

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNEK ARAÇLARDAKİ ROT BAŞLARINDA
YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Duygu ZERKİN

Ekim, 2019

İZMİR

BİNEK ARAÇLARDAKİ ROT BAŞLARINDA YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Yüksek Lisans Programı

Duygu ZERKİN

Ekim, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DUYGU ZERKİN, tarafından PROF. DR. EMİNE ÇINAR YENİ yönetiminde hazırlanan “BİNEK ARAÇLARDAKİ ROT BAŞLARINDA YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Emine Çınar YENİ

Yönetici



Prof. Dr. Binnur GÖREN KIRAL

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Buket Okutan Toksoy

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sırasında her zaman yanımda ve anlayışlı olan, benden bilgilerini ve deneyimlerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Emine Çınar YENİ'ye teşekkür ederim.

Tez süresince benden yardımlarını esirgemeyen ZF Lemförder çalışma arkadaşlarım, Buğra ÇETİN, Mehmet UÇAR, Kerem TAŞ, Çağrı ORUÇ ve Ender ERDOĞAN' a teşekkür ederim.

Yüksek lisans boyunca her konuda yanımda ve yardımcı olan aileme ve Uğur GENÇALP' e teşekkür ederim.

Duygu ZERKİN

BİNEK ARAÇLARDAKİ ROT BAŞLARINDA YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZ

Rotlar direksiyon sisteminin statik, dinamik ve yatak yüklerine maruz kalan en önemli bağlantı parçalarından biridir. Özellikle direksiyon sistemindeki güvenlik elemanı olduklarından dolayı yorulma dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir. Tasarım aşamasında, rotların yorulma ömrünü tamamlamadan önce kırılma tespit edilmesi durumunda yorulma ömrünün tamamlanabilmesi adına rot başı mafsal miline sertleştirme işlemi uygulanmaktadır. Günümüzde birçok sertleştirme işlemi yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler arasından yüzey kalitesini iyileştirici özelliğe sahip olan yöntemin seçilmesi prosesin geliştirilmesi açısından önemli bir husustur.

Bu çalışmada, yorulma yüklerine maruz kalan binek araçlardaki rot başları için yorulma davranışı incelenmiştir. Çalışma mafsal millerine uygulanan sertleştirme işleminin derin haddeleme ile yapılarak mafsalın yorulmaya karşı dayanımını arttırmayı ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında derin haddeleme işlemi uygulanmış ve derin haddeleme işlemi uygulanmamış mafsal mili numunelerine yorulma testi uygulanarak derin haddeleme işleminin yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüzey sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve geometrik ölçüm kontrolleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yorulma ömrü, rot başı, derin haddeleme, sertleştirme, direksiyon sistemi

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOR IN OUTER TIE RODS IN PASSENGER CARS

ABSTRACT

Tie rods which are subjected to static, dynamic and bearing loads are one of the important linkage components of the steering gears. Especially their fatigue endurance should be high since they are a safety component in steering gear. In case at design phase, a breakage is detected before completion of tie rod fatigue life, hardening process is applied to outer tie rod ball pin in order to be completed fatigue life. Nowadays many hardening process methods are available. Selecting the method which has the property of improving the surface quality is an important point in terms of developing the process.

In this study, fatigue behavior has been evaluated for the outer tie rods which are subjected to fatigue loads at the vehicle. The study aims to increase the strength of the ball pin against fatigue and to improve the surface properties by deep rolling which is the hardening process applied to the ball pins. Within the scope of the study, the effects of deep rolling process on fatigue life has been evaluated by performing fatigue test to the specimens which are implemented and not implemented deep rolling. Surface hardness, surface roughness and geometric dimensional inspections were carried out.

Keywords: Fatigue life, outer tie rod, deep rolling, hardening, steering gear

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	2
BÖLÜM İKİ - BİNEK ARAÇLARDA DİREKSİYON SİSTEMİ VE ROTLAR7	
2.1 Direksiyon Sistemi	7
2.1.1 Pinyon Kremayer Dişli Kutusu	8
2.2 Direksiyon Sistemi Rotu	9
2.2.1 Rot Kolu.....	11
2.2.2 Rot Başı.....	13
BÖLÜM ÜÇ - METAL YORULMASI.....	15
3.1 Yorulmanın Tarihçesi.....	15
3.2 Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler	18
3.2.1 Temel faktörler.....	19
3.2.2 Ek Faktörler.....	19
3.2.2.1 Sıcaklık.....	19

3.2.2.2 Korozyon	19
3.2.2.3 Mikro Yapı	20
3.2.2.4 Yüzey İşleme Kalitesi	20
3.2.2.5 Çentik Etkisi	22
3.2.2.6 Soğuk Deformasyon	22
3.3 Yorulma Ömrünün Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	23
3.3.1 Gerilme (S) – Ömür (N) Yaklaşımı	24
3.3.1.1 Ortalama Gerilme Etkisi.....	28
3.3.2 Birim Şekil Değiştirme (ϵ) – Ömür (N) Yaklaşımı.....	31
BÖLÜM DÖRT - BİNEK ARAÇ ROTLARINDA YORULMA VE SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	34
4.1 Binek Araç Rotlarında Yorulma	34
4.2 Sertleştirme Yöntemleri	38
4.2.1 İndüksiyonla Sertleştirme.....	38
4.2.2 Nitrasyon ile Sertleştirme.....	40
4.2.3 Derin Haddeleme ile Sertleştirme	42
BÖLÜM BEŞ - ROT BAŞLARINDA HADDELEME İLE SERTLEŞTİRME..	45
5.1 Yorulma Testi.....	46
5.2 Küresel Mafsal Eğilme Darbe Testi	48
5.3 Küresel Mafsal Statik Eğilme Testi	49
5.4 Küresel Mafsal Sertlik ve Pürüzlülük Ölçümü	49
BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Tasarım iyileştirme sonrası güvenlik katsayısı	3
Şekil 1.2 Rotun burkulma analizi ve test sonucu	4
Şekil 1.3 Rotun Von Mises gerilme analizi	6
Şekil 2.1 Direksiyon sistemi	8
Şekil 2.2 Pinyon kremayer dişlisi	9
Şekil 2.3 Direksiyon kremayer ve pinyon kinematığı.....	10
Şekil 2.4 Farklı rot kolu ve rot başı tasarımları.....	11
Şekil 2.5 Rot kolu bileşenleri	12
Şekil 2.6 Eksenel mafsallın dövme aşamaları	12
Şekil 2.7 Rot başı bileşenleri.....	13
Şekil 2.8 Radyal gövdenin dövme aşamaları	14
Şekil 2.9 Çeşitli rot başı geometrileri.....	14
Şekil 3.1 Wöhler yorulma test düzeneği	16
Şekil 3.2 New Hope buharlı tren ve Ivyland Demiryolu	17
Şekil 3.3 Farklı ortamların çeliklerin S-N eğrisi üzerindeki etkisi	20
Şekil 3.4 Çelik parçalardaki yüzey kalitesi faktörleri	21
Şekil 3.5 Çentik oluşumunun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi	22
Şekil 3.6 Çeliklerde gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı	23
Şekil 3.7 Bir uçağın yük değişimi	24
Şekil 3.8 Bir çeliğin yorulma ömür eğrisi.....	25
Şekil 3.9 Wöhler Eğrisi	25
Şekil 3.10 Sabit genlikli çevrimsel yükleme.....	26
Şekil 3.11 Çevrimsel yükleme çeşitleri.....	26
Şekil 3.12 Basquin tipi S-N eğrisi.....	28
Şekil 3.13 Ortalama gerilmenin yorulma ömrü üzerindeki etkisi	29
Şekil 3.14 Değişken gerilme ile ortalama gerilme arasındaki deneysel ilişkisi.....	30
Şekil 3.15 Birim şekil değiştirme – ömür eğrileri.....	31
Şekil 3.16 Gerilme-yer değiştirme histerezis döngüsü	32
Şekil 4.1 Rot başı küresel mafsall mili.....	35

Şekil 4.1’de mafsalsal mili boyun bölgesinden kırılmış bir rot başı görülmektedir.....	35
Şekil 4.2 Mafsalsal mili boyun bölgesinden kırılmış bir rot başı.....	36
Şekil 4.3 Boyun bölgesinden kırılmış mafsalsal milinin kesit alanı	36
Şekil 4.4 Çatlak ilerleme bölgesi	37
Şekil 4.5 Kırılma yüzeyinin son yüzey kısmı	37
Şekil 4.6 İndüksiyonla sertleştirme	39
Şekil 4.7 İndüksiyonla sertleştirilmiş numunenin mikro yapısı	40
Şekil 4.8 Nitrürleme katmanları.....	41
Şekil 4.9 Derin haddelemenin çeliklerin S-N eğrisi üzerindeki etkileri	43
Şekil 4.10 AISI 304 çeliği numunelerinin Rz pürüzlülük değerleri.....	44
Şekil 5.1 Derin haddeleme düzeneği.....	45
Şekil 5.2 Yorulma test cihazı	46
Şekil 5.3 Derin haddeleme uygulanmış rotaların Wöhler eğrisi.....	48
Şekil 5.4 Küresel mafsalsal statik eğilme testi	49
Şekil 5.5 Profilometre	51
Şekil 5.6 Aynı Ra değerine sahip farklı yüzey profilleri	52
Şekil 5.7 En büyük profil yüksekliği	53

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Farklı mafsal mili konumlarındaki maksimum gerilmeler	3
Tablo 4.1 Nitrasyonun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi	41
Tablo 4.2 Haddelenmiş ve haddelenmemiş cıvataların yorulma dayanımları	42
Tablo 5.1 Derin haddelme ile sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş rotların yorulması	47
Tablo 5.2 Küresel mafsal eğilme darbe testi sonuçları	49
Tablo 5.3 Küresel mafsal statik eğilme testi sonuçları	50
Tablo 5.4 Küresel mafsal sertlik ölçüm sonuçları.....	51
Tablo 5.5 Küresel mafsal pürüzlülük ölçüm sonuçları	52

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Rotlar, direksiyon sisteminin güvenlik açısından en önemli elemanlarıdır. Direksiyon sistemi ile tekerlekler arasında bağlantıyı sağlarlar ve direksiyon sisteminden gelen doğrusal hareketi aksona iletirler. Rotlar, rot başı ve rot kolu olmak üzere iki ana parçanın bir somun yardımıyla birbirine bağlanmasından oluşmaktadır. Böylece ayarlanabilir bir rot uzunluğu elde edilebilmektedir.

Rotlar çalışma esnasında birçok şekilde hasara uğrayabilirler ve genellikle hasar oluşana kadar bir işaret vermezler. Bunlardan biri de yorulma hasarı ya da kırılmasıdır. Yorulma kırılması genellikle rot başı mafsalsal milinin boyun kısmında veya mafsalsal milinin konik kısmında tekerlek aksununun oturduğu çapta (gauge diameter) gerçekleşir.

Günümüzde ana sanayi otomobil firmaları tarafından rotlar için yük gereksinimleri her geçen gün arttırılmaktadır. Rot başlarının yorulma gereksinimlerini karşılaması için ana sanayi tarafından şart koşulan yük ve çevrim sayısını tamamlamaları gerekmektedir. Verilen yük ve çevrim sayısını göz önünde bulundurarak tasarım aşamasında yorulma dayanımı tahlil edilmelidir. Yorulma dayanımı değerlendirilirken sonlu elemanlar analizleri ve mühendislik hesapları kullanılabilir.

Tasarım evresinde yapılan değerlendirmeler sonucu, rot başı mafsalsal milinin yorulma ömrünü tamamlamadan kırıldığı tespit edilebilir. Bu durumda mafsalsal millerinin yorulma ömrünü tamamlayabilmeleri için sertleştirme işlemi uygulanması öngörülmektedir. Mevcut olarak uygulanan birçok sertleştirme işlemi vardır. Giderek artan ana sanayi gereksinimleri ve maliyetler düşünüldüğünde seçilecek olan sertleştirme yönteminin diğer yöntemlere göre daha avantajlı ve mümkünse daha az maliyetli olması tercih edilmelidir.

Bu çalışmada yorulma ömrünü tamamlamadan kırılacağı saptanan rot başı mafsalsal millerine derin haddeleme yöntemi ile sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Derin

haddelme işlemi mafsall milinin konik bölgesinin iki adet silindirik makara arasına alınarak sertleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Sertleştirme işlemi uygulanan numunelere yorulma testi uygulanarak derin haddelmenin yorulma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sertleştirme işlemi uygulanmamış numunelere de yorulma testi uygulanarak aradaki farklar incelenmiştir. Bunun yanında derin haddelme işleminden yüzey özelliklerini iyileştirici bir performans beklenmektedir. Bu nedenle sertleştirme uygulanmadan önce numunelerin yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve geometrik ölçümleri yapılmıştır. Aynı numunelere sertleştirme uygulandıktan sonra yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve geometrik ölçümler yapıldıktan sonra derin haddelme işleminin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

1.1 Literatür Taraması

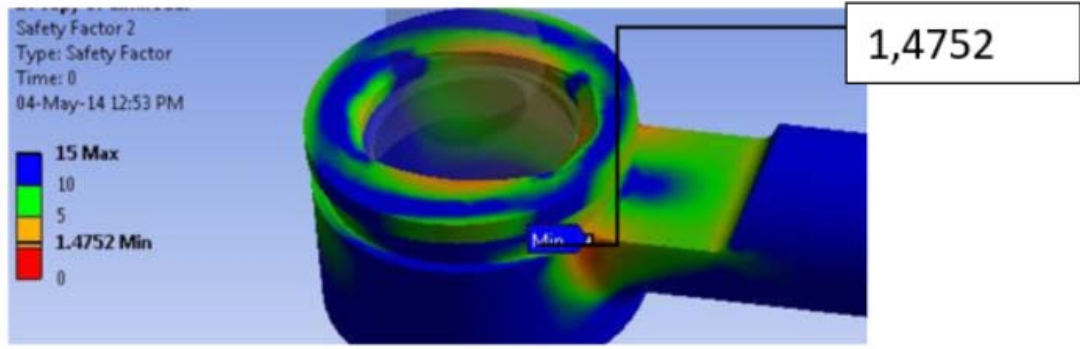
Uludamar, Biçer ve Taş (2018), ST 52-3 kalite çelikten üretilmiş bir rotun sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Analiz için CREO programında rotun tasarımı yapılmıştır. Analiz için Ansys Workbench programı kullanılmıştır. Ağ yapısı oluşturulurken gövdenin kafa kısmında parabolik dört yüzlü elemanlar, şaft kısmında ise prizma elemanlardan yararlanılmıştır. 6 tonluk yük altında yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda gövde üzerindeki maksimum gerilme 677,6 MPa ve güvenlik katsayısının 0,65 olduğu elde edilmiştir.

Pehlivan ve Özsoy (2014), ticari araç için rot başının yapısal mühendislik çözümlemelerini yapmıştır. Bu donanımda, direksiyondan gelen yönlendirmeler rot üzerinden aksone aktarılır ve tekerleklerin düşey ekseninde dönmesi sağlanır. Rotlar, gövde, mafsall ve yataktan oluşmaktadır. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, rot başının her bir elemanı ayrı modellenmiştir ve daha sonra bu parçalar arasında temas tanımlanarak ilişkilendirme yapılmıştır. Bunun yanında mafsallın sürüş anındaki farklı konumları için çözümlemeler yapılmıştır. Böylece her bir parçanın gerilme karakteri, Tablo 1.1’de görüldüğü üzere mafsallın farklı konumlarına göre incelenmiştir. Yorulma analizi yapılarak tasarım ömrü ve yorulma güvenlik katsayısı belirlenmiştir.

Tablo 1.1 Farklı mafsal mili konumlarındaki maksimum gerilmeler (Pehlivan ve Özsoy, 2014)

Konum [°]	Gövde Maksimum Gerilme [MPa]	Mafsal Maksimum Gerilme [MPa]	Alt Yatak Maksimum Gerilme [MPa]	Üst Yatak Maksimum Gerilme [MPa]
0	150	211	6,5	8,6
25	153,2	200,9	6,6	8,7
28	160,8	182,7	6,1	9,1

Ayrıca yapısal çözümleme sonucundaki gerilmelerden yola çıkılarak gövdenin tasarımında iyileştirme yapılmıştır. Yapısal statik çözümlemelere göre gövde üzerindeki gerilme yığılmasının olduğu bölgedeki çap artırılarak güvenlik katsayısı Şekil 1.1’de görüldüğü üzere 1,35’den 1,4752’ye artırılmıştır.



Şekil 1.1 Tasarım iyileştirme sonrası güvenlik katsayısı (Pehlivan ve Özsoy, 2014)

Senniappan, More, Bhide ve Gowda (2016), ticari bir aracın direksiyon rotlarını incelemiştir. Direksiyon rotu, tekerlek milini direksiyon sistemi bağlantısına yani direksiyon sevk çubuğuna bağlayan bir parçadır. Araç çalışma koşullarında, direksiyon rotlarına, yüksek bası ve çeki kuvvetleri etki eder ve rotlar yorulmaya maruz kalır. Direksiyon rotunun ilk tasarım önerisi, CAE analizleri, farklı çalışma koşullarındaki araç verileri, test verilerinin blok programları ve fiziksel test konuları gözden geçirildi. Öngörülen ömür, korelasyon kurmak için CAE’de elde edilen ömür ve gerçek test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, CAE korelasyonu ve yorulma ömrü hesaplamasının, zamandan ve geliştirme maliyetinden tasarruf sağlayan, fiziksel testler olmadan tasarım değişikliği iterasyonları ile optimizasyona yardımcı olduğu görülmüştür.

Park, Baek, Seo, Kim ve Lee (2014), bir elektrikli araca monte edilen rot başının hafif tasarımını, malzeme seçimi ve optimizasyon tekniği ile sağlamıştır. Malzeme olarak çelik yerine AI6082M alüminyum alaşımı seçilmiş ve metamodel bazlı optimizasyon uygulanarak, yapısal şekli optimize edilmiştir. Bunun yanında burkulma direnci ve yorulma ömrü gibi yapısal tepkileri öngörmek için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. İlk olarak çelikten yapılan bir örnek temel tasarım için yapısal tepkiler hesaplanmıştır. Daha sonra AI6082M'den yapılan hafif bir tasarım elde etmek için tasarım değişkenleri tanımlanmıştır. İkinci olarak krigleme interpolasyon yöntemine dayanan metamodel bazlı optimizasyon uygulanmış ve optimum bir tasarım elde edilmesi sağlanmıştır. Önerilen optimum tasarım, %65,3 hafif olmasına rağmen kritik tasarım gereksinimlerini karşılayan asgari ağırlığa sahiptir. Son olarak, burkulma direnci ve yorulma ömrünün nümerik sonuçları, burkulma ve yorulma testleriyle doğrulanmıştır. Şekil 1.2'de parçanın burkulma analiz sonucu ve burkulma testinden sonraki görünümü gösterilmiştir.

