

# Sertleştirilmiş Silindirik Düz Dişli Çarkın Statik Eğilme Dayanımının Güvenirlik Analizi

## Reliability Analysis of the Static Bending Strength of Cylindrical Hardened Gears

Mehmet BOZCA<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Konstrüksiyon Anabilim Dalı 34349 Yıldız, İstanbul, Türkiye

### Öz

Bu çalışmanın amacı sertleştirilmiş silindirik düz dişli çarkın statik eğilme dayanımını güvenilirlik analizi temelinde incelemektir. Bu amaç için, bilye-püskürtülmüş ve bilye-püskürtülmemiş farklı çekirdek ve yüzey sertliği değerlerine sahip dişli çarklar bir yarı-statik yükleme koşulu sağlayan bir pulsator test makinasında test edilmiştir. Test edilen tüm dişli çark numunelerinin malzemeleri 20MnCr5 çeliğidir ve aynı geometriye sahiptirler. Diş kırılması için yarı-statik yükleme durumu deneysel olarak gözlemlenmiş ve ölçülmüştür. Hasara sebep olan uygulanan yük için eğilme gerilmeleri hesaplanmıştır. Yüzeyden başlayan diş-dibi hasarları deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bilye-püskürtme işleminin statik yükleme koşullarında dişin eğilme dayanımı üzerinde hiç olumlu etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Sertleştirilmiş silindirik düz dişli çarkın statik eğilme dayanımını güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Statik eğilme dayanımının ortalama değerleri, standart sapmalar ve standart değişkenleri hesaplanmıştır. Statik eğilme dayanımının güvenilirlik seviyelerinin literatürde verilen dayanım değerlerini sağladığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sertleştirilmiş dişli çark, Bilye-püskürtme, Eğilme dayanımı, Güvenirlik.

### Abstract

The target of this study is to investigate the static bending strength of teeth in cylindrical hardened gears based on reliability analysis. The effect of hardness on the static bending strength of the tooth of the cylindrical gear was investigated in the static loading conditions. The gears were carburized with low-pressure in a 4 mbar acetylene atmosphere and cooled with gas. In order to obtain different hardness values, different cooling rates were applied using different gases and gas-pressures. For this objective, shot-peened and unshot-peened gears having different core and surface hardness values are tested on a pulsator test machine providing a quasi-static loading condition. Shot peening treatment was performed according to Atmen A and Atmen N method. Material used for gear samples is 20MnCr5 steel and samples have the same geometry. The quasi-static load for tooth fracture is monitored and measured. The bending stresses for applied load which causes fracture is calculated. Tooth-root failures starting from the surface are experimentally observed. The shot-peening treatment is found to have no positive effect on the bending strength of the tooth under static loading conditions, although the shot peening treatment is effective in improving the dynamic bending strength of the gears. The increase in the hardness value results in an increase in the static bending strength of the gears. A high static bending strength value was obtained for high-rigidity gears heat-treated in a 20 bar Helium (He) atmosphere. The hardness of the core has been shown to have no significant effect on the determination of the static bending strength of the gears since the damage occurred from the surface. The appearance of the damage surfaces for gears is typical static loading damage from the surface, depending on the maximum tensile stress of the crack. Reliability involves the damage behavior of a product and is therefore an important criterion for product assessment. Gears are the most important machine elements in many mechanical power transmission systems and therefore the reliability of the gears is very important. Reliability analysis is required to determine the possible strength values of the gears to meet the strength values foreseen in the literature. Reliability analyses of the static bending strength of the tooth in cylindrical hardened gears are conducted. The mean values, standard deviations and standard variables of the static bending strength are calculated. It is concluded that the reliability levels of the static bending strength satisfy the required strength values given in the literature.

**Keywords:** Hardened gears, Shot-peening, Bending strength, Reliability.

## I. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı sertleştirilmiş silindirik düz dişli çarkın statik eğilme dayanımını güvenirlilik analizi temelinde incelemektir. Statik yüklenme koşullarında silindirik düz dişli çarkın dişinin eğilme dayanımına sertliğin etkisi incelenmiştir. Bilye-püskürtülmüş ve bilye-püskürtülmemiş farklı sertliğe sahip dişli çarklar yarı-statik yüklenme koşullarında pulsator test makinasında test edilmiştir.

Dişli çarkların mukavemetini arttırmak için çeşitli ısı işlemlerin uygulanması gerekir. Sertleştirme işlemi ile yüzeyde dayanımı arttırıcı sert bir tabaka oluşturulur.

Isıl işlemlerin amacı genellikle aşınmaya ve yorulmaya karşı dayanıklı yüzeyler elde etmektir. Elde edilen yüzey tabakası yüzeydeki bası gerilmeleri ile birlikte yorulma dayanımının arttırılmasında çok etkili olabilir [1].

