

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AĞIR TİCARİ ARAÇLARIN CIVATALI BAĞLANTILARININ
ÖNGERİLME KAYBININ ÖNCEDEN TESPİTİ İÇİN BİR
LABORATUVAR TEST YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

VOLKAN AYIK

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AĞIR TİCARİ ARAÇLARIN CIVATALI BAĞLANTILARININ
ÖNGERİLME KAYBININ ÖNCEDEN TESPİTİ İÇİN BİR
LABORATUVAR TEST YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

VOLKAN AYIK

Dr.Öğr. Üyesi Serkan ZEREN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Ahmet ERDİL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr.Öğr. Üyesi Vedat TEMİZ
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.08.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, ağır ticari araçların civatalı bağlantılarının öngerilme kaybının önceden tespiti için bir laboratuvar test yöntemi geliştirme amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren, bana güvenen ve yüreklendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Serkan ZEREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım sırasında, beni destekleyen FORD OTOSAN ailesine teşekkür ediyorum.

Çalışmayla ilgili tüm testlerin tamamlanmasında özverili çalışma sergileyen ve fiziksel ve mental desteklerini esirgemeyen Alaattin KUVVETLİ, Celal DEMİR, İlker DALDAL, Murat YÖRÜK ve Turan GÜVEN'e teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında bilgi ve destekleriyle katkıda bulunan çalışma arkadaşım Ezgi ŞİMŞEKLİ'ye teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamda gösterdiği destek ve anlayış için sayın müdürüm Mustafa SİNAL ve sayın ekip liderim Yunus Emre BAYTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili eşim Hale Jafarova AYIK, annem Nazlı AYIK, babam Ali AYIK ve kardeşim Umut Kaan AYIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimimi yüksek lisans seviyesine taşıma motivasyonumu kaybetmemem için beni her fırsatta yüreklendiren ve bana neden devam etmem gerektiğini hatırlatan dedem Fazlı ALBAY'a da ayrıca teşekkür ediyorum.

Ağustos – 2020

Volkan AYIK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Literatür Araştırması	4
1.2. Çalışmanın Hipotezi.....	13
2. TEST CİHAZININ TANITIMI.....	15
3. TEST EDİLECEK BAĞLANTININ TANITIMI	21
4. TEST EDİLECEK BAĞLANTININ KAYMA DİRENCİNİN HESABI	23
4.1. Sıkma Momenti ve Öngerilme Kuvveti Arasındaki Bağlantı.....	23
4.2. Civatanın Sürtünme Katsayısı.....	23
4.3. Kayma Direncinin Hesaplanması ve Ölçülen Yanal Kayma Kuvveti ile Kıyaslanması.....	24
5. TEST CİHAZINDA CIVATANIN KAYMA DİRENCİ, YANAL YER DEĞİŞTİRME VE YANAL YÜK İLİŞKİLERİNİN GÖSTERİMİ.....	27
5.1. Sıkma Momenti ve Öngerilme Kuvveti Arasında Doğrusal İlişkinin Gösterimi.....	28
5.2. Öngerilme Kuvveti ve Gerinim Arasında Doğrusal İlişkinin Gösterimi.....	30
6. DENEYSEL TASARIM	33
7. ARAÇ TESTİ İLE CIVATAYA GELEN KUVVETLERİ TAYİNİ.....	39
8. “TESTED-BY-ME” YAKLAŞIMININ UYGULANMASI.....	42
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	47
EKLER.....	49
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	52
ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Cıvataya sıkma momenti uygulanması	3
Şekil 1.2.	Gömülme olayı	4
Şekil 1.3.	Çekme-basmaya çalışan cıvatalar (üstte) ve kesmeye çalışan cıvatalar (altta)	5
Şekil 1.4.	Junker'ın test cihazının şematik gösterimi	6
Şekil 1.5.	Junker'ın yaptığı test cihazı	7
Şekil 1.6.	Titreşim çarpanı ve çevrim sayısı grafiği	7
Şekil 1.7.	Cıvatalarda yapışma ve kayma durumu	8
Şekil 1.8.	Yanal yer değiştirme (S_{cr}) grafikleri	9
Şekil 1.9.	Dayanma sınırı grafiği	10
Şekil 1.10.	Cıvataların ilk montaj anındaki yüzdesel öngerilme kuvvet kaybının logaritmik skalada gösterimi	11
Şekil 2.1.	Üç boyutlu olarak tasarlanmış olan test cihazı	16
Şekil 2.2.	Test cihazının yandan görünümü	16
Şekil 2.3.	Üst plaka ile taban blok arasındaki bilyeli yataklar	17
Şekil 2.4.	Eyleyiciye bağlanmış olan test cihazı	17
Şekil 2.5.	Cıvatalı aparat	18
Şekil 2.6.	Cıvatalı aparatla taban blok arasına sıkıştırılmış olan yük hücresi	18
Şekil 2.7.	Kapalı çevrim test sisteminin şematik tarifi	19
Şekil 3.1.	Test edilen cıvata	21
Şekil 3.2.	Test edilen cıvatanın araçtaki konumu	22
Şekil 3.3.	Bağlantının kesit görünüşü	22
Şekil 4.1.	Kayma ve yapışma durumu	25
Şekil 5.1.	Yanal yer değiştirme ve yanal yük grafiği	27
Şekil 5.2.	Öngerilme yükü ve sıkma momenti grafiği	28
Şekil 5.3.	Sıkma momenti ve öngerilme kuvveti karşılıklarının doğrusallığının gösterimi	29
Şekil 5.4.	Öngerilme kuvveti-zaman ve gerinim-zaman grafikleri	30
Şekil 5.5.	Öngerilme kuvveti-test çevrimi grafiği	31
Şekil 5.6.	Gerinim-test çevrimi grafiği	31
Şekil 6.1.	Cıvatanın test edilebileceği yanal yer değiştirme aralığı	33
Şekil 6.2.	a) Teste girmemiş cıvata b) Marjinal kayma değeri 0,6 mm ile yapılan test sonrası cıvata c) 1,4 mm ile yapılan test sonrası cıvata	34
Şekil 6.3.	a) 2,2 mm ile yapılan test sonrası cıvata b) 2,4 mm ile yapılan test sonrası cıvata c) 2,6 mm ile yapılan test sonrası cıvata	35
Şekil 6.4.	Yanal yer değiştirmeye göre cıvata gevşeme çevrimleri dağılımının nokta gösterim grafiği	36
Şekil 6.5.	ANOVA analiz grafiği	37
Şekil 6.6.	Minitab yazılımında 1 mm yanal yer değiştirmede frekans parametresinin sonuçlara etkisinin incelenmesi	38
Şekil 7.1.	İçine gerinim ölçer yapılandırılmış olan test cıvatası	39
Şekil 7.2.	Cıvatanın test aracında ilgili yere bağlanması	39
Şekil 7.3.	Zaman bazında gerinim verisi	40

Şekil 7.4. Zaman bazında gerinim verisinin %47'sine daraltılmış hali.....	41
Şekil 8.1. Bağlantının kesit görünüşü.....	42



TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Test cihazında kullanılan elektronik parça ve sistemlerin detayları	19
Tablo 3.1. Test edilen cıvata özellikleri	21
Tablo 4.1. Cıvata sürtünme katsayı ölçümleri	23
Tablo 4.2. 2.1 denkleminde kullanılacak olan değerler	24
Tablo 5.1. Sıkma momenti ve öngerilme kuvveti karşılıkları	29
Tablo 6.1. Deneysel tasarım tablosu	35
Tablo 8.1. Yanal yer değiştirme-yanal yük-gerinim değeri karşılıkları	43



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ_n	: Somun yüzeyi ve bağlantının yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı
μ_t	: Cıvata ve somun dişleri arasındaki sürtünme katsayısı
A'	: Katedilen yol ve kalan yüzdesel öngerilme kuvvetine ilişkin sabit
A''	: İş çevrimi ve kalan yüzdesel öngerilme kuvvetine ilişkin sabit
B'	: Katedilen yol ve kalan yüzdesel öngerilme kuvvetine ilişkin sabit
B''	: İş çevrimi ve kalan yüzdesel öngerilme kuvvetine ilişkin sabit
C	: Sıkma momenti ve öngerilme kuvveti arasındaki oran
$C1$: Minitab'de analizi yapılan değişkene atanan değer
$C2$: Minitab'de analizi yapılan değişkene atanan değer
$C3$: Minitab'de analizi yapılan değişkene atanan değer
$C4$: Minitab'de analizi yapılan değişkene atanan değer
C_F	: F_R ve F_T arasındaki oran
F_C	: Cıvata tasarımda gelmesi beklenen yük, (N)
F_{kayma}	: Cıvatanın kaymaya başladığı yanal yük değeri, (N)
F_p	: Cıvatanın öngerilme kuvveti, (N)
F_R	: Cıvataya kullanım koşullarında gelen yük, (N)
F_T	: Cıvatayı test cihazında gevşeten yanal yük, (N)
L	: Katedilen yol, (km)
l_r	: Cıvatanın ilk temas ettiği malzemenin kalınlığı
n	: Cıvata kafa altının kayma direncine katkısı
N	: Test çevrim sayısı, (adet)
N	: Toplam gerçekleştirilen iş çevrimi, (adet)
p	: Cıvata diş adımı, (mm)
p	: İstatistiki anlamlılık değeri
R	: Kalan öngerilme kuvvetinin yüzdesel oranı, (%)
r_n	: Somun ve bağlantı yüzeyi arasındaki efektif temas yarıçapı, (mm)
r_t	: Dişlerin efektif yarıçapı, (mm)
S_{cr}	: Kritik yanal yer değiştirme, (mm)
T_{in}	: Cıvataya uygulanan sıkma momenti, (Nm)
V	: Titreşim çarpanı, (mmKgf)
W	: Yanal yer değiştirme, (mm)
β	: Dişlerin yarı açısı, (rad)
Ω	: Direnç birimi, (ohm)
$^{\circ}C$: Sıcaklık birimi, (santigrat)
M_A	: Sıkma momenti, (Nm)
M_{TP}	: Sıkma momentinin öngerilme kuvvetine harcanan kısmı, (Nm)
M_G	: Sıkma momentinin dişlerle malzeme arasındaki sürtünmeye harcanan kısmı, (Nm)
M_K	: Sıkma momentinin cıvata kafa altı ile malzeme arasındaki sürtünmeye harcanan kısmı, (Nm)

