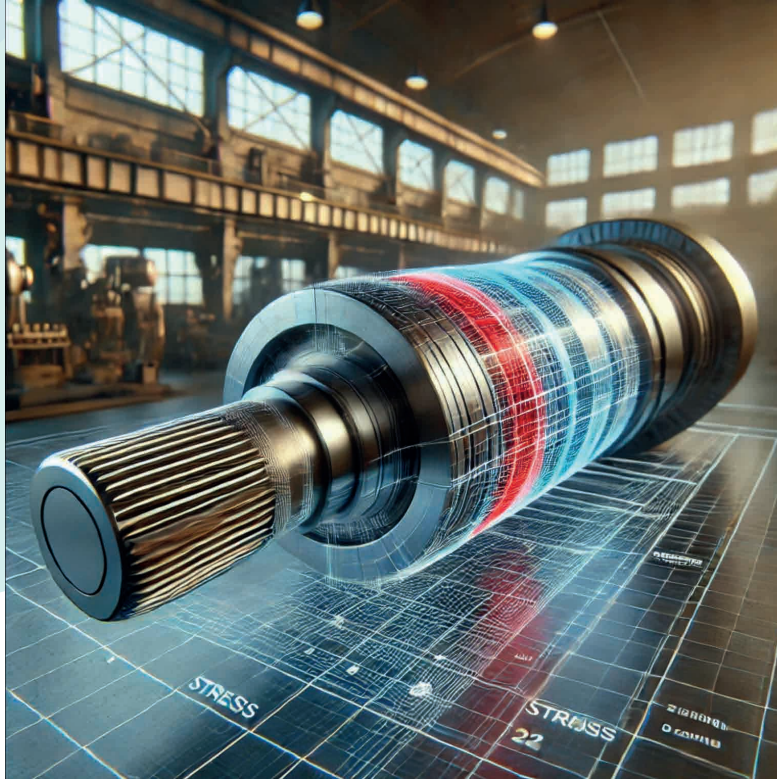


TEKNİK DOKÜMAN



Romax



BIAS
MÜHENDİSLİK



HEXAGON

Authorised Hexagon Partner

Şaft Yorulma Analizleri

HAZIRLAYAN
Doğukan Alkan Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih : 16 / 01 / 2025

Miller veya şaftlar, mekanik tasarımların en kritik bileşenlerinden biridir. Yorulma analizi, bu bileşenlerin uzun süreli dayanıklılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek için vazgeçilmez bir süreçtir. Romax, mil yorulma analizlerinin hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanıyan kapsamlı araçlar sunmaktadır. Bu teknik yazıda, Romax'ta kullanılan üç temel yorulma analizi yöntemi incelenecektir. Ayrıca yorulma standartlarının sonuçlara etkisi irdelenecektir.

1. Giriş

Farklı değerlendirme standartlarına göre yorulma analizleri gerçekleştirmek, belirli bir görev döngüsü için uygun şaft yorulma sonuçlarını tayin etmede kritik öneme sahip olmaktadır. Bu çalışma ile birlikte, standartlar arasındaki farklar ve yorulma analizi sonuçlarını etkileyebilecek şaft özellikleri incelenecektir.



Figür 1 – Mil Yorulma Çatlaklarını Gösteren Temsili Görsel

2. Yorulma Nedir?

Yorulma, mekanik bir bileşenin sürekli olarak değişen ya da tekrarlayan yükler altında kademeli olarak hasar görmesi ve sonunda kırılması olayıdır. Statik yüklerden farklı olarak; yorulma süreci, malzemenin elastik sınırının altında kalan stres seviyelerinde dahi oluşabilmektedir. Bu durum, özellikle dönen veya titreşimli hareketlere maruz kalan bileşenlerde sıklıkla görülmektedir.

2.1. Yorulma Sürecinin Temel Aşamaları

a) Başlangıç Çatlaklarının Oluşumu:

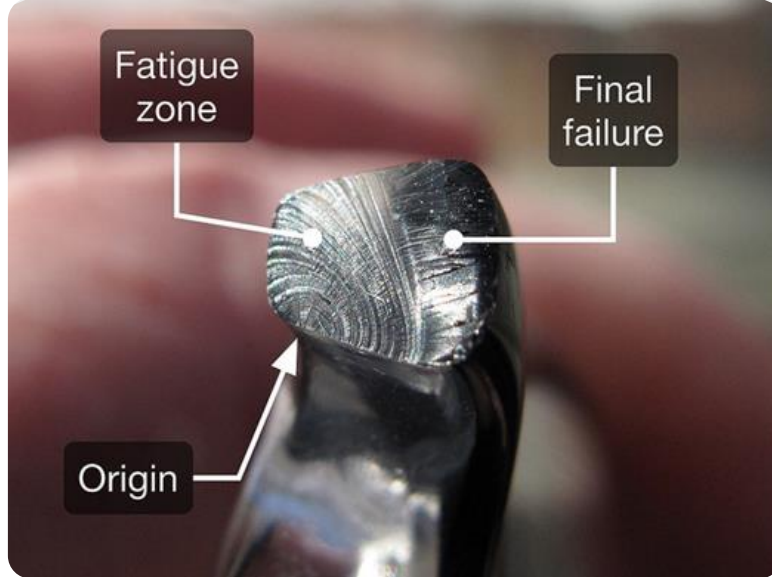
- Mikro düzeydeki malzeme kusurları, yüzey pürüzleri veya geometrik keskinlikler gibi stres yoğunlaşması yaratan faktörler çatlakların oluşmasına neden olmaktadır.
- Bu aşama genellikle bileşenin tasarımında, yüzey işlemlerinde veya malzeme seçiminde yapılan iyileştirmelerle geciktirilebilmektedir.

