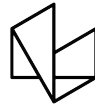
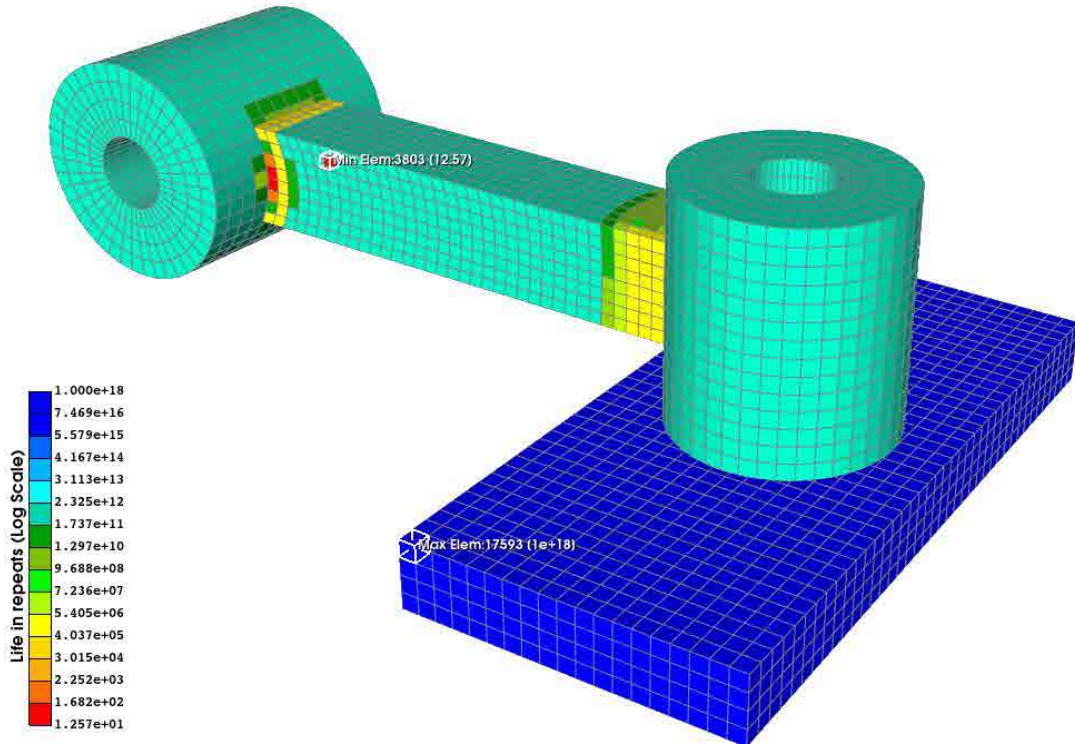


TEKNİK DOKÜMAN



CAEfatigue

Bu teknik yazı, araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan “anti-roll bar (ARB)” (viraj denge çubuğu) bağlantı elemanlarının, sürekli tekrarlanan yüklemelere maruz kalmaları sonucu öngörülen yorulma dayanımını kapsamaktadır.



Anti-Roll Bar Bağlantı Elemanlarında Zaman Düzleminde Yorulma Analizi

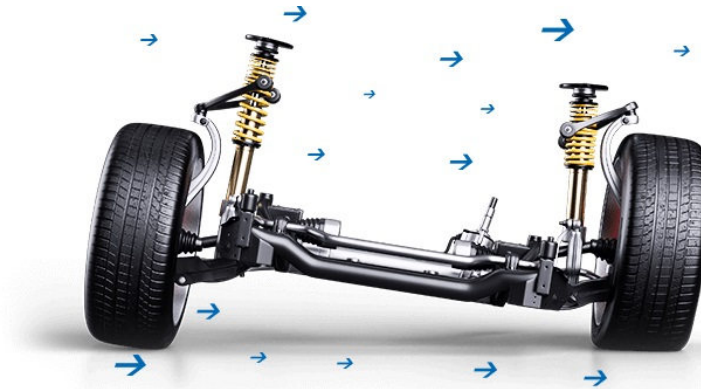
HAZIRLAYAN
Doğukan Alkan Kıdemli Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih : 22/ 12 / 2025

Bu teknik yazı, araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan “anti-roll bar (ARB)” (viraj denge çubuğu) bağlantı elemanlarının, sürekli tekrarlanan yüklemelere maruz kalmaları sonucu öngörülen yorulma dayanımını kapsamaktadır. Yapılan sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme değerleri CAEfatigue yazılımına aktarılmış ve 500.000 çevrimlik yüklemeye karşı ömür tahmini gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar, yapısal bütünlük ve ömür öngörüsü açısından değerlendirilmiştir.

