



Özel Tasarım Bir Bilyeli Değirmen Makinesine Ait Boyun Yataklarının Gerilme Analizi

Structural Stress Analysis on The Neck Bearings of A Custom Design Ball Mill Machine

H.Kürşat ÇELİK^{1*} , Çağatay ÇETİNKAYA² , Fatih AK³ , Ozan ÖZMEN⁴ 

¹ Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği, Ziraat Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-8154-6993

² Kristal Endüstriyel Mutluk Çamaşırhane Makine Pazarlama ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Antalya, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-4120-6940

³ Fark Mühendislik, Proje Danışmanlık ve İmalat, Antalya, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-5234-7363

⁴ Cantek Endüstriyel, Tasarım Büro, Antalya, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-8287-5892

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/10/2019

Kabul Tarihi : 28/05/2020

Anahtar Kelimeler

Bilyeli Değirmen
Boyun Yatakları Tasarımı
Hasar Analizi
Yüzey Yorulma Aşınması
Gerilme Analizi

Research Paper

Received Date : 17/10/2019

Accepted Date : 28/05/2020

Keywords

Ball Mill Machine
Neck Bearing Design
Failure Analysis
Pitting
Stress Analysis

Özet

Bilyeli değirmen makineleri farklı form ve boyutlardaki cevherlere istenilen form ve boyutun kazandırılmasında kullanılan cevher işleme/öğütme makineleridir. Bu tip bilyeli değirmenler malzeme işleme/öğütme işlemleri sürecinde yüksek statik ve dinamik yükler altında çalışmaktadırlar. Özellikle makineye ait mesnet yatakları yüksek yüzey gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu tip gerilmeler mesnet yatak yüzeyleri üzerinde plastik deformasyon ve yüzey yorulma aşınması (pitting) hasarlarına yol açabilmektedir. Bu hasarlar makinenin ürün işleme aşamalarında istenmeyen aksamalara, ürün ve işleme zamanı kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada boyun yatakları hasar almış özel tasarım örnek bir bilyeli değirmen ele alınmış ve tanımlanan gerçek çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yataklar üzerinde yapısal hasara neden olan gerilme dağılımları incelenmiştir. Çalışmada tanımlanan statik ve tekrarlı yüklenme koşulları altında yatakların yüzey gerilme dağılımları sonlu elemanlar analizi kullanılarak bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Statik yüklenmede simülasyon sonuçlarına göre incelenen yatak yüzeylerinde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme (von-Mises) değeri 88.906 MPa ve maksimum deformasyon değeri 0.132 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen gerilme değeri ile yatak malzemesinin akma mukavemet değeri (250 MPa) karşılaştırıldığında, ana hasar sebebinin statik durumda oluşan gerilmelerden kaynaklı olmayabileceği değerlendirilmiştir. Yataklar üzerine ön yüklemeli genel değişken tekrarlı yüklenme kabulü yapılarak yapılan yorulma hasar analizi değerlendirmesinde ise yatakların emniyetli çalışma katsayısının düşük çıkması (0.913 ve 0.629), hasarın dinamik çalışma koşullarında yüzey yorulma aşınması kaynaklı olabileceğini göstermiştir. Teknik analiz çıktılarına ek olarak, bu çalışma, makine elemanlarında oluşan hasarın incelenmesinde bilgisayar destekli simülasyon teknolojilerinin kullanılması üzerine gelecek araştırmalara katkı sağlayacak bir çalışma olarak yapılandırılmıştır.

Abstract

The ball mill machines are the types of machines used to process/grind materials (mostly natural ores) from their natural form to desired size and form. These machines are subjected to high static and dynamic loads during the material processing/grinding. Most especially, the support elements such as neck bearings may experience excessive stress distributions that may cause plastic deformation and pitting failures on the contact surfaces of the bearings. Consequently, these failures may lead to undesired disruptions in the material processing stages and loss of material and processing time. In this paper, a custom design ball mill machine with failure on its neck bearings is considered. Structural stress distributions, which might be responsible for the surface failure of the neck bearings were analysed under consideration of real operating condition. The structural stresses under static and cyclic loading conditions on the contact surfaces of the bearings were simulated through finite element analyses. The simulation results revealed that the maximum equivalent (von-Mises) stress and maximum deformation magnitudes were 88.906 MPa and 0.132 mm respectively. These results led to say that main failure reason might not be due to static loading as the maximum stress magnitude obtained from the simulation was lower than the material yield point (250 MPa), however, the cyclic loading analysis results indicated a low safety factor (0.913 and 0.629) which may be the indication of the pitting failure on the contact surfaces of the bearings under dynamic loading conditions. In addition to technical outputs exhibited specific to this study, the application procedure followed in the paper would contribute to further research studies on failure analysis of the machine elements by means of advanced computer aided engineering simulation technologies.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): hkcelik@akdeniz.edu.tr