b) Çatlak Gelişimi:

- Oluşan çatlaklar, her yük döngüsüyle birlikte büyür ve malzeme boyunca ilerler. Bu süreçte, çatlak ilerleme hızı, yükün büyüklüğüne, malzemenin mukavemetine ve çevresel faktörlere bağlıdır.

c) Kırılma:

- Çatlak kritik bir boyuta ulaştığında, bileşen artık yük taşıyamaz ve ani bir şekilde kırılır. Bu aşama, yorulmanın son ve genellikle en dramatik aşamasıdır.



Figür 2 – Yorulma Sürecinin Adımlarını İçeren Görsel

2.2. Yorulmayı Etkileyen Faktörler

- a) **Yük Seviyesi ve Türü:** Tekrarlayan yüklerin genliği, yorulma ömrünü doğrudan etkilemektedir.
- b) **Malzeme Özellikleri:** Çelik, alüminyum gibi malzemelerin yorulma mukavemeti farklılık göstermektedir. Çelikler genellikle daha yüksek yorulma dayanımına sahip olmaktadır.
- c) **Yüzey Durumu:** Pürüzsüz yüzeyler yorulma dayanımını artırırken, keskin kenarlar ve kusurlar stres yoğunlaşmasına neden olarak yorulma dayanımını olumsuz etkilemektedir.
- d) **Ortam Şartları:** Korozyon, yüksek sıcaklık veya kimyasal ortamlar yorulma sürecini hızlandırarak negatif etki yapabilmektedir.

2.3. Şaftların Yorulma Analizleri

Mekanik sistemlerde kullanılan şaftlar, sürekli dönen, burulma veya eğilme yüklerine maruz kalan bileşenlerdir. Karmaşık yüklere sahip olmaları nedeniyle, yorulma analizleri millerin dayanıklılığı ve güvenilirliği için kritik öneme sahip olmaktadır.

- a) **Tekrarlayan Yüklerin Etkisi:**
 - Şaftlar, dönme hareketleri sırasında genellikle burulma, eğilme ve eksenel yüklerin birleşimine maruz kalırlar. Bu tekrarlayan yükler, mil üzerinde sürekli stres değişikliklerine neden olmaktadır.
 - Stres değişiklikleri, milin yorulmaya karşı en hassas noktalarında (örneğin, kesit değişiklikleri, yüzey pürüzleri veya montaj bölgelerinde) çatlak oluşumuna yol açmaktadır.
- b) **Kritik Alanların Belirlenmesi:**
 - Yorulma analizi, şaft üzerindeki maksimum stres bölgelerini belirleyerek bu bölgelerde çatlak oluşumunu önlemek için tasarım değişiklikleri bildirmektedir.

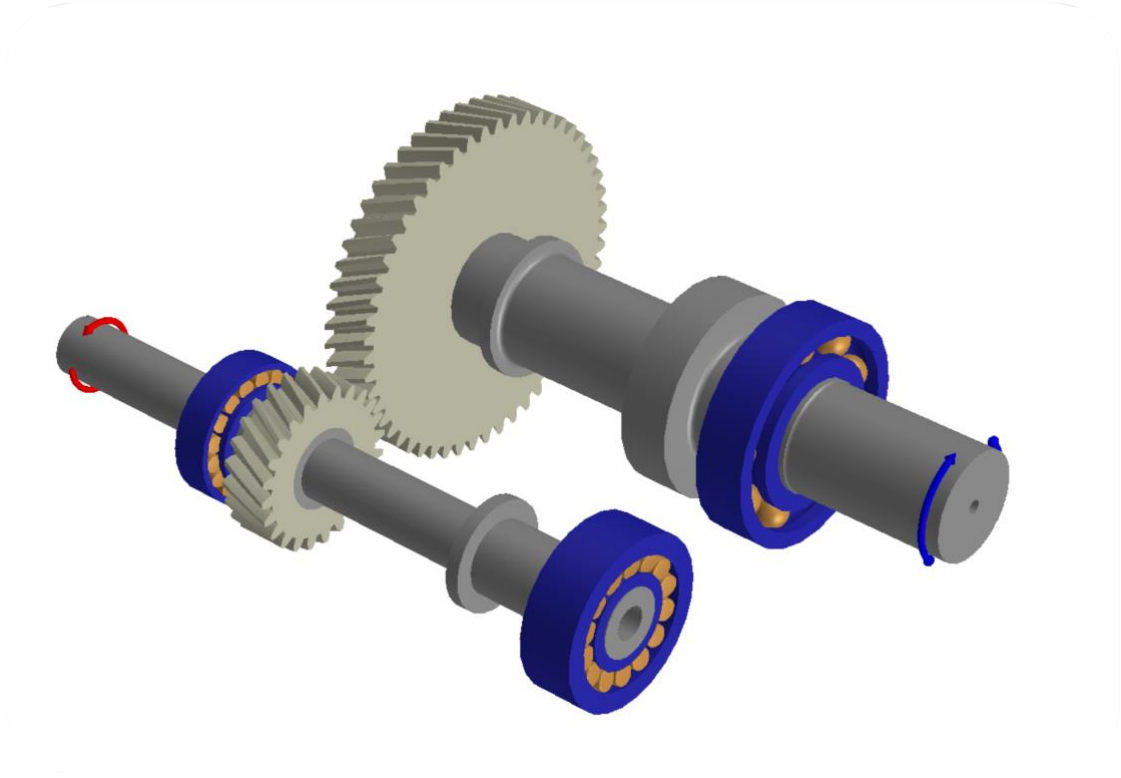
2.4. Romax'ta Yorulma Analizleri Standartları