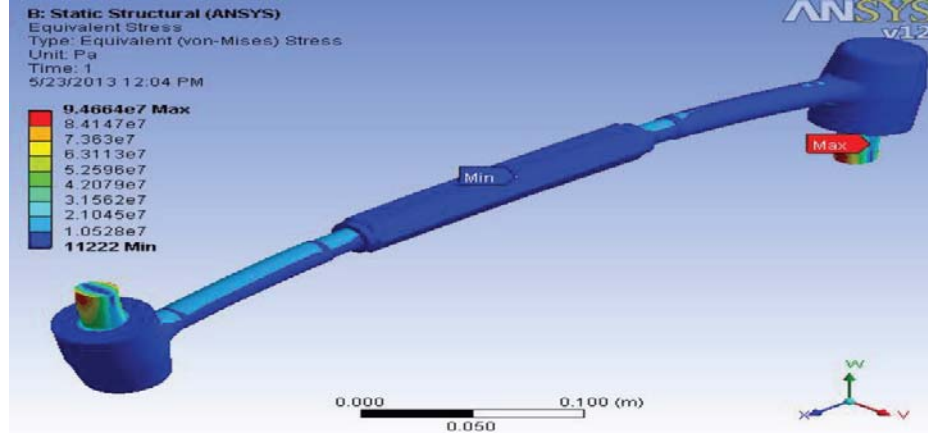


Şekil 1.2 Rotun burkulma analizi ve test sonucu (Park ve diğer., 2014)

Ikechukwu, Aniekan, Ebunilo ve Ikpe, (2016), araçlardaki süspansiyon sistemlerine etki eden bası ve çeki kuvvetlerinin önemini incelemişlerdir. Araçlarda direksiyon simidinin tekerlekleri döndürebilmesi için, direksiyon sistemleri bir dişliye bağlıdır. Rotlar da, direksiyon dişlisi ile tekerlekler arasında bağlantıyı sağlayan direksiyon mekanizmasının bir parçasıdır. Engebeli arazilere, çukurlara, tümseklere veya küçük kazalara maruz kalan bir araçta, süspansiyon sistemi yatay, dikey ve yanal yüklemeye maruz kalır ve bu yükleri rotlar dahil bütün bağlantı elemanlarına dağıtır.

Bu şartlar altında, aracın rotu, burkulma ile karakterize edilmiş bası ve çeki kuvvetleri altında olabilir. Sonuç olarak rotlar aşınarak tekerleklerin yanlış hizalanmasına ve yolcuların ve sürücülerin hayatlarının tehlikeye atılmasına neden olabilir. Bu nedenle bu çalışmada çeşitli rot hasarlarının nedenleri ve rotların performansını etkileyen faktörler incelenmiştir. Bası yükü için ters yöne fren ve çarpma senaryosunun ve çeki yükü için viraj alma ve çarpma senaryosunun, kullanım ömrü boyunca rot üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu ve yorulma, korozyon, yanlış üretim yöntemi, araca yanlış hizalama, servis yüklemesi gibi faktörlerle birleştiği bulunmuştur. Bunun yanında ADAMS simülasyonu sırasında, yanıl ve boylamsal yükler elde edilmiştir. Bu kuvvetler, rotların eğilmesine sebep olabilir ancak z doğrultusundaki bası ve çeki yükleriyle karşılaştırıldıklarında çok küçük bir değere sahip olduklarından dolayı rotların üzerindeki etkileri ihmal edilmiştir. Bu nedenle rot üreticileri, tasarım sırasında malzeme özelliklerinin yanı sıra bu kuvvetlere de dikkat etmelidir çünkü bu, rotaları burkulmaya veya kırılmaya ve hasar görmelerine daha az meyilli hale getirme yollarından biridir.

Patil, Chavan, Kavade ve Ghorpade (2013), rotların sonlu elemanlar analizini, doğal frekansı, maksimum gerilme analizi ve deformasyonunu incelemek için gerçekleştirmiştir. Aracın ağırlığının büyük bir yüzdesini süspansiyon sistemi oluşturur, bununla birlikte rotlar, aracın sürüldüğü ve zıpladığı esnada oluşan değişken kuvvetlerden dolayı hasara uğrayabilir. Ayrıca araç statik durumda iken dahi direksiyondan gelen kuvvetler göz önüne alınmalıdır. Rotların titreşimi ve yorulması, eğer ortaya çıkan titreşim ve gerilmeler çok büyük ve şiddetli ise yapısal bir hasara yol açacak bir sorun haline gelmektedir. Ansys yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonuçlardan Şekil 1.3’de görüldüğü gibi, deformasyon ve gerilme dağılımının akma dayanımını aşmadığı ve rotun hasara uğramadığı elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, rot üzerindeki deformasyon miktarı 0,13302 mm ve maksimum gerilme ise 250 MPa olan akma gerilmesinin altında 94,66 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 1.3 Rotun Von Mises gerilme analizi (Patil ve diğer., 2013)

Wehner ve Fatemi (1991), ortalama gerilmenin, 55 HRC'ye sertleştirilmiş SAE 1045 çeliğinden yapılan tek eksenli yorulma numunelerinin yorulma ömrü ve döngüsel deformasyonu üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Bası ve çeki ortalama gerilmeleri, birim şekil değiştirme oranları -2 ve 0,5 olan ve yorulma ömrünün 550 ile 10^6 çevrim arasında değişmesiyle sonuçlanan birim şekil değiştirme kontrollü testler uygulanmıştır. Çok kısa ömürler haricinde önemsiz derecede ortalama gerilme relaksasyonu gözlenmiştir. Bunun yanında çeki ortalama gerilmesinin ömrü 20 kat azalttığı ve bası ortalama gerilmesinin ömrü 5 kat arttırdığı gözlemlenmiştir. Ortalama gerilme yorulma ömrü verisinin en iyi korelasyonu, Smith-Watson-Topper hasar parametresinin kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Catic, Krstic ve Miloradovic (2009), hafif ticari araçların direksiyon sistemine ait rotları kullanarak güvenilirlik testleri yapmıştır. Test için en uygun planı seçmek için, yapının, uygulanan işlemlerin, potansiyel hasar modlarının ve mekanizmanın detaylı olarak bilinmesi gerekiyordu. Çalışma süresi boyunca rotlarda hasar meydana gelene kadar, çalışma koşullarındaki testler uygulanarak istatistiksel veriler elde edilmiştir. İlgili yazılımlar kullanılarak test sonuçları işlenmiştir. Tüm ilgili tanımlayıcılar göz önüne alınarak, rastgele değişken dağılımının en uygun teorik modelinin seçimi yapılmıştır. Bunun sonucunda, ampirik dağılımın en uygun modelinin belirlenmesi için önerilen prosedürün geçerli olduğu saptanmıştır. Makine elemanları güvenilirliğinin dağılım yasasının tanınması, temel elemanların güvenilirliğinin bir fonksiyonu olarak tüm sistemin güvenilirliğinin belirlenmesini ve bakım önlemlerinin planlanmasını sağlar.

BÖLÜM İKİ

BİNEK ARAÇLARDA DİREKSİYON SİSTEMİ VE ROTLAR

2.1 Direksiyon Sistemi

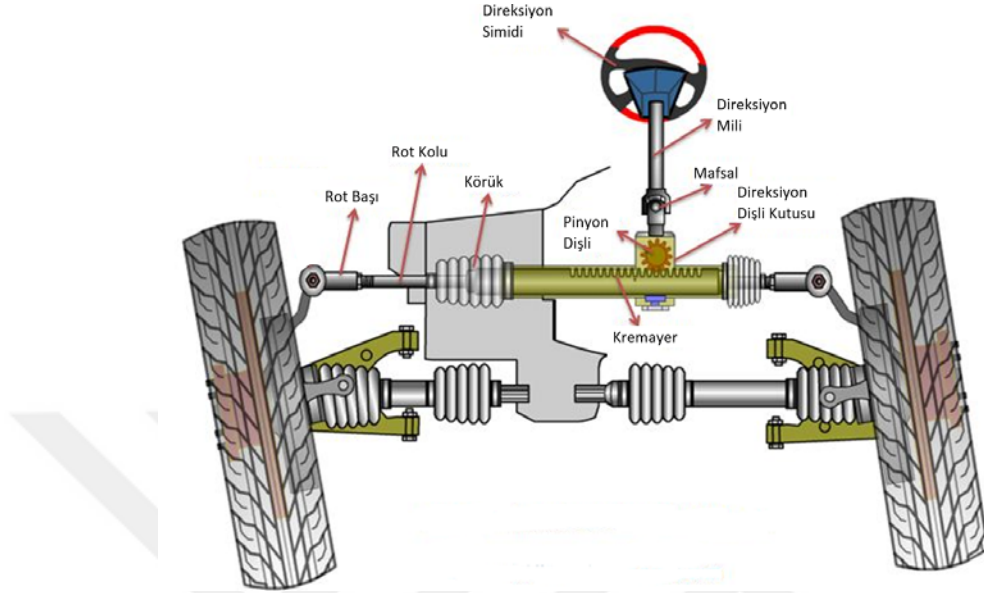
Direksiyon sistemi sürücü ile araç arasında bir ara yüz görevi görmektedir. Bu nedenle direksiyon aktarım davranışı ve geribildirimi, sürücünün sürüş kontrolünü ve konforunu etkileyen faktörlerdir. Mevcut direksiyon sistemi tiplerine bakıldığında, direksiyon simidinin döndürülmesi için destek momentin çeşidine göre, direksiyon sistemleri üç gruba ayrılabilir.

1. Hidrolik destekli sistemler
2. Elektro-hidrolik destekli sistemler
3. Elektrik destekli direksiyon sistemleri (Ersolmaz, Karamuk, Şentürk, Geçgil ve Atabay, 2012)

Bunlar, tekerleklerin dönmesine yardımcı olmak için fazladan enerji verilmesini sağlar ve park etme, manevra gibi hareketlerde daha fazla enerji gereksinimini azaltır. Direksiyon çeşitleri araç segmenti baz alınarak seçilmektedir. Direksiyon çeşidini (hidrolik ya da elektrikli) tayin ederken direksiyon dönme momentinin ve kremayer/pinyon dişli rasyosunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Dişli rasyosu, direksiyon sisteminin rijitliğinin belirlenmesinde başrol oynayan bir faktördür (Kurachi, Okamoto, Saito ve Chikuma, 1983).

Direksiyon sistemleri direksiyon simidi, direksiyon mili, direksiyon dişli kutusu, pinyon-kremayer dişlileri, körük ve rotlardan meydana gelmektedir. Direksiyon sisteminde, direksiyon simidinin dönme hareketi dişli kutusuna aktarılarak lineer harekete çevrilir ve kuvveti arttırılmış bir biçimde tekerleklerle iletilir. Böylelikle direksiyon simidinin dönüşü ile tekerlekler döndürülmüş ve aracı yönlendiren doğrusal harekete dönüşmüş olur. Direksiyon hareketi, döner bağlantı sisteminden tekerleklerle aktarılmaktadır. Bunlar direksiyonun açısını değiştirmeden tekerleklerin

süspansiyonla aşağı ve yukarı hareket etmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Şekil 2.1’de direksiyon sistemi görülmektedir.



Şekil 2.1 Direksiyon sistemi (Direksiyonpompa, 2018)

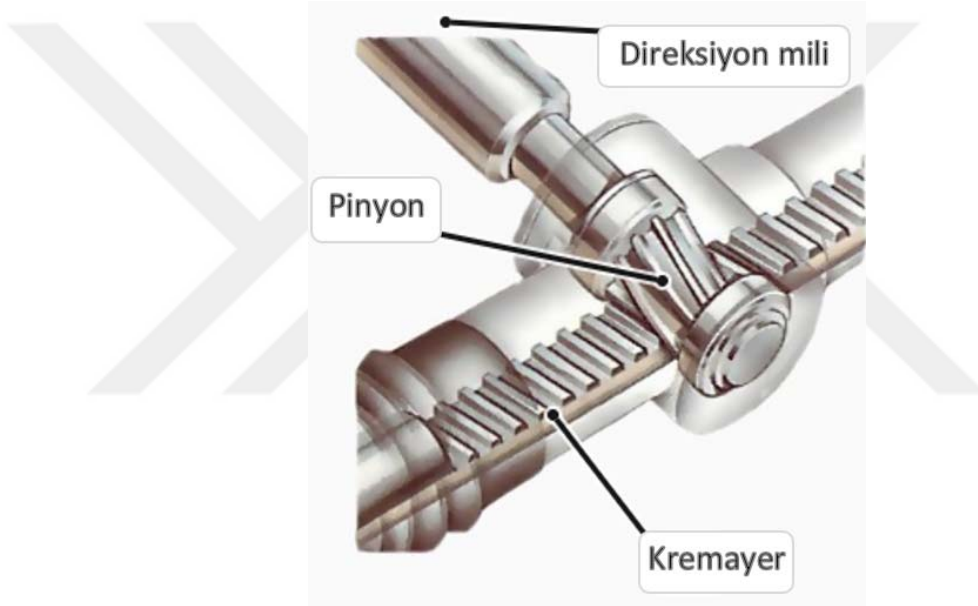
Sistem, sürücünün ağır bir aracı yönlendirmek için yalnızca hafif bir güç kullanmasını sağlamaktadır. Direksiyon sisteminde bağlantılar çok hassas bir şekilde ayarlanmalıdır, en ufak bir çözünme durumunda tehlikeli sürüş şartları oluşabilmektedir.

2.1.1 Pinyon Kremayer Dişli Kutusu

Binek araçlarda kinematik rijitlik, düşük ağırlık ve paket avantajlarından dolayı en yaygın kullanılan direksiyon dişli çeşidi pinyon kremayerdir (Bishop and Baxter, 1984). Pinyon kremayer direksiyon sistemlerinde tekerleğin döndürülebilmesi için direksiyon simidinin dairesel hareketini doğrusal harekete çeviren bir dişli takımı kullanılır. Direksiyon simidinin dairesel hareketi direksiyon mili yardımıyla direksiyon dişli kutusuna aktarılır. Direksiyon mili, direksiyon dişli kutusundaki pinyon dişliyi döndürür. Pinyon dişli lineer bir dişli olan kremayer dişlisine bağlı olduğundan dolayı kremayeri doğrusal yönde hareket ettirir. Kremayer bu doğrusal

hareketi bir dişli ile bağılı olduğu rol koluna iletir, rot kolundan aksona bağılı olan rot başı da hareketi tekerleklerle iletmiş olur.

Otomobillerin çoğı tekerleğı en sağdan en sola döndürmek için direksiyon simidinin üç ila dört tam tur döndürölmesine ihtiyaç duyarlar. Direksiyon oranı, tekerleklerin belirli bir miktarda dönmesi için direksiyon simidinin ne kadar döndürölmesi gerektiğini gösterir. Yüksek bir oran, tekerlekleri belirli bir miktarda çevirmek için direksiyon simidinin daha fazla döndürölmesi gerektiğı anlamına gelir ve daha düşük oranlarda direksiyona daha hızlı tepki verir.



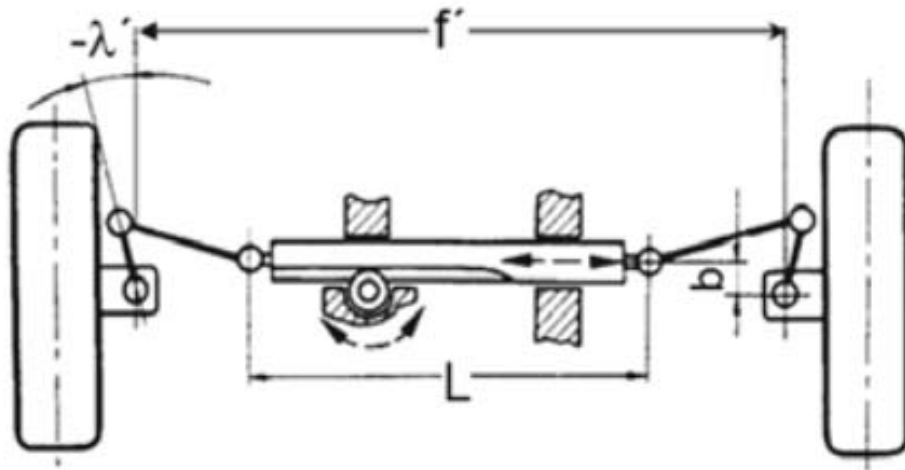
Şekil 2.2 Pinyon kremayer dişlisi (Pistonpuff, 2017)

Pinyon kremayer tasarımı, büyük ölçüde geri bildirim ve doğrudan direksiyon hissi avantajlarına sahiptir. Dezavantajı ise ayarlanabilir olmamasıdır, bu yüzden titreşim ve aşınma meydana gelebilir. Bu durumda yapılacak tek şey sistemi değiştirmektir.

2.2 Direksiyon Sistemi Rotu

Direksiyon sistemi, motorlu taşıt mekanik sisteminin hayati parçalarından biridir. Direksiyon mekanizması ve tekerlekler arasında bağlantıyı sağlamanın yanı sıra, tekerlek dönüşünün doğru kinematikini sağlamak için de önemli bir göreve sahiptir.

Fren sistemi ve lastiklerle birlikte, motorlu taşıtların ve trafikteki insanların güvenliği açısından çok önemli bir yere sahiptir. Binek araç direksiyon sisteminde kullanılan rotların, güvenlik açısından en kritik unsurlar olduğu tespit edilmiştir. Rotların en önemli fonksiyonu, direksiyon sisteminden gelen doğrusal hareketi aksona iletmeleridir. Rotlar, basit bir pivot yatak yerine küresel mafsala sahip olmalıdır. Bu mafsallar kendi eksenleri boyunca en geniş dönme hareketini yapacak şekilde yönlendirilir. Kinematik olarak bakılacak olursa, kremayer ve rotlar üç boyutlu kayan bir krank oluşturmaktadır. Burada kremayer kayan eleman ve akson ise dönme elemanıdır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, direksiyon rotları bağlantı elemanlarını oluşturur. Tekerlekler aynı zamanda direksiyon eksenine paralel olacak şekilde yukarıya ve aşağıya hareket ettiğinden dolayı bu kayan kam sistemi üçüncü bir hareket boyutuna maruz kalır (Heissing ve Ersoy, 2011).



Şekil 2.3 Direksiyon kremayer ve pinyon kinematığı (Heissing ve Ersoy, 2011)

Rot, rot başı ve rot kolu olarak iki ana parçadan meydana gelmektedir. Aracın yönlendirilmesinin sağlanabilmesi için, ilk olarak rot kolu direksiyon dişlisinden gelen lineer kuvvetle etkilenir ve bu kuvveti rot başına iletir. Rot kolu direksiyon kremayer gövdesine dişli sistem ile bağlanmaktadır. Rot başı ise direksiyon sisteminden gelen kuvveti aksona ileterek aracın tekerleğinin sağa ve sola dönmesini sağlamakta ve yönlendirmeyi gerçekleştirmektedir. Rot başı da tekerlek aksonuna küresel mafsallın dişli kısmından monte edilmektedir. Rot kolu ve rot başı birbirlerine dişli sistem

yardımla montaj edilmektedir ve montaj boyu ayarlanabilir özelliktedir. Ana sanayi firmaları tarafından araç şasi bünyesindeki tüm parçalar göz önüne alınarak rotlar için bir geometri paketi oluşturulur ve rot geometrisinin de bu pakete sığması istenir. Bu nedenle şekil 2.4’de görüldüğü gibi farklı geometri ve boylarda rotlar meydana gelmektedir.