Yüzey sertleştirme, çelik alaşımlarının yüzey sertliğini ve yorulma ömrünü arttırmak için sıkça kullanılan bir ısıl işlemdir. Bu sertleştirme işlemi bir karbürleme veya nitrürleme işlemi tarafından gerçekleştirilir. Bir parça, yüzey sertleştirme esnasında, bir yüksek sıcaklıkta karbonlu veya azotlu bir atmosfer etkisindedir. Karbon veya azot bakımından zengin bir yüzey tabakası gaz fazından atomik bir difüzyonla ortaya çıkar [2].

Yüzey sertleştirme ile çelik bir karbürizasyon sürecine girer. Yüzey sertleştirme işlemi esnasında, ürün karbon açısından zengin bir dış yüzey elde eder, böylece yüzey sertliği ve yorulma ömrü artar [3].

Dişli çarkların mukavemetini arttırmak için mekanik yüzey işlemlerin de uygulanması gerekir. Bilye püskürtme işlemi ile yüzeyde bası gerilmeleri oluşturulur.

Bilye-püskürtme metal parçaların yorulma dayanımını iyileştirmek için kullanılan bir mekanik yüzey işlemidir. Bilye-püskürtme işleminde yüksek sertlik değerine sahip küçük bilyeler yüzeye basınçla püskürtülür [4].

Bilye-püskürtme dişli çark gibi makina elemanlarının yorulma özelliklerini geliştirir. Bilye-püskürtme ile artık gerilmeler ve yüzey pürüzlükleri azaltılır ve yüzey tabakasındaki çalışma sertliği geliştirilir. Ayrıca, bilye-püskürtme işlemi çeşitli endüstrilerde maliyetleri azaltmak ve verimliliği arttırmak için fayda sağlayabilir [3].

Bası gerilmeleri yorulma hasarı dayanımını, korozyon yorulması hasarını ve gerilme korozyonu çatlamasını, hidrojen gevrekliği çatlamasını ve aralık korozyonunun dayanımını arttırmak için faydalıdır [5,6].

Artık basma gerilmeleri genel olarak bilye-püskürtme işlemi esnasında dış yüzey bölgesi içindeki bölgesel plastik deformasyon ile sünek metallere mekanik olarak uygulanır [5].

Sertleştirilmiş bir silindirik düz dişli çarkın dişinin statik eğilme dayanımına çekirdek sertliğinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çekirdek sertliğinin statik yüklenme koşullarında dişin eğilme dayanımına hiç dikkate değer bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir [7].

Dişli çarkın deneysel olarak elde edilen mukavemet değerlerinin literatürde ön görülen mukavemet değerlerini karşılayabilme olasılığını belirlemek için güvenirlilik analizi yapılması gerekir.

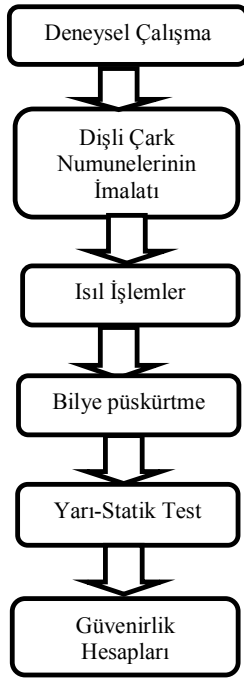
VDI 4001 (Verein Deutscher Ingenieure – Handbuch Technische Zuverlässigkeit) (Alman Mühendisler Odası – Teknik Güvenirlilik El Kitabı) direktifine göre [8] güvenirlilik belirli bir süre boyunca bir ürünün belirli işlevsel ve çevresel koşullar altında hasara uğrama olasılığıdır. Güvenirlilik bir ürünün hasar davranışını içerir ve bundan dolayı ürün değerlendirilmesi için önemli bir kriterdir.

Dişli çarklar, birçok mekanik güç iletim sistemlerinde en önemli makine elemanlarıdır ve bu yüzden dişli çarkların güvenirlilik analizleri çok önemlidir [9]. Dişli çarklar birçok durumda, yüksek hızlarda yüksek yük altında ve titreşim altında çalıştıklarından dolayı, dişli çarkların hasar türleri, diş dibi kırılması, yüzey basıncı hasarı (*pitting*) ve yenme (*scuffing*) olarak çeşitlenir [9]. Bu yüzden, dişli çarkların mukavemet değerlerinin güvenirliliği önem kazanır.

Bu çalışma aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2 de uygulanan metod sunulmuştur. Metod bölümünde, sertleştirilmiş düz dişli çark numunelerinin geometrisi, malzemesi, uygulanan ısıl işlemler ve bilye püskürtme işlemi açıklanmıştır. Test sonuçları da bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 3 de güvenirlilik analizi açıklanmış ve bölüm 4 de ise sonuçlar ve tartışma sunulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar bölüm 5 de özetlenmiştir.