Romax yazılımında şaftların yorulma analizi, üç ana standarda dayanarak gerçekleştirilmektedir.

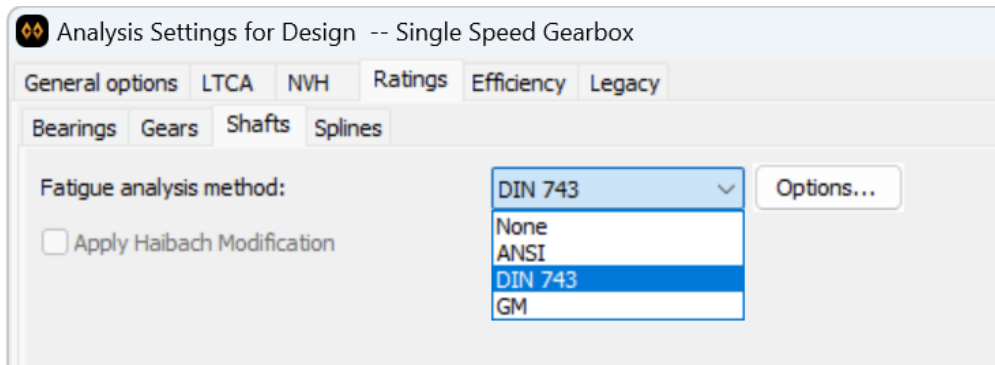
- 1. **DIN 743 Standardı:**
 - Şaftların yorulma analizinde en yaygın kullanılan standartlardan biridir.
 - Güvenlik faktörlerini ve yorulma sınırlarını belirler. Özellikle statik analizlerde minimum güvenlik faktörünü 1.2 olarak tanımlamaktadır.
- 2. **GM Standardı:**
 - Yük döngülerine bağlı olarak şaftın ömrünü hesaplar. Miner-Haibach Modifikasyonu ile düşük stres seviyelerinde bile yorulma hasarını dikkate almaktadır.
- 3. **ANSI Standardı:**
 - Yorulma analizinde minimum şaft çaplarını optimize etmek için kullanılır. Çalışma ömrünü ve hasar yüzdesini detaylı şekilde hesaplamaktadır.

3. Romax'ta Mil Yorulma Analizleri

Romax'ta mil yorulma analizlerini hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirmek için kapsamlı araçlar sunulmaktadır. Bu analizler, farklı standartlara (DIN 743, GM, ANSI) dayalı olarak yapılır ve her biri farklı tasarım ihtiyaçlarına yönelik çözümler sağlar. Romax'ta miller veya şaftlar için yorulma analizi yaparken çeşitli standartlar çalışmaya ortak olmaktadır. Bu standartların etkisi yorulma sonuçları üzerinden incelenecektir.



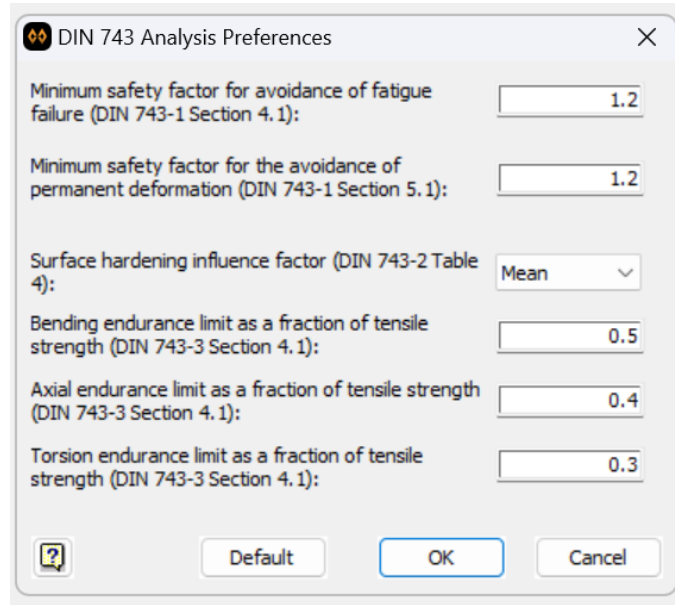
Figür 3 – Yorulma Analizinde Kullanılacak Model Görüntüsü



Figür 4 – Yorulma Analizinde Kullanılacak Standartların Seçim Menüsü

İlk olarak DIN743 standardı kullanılarak yorulma analizi yapılacaktır. DIN743 standardı için parametre ayarlamaları aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.