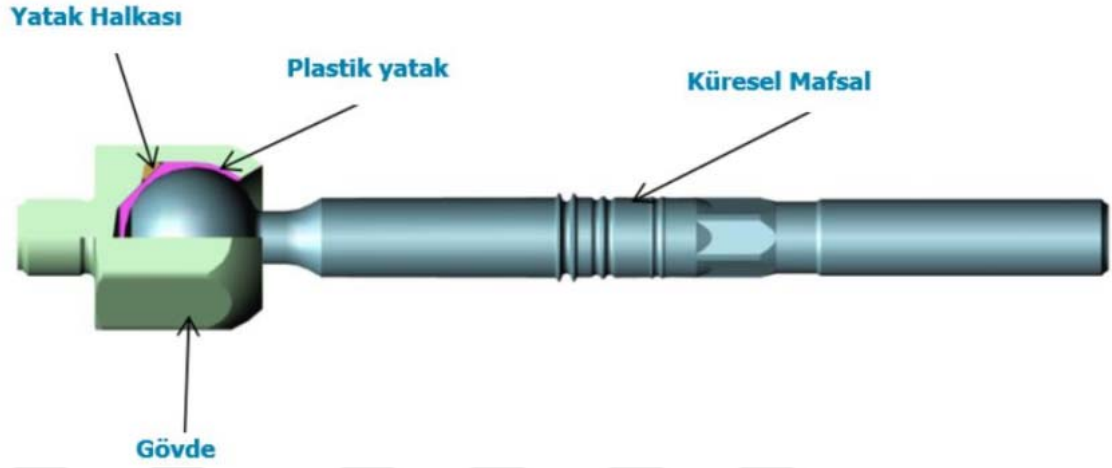
Şekil 2.4 Farklı rot kolu ve rot başı tasarımları (Heissing ve Ersoy, 2011)

2.2.1 Rot Kolu

Rot koluna direksiyon dişlisinden gelen eksenel bir kuvvet etki eder. Rot kolu bu kuvveti rot başına iletir. Rot kolu şekil 2.5’de görüldüğü üzere eksenel gövde, yatak halkası, plastik yatak ve eksenel mafsalsal milinden meydana gelmektedir. Ayrıca eksenel mafsalsal ile plastik yatak arasına gres yağı konulmaktadır.

Rot kolu eksenel gövdesi, ölçüsü ana sanayi tarafından belirlenen dişli yardımıyla direksiyon sistemine bağlanır. Araçta montaj halinde iken gövde kısmı içinde kalacak şekilde sızdırmazlık oluşuna kadar direksiyon sistemi körüğü içinde bulunur. Eksenel

yatak ve mafsalları mil malzemesi halindeyken soğuk dövme yöntemi ile büyük ölçüde çalışma geometrisine getirilmiş olur.



Şekil 2.5 Rot kolu bileşenleri (ZF Friedrichshafen, 2018)

Daha sonra eksenel yatağın iç konturu ve mafsalları boyun kısmı işlenerek çalışma geometrisini alır. Şekil 2.6’de eksenel mafsalları dövme aşamaları görülmektedir.

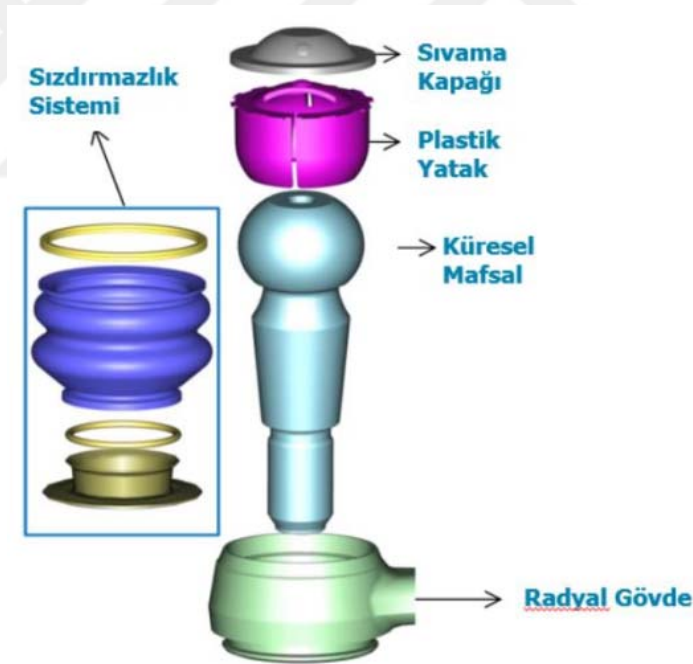


Şekil 2.6 Eksenel mafsalları dövme aşamaları (Heissing ve Ersoy, 2011)

Rot kollarının küre çapları genellikle 26, 29 ve 32mm olmaktadır. Maksimum yatma açısı ise 68°'dir. Rot kolunun eksenel mafsallının üzerinde, direksiyon sisteminin sızdırmazlık körüğünün takılabilmesi için bir oluk bulunmaktadır. Bunun yanında montaj yapılırken tutulabilmesi için hegzagonal anahtar yüzeyi bulunmaktadır.

2.2.2 Rot Başı

Rot başı, rot kolundan aldığı eksenel hareketi akson yardımıyla tekerleğe aktararak tekerleklerin yönlendirilmesini sağlar. Rot başı Şekil 2.7'da görüldüğü üzere radyal gövde, küresel mafsallık, plastik yatak ve sızdırmazlık sisteminden meydana gelmektedir. Sızdırmazlık sistemi toz lastiği ve sızdırmazlık halkalarından oluşmaktadır. Toz lastiğinin içine ise montaj sırasında gres yağı konulmaktadır.



Şekil 2.7 Rot başı bileşenleri (ZF Friedrichshafen, 2018)

Radyal yatak çelik ya da alüminyum malzemeden üretilmektedir ve geometrisine bağlı olarak sıcak ya da soğuk dövme yöntemi ile şekillendirilir. Daha sonra kafa kısmının iç konturu ve toz lastiğinin oturduğu kısım işlenir. Şaft kısmında

ise rot kolu ile montaj edilmesini sağlayan diş deliği açılır. şekil 2.8’de radyal gövdenin dövme aşamaları görölmektedir.



şekil 2.8 Radyal gövdenin dövme aşamaları (Heissing ve Ersoy, 2011)

Direksiyon sisteminde, bir çarpma durumunda rotların hasar görmesi istenir. Burada amaç genellikle rotun aracın ön kısmının deformasyonunu sınırlandırmasını önlemektir. Rotlar aynı zamanda direksiyon sisteminin diğerkıymalı parçalarına verilen zararı sınırlayacak şekilde burkulmak üzere ayarlanabilir. Sürücü, direksiyon simidinin açısından ve aracın yetersiz sürüş davranışından dolayı rotun eğilmiş olduğunu fark edebilir (Heissing ve Ersoy, 2011). Rot başları araçtaki pakete göre şekil 2.9’da göröldüğü gibi farklı geometrilere sahip olabilirler.



şekil 2.9 Çeşitli rot başı geometrileri (Heissing ve Ersoy, 2011)

Rot başlarında küre çapları genellikle 22, 25 ve 27 mm olmaktadır. Maksimum yatma açısı 50°’dir. Eğer daha fazla yatma açısı isteniyorsa, gövdenin kafa kısmının açıklığı arttırılmalıdır veya geometrisi oval olarak değıştirilmelidir. Böylece 60° yatma açısına kadar ulaşmak mümkün olmaktadır.

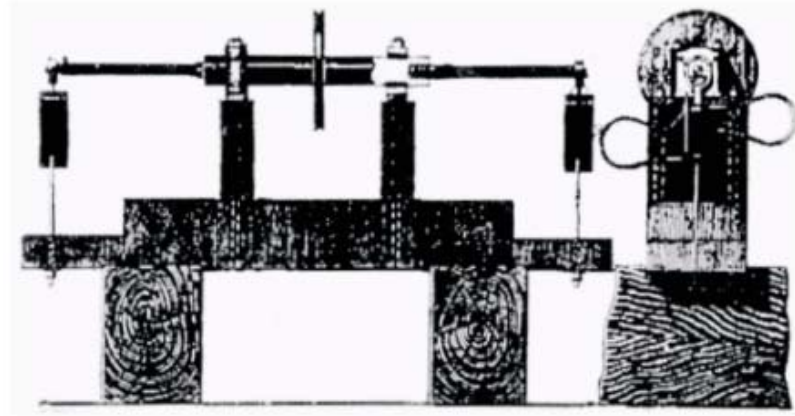
BÖLÜM ÜÇ

METAL YORULMASI

Yorulma, değişken gerilme ve şekil değiştirme altındaki malzemelerdeki her geçen döngüde hasar biriktirme işlemi olarak tanımlanır. Yorulmanın en önemli özelliği, yükün ani bir arızaya neden olacak kadar büyük olmamasıdır. Metal ve metal yapıların yorulması 160 yıldan fazla bir süredir çalışılmakta ve metal yorulma mekanizmalarının iyi bir şekilde anlaşılması sağlanmaktadır. Yorulma çatlakları genellikle bir bileşenin, kristalografik kayma düzlemlerinde kesme çatlaklarının başladığı yorulma hasarının olduğu yüzeyden başlar. Daha sonra çatlaklar ilerleyerek yorulma kırılmasının oluşmasına neden olur.

3.1 Yorulmanın Tarihçesi

Modern dünyada, yüksek derecede hareketlilik, otomasyon, telekomünikasyon ve bilgisayar ağları, mühendislik bileşenlerinin yorulması ve kırılması ile karakterize olmak, günlük hayatın tatsız ama oldukça sık bir deneyimine dönüşmüştür. Malzemelerin yorulma davranışı, 150 yıldan fazla bir süredir sürekli araştırma çalışmalarına konu olmuş olsa da, teknolojik gelişme ile servis ömrü tahmini ve yorulma araştırmalarında gerçekten teknolojiyi zorlayan az sayıda olağanüstü hasar vakası gerçekleşmiştir. Bunlar, 19. Yüzyıl'daki demiryolu kazaları, 20. Yüzyıl'daki havacılık teknolojisi ve elektron mikroskobunun icadı ve 21. Yüzyıl'daki nano teknoloji (Krupp, 2007). Tekrarlayan gerilmelerden kaynaklanan hasarların ana etkisi 1840'larda demiryolu endüstrisinde görülmüştür. Demiryolu raylarındaki bağlantı parçalarında düzenli aralıklarla hasar oluştuğu fark edilmiştir. "Yorulma" kelimesi, 1840'larda ve 1850'lerde tekrarlanan gerilmelerden kaynaklanan arızaları tanımlamak için takdim edilmiştir. Daha sonra yorulma, tekrarlanan gerilmeler nedeniyle oluşan kırılmaları tanımlamak için kullanılmaya devam edilmiştir. 1850'lerde ve 1860'larda, August Wöhler tekrarlanan gerilmeler altında birçok laboratuvar yorulma testi yapmıştır. Bu deneyler demiryolu hasarları ile ilgiliydi ve ilk sistematik yorulma araştırması olarak kabul edildi. Şekil 3.1'de Wöhler'in tasarladığı demir yolu mili yorulma hasarı test düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.1 Wöhler yorulma test düzeneği (Halfpenny, 2001)

Gerilme ve ömür diyagramlarını kullanarak yüksek gerilme genlikleri ile yorulma ömrünün nasıl azaldığını ve belirli bir gerilme genliği altında test numunelerinin kırılmadığını gösterdi. Böylece yorulma için gerilme aralığının maksimum gerilmeden daha önemli olduğunu göstermiş oldu. 1870'lerde ve 1890'larda, yeni araştırmacılar Wöhler'in klasik çalışmasını doğruladı ve genişletti. Gerber ve arkadaşları ortalama gerilmenin etkisini araştırdılar ve Goodman da ortalama gerilme ile ilgili basitleştirilmiş bir teori önerdi. 1886'da Bauschinger, elastik olmayan deformasyona neden olan zıt yönde bir yük uyguladıktan sonra çeki ve basıdaki akma dayanımının azaldığını göstermiştir. Bu, elastik olmayan gerinimin metallerin gerilme-gerinim davranışını değiştirebileceğinin ilk göstergesiydi. Şekil 3.2'de görülen buharlı trenlerde meydana gelen ani kazalardan sonra mühendisler dövülmüş mil veya şaftların servis ömürlerinin kısıtlı olduğunun farkına varmışlardır.

1900'lü yılların başında, Ewing ve Humpfrey, yorulma mekanizması çalışmalarını sürdürmek için optik mikroskop kullandılar. Lokalize kayma çizgileri ve mikro çatlak oluşumuna neden olan kayma bantları gözlenmiştir. 1910 yılında Basquin, sonlu ömür bölgesindeki değişken gerilme ve hasar çevrim sayısı (S-N) arasında logaritmik doğrusal bir ilişki olabileceğini göstermiştir. Basquin'in denklemi yapılan ek güncellemeler ile sonlu ömür yorulma davranışını temsil edecek şekilde günümüzde hala kullanılmaktadır. 1924 yılında Palmgren, değişken genlik yüklemesi için doğrusal bir kümülatif hasar modeli geliştirdi ve B10 yorulma ömrünün küresel yatak tasarımı için istatistiksel dağılımlara dayanarak kullanımını sağladı.



Şekil 3.2 New Hope buharlı tren ve Ivyland Demiryolu (Krupp, 2007)

1930’larda, otomobil endüstrisinde bilya püskürtme yöntemiyle tanışılmasıyla birlikte önemli bir ilerleme kaydedildi. Almen, bilya püskürtülmüş parçaların yüzeye yakın tabakalarında bası artık gerilmesi oluşturulmasıyla birlikte geliştirmeleri doğru bir şekilde açıklamıştır ve faydalı artık gerilme üreten diğer proseslerin ve bilya püskürtme yönteminin kullanımını desteklemiştir. Horger, yüzey haddelemenin çatlak büyümesini engelleyebileceğini göstermiştir. Neuber 1937 yılında, çentiklerdeki gerilme gradyan etkilerini ve temel blok konseptini tanıtmıştır; bu, çentiğin kökündeki küçük bir hacim üzerindeki ortalama gerilmenin çentikteki maksimum gerilmeden daha önemli olduğunu gösterir. Yorulma konusuna temel katkılar, kapalı döngü servo hidrolik test sistemlerinin tanıtılmasıyla yapılmıştır. Bu sistem, mekanik sistemlerdeki, parçalardaki ve test numunelerindeki yük geçmişinin daha iyi simüle edilmesini sağlamıştır. Irwin, doğrusal elastik kırılma mekaniğinin ve yorulma çatlak başlangıcı ömür tahmininin temeli olarak kabul edilen K_I gerilme yoğunluğu faktörünü tanıtmıştır. Elber 1970 yılında, yorulma çatlağı büyümesinde çatlakların kapatılmasının önemini vurgulamıştır. Yorulma çatlağı büyümesinin, uygulanan bir gerilme yoğunluğu faktörü aralığı yerine efektif bir gerilme yoğunluğu faktörü aralığı ile kontrol edildiğini gösteren nicel bir model geliştirmiştir. Bu çatlak kapatma modeli, günümüzdeki yorulma çatlağı büyüme hesaplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 1880’lerde ve 1990’larda birçok araştırmacı, faz dışı ve eş fazlı çok eksenli yorulma

problemlerini araştırdılar. Bu zaman aralığında küçük çatlakların davranışı incelendi. Aynı yük altında, küçük çatlakların büyümesi büyük çatlaklardan daha hızlı olduğundan dolayı küçük çatlak probleminin karmaşık ve daha önemli olduğu gözlemlendi.

Mühendisliğin bütün alanlarında birçok mekanik hasar gerçekleşmektedir. Yorulmadan kaynaklanan hasarlar, örneğin tekrarlanan yüklemeler, multidisipliner ve çok yaygın mekanik hasarlardır. Yorulma davranışı ve yorulma tasarım prensipleri, Wöhler'in ilk çalışmasından beri yaklaşık 150 yıldır açık ve kesin olarak belirtilmektedir. Bu prensipler, pek çok yerde ve disiplinde mühendisler ve bilim adamları tarafından geliştirilmiş, kullanılmış ve test edilmiştir. Günümüzde ise gelişmiş olanaklarla birlikte incelenmeye devam edilmektedir (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001).

3.2 Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

Metal yorulması, tekrarlanan yüklemeye maruz kalan bir bileşenin zarar görmesine neden olan bir olaydır. Periyodik yüklemeye maruz kalan parçaların mukavemeti azalır. Malzemenin kopma ve akma sınırlarının çok altında bile hasar meydana gelebilir. Bunun sebebi yorulma olayıdır. Yorulma olayı farklı faktörlerin rol oynadığı bir olaydır (Karamangil, 2007). Mikroskobik seviyede doğru şekilde tanımlanması ve modellenmesi zor olan karmaşık bir metalürjik işlemdir. Buna rağmen, yapıların ya da bileşenlerinin tasarımları için yorulma hasarı değerlendirmesi mutlaka yapılmalıdır. Bu değerlendirme sentez, analiz ve testi içermelidir. Günümüzde tasarım aşamasında bilgisayar destekli analizlerden faydalanılmaktadır. Fakat bu analizlerle sıcaklık, korozyon, artık gerilmeler gibi faktörler incelenememektedir. Bu nedenle yapılan analizler test sonuçları ile doğrulanmalıdır.

Çalışma durumunda bileşenlerin yorulma performansını etkileyen birçok etken vardır. Yorulma mukavemetine etkiyen faktörler, temel faktörler ve ek faktörler olarak başlıca iki grupta incelenebilir.

3.2.1 Temel faktörler

- Yeterince yüksek değerlere sahip maksimum çeki gerilmesi
- Uygulanan gerilmenin büyük miktarda değişmesi
- Uygulanan gerilmenin çok sayıda tekrar edilmesi

3.2.2 Ek Faktörler

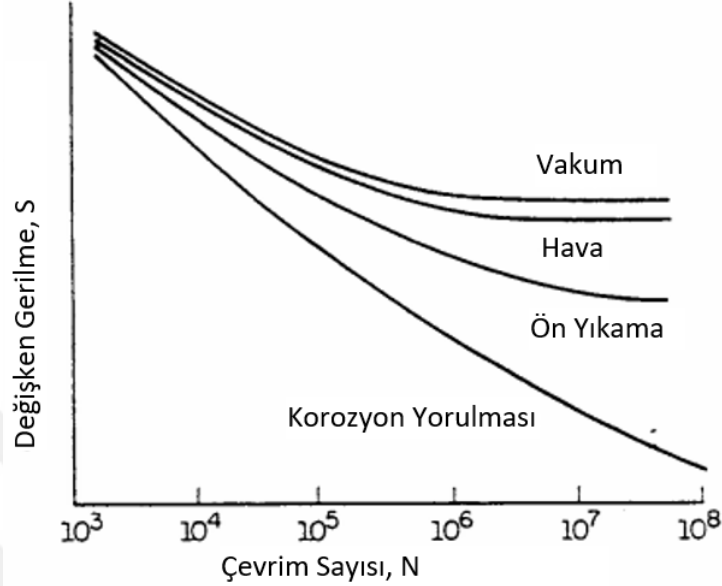
3.2.2.1 Sıcaklık

Sıcaklık genellikle malzemenin akma ve kopma mukavemeti değerlerini değiştirerek yorulma dayanımının değişmesine neden olur. Sıcaklığın oda sıcaklığının üstüne çıkması durumunda malzemenin akma sınırı, çekme dayanımı ve yorulma dayanımı düşer. Yüksek sıcaklığın mekanik özellikler üzerindeki etkisi, difüzyon prosesleri, yaşlandırma ve yeniden kristalleşme nedeniyle oluşan malzeme yapısının dönüşümleriyle ilişkilendirilebilir. Genel olarak bu işlemler, plastik deformasyonun yüksek bir sıcaklıkta daha kolay meydana gelebileceği anlamına gelir. Bu, sürekli yük altında devam eden plastik deformasyon olarak tanımlanan sürünme olayına yol açabilir. Mikro çatlak ve makro çatlak içeren bir yorulma çatlaklarının plastik bölgesinde sürünme meydana gelebilir. Böylece yorulma hasarı yığılmaları artabilir (Yeni, bt).

