

Yapısal Döküm Parçaların Yorulma Ömrünü Etkileyen Ana Faktörlerin Ağır Ticari Araç Fren Sistemlerinde İncelenmesi

Özgün Cem YILMAZ^{1*} , Bora GÜNTAY¹ , İbrahim Can GÜLERYÜZ¹ 

¹ Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No:4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/10/2023
Düzeltilme: 27/12/2023
Kabul: 09/02/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araç
Fren Sistemi
Yapısal Döküm Parça
Yorulma Testi
Tekrarlı Yükleme
Sonlu Elemanlar Analizi

Article Info

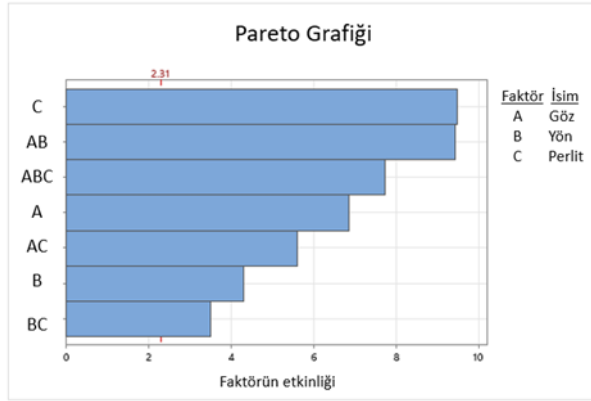
Research article
Received: 02/10/2023
Revision: 27/12/2023
Accepted: 09/02/2024

Keywords

Heavy Commercial Vehicle
Brake System
Structural Casting
Component
Fatigue Test
Cycling Loading Test
Finite Element Analysis

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Deney tasarımı metodu kullanılarak köprü parçasının yorulma ömrüne etki eden faktörler incelenmiştir. / The factors influencing the fatigue life of the bridge component were investigated using the design of experiment method.



Şekil A: Pareto grafiği / Figure A: Pareto graph

Önemli noktalar (Highlights)

- Sayısal gerilme analizi ile fiziksel testlerde görülen hasarların karşılaştırılması. / Comparison of damage observed in physical experiments with numerical stress analysis.
- Malzeme mikroyapısının yorulma ömrüne etkisi. / The influence of material microstructure on fatigue life.
- Döküm parçalarının imalat kalıbı içindeki yerleşiminin yorulma ömrüne etkisi. / The impact of casting figure orientation on fatigue life.

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, fren ana komponentlerin yorulma ömrünü belirleyen faktörleri araştırmak ve bu faktörleri laboratuvar testleri aracılığıyla incelemektir. / The aim of this study is to investigate the key factors determining the fatigue life of main components in brake systems and investigate these factors through laboratory experiments.

Özgünlük (Originality): Yorulma testlerinin basitleştirilmiş numuneler yerine gerçek fren parçaları üzerinde yapılması ve buna karşın sınır şartlarının stabil olarak kontrol altında tutulması çalışmanın özgün yönüdür. / The original contribution of this study lies in conducting fatigue tests on actual brake components rather than simplified samples, while simultaneously maintaining stable control over boundary conditions.

Bulgular (Results): Sonlu elemanlar analizi ile parça üzerinde çatlak görülen bölgenin uyumlu olduğu görülmüştür. Yorulmaya en fazla etki eden faktörlerin perlit oranı ve kaliper yönü ile köprü döküm gözünün kombinasyonu olarak bulunmuştur. / The finite element analysis and experimental results are compatible with each other. The factors that have the greatest impact on the bridge fatigue life have been found to be the pearlite ratio and the orientation of the caliper combined with the bridge casting cavity.

Sonuç (Conclusion): Çalışmada frenlerde kullanılan bir yapısal döküm parçanın yorulma ömrüne etki eden ana parametreler sıralanmıştır. / The main parameters affecting the fatigue life of a structural cast part used in brakes was inspected in the study.



Yapısal Döküm Parçaların Yorulma Ömrünü Etkileyen Ana Faktörlerin Ağır Ticari Araç Fren Sistemlerinde İncelenmesi

Özgün Cem YILMAZ^{1*} , Bora GÜNTAY¹ , İbrahim Can GÜLERYÜZ¹ 

¹ Ege Fren Sanayii ve Ticaret A.Ş., 35060 Kemalpaşa Mah. 7405/2 Sokak No: 4 Pınarbaşı Bornova/İZMİR

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 02/10/2023
Düzeltilme: 27/12/2023
Kabul: 09/02/2024

Anahtar Kelimeler

Ağır Ticari Araç
Fren Sistemi
Yapısal Döküm Parça
Yorulma Testi
Tekrarlı Yükleme
Sonlu Elemanlar Analizi

Öz

Çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan havalı disk frenin ana döküm parçalarından biri olan köprünün servis ömrünün artırılabilmesi için yorulma ömrüne etkileyen faktörler incelenmiştir. Fren parçasına, gerçek çalışma koşullarında etki eden tüm sınır koşulları göz önüne alınarak, yorulma ömrüne en çok etki edeceği öngörülen üç faktör için iki kademeli faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılmış ve her bir faktör için iki farklı seviye belirlenerek numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Parça üzerindeki gerilmelerin yüksek olduğu kritik bölgelerin belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Testlerde, çatlağın ilk oluştuğu anda yakalanması için sayısal yöntem ile belirlenen, gerilmenin yüksek olduğu ve parçaların kırılması beklenen bölgelere tuzak teli uygulanmıştır. Hazırlanan test numuneleri mekanik hasar meydana gele kadar yorulma testine tabi tutulmuş ve çatlak oluşan çevrimler detaylı analiz edilmiştir. Analiz sonucunda köprü parçasının yorulma ömrüne en fazla etki eden iki faktör sırası ile “perlit oranı” ve “kaliper yönü ile köprü döküm gözü” kombinasyonu olarak bulunmuştur. Perlit oranı yüksek olan köprü numunelerinin yorulma ömürlerinin, düşük olan numunelere göre 3,1 kata kadar; uygun kaliper yönü ve köprü döküm gözü kombinasyonu seçildiği durumda ise 3,4 kata kadar arttığı tespit edilmiştir.