- **Minimum safety factor for avoidance of fatigue failure** : Bu değer denklemdeki S_{min} değeridir. Hesaplama prosedürünün minimum temelleri, minimum güvenlik faktörü $S_{min} = 1,2$ 'yi gerektirmektedir.
- **Minimum safety factor for avoidance of permanent deformation** : Emniyet katsayısı değeridir. Hesaplanan herhangi bir emniyet katsayısı değeri bu değer altındaysa, statik analiz sırasında bir uyarı verilecektir. Varsayılan değer 1.2'dir. Yükleme varsayımındaki belirsizlikler, olası yorulma çizgileri vb. daha yüksek güvenlik faktörleri gerektirir. Bunlar beyan edilmeli veya üzerinde varsayımlar yapılmalıdır.
- **Surface hardening influence factor** : Yüzey sertleştirme etki faktörü K, çeşitli prosedürler ile birlikte değişen yüzey koşullarının (artık gerilme, sertlik) dayanıklılık limiti üzerindeki etkisini dikkate almaktadır.



The dialog box titled "DIN 743 Analysis Preferences" contains the following settings:

Parameter	Value
Minimum safety factor for avoidance of fatigue failure (DIN 743-1 Section 4.1):	1.2
Minimum safety factor for the avoidance of permanent deformation (DIN 743-1 Section 5.1):	1.2
Surface hardening influence factor (DIN 743-2 Table 4):	Mean
Bending endurance limit as a fraction of tensile strength (DIN 743-3 Section 4.1):	0.5
Axial endurance limit as a fraction of tensile strength (DIN 743-3 Section 4.1):	0.4
Torsion endurance limit as a fraction of tensile strength (DIN 743-3 Section 4.1):	0.3

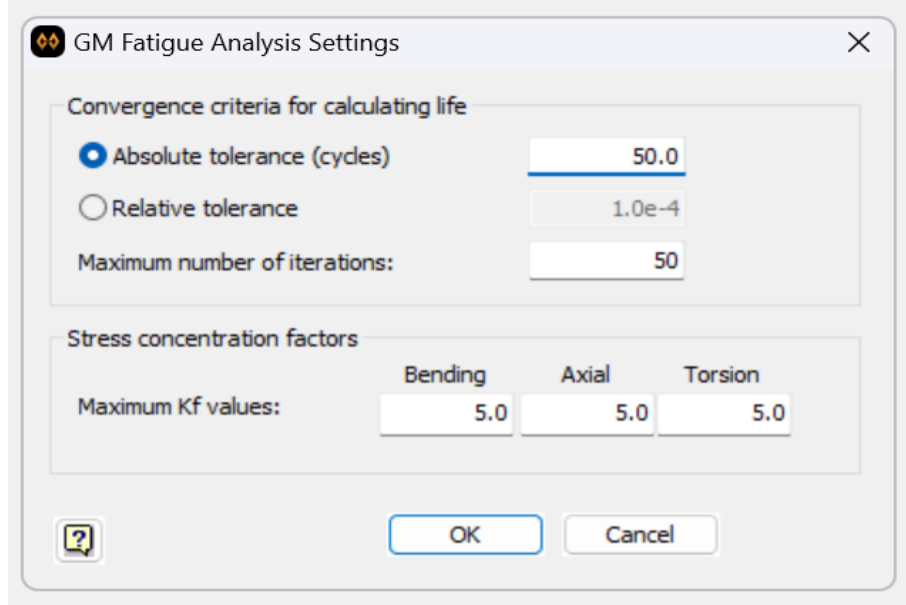
Buttons at the bottom: ? (Help), Default, OK, Cancel.

Figür 5 – DIN743 Standardı Parametre Seçenekleri

İkinci olarak GM standardı kullanılarak yorulma analizi yapılmıştır. GM standardı için parametre ayarlamaları aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır.

- **Convergence criteria for calculating life** : İterasyon sırasında hesaplanan ömür döngüsü hata değeri, giriş değerinden küçükse, shaft yorulma sonucu yakınsamıştır yorumu yapılmaktadır. Yakınsama toleransını tanımlamak için iki seçenek vardır. Bunlar mutlak döngü sayısı ve relatif döngü sayılarıdır.

- **Maximum number of iteration** : GM metodu iterasyonlu hesaplama dayanmaktadır. Kullanıcı şaft yorulma analizi için iterasyon sayısını belirtmektedir.
- **Maximum Kf values** : Kf teorik bir gerilme konsantrasyon faktörüdür. RomaxDesigner modülü; eğilme, eksenel ve burulma için maksimum değerleri Kf için değerlendirmektedir. Bu varsayılan değerlerden farklı olarak, daha yüksek değerler dikkatli seçilmelidir.