3.2.2.2 Korozyon

Yorulma yüklemesi korozif bir ortamda gerçekleştiğinde ortaya çıkan zararlı etkiler, yorulma ve aşınmanın ayrı ayrı göz önünde bulundurulduğu durumdan daha etkilidir. Aşınma ve yorulma etkileşimi, benzersiz hasar mekanizmaları içerir. Korozif ortam metal yüzeyini aşındırır ve bir oksit filmi oluşturur. Genellikle bu oksit filmi koruyucu bir tabaka olarak görev yapar ve metalin daha fazla aşınmasını önler. Bununla birlikte, tekrarlanan yükleme bu tabakanın lokal olarak çatlamasına neden olur. Aynı zamanda korozyon, yüzeyde lokal olarak çukurlar oluşmasına neden olur ve bu çukurlar gerilme yığılmaları olarak davranırlar. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere korozyon-yorulma eğrisi oda sıcaklığı eğrisinin önemli ölçüde altında kalmıştır.

Bunun nedeni ise korozyon çukurlarının neden olduğu pürüzlü yüzeyden dolayı yorulma dayanımının azalmasıdır (Bannantine, Comer ve Handrock, 1990).



Şekil 3.3 Farklı ortamların çeliklerin S-N eğrisi üzerindeki etkisi (Bannantine, Comer ve Handrock, 1990)

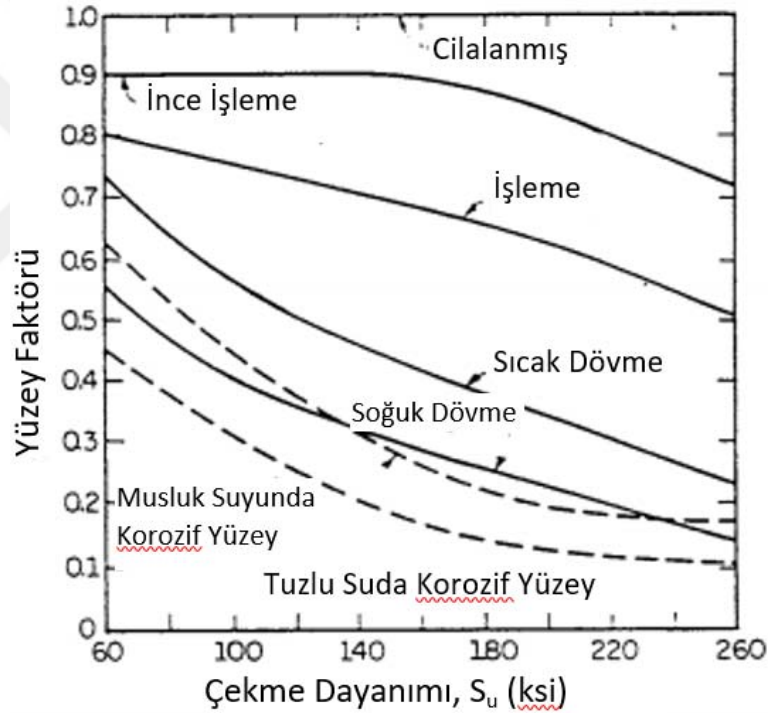
3.2.2.3 Mikro Yapı

Metalleri çoğunlukla homojen, izotropik ve doğrusal elastik olarak modelliyoruz. Mikroskobik seviyede, bu varsayımların hiçbiri bulunmayabilir ve metal yorulması mikro yapıdan önemli ölçüde etkilenebilir. Kimya, ısı işlem ve soğuk işlemenin nihai çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. İnce taneler genellikle, sürtünme yorulma etkileşiminin olduğu yüksek sıcaklıkların haricinde büyük tanelere göre daha iyi bir yorulma direnci sağlar (Stephens ve diğer., 2001).

3.2.2.4 Yüzey İşleme Kalitesi

Bir malzemenin yüzeyindeki pürüz, çukur ve işleme izleri, parçanın geometrisi nedeniyle var olan gerilme konsantrasyonlarına yenilerini ekler. Yüksek mukavemetli çelik gibi tek tip ince taneli malzemeler, pürüzlü bir yüzeyden dökme demir gibi kaba

taneli malzemeye oranla daha fazla negatif yönde etkilenir. Şekil 3.4'deki grafikte görüldüğü gibi, bazı eğriler yüzey pürüzlülüğünden daha fazla etkilenmiştir. Yapılan çalışmalarda, pürüzlülüğün dövme, taşlama, işleme ve cilalama gibi kullanılan işleme yöntemiyle ayırt edildiğinde yorulma limitindeki değişiklikler öngörülmüştür. Yüzey koşullarına bağlı olarak, yorulma ömürleri büyüklük sırasına göre değişebilmektedir. Bunun yanında sertlik ya da yapı gibi yüzey karakteristikleri işleme uygulamasının bir sonucu olarak değişebilir. Bu yüzden dövülmüş bir parçayı dökme bir parça ile karşılaştırmak yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine neden olabilir. Pürüzlülükteki değişiklikler yorulma ömrünü etkilerken, bu etkiyi, yüzey kimyası ve yapısındaki değişikliklerden ayırmak zordur (Andrews ve Sehitoglu, 2000).



Şekil 3.4 Çelik parçalardaki yüzey kalitesi faktörleri (Bannantine, Comer ve Handrock, 1990)

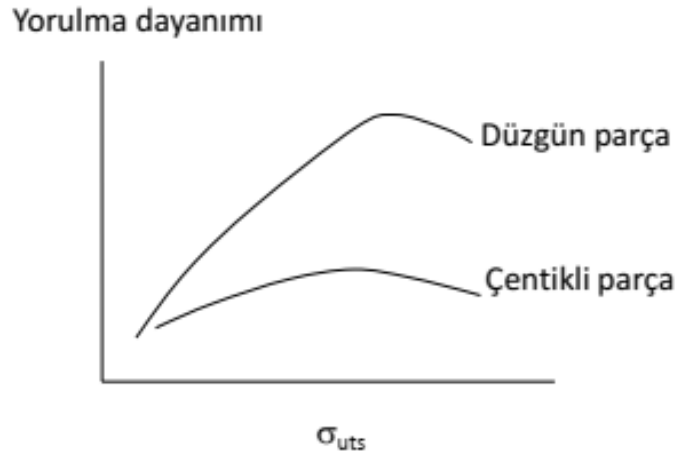
İşleme operasyonlarından kaynaklanan yüzey artık gerilmeleri de yorulma üzerinde öneme sahiptir. Örneğin, bazı taşlama işlemlerinden sonra yüzeyde artık çeki gerilmeleri oluşabilmektedir. Bunun yanında parçalar üzerindeki markalama işaretleri de çok etkili gerilme konsantrasyonları olarak işlev görebilir.

3.2.2.5 Çentik Etkisi

Çentik etkisinin yorulma dayanımını azalttığına dair çok sayıda çalışma yapılmıştır ve böylece K_t teorik gerilme yığılması faktörü ve K_f efektif gerilme yığılması faktörü ortaya çıkmıştır. Çentik hassasiyet faktörü q ise denklem 3.1'deki gibi tanımlanmıştır.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (3.1)$$

Numunede çentik olması durumunda (oyuklar, keskin köşeler, delikler gibi) kesit alandaki ani değişiklik nedeniyle gerilme yığılması oluşması sonucu Şekil 3.5'de görüldüğü üzere yorulma mukavemeti ani olarak düşer (Yeni, bt).



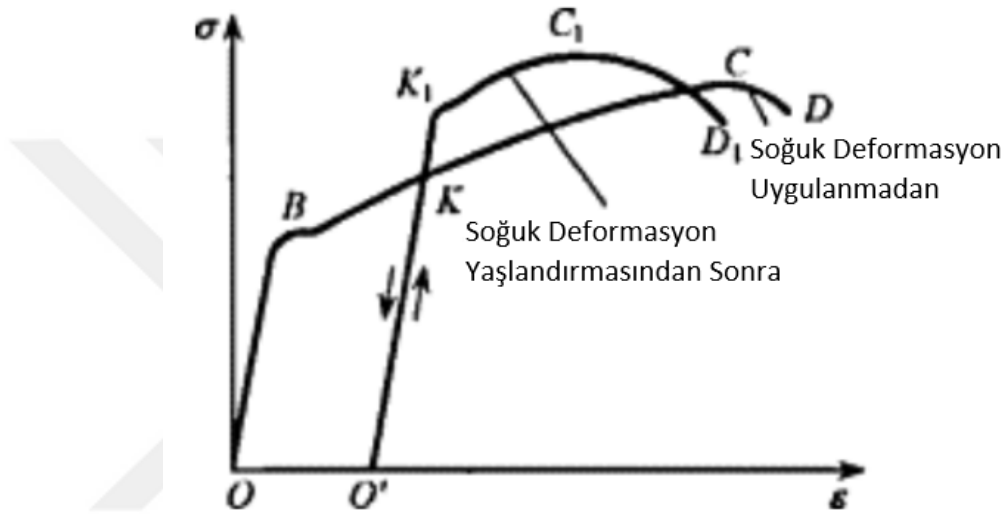
Şekil 3.5 Çentik oluşumunun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi (Yeni, bt)

Makinada işleme ve imalat süreçlerinde mümkün olduğunca gerilme arttırıcı faktörlerin oluşumundan kaçınılmalıdır (Yeni, bt).

3.2.2.6 Soğuk Deformasyon

Soğuk deformasyon, malzemelere oda sıcaklığında uygulanan bir işlemdir. Malzemenin yüzeyi soğuk deformasyona uğratılır ve böylece yüzeylerin sertliği ve dayanımı artar. Ayrıca yüzeyde bası iç gerilmeleri de meydana gelir. Bu şekilde

malzemenin yorulma dayanımı iyileştirilir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi, malzemenin elastik bölgede K noktasına uzadığı durumda yük kaldırıldığında zaman kalıcı bir şekil değişikliği var ise şekil değiştirme sıfıra dönmez, bir sonraki yükleme O’ noktasından başlar ve yeni bir yükleme durumunda malzeme O’KCD yolunu izleyecektir. Fakat soğuk deformasyon uygulandığı durumda akma değeri artar ve şekil değiştirme O’K₁C₁D₁ yolunu takip eder.



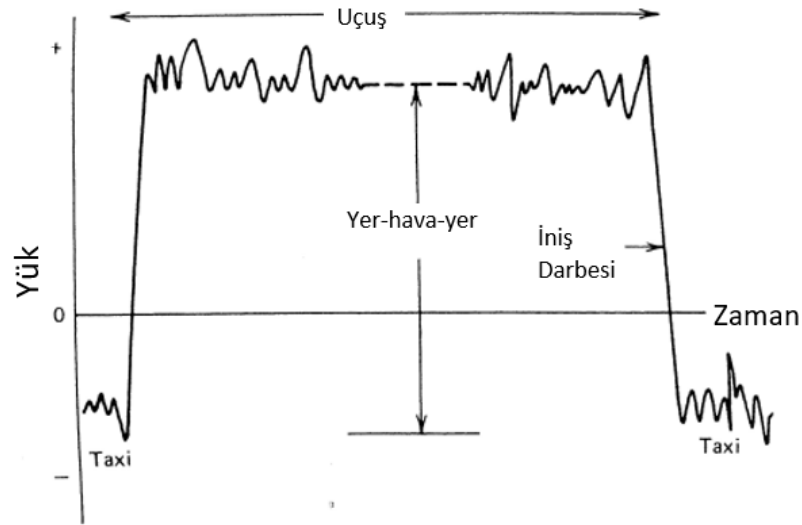
Şekil 3.6 Çeliklerde gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Zhang, 2011)

3.3 Yorulma Ömrünün Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Tekrarlayan yüke maruz kalan herhangi bir bileşenin arızalanmasını önlemek ya da geciktirmek, ön tasarım sırasında ele alınması gereken önemli bir konudur. Yorulma hasarı mühendislikteki en önemli konular arasındadır, çünkü uygulanan yük döngüleri ile kümülatif bir şekilde artar ve parçanın hasara uğramasına ya da kırılmasına sebep olabilir. Genel olarak, yorulmaya maruz kalan öğelerin ömür tahmini, doğrusal kümülatif hasar kuralları ile birlikte “güvenli ömür” yaklaşımına dayanır (Santecchia ve diğer., 2016).

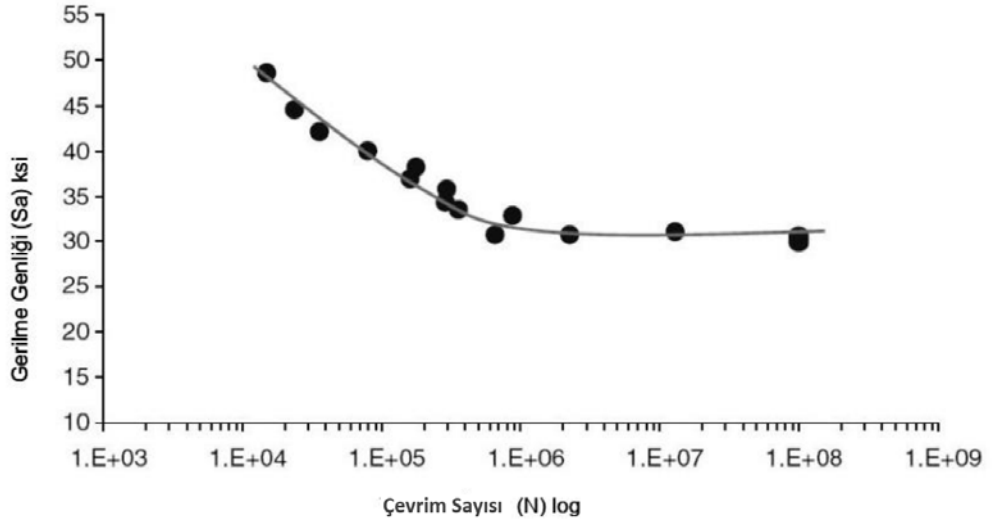
3.3.1 Gerilme (S) – Ömür (N) Yaklaşımı

Birçok S-N datası küçük numuneler ile yapılan yorulma testlerinden elde edilir. Testler, numuneler hasar görene kadar devam ettirilir. Bu numunelerde çatlak büyümesi sırasında gerilmelerin yeniden dağıtılması mümkün değildir. Bunun anlamı çoğu yorulma ömrü, çatlak boyutu kırılmaya kadar büyüdüğünden dolayı daha hızlı büyüyen küçük çatlakların büyümesi ile ilişkili olduğudur. Bu method, uzun ömür ve sabit genlik içeren tasarımlarda iyi çalışmaktadır. Sabit genlik yüklemesi, yorulma tasarımında kullanım durumunda malzeme yorulma davranışı ve özelliklerini elde etmek için kullanılır ve gerçek hayattaki bazı yük değişimleri zaman zaman sabit genlik olarak modellenebilir. Şekil 3.7’de bir uçağın şematik yük değişimi gösterilmektedir. Uçaktaki yük değişimi esas olarak uçuş, iniş ve taksi yüklerini kapsamaktadır.



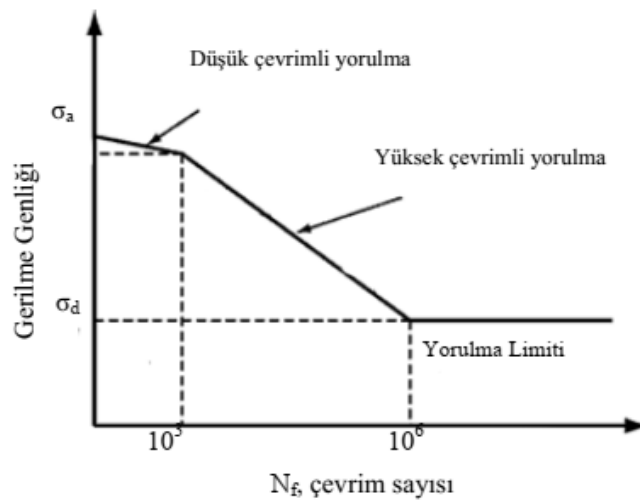
Şekil 3.7 Bir uçağın yük değişimi (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

Şekil 3.8’de bir çeliğin eğilme yorulma davranışı logaritmik formda görülmektedir. Bu eğri gerilme-ömür eğrisi veya Wöhler eğrisi olarak adlandırılır (Akarsu, 2012).



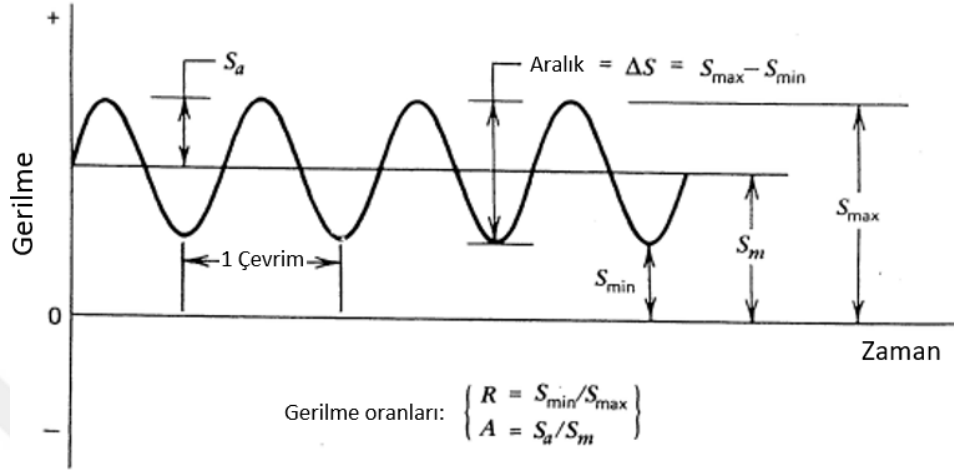
Şekil 3.8 Bir çeliğin yorulma ömür eğrisi (Akarsu, 2012)

Özel bir amaçla hazırlanan malzeme numuneleri, makine parçaları ve yapılar için Wöhler Eğrileri Şekil 3.9'daki gibi oluşturulabilir. Wöhler eğrisinde eğimli bölge sonlu ömür bölgesi ve paralel olan bölge ise sonsuz ömür bölgesidir (Kahya, 2016). Bu parçalara yeterli şiddette çevrimsel gerilme uygulandığında, parçada nihai hasar oluşturan yorulma çatlakları oluşabilir. Testin daha yüksek bir gerilme seviyesinde tekrarlandığı durumda kırılmaya kadar olan çevrim sayısı azalır, gerilme azalırsa çevrim sayısı artar (Yeni, bt).



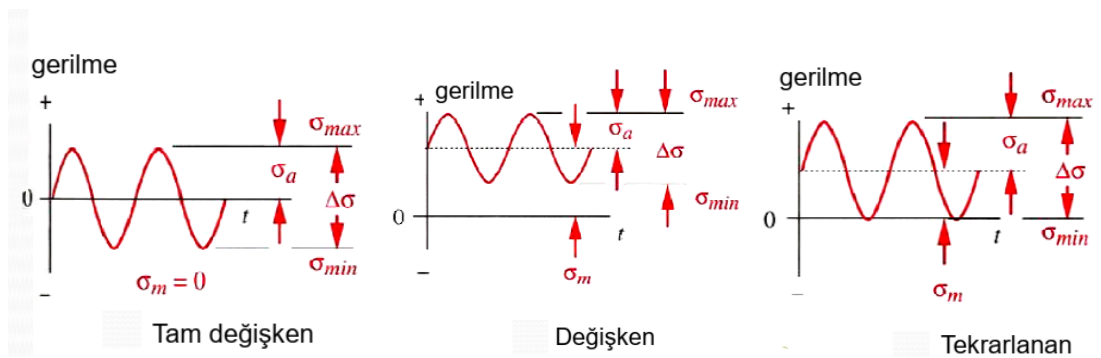
Şekil 3.9 Wöhler Eğrisi (Kahya, 2016)

Yorulma tasarımı kullanılan terminoloji, Şekil 3.10'daki zaman eğrisi karşısında sabit genlik ile birleştirilmiştir. Bu yaklaşımda yük veya moment belirli sabit değerler arasında değişir (Yeni, bt).