Investigation of the Main Factors Affecting the Fatigue Life of Structural Casting Parts in Heavy Commercial Vehicle Brake Systems

Article Info

Research article
Received: 02/10/2023
Revision: 27/12/2023
Accepted: 09/02/2024

Keywords

Heavy Commercial
Vehicle
Brake System
Structural Casting
Component
Fatigue Test
Cycling Loading Test
Finite Element Analysis

Abstract

In the study, factors affecting the fatigue life of the bridge, which is one of the main casting components of an air disc brake used in heavy commercial vehicles, were investigated to enhance its service life. Considering all the boundary conditions affecting the brake under real operating conditions, a two-level factorial experimental design method was used for the three factors predicted to have the most effect on fatigue life and two different levels were determined for each factor and specimens were produced. Structural analyses were conducted using the finite element method to identify critical regions with high stresses on the part. In the tests, to capture the moment of crack initiation, a tripwire was applied to the areas where the stress was high and the part failure was expected, as determined by numerical methods. Prepared test samples were subjected to fatigue testing until mechanical damage occurred and cycles where cracks formed were analysed in detail. As a result of the analysis, the two factors found to have the greatest impact on the fatigue life of the bridge were identified as "pearlite ratio" and the "combination of caliper orientation and bridge casting cavity". It was observed that the fatigue life of bridge samples with a high pearlite ratio increased up to 3.1 times compared to low-pearlite samples and when an appropriate combination of caliper orientation and bridge casting cavity was selected, it increased up to 3.4 times.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağır ticari araçlar üzerinde kullanılan fren sistemleri bu araçların yüksek hızda seyretme yetenekleri ve yüksek tonajları nedeniyle emniyet açısından hayati bir öneme sahiptir. Frenlerin yüksek tork gereksinimini araç ömrü boyunca

sağlayabilmesi için yapısal olarak bütünlüğünü koruyabilmesi gerekmektedir [1, 2]. Bu şartları sağlayabilmek için yüksek sıcaklıklarda kullanıma daha uygun olan disk tipi frenler binek araçlarda, hafif ve ağır ticari yol araçlarında tercih edilmektedir [3].

Frenlerin hasar görmesi halinde araçta sağa veya sola çekme, şerit dışına taşma, gerekli frenleme ivmesini oluşturamama gibi sorunlar görülebilmektedir. Normal kullanımda frenler arasında oluşabilecek fren kuvvetleri düşük olduğundan sürücünün bunu direksiyon girdisi ile bertaraf etmesi beklenirken, ani kırılma ve fren kaybı durumunda kaza ihtimali artmaktadır [4].

Frenlerde en çok yapısal hasarlara yol açan koşul, tekrarlı yükler altında çatlak oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesi ile kesitlerin zayıflayarak ani kırılma meydana gelmesidir [5, 6].

P. Canzar ve ark. (2012), malzeme içerisindeki Mn, Ni ve Mg içeriğini değiştirerek dört farklı, küresel grafitli dökme demir numune grubu hazırlamış ve numunelere uyguladıkları yorulma testlerinde, perlit oranının %10 ve üzerinde olması halinde yorulma ömründe azalma olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada ayrıca grafitlerde küreselleşme oranı arttıkça, yorulma mukavemetinde iyileşme olduğu ortaya konmuştur. Çatlakların genel olarak ferrit fazı ve içerisindeki grafitlerin sınırlarından başladığı, ferrit fazı içerisinde kırık çizgiler halinde ilerlediği, perlit fazında ise düz çizgiler halinde ilerlediği gözlemlenmiştir.[7].

D'Agustino ve ark. (2016) küresel grafitli dökme demir malzeme üzerinde yaptıkları çalışmalarında, perlit ve ferrit oranının çatlak ilerlemesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada GJS 350-22 (ferritik), GJS 500-7 (ferritik-perlitik) ve GJS 700-2 (perlitik) olmak üzere üç malzeme karşılaştırılmış; ferrit oranı yükseldikçe çatlak ucu körelmesinin arttığı ve çatlak ilerlemesinin azaldığı gözlemlenmiştir. [8].

M. Benedetti ve ark. (2019) çalışmalarında GJS-400 tipi malzemenin katılma süresi, Cu ve Mg oranlarını değiştirerek dört farklı numune hazırlamış, bu faktörlerin faz dağılımı ve grafit nodül yapısına etkilerini incelemiştir. Numuneleri karşılaştırmak için çekme, burulma yorulması ve tokluk testleri gerçekleştirilmiştir. Ferritik yapının sünekliği arttırmasına karşın çekme ve yorulma dayanımlarını düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, malzemenin kimyasal kompozisyonu ve kalıpta katılma rejiminin mikroyapıdaki ferrit fazı oranını etkilediğini vurgulamışlardır [9].

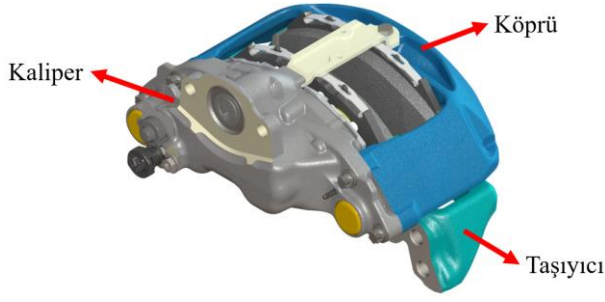
Vantadori ve ark. (2021) GJS 400-18 (ferritik) ve GJS 700-2 (perlitik) küresel grafitli dökme demir numuneler ile tek ve çok eksenli yorulma testleri gerçekleştirmiş ve tüm yüklem koşullarında yüksek perlit fazı oranına sahip numunenin daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğu sonucuna

varmıştır. Vandadori ve ark. ayrıca kendi literatür araştırmalarında buldukları çelişkili sonuçlara değinmiş; malzeme fazı ve grafit morfolojisinin, malzeme yorulması ve çatlak ilerlemesine etkisi konusunun araştırılmaya değer olduğunu vurgulamışlardır [10].

Literatür araştırmasından görüldüğü üzere perlit oranının yorulma ömrü, çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, ağır ticari araçlarda kullanılan havalı disk frenin ana döküm parçalarından biri olan köprünün servis ömrünün arttırılabilmesi için yorulma ömrüne etkiyen faktörler incelenmiştir. Yorulma ömrüne etki eden faktörlerden malzeme mikroyapısı ve parçaların döküm kalıbındaki yerleşimi göz önünde bulundurulmuştur. Literatür araştırmasındaki çalışmalardan farklı olarak, basit şekilli test numuneleri yerine doğrudan 22,5" jant ölçüsü ile uyumlu olan disk fren kompleksi üzerinde çalışılmış ve gerçek yüklem koşullarına yakın bir test tasarımı kullanılmıştır.

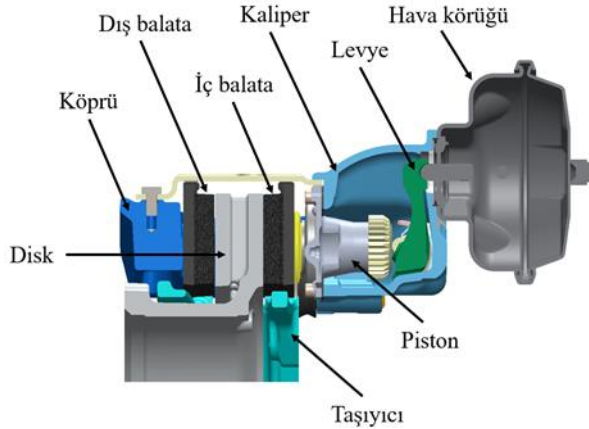
Çalışmanın genel düzeni şu şekildedir: Bölüm 2'de öncelikli olarak parça üzerindeki gerilmelerin yüksek olduğu kritik bölgelerin belirlenebilmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Köprü parçası üzerindeki kritik gerilme bölgelerine tuzak teli uygulanarak iki kademeli faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle belirlenen faktörler göz önünde bulundurulmuş yorulma testleri yapılmıştır. Bölüm 3'te sayısal ve test sonuçları detaylı bir şekilde analiz edilerek faktörlerin etkinliği sıralanmıştır. Bölüm 4 çalışmanın genel sonucunu içermektedir.