1. Giriş

Bilyeli değirmen makineleri temel olarak cevher işleme/öğütme makineleridir. Bilyeli değirmenlerde öğütme işlemi, farklı form ve büyüklükteki cevherlerin boyutlarını küçültmekte kullanılan önemli bir teknolojik işlemidir. En bilinen uygulamaları cevherler, mineraller ve kireç taşı üzerinedir. Parçacık boyutu küçültmenin (kıırma ve öğütme) yanında karıştırma ve ayrıştırma işlemleri için de kullanılmaktadır [1]. Konstrüksiyon olarak bir bilyeli değirmen, silindirik bir haznenin her iki taraftan dönmesine izin veren bir sabitleme ile aksel olarak hareket edebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Senkron bir şekilde çalışan motorlardan gelen güç, redüktörler yardımı ile istenilen devir ve tork değerlerine ulaştırılarak, kaplin yardımı ile değirmenin silindir gövdesine döndürme momenti aktarılmakta ve silindirik değirmen gövdesinin döndürme hareketi gerçekleştirilmektedir. Burada silindirin içerisindeki başlangıç materyali (Cevher, mineral vs.) ve öğütücüler (bilyeler), kaplinin gövdeye ilettiği döndürme momenti (tork) yardımıyla, bir eksen etrafında dönmeye başlar. Ortamın kinetik enerjisi, öğütücüler yardımıyla başlangıç materyaline aktarılır ve dönme esnasında öğütme işlemi gerçekleşir [1]. Bu hareket esnasında, silindirik gövdeyi taşıyan esas elemanlar olan boyun yataklarında yüksek yüzey basıncı kaynaklı gerilme dağılımları ortaya çıkmaktadır. Bu gerilmeler ve oluşan dinamik durum sonucu, yatak yüzeylerinde hasar oluşumu gözlemlenmektedir. Silindirik gövde içerisinde bilyelerin, öğütülen cevherin ve astar plakalarının olduğu da dikkate alındığında, boyun yataklarına etkiyen toplam yükün birçok benzer büyüklükteki makine sistemlerine göre oldukça büyük bir değer aldığı görülebilmektedir.

Bu çalışmada, özel tasarım örnek bir bilyeli değirmen ele alınmış ve hasara uğramış olan boyun yatakları Sonlu Elemanlar Analizi kullanılarak statik ve tekrarlı yüklenme koşulları altında analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından alınan görsel çıktılar ve sayısal değerler, yataklar üzerinde oluşan hasar mekanizmalarının tarif edilmesinde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda benzer makine sistemlerinde ortaya çıkabilecek bu tip hasarların önüne geçilmesi adına önerilerde bulunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bilyeli Değirmen