Şekil 3.10 Sabit genlikli çevrimsel yükleme (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

Şekil 3.11'de tam değişken, değişken ve tekrarlanan çevrimsel yükleme tipleri görülmektedir. Grafikte görülen σ_a , σ_m , σ_{max} , σ_{min} , A , R ve $\Delta\sigma$ sırasıyla gerilme genliği, ortalama gerilme, maksimum gerilme, minimum gerilme, genlik oranı, gerilme oranı ve gerilme aralığını ifade etmektedir. Tam değişken durumda, ortalama gerilmenin sıfır olduğu kabul edilir.



Şekil 3.11 Çevrimsel yükleme çeşitleri (Yeni, bt)

Ortalama gerilme, gerilme aralığı, gerilme genliği, gerilme oranı ve genlik oranı arasındaki ilişkiler ise sırasıyla Denklem 3.2, Denklem 3.3, Denklem 3.4, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6’da verilmiştir.

$$\text{Ortalama gerilme:} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\text{Gerilme aralığı:} \quad \Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.3)$$

$$\text{Gerilme genliği:} \quad \sigma_\alpha = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (3.4)$$

$$\text{Gerilme oranı:} \quad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.5)$$

$$\text{Genlik oranı:} \quad A = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_m} \quad (3.6)$$

Gerilme aralığı, ortalama gerilme, gerilme oranı ve genlik oranının A ve R cinsinden ifadeleri sırasıyla Denklem 3.7, Denklem 3.8, Denklem 3.9 ve Denklem 3.10’da verilmiştir.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_\alpha = \sigma_{max}(1 - R) \quad (3.7)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 + R) \quad (3.8)$$

$$R = \frac{1 - A}{1 + A} \quad (3.9)$$

$$A = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (3.10)$$

S-N eğrileri ile ilgili birçok bağıntı bulunmaktadır. Fakat en sık kullanılan, Denklem 3.11’de verilen kırılma çevrim sayısı ve yük gerilme genliği arasındaki logaritmik Basquin bağıntısıdır.

$$\sigma_a = CN_f^b \quad (3.11)$$

Burada,

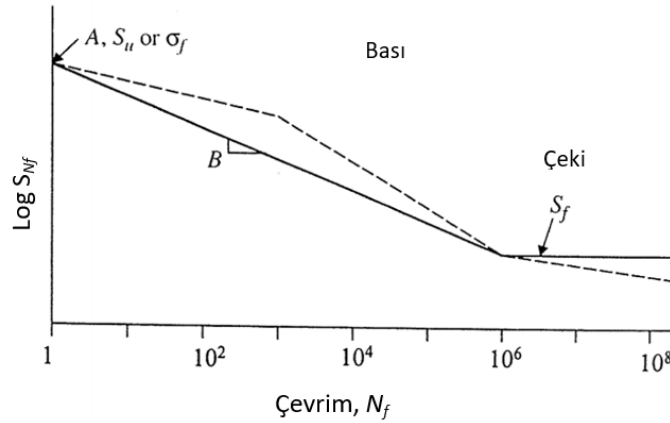
σ_a : gerilme genliği

C: malzeme sabiti

N_f : kırılmaya kadar olan çevrim sayısı

b: Basquin üsteli

S-N eğrisinin Basquin yaklaşımıyla oluşturulduğu grafik Şekil 3.9'da görülmektedir. Bu eğride ilk kısım 1 ve 10^3 çevrim arasında, ikinci kısım 10^3 ve 10^6 çevrim arasında ve üçüncü kısım ise 10^8 çevrimden itibaren incelenmiştir. Bu model Şekil 3.12'deki kesik çizgilerle ifade edilmektedir ve kullanım sırasında değişken genlikli yükleme durumunda yorulma sınırının bulunmadığını göstermektedir. Bazı durumlarda üçüncü kısım yatay olarak da ilerleyebilmektedir (Stephens ve diğer., 2001).

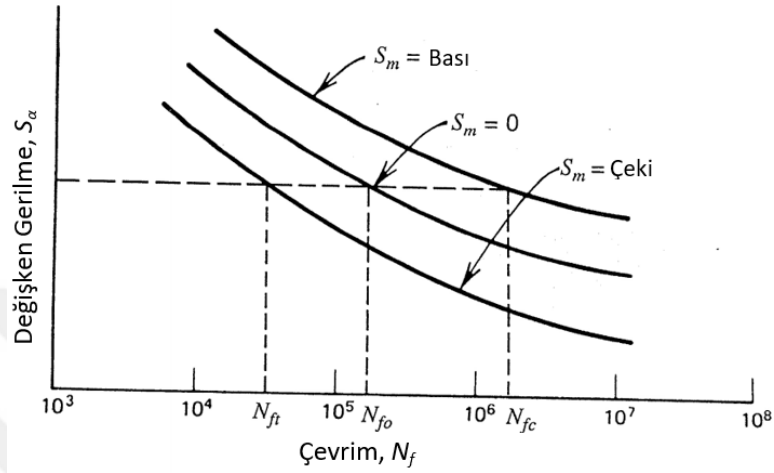


Şekil 3.12 Basquin tipi S-N eğrisi (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

3.3.1.1 Ortalama Gerilme Etkisi

Ortalama gerilme birçok uygulamada görülebilir ve ortalama gerilmenin yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ortalama gerilmeler makinelerde

oluşabildikleri gibi artık gerilmelerden dolayı bileşenlerde de oluşabilmektedirler. Çeki veya bası artık gerilmeleri, bir bileşendeki kaynak, tornalama, taşlama gibi üretim prosesleri ile tetiklenebilir (Wehner ve Fatemi, 1991). Şekil 3.13’de gerilme genliği, S_a , ile farklı ortalama gerilmelerde kırılmaya kadarki çevrim sayısı, N_f , incelenmiştir.

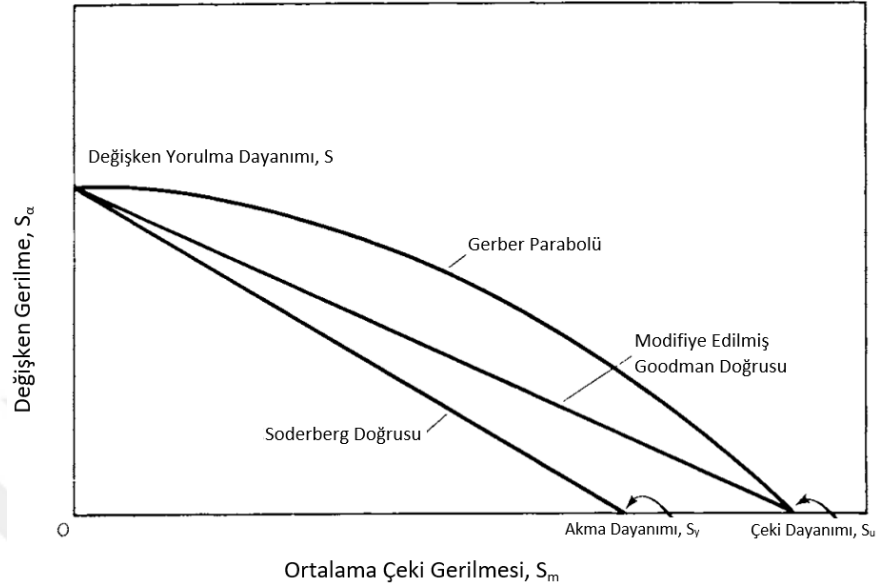


Şekil 3.13 Ortalama gerilmenin yorulma ömrü üzerindeki etkisi (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

Şekil 3.10’da görüldüğü üzere, bası ortalama gerilmesinin yorulma ömrünü arttırdığı bilinirken, çeki ortalama gerilmesi yorulma ömrüne zarar verici niteliktedir. Bu, aynı zamanda grafikte S_a değişken gerilmesi altındaki yorulma ömrünü temsil eden 3 dikey çizgi ile de gösterilmektedir. Bunlardan N_{ft} çeki ortalama gerilmesi için yorulma ömrünü, N_{fo} sıfırı ve N_{fc} ise bası ortalama gerilmesi için yorulma ömrünü temsil etmektedir.

Şekil 3.14’de değişken gerilme altında yorulma dayanımını tahmin etmek için sıkça kullanılan deneysel ilişkiler gösterilmiştir. Bu grafik iki adet doğrusal ve bir adet parabolik çizgiden oluşmaktadır. Değişken yorulma dayanımını çekme dayanımına bağlayan düz çizgi Goodman kuralı olarak bilinir. Gerber, Wöhler’in ilk deneysel sonuçlarının parabolik bir ilişki ile yakın olarak eşleştiğini buldu, bu nedenle bu eğriye Gerber’in parabolü denmektedir. Soderberg kuralı ise değişken yorulma dayanımının akma dayanımına doğrusal bir çizgi ile ilişkilendirilmesi olarak tanımlanmıştır. Metal ve alaşımların birçoğu Gerber parabolü ile Goodman çizgisi arasındaki bölgede

bulunmaktadır. Goodman, Gerber ve Soderberg bağıntıları Denklem 3.12, Denklem 3.13 ve Denklem 3.14’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.14 Değişken gerilme ile ortalama gerilme arasındaki deneysel ilişki (Forrest, 1962)

Goodman bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right) \quad (3.12)$$

Gerber bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 \right) \quad (3.13)$$

Soderberg bağıntısı:
$$S_a = S \left(1 - \frac{S_m}{S_y} \right) \quad (3.14)$$

Burada,

S_a : $S_m \neq 0$ için gerilme genliği cinsinden yorulma dayanımı

S : $S=0$ için gerilme genliği cinsinden yorulma dayanımı

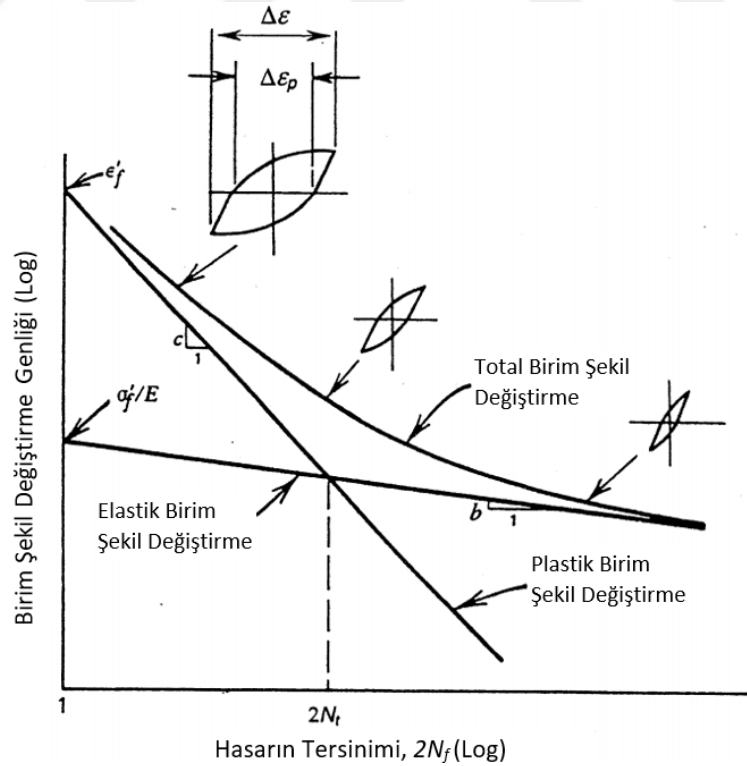
S_m : Ortalama gerilme

S_u : Çekme mukavemeti

S_y : Akma mukavemeti

3.3.2 Birim Şekil Değiştirme (ϵ) – Ömür (N) Yaklaşımı

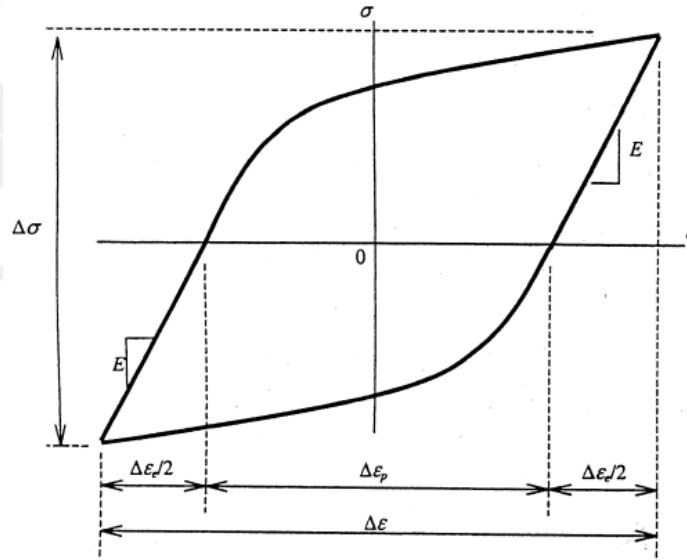
Gerilme-ömür yaklaşımı, tekrarlayan yükleme yoluyla oluşan plastik deformasyonun olduğu durumlarda kesin sonuç vermez. Bu durumda şekil değiştirme-ömür yaklaşımı kullanılmaktadır. Ayrıca yükleme miktarının yüksek olduğu durumlarda şekil değiştirme-ömür yaklaşımının kullanılması daha uygundur. Birim şekil değiştirme yaklaşımlarının en çok kullanıldığı alan, çentikli elemanların yorulmasıdır. Döngüsel dış yüklere maruz kalmış çentikli bileşen ya da numunelerde, çentik kökündeki malzemenin davranışı birim şekil değiştirme açısından en iyi şekilde ele alınabilir. Çentikteki lokal plastik bölgeyi çevreleyen elastik kısıtlar olduğu sürece, birim şekil değiştirme gerilmeden daha kolay hesaplanabilir. Gerilme-ömür eğrileri için hasar kriteri, tespit edilebilir boyuttaki küçük bir çatlağı oluşturacak hasar, çeki yönünde ömürde belli bir oranda düşüşe neden olan hasar ve kırılma meydana getiren bir hasar için tutarlı bir şekilde tanımlanmamıştır. Şekil 3.15’de birim şekil değiştirme-ömür yorulma eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.15 Birim şekil değiştirme – ömür eğrileri (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

Toplam birim şekil değiştirme genliği, kararlı bir gecikme döngüsünden elastik ve plastik şekil değiştirme bileşenlerine dönüştürülmüştür. Belli bir N_f ömründe, toplam şekil değiştirme elastik ve plastik şekil değiştirmelerin toplamıdır. Elastik ve plastik eğriler doğrusal olarak kabul edilebilir. Büyük şekil değiştirme ya da kısa ömürlerde plastik şekil değiştirme bileşenleri hakimdir, küçük şekil değiştirme ya da uzun ömürlerde ise elastik şekil değiştirme bileşenleri ağır basmaktadır.

Tekrarlayan yükleme esnasında elastik bölgedeki şekil değiştirme ve gerilme, elastisite modülü ile ilişkili olarak meydana gelir. Tekrarlayan yüklemeler plastik uzama oluşturur ve bunun sonucunda Şekil 3.16’da görülen histerezis döngüsü oluşur (Kahya, 2016).



Şekil 3.16 Gerilme-yer değiştirme histerezis döngüsü (Stephens, Fatemi, Stephens ve Fuchs, 2001)

Elastik uzama durumunda yüksek çevrim ve düşük uzama Denklem 3.15’deki Basquin denklemi ile ifade edilir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} E = \sigma' f (2N)^b \quad (3.15)$$

Basquin denklemi ve Coffin-Manson denklemlerinin birleştirilmesi ile Denklem 3.16'daki toplam yer değiştirme-ömür bağıntısı elde edilmektedir.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3.16)$$

Burada,

$\Delta \varepsilon/2$: Toplam yer değiştirme genliği

ε_f' : Yorulma süneklik katsayısı

c: Yorulma süneklik üssü

σ_f' : Yorulma dayanım katsayısı

b: Yorulma dayanım üssü

E: Elastisite modülü

N_f : Hasar çevrim sayısı

BÖLÜM DÖRT

BİNEK ARAÇ ROTLARINDA YORULMA VE SERTLEŞTİRME

YÖNTEMLERİ

4.1 Binek Araç Rotlarında Yorulma

Birçok yapı ve mekanik sistem, çalışma sırasında düzensiz veya rastgele yüklere maruz kalır. Rotlar da, araçta montaj halinde dinamik ve statik yükler altında çalışmaktadırlar. Dinamik yükler, belli bir çevrim sayısından sonra rotlarda yorulma kırılması oluşturmaktadırlar. Tasarım aşamasında malzeme seçimi ve geometri, yorulma dayanımını etkileyen önemli faktörlerdir. Bunun yanında yorulma çatlağının büyümesi için geçen süreyi tahmin etmek, değişken yüklere maruz kalacak elemanların tasarımında esastır. Otomotiv ana sanayi firmaları tarafından rotların karşılaması gereken yükler belirlenmektedir. Bu nedenle yapılan tasarımın ve seçilen malzemenin bu yükleri karşılayacak nitelikte olması gerekmektedir (Moreno, Zapatero ve Dominguez, 2003; Taş, 2017).

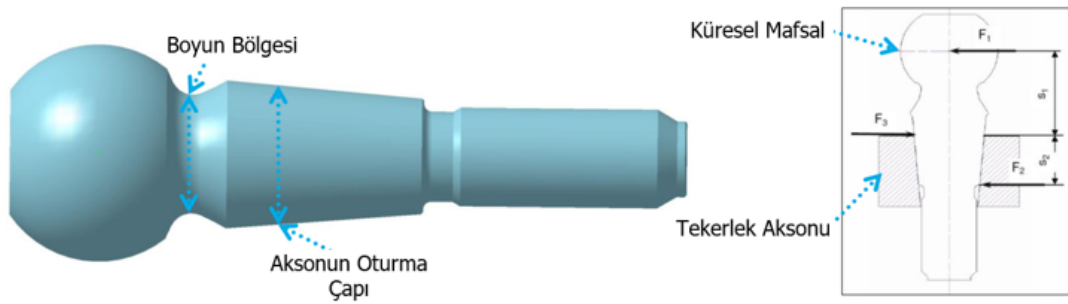
Aracın direksiyon sistemi belirli aralıklarla düzenli olarak kontrol edilmelidir. Rotlar birçok şekilde hasara uğrayabilirler fakat ses ya da titreşimdeki hafif bir artış dışında hasar meydana gelene kadar bir işaret vermezler. Genel olarak her hasar tipi karakteristik ipuçları bırakır ve ayrıntılı inceleme ile hasar nedenini ortaya koyacak bilgi elde etmek mümkündür. Rotların arıza modları arasında yorulma, darbe ile kırılma, gerilme kopması bulunmaktadır. Rot hasarları için pek çok neden tanımlanmıştır. Bunlar kötü tasarım, yanlış montaj, aşırı yükleme, kritik alanlardaki gerilme yükselticileri ve yüzey altı kusurları, yanlış malzeme kullanımı, üretim prosesi ve uygun olmayan ısıtma işlemlerin uygulanması olabilir (Falah, Alfares ve Elkholy, 2007). Yorulma ömrü ve dayanımının tespiti için dört adet yöntem bulunmaktadır.