İnceleme konusu olarak kayar kaliperli havalı disk frenin yapısal parçalarından birisi olan köprü parçası seçilmiştir. Köprü, frenin yapısal çerçevesini oluşturan üç ana parçadan birisidir. Köprü, kalipere montajlanarak dış balatayı yerinde tutmakta ve fren uygulandığında dış balatayı tahrik ederek disk yüzeyine basmasını sağlamaktadır. Kaliper, frenin ayar mekanizmasını ve pistonlarını barındırmaktadır. Taşıyıcı ise kaliper ve köprünün araç dingiline montajlanmasını sağlamaktadır. Disk freni oluşturan kaliper, köprü ve taşıyıcı kısımları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Disk fren (Disc brake)

Fren üzerinde bulunan hava körüğüne basınçlı hava dolduğunda, itici pim ile levreyi ileri doğru hareket ettirmektedir. Pistonlar iç balatayı diske doğru bastırmakta ve fren, kılavuz pimler üzerinde kayarak dış balatayı diske bastırarak aracın durmasını sağlamaktadır [11]. Frenin kesit görünüşü Şekil 2’de verilmiştir. Frenleme esnasında köprü parçasına piston ekseninde doğrusal yük ve disk dönme ekseninde frenleme torku etki etmektedir. Frenleme torkunun büyük kısmı balatalar aracılığı ile taşıyıcı parçasına aktarıldığı için, çalışma sadece piston eksenindeki yüklere odaklanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Havalı disk fren kesiti (Cross-section of an air disc brake)

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

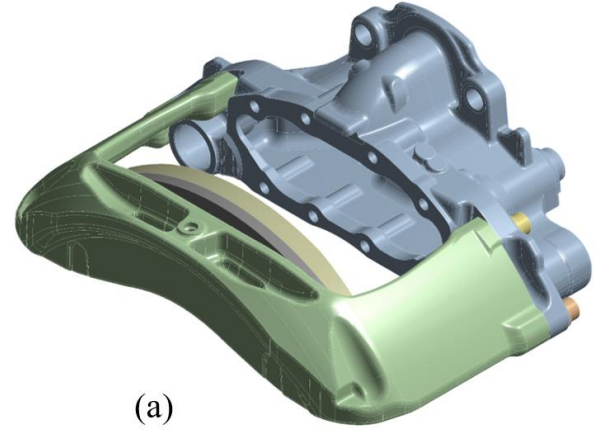
2.1 Sayısal Çalışma (Numerical Study)

Güleriyüz ve Yılmaz (2019) tarafından 22.5” havalı disk fren kaliper yuvası ve köprüsü üzerindeki kritik gerilme bölgelerinin belirlenebilmesi amacıyla parçanın azami yük altındaki sınır koşulları göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar (SE) analizleri gerçekleştirilmiştir [12]. Köprü parçası üzerindeki kritik gerilme bölgelerinin tespit edilebilmesi amacıyla SE analizleri Ansys Mechanical 19.2 yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, analiz tipi olarak yapısal analiz seçilmiştir.

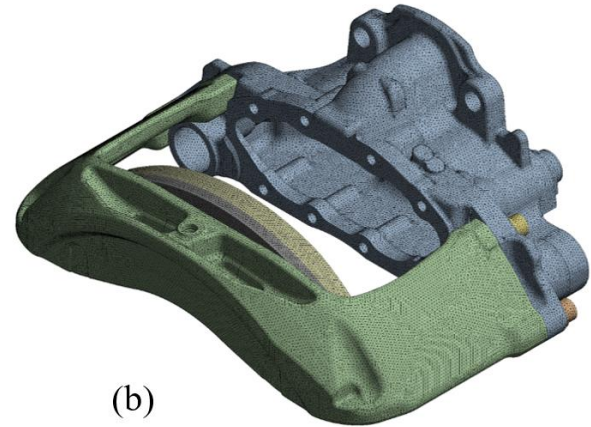
Literatürdeki benzer çalışmalarda da binek ve ağır hizmet araçlarında kullanılan havalı disk fren kaliperinin ve kampanalı frenlerdeki fren tablasının SE analizlerinde analiz tipi olarak yapısal analiz yöntemi tercih edilmektedir [12 - 17].

SE analiz modeline montaj ve hizmet koşulları göz önünde bulundurularak köprü, kaliper yuvası, köprü ile kaliper yuvasını birbirine iliştiren bağlantı cıvataları, dış balata dahil edilmiştir. Şekil 3-a’da yer alan üç boyutlu model Ansys Mechanical 19.2 yazılımına aktarılmıştır. 1.300.000 düğüm noktası ve 800.000 elamandan oluşan tetrahedral yapıdaki sonlu elemanlar ağı Şekil 3-b’de verilmektedir.

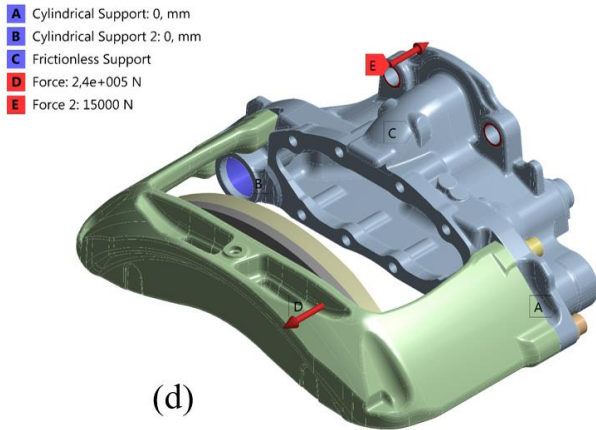
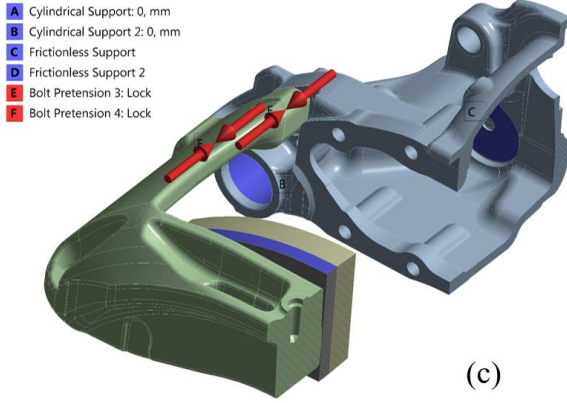
Kaliper yuvası ve köprü malzemesi olarak EN-GJS-500 küresel grafitli dökme demir; balata sırt sacı ve bağlantı cıvataları malzemesi olarak yapısal çelik malzeme modeli seçilmiştir. Seçilen malzemeler ait elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Döküm parçalardan çıkarılan çekme deneyi gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisinden faydalanılarak köprü ve kaliper yuvası için doğrusal olmayan EN-GJS-500-7 malzeme modeli oluşturulmuştur (Şekil 4).