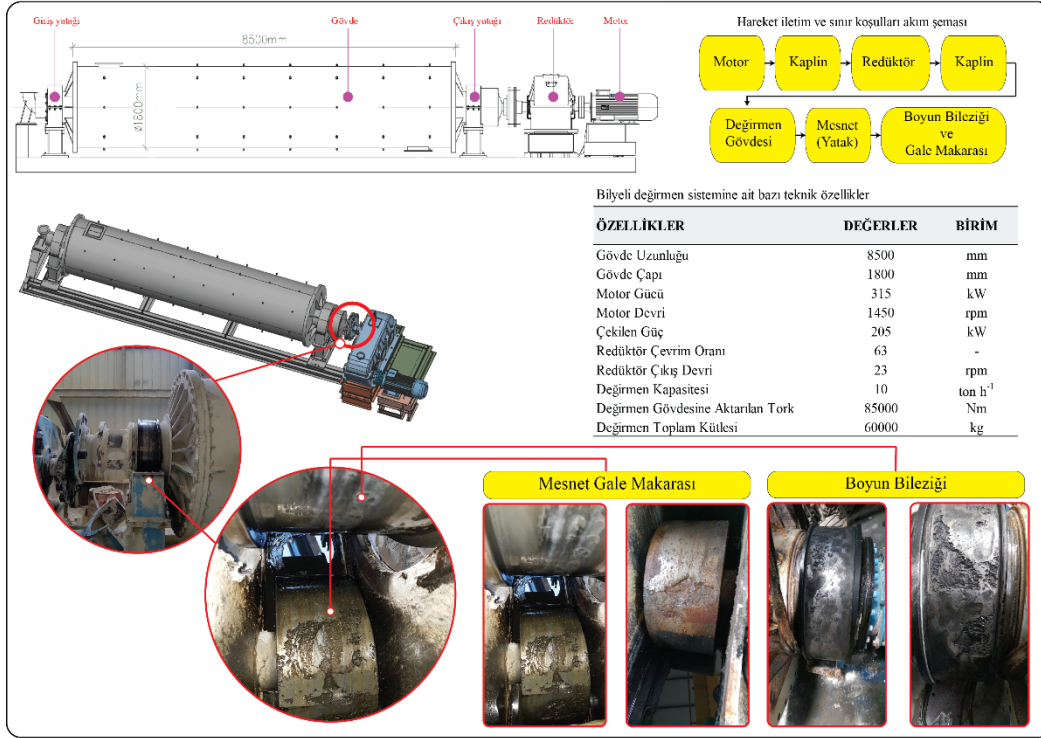
Günümüzde kullanım alanı, fonksiyonu ve teknik özellikleri paralelinde tasarımlarına göre farklılık gösteren değişik kapasite ve teknik özelliklere sahip bilyeli değirmen tipleri mevcuttur. Bu çalışmada BaSO₄ cevherinin, 3 000 µm büyüklükten 45 µm büyüklüğe kadar

öğütülmesini sağlayan özel tasarım bir bilyeli değirmen ele alınmıştır. Değirmen, öğütme işlemi için ihtiyaç duyduğu enerjiyi 315 kW gücündeki elektrik motorundan gelen hareketten almaktadır. Çevrim oranı (i)= 63/1 olan bir redüktör yardımı ile devir 23 min⁻¹ 'ye düşürülmektedir. Devri düşürülen ve tork kazandırılarak elde edilen hareket enerjisi, mekanik kaplin ile değirmen gövdesine aktarılmakta ve gövde içerisinde bulunan öğütücü bilyeler cevhere enerjisini aktararak öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sırasında statik ve dinamik yüklere bağlı olarak, silindirik değirmen gövdesini taşıma görevi gören boyun yataklama sistemi içerisinde yer alan boyun bileziği ve bu bileziği mesnetleyen gale makaraları yüzeylerinde yüksek gerilme dağılımları istenmeyen hasarlara neden olabilmektedir. Ele alınan makine sisteminde hasara uğramış makine elemanları üzerinde yapılan ilk incelemede, aşınmalar, ezilmeler ve yer yer eleman yüzeylerinden parça kopmaları olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilk gözlemler sonucunda yatak yüzeylerindeki hasar sebebinin, statik ve/veya dinamik yüklere karşı gerekli mukavemetin sağlanamaması olarak yorumlanmıştır. Ele alınan bilyeli değirmenin hareket iletimini ve sınır koşullarını tarif eden akım şeması, genel teknik resim gösterimi, bazı teknik özellikleri ve hasarlı yatak elemanlarına ait görseller Şekil 1'de verilmiştir.

2.2. Sonlu Elemanlar Analizi

İlgili makine elemanlarının yüklenme ve deformasyon davranışını fiziksel olarak gözlem yaparak belirlemek oldukça sınırlı derecede olmaktadır. Özellikle yapının büyüklüğü ve tekrarlı yüklenme şekli dikkate alındığında, yataklar yüzeylerindeki yük etkilerini, gerilme dağılımlarını daha detaylı değerlendirebilmek adına Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) kullanılarak değirmenin yüklenme durumu analiz edilmiştir.