## II. METOT

Bu çalışmada sertleştirilmiş silindirik düz dişli çarkın statik eğilme dayanımını belirlemek ve belirlenen dayanım değerlerinin güvenirlilik analizini gerçekleştirmek için aşağıdaki işlem sırası uygulanmıştır. Uygulanan işlemlerin akış şeması Şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1. Deneysel çalışmanın akış diyagramı

## 2.1 Sertleştirilmiş Düz Dişli Çark Numuneleri

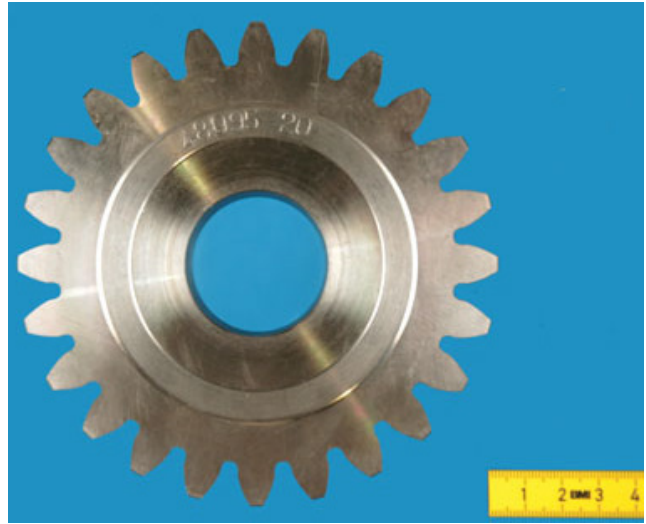
Dişli çark numuneleri statik yüklemde diş-dibinin eğilme dayanımını belirlemek için pulsator test makinasında test edilmiştir.

### 2.1.1 Dişli çark geometrisi

Dişli çark geometrisi olarak otomotiv transmisyonunda sıkça kullanılan silindirik düz dişli çark seçilmiştir. Dişli çark geometrisi parametreleri Tablo 1’de verilmektedir. Bir silindirik düz dişli çark numunesinin görünümü Şekil 2 de görülmektedir.

Tablo 1. Dişli çark geometrisi parametreleri

Dişli parametreleri	Sembol	Birim	Değer
Normal modül	$m_n$	[mm]	5
Diş genişliği	$b$	[mm]	30
Kavrama açısı	$\alpha$	[ $^\circ$ ]	20
Diş sayısı	$z$	[adet]	24
Diş dibi çapı	$d_a$	[mm]	130
Ortalama dairesi çapı	$d_0$	[mm]	120
Yüzey pürüzlülüğü	$R_z$	[ $\mu$ m]	10,4 – 1,1
Diş dibi genişliği	$S_{Fn}$	[mm]	10,925
Eğilme diş yüksekliği	$h_F$	[mm]	6
Gerilme düzeltme faktörü	$Y_s$	[-]	2,0
Dişli kalınlığı	$S_0$	[mm]	7,853



Şekil 2. Silindirik düz dişli çark

### 2.1.2 20MnCr5 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Dişli çark malzemesi 20MnCr5 çeliğidir ve element kompozisyonu Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. 20MnCr5 dişli çark malzemesinin element kompozisyonu

Element Kütle %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
	0,2	0,25	1,2	0,009	0,031	1,25	0,04	0,21	0,018	0,15	0,005
EN 10084	0,17-0,22	<0,4	1,1-1,4	<0,035	<0,035	1,0-1,3	-	-	-	-	-

### 2.1.3 Isıl İşlem

Tüm test edilmiş dişli çarklar farklı çekirdek ve yüzey sertliğinde sertleştirilmiştir. Dişli çarklar 4 mbar asetilen atmosferinde düşük-basınçla karbürize edilmiş ve gaz ile soğutulmuştur. Farklı sertlik değerlerini elde etmek için, farklı soğutma hızları farklı gazlar ve gaz-basınçları kullanarak uygulanmıştır. Böylece, düşük-sertlik Azot ( $N_2$ ) atmosferinde 2 bar basınç altında elde edilmiştir. Orta-sertlik Azot ( $N_2$ ) atmosferinde ve 6 bar basınç altında elde edilmiştir. Yüksek-sertlik Helyum (He) atmosferinde ve 20 bar basınç altında elde edilmiştir.

ISO 6336-5'e göre, sertlik ve dayanım dönüşümü mümkündür [12]. Sertlik ölçümü yüzeyden 2 [mm] derinliğe kadar gerçekleştirilmiştir. 20MnCr5 dişli malzemesinin eğilme dayanımı değerleri düşük-sertlik, orta-sertlik ve yüksek-sertlik için Tablo 3'de verilmektedir.

