özellikleri

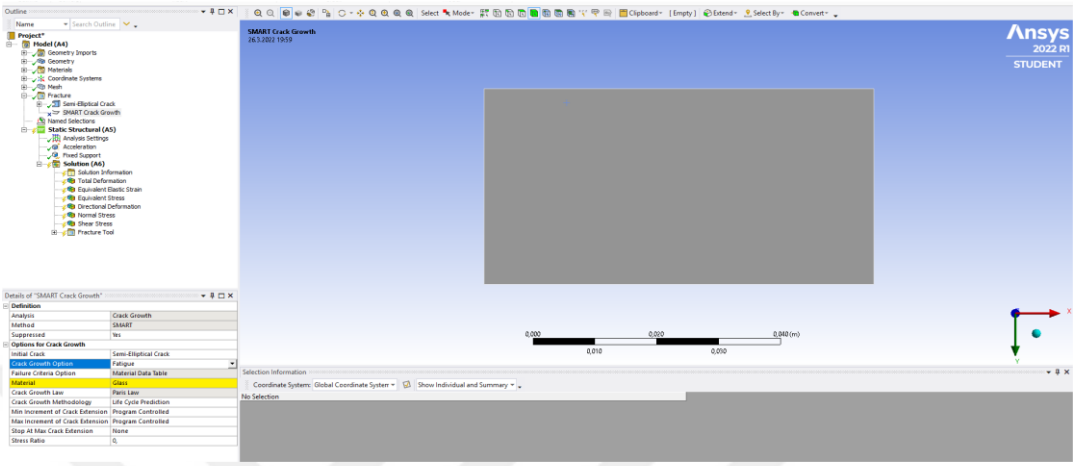
Yoğunluk	6830 kg/m^3
Elastisite Modülü	190 GPa
Poisson Oranı	0,38
Kritik Çatlak Boyu	0,02 mm
Başlangıç Çatlak Boyu	0,01 mm

Malzeme özellikleri tanımlanan LCD, Şekil 3.12' de görüldüğü gibi 3 boyutlu olarak modellenmiştir.



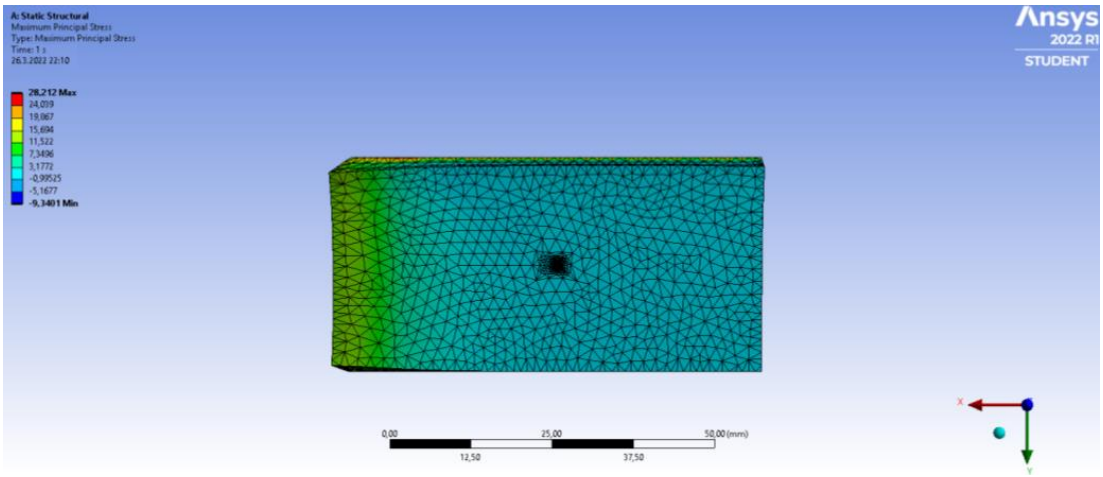
Şekil 3.12 3 Boyutlu LCD modeli

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere ivme-gerilme dönüşümü denklemleri ile elde edilen gerilme değerleri önşart olarak sisteme girilmiştir. Bu koşullar altında Paris-Erdoğan denklemini referans alan Smart Crack Growth analizi ile asal gerilmeler tespit edilmiştir.