Kisaltmalar

- ANOVA : Analysis of Variance (Varyans Analizi)
DIN : Das Deutsche Institut für Normung (Normlar için Alman Enstitüsü)
ISO : International Standard Organization (Uluslararası Standart Org.)
NASM : National Aerospace Standards (Ulusal Havacılık Standartları)



AĞIR TİCARİ ARAÇLARIN CIVATALI BAĞLANTILARININ ÖNGERİLME KAYBININ ÖNCEDEN TESPİTİ İÇİN BİR LABORATUVAR TEST YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Sıkma momentinin kaybının bir sonucu olarak civataların gevşemesi, bağlanan parçaların aralarındaki bağlantının kaybolması ile sonuçlanabilen ve çok sık karşılaşılan problemlerden biridir. Bunun temel nedenlerinden birisi, araç hareket ederken, bağlantıların maruz kaldığı dinamik yüklerdir. Özellikle, titreşim kaynaklı yükler, herhangi bir boyut ve geometrideki bağlantıyı gevşetebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, halihazırda karşılaştırmalı testlerde kullanılan ve Junker test cihazı olarak da adlandırılan yanal yüklemeli test cihazını kullanarak ve geliştirerek civatalı bağlantıların araç kullanım ömrünü kapsayacak mutlak bir test metodu geliştirmektir.

Bu amaçla, DIN 25201 standardına uygun olarak yanal yüklemeli test uygulama cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Eyleyici olarak, servo-hidrolik ekipmanlar ve algılayıcı olarak da yük hücresi, uzama ölçer ve gerinim ölçerle donatılmış olan bu cihaz üzerinde, deneysel tasarım ile oluşturulmuş testler yapılarak literatür ile paralel sonuçlar verdiği, Minitab yazılımında istatistik analizler yapılarak gözlemlenmiştir. Ardından, ağır ticari araç üzerinden bir civatalı bağlantı seçilerek, bu bağlantının teorik hesapları yapılmış ve test aracı üzerine monte edilip test pistinden civata üzerine gelen dinamik gerinim verileri toplanmış ve bu veriler Ncode yazılımı yardımıyla işlenmiştir. Bu veriler, teorik hesaplar yardımıyla analiz edildikten sonra, bu verilerin civata üzerinde oluşturduğu mekanik zorlanmanın benzerini oluşturacak bir test çevrimi önerilmiş ve bu çevrimle civatalı bağlantı test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Civatalı Bağlantılar, Civata Gevşemesi, Kendiliğinden Gevşeme, Junker Testi, Öngerilme Kaybı.

A LABORATORY TEST METHOD TO PREDICT PRELOAD LOSS OF BOLTED CONNECTIONS IN HEAVY COMMERCIAL VEHICLES

ABSTRACT

Loosening of the bolts as a result of the tightening torque loss is a common problem that can result in the loss of the connection between the connected parts. One of the main reasons for this is the dynamic loads to which the connections are exposed when the vehicle is moving. Especially, loads caused by vibration can loosen the connection of any size and geometry. The aim of this study is to develop an absolute test method that will cover the service life of the bolted joints by using and developing the transverse load test device, also called Junker's test device, which is already used in comparative tests.

For this purpose, a lateral loading test application device was designed and manufactured in accordance with DIN 25201 standard. It has been observed by using statistical tools in Minitab software that it has been carried out with experimental design tests are aligned with the literature. The device was equipped with servo-hydraulic equipment as actuator and load cell, extensometer and strain gauge as sensors. Then, by selecting a bolted connection on the heavy commercial vehicle, the theoretical calculations of this connection were made and dynamic strain data from the test track on the test vehicle was collected and processed with the help of Ncode software. After these data were analyzed with the help of theoretical calculations, a test cycle was proposed that would simulate the mechanical forcing of this data on the bolt and the bolted connection was tested with this test cycle.

Keywords: Bolted Joints, Bolt Loosening, Self Loosening, Junker's Test, Preload Loss.

GİRİŞ

Cıvatalı bağlantıların kendiliğinden gevşeme problemi, kullanıldığı tüm makine, araç vb. sistemlerde yüksek risk içermekte ve maliyetli sonuçlara yol açabilmektedir. Bu problemin ortadan kaldırılması adına önlemler tariflenmiş ve ürünler tasarlanmıştır. Cıvatanın metrik, sınıf vb. özellikleri ile sıkma moment değerleri değiştirilerek kilitli somun ve pullar kullanarak ve bağlantının tasarımı değiştirilerek kendiliğinden gevşemenin önüne geçilebilmektedir. Diğer taraftan kronik olarak devam eden problemlerin çözümünü tüm bu çözüm önerileri arasında bulmak her zaman mümkün ve kolay olmamaktadır.

Kendiliğinden gevşeme problemine sunulacak olan çözümlerin test aracına veya müşteri aracına uygulanmadan önce hızlı, pratik ve güvenilir olarak test edilmesi bir ihtiyaçtır. Bu kapsamda, laboratuvar ortamında kıyaslamalı sonuçlar veren testler tariflenmiş, standarda bağlanmış ve endüstride yaygın olarak uygulanmaktadır [1,2,3]. Ancak bu testleri başarı ile geçen bir cıvatalı bağlantı için bir diğerinden iyidir denebilmekle birlikte, müşteri koşulları için yeterince iyidir ve kendiliğinden gevşeme, tüm ömrü boyunca görülmeyecektir denememektedir. Bu noktada, cıvatalı bağlantının karşılaması gereken bir kriter olduğunu ve bunu sağladığında müşteri koşullarını sağlayacağını ve testin mutlak bir test olarak değerlendirilebileceğini ifade eden bir çalışma da yapılmıştır [4]. Ancak bu kriterin nasıl ölçümleneceği ve ortaya konulacağı konusunda yönlendirme yapılmamıştır.

Bu çalışma kapsamında; Bölüm 1’de giriş bölümü, Bölüm 2’de literatür araştırmasını içeren genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te DIN 25201’e uygun olarak tasarlanan ve üretilen yanal yüklemeli test cihazı tanıtılmıştır. Bölüm 4’te test edilen bağlantının detayları anlatılmıştır. Bölüm 5’te test edilen bağlantının kayma direnci hesaplanmıştır. Bölüm 6’da test cihazında kayma direnci, yanal yer değiştirme ve yanal yük arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bölüm 7’de bu cihazla tasarlanan ve gerçekleştirilen deneysel tasarım testleri anlatılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bölüm 8’de seçilen cıvatalı bağlantıya gelen yanal kuvvetlerin araç testi ile nasıl

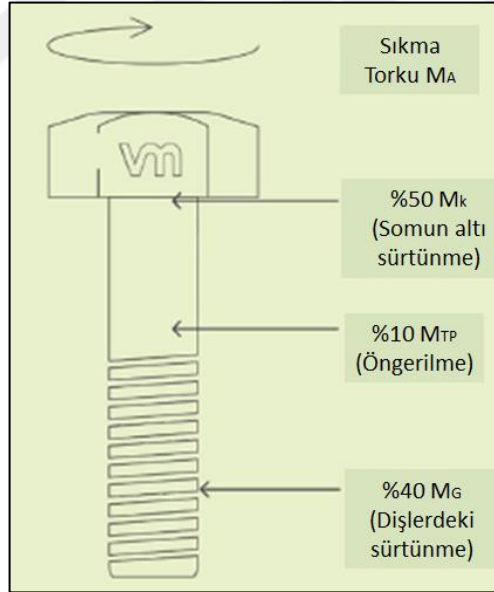
tain edildiği anlatılmıştır. Bölüm 9’da “tested-by-me” yaklaşımından faydalanarak araç testinden ve teorik hesaptan alınan girdilerle, mutlak bir cıvatalı bağlantı test yöntemi tariflenmiştir. Bölüm 10’da ise, çalışmanın sonuçları ve nerileri paylaşılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, kıyaslamalı olarak yapılan cıvata gevşeme testlerinin mutlak bir test olarak yapılabilmesi için bir yöntem geliştirmektir. Bu yöntem ile cıvatalı bağlantılarda görülebilecek olası öngerilme kayıplarının önceden tespiti amaçlanmaktadır.