(a)



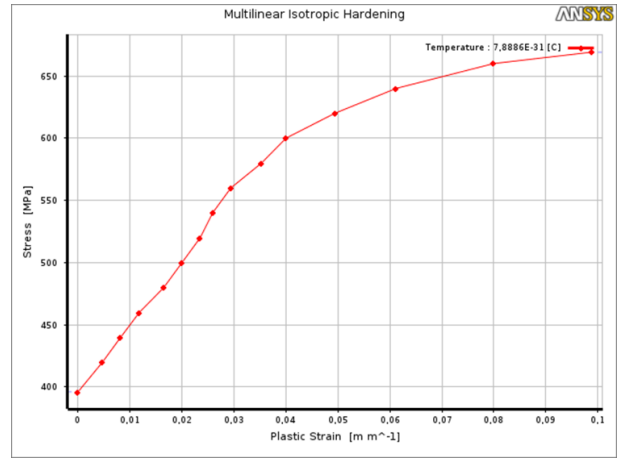
(b)



Şekil 3. (a) SE modeli, (b) SE ağ yapısı, sınır koşulları (c) 1. analiz adımı, (d) 2. analiz adımı. ((a) FE model, (b) mesh, boundry conditions (c) 1st step of analysis, (d) 2nd step of analysis)

Tablo 1. Malzeme özellikleri [12] (Material properties)

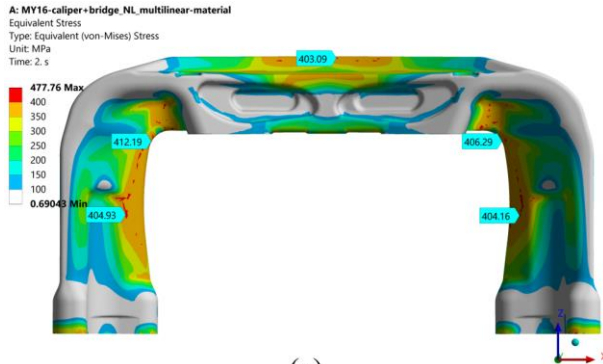
Malzeme	E (Gpa)	v (-)
EN-GJS-500-7	170	0.29
Yapısal çelik	200	0.30
Balata malzemesi	0.998	0.29



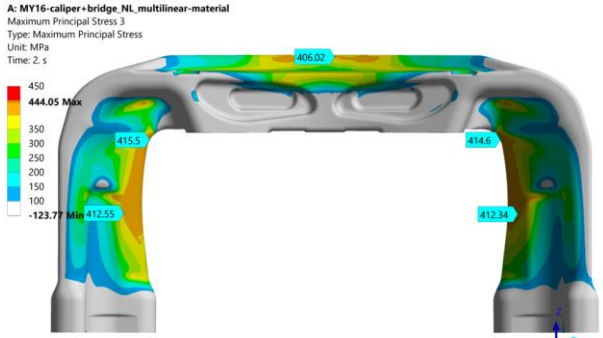
Şekil 4. EN-GJS-500-7 gerilme – plastik şekil değiştirme grafiği [12]. (EN-GJS-500-7 stress-strain curve)

SE analizi iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda köprü – kaliper yuvası bağlantı civatalarının sıkma torklarının oluşturduğu cıvata ön gerilme kuvvetleri, ikinci adımda ise disk fren mekanizmasının ürettiği sıkıştırma kuvveti ve fren körüğü girdi kuvvetinin kaliper yuvası üzerindeki reaksiyon kuvveti uygulanmıştır. Disk fren deneysel kuvvet ölçümlerinde 15 kN girdi körük kuvvetine karşılık fren mekanizması tarafından karşılık balatalara 240 kN büyüklüğünde sıkıştırma kuvveti uygulandığı görülmüştür. Bu nedenle, ikinci analiz adımında dış balata yüzeyine dik doğrultuda 240 kN büyüklüğünde ve körük bağlantı somunlarının kaliper yuvasına bastığı yüzeylerden 15 kN büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Kılavuz pimlerin kaliper yuvası üzerinde yatakladığı yüzeylere silindirik mesnet; levyenin kaliper yuvasına yatakladığı yüzeylerden sürtünmesiz mesnet tanımlaması ile parçalar sınırlandırılmıştır. Balata sırt sacının yan yüzeylerine sürtünmesiz mesnet tanımlanması yapılarak, dış balata sıkıştırma yönünde kılavuzlanmıştır. SE analizlerine ait sınır koşulları Şekil 3-c ve 3-d’de özetlenmektedir. Diğer SE analiz detayları [12]’de verilmektedir.

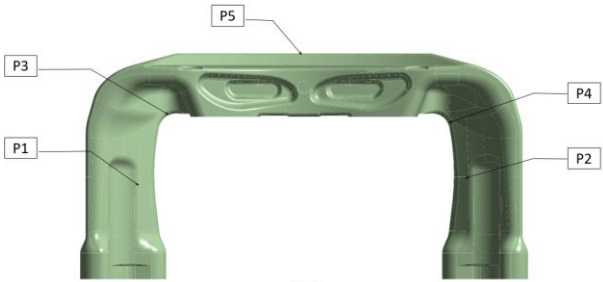
SE analizleri sonucunda köprü parçası üzerindeki von-Mises ve maksimum asal gerilme dağılımları elde edilmiştir (Şekil 5). Mekanik olarak zorlanan parçalarda yapısal hasara çeki gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerde rastlanmaktadır. Bu nedenle von-Mises gerilmelerinin yüksek olup, aynı yerde maksimum asal gerilmelerin düşük olduğu lokasyonlarda (bası durumu) mekanik hasar oluşma olasılığı düşük olarak değerlendirilmektedir. Yorulma testlerinde köprü üzerindeki mekanik hasarın P1-P5 ile ifade edilen kritik gerilme bölgelerde meydana gelmesi beklenmektedir (Şekil 5-c).



(a)



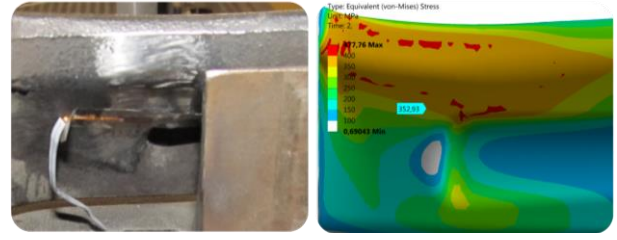
(b)



(c)

Şekil 5. Köprü üzerindeki, (a) von-Mises, (b) maksimum asal gerilme dağılımları, (c) kritik gerilme bölgeleri (On bridge, (a) von-Mises, (b) maximum principle stress distribution (c) critical stress regions)

Gerilim ölçer uygulanan kritik bir bölgedeki gerçek gerilme değerinin, yapısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için ilk olarak; Şekil 6'da gösterildiği gibi köprü üzerinde gerilim ölçer uygulaması için seçilen noktalar ile aynı pozisyonda düğüm noktaları seçilerek bu noktalardaki von-Mises gerilme değeri SE yazılımına hesaplatılmıştır. Gerilim ölçer yerleştirilen bölgelerden 30'ar çevrim için elde edilen gerilme değerlerinin ortalaması alınarak; SE analiz sonucu ile karşılaştırılmak üzere Tablo 2'de verilmiştir. Sayısal ve test sonuçları arasındaki maksimum fark %3,4 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, sayısal analiz modelinin gereken güveni sağladığı görülmektedir.