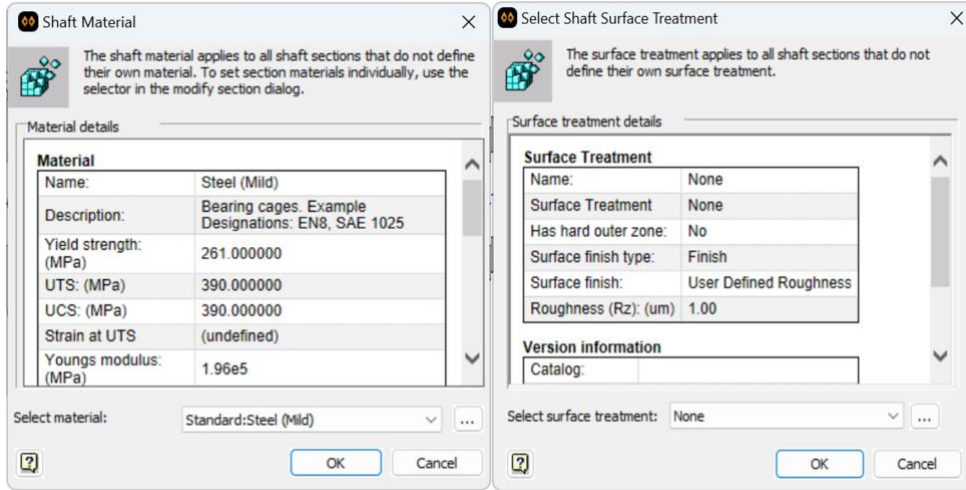


The dialog box titled "GM Fatigue Analysis Settings" contains two main sections. The first section, "Convergence criteria for calculating life", has two radio buttons: "Absolute tolerance (cycles)" which is selected and has a value of 50.0, and "Relative tolerance" which is unselected and has a value of 1.0e-4. Below these is a text field for "Maximum number of iterations" with a value of 50. The second section, "Stress concentration factors", has three columns: "Bending", "Axial", and "Torsion". Each column has a text field for "Maximum Kf values" with a value of 5.0. At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons, and a help icon on the left.

Figür 6 – GM Standardı Parametre Seçenekleri

Üçüncü olarak ANSI standardı kullanılarak yorulma analizi yapılmıştır. ANSI standardı kendi içerisinde gelen parametreler ile çözüm yapmasından dolayı, parametre seçenekleri Romax içerisinde yapılmamaktadır.

Analiz sonuçlarının anlamlı olabilmesi için modelin uygun detay seviyesinde tanımlanması gerekir. Şaftın malzeme özellikleri ve uygulanan yüzey işlemi çalışılacak modele uygun olmalıdır. Şaft malzemesi olarak standart çelik kullanılmış olup, herhangi bir yüzey işleme süreci (proseesi) tanımlanmayacaktır.



Figür 7 – Şaft Malzeme ve Yüzey İşleme Prosesinin Seçimi

3.1. DIN743 Standardına göre Yorulma Analiz Sonuçları

İlk yorulma analizinde DIN743 standardına göre çözüm alınacaktır. Romax'ta yorulma analizi gerçekleştirmek için, ilgilenilen şaftın çalışma sayfasının açılması gerekmektedir. Ardından yükleme şartının seçimi yapılmalıdır. Yükleme; tam yük, yarı yük veya farklı bir şiddette seçilebilir. Bu örnekte, tam yük (çalışma saati : 20 saat, şaftın dönmeye başladığı hız : 3000 rpm ve şafta uygulanan tork : 400 Nm) olacak şekilde yorulma analizi yapılacaktır. Bu yükleme şartını çözmek için %100 Loadcase seçimi yapılır ve Run butonuna tıklanır. Sonuçlarda stres içerisinden "Fatigue safety factor" seçimi yapılarak sonuçlar incelenmektedir.

Load case: 100% Low Speed

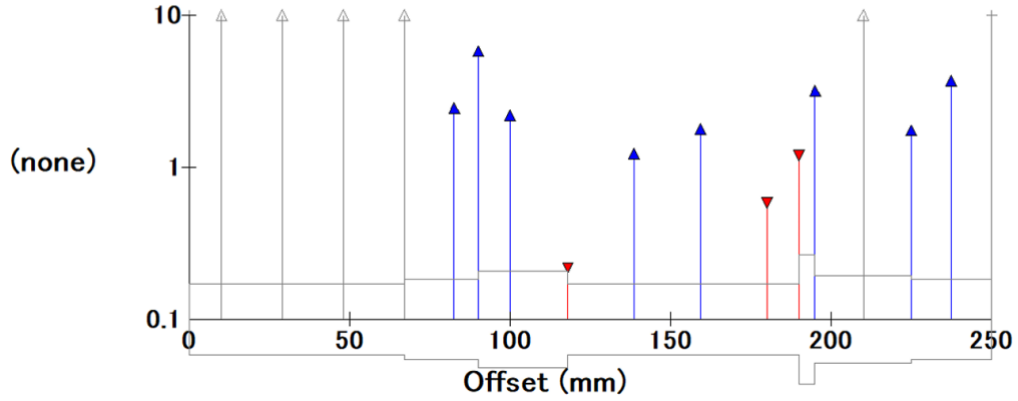
Run

Load Case Grid

Name	Duration (hrs)	Temperature (C)	Power In	Speed (rpm)	Torque (Nm)	Power (kW)	Power Out	Speed (rpm)	Torque (Nm)	Power (kW)
100% Low Speed	20.0000	70.000	3000	400.000000	125.663706	-1358	883.333334	-125.663706		
20% Low Speed	10.0000	70.000	3000	80.000000	25.132741					
40% Low Speed	25.0000	70.000	3000	160.000000	50.265482					
60% Low Speed	30.0000	70.000	3000	240.000000	75.398224					
80% Low Speed	40.0000	70.000	3000	320.000000	100.530965					