1. Trafiğe açık yollarda yapılan dayanım testleri,
2. Hızlandırılmış test pistlerinde yapılan dayanım testleri,
3. Laboratuvarda yapılan dayanım testleri,

4. Bilgisayar destekli mühendislik araçlarıyla yapılan yorulma analizleri ve ömür tahminleri

Yorulma hataları genellikle uzun bir zaman aralığında araçta müşteri kullanımı sırasında ortaya çıktığından dolayı bu tip hataların kısa sürede tespit edilmesi zordur. Aracın dayanımı 3 adet parametreye bağlıdır; tasarımın geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme şartlarıdır. Bunun yanında yol pürüzlülükleri, yol tipleri, coğrafi koşullar ve araç kullanım şekli aracın ömrünü etkilemektedir (Güvenç ve Botsalı, 2015).

Yorulma üzerindeki kritik bölge yaklaşımında, geometrik etkiler, araçların ya da parçalarının üzerindeki dış yüklerin, kritik bölgelerdeki gerilme veya birim yer değiştirmeye dönüşmesine neden olur. Kuvvet veya moment olabilecek herhangi bir dış yük, lokal gerilme konsantrasyonuna dönüşebilir (Conle ve Chu, 1997). Rotlarda yorulma kırılmaları genellikle dinamik ve geometrik açıdan kritik bir bölge olan rot başı mafsali milin boyun bölgesinde oluşmaktadır. Diğer bir kritik bölge ise mafsali milin konik bölgesinde bulunan tekerlek aksunun bulunduğu çaptır. Genellikle kontrollü olması bakımından aksunun oturduğu çaptan kırılması tercih edilir. Şekil 4.1’de küresel mafsali milin boyun bölgesi ve aksunun oturduğu çap gösterilmektedir. Şekil 4.2’de ise boyun bölgesinden kırılmış bir mafsali mil gösterilmektedir.



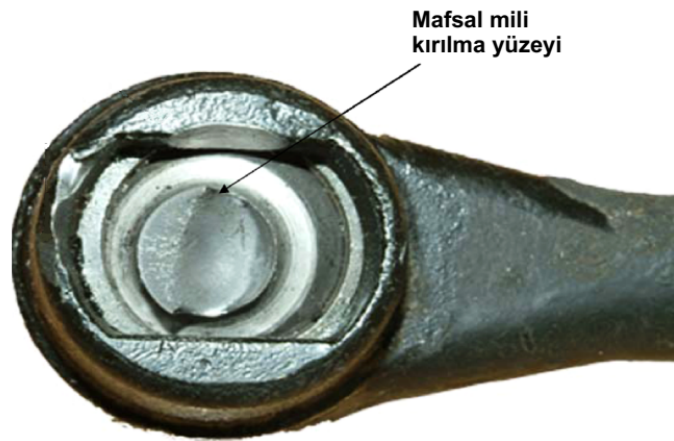
Şekil 4.1 Rot başı küresel mafsali mil (ZF Friedrichshafen, 2018)

Şekil 4.1’de mafsali milin boyun bölgesinden kırılmış bir rot başı görülmektedir.



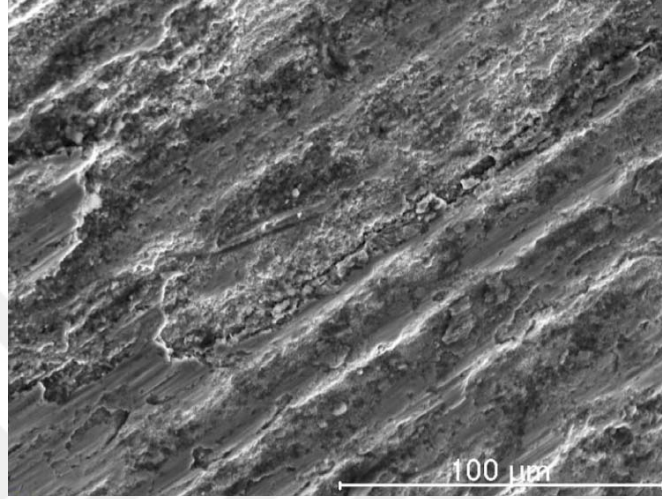
Şekil 4.2 Mafsal mili boyun bölgesinden kırılmış bir rot başı (Falah, Alfares ve Elkholy, 2007)

Şekil 4.3’de boyun bölgesinden kırılmış mafsal milinin kesit alanı görülmektedir. Burada kesit alanının azalmasından ve gerilme birikmesinden dolayı gerilmenin yüksek olduğu tahmin edilen boyun bölgesinden kırılma gerçekleşmiştir. Açık olarak görülmektedir ki kırılma yüzeyinde iki farklı alan vardır, bir taraf pürüzsüz iken diğer taraf nispeten pürüzlüdür. Bu, pürüzsüz kenardan başlayan, pürüzlü alana doğru ilerleyen ve de nihai hasarı meydana getiren tipik bir yorulma kırığıdır. Diğer bir yandan pürüzsüz yüzey alanının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu, çatlak başlangıcından kırılmaya kadar biraz zaman geçtiğini gösterir ve yüksek çevrimli bir yorulma hasarına örnek olabilir (Falah ve diğer., 2007).



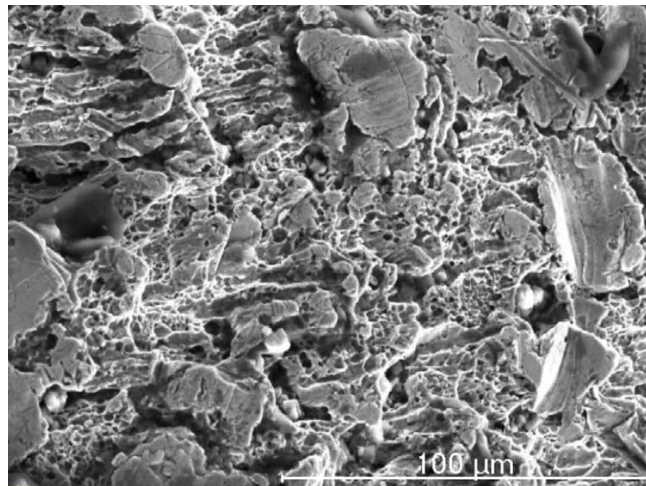
Şekil 4.3 Boyun bölgesinden kırılmış mafsal milinin kesit alanı (Falah, Alfares ve Elkholy, 2007)

Şekil 4.4’de metalografik olarak hazırlanmış kırık numunenin yüzeyi taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Kırılma yüzeyindeki pürüzsüz bölgede belirgin yorulma çatlakları gözlemlenmiştir. Çatlakların kökeni bu pürüzsüz alanın kenarında olduğundan dolayı, gerilmenin bu bölgede en yüksek seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Açık bir biçimde görülen kumul izleri yorulma kırılmasının tipik bir özelliğidir.



Şekil 4.4 Çatlak ilerleme bölgesi (Falah, Alfares ve Elkholy, 2007)

Şekil 4.5’de ise çukurlarla birleştirilmiş tane büyüklüğü değişiminin belirgin olduğu kırılma yüzeyinin pürüzlü alanının mikrografisi görülmektedir.



Şekil 4.5 Kırılma yüzeyinin son yüzey kısmı (Falah, Alfares ve Elkholy, 2007)

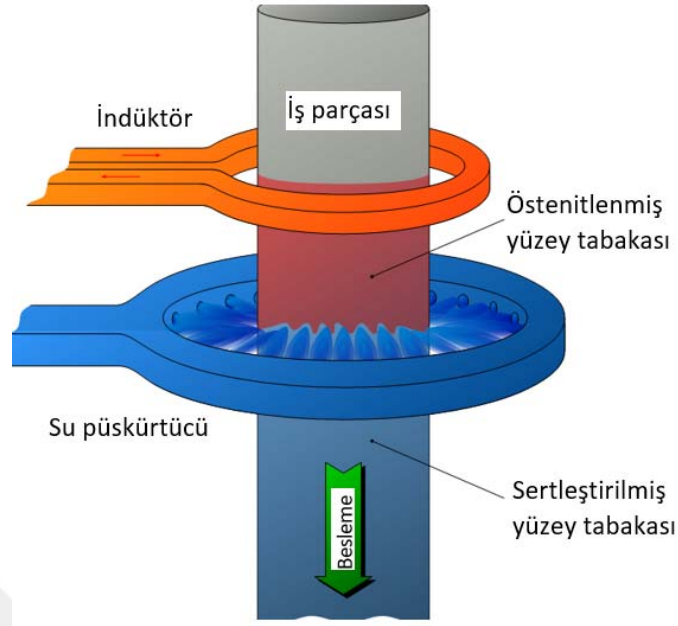
Tasarım aşamasında yorulma ömrü tahmin araçları kullanılarak, mafsalda yorulma ömründen önce kırılma tespit edildiği durumlarda küresel mafsala sertleştirme işlemi uygulanması planlanır.

4.2 Sertleştirme Yöntemleri

Makine elemanları, çalışma durumunda iken dış yüzeylerinde iç bölgelerine oranla daha büyük bir gerilme ve aşınma kuvvetleri oluşur. Bu gerilme ve kuvvetler, malzemenin yüzey dayanım sınırını aştığı durumda yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu şekilde değişken yüklemeye maruz kalan parçalarda yüzey dayanımını yükseltmek ve aynı zamanda darbeye dayanıklılığı arttırmak için sünek bir iç bölge sağlamak için sertleştirme işlemi yapılmalıdır. Sertleştirme işlemi uygulanan parçaların aşınma dayanımları yükselir, çekirdek kısmı sertleştirme işleminden etkilenmediği için darbeye dayanıklılığı artar, korozyon direnci iyileştirilir ve parçanın yüzeyinde çatlak oluşumu geciktirildiğinden dolayı yorulma dayanımı artırılmış olur. Mil, dişli çark, muylu, cıvata gibi pek çok makine elemanında sertleştirilerek istenilen aşınma dayanımı elde edilir bunun yanında iç bölge ise tok kalır (Güven, Delikanlı ve Öncel, 2014). Günümüzde rot başı mafsali için yaygın olarak kullanılan sertleştirme işlemleri indüksiyonla sertleştirme, nitrasyon ve derin haddeleme ile sertleştirmedir.

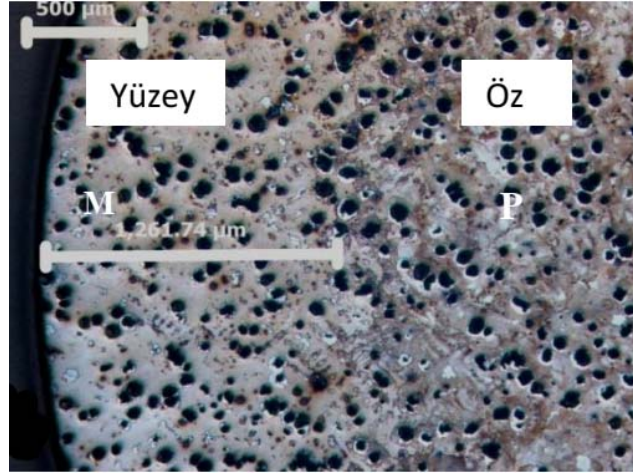
4.2.1 İndüksiyonla Sertleştirme

İndüksiyonla sertleştirme işleminde Şekil 4.6'de görüldüğü gibi metal iş parçası değişken bir manyetik alana yerleştirilir ve parça içerisinde elektrik akımı oluşturulması sağlanır. Yüksek frekanslı alternatif akım geçirilen bobinler sayesinde yüksek frekanslı manyetik alan oluşturulur. Bu manyetik alan, parçanın içerisinde eddy akımlarının oluşmasını sağlar ve bu akımlar parçanın yüzeyinde hareket etmeye başlar. Metal parça, bu akımlara direnç gösterdiği esnada ısınır ve böylece çekirdek bölgesi ısınmadan yüzeyi ısınmış olur. Isıtma süresi değiştirilerek sertleştirilen yüzey tabasının derinliği kontrol edilebilir. Daha sonra yüzeye su püskürtülerek yüzey sertleştirilir. Dönel simetriye sahip parçalar dengeli bir sertleştirme tabakasına sahip olmaları için sertleştirme ve soğuma esnasında döndürülebilirler.



Şekil 4.6 İndüksiyonla sertleştirme (Tec-science, 2018)

Günümüzde çelik malzemelerin yüzey yapısının kimyası değiştirilmeden yüzey sertleştirme işlemi olarak indüksiyonla sertleştirme sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntem ile ısıtma süresi, frekans, güç gibi parametreler kontrol edilerek yüzeyde oluşturmak istenilen sertleşme katmanı kalınlığı ve sertlik derecesi hassas bir şekilde denetlenebilmektedir. Sertleşme katmanı ve sertlik derecesinin kontrol edilebilmesi indüksiyonla sertleştirme yönteminin en büyük avantajıdır (Sadeler, Şengül, Çelik ve Totik, 2007). Bir başka avantajı ise sertleştirilen yüzeydeki sıcaklığı kısa bir süre içerisinde (3-5 sn) östenitleme sıcaklığına ulaştırabilmesidir. Bu işlemten sonra hızlı soğutma yapılması sayesinde de sıcaklığın çekirdeğe ulaşması engellendiğinden dolayı iç bölgedeki yapının değişmesi önlenmiş olur ve aynı zamanda parçanın yüzeyinde martensitin oluşturduğu aşınmaya dayanıklı sert bir yapı oluşturulur. Östenitten martensite dönüşme sırasında hacim büyümesi meydana gelir bu nedenle sertleştirme işlemi esnasında yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşur ve böylece yorulma sınırı arttırılmış olur (Oktay, Kılıçlı ve Erdoğan, 2018). Şekil 4.7’de indüksiyonla sertleştirilmiş bir numunenin mikroyapısı gösterilmektedir.



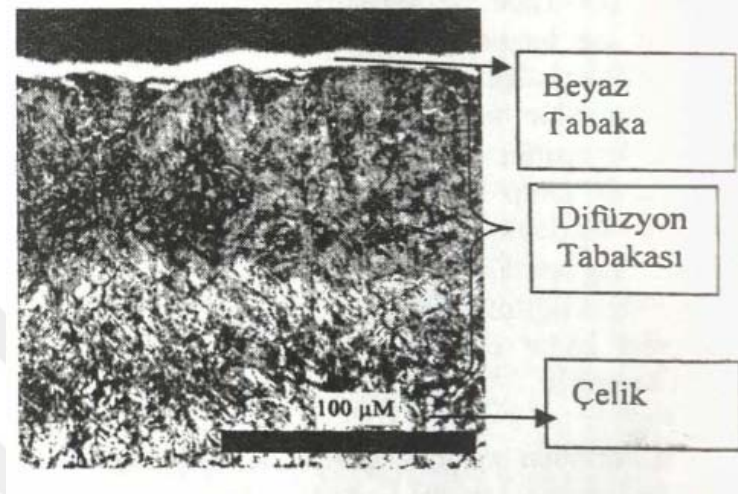
Şekil 4.7 İndüksiyonla sertleştirilmiş numunenin mikro yapısı (Oktay ve diğer., 2018)

Fakat indüksiyonla sertleştirme işleminin rot başı mafsal milleri üzerinde negatif bir etkisi vardır. İşlem sırasında mafsal milinin küre kısmında oksit tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka, gereksinimleri ana sanayi otomotiv firmaları tarafından belirlenen tork testlerindeki performansı olumsuz etkilemektedir. Bu negatif etkiyi yok etmek için mafsalın küre kısmından ince bir tabaka talaş kaldırılması gerekmektedir. Bu da ilave iş gücü, zaman ve para anlamına gelmektedir. Bunun yanında indüksiyonla sertleştirme işlemi diğer sertleştirme yöntemlerine oranla daha pahalıdır.

4.2.2 Nitrasyon ile Sertleştirme

Nitrasyon, mekanik elemanların yorulma dayanımını arttırmak için sıklıkla kullanılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Nitrasyon işlemi, demir içerikli alaşımların yüzey kısmına belirli sıcaklıkta nitrojen difüze edilerek parçanın yüzeyinde nitrür tabakası oluşturulan bir termal difüzyon işlemidir. Bu yöntem diğer sertleştirme yöntemlerine nazaran daha düşük sıcaklıkta (500-570°C) gerçekleştirilir. Bunun sonucunda yüzeyde metal-nitrür bileşikleri içeren sert bir yapı oluşur. Bu metodun uygulanabilmesi için çeliğin yaklaşık %1 oranında Al, Cr, Ti gibi nitrür yapıcı elementlerle alaşımlandırılması gerekmektedir. Bu elementlerin azota olan ilgisi demirden daha çok olduğu için yüzeyde ortalama 1200 HV sertliğinde azot ile bileşik oluştururlar (Akdoğan Eker, 2008). Nitrasyon işleminin uygulandığı parçanın yüzeyinde alaşımlama katmanı ve altında difüzyon tabakası oluşur. Alaşımlama

tabakası beyaz tabaka olarak isimlendirilmektedir. Bu tabaka korozyon ve aşınma dayanımının artmasını sağlarken, difüzyon katmanı yorulma dayanımını destekler. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere beyaz tabakanın, gevrekliği artırma özelliği bulunduğundan dolayı ince olması istenir (Bostan, 2015).



Şekil 4.8 Nitrürleme katmanları (Akbulut ve Bengü, 2004)

Çelikler nitrasyon işleminin gerçekleştiği sıcaklıklarda faz dönüşümüne uğramadığından dolayı çarpılma riskleri çok azdır. Nitrasyon işlemi Fe-N faz diyagramından faydalanılarak da incelenebilir. Bu işlem genellikle orta karbonlu çeliklere uygulanmaktadır (Akbulut ve Bengü, 2004). Nitrasyon işlemi, yüzeyde daha yüksek mukavemetli bir malzeme üretmenin yanı sıra artık bası yüzey gerilimleri üreten hacimsel değişikliklere neden olmaktadır. Bu işlemin çentikli çelik elemanlar üzerindeki etkisi Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1 Nitrasyonun yorulma dayanımı üzerindeki etkisi (Forrest, 1962)

Geometri	Yorulma Dayanımı (MPa)	
	Nitrasyon uygulanmış	Nitrasyon uygulanmamış
Çentiksiz	620,5	310,2
Yarım daire çentik	599,8	172,3
V çentik	551,5	165,4

4.2.3 Derin Haddeleme ile Sertleştirme

Bir bileşenin yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturmak için kullanılan birçok soğuk işlem yöntemi vardır. Derin haddeleme, dinamik olarak yüklenmiş bileşenlerin yorulma ömrünü verimli bir şekilde arttıran bir işlemdir. Bu yöntem yorulma dayanımını, tribolojik özellikleri ve bir yüzeyin korozyon dayanımını arttırmak için üç efekti birleştirir. Derin haddeleme,

- Yüzeyleri pürüzsüzleştirir.
- Yüzey bölgesinde derin bası gerilmeleri yaratır.
- Yüzey bölgesini sertleştirir.