Şekil 6. Köprü üzerine gerilim ölçer yerleştirilen bölgedeki gerilme sonuçları [12] (The stress results in the region where strain gauges are placed on the bridge)

Tablo 2. Köprü üzerinde gerilim ölçer yerleştirilen bölgedeki sayısal ve test sonuçlarının karşılaştırılması [12] (Comparison of numerical and experimental results in the region where strain gauges are placed on the bridge)

Sayısal sonuç (MPa)	Test sonucu (MPa)	Fark (%)
352,93	365,52	% 3,4

2.2 Deneysel Çalışma (Experimental Study)

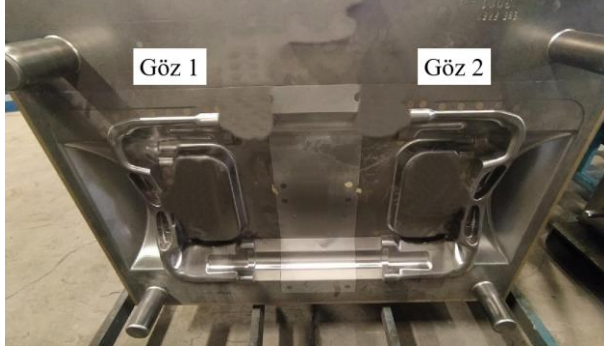
Sonlu elemanlar ile modelleme çalışmalarının ardından deneysel doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, frenin köprü parçasının ömrü üzerinde üç farklı faktörün etkisi incelenmiştir. Bu faktörler; kaliper yönü, köprü döküm gözü ve perlit oranı olarak belirlenmiştir. Bu seçim yapılırken önceki kampanalı ve disk frenlerde kullanılan döküm parçalarının yorulma testlerinde parça ömürlerine etki ettiğinden şüphelenilen ve kontrol altında tutulabilecek faktörler göz önünde bulundurulmuştur ve faktörlerin etkinliği araştırılmıştır. "iki kademeli faktöriyel deney tasarımı" yöntemi kullanılarak, her bir faktör için Tablo 3'te gösterildiği şekilde 2 farklı değer belirlenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Kaliper yönü için sağ ve sol, köprü döküm gözü için göz 1 ve göz 2 seçenekleri kullanılmıştır. Perlit oranı ise %50 perlit ve %90 perlit olarak iki ayrı değer üzerinden incelenmiştir.

Tablo 3. Yorulma ömrüne etki eden faktörler (Factors affecting the fatigue life)

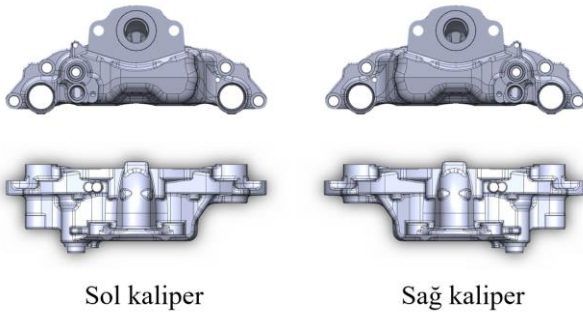
Seviye	Köprü döküm gözü (Faktör - A)	Kaliper yönü (Faktör - B)	Perlit oranı (Faktör - C)
-	Göz 1	Sol	% 50
+	Göz 2	Sağ	% 90

Döküm kalıbı içerisinde bir kalıpta iki adet köprü parçası üretiliyor olup bunlar göz 1 ve göz 2 olarak isimlendirilmiştir. Kalıbın içerisindeki dolun, besleme, soğuma, katılaşma şartlarındaki değişkenlik nedeniyle hem göz 1 ve göz 2 arasında, hem de parçalarındaki farklı kesitlerde mikroyapı farkları görülebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Köprü parçası üretiminde kullanılan döküm kalıbı (The casting mold used in the production of the bridge)

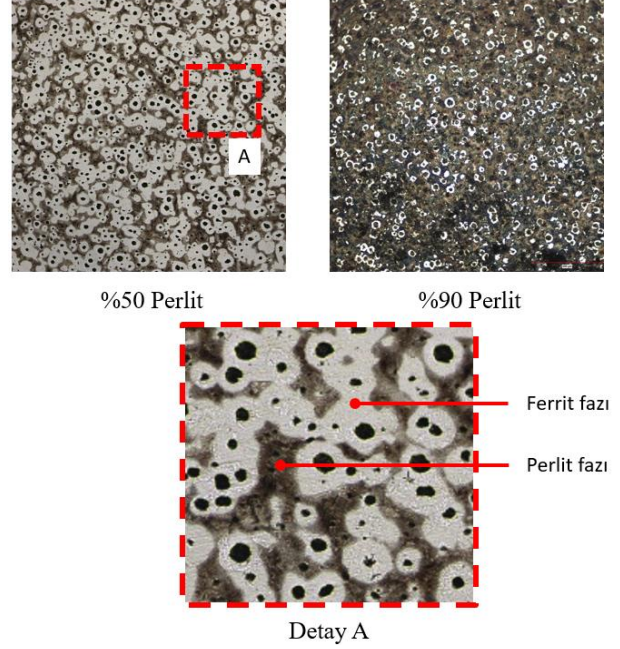
Köprü üzerindeki yorulmaya etki eden gerilmeler, köprünün bağlandığı parça olan kaliperin geometrisi ile değişmektedir. Aynı dingilin sağında ve solunda kullanılan kaliperlerin simetrik olmasına karşın farklı olmasından dolayı köprü üzerinde kırılma noktasına etki edebileceği değerlendirilmiştir (Şekil 8). Parçalar, çalışmanın devamında sağ ve sol kaliper olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 8. Kaliper yönü (Caliper orientation)

Köprü mikroyapısında perlit oranının yorulma dayanımına etkisinin incelenebilmesi için farklı proses parametreleri ile dökümler ISO 945 standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Düşük seviyeyi temsil etmesi için, standartta belirtilen minimum perlit oranı olan %50, yüksek seviyeyi temsil etmesi için perlit oranı %90 olan küresel grafitli dökme demir numuneler hazırlanmıştır [18-21] (Şekil 9). Mikroyapı görüntülerinde açık renk ile görülen bölgeler ferrit, koyu renk ile görünen bölgeler perlit fazıdır. İnceleme için Nikon MA100

ters metalografi mikroskobu kullanılmıştır. Mikroyapı numuneleri 15 mm x 15 mm büyüklüğünde kesilip, bakalit malzeme ile kalıplanarak ve 2500 kum zımpara ile parlatılmıştır. Değerlendirmeler ISO 945-1 standardına uygun olarak yapılmıştır.