**Tablo 3.** 20MnCr5 malzemesinin sertlik ve dayanım ilişkisi

Düşük sertlik [HV1]	Referans dayanım $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Orta sertlik [HV1]	Referans dayanım $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Yüksek sertlik [HV1]	Referans dayanım $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Yüzey 699,95	2309,8	Yüzey 701,3	2335,3	Yüzey 717,97	2369,3
Çekirdek 314,6		Çekirdek 411,71		Çekirdek 451,94	

### 2.1.4 Bilye püskürtme

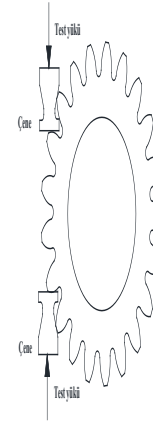
Bilye püskürtme dişlilerin yorulma dayanımını arttırmak için yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Bilye püskürtme esnasında yüzey tabakasına uygulanan yüksek basınçlı gerilmeleri çatlak başlangıcı için gerilme sınırını arttırmayı amaçlar. Kontrollü bilye püskürtme işlemi yüzey sertleştirmeden sonra uygulanmıştır. Bilye püskürtme işlemi Atmen A ve Atmen N metoduna göre [10,11] yapılmıştır ve bilye püskürtme işlemine ait parametreler Tablo 4 de verilmektedir.

**Tablo 4.** Bilye püskürtme işlemi parametreleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
Dövme şiddeti	0,018-0,020" A (0,45-0,50 mm A)	0,003-0,004" N (0,075-0,1 mm N)
Dövme oranı	%100	%200
Bilye malzemesi	Çelik tel kesme Ø 0,9 mm	Cam boncuk Ø 500 µm

### 2.2 Test Prosedürü

Dişli çarkların statik eğilme dayanımını belirlemek için dişli çarkın dişleri iki paralel temas çenesi arasında simetrik olarak sıkıştırılmıştır ve dişli çarkların dişleri statik olarak yüklenmiştir. Pulsator test makinasındaki diş konumu Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.** Pulsator test makinasında dişin konumu



**Şekil 4.** Pulsator test makinası

### 2.3 Test Sonuçları

Test makinasında kırılma hasarına karşılık gelen nominal uygulanan yük değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu değerler kullanılarak hasara karşılık gelen gerilme değerleri hesaplanmıştır.

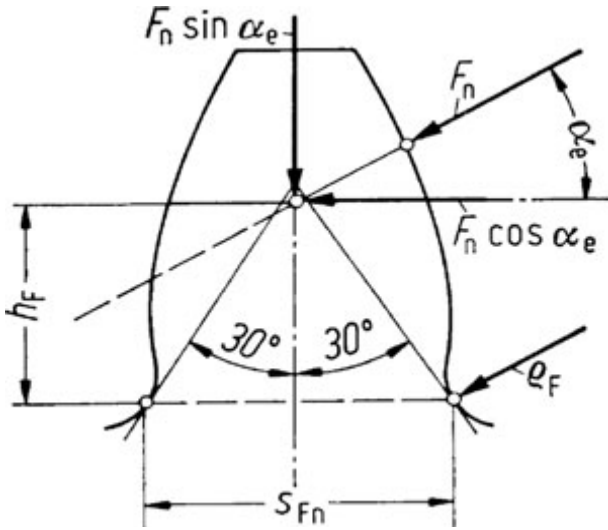
#### 2.3.1 Hasar yükleri ve diş-dibi gerilmeleri

Yarı-statik eğilme testlerinin deneysel sonuçları Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmektedir. Her bir grup için, dört test gerçekleştirilmiştir.

Nominal diş-dibi gerilmesi  $\sigma_{F0}$  aşağıdaki gibi hesaplanır [13]:

$$\sigma_{F0} = \frac{F_n \cos \alpha_a}{\frac{1}{6}(bS_{Fn}^2)} h_F Y_S \quad (1)$$

burada  $F_n$  temas doğrultusuna dik olan nominal uygulanan yük [N],  $\alpha_a$  kavrama açısı [ $^\circ$ ],  $h_F$  yükün uygulandığı noktadan diş dibine olan eğilme momentine sebep olan mesafe [mm],  $Y_S$  ISO 6336 ya göre gerilme düzeltme faktörü,  $b$  diş genişliği [mm] ve  $S_{Fn}$  kritik kesitteki diş dibi genişliği [mm], Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Dişli çarkın dişi

#### 2.3.2 Hasar analizi

Güvenirlik analizi için, bir pulsator testi üç farklı çekirdek ve yüzey-sertliğine sahip dişli çarkın dişleri için dört defa tekrarlanmıştır.