1. Giriş

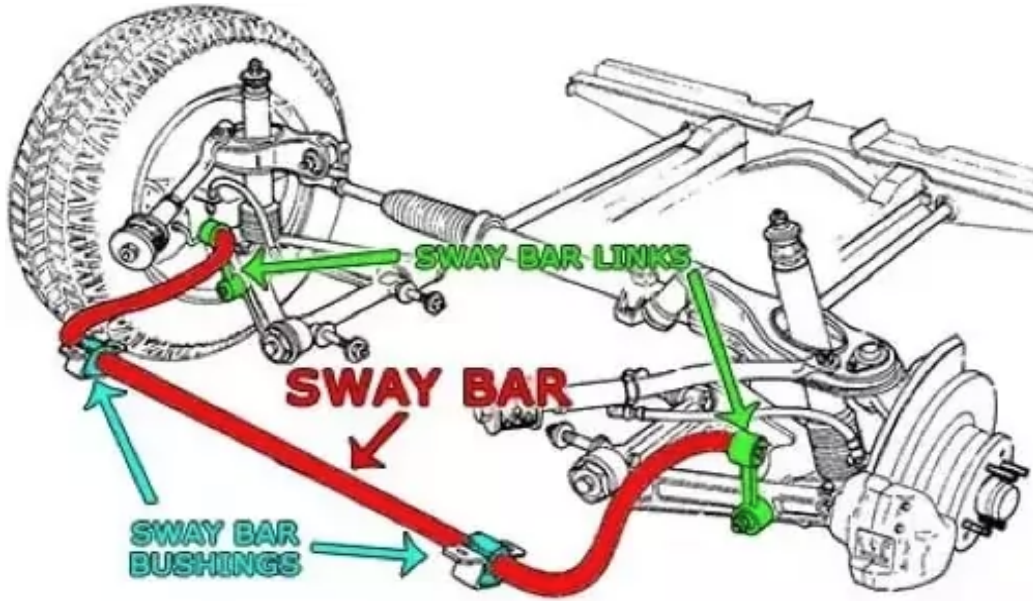
Günümüzde taşıt süspansiyon sistemlerinde dengeleyici bir unsur olarak görev yapan “anti-roll bar” (viraj denge çubuğu) sistemleri, özellikle viraj alma esnasında ortaya çıkan yük aktarımını azaltarak sürüş güvenliğini ve konforunu artırmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan bağlantı elemanları, dinamik yüklemelere maruz kalan kritik bileşenler arasında yer almakta ve uzun süreli kullanım sonucunda yorulma kaynaklı hasar riski taşımaktadır. Bu çalışmada, “anti-roll bar” bağlantı elemanlarının yorulma davranışı, zaman düzleminde gerçekleştirilen bir analiz yaklaşımıyla değerlendirilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen zamana bağlı gerilme verileri, CAEfatigue yazılımı aracılığıyla doğrudan yorulma analizine tabi tutulmuş, herhangi bir spektrum dönüşümüne ihtiyaç duyulmadan doğrudan zaman üzerinden yükleme kullanılarak yorulma ömrü tahmini gerçekleştirilmiştir.



Figür 1 – Araç Süspansiyonunda Kullanılan Anti-Roll Bar Sisteminin Şematik Gösterimi

2. “Anti-roll Bar” Nedir?