Bilyeli değirmen boyun yatağı elemanları için gerçekleştirilen tüm FEA'lar , tanımlanan gerçek çalışma koşulları referans alınarak kurulmuştur. Bu kapsamda boyun yatağı içerisinde yer alan gövdeye sıkı geçme olarak montajlanmış boyun bileziği ve bu boyun bileziğini mesnetleyen gale makaraları için analizler gerçekleştirilmiş ve her bir eleman için tanımlanan çalışma koşulları altında, maruz kaldıkları maksimum von-Mises eşdeğer gerilme değerleri ve maksimum yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Statik analize ek olarak sistemin tekrarlı yüklenme çalışma koşulları da dikkate alınarak yorulma analizi gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizi ile, sistemin sürekli mukavemet değeri kapsamında güvenli davranıp davranmadığı analiz edilmiştir. Yatak elemanları için kurulan detaylı FEA'lar, ANSYS Workbench FEM tabanlı multi-fizik mühendislik analizi yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2].



Şekil 1. Değirmen sistemine ait bazı teknik özellikler ve hasarlı yatak elemanlarına ait görseller

Yatak düzeneğindeki elemanların detaylı FEA'larında standart FEM uygulama adımları takip edilmiştir. FEA'larda kullanılan CAD modelleri, yatakların geometrik yapısını ve yük taşıma özelliğini bozmayacak şekilde küçük basitleştirmeler ile düzenlenmiştir. FEA kurgularında elemanlar arası sürtünmesiz temas, statik yükleme ve homojen, izotropik lineer malzeme modeli kabulleri yapılmıştır. Çalışan sistemde yer alan ve plastik deformasyona maruz kalan boyun bileziği ve mesnet gale makarası malzemeleri için S235JR yapısal çelik malzemesi tanımlanmıştır (Elastisite Modülü: 220 GPa, Poisson Oranı: 0.3, Akma Mukavemeti: 250 MPa, Çekme mukavemeti: 460 MPa Yoğunluk: 7850 kg m⁻³) (Şekil 2). Yatak elemanlarının en kritik zorlanmaya maruz kaldığı durum ve konum dikkate alınarak FEA sınır koşulları tanımlanmıştır.

Tüm değirmen sistemi ve yatak grubunda yer alan elemanlar (Boyun bileziği, mesnet gale makarası), sonlu eleman modeli ANSYS Workbench elemanlara ayırma (Meshing) fonksiyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinde kullanılacak uygun eleman boyutunu belirlemek için ön denemeler gerçekleştirilmiştir. FEA çözümünün yapılacağı bilgisayar platformunun gücü, model büyüklükleri ve geometrisi göz önünde tutularak, inceleme yapılan yatak elemanlarını en uygun şekilde temsil edebilecek eleman boyutları tanımlanmış ve incelenen kritik bölgelerin sonlu eleman katmanları daha ince hale getirilmiştir. Bilezik ve makara için elemanlara ayırma işlemlerinde eğrilik tabanlı elemanlara ayırma

(Curvature based meshing) yaklaşımı uygulanmıştır [2]. Sonlu eleman modeli "Skewness" eleman kalite kontrol değerlendirmesine tabi tutulmuş ve ortalama model metrik değeri 0.227 bulunmuştur. Bu değer sonlu eleman modelinin kalitesinin yüksek derecede olduğunu göstermektedir [3]. FEM işlem öncesi adımların tamamlanmasının ardından FEA çözüm işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kayıt edilmiştir.

Ele alınan makine elemanlarının analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde daha çok sünek malzemelerin çok eksenli yüklenme durumlarında karşılaştıkları hasar değerlendirilmesinde kullanılan ve deneysel çalışmalarla oldukça uyumlu sonuçlar veren von-Mises eşdeğer gerilme kriteri (von-Mises-Hencky teorisi, yırtılma-enerji teorisi ya da maksimum bozulma enerjisi teorisi) tercih edilmiştir. Teori; hesaplanan eşdeğer gerilmenin, malzeme gerilme limitine eşit olduğunda malzemenin belirli bir konumda akmaya başlayacağını yani plastik deformasyona uğrayacağını ifade etmektedir. Çoğu durumda akma dayanımı, hasar tanımlaması için sınır gerilme değeri olarak kullanılmaktadır.