Bilye-püskürtülmüş, düşük-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 6'da gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda

nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2272 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2409 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

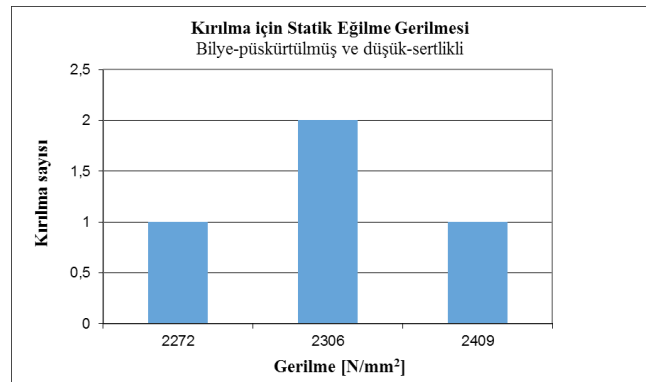
Bilye-püskürtülmüş, orta-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 7'de gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2480 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2491 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

Bilye-püskürtülmüş, yüksek-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 8'de gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2486 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2497 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

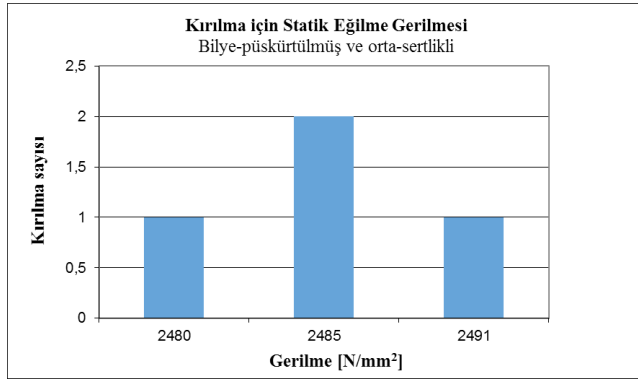
Bilye-püskürtülmüş, düşük-sertlikli, orta-sertlikli ve yüksek-sertlikli dişli çarkların tümünde yüzey sertliği arttığında, statik eğilme dayanımı artmaktadır.

Tablo 5. Bilye-püskürtülmüş dişli çarklar için statik eğilme testi sonuçları

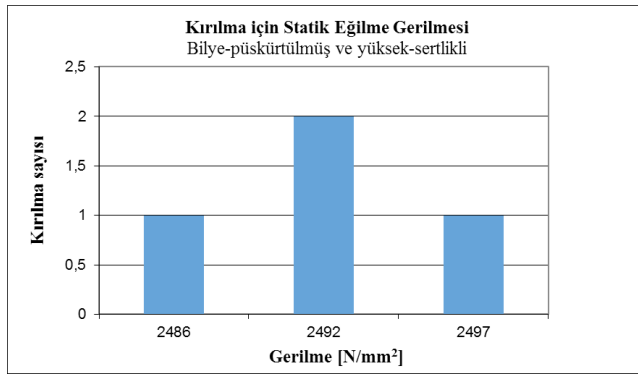
Grup	Sertleş-tirme İşlemi	Yüzey Sertliği [HV1]	Bilye Püs-kürtme	Hasardaki Statik Yük $F_n$ [N]	Hasardaki Diş-dibi Gerilmesi $\sigma_{F0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	2 bar Azot (N <sub>2</sub> )	699,95	Uygu-landı	120240	2272
				122050	2306
				122050	2306
				127470	2409
2	6 bar Azot (N <sub>2</sub> )	701,3	Uygu-landı	131270	2480
				131540	2485
				131540	2485
				131810	2491
3	20 bar Helyum (He)	717,97	Uygu-landı	131550	2486
				131850	2492
				131850	2492
				132150	2497



Şekil 6. Bilye-püskürtülmüş, düşük-sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı



Şekil 7. Bilye-püskürtülmüş, orta sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı



Şekil 8. Bilye-püskürtülmüş, yüksek-sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı

Bilye-püskürtülmemiş, düşük-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 9'da gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2403 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2439 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

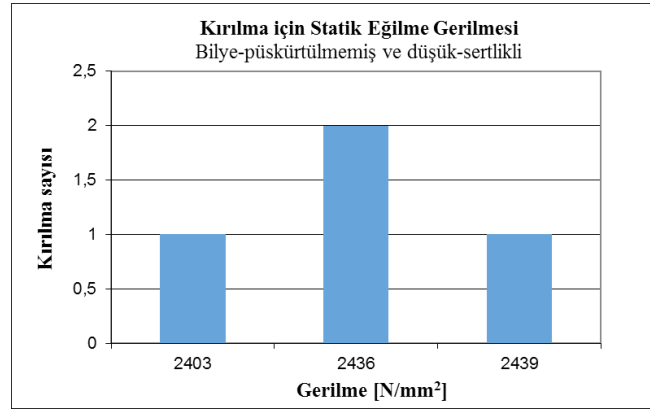
Bilye-püskürtülmemiş, orta-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 10'da gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2419 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2508 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

Bilye-püskürtülmemiş, yüksek-sertlikli dişli çarklar için statik eğilme dayanımının hasar ihtimalinin histogramı Şekil 11'de gösterilmiştir. Pulsator testi esnasında hasar durumunda nominal diş-dibi gerilmesi değeri  $\sigma_{F0}$ , 2457 [N/mm<sup>2</sup>] ile 2519 [N/mm<sup>2</sup>] arasında değişmektedir.