Figür 8 – Yükleme Şartının Seçilmesi ve Analizin Koşturulması

Input shaft [100% Low Speed]: Fatigue safety factor



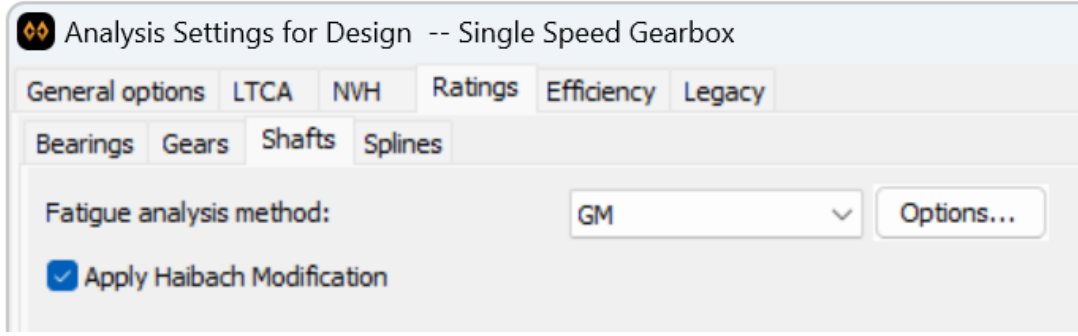
Figür 9 – DIN743 Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Grafik Gösterimi)

Node	Offset (mm)	Fatigue Safety Factor	Bending Kf	Axial Kf	Torsional Kf
1	0				
2	10.000	+Infinity	1.0	1.000	1.0
3	29.000	+Infinity	1.0	1.000	1.0
4	48.000	+Infinity	1.0	1.000	1.0
5	67.000	+Infinity	11.31	12.687	5.999
6	82.500	2.456	1.0	1.000	1.0
7	90.000	5.787	12.84	14.756	6.889
8	100.000	2.196	1.0	1.000	1.0
9	118.000	0.218	13.1	15.528	7.225
10	138.667	1.226	1.0	1.000	1.0
11	159.333	1.783	1.0	1.000	1.0
12	180.000	0.5811			
13	190.000	1.190	13.94	17.061	7.887
14	195.000	3.194	14.79	17.783	8.193
15	210.000	29.142	1.0	1.000	1.0
16	225.000	1.750	10.6	11.538	5.503
17	237.500	3.714	1.0	1.000	1.0
18	250.000				

Figür 10 – DIN743 Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Değer Gösterimi)

3.2. GM Standardına göre Yorulma Analiz Sonuçları

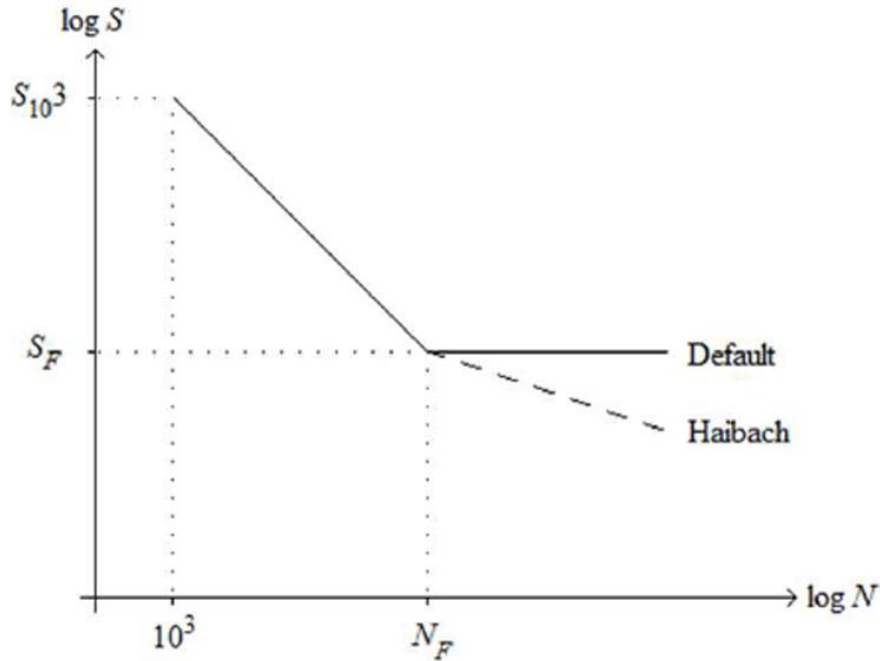
İkinci yorulma analizinde GM standardına göre çözüm alınacaktır. Romax'ta standart değişikliğini gerçekleştirmek için, Analysis>Settings>Raitings>Shafts yolu izlenmelidir. DIN743 standardı, GM standardı olarak değiştirilir ve ardından aynı yükleme şartları ile statik analiz koşturulur.