1.GENEL BİLGİLER

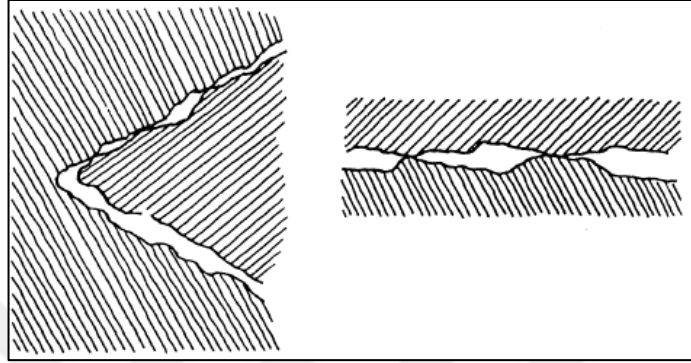
Cıvatalı bir bağlantının gevşemesi ve bağlantıyı sağlayamaz hale gelmesi için öngerilme kuvvetini kaybetmesi gerekmektedir. Öngerilme kuvveti ise, cıvatanın bir el aleti ile sıkılması sonucunda cıvata üzerinde oluşan gerilmedir. Bu gerilme sayesinde, sıkıştırılan parçalar bir arada durmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, cıvata sıkılırken oluşan momentin (M_A) yaklaşık olarak sadece %10'u öngerilme kuvvetine dönüşmektedir. Geriye kalan kısmı büyük oranda malzeme ile cıvata dişleri ve malzeme ile somun altı arasındaki sürtünmeyi yenmeye gitmektedir. Şekilde cıvatanın sıkma momentinin öngerilme kuvvetine dönüşen kısmı M_{TP} ile gösterilmiştir. M_k ve M_G ise sırasıyla, somun altı ve cıvata dişleri ile malzeme arasına harcanan momenttir [1, 4].



Şekil 1.1. Cıvataya sıkma momenti uygulanması [4]

Cıvatalar, somunlar ve sıkılarak birleştirilen parçalar mükemmel derecede düz ve pürüzsüz yüzeyler değildir. Mikroskop altında bakıldığında, Şekil 1.2'deki gibi tepeler ve çukurlar görülecektir. Cıvataya sıkma momenti uygulandığında ilk önce bu

bölgeler temas eder ve bu bölgelerde yüksek bir gerilme oluşturur. Bu gerilme tepe ve çukurların ezilerek plastik deformasyona uğramasına yol açar. Bu deformasyon sonucunda dişlerin tüm yüzeyi artık malzeme ile örtülmüş olur ve daha fazla plastik deformasyon ve malzemede akma gözlenmez. Bu olaya gömülme (embedment) denir [1].

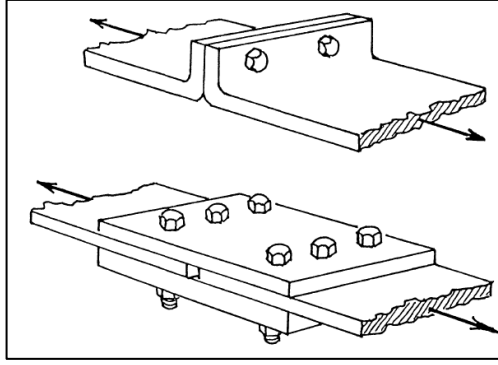


Şekil 1.2. Gömülme Olayı [1]

Sürtünmeler ve gömülme olayındaki kayıpların ardından, belirli bir öngerilme kuvveti ile bağlantı sağlanmış olur. Bağlantı, sıkma momenti uygulandığında fiziksel olarak sağlam ve dayanıklı gözüküyor olsa da, zamanla dış etkenlerin etkisiyle kendiliğinden gevşemeye uğrayabilir.

1.1. Literatür Araştırması

Üzerlerinde oluşan mekanik zorlamaya göre cıvatalar iki grupta sınıflandırılabilir. Çekme-basmaya ve kesmeye çalışan tipte olacak şekilde ikiye ayrılır. Çekme-basmaya çalışan bağlantılarda cıvataya aksenal yükleme gelir (Şekil 1.3). Cıvatalı bağlantı birleştirilen parçalar arasında kuvvet oluşturma ve bunun devamlılığını sağlama amaçlı bir mekanizmadır. Cıvatanın davranış ve ömrü, ön gerilme kuvvetinin büyüklüğü ve sürekliliği (stability) ile ilgilidir. Kesmeye zorlanan bağlantılarda, cıvata kayma ve parçaları birbirinden ayırmaya zorlayan kuvvetlere karşı çalışır. Bu kayma, parçalar arasındaki sürtünme ile engellenir. Cıvata, birleştirilen parçalar arasında kuvvet oluşturma ve bunun devamlılığını sağlama amaçlı bir mekanizmadır denebilir ve bu devamlılık, cıvatalarda montaj sırasında depolanan potansiyel enerji ile ilintilidir [1].



Şekil 1.3. Çekme-basmaya çalışan cıvatalar (üstte) ve kesmeye çalışan cıvatalar (altta) [1]

Bu potansiyel enerjiyi yaratmak ve parçaları birleştirecek kuvveti oluşturmak için cıvataya sıkma momenti uygulanır. Cıvataya uygulanan moment ile cıvatanın öngerilmesi arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilir. Bu ilişki matematiksel formda Denklem 1.1'deki gibi gösterilebilir [1] ;

$$T_{in} = F_p \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1.1)$$

Burada,

T_{in} = Cıvataya uygulanan moment

F_p = Cıvatanın öngerilmesi

P = Cıvata diş adımı

μ_t = Cıvata ve somun dişleri arasındaki sürtünme katsayısı

r_t = Dişlerin efektif temas yarı çapı

β = Dişlerin yarı-açısı

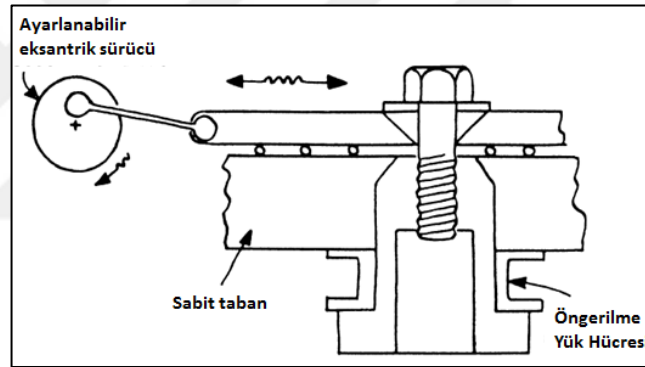
μ_n = Somun yüzeyi ve bağlantının üst yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı

r_n = Somun ve bağlantı yüzeyi arasındaki efektif temas yarı çapını ifade eder [5].

Bir cıvatalı bağlantı, genellikle kırılarak ya da kendiliğinden gevşeyerek hasara uğramaktadır. Kendiliğinden gevşemenin nedenleri, cıvatanın ileri-geri kaymasına yol açabilecek titreşim ve diğer çevrimsel kayma yönünde yüklemeler olarak sıralanmaktadır [1].

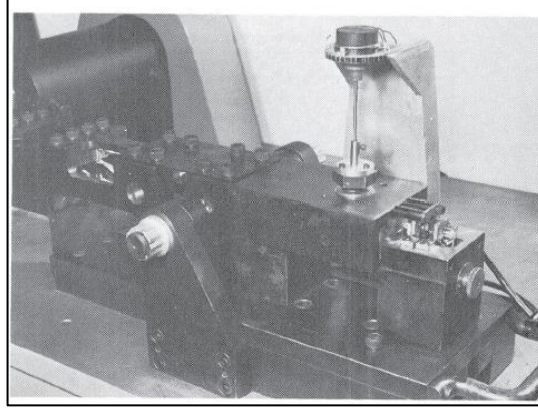
Cıvataların aksel dinamik ve aksel şok yükleri ile zorlandığı pek çok test yöntemi geliştirilmiştir. Ancak, bu testlerden farklı olarak Junker'ın geliştirdiği dinamik yüklerin cıvata akseline dik yönde uygulandığı test yöntemi, en iyi sonuçları vermekte, çok sayıda atıf olarak literatürde kabul görmektedir. Cıvatanın akseni doğrultusunda gelen zorlayıcı bir dinamik yük, uzun bir süre sonunda cıvatanın öngerilme kuvvetinin %30-40'ının kaybolmasına yol açabilir ancak, genellikle cıvatanın öngerilme kuvvetinin tamamen kaybolmasına yol açmaz. Buna karşın, cıvatanın akseline dik olarak gelen zorlayıcı bir yanal yük, genellikle tüm öngerilme kuvvetinin kaybına yol açar [1].

Başka bir çalışmaya göre ise, aksel yük cıvatalı bağlantıyı gevşetebileceği gibi bazı durumlarda sıkabilmektedir. Dişlerin periyodik hareketi, cıvatanın gevşemesi için yenilmesi gereken sürtünmeyi artırabilmektedir [6].



Şekil 1.4. Junker'ın test cihazının şematik gösterimi [1]

Junker'ın yöntemini bir test cihazı üzerinde tarif etmek gerekirse, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi bir eksantrik sürücü cıvatanın bağlı olduğu üst plakaya titreşim veriyorken, cıvatanın dişlerinin bağlı olduğu alt plaka sabit durmaktadır. Cıvatanın iki plakayı bir arada tutmak için oluşturduğu öngerilme kuvveti (preload), en altta bir yük hücresi (load cell) ile ölçülmektedir. Plakaların birbirinin üstünde kayabilmesi için aralarında bilyeler kullanılmıştır. Cihazda ek olarak, cıvata belli bir sıkma momenti değerine sıkıldıktan sonra, cıvata kafasının dönmesini de tespit etmek üzere bir potansiyometre de bulunmaktadır [1].