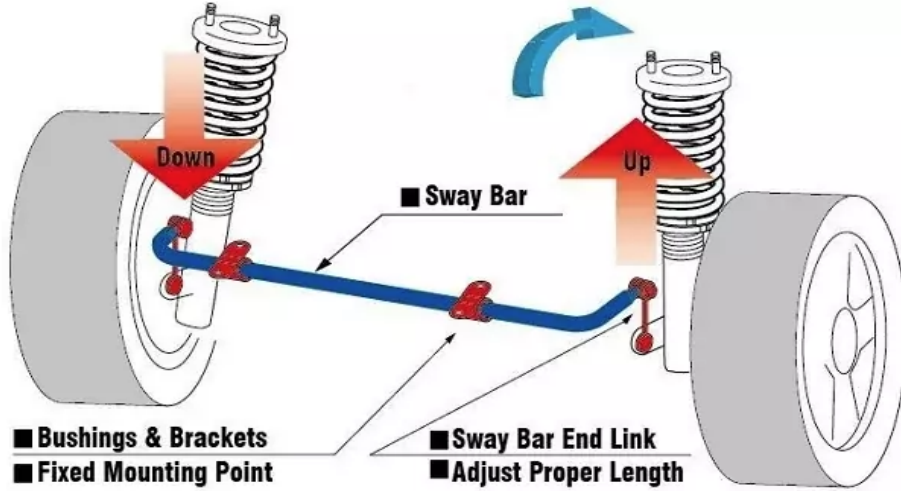
“Anti-roll bar” (viraj denge çubuğu), araç süspansiyon sistemlerinin en önemli parçalarından biridir. Sol ve sağ tekerlekleri birbirine bağlayan bu sistem, viraj alma sırasında oluşan gövde savrulmasını azaltarak, aracın daha dengeli bir şekilde yol almasını sağlamaktadır. Bu sayede sürüş güvenliği ve yol konforu artırılmaktadır. Diğer bir taraftan “ARB” terimine farklı kaynaklarda “sway bar”, “stabilizer bar / stabilizer” ve “anti-sway bar” olarak rastlanılabilmektedir. Bağlantı elemanları ise bu çubuğun tekerleklerle ve süspansiyon sistemiyle doğru şekilde etkileşim kurmasını sağlar. Küçük boyutlarına rağmen bu elemanlar, dinamik yükler altında aracın davranışını doğrudan etkileyen kritik bileşenlerdir. Uzun süreli kullanımda yorulmaya maruz kalabilmeleri, onları yapısal dayanıklılık açısından en çok dikkat edilmesi gereken parçalardan biri haline getirmektedir.



Figür 2 – Araç Süspansiyon Sisteminde Anti-Roll Bar Ve Bağlantı Elemanlarının Konumu [Sway Bar (Viraj Denge Çubuğu), Sway Bar Links (Bağlantı Elemanları) ve Sway Bar Bushings (Burçlar) Gösterilmektedir.]

3. “Anti-roll Bar” Çalışma Prensipleri ve Tasarım Faktörleri

“Anti-roll bar”, aracın viraj sırasında devrilmesini önlemek için kullanılan U şeklinde çelik bir çubuktur. Araç viraja girdiğinde, virajın iç tarafındaki tekerlekler yukarı doğru hareket ederken dış taraftaki tekerlekler aşağı doğru bastırılır. Bu durum gövdenin yana yatmasına sebep olmaktadır. “Anti-roll bar”, bu yatmayı kontrol altına alarak aracın ağırlığını dört tekerlek üzerine daha dengeli bir şekilde dağıtır. Böylece aracın süspansiyonunun hem konfor hem de yol tutuş performansı korunmuş olur. Tasarım açısından bakıldığında, malzeme seçimi, çubuğun kesit özellikleri ve bağlantı noktalarının rijitliği, sistemin verimliliği üzerinde doğrudan etkili faktörlerdir.



Figür 3 – Anti-roll Bar Çalışma Prensibinin Şematik Gösterimi

4. “Anti-roll Bar”ın Etkisi Altında Kaldığı Yükler

Viraj sırasında aracın gövdesi, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dış tarafa doğru eğilmeye başlamaktadır. Bu eğilme, lastiklerin yol ile temas alanını azaltarak sürüş güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Bu esnada “anti-roll bar” devreye girmektedir. Gövdeden tekerleklerle aktarılan burulma kuvveti, bağlantı elemanları aracılığıyla karşı tarafa iletilir ve böylece aşırı yuvarlanma büyük ölçüde sınırlandırılır.