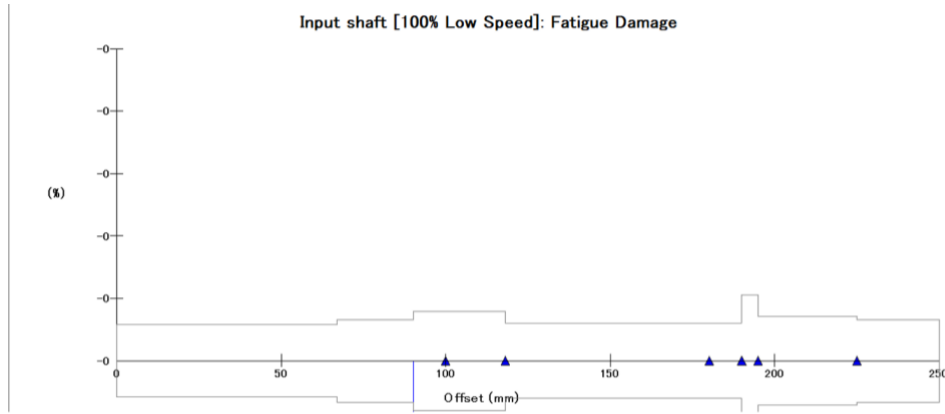
Figür 11 – Yorulma Standart Seçim Menüsü

Analiz ayarları penceresinde, şaft yorulma standardı yöntemi olarak GM'yi seçildiğinde, bu seçeneğin altında Haibach Modifikasyonu “Uygula”yı seçebilmek bir onay kutusu bulunmaktadır. Miner Haibach Modifikasyonu; yükleme senaryosundaki yüksek sayıdaki çevrim sırasında düşük stres içeriyorsa yararlı olabilmektedir. Bunun nedeni, GM yöntemi için standart S-N eğrisinin düşük gerilme değerleri için yorulma ömrünün sonsuz olacağını varsaymasıdır. Figür 12’de gösterilen, noktalı çizgi ile gösterilen Miner Haibach modifikasyonu, GM yöntemi için S-N eğrisini bu özel koşullar için daha temsili hale getirebilir. Dolayısıyla bu modifikasyonun uygulanması, normalde herhangi bir hasara yol açmayacak olan bu yükleri hesaba katacaktır.

Bu metodun dahil edilmediği analizlerde, sonsuz olarak rapor edilen bazı ömür değerlerinin, bu metodun dahil edildiği analizlerde artık sonlu ömür değerlerine sahip olduğu gözlenmektedir.



Figür 12 – Miner Haibach Modifikasyonu için S-N Eğrisi Gösterimi



Figür 13 – GM Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Grafik Gösterimi)

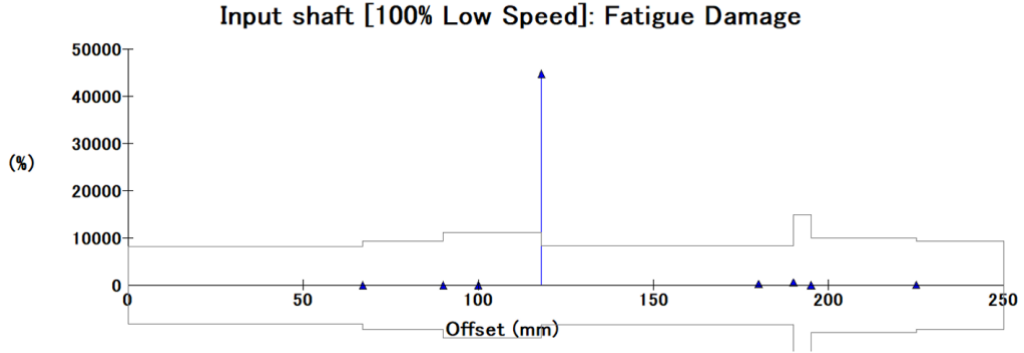
	Node	Offset (mm)	Life (Cycles)	% Damage	Bending Kf	Axial Kf	Torsional Kf
	1	0					
	2	10.000					
	3	29.000					
	4	48.000					
	5	67.000					
	6	82.500					
	7	90.000	<1000	+Infinity	1.0	1.000	1.0
	8	100.000	+Infinity	0	1.0	1.000	1.0
	9	118.000	13766.0182	2.615e4	1.308	1.343	1.177
	10	138.667					
	11	159.333					
	12	180.000	703061.238	512.0	2.001	2.100	1.531
	13	190.000	+Infinity	0	5.0	5.000	5.0
	14	195.000	+Infinity	0	2.511	5.000	5.0
	15	210.000					
	16	225.000	+Infinity	0	3.696	3.945	2.767
	17	237.500					
	18	250.000					

Figür 14 – GM Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Değer Gösterimi)

Bu yöntem sonlu ömrü (10-10 döngü arasında) hedeflediğinden, 10'un altındaki herhangi bir ömür toplam hasarı (+sonsuz) olarak kabul edilir ve 10'un üzerindeki herhangi bir ömür döngüsü %0 hasar yüzdesi ile sonsuz ömür (+sonsuz) olarak kabul edilmektedir.

3.3. ANSI Standardına göre Yorulma Analiz Sonuçları

Üçüncü yorulma analizinde ANSI standardına göre çözüm alınacaktır. Romax'ta standart değişikliğini gerçekleştirmek için, Analysis>Settings>Raitings>Shafts yolu izlenmelidir. GM standardı, ANSI standardı olarak değiştirilir ve ardından aynı yükleme şartları ile statik analiz koşturulur.