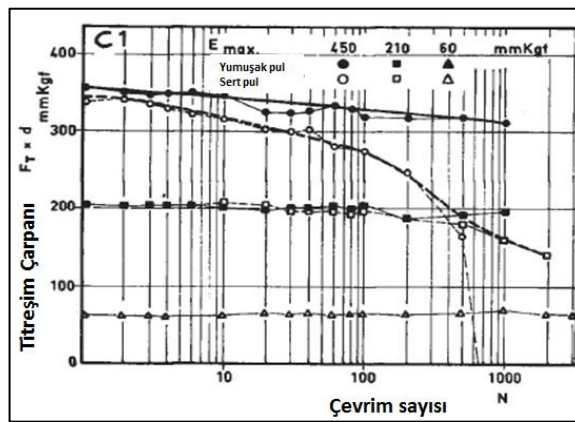


Şekil 1.5. Junker'in yaptığı test cihazı [2]

Junker [2], Şekil 1.5'te görülen bu cihazda yanal yer değiştirmeleri (transverse displacement), yanal yükleri (transverse load) ve frekansları değiştirerek, cıvataların kaç çevrimde ne kadar öngerilme kuvveti kaybettiklerini incelemiş ve sıkma momenti kayıplarını gözlemlemiştir.

Yaptığı çalışmalarda yanal yer değiştirme ve yanal yükü çarparak, titreşim çarpanı (vibration product) diye bir büyüklük tanımlamış ve titreşim çarpanı büyüdükçe cıvataların daha erken çevrimlerde çözüldüğünü gözlemlemiştir. Test frekansını ise etkisiz bir değişken olarak bulmuştur [2].

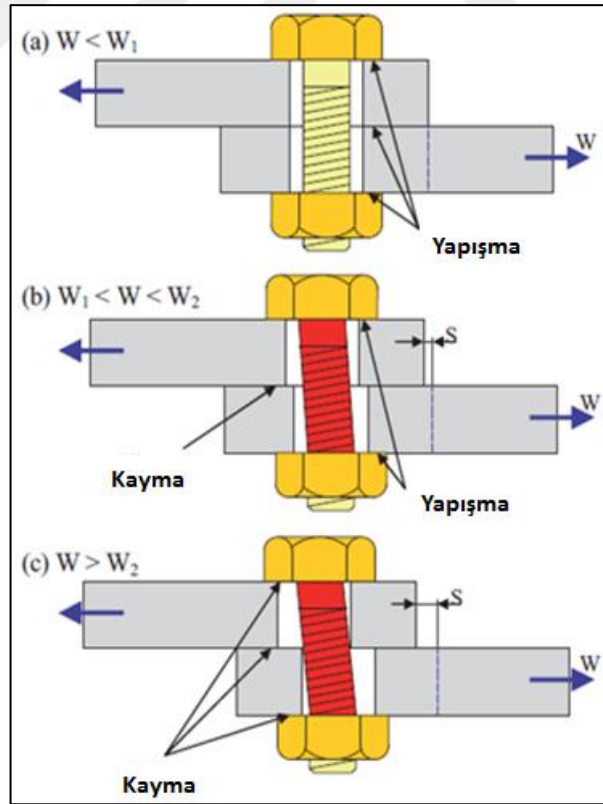
Testler sonucunda bulduğu grafikleri ise, yorulma teorisinde kullanılan Wöhler eğrilerine dayanan S-N eğrilerine benzetmiş ve bunları V-N (Titreşim çarpanı-Çevrim sayısı) eğrileri olarak isimlendirmiştir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Titreşim çarpanı ve çevrim sayısı grafiği [2]

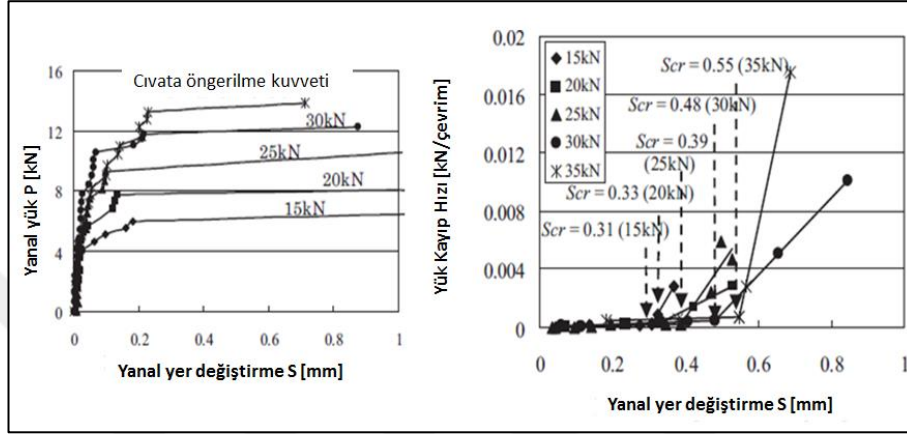
Junker'in çalışmalarına dayanarak DIN 25201 standardı geliştirilmiştir. Bu standart, bağlantının temel testi ve doğrulama testlerini içermektedir. Güvensiz bağlantının 300 ± 100 çevrimde tamamıyla gevşetileceği bir etkili yer değiştirme (effective displacement) değerinin tespit edildiği temel test üç kez uygulandıktan sonra (belli bir yer değiştirme değerinin altında cıvata gevşemeyecektir); aynı yer değiştirme ile güvenli olup olmadığı test edilmek istenen bağlantının 2000 çevrime kadar, öngerilme kuvvetinin %80'inden fazlasını muhafaza ediyor olması beklenir. 12,5 Hz frekansla test uygulanabilmekte ancak bu değer test cihazının doğal frekansı ile çakışıyor ise bu değerle test yapılmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Test esnasında öngerilme kuvveti, yanal yer değiştirme ve test çevrimi parametreleri ölçülür [3].

Hattori, T. ve diğerleri [7], yanal yüklemeye dayalı bu test metodunda seçilecek olan yer değiştirme değerinin bir üst sınırı olması gerektiğini belirtmiş ve bunu da kritik yanal yer değiştirme (S_{cr}) olarak tanımlamışlardır. Eğer S_{cr} değeri aşılsa, cıvatanın gevşemesi yerine yorulma kaynaklı bir kırılma olacağı belirtilmiştir.



Şekil 1.7. Cıvatalarda yapışma ve kayma durumu [7]

Şekil 1.7’de, W harfi cıvatalı bağlantıya gelen yanal yer değiştirmeyi ifade etmektedir. (a) durumunda cıvatanın gevşemeyeceği ve cıvatanın yapışma durumunda olduğu gösterilmiştir (stick condition), (b) durumunda gevşeme olacaktır ve plakalar arasında kayma durumu başlamıştır (slip condition). Ancak (c) durumunda ise, artık cıvata S_{cr} değerinin üzerinde bir yanal yer değiştirmeye maruz kalmaktadır ve yorularak kırılacaktır (slip condition).

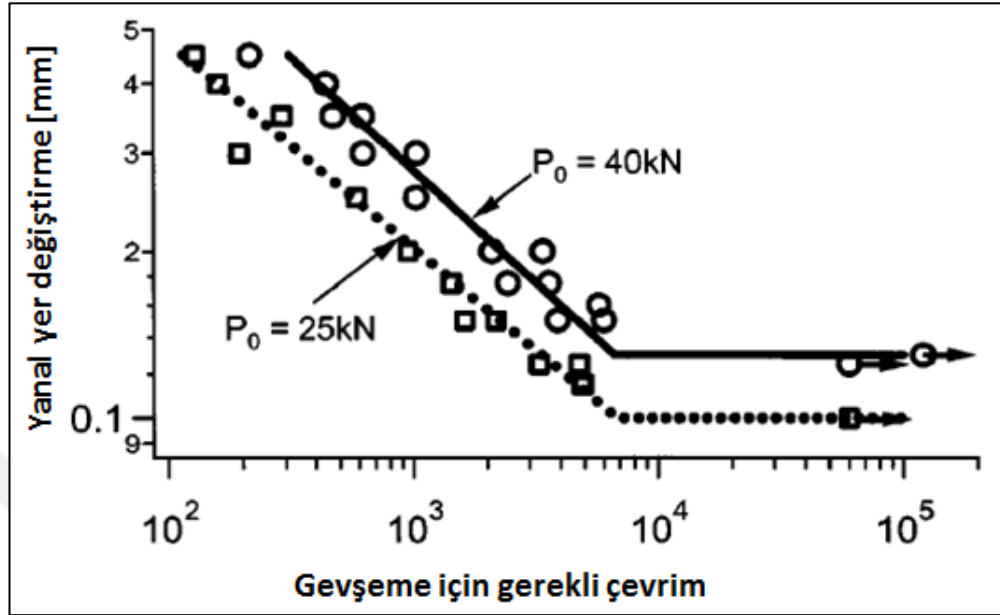


Şekil 1.8. Yanal yer değiştirme (S_{cr}) grafikleri [7]

Şekil 1.8’de, değişik öngerilme kuvvetleri verilmiş olan cıvataların artan yanal yer değiştirmeler karşısında, öngerilme kuvvetlerini kaybetme hızları kıyaslanmıştır. S_{cr} değerlerinde kırılma ve/veya ani öngerilme kaybı görülür. Şekil 2.6’da soldaki grafikte dikey eksen yanal yükü ve yatay eksen yanal yer değiştirmeyi gösterir. Grafikte eğrilerin üzerindeki rakamlar ise, cıvataların öngerilme kuvvetlerini göstermektedir. Cıvataların öngerilme kuvveti arttıkça, kaymadan dayanabilecekleri yanal yer değiştirme ve yanal yük değerleri artmaktadır. Şekil 2.6’da sağdaki grafikte ise, yatay eksen yanal yer değiştirme ve dikey eksen cıvatanın öngerilme kuvvetini kaybetme hızıdır. Bu grafikte, S_{cr} değerlerinin yanında parantez içinde cıvataların öngerilme kuvvetleri de yazmaktadır. Soldaki grafikte yapılan çıkarım burada da yapılabilir. Cıvataların öngerilme kuvveti arttıkça, kaymadan dayanabilecekleri yanal yer değiştirme ve yanal yük değerleri artmaktadır [7].