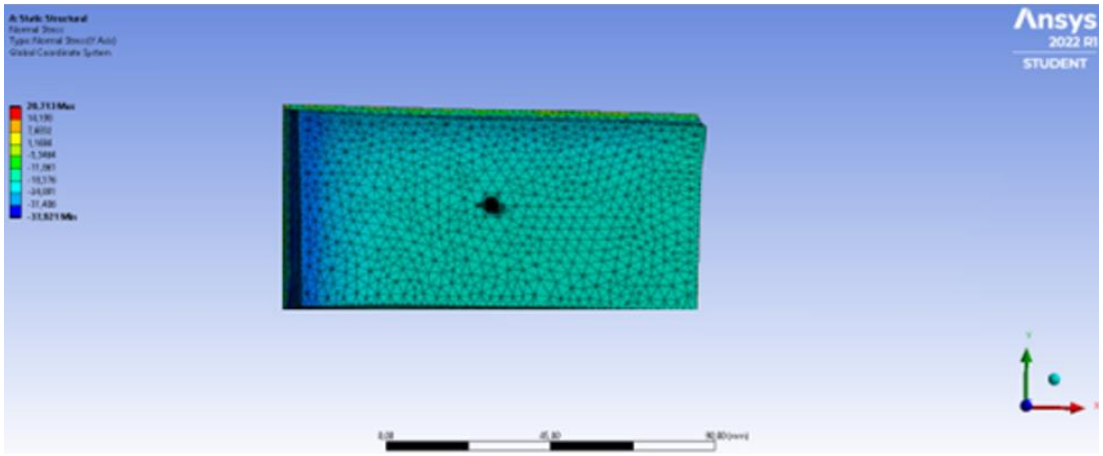


Şekil 3.13 Ansys Smart Crack Growth – Paris Denklemi

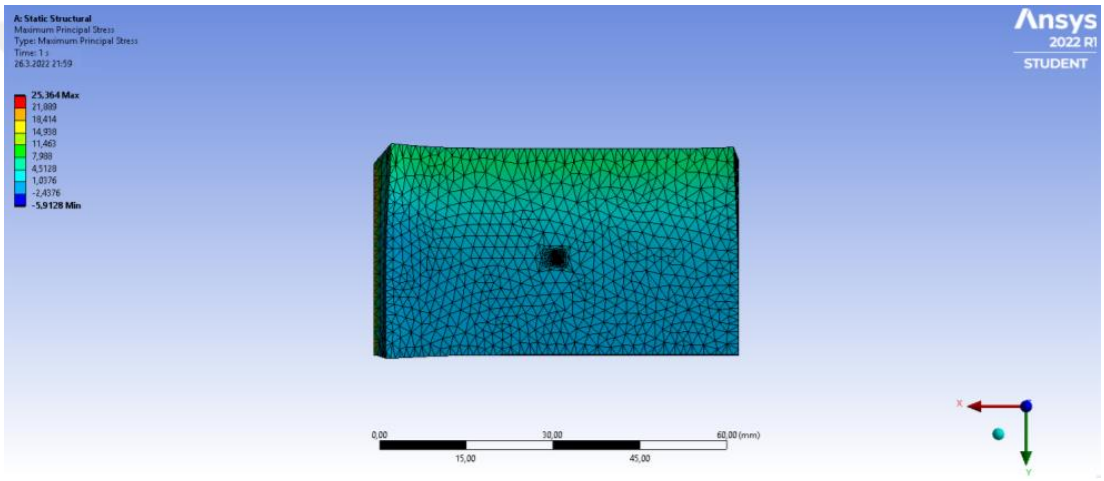
Belirtilen koşullar altında incelenen 4 farklı zaman için ANSYS programı üzerinden çatlak analizi yapılmıştır. Yapılan analize göre çatlağın bulunduğu noktadaki asal gerilmelerin 4 farklı zaman durumu için simulasyonu şekiller 3.14-3.17 arasında verilmiştir. Ayrıca analitik ve sayısal olarak tespit edilen maksimum ve minimum asal gerilme değerleri Tablo 6' da karşılaştırılmıştır.