Figür 15 – ANSI Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Grafik Gösterimi)

	Node	Offset (mm)	Life (Cycles)
	1	0	
	2	10.000	
	3	29.000	
	4	48.000	
	5	67.000	0.0
	6	82.500	
	7	90.000	220071712
	8	100.000	1.91852906e12
	9	118.000	8042.8
	10	138.667	
	11	159.333	
	12	180.000	1730438.99
	13	190.000	597782.027
	14	195.000	1.47315589e10
	15	210.000	
	16	225.000	9970621.39
	17	237.500	
	18	250.000	

Figür 16 – ANSI Standardına göre Yorulma Analizi Sonuçları (Değer Gösterimi)

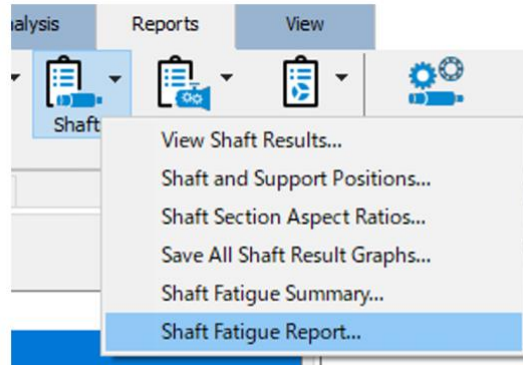
3.4. Yorulma Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Her standardın şafttaki yorulmanın hesaplanması için özel bir yaklaşımı bulunmaktadır. Varsayımlar ve değerlendirmeler (örneğin yüzey işlemi, sonsuz ömür vb.) her standartta farklıdır. Bu nedenle, farklı yöntemler üzerinden değerlendirilen yorulma sonuçları arasında bir ilişki kurulmaması önerilmektedir.

Bununla birlikte, her bir standart tarafından sağlanan bilgiler farklıdır ve elde edilen sonuçların detay seviyesini arttırmak ve bunu farklı sonuçlara temel olarak kullanmak, kullanıcı için faydalı olabilmektedir.

3.5. Şaft Yorulma Raporlarının Oluşturulması

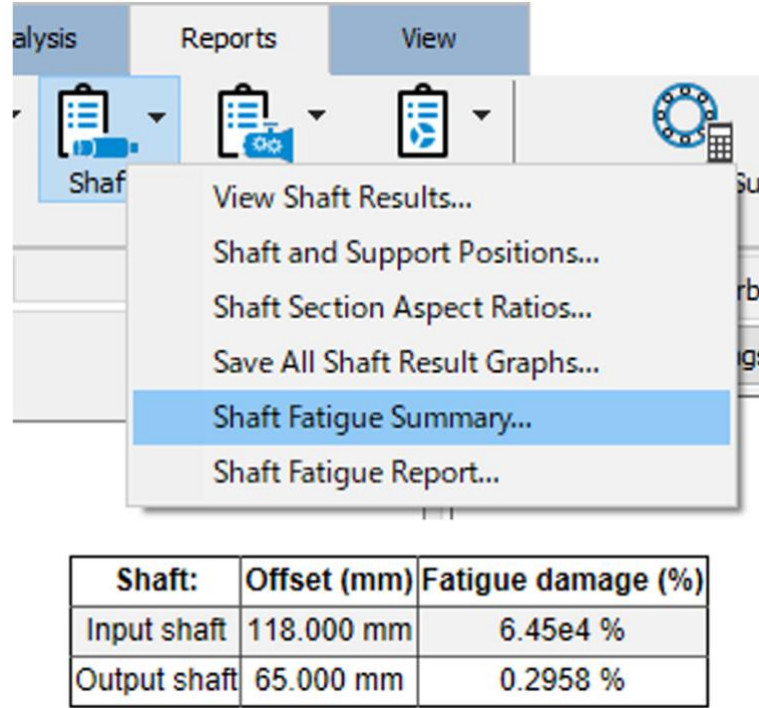
Romax'ta gerçekleştirilen her analiz için detaylı rapor çıktısı alınabilmektedir. Değerlendirmede kullanılan tüm yorulma standartlarının sonuçlarını içeren rapor ve özet alınması gerekmektedir. Romax'ta rapor ve özet dokümanları "Reports" sekmesinden alınmaktadır. Figür 17'de "Shaft Fatigue Report" seçeneği ile şaftlar için yorulma sonuçlarının raporu alınmaktadır.



Shaft:	Case	Fatigue damage (%)
Input shaft	All	6.45e4
	100% Low Speed	4.476e4
	20% Low Speed	0.2542
	40% Low Speed	82.7
	60% Low Speed	1731.6
	80% Low Speed	1.792e4
Output shaft	All	0.2958
	100% Low Speed	0.2137
	20% Low Speed	8.606e-7
	40% Low Speed	2.887e-4
	60% Low Speed	6.553e-3
	80% Low Speed	7.53e-2

Figür 17 – "Shaft Fatigue Report" menüsü ve sonucundan bir kesit

Figür 18’de ise “Shaft Fatigue Summary” seçeneği ile şaftlar için yorulma sonuçlarının özet bilgisi alınmaktadır.



Figür 18 – “Shaft Fatigue Summary” menüsü ve sonucundan bir kesit

4. Referanslar

- Romax 2024.1
- Romax Help Section
- Romax Users Guide
- Romax Enduro Tutorials, Shaft Fatigue Analysis