5. “Anti-roll Bar” Sistemlerinde Yorulma Süreci

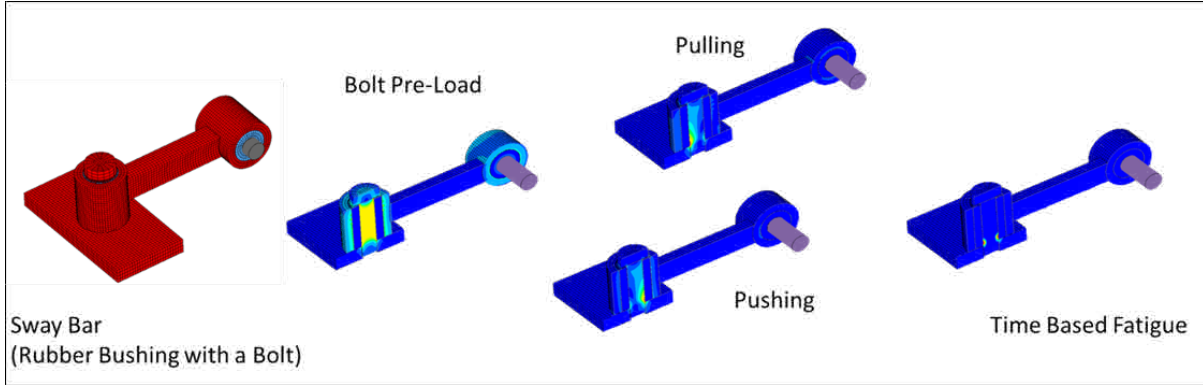
Makine parçaları kullanım ömürleri boyunca tekrarlı yükler altında çalışmakta ve bu yüklemeler, parçaların dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. Tekrarlı yükler altında çalışan metal malzemelerde, gerilme seviyeleri statik dayanım sınırlarının oldukça altında olsa bile zamanla mikroskobik çatlaklar oluşabilmektedir. Bu çatlaklar ilerleyen çevrimlerde büyüyerek makroskobik boyutlara ulaşır ve sonuçta parçanın kopmasına veya kırılmasına neden olmaktadır. Literatürde, kırılma ve mekanik arızaların yaklaşık %50 ila %90'ının yorulmaya bağlı olduğu tahmin edilmektedir. Ancak bu rakamların kesin olarak belirlenmesi zordur; çünkü yorulma hasarı çoğunlukla öngörülemez ve ani bir şekilde gerçekleşir.

6. “CAEfatigue” ile Yorulma Ömrünün Değerlendirilmesi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), mühendislik yapılarında gerilme dağılımlarının ve yer değiştirmelerin hesaplanmasında güvenilir bir yöntem olsa da, çevrimsel yükler altındaki uzun çevrimli hasar birikimini doğrudan ortaya koymamaktadır. Yorulma ömrü tayini için FEM çözümlerinden elde edilen gerilme-zaman verilerinin, yorulma yazılımlarına aktarılması gereklidir. “CAEfatigue”, hesaplanan yapısal gerilme değerlerini kullanarak, yorulma ömrü değerlendirmesi yapılmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, “anti-roll bar” bağlantı elemanlarına ait sonlu elemanlar çözümü “Marc” yazılımında gerçekleştirilmiş, elde edilen çekme, basma ve ön yükleme (preload) koşullarındaki gerilme sonuçları yorulma analizine girdi olarak kullanılmıştır. Zaman düzleminde gerçekleştirilen bu yaklaşımda, doğrudan gerilme-zaman verileri bas-çek senaryosu (0-0, 0.5-1, 1-0) ile “CAEfatigue” yazılımında kullanılmıştır.

Bu yöntem sayesinde, “anti-roll bar” bağlantı elemanının 500.000 çevrimlik yükleme senaryosu altındaki dayanıklılığı belirlenmiş; kritik bölgelerdeki hasar birikimi (damage accumulation) haritaları çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yapısal bütünlük ve güvenilirlik açısından tasarımın doğrulanması için kullanılmıştır.