Cıvataların birleştirdiği plakalar arasında bilyeler olmayan ve yataydaki yer değiştirmeyi daha hassas kontrol eden cihazlar geliştirilip bunlarda da testler uygulanmıştır. Bu çalışmaların bulgularında, cıvataya yanal yönde uygulanan yer değiştirme ile test çevirimi eğrilerini S-N eğrilerine benzetilip bir dayanma sınırı

(endurance limit) yaklaşımı geliştirilmiştir. Ek olarak, cıvatanın sıkıldığı öngerilme kuvveti arttıkça, cıvatanın gevşemeye karşı direncinin arttığı gösterilmiştir [8].



Şekil 1.9. Dayanma sınırı grafiği [8]

Şekil 1.9'da, yatay eksen test çevrim sayısını, dikey eksen ise yanal yer değiştirme değerini göstermektedir. İki farklı eğride ise, iki farklı öngerilme kuvveti durumu verilmiştir. Cıvatalar belirli bir yanal yer değiştirme değerinin altında artık gevşememektedir. Diğer taraftan, öngerilme kuvveti daha yüksek olan cıvatalar için bu belirli yanal yer değiştirme değeri daha yüksek olmaktadır [8].

Hareyama, S. ve diğerleri [8,9], cıvatalı bağlantıların öngerilme kuvvetindeki kaybı, ürün geliştirme testleri esnasında yapılan ölçümleri çalışmada belirtilen bir regresyon denklemi ile analiz ederek cıvatalı bağlantının tüm kullanım ömrü boyunca uğrayacağı öngerilme kuvveti kaybını öngörebilmiştir. Bu yöntem ile cıvatanın öngerilme kuvvetinin sürdürülebilmesi mutlak (absolute) bir şekilde öngörülebilmektedir. Gevşeme hasarı (loosening damage) tanımını kullanarak öngerilme kuvvetindeki toplam kaybı tanımlamışlardır.

Bir iş makinesinin tekerlek göbeğine bağlı saplama tipinde bir cıvatanın dört noktasından rozet ve tek eksenli gerinim ölçerlerle gerinim verisi toplanmış ve bu gerinim verisinden yola çıkılarak, saplamaya gelen eksenel, eğilme ve burulma tipinde gerilmeler ayrı ayrı hesaplanmıştır. S-N eğrisi üzerinde gösterim yapılarak

bağlantı için ömür öngörüsünde bulunulmuştur. Bu araştırmalar, gerçek yükler ile sistematik bir ölçüm ve analiz metodu olmamakla birlikte bu alana katkı sunmuştur [9].

İş makinesinde yapılan ölçümlerde, civatanın öngerilme kuvvet kaybı ile servis süresi log-log skalada incelendiğinde, doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bu birkaç saatlik geliştirme testi ile 1 aydan 6 aya kadar süren ölçümlerde benzer eğimde grafikler gözlemlenmiştir [9].

Şekil 1.10'da görüldüğü gibi, müşterinin kullanım sahasında, iş makinesi üzerindeki bir bağlantıdan civata içi gerinim ölçer ile 4 gün boyunca toplam 86,5 saatlik bir veri toplanmıştır. Bu veriden yola çıkılarak civatalı bağlantının ömrü boyunca ne kadarlık bir gevşemeye uğrayacağı, kullanım koşulları ve süresine göre L-N (gevşeme-çevrim sayısı) eğrisinin eğiminde bir yaklaşımla öngörülmüştür [9].

$$\log R=A'+B' \times \log L \quad (1.2)$$

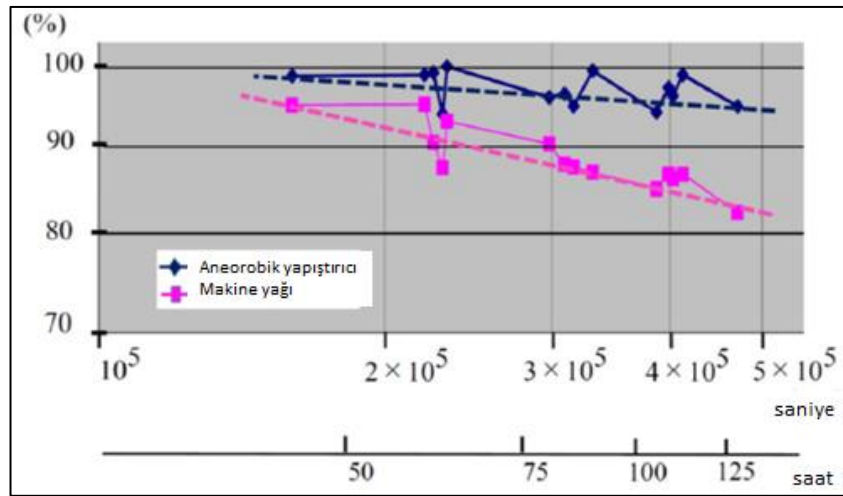
$$\log R=A''+B'' \times \log N \quad (1.3)$$

L: Katedilen yol (km)

N: Toplam gerçekleştirilen iş çevrimi (adet)

R: Kalan öngerilme kuvvetinin yüzdesel oranı

A', B', A'', B'': Sabitler



Şekil 1.10. Cıvataların ilk montaj anındaki yüzdesel öngerilme kuvvet kaybının logaritmik skalada gösterimi [4]

Ayrıca Hareyama, S. ve diğeri [4] , yaptığı detaylı literatür araştırması sonucunda bugüne kadar yapılan çalışmalarda, bağlantı elemanlarının laboratuvar ortamında niteliksel olarak kıyaslanması ile gevşeme engelleyici bağlantı parçalarının performansının niceliksel olarak karşılaştırılmasının yapıldığını ancak bunların belirli bir süre zarfı boyunca, başlangıçtaki bağlantı performanslarını sürdürüp sürdüremeyeceklerini öngörebilecek mutlak değerlendirme yöntemleri olmadıklarını ifade etmiştir.

Pichoff, F., M. Kummel ve M. Schiff, [4], var olan test standartlarını inceleyerek bağlantıların kullanım koşullarını kapsayan bir test metodolojisi geliştirmek için yalın bir yöntem geliştirmeyi tariflemiştir. Bu çalışma kapsamında, DIN 25201-4 B, ISO 16130 ve NASM 1312-7 test standartlarını ayrıntılı olarak incelenmiş ve önerdikleri "tested-by-me" yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır.

Bir cıvatalı bağlantıya etki eden yanal kuvvet, bağlantının sürtünme direncinden daha yüksekse, dişler arasında ve somun altı yüzeyinde göreceli hareket başlar. Bu hareketin tekrarlı olması durumunda cıvata gevşeyebilir. "Tested-by-me" yaklaşımı, cıvatalı bağlantının test riginde, aynı araçta olduğu malzeme, ölçüler ve yüzey özellikleri ile ortaya çıkarılması ve bu yapının sürtünme katsayısını yenecek ve göreceli hareketi ve dönel kendinden gevşemeyi başlatacak bir yanal yer değiştirme ve kuvvetine ulaşana kadar bu parametrelerin (yanal yer değiştirme ve kuvvet) artırılarak test edilmesini içermektedir. Bu ulaşılan belirli ve cıvata gevşemesini başlatan yanal yer değiştirme ve kuvvet değerine, marjinal kayma değeri (marginal slip) denmektedir. Bu değer altında bir yanal yer değiştirmeyle test edilen cıvatanın gevşememesi beklenir [4].

Bu yaklaşımda, cıvatalı bağlantının testte, uygulamadaki montaj haliyle birebir oluşturulması ve 2.4 denkleminde görüldüğü gibi, gevşetecek olan yanal yükün (F_T) tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bu aşamadan sonra, uygulamada (araçta, herhangi bir makinede veya yapıda) cıvataya gelen yükler (F_R) ile cıvata test cihazında gevşeten yanal yük (F_T) arasında bir düzeltici katsayı (C_F) ile bağlantı kurulmalıdır [4] ;

$$F_R = F_T \times C_F \quad (1.4)$$

Denklem 2.5'te görüldüğü gibi, parçanın tasarımında parçaya geleceği öngörülen kuvvet (F_C) değerinden daha büyük olacak şekilde bir F_R bulunduğu takdirde, cıvata F_R değeri ile doğrulanabilir. Diğer bir ifadeyle, eğer cıvatanın testleri bu F_R değeri ile yapılırsa ve cıvata gevşemezse, uygulama sırasında da cıvatanın gevşememesi beklenir.

$$F_R > F_C \quad (1.5)$$

1.2. Çalışmanın Hipotezi

Endüstride yaygın bir kullanımı olan yanal yüklemeli test cihazları (Junker test cihazı olarak da isimlendirilmektedir) cıvatalar arasında kıyaslamalı sonuçlar vermekte ve gevşeme önleyici parçaların etkinliğinin gösterilmesinde kullanılmaktadır. Ancak bu testlerden gevşemeden geçen bir bağlantı tipi için, gevşeyene göre daha iyidir denebilmekle birlikte, bu bağlantı tipinin bağlantısını sağlayacağı araç/makine/sistem için yeterince iyi olup olmadığının cevabı verilememektedir. Bu bağlamda, mutlak bir test yöntemi ile cıvatalı bağlantının test cihazında, uygulama ve müşteri kullanım koşullarının benzetilebilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, araçtan cıvata içinden toplanan gerinim verileri kullanılarak bir test çevrimi oluşturulması ve bu bağlantının laboratuvarında yanal yüklemeli test cihazında, bu çevrimler kullanılarak mutlak olarak test edilmesidir.