Buna ek olarak daha gerçekçi simülasyon sonuçlarını elde edebilmek amacıyla ince yapı plaka özellikli elemanlar üzerinde kurulan düzlemsel gerilme (plane stress) varsayımları yerine çalışmada üç boyutlu (3D) gerilme hali dikkate alınmış ve çok parçalı 3D katı model montajı kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen FEA kurgusunda yer alan malzeme modeli, sınır koşulları sonlu eleman modeli detayları,

von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları ve toplam deformasyon davranışı çıktıları Şekil 2’de verilmiştir.

Statik analiz sonuçlarına ek olarak sistemin tekrarlı yüklenme durumu dikkate alınarak yorulma analizi gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizinde, hasar durumu ve bileziğin bağlandığı muylu eksenindeki balanslı aksenal kaçıklık gözlemleri dikkate alınarak yük tipinin ön yüklemeli genel değişken yüklenme ile 2.5 yüklenme faktörü ile yüklendiği ve malzeme sürekli mukavemet değeri yük tekrar (çevrim) sayısının 10^6 olduğu kabulleri yapılmıştır. Hesaplama için yapısal çelik malzemelere uyumlu ‘Soderberg’ teorisi, yorulma dayanımı faktörü ise 0.8 olarak kabul edilmiştir [4, 5]. Yorulma analizi kurgusu ve analiz çıktılarına ait görseller Şekil 3’de verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