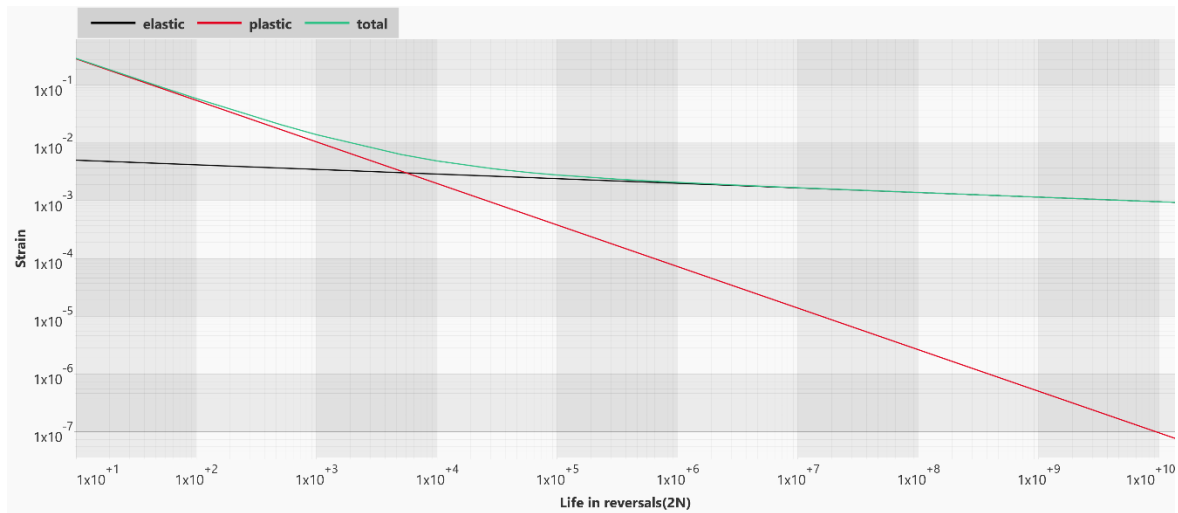
Figür 4 – Anti-roll Bar Bileşeni için Uygulanan Yapısal Yüklerin Açıklanması

6.1. Malzeme Bilgisi ve ϵ -N Eğrisi

Yorulma analizleri gerçekleştirilirken, daha önce tamamlanan statik analiz sonuçları kullanılacaktır. Bu analizlerde R oranı = -1 (tam değişken yükleme) varsayımı alınarak inceleme yapılmıştır. Yorulma analizleri ϵ -N eğrisi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar da yine ϵ -N eğrisi üzerinden değerlendirilmiştir. ϵ -N eğrisi Tablo 1'deki katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır. Malzemenin ϵ -N eğrisi Figür 5'de gösterilmektedir. Malzeme bilgilerine TotalMateria veri tabanından ulaşılmıştır.

Malzemenin Mekanik Özellikleri	
Young Modülü (MPa)	210000
Poisson Oranı	0.33
Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	895
Akma Gerilmesi (MPa)	780
ϵ -N Eğrisinin Özellikleri	
Yorulma dayanım katsayısı, σ_f (MPa)	1273
Yorulma güç üssü, b	-0.08
Yorulma süneklik katsayısı, ϵ_f	1.51
Yorulma süneklik üssü, c	-0.72
Döngüsel dayanım katsayısı, K (MPa)	1359
Döngüsel gerinim üssü, n	0.13

Tablo 1: ϵ -N Eğrisi Katsayıları



Figür 5 – Malzemenin ϵ -N Eğrisi

6.2. Malzeme Pürüzlülük Faktörü

Yorulma testine tabi tutulacak numuneler çoğu zaman ideal, kusursuz yüzey kalitesine sahip değildir. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan etkiler “Yüzey Pürüzlülük Katsayısı (Surface Finishing Factor)” kullanılarak hesaplanacak ve analize dahil edilecektir. Bu katsayı Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmış ardından CAEfatigue arayüzüne girdi yapılmıştır.

$$K_F = 1 - a_R \cdot \log(K_R) \cdot \log(2 \cdot UTS/R_f)$$

Eşitlik 1

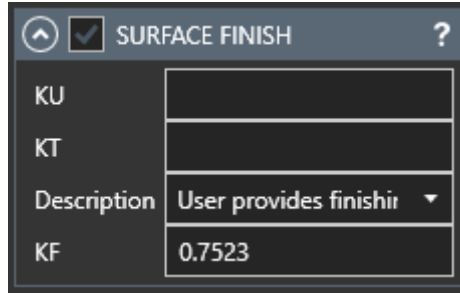
Material	Steel	Cast Steel	Nodular Cast Iron	Malleable Cast Iron	Gray Cast Iron	Wrought Al Alloys	Cast Al Alloys
CODE	13,14, 16-22, 25-99	9-12, 15	5-8	2-4	1	100-105	106
a_R	0.22	0.20	0.16	0.12	0.06	0.22	0.20
R_f	400	400	400	350	100	133	133

Figür 6 – CAEfatigue Kullanıcı Kılavuzunda Yüzey Pürüzlülüğü Hesaplamasında Kullanılan Değerler

Genel üretim yönteminin döküm ve yüzeyin taşlanmış olduğu varsayılmaktadır. Buna göre ortalama K_R (üretim pürüzlülük) değeri 12.5 μm 'dir. Bu değerler Eşitlik 2'de yerine konularak, hesaplama yapılmıştır.

$$K_F = 1 - (0.20) \log(12.5) \cdot \log(2 \times 895/133) = 0.7523$$

Eşitlik 2



Figür 7 – CAEfatigue Arayüzünde Yüzey Pürüzlülük Değerinin Girilmesi

Yükleme senaryosu olarak bas-çek senaryosu 0-1 genliği arasında uygulanmıştır. Analiz isterini karşılamak adına yüklem, 500.000 tekrar çevrim sayısı olarak girdi sağlanmıştır.