İş makineleri üzerinden toplanan verilerden, birkaç saatlik gerinim kaybını logaritmik skalada inceleyerek 1 aydan 6 aya kadar cıvataların kalan öngerilme kuvvetleri hakkında öngörüde bulunan çalışmalar vardır. Bu çalışmalar, müşterinin kullanım verisini kullanmaktadır. Bu açıdan kıyaslamadan öte, mutlak bir doğrulama yöntemi geliştirilmesine katkı sunmuşlardır. Ancak bu çalışmaların yapılabilmesi için bir test aracı ve bir test pisti gerekmektedir. Laboratuvar koşullarında yapılan uygulamalar değildir [9] [10].

Cıvataların yanal yüklemeli bir test cihazında kıyaslamalı olarak test edilmesinin ötesine geçecek şekilde, cıvatalara test cihazında gelen kuvvetlerin ölçülerek, bunların cıvataya uygulamada (araçta, makinede vb.) gelen kuvvetlerden yüksek olması durumunda, cıvatanın bu yanal yük değerleriyle doğrulanabileceğini ifade

eden bir çalışma da mevcuttur [4]. Ancak bu çalışmada da, uygulamada gelen yanal yüklerin nasıl tayin edilebileceği açıklanmamıştır. Bunun için bilgisayar benzetimleri, teorik hesaplar veya tecrübeye dayalı çıkarımlar kullanılabilir.

Bu tez kapsamında, standartlara uygun olarak üretilen ve tutarlı test sonuçları verdiği emin olunan bir test cihazında, seçilen bir bağlantı tipi için gevşeten yanal yük değeri tespit edilip bu değerin teorik hesapla tutarlılığı incelendi. Devamında ise, bu bağlantıya araçta gelen yükler, bir araç testi yapılarak ölçümlendi ve bu ölçümler ile ilgili bağlantının hangi yanal yüklerle test edilirse doğrulanabileceği tariflendi.



2. TEST CİHAZININ TANITIMI

Çalışma kapsamında, ilk aşamada, DIN 25201 standardında belirtilen testlerin yapılabilmesini sağlayabilecek özelliklerde bir test cihazı tasarlandı ve imal edildi.

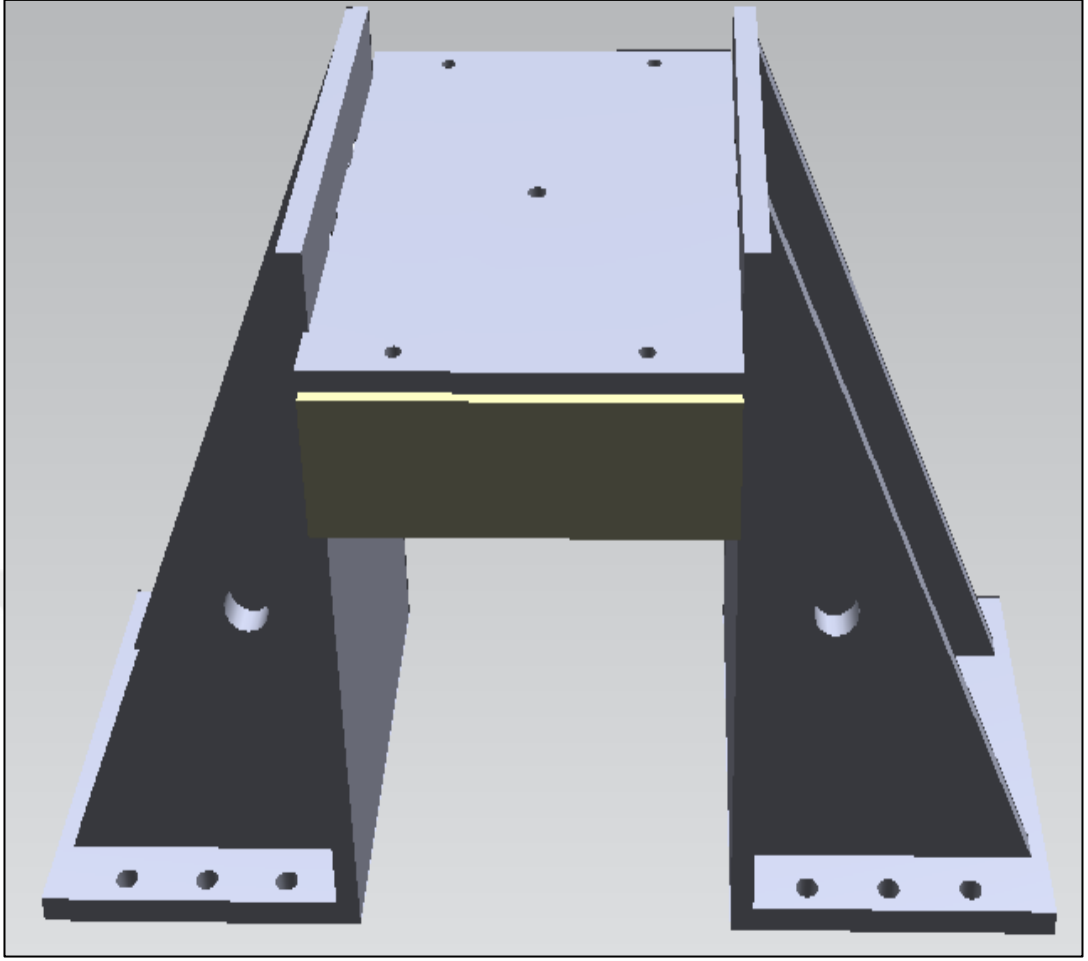
Bu cihaz, cıvatanın dış boyu için yeterli olacak biçimde ve kalınlıkta bir taban blok üstüne test edilecek cıvatanın bağlandığı ve test esnasında eyleyiciden tahrik edilen ve bu sayede yanal hareketi test edilen cıvataya aktaran üst plaka diye isimlendirilen bir parçadan oluşmaktadır (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2).

Taban blok, test alanına fikstürlerle rijit olarak sabitlenirken, üst plakaya yüksek basınçla çalışan, servo-valfler ile hassas kontrol edilebilen ve üzerindeki uzama ölçer ve yük hücresi ile kapalı çevrim çalışabilen bir hidrolik eyleyici bağlanmaktadır (Şekil 2.3 ve Şekil 2.4). Hidrolik eyleyici, üst plakaya hareket vererek üst plakanın taban blok üzerindeki bilyeler üzerinde kaymasını sağlar ve bu göreceli hareket somun altındaki yüzeyin de hareketi ile gevşemesine yol açar.

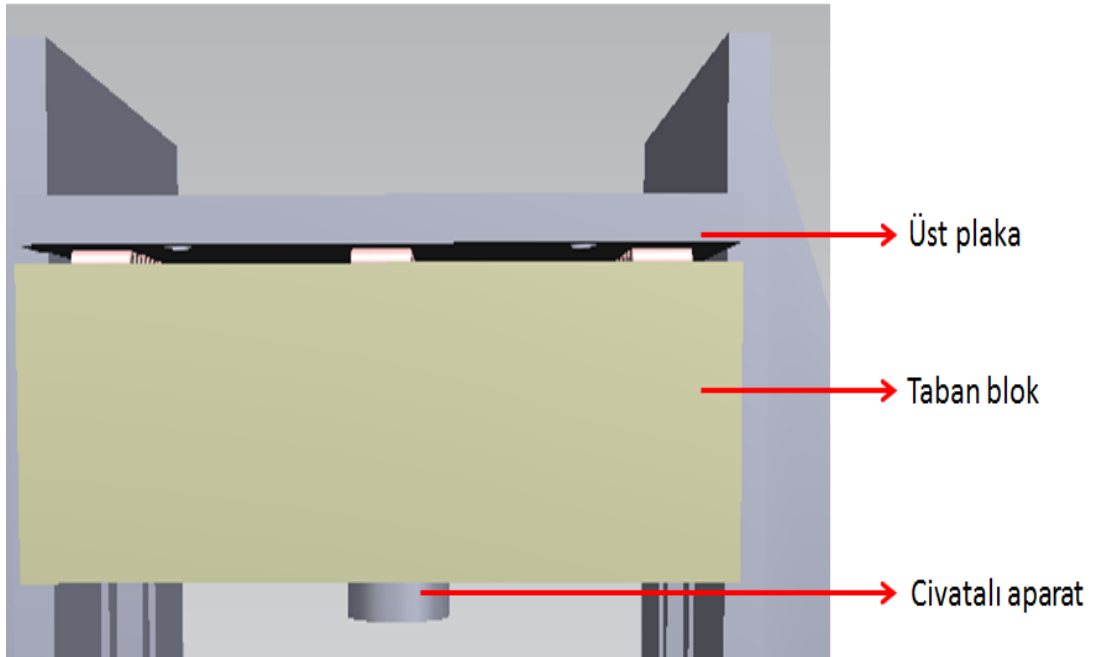
Bu yapının içerisinde, test edilecek cıvatanın içine monte edilebildiği ve alt kısmındaki yük hücresi ile cıvatanın öngerilmesinin ölçülebildiği bir aparat bulunmaktadır (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6).

Bu esnada, hem cıvatanın öngerilmesi hem yanal yük hem de yanal yöndeki yer değiştirme miktarı gerçek zamanlı ve aynı anda kayıt altına alınabilmektedir. Eğer cıvatanın içerisine gerinim ölçer yerleştirilirse, ek olarak, bu ölçüm de alınabilmektedir.