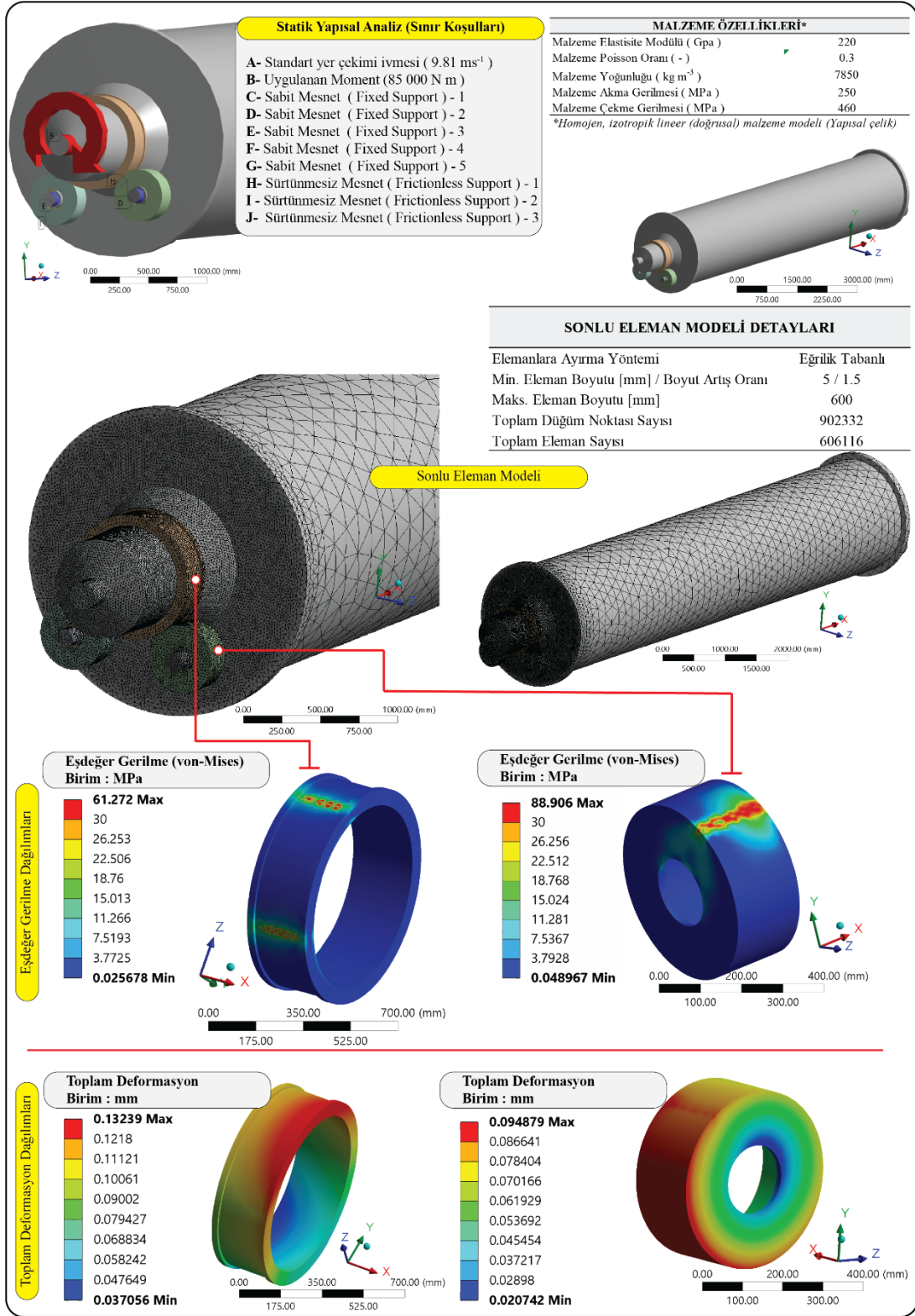
Gerçekleştirilen statik yüklenme durumu analiz sonuçlarına göre boyun bileziği ve mesnet gale makarasında maksimum von-Mises eşdeğer gerilme değerleri sırasıyla 61.272 MPa ve 88.906 MPa olarak hesaplanmıştır. Maksimum deformasyon değerlerinin (0.132 mm ve 0.094 mm) ise sistemin çalışma koşullarını olumsuz yönde etkilemeyecek büyüklükte olduğu ve bu değerlerin kabul edilebilir emniyetli çalışma değerleri içerisinde yer aldığı kanısına varılmıştır (Şekil 2). Statik analiz kurgusunda elde edilen gerilme değerleri yatak elemanları malzemesinin akma mukavemeti değeri ile karşılaştırıldığında, hesaplanan gerilme değerlerinin herhangi bir plastik deformasyon veya kırılma hasarına işaret etmediği anlaşılmaktadır. Ancak, sistemin tekrarlı yükler altında çalıştığı dikkate alınarak gerçekleştirilen yorulma analizinde, statik analizlerde yapılan hasar değerlendirmesinin yorulma analizi sonuçlarına göre geçerli olmadığı ortaya çıkmıştır. Yorulma analizinde yatak elemanları ve boyun bileziğinin emniyet katsayısı 1 değerinin altında, sırasıyla 0.913 ve 0.631 olarak hesaplanmıştır. Yapılan kabuller sonucunda hasara en yatkın eleman olan gale makarasının tanımlanan değişken çalışma koşullarında çevrim sayısı (yorulma ömrü) 17 995 olarak hesaplanmıştır, güvenli çalışma katsayısı ise 0.629 olarak elde edilmiştir. Çalışmada ele alınan sistemin statik yüklenme durumunda hasar almadan çalışabildiği ancak tekrarlı yüklenme çalışma koşullarında yatak yüzeylerinde yorulma hasarı ortaya çıkabileceği gerçekleştirilen simülasyon çıktıları ışığında söylenebilmektedir. Hasara uğramış elemanların yüzeylerinde yüzey yorulma aşınması hasarı (pitting) açıkça görülebilmektedir. Fiziksel incelemesi yapılan hasarlı yatak sisteminde, işletme koşullarında çok kısa bir zaman aralığında yatak elemanlarının plastik deformasyona uğradığı da gözlemlenmiştir. Bu durum, hasarlı elemanlarda yapılan gözlemlere dayalı olarak elemanların hasar mekanizması

hakkında yapılan tahminlerin, tekrarlı yüklenme koşullarını inceleyen yorulma analizine ait görsel ve sayısal simülasyon çıktıları ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmeler ile çalışmada kurulan FEA yaklaşımlarının doğru kurulduğu ve gerçekleştirilen simülasyon çalışmasının hedeflenen amaçlara hizmet ettiği söylenebilmektedir. Bununla birlikte bilgisayar ortamında gerçekleştirilen mühendislik simülasyon çalışmalarının analiz edilen sistemlerin gerçek çalışma ortamını ne derecede temsil edebildiği iyi değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, simülasyon kurgusunun dikkatli ve gerçek çalışma ortamına uygun bir şekilde kurulması, elde edilen sonuçların tecrübe ile yorumlanması ve imkanlar dahilinde ilgili mühendislik analitik ve/veya deneysel yöntemlerden en az biri ile doğrulanması konuları dikkate alınması gereken önemli konular arasında yer almaktadır.