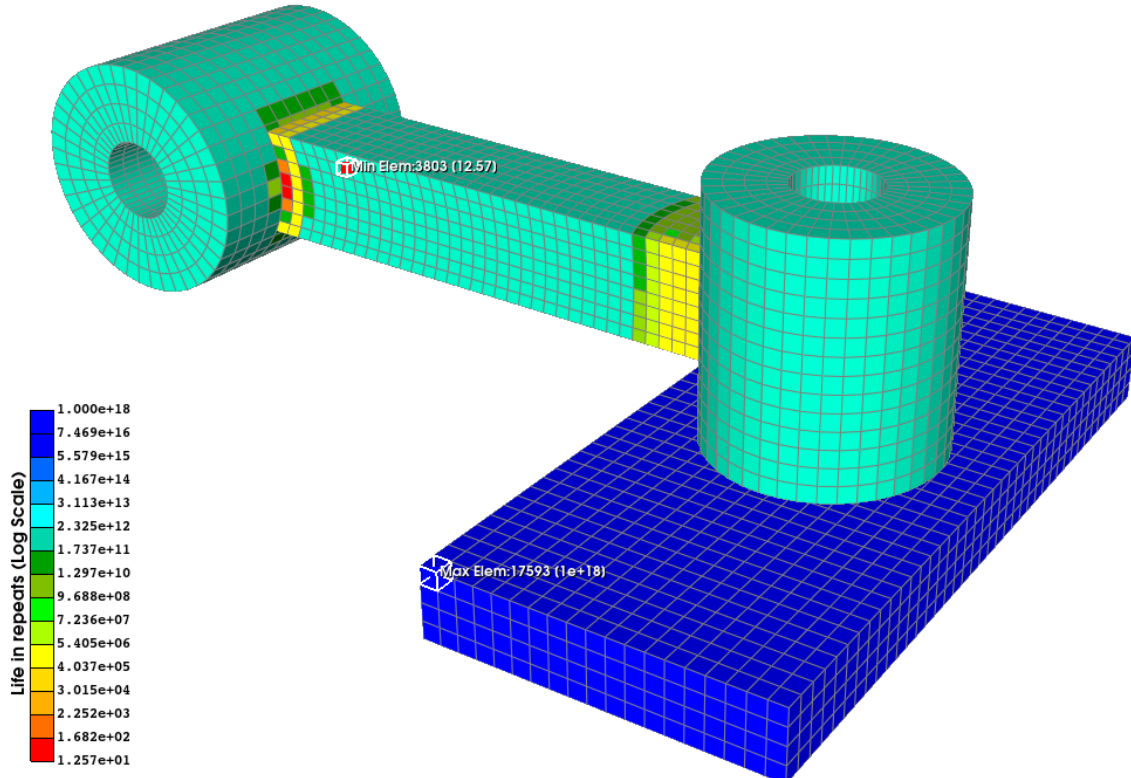
EVENT ?	
Name	Event1
Duration (s)	1
Repetitions	500000
Load Scale Factor	1