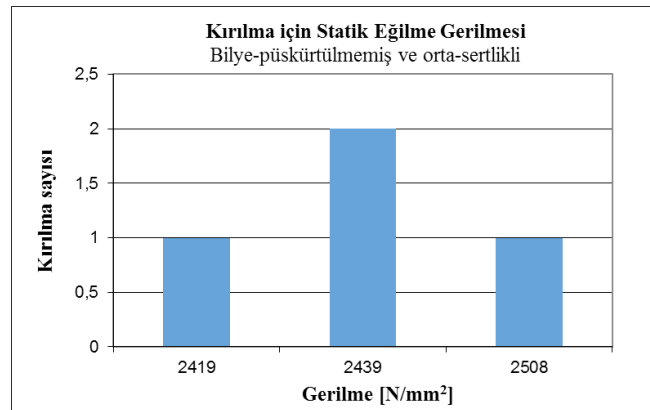
Bilye-püskürtülmemiş, düşük-sertlikli, orta-sertlikli ve yüksek-sertlikli dişli çarkların tümünde yüzey sertliği arttığında, statik eğilme dayanımı artmaktadır.

Tablo 6. Bilye-püskürtülmemiş dişli çarklar için statik eğilme testi sonuçları

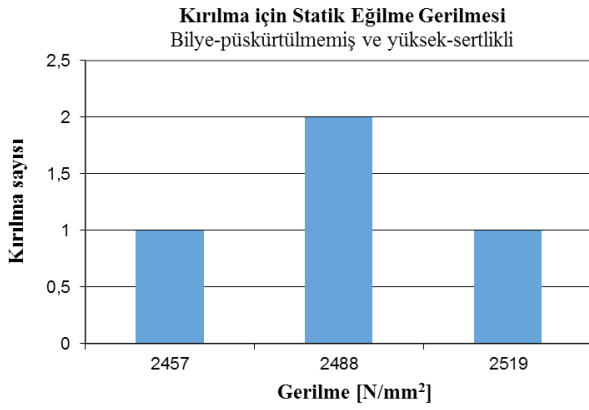
Grup	Sertleştirme İşlemi	Yüzey Sertliği [HV1]	Bilye Püskürtme	Hasar-daki Statik Yük $F_n$ [N]	Hasar-daki Diş-dibi Gerilmesi $\sigma_{F0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	2 bar Azot (N <sub>2</sub> )	699,95	Uygulanmadı	127180	2403
				128910	2436
				128910	2436
				129080	2439
2	6 bar Azot (N <sub>2</sub> )	701,3	Uygulanmadı	128030	2419
				129080	2439
				129080	2439
				132710	2508
3	20 bar Helyum (He)	717,97	Uygulanmadı	130030	2457
				131680	2488
				131680	2488
				133340	2519



Şekil 9. Bilye-püskürtülmemiş, düşük-sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı



Şekil 10. Bilye-püskürtülmemiş, orta sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı



Şekil 11. Bilye-püskürtülmemiş, yüksek-sertlikli dişli çarklar için hasara sebep olan statik eğilme gerilmelerinin histogramı

### III.GÜVENİRLİK ANALİZİ

Güvenirlik analizi için, statik eğilme dayanımının ortalama değerleri, standart sapmaları ve standart değişkenleri hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 7 ve Tablo 8'de sunulmuştur.

#### 3.1 Hasar İhtimali Fonksiyonu

Hasar ihtimali hesaplamaları için aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır [14]:

$$f(\sigma) = \frac{1}{S_\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\sigma - \sigma_m)^2}{2S_\sigma^2}\right] \quad (2)$$

burada  $S_\sigma$  standart sapma,  $\sigma$  nominal gerilme ve  $\sigma_m$  gerilmenin ortalama değeridir.

#### 3.2 Ortalama Değer

Gerilmenin ortalama değeri,  $\sigma_m$  [N/mm<sup>2</sup>] için aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır [14]:

$$\sigma_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3)$$

burada  $n$  testlerin sayısı ve  $\sigma_i$  [N/mm<sup>2</sup>] her bir test için ölçülen gerilmedir.

#### 3.3 Standart Sapma

Gerilmenin standart sapması  $S_\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] için aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır [14]:

$$S_\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_m)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

burada  $\sigma_i$  [N/mm<sup>2</sup>] her bir test için ölçülen değerdir ve  $\sigma_m$  [N/mm<sup>2</sup>] gerilmenin ortalama değeridir.

#### 3.4 Standart Değişken

Gerilmenin standart değişkeni  $z_\alpha$  için aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır [14]:

$$z_\alpha = \frac{\sigma_i - \sigma_m}{S_\sigma} \quad (5)$$

burada  $\sigma_i$  [N/mm<sup>2</sup>] malzemenin literatürde verilen static eğilme dayanımıdır.

### IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bilye-püskürtülmüş dişli çarklar için statik eğilme dayanımının güvenilirlik analizi parametreleri Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Bilye-püskürtülmüş dişli çarkların güvenilirlik analizi parametreleri

Grup	Sertleştirme işlemi	Referans dayanım $\sigma_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Ortalama değer $\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Standart sapma $S_\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Standart değişken $z_\sigma$ [-]	Güvenirlik R [%]
1	2 bar Azot (N <sub>2</sub> )	2309,8	2323,25	59,37	-0,2265	>99
2	6 bar Azot (N <sub>2</sub> )	2335,3	2485,25	4,5	-33,3222	>99
3	20 bar Helyum (He)	2369,3	2491,75	4,5	-27,2111	>99

Bilye-püskürtülmüş ve düşük sertlikli dişli çarkların (1.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ 'den % 0,58 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmüş ve orta sertlikli dişli çarkların (2.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ 'den % 6,4 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmüş ve yüksek sertlikli dişli çarkların (3.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ 'den % 5,2 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmemiş dişli çarklar için statik eğilme dayanımının güvenirlilik parametreleri Tablo 8’de sunulmaktadır.

**Tablo 8.** Bilye-püskürtülmemiş dişli çarkların güvenirlilik analizi parametreleri

Grup	Sertleştirme işlemi	Referans dayanım $\sigma_i$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Ortalama değer $\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Standart sapma $S_\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Standart değişken $z_\sigma$ [-]	Güvenirlilik R [%]
1	2 bar Azot (N <sub>2</sub> )	2309,8	2428,5	17,05	-6,9618	>99
2	6 bar Azot (N <sub>2</sub> )	2335,3	2451,25	38,99	-2,9768	>99
3	20 bar Helyum (He)	2369,3	2488	25,31	-4,6898	>99

Bilye-püskürtülmemiş ve düşük sertlikli dişli çarkların (1.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ ’den % 5,1 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmemiş ve düşük sertlikli dişli çarkların (3.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ ’den % 4,9 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmemiş ve düşük sertlikli dişli çarkların (2.grup), kırılma hasarının gerçekleştiği ortalama gerilme değeri  $\sigma_m$ , referans dayanım değeri  $\sigma_i$ ’den % 5,0 daha yüksektir.

Bilye-püskürtülmüş ve bilye-püskürtülmemiş dişli çarkların statik eğilme dayanımı karşılaştırıldığında; düşük-sertlik için % 4,5 orta sertlik için % 1,4 ve yüksek sertlik için % 0,15 fark vardır.

Bilye-püskürtme işleminin dişli çarkların statik eğilme dayanımını artırıcı-olumlu bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çekirdek sertliğinin, dişli çarkların statik eğilme dayanımının belirlenmesinde, hasar oluşumu yüzeyden başladığından dolayı belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Dişli çark dişlerinin statik eğilme dayanımının ortalama değerleri 20MnCr5 dişli çark malzemesinin statik eğilme dayanım değeri olan  $\sigma_e=2180$  [N/mm<sup>2</sup>] den (650 HV ve yukarı için) [12] daha büyüktür.

#### 4.1 Hasar Yüzeyinin Makro-Yapısı

Dişli çarkın hasar yüzeyinin makro-yapısı bir “PROGRESS 3012 Digital optik kamera” ile gözlemlenmiştir. Bilye-püskürtülmüş ve bilye-püskürtülmemiş dişli çarklar için hasar yüzeylerinin görünümü Şekil 12-13’de gösterilmektedir. Kırılma yüzeyleri çatlağın maksimum çekme gerilmesine

göre yüzeyden başladığı tipik statik yükleme hasarları görünümündedir. Şekil 14 diş-dibi eğilme hasarının dış simetri eksenine ile 30° eğim yapan doğrunun diş-dibi kavislerine teğet olduğu noktada olduğunu gösterir.



**Şekil 12.** Bir bilye-püskürtülmüş, yüksek-sertlikli dişli çarkın dişinin kırılma yüzeyi



**Şekil 13.** Bir bilye-püskürtülmemiş, yüksek-sertlikli dişli çarkın dişinin kırılma yüzeyi



**Şekil 14.** Silindirik düz dişli çarkın dişinin hasar görünümü



## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı sertlikteki silindirik düz dişli çarkların dişinin statik eğilme dayanımı güvenilirlik temelinde deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, bilye-püskürtülmüş ve bilye-püskürtülmemiş düşük-sertlikli, orta-sertlikli ve yüksek-sertlikli gibi farklı çekirdek ve yüzey sertlik değerlerine sahip dişli çarklar pulsator test makinasında test edilmiştir.

Test sonuçları sertliğin dişli çarkların dişlerinin statik eğilme dayanımlarının belirlenmesinde iyi bir referans olduğunu göstermiştir.