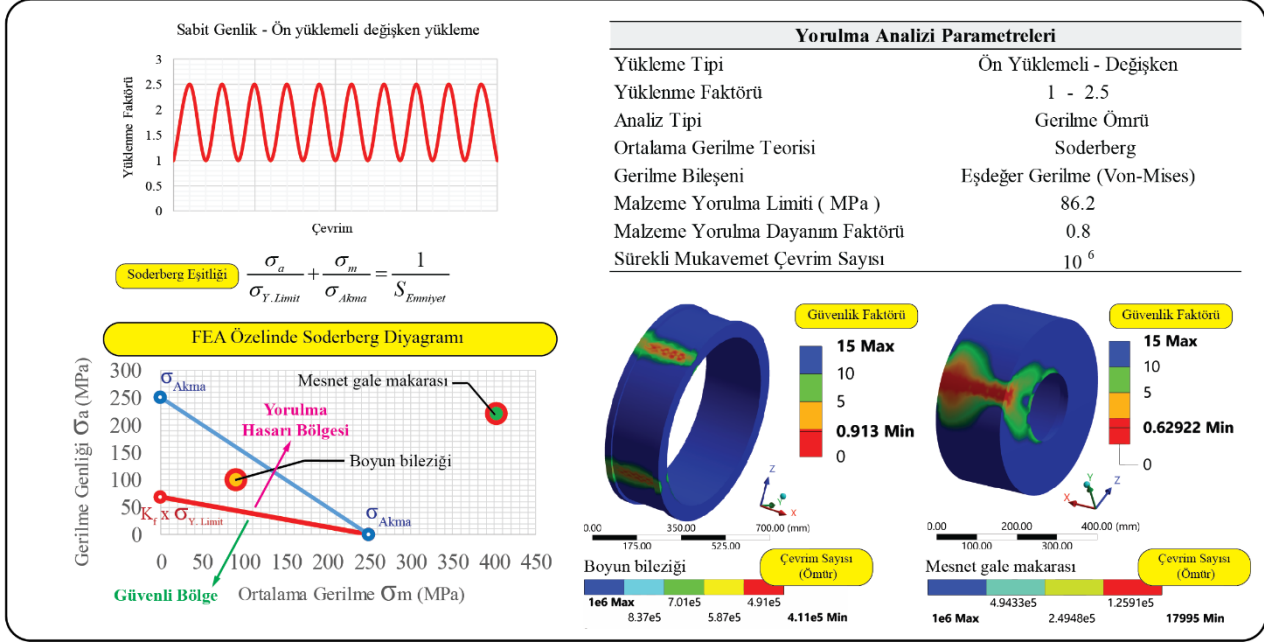
4. Sonuç

Ülke ekonomisinde büyük pay sahibi olan madencilik sektöründe, öğütme işlemlerinde kullanılan mekanik ekipmanların optimum boyutsal tasarımı ve tanımlanan ekonomik çalışma periyotlarında hasar almadan çalışma kapasiteleri işletme verimliliğine etki eden önemli faktörlerin başında gelmektedir. Bu çalışmada ele alınan özel tasarım bir bilyeli değirmen sisteminin yük taşıyıcı elemanlarında ortaya çıkan plastik deformasyon ve yatak yüzeyi hasarları üzerine odaklanılmış ve ileri düzey bilgisayar destekli mühendislik simülasyon teknikleri kullanılarak yüzey hasarlarının statik ve tekrarlı yüklenme koşulu altında maruz kaldıkları yapısal gerilmelerle ilişkisi değerlendirilmiştir. Hasarlı elemanlar üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde fiziksel gözlem ve FEA sonuçlarının birbirlerini destekleyici nitelikte olduğu görülmüş, statik ve tekrarlı yüklenme durumlarında elemanların maruz kaldıkları gerilme dağılımları tanımlanan yüklenme koşulları altında haritalandırılabilmiştir. Böylelikle ilgili hasarların tekrar yaşanmasını önleyici tedbirlerin alınması ve optimum makine elemanı tasarımlarının ortaya konmasında kullanılacak faydalı görsel ve sayısal çıktılar elde edilmiştir. Bununla birlikte bu tip elemanların deformasyon ve gerilme analizleri için örnek uygulama olabilecek bir ileri düzey bilgisayar destekli mühendislik simülasyon uygulaması başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Yatak elemanları üzerinde gerçekleştirilen FEA sonuçlarına göre, statik yüklenme durumunda plastik deformasyon ile ilişkili hasar belirtileri görülmemesine rağmen tekrarlı yüklenme durumunda elemanların özellikle yüzeylerinde yorulma dayanımının yetersiz olduğu anlaşılmıştır. Bu değerlendirme ile tanımlanan sınır koşulları altında ele alınan değirmen sisteminin yatak elemanlarında tasarım iyileştirme çalışmalarının yapılması gerektiği kanısına varılmıştır.