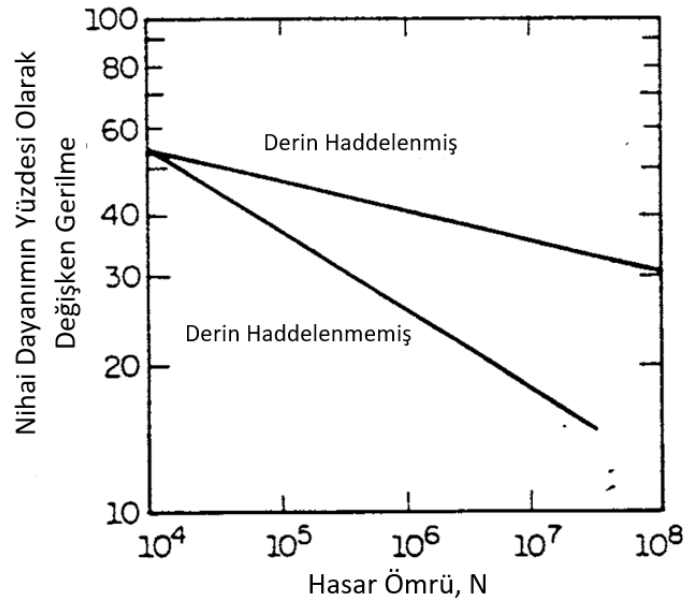
Bir iş parçasının yüzey alanının bileşenin dayanımı üzerinde büyük bir etkisi vardır, özellikle periyodik yüklemeye maruz kalıyorsa. Günümüzde biliyoruz ki yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme ve mikro yapı yüzey alanını optimize etmek için önemli parametrelerdir. Neredeyse her üretim prosesi bu parametreleri etkilemektedir. Derin haddeleme gibi işlemler ise bileşenlerin yorulma dayanımını geliştirmek için ortaya koyulmuştur ve yaygın olarak uygulanabilir bir süreç olarak geliştirilmiştir. Modern takım teknolojisi, sadece simetrik dönel parçalara değil düz ve serbest formlu yüzeylere de derin haddeleme uygulanmasına izin verir. Derin haddeleme takımları, iş parçasının yüzeyine belli bir yük ile baskı uygulayan silindir ya da bilyeden oluşur. Yük, yüzey bölgesinde elastik-plastik deformasyona neden olacak kadar yüksektir, bu da yüzeyi pürüzsüzleştirir ve yüzeyde derin bası artık gerilmeleri oluşmasına neden olur. Bu kombinasyon, derin haddeleme teknolojisine özgüdür. Tablo 4.2’de tasarımları aynı olan haddelenmiş ve haddelenmemiş cıvataların 10^5 çevrimden sonra dış kısımlarındaki yorulma dayanımı farkı görülmektedir.

Tablo 4.2 Haddelenmiş ve haddelenmemiş cıvataların yorulma dayanımları (Bannantine ve diğer., 1990)

	Yorulma Dayanımı (MPa)
Haddelenmiş cıvata	510,2
Haddelenmemiş cıvata	303,3

Günümüzde hafif tasarım ve arttırılmış parça performansı ortak bir sanayi talebidir. Bu amaca ulaşmak için sadece bir parçayı değil parçanın özelliklerini, bilhassa yüzey özelliklerini tasarlamak gerekmektedir. Derin haddeleme de bu amaca hizmet etmektedir. Pürüzsüz bir yüzey sadece yorulma dayanımı için değil, aynı zamanda tribolojik ve korozyon özellikleri üzerindeki olumlu etkisi için de önemlidir. Derin haddeleme yöntemi de $R_a 0,02 \mu\text{m}$ 'den düşük yüzey pürüzlülüğü sağlayabilmektedir. Bu işlem standart tezgahlara dahil edilebilmektedir ve tornalama veya frezelemeden sonra tek bir ayarda uygulanabilir (Röttger, Jacobs ve Wilcke, 2005).

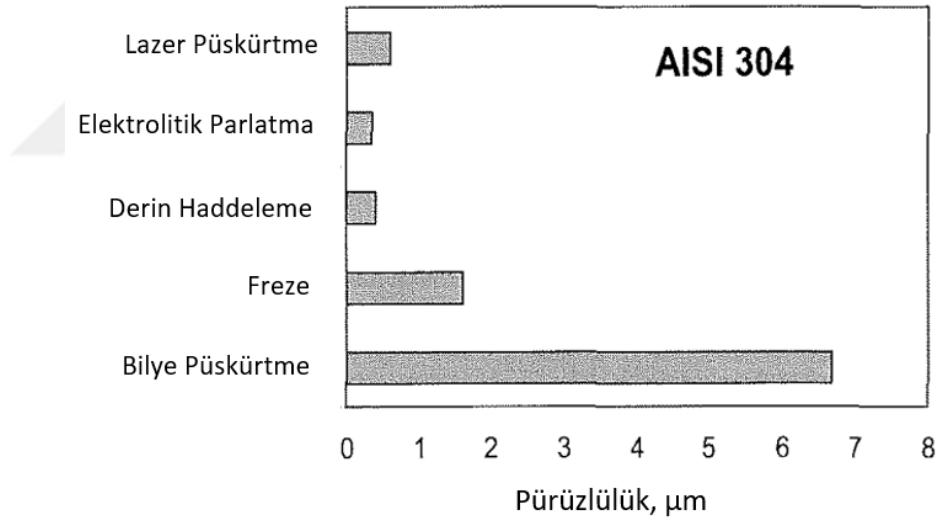
Yorulma dayanımını arttırmak için bası artık gerilmesi oluşturulması yaygın bir yöntemdir. Özellikle yüksek çevrimde, bası artık gerilmeleri yorulma ömrünü arttırmaktadır. Çatlak büyümesi azaltılabilir hatta bazı durumlarda sıfıra bile indirgenebilir bu nedenle parçada çatlak olduğu durumda dahi hasar önlenir. Şekil 4.5'de derin haddelenmiş ve derin haddelenmemiş parçaların yorulma ömürleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Derin haddelenmenin çeliklerin S-N eğrisi üzerindeki etkileri (Bannantine ve diğer., 1990)

Yüzey bölgesindeki bası artık gerilmesinin derinliği, yorulma dayanımı artışını ve çatlak ilerlemesinin azaltılmasını ciddi bir biçimde etkilemektedir. Derin haddeleme ile en çok karşılaştırılan yöntem bilyeli püskürtmedir. Fakat yorulma dayanımı

açısından daha yüksek bir performans, daha derin bası artık gerilmeleri ve daha pürüzsüz bir yüzey arandığı durumlarda derin haddeleme daha iyi bir performans göstermektedir (Wong, Hartawan ve Teo, 2014). Örneğin soğuk şekillendirme yöntemlerinden biri olan bilyeli püskürtme işleminde yüzey alanının oldukça ince bir tabakası etkilenirken, derin haddeleme daha derin bası artık gerilmeleri oluşturur. Bilyeli püskürtme işleminde parça küçük bilyelere dayanım gösterirken derin haddeleme işleminde büyük çaplı bir silindir ya da bilye kullanılır. Bu nedenle plastik deformasyon ve ortaya çıkan artık gerilme daha derinde oluşur. Genel bir kural olarak yeterli deformasyon sertleşmesi derin haddeleme parçaları için bilye püskürtme parçalarından daha önemlidir çünkü bilye püskürtülmüş yüzeyler yüksek yüzey pürüzlülüğü sergiledikleri için her zaman daha fazla ya da az çentiklidir. Şekil 4.6'da aynı numuneler üzerinde farklı yüzey işlemleri uygulandığında elde edilen yüzey pürüzlülükleri görülmektedir (Altenberger, 2005).



Şekil 4.10 AISI 304 çeliği numunelerinin Rz pürüzlülük değerleri (Altenberger, 2005)

Rot başlarına uygulanan sertleştirme yöntemlerinden indüksiyonla sertleştirme ve nitrasyon pahalı işlemlerdir buna karşın derin haddeleme daha az maliyetli bir yöntemdir ve bunun yanında yüzey iyileştirici özelliklere sahiptir.

BÖLÜM BEŞ

ROT BAŞLARINDA HADDELEME İLE SERTLEŞTİRME

Bu bölümde, belirlenmiş yorulma ömründen önce kırılması öngörülen ve çelik malzemeden dövme yöntemiyle üretilmiş bir rot başı konik mafsallı milinin yorulma ömrünü uzatmak için aksonun oturduğu konik bölgeye derin haddeleme işlemi uygulanması incelenmiştir. Daha sonra sertleştirme işlemi uygulanmış numunelere yorulma testi yapılmış, Wöhler eğrisi oluşturulmuş ve sertleştirme işlemi yapılmamış numunelerin yorulma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bunun yanında derin haddeleme ile sertleştirilmiş numunelere küresel mafsallı eğilme darbe testi, küresel mafsallı statik eğilme testi ve sertlik ve pürüzlülük ölçümü yapılmış, sertleştirme işlemi uygulanmamış numuneler ile sonuçlar karşılaştırılıp derin haddeleme işleminin etkileri değerlendirilmiştir.

Derin haddeleme işleminde, küresel mafsallı konik bölgesi boyunca dairesel hareket yapan silindirik röleler arasında belli bir hız, süre ve kuvvet altında basınç uygulanarak bu bölgede plastik deformasyon oluşması sağlanmıştır. Böylece dinamik yükler altında konik bölgeden kırılan mafsallı milin derin bası gerilmeleri oluşmasıyla yorulma dayanımı artması ve pürüzlülüğü azaltılmış yüzey sayesinde çatlak ilerlemesinin geciktirilmesi beklenmiştir. Şekil 5.1’de derin haddeleme yapılan bir küresel mafsallı mil ve derin haddeleme düzeneği görülmektedir.



Şekil 5.1 Derin haddeleme düzeneği (ZF Friedrichshafen, 2018)

5.1 Yorulma Testi

Küresel mafsallı miline derin haddeme ile sertleştirme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış rot başı ve rot kolu ana sanayi otomotiv firmasından gelen rot boyuna uygun olarak uygun bir somun yardımıyla montaj haline getirilmiştir ve yorulma testi cihazının aparatları yardımıyla test cihazına bağlanmıştır. Daha sonra rot başı, aksonu temsil eden aparatlara torklanmıştır. Şekil 5.2’de yorulma testi cihazı görülmektedir. Yorulma test düzeneğinde hareket, 200 Bar’da çalışan Moog marka valfler, Instron marka aktüatör ve hidrolik silindirler yardımıyla sağlanmaktadır. Hidrolik silindirlerden gelen hareket bası ve çeki olarak aktarılmaktadır ve böylece gerekli çevrim sayısı sağlanmaktadır. Test numunelerine 10 Hz frekansta farklı kuvvetler uygulanmıştır. Parça kırıldığı zaman sensör tarafından algılanıp test durdurulmuştur ve böylece kaç çevrim dayandığı test cihazına bağlı bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler yardımıyla Wöhler eğrisi hesaplanmıştır.



Şekil 5.2 Yorulma test cihazı (ZF Friedrichshafen, 2018)

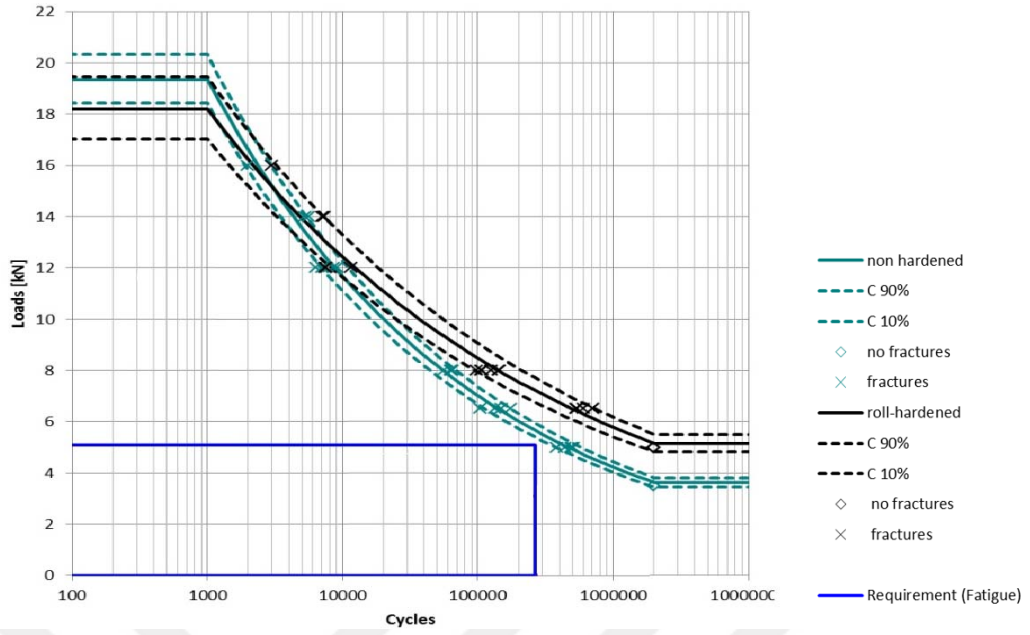
Tablo 5.1’de derin haddeme ile sertleştirilmiş ve sertleştirme işlemi uygulanmamış küresel mafsallı miline sahip rotaların yorulma sonuçları görülmektedir. Yorulma testinde 2000000 çevrim, sonsuz ömür olarak kabul edilmiştir. Sonuçlardan

da görüldüğü üzere sertleştirme işlemi uygulandıktan sonra küresel mafsalsın sonsuz ömre karşı dayanımı artmıştır. Sertleştirme işleminden önce sonsuz ömürde 3,5 kN kuvvete dayanım sağlarken derin haddelenme işleminden sonra sonsuz ömürde 5 kN kuvvete dayanabilmiştir. Uygulanan diğer kuvvetleri incelediğimizde ise 6,5 kN’da ciddi bir ömür artışı görülmektedir. 8 kN’da neredeyse iki katı kadar ömür artışı olmuştur, 12 kN ise dayanımları hemen hemen aynıdır.

Tablo 5.1 Derin haddelenme ile sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş rotların yorulması

Sertleştirilmeden Önce			Sertleştirildikten Sonra		
Yük [kN]	Frekans [Hz]	Çevrim Sayısı	Yük [kN]	Frekans [Hz]	Çevrim Sayısı
±3,5	10	2000000	±5	10	2000000
±6,5	10	175600	±6,5	10	533500
±6,5	10	134400	±6,5	10	704700
±6,5	10	104500	±6,5	10	710000
±8	10	56000	±8	10	144200
±8	10	64700	±8	10	142200
±8	10	63200	±8	10	125600
±12	10	6400	±12	10	7400
±12	10	8500	±12	10	7500
±12	10	7100	±12	10	11500

Şekil 5.3’de Wöhler eğrisi görülmektedir. Derin haddelenmiş ve haddelenmemiş rotların 5 kN kuvvet ve 2000000 çevrim sonsuz ömürdeki çoğunlukla ana sanayi otomobil firmalarının gereksinimi olan C %90’daki değerleri karşılaştırılacak olursa, derin haddelenmiş parçaların uzun ömürde kuvvete daha uzak kaldığı yani burada da daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 5.3 Derin haddeleme uygulanmış rotların Wöhler eğrisi (ZF Friedrichshafen, 2018)

5.2 Küresel Mafsal Eğilme Darbe Testi

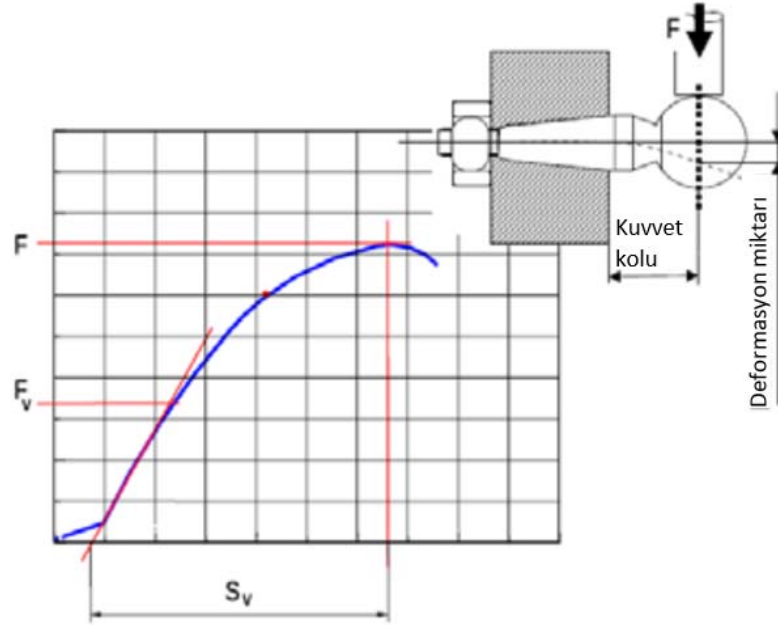
Çalışma koşullarında dinamik yüklemeye maruz kalan rot başı küresel mafsal millerinin bu yüklemelere dayanma kabiliyetini değerlendirmek için eğilme darbe testi yapılır. Eğilme darbe testinde numunelerin maruz kaldığı ortam sıcaklığı ve süresi, mafsalın sıkma torku, verilen enerji miktarı ve kalıcı deformasyon boyutu ana sanayi otomobil firması tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş küresel mafsal numuneleri orijinal aksonu temsil eden bir test fikstürüne somun ile bağlanarak, sıkma momenti ile sıkılmıştır. Darbe bir pandül ile belirli bir düşme yüksekliğinden mafsalın küresine radyal yönden uygulanmıştır. Testin sonunda uygulanan belirli enerji miktarları karşısında meydana gelen eğilme miktarı ölçülmüştür. Ayrıca testin sonunda çatlak veya kırılma oluşmaması da istenmektedir. Tablo 5.2’de test sonuçları görülmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, derin haddeleme işleminin küresel mafsalın gevrekliğini arttırmadığı ve eğilme miktarının sertleştirme işlemi uygulanmayan numuneler ile hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.2 Küresel mafsalsal eğilme darbe testi sonuçları

Sertleştirilmeden Önce		Sertleştirildikten Sonra	
Enerji [J]	Eğilme [mm]	Enerji [J]	Eğilme [mm]
130	2,89	130	3,11
150	3,45	150	3,41
180	4,17	180	4,08

5.3 Küresel Mafsalsal Statik Eğilme Testi

Küresel mafsalsal statik eğilme testi, mafsalsalın statik eğilme karakteristiğini incelemek amacıyla yapılır. Küresel mafsalsal dış kısmından aksonu temsil eden bir fikstüre ya da orijinal aksone montajda kullanılacak orijinal somun yardımıyla sıkma torku ile bağlanır. Daha sonra hızı ve kalıcı deformasyonu ana sanayi firması tarafından belirlenmiş yük Şekil 5.4’deki gibi mafsalsalın küre kısmına, mafsalsal eksenine dik olacak şekilde maksimum radyal yüke ulaşılan kadar kuvvet uygulanır (Baroiu, David ve Susac, 2014).



Şekil 5.4 Küresel mafsalsal statik eğilme testi (Baroi ve diğer., 2014)

Bu çalışmada derin haddeleme ile sertleştirme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelere eğilme testi uygulanmıştır. Testin sonunda Tablo 5.2’de de görüldüğü gibi numunelerin akma limiti ve maksimum yük elde edilmiştir. Statik eğilme sonuçları incelendiğinde, her iki numune cinsinin değerlerin birbirine yakın olduğu ve derin haddeleme işleminin statik eğilme açısından negatif bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.3 Küresel mafsalsal statik eğilme testi sonuçları

Sertleştirilmeden Önce		Sertleştirildikten Sonra	
Akma Limiti [kN]	Maximum yük [kN]	Akma Limiti [kN]	Maximum yük [kN]
20,4	42,1	19,4	41,5
19,8	41	20,2	43,4

5.4 Küresel Mafsalsal Sertlik ve Pürüzlülük Ölçümü

Sertlik, malzemelerin aşınmaya karşı direnci, mukavemetin ve işlenebilirliğin değerlendirilmesi gibi kavramlara öncülük etmektedir. Özellikle çeliklerde malzemenin sertlik değeri ile mekanik özellikleri arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur. Sertlik değeri, çeliklerde soğuk sertleştirme ile büyük ölçüde değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Vickers sertlik ölçme yönteminde, piramit şeklindeki uç belirli bir yük altında, parçanın yüzeyine belli bir süre uygulanır ve parça yüzeyinde meydana gelen izin alanına göre değerlendirilir. Tablo 5.3’de küresel mafsalsal mili konik bölgesine sertleştirme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin sertlik değerleri görülmektedir. Derin haddeleme ile sertleştirme işleminden sonra yüzeydeki sertlik değerinin artması beklenmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere sertleştirme işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri, sertleştirme işlemi uygulanmayan numunelere göre daha yüksektir.