- i. Hasar yüzeyinin gözlemlenmesiyle, bir tipik statik yüklenme hasarı yüzeyi ve hasarın diş simetri eksenine ile 30° eğim yapan doğrunun diş kavislerine teğet olan noktada olduğu görülmektedir.
- ii. Sertlik değerinin artması dişli çarkın diş-dibi eğilme dayanımının artmasıyla sonuçlanmaktadır.  
Bir yüksek eğilme dayanımı değeri 20 bar Helyum (He) atmosferinde ısıl işlem görmüş yüksek-sertlikli dişli çarklar için elde edilmiştir.
- iii. Düşük-sertlikli dişli çarklar, 2 bar Azot (N<sub>2</sub>) atmosferinde sertleştirilerek elde edilmiştir. Düşük-sertlikli dişli çarkların güvenilirlik seviyeleri (R>99%) istenilen değerleri sağlamaktadır.
- iv. Orta-sertlikli dişli çarklar, 6 bar Azot (N<sub>2</sub>) atmosferinde sertleştirilerek elde edilmiştir. Orta-sertlikli dişli çarkların güvenilirlik seviyeleri (R>99%) istenilen değerleri sağlamaktadır.
- v. Yüksek-sertlikli dişli çarklar, 20 bar Helyum (He) atmosferinde sertleştirilerek elde edilmiştir. Yüksek-sertlikli dişli çarkların güvenilirlik seviyeleri (R>99%) istenilen değerleri sağlamaktadır.
- vi. Bilye-püskürtme dişli çarkların değişken eğilme dayanımlarının iyileştirilmesinde etkili bir işlem olmasına rağmen, dişlilerin statik eğilme dayanımlarının iyileştirilmesinde hiç etkili olmadığı belirlenmiştir.
- vii. Çekirdek sertliğinin, dişli çarkların statik eğilme dayanımının belirlenmesinde, hasar oluşumu yüzeyden başladığından dolayı, belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- viii. Bütün test gerilmeleri referans dayanım değerlerinin üzerinde olduğundan, bütün dişli çarkların güvenilirliklerinin 99% civarında olduğunu tahmin etmek mümkün olmasına rağmen, bir güvenilirlik analizi ürün güvenirligini tahmin etmek için her bir imalat ve tasarım aşamasında gereklidir.

- ix. Dişli çarklar yaygın olarak mekanik sistemlerde kullanıldığından, elde edilen sonuçlar ve kullanılan metotlar dişli imalatçıları için faydalıdır.

## Teşekkür

Yazar, Münih Teknik Üniversitesi, FZG Dişli Çark Araştırma Merkezi'nde misafir araştırmacı olduğu süreçte katkılarından dolayı Prof. Dr.-Ing. Bernd Robert Höhn'e teşekkür eder.

## Kaynaklar

- [1] Juvinal, Robert C. and Marshek, Kurt M., (2000). Fundamentals of Machine Component Design, *John Wiley & Sons, Inc.*, U.S.A.
- [2] William D. Callister, Jr., (2007). Materials Science and Engineering, An Introduction, *John Wiley & Sons, Inc.*, U.S.A.
- [3] Karin Björkeborn, Uta Klement, Hans-Börje Oskarson, (2010). Study of microstructural influences on machinability of case hardening steel, *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 441-446.
- [4] A.T. Vielma, V.Llaneza, F.J. Belzunce, (2014). Shot peening intensity optimisation to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel, *Procedia Engineering* 74, 273-278.
- [5] S. B. Mahagaonkar, P. K. Brahmanekar, C. Y. Seemikeri, (2008). Effect of shot peening parameters on microhardness of AISI 1045 and 316L material: an analysis using design of experiment, *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 563-564.
- [6] R. Yang, X Zhang, D. Mallipeddi, N. Angelou, H.L. Toftegard, Y.Li, J. Ahlström, L. Lorentzen, G. Wu, X. Huang, (2017). Effect of shot peening on the residual stress and mechanical behaviour of low-temperature and high-temperature annealed martensitic gear steel 18CrNiMo7-7, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 219, 1-7.
- [7] Mehmet Bozca, (2008). Influence of core hardness on bending strength of tooth in cylindrical gears under quasistatic loading conditions, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31, 902-910.
- [8] VDI 4001: Verein Deutscher Ingenieure –Handbuch Technische Zuverlässigkeit.
- [9] Fang Jun Zuo, Le Yu, Jinhua Mi, Zheng Liu, Hong Zhong Huang, (2015). Reliability analysis of gear transmission with considering failure correlation, *Maintenance and Reliability*, 17 (4) 617-623.
- [10] Alessandro Stenico, (2007). Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder, *Institut für Maschinen – und Fahrzeugtechnik – Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München, München.*

- [11] Hamza Kemal Akyıldız, (1998). Bilyeli dövmenin Fe+%2 Cu +%0,5 C Toz Metal Çeliđin Yorulma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen BilimleriEnstitüsü*, Ankara.
- [12] ISO 6336-5, Calculation of load capacity of spur and helical gears-Part 5: Strengthand quality of materials.
- [13] ISO 6336-3, Calculation of load capacity of spur and helical gears-Part 3: Calculation of tooth bending strength.
- [14] Bernd Bertsche, “Reliability in Automotive and Mechanical Engineering”, Springer,2008.