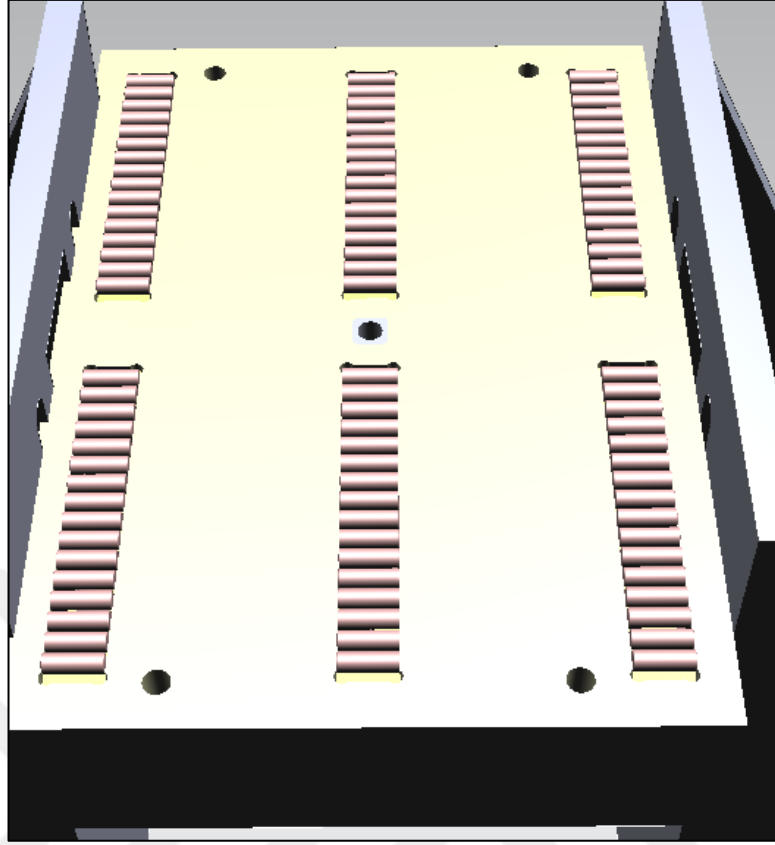
Test standartına uygun olarak, üst plaka ve taban blok arasındaki mesafe 1 mm olarak ayarlanmıştır. Bu mesafenin 5 mm olduğu denemelerde cıvataların gevrek olarak cıvata kafasının altından kırıldığı gözlemlendi.



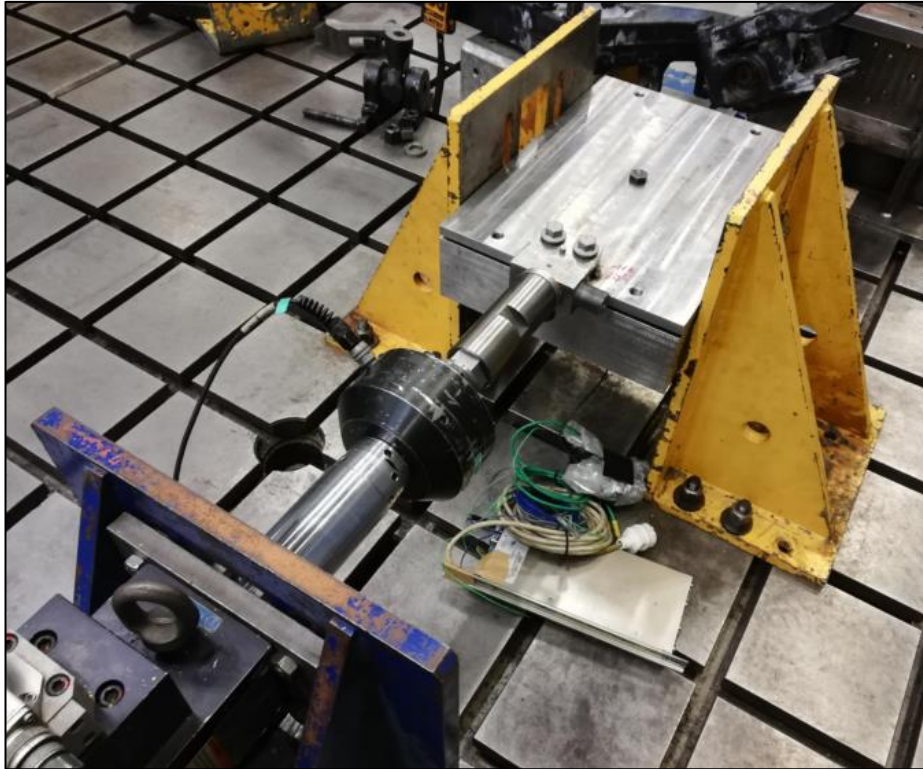
Şekil 2.1. Üç boyutlu olarak tasarlanmış olan test cihazı



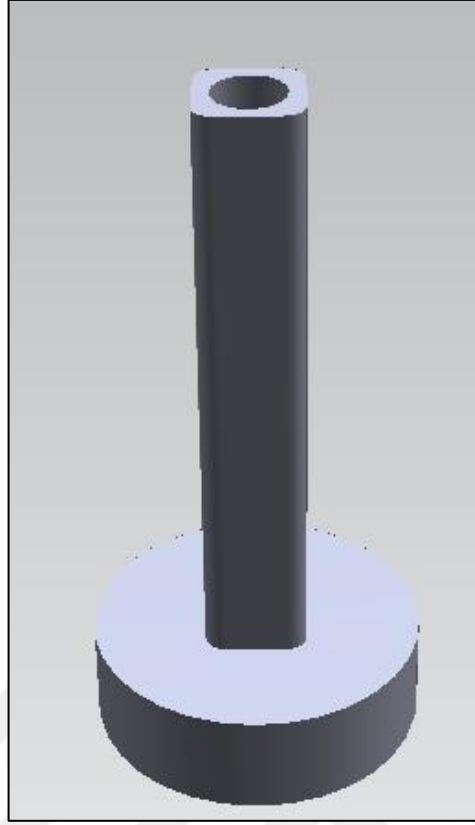
Şekil 2.2. Test cihazının yandan görünümü



Şekil 2.3. Üst plaka ile taban bloklar arasındaki bilyeli yataklar



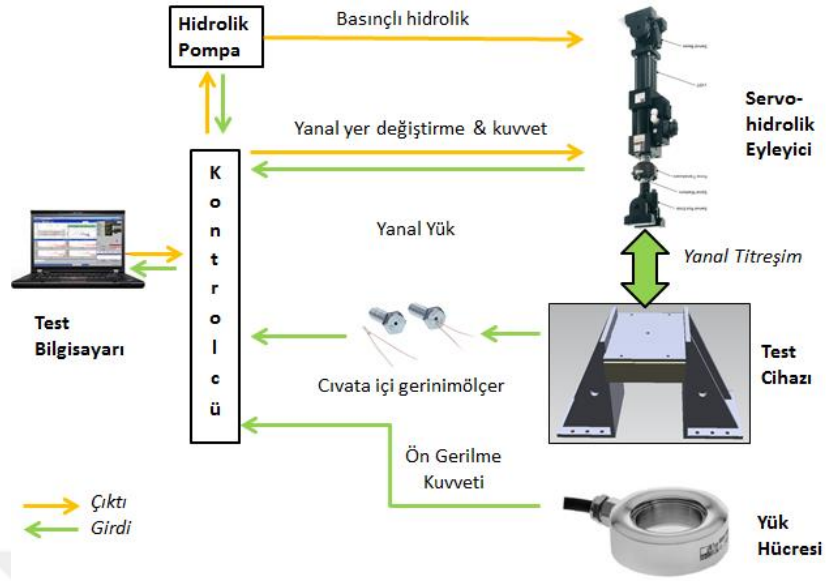
Şekil 2.4. Eyleyiciye bağlanmış olan test cihazı



Şekil 2.5. Cıvatalı aparat



Şekil 2.6. Cıvatalı aparatla taban blok arasına sıkıştırılmış olan yük hücresi



Şekil 2.7. Kapalı çevrim test sistemin şematik tarifi

Şekil 2.7’de kapalı çevrim bir sistem olan test cihazı şematik olarak gösterilmiştir. Test cihazı mekanik ve elektronik kısım olarak iki parça halinde düşünüldüğünde, elektronik kısımları ile ilgili bilgiler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Test cihazında kullanılan elektronik parça ve sistemlerin detayları

No	Sistem parçası	Marka ve Model Bilgisi	Detaylar
1	Kontrolcü	MTS Flextest Controller 100	32 Bitlik bir kontrolcüdür. 8 kanaldan aynı anda geniş bir skalada sinyal üretip bunları gerçek zamanlı kontrol edebilir.
2	Eyleyici	MTS 244.21 Hydraulic Actuator	0-50 Hz aralığında sinus, kare, rastgele vb. sinyaller çalabilen, 250 mm stroklu ve servovalf vasıtasıyla kontrol edilebilen hidrolik eyleyicilerdir.
3	Veri toplayıcı	HBM Quantum MX410B	4 kanala kadar veri toplar. 24 bitlik bir veri toplayıcıdır. Bütünleşik Wheatstone köprüsü içerdiği için gerinim ölçerden veri toplayabilir.

Tablo 2.1. (Devam) Test cihazında kullanılan elektronik parça ve sistemlerin detayları

4	Yük algılayıcısı	HBM KMR 400 Force Washer	400 kN'a kadar yük okuyabilen, cıvatalar ile yüzey arasına sıkıştırılıp basma kuvveti okuyan özel tipte algılayıcıdır.
5	Gerinim ölçer	HBM LB11 Strain Gage	Cıvata içinden gerinim verisi toplayabilmek için geliştirilmiş özel gerinim ölçerlerdir. 120 Ω direnç içerir ve çeyrek köprü yapıda bir Wheatstone köprüsü ile veri toplanabilir.