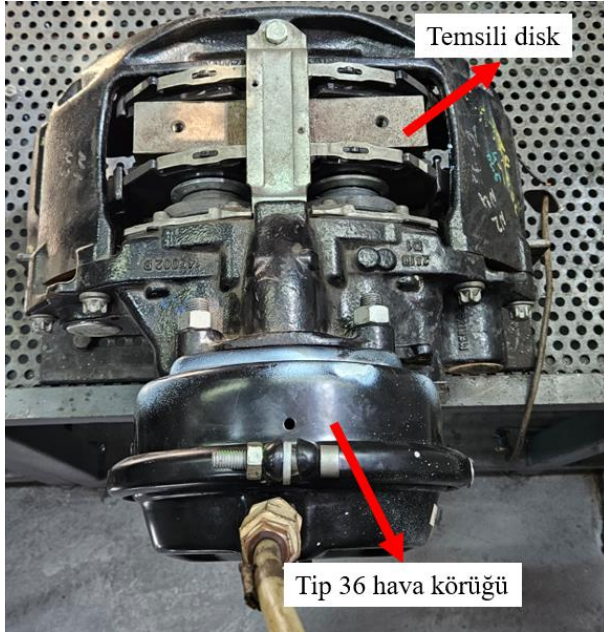
Şekil 9. Mikroyapı örnek görselleri (x100 büyütme) (Sample microstructure images (x100 zoom))

Toplamda 8 kombinasyon, Tablo 4'te verilen rastgele sıra ile gerçekleştirilerek, her bir durum için iki kez test edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen veriler, söz konusu faktörlerin köprü parçasının ömrüne olan etkisini detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır.

Tablo 4. Test sıralaması ve faktörler (Test sequence and factors)

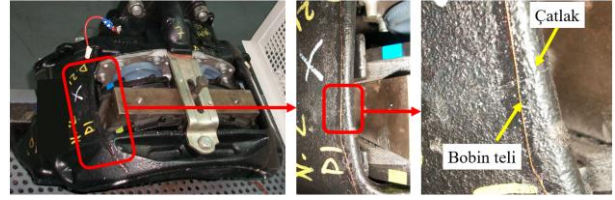
Test sırası	A	B	C
3	-	-	-
6	+	-	-
1	-	+	-
5	+	+	-
2	-	-	+
4	+	-	+
8	-	+	+
7	+	+	+
13	-	-	-
11	+	-	-
15	-	+	-
12	+	+	-
10	-	-	+
16	+	-	+
9	-	+	+
14	+	+	+

Fren üzerine etki eden yükler incelendiğinde, köprü parçasının yorulma ömrüne etki edebilecek iki ana faktör belirlenmiştir. Bunlardan piston eksenindeki doğrusal kuvvetin, dönme eksenindeki fren torkuna göre daha etkin olduğu öngörülmektedir. Bu nedenle testler fren diskinin döndürülmediği, hareketsiz olduğu koşulda yapılmıştır. Fren bir fikstür ile test masasına sabitlenmiştir. Diski temsilen disk ile aynı kalınlıkta üretilmiş bir çelik blok kullanılmıştır. Testlerde yarı aşınmış balatayı temsilen 10 mm balata sürtünme malzemesi kalınlığı olan balatalar kullanılmıştır. Freni tahrik etmek için Tip 36 (36 in² piston alanına sahip) hava körüğü kullanılmıştır (Şekil 10).



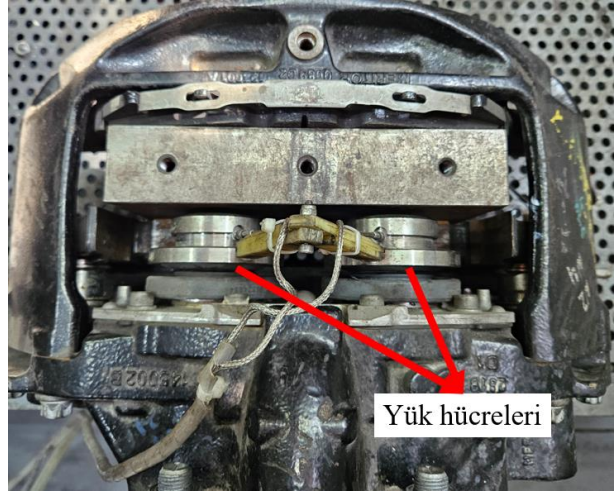
Şekil 10. Test düzeneğinin görünümü (Test setup)

Testler esnasında kırılma çevriminin yakalanabilmesi için kırılma beklenen bölgelere bobin teli yapıştırılarak test cihazına bir girdi olarak bağlanmıştır. Bobin teli üzerinden 24 V gerilim uygulanarak hat boyunca bobin teli bütünlüğü sürekli olarak test cihazı tarafından kontrol edilmektedir. Parça üzerinde kırılma oluştuğu durumda bobin teli koparak 24 V'luk gerilim kesilmekte ve test sistemini durdurmaktadır. Böylelikle kırılma çevrimi hasarın oluştuğu ilk anda belirlenmektedir. Bobin teli uygulaması ve örnek bir çatlakın yakalanması Şekil 11 ile gösterilmiştir.



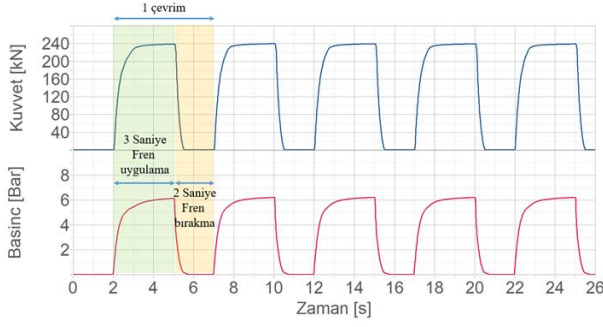
Şekil 11. Bobin teli kullanımı ile çatlakın yakalanması (Detection of cracks with the use of coil wire)

Test, hava basıncı ve uygulama süresi ayarlanabilen özel test cihazı ile sürülmüştür. Çalışmada hedef piston sıkıştırma kuvveti olarak 260 kN belirlenmiştir. Kuvvet, iç balatalar yerinden çıkarılarak Kistler 9061A yük hücrelerinin pistonlar önüne yerleştirilmesiyle ölçülmüştür (Şekil 12). Ölçümlerin ardından yük hücreleri yerine iç balata tekrar takılarak Şekil 10'da gösterildiği gibi yorulma testine devam edilmektedir.