Figür 7 – CAEfatigue Arayüzünde Çevrim Sayısının Girilmesi

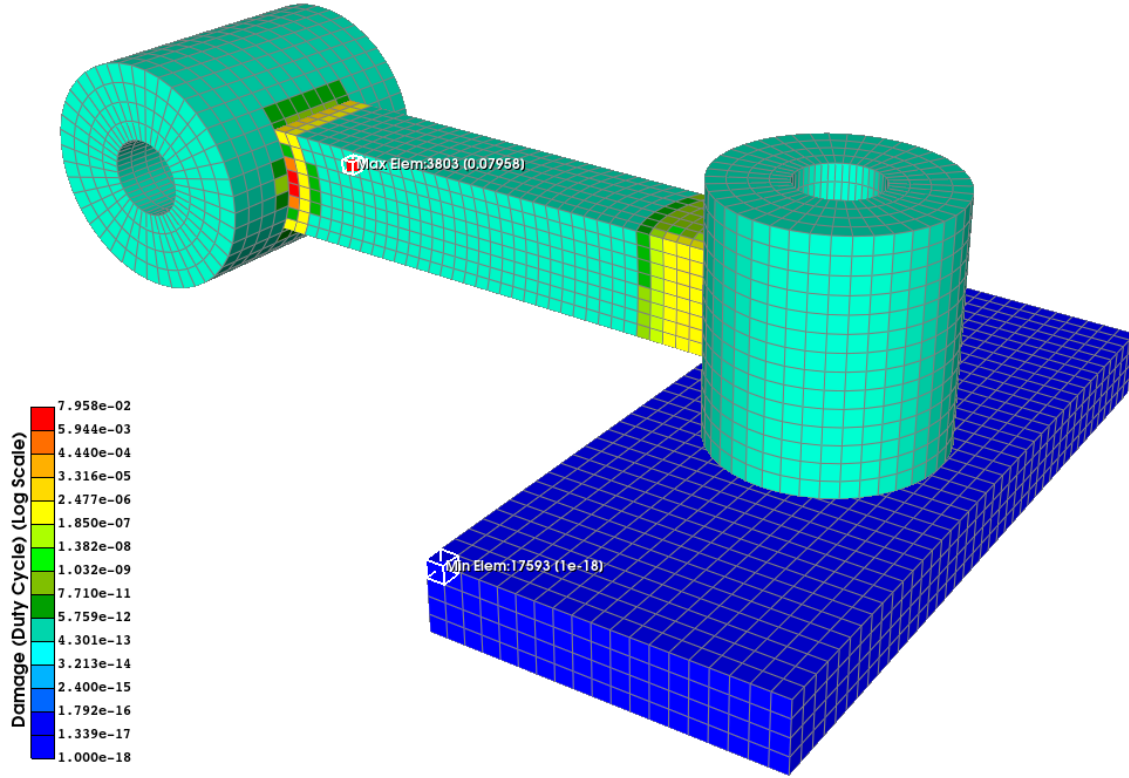
6.3. Yorulma Analizlerinin Sonuçları

Yorulma analizleri gerçekleştirilirken, “Stress Combination” olarak “Maximum Principal” seçilmiştir. Yorulma analizinde önceden tanımlanmış yükleme, modele aktarılmış ve gerinim-ömür ($\epsilon-N$) yöntemini kullanarak bir yorulma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizine ait sonuçlar, Figür 8 ve Figür 9’da paylaşılmıştır. Renk dağılımı, bileşen genelinde öngörülen yorulma ömrünü göstermektedir.

En kritik bölge, minimum ömürün yaklaşık 12.57 döngü olduğu bağlantı bölgelerinde yer almaktadır. Burası, zamanla yorulma hasarının en çok meydana gelme olasılığı olan yerdir.



Figür 8 – CAEfatigue Arayüzünde Yorulma Döngüsü Sonuçları



Figür 9 – CAEfatigue Arayüzünde Hasar Miktarı Sonuçları

Elde edilen yorulma simülasyonu sonuçları, anti-roll bar bağlantı elemanlarında kritik ömrün bağlantı bölgesinde yoğunlaştığını ve bu bölgenin yorulma kaynaklı hasarın başlangıç noktası olarak öne çıktığını ortaya koymaktadır. Minimum ömür değerinin yaklaşık 12,57 döngü olarak belirlenmesi, 500.000 çevrimlik bir yüklemenin 12.57 kez uygulanabileceğini göstermektedir. Bu senaryoda istenen analiz talebi yorulma tarafında güvenli bölgede kalmıştır.

7. Referanslar

- I. CAEfatigue Software (Cf) 2025.1.1 Quick Reference Guide
- II. CAEfatigue Software (Cf) Training PDF's — Background Theory
- III. J. Marzbanrad, A. Yadollahi, Fatigue Life of an Anti-Roll Bar of a Passenger Vehicle, International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering 6 2012
- IV. Marc® and Mentat® 2021.3 Release Guide
- V. <https://emerald-autoparts.com/wp-content/uploads/2024/10/Stablizer-Link-2.png>
- VI. https://www.researchgate.net/figure/Suspension-system-with-swaybar_fig2_305489739