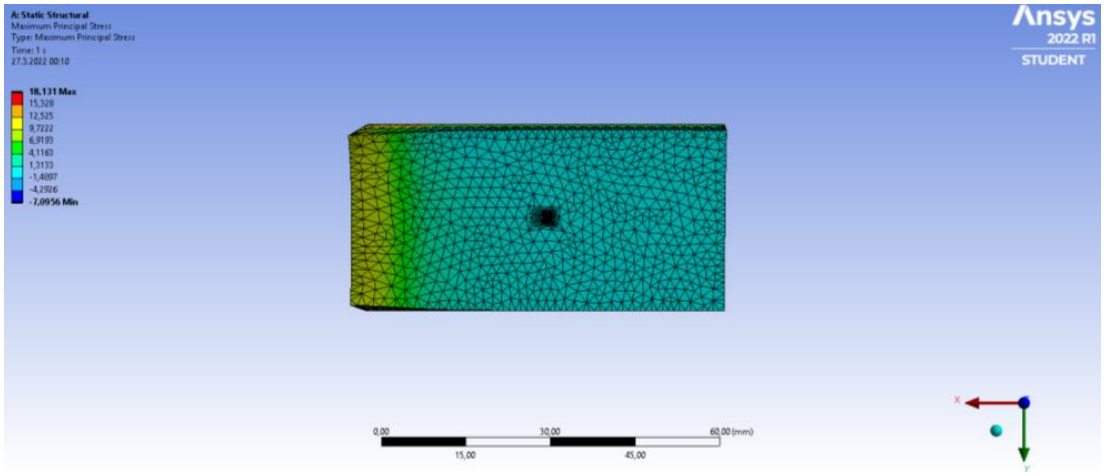
Şekil 3.14 Sinyal 1 Ansys simülasyon sonucu



Şekil 3.15 Sinyal 2 Ansys simülasyon sonucu



Şekil 3.16 Sinyal 3 Ansys simülasyon sonucu



Şekil 3.17 Sinyal 4 Ansys simülasyon sonucu

Tablo 6. ANSYS ve analitik hesap kıyaslaması

	Analitik Hesap		ANSYS	
	Minimum Gerilme (kPa)	**Maksimum Gerilme (kPa)**	**Minimum Gerilme (kPa)**	**Maksimum Gerilme (kPa)**
1. Anlık Değer	-0,645	-13,78	-0,99	-5,1677
2. Anlık Değer	0,436	-24,227	-11,23	-24,08
3. Anlık Değer	4,985	8,705	4,5	7,98
4. Anlık Değer	-3,348	18,741	-1,49	4,11

Görüldüğü üzere 1. ve 4. anlık zamanlar için analitik ve sayısal veriler karşılaştırıldığında nicelik olarak bir tutarlılık söz konusu değildir. Ancak nitelik olarak tutarlı olduğu kısmen söylenebilir. 2. anlık zamanda maksimum gerilmeler analitik ve sayısal veriler ışığında incelendiğinde nicelik olarakta tutarlılık da sağlanmaktadır. Analitik ve sayısal olarak bulunan maksimum ve minimum asal gerilmelerin 3. anlık zamanda gayet uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

ANSYS analizi ile bulunan sonuçlar kullanılarak Paris-Erdoğan denklemi yardımı ile ömür hesabı tekrarlandığında ise malzemenin plastik deformasyona kadar geçen çevrim süresinin 1258 olduğu görülmüştür. ANSYS ile analiz yapılırken LCD'nin cihaz üzerindeki diğer parçalarla olan montaj koşulları da analize dahil edildiğinden dolayı çatlak ucundaki asal gerilmeler daha net analiz edilebilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma sonucunda başlangıç çatlağı bulunan LCD'nin yol boyunca maruz kaldığı titreşimlerden dolayı çatlak ucunda oluşan asal gerilme değerleri analitik olarak hesaplanmış olup ANSYS üzerindeki sayısal analizler ile karşılaştırılmıştır.

ITO cam için kullanılan analitik hesaplamada kırılmanın gerçekleşeceği noktaya kadar gerekli olan çevrim sayısı 1258 olarak bulunmuştur. Paris–Erdoğan denklemi göz önünde bulundurulduğunda malzeme ömrünün arttırılabilmesi için malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olan kritik çatlak boyu ($\boldsymbol{a_c}$) arttırılarak LCD'nin enerji sönümleme kapabilitesi arttırılabilir. Bunun için ise tokluk değerleri daha yüksek olan IZO cam kullanılması önerilmiştir. Bu kapsamda Bölüm 3' te bahsedilen ANSYS Smart Crack Growth analizi, enerji sönümleme kapabilitesi daha yüksek olan IZO cam ile tekrarlanarak çatlak ucundaki asal gerilme değerleri bulunmuştur.