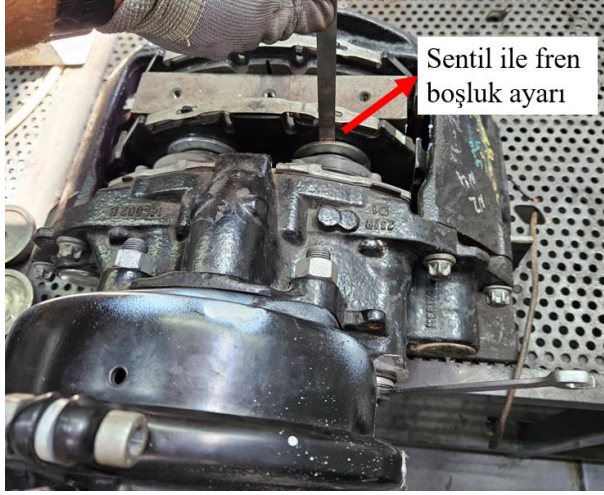
Şekil 12. Yük hücreleri ile kuvvet ölçümü (Force measurement with loadcells)

Ölçümler her 15.000 çevrimde bir kontrol edilerek, toplam kuvvette 5 kN fark görüldüğü durumda hava basıncı tekrar ayarlanmıştır. İki piston arası 25 kN fark görüldüğü durumda, farkı azaltacak yönde uygun pistonun önüne mesafe parçası olarak şim eklenerek kuvvet dengelenmiştir. Test programı, uygulama süresi 3 saniye, bırakma süresi 2 saniye olarak, toplamda bir çevrim 5 saniye sürecek şekilde ayarlanmıştır (Şekil 13). Bu süreler, pistonlar önündeki yük hücreleri yardımıyla kuvvetin maksimum ve sıfır olduğu periyot izlenerek belirlenmiştir.



Şekil 13. Zamana bağlı, parçaya uygulanan basınç değişimleri (Pressure application and release over time)

Uygun hava basıncı ayarlanmasının ardından yük hücreleri çıkarılarak ve iç balata tekrar yerine koyularak test başlatılmaktadır. Test öncesinde ve esnasında yapılan fren boşluk testi referans alınmış ve balata rotor arası boşluk ayarlanmıştır. (Şekil 14).



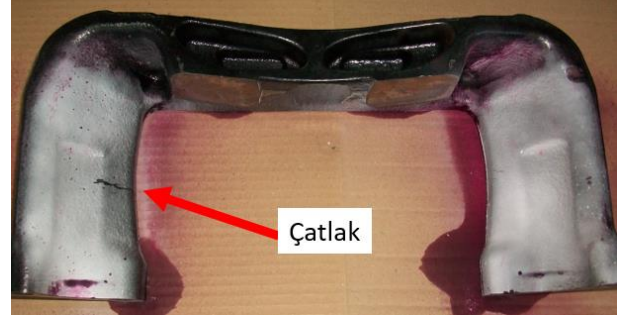
Şekil 14. Fren boşluk ayarı (Brake clearance adjustment)

Deney tasarımı çalışmaları ile belirtilen numunelerin hazırlanmasının ardından testler planlanan sırayla gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Testlerde gerinim ölçer üzerinden alınan gerilme sonuçların sayısal gerilme sonuçlarını yüksek güvenilirlikli olarak doğruladığı görülmüştür. Yorulma testlerinde köprü üzerindeki çatlak oluşumunun başladığı bölgeleri tespit edebilmek amacıyla test numuneleri, tahribatsız muayene tekniklerinden biri olan penetrant sıvısı testine tabi tutularak incelenmiştir. Köprü üzerinde çatlak oluşumunun başladığı bölgenin SE analizinde tespit edilen bölge ile uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 15). Bu çatlaklar, tane sınırlarından ve malzeme içerisinde yüzeye yakın inklüzyon, döküm boşluğu

gibi hatalardan başlamaktadır. Test boyunca çatlaklar ilerleyerek malzeme yorulmasına ve belirli bir büyüklüğe geldiğinde ani kırılmaya yol açmaktadır [22].



Şekil 15. Testlerde çatlak görülen bölge (The region where cracks are observed during testing)

Numuneler üzerinde çatlak görülen çevrimler Tablo 5'teki gibi gerçekleşmiştir.

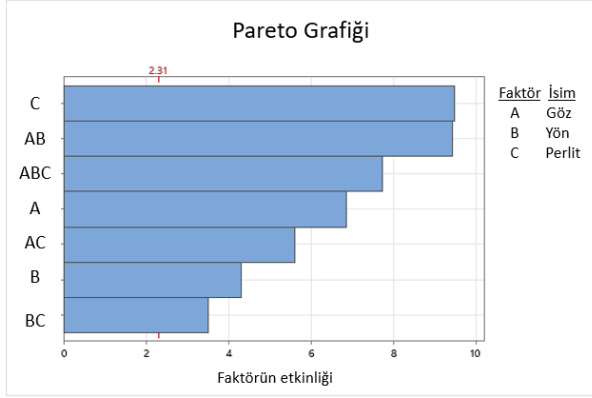
Testler tamamlandıktan sonra sonuçlar Minitab yazılımı ile analiz edilmiştir [23].

Tablo 5. Çatlak başlangıç çevrimleri (Crack propagation cycles)

Test numarası	A	B	C	Çatlak çevrimi sayısı
1	-	-	-	13.807
2	+	-	-	26.215
3	-	+	-	14.235
4	+	+	-	13.124
5	-	-	+	12.534
6	+	-	+	127.188
7	-	+	+	54.934
8	+	+	+	32.013
9	-	-	-	10.984
10	+	-	-	19.978
11	-	+	-	17.053
12	+	+	-	14.935
13	-	-	+	9.742
14	+	-	+	109.652
15	-	+	+	34.974
16	+	+	+	23.893

“A” faktörü köprü döküm gözü, “B” faktörü kaliper yönü, “C” faktörü ise perlit oranı olarak belirlenmiş ve grafiklerde bu isimlendirmeler kullanılmıştır. Pareto grafiği incelendiğinde (Şekil 16), sonuca etki edebilecek faktörlerin büyükten küçüğe sıralaması görülmektedir. Kritik değer olan 2,310 değerinin üzerinde kalan faktörlerin sonuca etkisinin kayda değer olduğu kabul edilmektedir [24]. Sonuca en fazla etki eden iki faktörün perlit oranı (etki değeri:

9,487) ve kaliper yönü & köprü döküm gözü (etki değeri: 9,439) olduğu görülmektedir.



Şekil 16. Pareto grafiği (Pareto graph)

İncelenen çalışmaların bir kısmında perlit oranındaki artışın yorulma ömrüne pozitif etki ettiği görülürken, bazı araştırmalarda ise bu sonucun negatif olabileceği de vurgulanmıştır [7 – 10]. Bu çalışma kapsamında, araçtaki kullanım koşullarına daha yakın sınır şartlarında test edilen numunelerde perlit oranının yükselmesinin parça yorulma ömrünü arttırdığı görülmüştür.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada ağır ticari araç frenlerinde kullanılan bir yapısal döküm parçanın yorulma ömrüne etki eden ana parametrelerden malzeme mikroyapısı ve döküm kalıplaması incelenmiştir.