Şekil 2. Sonlu elemanlar analizi detayları (Statik yükleme çıktıları)



Şekil 3. Yorulma analizi detayları

Bu kapsamda, bu çalışmada odağında yer alan ilgili yatak elemanlarının maruz kaldığı hasarların tekrarlanmasını önlemek adına bazı öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Sistem üzerinde yer alan yataklardaki eksen bozuklukları istenmeyen yüksek değişken yükleme etkileri ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenle eksen bozukluğu olmayan yatak montajları daha düzgün yayılı yüklemeleri sağlayarak istenmeyen yüksek değişken yüklemelerin neden olduğu hasarları önleyebilecektir.

2. Değişken ve tekrarlı yükleme koşullarında, ilgili yatak elemanlarının yüzey pürüzlülüğü, çentik katsayısı, geometrik büyüklük katsayısı gibi faktörler, ortaya çıkan gerilme değerlerini büyüten ve tasarım çalışmalarında dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Yatak elemanları üzerinde imalat hatalarından kaynaklı istenmeyen yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi, yorulma ve ani darbe yüklenmelerine karşı çentik etkilerinin azaltılması, tasarlanan geometrilerde ani kesit geçişlerinden kaçınılması elemanların hasar almadan daha uzun süre çalışmalarına katkıda bulunabilecektir.

3. İlgili yatak elemanlarında yüklemeler sırasında, yüklenmeye maruz kalan etkili temas genişliklerinin artırılması eleman yüzeylerindeki yüzey basıncının azalmasına dolayısıyla yüzey gerilme değerlerinin azaltılmasına yardımcı olabilecektir.

4. Yatak malzemelerinin aşınma direncini iyileştirmek özellikle yüksek yüklerin taşındığı temas noktalarında yüzey hasarlarının önüne geçilmesinde yardımcı olabilecektir. Bunun için dış yüzeyi sert, darbe dayanımını artırmak için ise iç yapısı sünek malzemelerin kullanımı değerlendirilebilir. Özellikle yüzey yorulma aşınması önüne geçilebilir amacıyla malzeme yüzey sertleştirme işlemleri faydalı olabilecektir.

5. İlgili elemanların tasarım iyileştirme ve yeni tasarım çalışmalarının zorunlu hale gelmesi durumunda, simülasyon sonuçları çerçevesinde, yatak tipinin değiştirilmesi önerilebilir (Alternatif öneri: Hidrodinamik yağlamalı yüzen yatak sistemi).

Bununla birlikte, yukarıda sayılan önerilerin ne oranda etkili olduğunun belirlenmesi konusu tasarım iyileştirme çalışmaları için önemli bir konudur ve her birinin ayrı ayrı analiz edilme gerekliliği bulunmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Monov V., Sokolov B., Stoenchev S., 2012. Grinding in Ball Mills: Modelling and Process Control, Cybernetics and Information Technologies v12: 51-52
- [2] ANSYS Documentation, 2019. Release notes: Resolved Issues and Limitations. Release 19.1. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- [3] ANSYS Documentation, 2019. Release notes: Meshing. Release 19.1. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- [4] Chaush, Y., 2008. ANSYS Workbench ile Yorulma Analizi, Bitirme Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü. Ulaşılabilir URL (15.05.2019): http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/cmdm/348/1450272307_Yorulma-WB.pdf
- [5] Budynas R.G., Nisbett, J.K., 2015. Shigley's Mechanical Engineering Design (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering - 10th Edition), McGraw-Hill publication, ISBN-10: 9780073398204, p.1105