Tablo 7. IZO cam Ansys sonuçları

		ANSYS	
		Minimum Gerilme (kPa)	**Maksimum Gerilme (kPa)**
1.	**Anlık Değer**	0,21	-5,02
2.	**Anlık Değer**	3,38	-4,19
3.	**Anlık Değer**	-1,12	2,44
4.	**Anlık Değer**	-1,5	3,3

IZO cam için bulunan gerilme değerleri Bölüm 2.7'de bahsedilen ve Ansys analizinde de kullanılan Paris-Erdoğan denklemi ile çözüldüğünde camın kırılması için gerekli olan çevrim sayısının 4804 olduğu hesaplanmıştır. Bu çevrim sayısı ITO camda 1258 iken IZO cama geçildiğinde 4804'e çıkarak mevcut yol profillerinde etkiyen titreşimler altında camın kritik çatlak boyuna ulaşma süreci geciktirilerek malzeme üzerinde herhangi bir eksik segment hatası oluşmadan ürünün müşteriye ulaştırılması sağlanabilmektedir.

Yüzey üzerinde farklı noktalarda meydana gelmiş başlangıç çatlaklarının sisteme etkiyen titreşimlerden kaynaklı yorulma davranışları, malzeme dislokasyonları da göz önünde bulundurarak ayrı bir akademik çalışma olarak incelenebilir. Bu sayede LCD' lerde köşe ve yüzey çatlaklarının yorulma üzerindeki etkileri malzeme dislokasyonları da göz önünde bulundurularak çalışma genişletilebilir.

ITO cam için yapılan analitik hesaplamalar, IZO cam için de değerlendirilerek sonraki akademik çalışmalarda referans olması için literatüre kazandırılabilir.

Bir başka açıdan ise ivme-gerilme dönüşüm denklemleri kullanılarak elde edilen gerilmelerden kaynaklı LCD üzerinde birim zamanda meydana gelen yer değiştirme miktarları, sistem elemanı üzerinde farklı çatlakları meydana getirebilir. Bu durum, LCD'nin cihaz üzerindeki tasarımı yapılırken LCD'yi tutan sistem elemanlarından LCD'ye aktarılan enerjilerin hangi noktalarda sönümlenmesi gerektiğini açıkça ortaya koyacaktır. Bahsi geçen tüm bu noktalar yapılan tez çalışmasından yola çıkılarak detaylandırılabilir ve literatüre yeni çalışmalar kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Wyzgoski MG, Novak GE, Simon DL. Fatigue of engineering plastics,New York, 1980, 67s

[2] Dowling N. E., Mechanical Behaviour of Materials, Prentice Hall, ABD, 1999 , 24s

[3] Meyers M. A., Chawla K. K.,"Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall, 1999 , 10s

[4] Saatçı G. E., Tahralı N., Birikimli Hasar Teorileri ve Hareket İletim Elemanına Uygulanması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, İstanbul, 2003, 9s

[5] Saatçı G. E., Dinamik Kırılmalarda Birikimli (Kümülatif) Hasar Metotlarının İncelenmesi ve GTD Model 4x4 Askeri Aracın Aktarma Elemanlarına Uygulanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002, 6s (Yüksek Lisans Tezi)

[6] Ay İ., Kırılma Mekaniği, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 9s

[7] Paris PC, Erdogan F.A, critical analysis of crack propagation, Journal of Basic Engineering, 1963, 6s

[8] Anderson T.L., Fracture Mechanics: Fundamentals and Application, CRC Boca Raton, 1995, 621s

[9] Çakır E., Parçacık Takviyeli AL Matrisli Kompozitlerin Yorulma Çatlak İlerleme Hızı ve Yorulma Çatlak İlerleme Mekanizmaları, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2016, 100s (Yüksek Lisans Tezi)

[10] Pierron F., Fletcher L., Generalized Stress–Strain Curves for IBII Tests on Isotropic and Orthotropic Materials, Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2019, 14s

[11] Öztürkler C., Yüzey çatlaklarının yorulması, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 1998, 111s (Yüksek Lisans Tezi)

[12] Zhu F., Zeng K., Hu J., Shen L., Zhang K., Gong H., Investigation of techanical properties of transparent conducting oxide thin films, Institute of Materials Research and Engineering, Singapore, 2003, 6s

[13] Pierron F., Fletcher L., High-Strain Rate Interlaminar Shear Testing of Fibre-Reinforced Composites Using an Image-Based Inertial Impact Test, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2018, 6s

[14] J. Lukács, Fatigue crack propagation limit curves for metallic and non-metallic materials, University of Miskolc, Department of Mechanical Engineering, Hungary, 6s