Tablo 5.4 Küresel mafsal sertlik ölçüm sonuçları

Sertleştirilmeden Önce	Sertleştirildikten Sonra
Sertlik [HV]	Sertlik [HV]
309	350
333	351
339	357
317	359
330	361

Otomotiv ana sanayi firmalarının kalite beklentilerinden biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğünü, işlenmiş yüzeyde meydana gelen dalgalanmalar oluşturmaktadır. Gerçek bir yüzeyin normal vektörünün yönündeki ideal formundan sapmalar ile ölçülür. Bu sapmaların büyük olduğu durumda yüzey pürüzlü, sapmaların küçük olduğu durumda ise yüzey pürüzsüz olarak kabul edilebilir. Yüzey metrolojisinde pürüzlülük tipik olarak ölçülen bir yüzeyin yüksek frekanslı, kısa dalga boylu bileşeni olarak kabul edilir. Bununla birlikte, pratikte bir yüzeyin bir amaca uygun olmasını sağlamak için genellikle hem genliği hem de frekansı bilmek gerekmektedir.

Pürüzlülük, bir nesnenin çevresi ile nasıl etkileşime gireceğini belirlemede önemli bir rol oynar. Tribolojide, pürüzlü yüzeyler genellikle daha hızlı aşınır ve pürüzsüz yüzeylerden daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Pürüzlülük, mekanik bir bileşenin performansının iyi bir göstergesidir çünkü yüzeydeki düzensizlikler, çatlaklar ya da korozyon için çekirdeklenme bölgeleri olabilir. Yüksek pürüzlülük değeri çoğu zaman istenmese de imalatla kontrol edilmesi zor ve pahalı olabilir. Örneğin, birleştirmeli yığılma modellemesi ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek zor ve pahalıdır. Bir yüzeyin pürüzlülüğünü azaltmak genellikle üretim maliyetini artırır. Bu, genellikle bir bileşenin üretim maliyeti ile uygulamadaki performansı arasında bir denge kurulmasını sağlar. Yüzey pürüzlülüğü komparatörle ölçülebilir fakat genellikle Şekil 5.5'te gösterilen profilometre kullanılmaktadır. Bunun yanında aynı pürüzlülük değerleri görünüşte çok farklı olabileceğinden yüzey bitirme blokları, tasarımcının belirli bir işlemle elde edilmesi istenen bir yüzey ile

ölçülen değerin daha iyi ilişkilendirilmesini sağlar (DeGarmo, Black and Kohser, 2003).

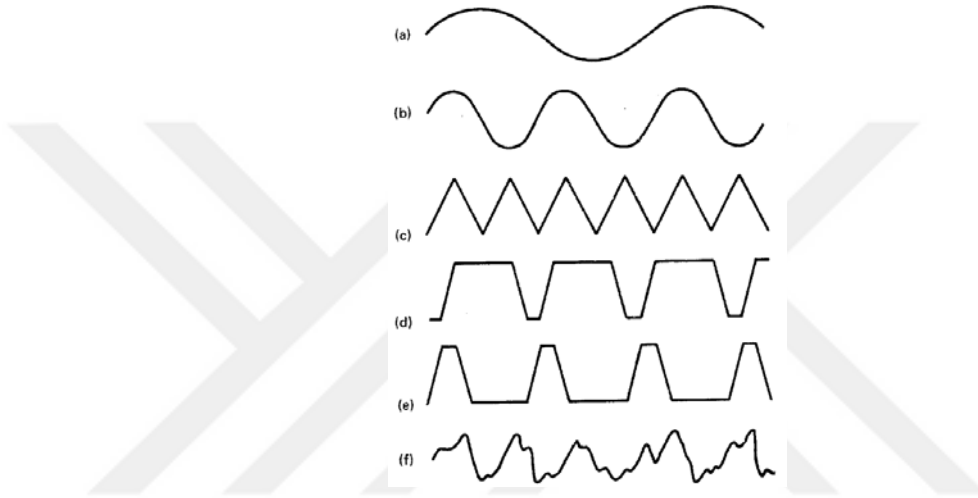


Şekil 5.5 Profilometre (Wikipedia, 2019)

Birçok yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemi vardır. Bunlardan en yaygın kullanılanlar R_a , R_z ve R_q yüzey pürüzlülük parametreleridir. Bu parametreler bir profildeki tüm bilgileri tek bir sayıya düşürdüğü için, uygulama ve yorumlamada büyük özen gösterilmelidir. Ham profil verilerinin filtrelenmesi, ortalama doğrusunun nasıl hesaplandığı ve ölçümün fiziği üzerindeki küçük değişiklikler hesaplanan parametreyi büyük ölçüde etkileyebilir. Günümüzde modern dijital ekipmanlar kullanılarak, değerleri çarpıtan bariz bir aksaklık olmadığından emin olmak için tarama yöntemi değerlendirilebilir. Pürüzlülük ifadesinde R harfi, 2 boyutlu pürüzlülük parametresini ifade eder. Yanına eklenen alt simgeler ise kullanılan formülü göstermektedir. Talaşlı imalatta yüzey pürüzlülüğü aşağıda belirtilen etkenlerden etkilenmektedir.

- Takım tezgahının rijitlik durumu
- Yataklama sisteminden kaynaklanan hatalar
- Takım tutucu rijitlik durumu
- Takım aşınması
- Malzemenin mekanik özellikleri
- Soğutma sıvısının etkileri
- Kesme parametreleri

Ra, yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. İstatistik olarak, Ra aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün y-koordinatlarının merkez hattında ortalama aritmetik sapmasını tanımlar. Ra, profil çıkıntı ve boşluk kesitleri ile ilgili olarak hassasiyet göstermez. Genellikle tek boyutlu yüzeylerin pürüzlülük ölçümünde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra Şekil 5.6’da görüldüğü gibi aynı Ra değerine sahip yüzey pürüzlülükleri farklı profillere sahip olabilmektedir (Bhushan, 2000).

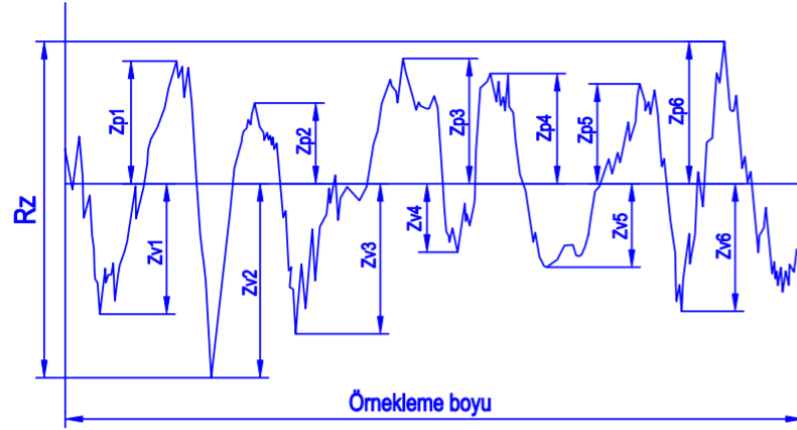


Şekil 5.6 Aynı Ra değerine sahip farklı yüzey profilleri (Bhushan, 2000)

Rq, yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının kuadratik ortalama değeridir. Yüzey profilinin y-koordinatlarının merkez hattından ortalama kuadratik sapması, profilin ordinatlarından standart sapmayı ifade ettiği için ve piklere ve vadilere daha duyarlı olduğu için Ra’dan istatistik olarak daha önemlidir. Rq ve Ra arasındaki temel farklılık, Rq parametresi ile ölçümde ara sıra yüksek ve düşük okumalar artarken Ra sadece bunların ortalamasıdır. Dolayısıyla bir profili ölçerken çıkan Rq değeri, Ra değerinden biraz daha fazla olacaktır (Wikipedia, 2019).

Bu çalışmada Şekil 5.7’de gösterilen en yüksek yüzey pürüzlülüğü Rz kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en alt noktaları arasındaki dikey mesafe, yüzey pürüzlülüğüne karşılık gelen y-koordinat aralıklarının ölçülmesi ile elde edilir. Bu yöntemde, örnekleme boyu içinde en büyük profil tepe noktası yüksekliği (Z_p) ve profilin en çukur nokta derinliği (Z_v) değerleri bir kalem yardımıyla

yüzey üzerinde işleme yönüne dik olarak ölçülür. Daha sonra Şekil 5.7’deki grafik oluşturulup ve 5 adet en yüksek ve 5 adet en alçak noktanın ortalaması alınmaktadır. Bu grafikte x eksenini örneklemeye boyunu gösterirken, y eksenini ise yüzey pürüzlülük derinliğinin dağılımını göstermektedir.



Şekil 5.7 En büyük profil yüksekliği (Anonim, 2019)

Derin haddemeleme işlemi uygulandıktan sonra küresel mafsallarda konik bölgede pürüzlülüğün azalması beklenmektedir. Pürüzlülüğün azalması ile çatlak büyümesi büyük oranda azaltılabilir ve yorulma ömrü arttırılabilmektedir. Tablo 5.4’de konik bölgeye derin haddemeleme işlemi uygulanmış numunelerin ve derin haddeme uygulanmamış numunelerin Rz pürüzlülük ölçümleri görülmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, derin haddeme işleminden sonra yüzeydeki pürüzlülük çok büyük oranda azalmış ve beklenen davranış sergilemiştir.

Tablo 5.5 Küresel mafsallarda pürüzlülük ölçüm sonuçları

Sertleştirilmeden Önce	Sertleştirildikten Sonra
Pürüzlülük [Rz]	Pürüzlülük [Rz]
9,8	0,6
9,3	0,6
9,6	0,6
9,7	0,7
9,1	0,3

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Çalışmada dövme ile çelikten malzemedan üretilmiş ve daha sonra yüzeyi kısmı işlenmiş bir rot başı mafsals milinin konik bölgesine, yorulma ömrünü ve yüzey kalitesini arttırmak için derin haddeleme ile sertleştirme işlemi yapılmıştır. Daha sonra sertleştirme işleminin etkilerini belirlemek için sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş numunelere yoruma testi, statik eğilme testi, eğilme darbe testi, sertlik ve pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yapılan test ve ölçümlerden edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yorulma testi sonucunda sertleştirme işlemi uygulanmamış numuneler, sonsuz ömür olan 2000000 çevrimde 3,5 kN kuvvete dayanabilmiştir fakat derin haddeleme ile sertleştirme işlemi uygulanmış numuneler sonsuz ömürde 5 kN kuvvete kadar dayanım sağlamıştır. Düşük çevrim bölgesindeki sonuçlar incelendiğinde ise sonuçların kıyaslanabilir olduğu görülmüştür.
- Derin haddeleme işlemi uygulanmış numunelerin pürüzlülük değerleri derin haddeleme uygulanmamış numunelerin pürüzlülük değerleri ile karşılaştırıldığında, pürüzlülüğün yaklaşık 10 kat azaldığı gözlemlenmiştir.
- Derin haddeleme ile sertleştirme işlemi uygulandıktan sonra küresel mafsals mili konik bölgesinde sertlik sonuçlarının, sertleştirilmemiş numunelere oranla daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Küresel mafsals miline statik eğilme testi uygulanmış ve her iki tip numunenin sonuçlarının birbirine yakın olduğu, sertleştirme işleminin mafsals statik eğilme yönünden negatif bir etkiye uğratmadığı görülmüştür.
- Küresel mafsals miline uygulanan darbe eğilme testi sonuçları sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş numunelerde birbirine çok yakındır ve derin haddeleme işleminin, mafsals darbe ile eğilme dayanımına negatif bir etkisi bulunmamıştır.

- Derin haddeleme işlemi, mafsal millerine uygulanan sertleştirme işlemlerinden indüksiyonla sertleştirme ve nitrasyon yöntemlerine nazaran daha az maliyetli ve pürüzlülüğü azaltan bir yöntemdir. Bir sonraki adımda derin haddeleme prosesinde, parametreler geliştirilerek daha iyi sonuçlar alınması hedeflenebilir.



KAYNAKLAR

- Akarsu, C. (2012). *Bir ticari kamyon Şasisine bağlı parçaların titreşim kaynaklı yorulma analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Akbulut, H. ve Bengü, E. (2004). İki farklı sıvı ortamda nitrülenmiş H13 çeliğin aşınma davranışı. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 1-8.
- Akdoğan Eker, A. (2008). *Çeliğin ısıt işlemleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi. 29 Mayıs 2019, http://yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme1/Celigin_isil_islemleri.pdf
- Altenberger, I. (2005). Deep rolling - the past, the present and the future. *International Conferences on Shot Peening*, 9, 144-154.
- Andrews, S. Ve Sehitoglu, H. (2000). A computer model for fatigue crack growth from rough surfaces. *International Journal of Fatigue*, 22, 619-630.
- Bannantine, J. A., Corner, J. J. ve Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Baroui, N., David, M. ve Susac, F. (2014). Study concerning the ball joint functionality of a vehicle steering system. *The Annals of "Dunarea De Jos" University of Galati Fascicle V, Technologies in Machine Building*, 2014, 1-6.
- Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook* (1. Baskı). Boca Raton: CRC Press
- Bishop, A. E. Ve Baxter, J. (1984). New rack and pinion steering design and manufacturing technology. *SAE Technical Paper Series 841199*, 1-12.
- Bostan, B. (2015). *Yüksek hız takım çeliklerinin yüksek sıcaklık aşınma dayanımına nitrasyon işleminin etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Catic, D., Krstic, B. Ve Miloradovic, D. (2009). Determination of reliability of motor vehicle steering system tie rod joint. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 15(3), 309-322.

Conle, F. A. ve Chu, C. C. (1997). Fatigue analysis and the local stress-strain approach in complex vehicular structures. *International Journal of Fatigue*, 19(1), 317-323.

DeGarmo, E. P., Black, J. T. ve Kohser, R. A. (2003). *Materials and processes in manufacturing*. New York: Wiley

Direksiyonpompa (2017). 31 Ocak 2019, <http://direksiyonpompa.com/genel/direksiyon-sistemi-nasil-calisir-cesitleri-gorevleri-nelerdir.html>

Ersolmaz, Ş. S., Karamuk, M., Şentürk, F. F., Geçgil, M. ve Atabay, O. (2012). Binek ve hafif ticari araç direksiyon ve direksiyon test sistemlerine genel bakış. 6. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 2012, 1-9.

Falah, A. H., Alfares, M. A. ve Elkholy, A. H. (2007). Failure investigation of a tie rod end of an automobile steering system. *Engineering Failure Analysis*, 14, 895-902.

Forrest, P.G. (1962). *Fatigue of metals*. Oxford: Pergamon Press

Güven, Ş. Y., Delikanlı, K. ve Öncel, E. (2014). AISI 4140 çeliğine uygulanan iyon nitrasyon yüzey sertleştirme işleminin yorulma dayanımına etkisi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 4(2), 29-39.

Güvenç, M. A., ve Botsalı, F. M. (2015). Rot başı yorulma ömrünün bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılarak tahmin edilmesi. 17. *Makine Teorisi Sempozyumu*, 2015, 1-9.

Halfpenny, A. (2001). A practical discussion on fatigue. *Environmental Engineering Society of Environmental Engineers*, 14, 21-25.

Ikechukwu, O., Aniekan, I., Ebunilo, P. O. ve Ikpe, E. (2016). Investigation of a vehicle tie rod failure in relation to the forces acting on the suspension system. *The American Journal of Engineering Research*, 5(6), 208-217.

Kahya, D. (2016). *Soğuk dövme kalıpları yüzey koşullarının kalıp ömrü/işleme maliyeti etkisi yönünden incelenerek optimize edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Karamangil, M. İ. (2007). Bir otomobil arka dingilinin sonlu elemanlar metodu ile yorulma analizi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 311-318.

Krupp, U. (2007). *Fatigue crack propagation in metals and alloys*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.

Kurachi, H., Okamoto, K., Saito, I. ve Chikuma, I. (1983). Improvements in rack and pinion steering gears. *SAE Technical Paper Series 830996*, 1-12.

Moreno, B., Zapatero, J. ve Dominguez, J. (2003). An experimental analysis of fatigue crack growth under random loading. *International Journal of Fatigue*, 25(2003), 597-608.

Oktay, E., Kılıçlı, V. ve Erdoğan, M. (2018). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde indüksiyonla yüzey sertleştirilmenin yorulma sınırı üzerindeki etkisi. *Fen Bilimleri Dergisi*, 6(3), 668-679.

Park, Y. C., Baek, S. K., Seo, B. K., Kim, J. K. ve Lee, K. H. (2014). Lightweight design of an outer tie rod for an electrical vehicle. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1-16.

- Patil, M. A., Chavan, D. S., Kavade, M. V. ve Ghorpade, U. S. (2013). FEA of tie rod of steering system of car. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, 2(3), 1-6.
- Pehlivan, M. K. ve Özsoy, M. (2014). Rot başının bilgisayar destekli yapısal çözümlemesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-7.
- Pistonpuff (2017). 17 Nisan 2019, <http://www.pistonpuff.com/what-is-a-pinion-in-a-rack-pinion-type-automotive-manual-steering-system/>
- Röttger, K., Jacobs, T. L. Ve Wilcke, G. (2005). Deep Rolling efficiently increases fatigue life. *World Tribology Congress*, 1-2.
- Sadeler, R., Şengül, A. B., Çelik, A. ve Totik, Y. (2007). AISI 1045 çeliğinin düz ve fretting yorulma davranışları üzerinde indüksiyonla sertleştirmenin etkisi. 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, 1-9.
- Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., El Mehtedi, M. ve diğer., (2016). A review on fatigue life prediction methods for metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-26.
- Seniappan, M., More, R., Bhide, S. ve Gowda, S. (2016). Optimization of commercial vehicle's steering tie rod arm design based on strain life approach. *SAE Technical Paper 2016-01-0381*, 1-6.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. Ve Fuchs, H. O. (2001). *Metal fatigue in engineering* (2. Baskı). Canada: John Wiley & Sons.
- Taş, K. (2017). *Binek araç rotunun push-out ve yorulma performansının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

Tec-science (2018). 08 Ağustos 2019, <https://www.tec-science.com/material-science/heat-treatment-steel/surface-hardening-case-hardening/>

Uludamar, E., Biçer, S. G. ve Taş, M. (2018). Sonlu elemanlar metodu kullanılarak rot üzerinde oluşan gerilmelerin hesaplanması. *Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 30-35.

Wehner, T. ve Fatemi, A. (1991). Effects of mean stress on fatigue behaviour of a hardened carbon steel. *International Journal of Fatigue*, 13(3), 241-248.

Wikipedia (2019). 15 Kasım 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_roughness.

Wong, C. C., Hartawan, A. ve Teo, W. K. (2014). Deep cold rolling of features on aero-engine components. *2nd CIPR Conference on Surface Integrity*, 13, 350-354.

Yeni, Ç. (b.t.). *Çınar Yeni Yorulma Notları*. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Zhang, H. (2011). *Building materials in civil engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.