Testlerde gerinim ölçer üzerinden alınan gerilme sonuçları ile sayısal gerilme sonuçları arasındaki maksimum fark %3,4 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle sayısal analiz yönteminin gerilme sonuçlarını yüksek güvenilirlikli olarak doğruladığı görülmektedir. Buna ek olarak, yorulma testlerinde köprü üzerindeki çatlak oluşumunun başladığı bölgenin, yapısal analizlerde tespit edilen kritik bölge ile aynı olduğu görülmektedir.

“İki kademeli faktöriyel deney tasarımı” yöntemi ile kurgulanan testlerin sonucu incelendiğinde;

- Perlit oranının yüksek olmasının yorulma ömrünü yükselttiği görülmüştür. Perlit oranı yüksek numunelerin ortalama ömrü 50.616, düşük olan numunelerin ortalama ömrü 16.291 çevrim olarak hesaplanmıştır.
- Köprünün üst kısmına gelen kolunun kaliper üzerinde kalın kesit tarafında montajlanması halinde (göz 1 & sol veya göz 2 & sağ kombinasyonu) yorulma ömrüne negatif etki ettiği görülmüştür. Göz 1 & sol kombinasyonunda ortalama 11.767

çevrim ömrü hesaplanırken, göz 1 & sağ kombinasyonunda ortalama 30.299 çevrim ömrü hesaplanmıştır. Benzer şekilde göz 2 & sağ kombinasyonunda ortalama 20.911 çevrim ömrü hesaplanırken, göz 2 & sol kombinasyonunda ortalama 70.758 çevrim ömrü hesaplanmıştır.

- Kalıplamada üst kısma gelen kol tarafında yorulma mukavemetinin daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan 16 testin 13’ü üst kol tarafından kırılmıştır.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında imalat prosesinde, parçanın homojenliğini artırılmasının ve daha yüksek perlit oranını tercih edilmesinin yapısal parçaların yorulma ömrünü yükselteceği görülmüştür.

Çalışma esnasında ayrıca parça kalıp ayırım yüzeylerindeki imalat sonrası taşlama işlemi nedeniyle kalan bozuk yüzeylerin yorulma ömrüne etki edebileceği değerlendirilmiştir. Bu etki ileri bir çalışmada ele alınacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar sağlanan test imkanlarından dolayı Ege Fren San. ve Tic. A.Ş.’ye, numunelerin hazırlanmasındaki desteklerinden dolayı Demisaş Döküm Emaye Mamülleri Sanayi A.Ş.’ye teşekkürlerini sunar.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Özgün Cem YILMAZ: Testlerin planlanması ve yapılmasında katkı sağlamıştır. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He contributed to planning and conducting the tests. He performed the writing of the article.

Bora GÜNTAY: Testlerin planlanması ve sonuçlarının yorumlanmasında katkı sağlamıştır. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He contributed to the planning of the tests and interpretation of the results. He performed the writing of the article.

İbrahim Can GÜLERİYÜZ: Sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. Makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

He conducted finite element analyses. He performed the writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Limpert, R. "Brake design and safety Third Edition", SAE; 2011.
- [2] Day, Andrew J., and David Bryant. "Braking of road vehicles". Butterworth-Heinemann, (2022).
- [3] Güleriyüz, İ. C. & Yılmaz B. "Ağır Hizmet Aracı Fren Diski Soğuma Davranışının İncelenmesi." Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 8.4 (2020): 936-947.
- [4] Tagesson, Kristoffer. "Truck steering system and driver interaction". Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2014.
- [5] Seetharamu, S., Thimmarayappa Jagadish, and Ravindra Malagi. "Fatigue, Durability, and Fracture Mechanics Proceedings of Fatigue Durability India 2019." Proceedings of Fatigue Durability India (2019).
- [6] Di Cocco, Vittorio, et al. "Damaging micromechanisms characterization in a ferritic-pearlitic ductile cast iron." Frattura ed Integrità strutturale 8.30 (2014): 62-67.
- [7] Čanžar, Predrag, Zdenko Tonković, and Janoš Kodvanj. "Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron." Materials Science and Engineering: A 556 (2012): 88-99.
- [8] D'Agostino, Laura, Vittorio Di Cocco, and Francesco Iacoviello. "Overload effects on fatigue cracks in ferritic-pearlitic ductile cast irons." Procedia Structural Integrity 2 (2016): 3369-3376.
- [9] Benedetti, M., V. Fontanari, and D. Lusuardi. "Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron." Engineering Fracture Mechanics 206 (2019): 427-441.
- [10] Vantadori, Sabrina, et al. "Fatigue behaviour assessment of ductile cast iron smooth specimens." International Journal of Fatigue 152 (2021): 106459.
- [11] "Maintenance Manual no. MM-0350 ELSA 195/225 Reaction Beam Air Disc Brake"; (2009).
- [12] Güleriyüz, İ. C. & Yılmaz B., "Ağır hizmet araçlarında kullanılan disk fren kaliper yuvasının yapısal analizi ve deneysel doğrulaması" 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019) Antalya 2019, (2019).
- [13] Tyagi, Parshant. Finite Element Analysis of Innovated Design of Racing Brake Calipers. Diss. Wichita State University, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2006.
- [14] Tirovic, M., et al. "Structural analysis of a commercial vehicle disc brake caliper." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 226.5 (2012): 613-622.
- [15] Sergeant, Nicolas, Marko Tirovic, and Jeronimas Voveris. "Design optimization of an opposed piston brake caliper." Engineering Optimization 46.11 (2014): 1520-1537.
- [16] Güleriyüz, İbrahim Can. "Lightweight design of a torque plate of Z-cam drum brake for heavy duty vehicles." International Journal of Automotive Science and Technology 3.2 (2019): 42-50.
- [17] Tekbaş, U., Güleriyüz, İ.C., Ağır Hizmet Araçlarında Kullanılan Hidrolik Disk Fren Kaliper Yuvasının Topoloji Optimizasyonu. 3rd International Symposium on Automotive Science and Technology, (2023).
- [18] ISO 945-1, "Microstructure of cast irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis", (2018).
- [19] ISO 945-2, "Microstructure of cast irons — Part 2: Graphite classification by image analysis", (2017).
- [20] ISO 945-3, "Microstructure of cast irons — Part 3: Matrix structures", (2018).
- [21] ISO 945-4, "Microstructure of cast irons — Part 4: Test method for evaluating nodularity in spheroidal graphite cast irons", (2019).
- [22] Taylor, D., and J. F. Knott. "Fatigue crack propagation behaviour of short cracks; the effect of microstructure." Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 4.2 (1981): 147-155.
- [23] Mathews, Paul G. "Design of Experiments with MINITAB". Quality press, (2004).
- [24] Anderson, Virgil L., and Robert A. McLean. Design of experiments: a realistic approach. CRC Press, (2018).