3. TEST EDİLECEK BAĞLANTININ TANITIMI

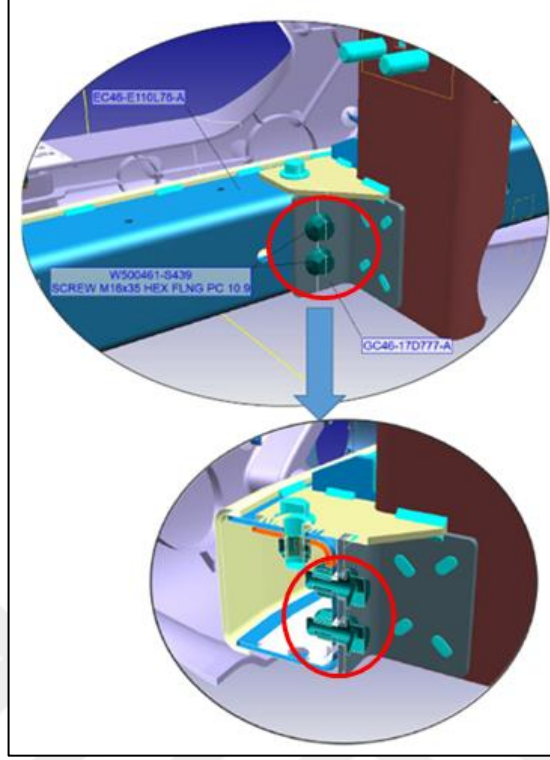
Testler esnasında, Şekil 3.1’de görülebilen ve Tablo 3.1’de özellikleri verilen cıvata hidrolik eyleyicinin bağlandığı hareketli üst plakaya 250 Nm moment ile sıkıldı. Üst plaka, değişken yanal yer değiştirme ve frekanslarla hareket ederken, cıvatanın dişlerinin tutunduğu taban blok ise sabit durmaktadır. Bu göreceli hareket ile cıvatanın gevşemesi sağlandı.



Şekil 3.1. Test edilen cıvata

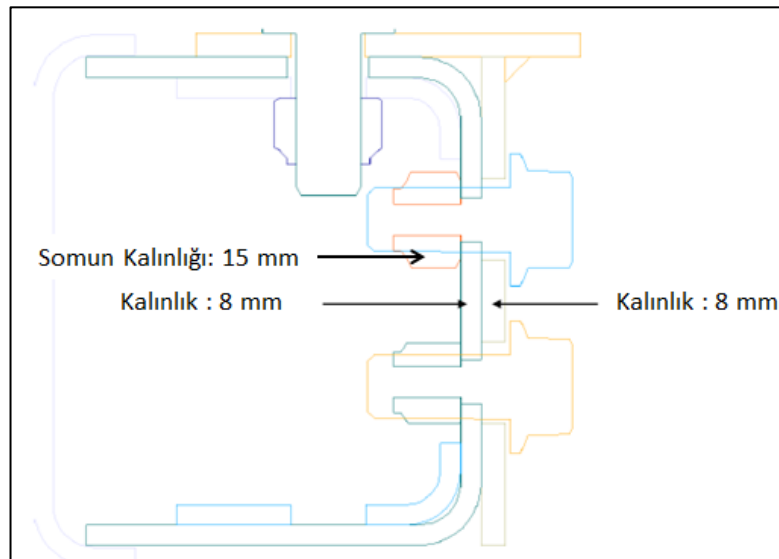
Tablo 3.1. Test edilen cıvata özellikleri

Metrik	16
Diş adımı (mm)	1,5
Cıvata kafa özellikleri	Altıköşe başlı ve flanşlı
Boy (mm)	35
Sınıfı	10.9



Şekil 3.2. Test edilen cıvatanın araçtaki konumu

Şekil 3.2’de görülebilen, testte kullanılan cıvata, ağır ticari araçta, tamponu şasiye bağlayan bağlantı cıvatalarından biridir ve kırmızı daire içine alınarak gösterilmiştir. Şekil 3.3’te bu cıvatanın kesit görünüşü görülebilir.



Şekil 3.3. Bağlantının kesit görünüşü

4. TEST EDİLECEK BAĞLANTININ KAYMA DİRENCİNİN HESABI

4.1. Sıkma Momenti ve Öngerilme Kuvveti Arasındaki Bağntı

Cıvataya uygulanan sıkma momentinin yol açacağı öngerilme kuvveti 4.1 denkleminde görülen bağıntı ile bulunur;

$$T_{in} = F_p \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (4.1)$$

Burada,

T_{in} = Cıvataya uygulanan moment

F_p = Cıvatanın öngerilmesi

P = Cıvata diş adımı

μ_t = Cıvata ve somun dişleri arasındaki sürtünme katsayısı

r_t = Dişlerin efektif temas yarı çapı

β = Dişlerin yarı-açısı

μ_n = Somun yüzeyi ve bağlantının üst yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı

r_n = Somun ve bağlantı yüzeyi arasındaki efektif temas yarı çapını ifade eder [5].

4.2. Cıvatanın Sürtünme Katsayısı

Endüstri standardı olarak cıvataların sürtünme katsayısının 0,11 ve 0,17 aralığında olması gerekmektedir. Testte kullanılan cıvatanın sürtünme katsayı ölçümleri, üretilen miktar içinden 5 adet örneklem üzerinden yapıldığında Tablo 4.1'deki sonuçlar çıkmıştır.

Tablo 4.1. Sürtünme katsayı ölçümleri

No	Sürtünme katsayısı ölçümü
1	0,14
2	0,15
3	0,15
4	0,15
5	0,15

Bu ölçüm sonuçlarına göre, test edilen civatanın sürtünme katsayısı 0,15 olarak alınmıştır.

4.3. Kayma Direncinin Hesaplanması ve Ölçülen Yanal Kayma Kuvveti ile Kıyaslanması

4.1 denklemine göre, öngerilme kuvveti (F_p) hesaplamasını yapmak için Tablo 4.2'deki değerler kullanıldı.

Tablo 4.2. 4.1 denkleminde kullanılacak olan değerler

Değerleri bilinen ve ölçülenler	
T_{in}	250 Nm
P	2 mm
μ_t	0,15
μ_n	0,15
β	30°
r_t	12,87
r_n	7,35

$$F_p = 68500 \text{ N}$$

Cıvatanın teorik kayma direnci (F_{kayma}) ;

$$F_{kayma} = (\mu_t + n \times \mu_n) \times F_p \quad (4.2)$$

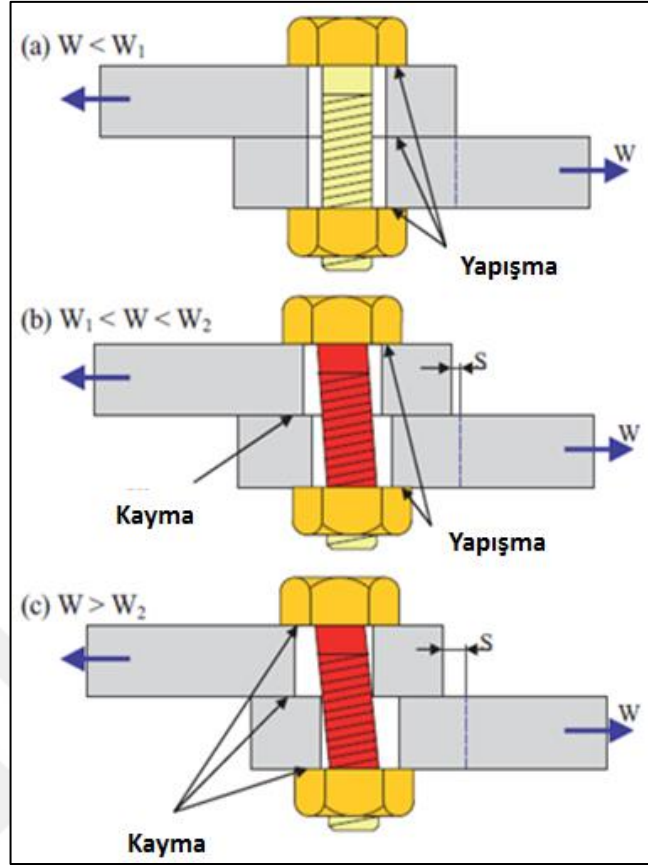
F_p = Öngerilme kuvveti

μ_t = Cıvata ve somun dişleri arasındaki sürtünme katsayısı

μ_n = Somun yüzeyi ve bağlantının üst yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı

n = Somun altı ile malzeme yüzeyi arasındaki sürtünmenin kayma direncine katkısı

Cıvatanın kayma direnci iki kısımdan oluşmaktadır. Bu iki kısmın katkısı ile cıvata yanal yüklere karşı öngerilme kuvvetini kaybetmeden durabilmektedir.



Şekil 4.1. Kayma ve yapışma durumu [7].

Hattori, T. ve diğerlerinin çalışmasında ve Şekil 4.1.'deki görselle gösterildiği gibi, eğer yanal yük değeri (W), malzemeler arası sürtünmeden kaynaklı kayma direncinden (W_1) büyükse, malzemeler arası kayma başlar. Eğer bu değer (W), somun altı ile malzeme arasındaki sürtünmeden (W_2) büyükse, somun altı ve malzemeler arasında da sürtünme yenilecek, böylece cıvata kayma direncinden daha yüksek bir yanal yük uygulanarak gevşetilebilecektir [7].

Somun altı ile malzeme yüzeyi arasındaki sürtünmenin kayma direncine olan katkısı 4.3 denklemindeki gibi hesaplanır [11].

$$n = 1 - \left(\frac{l_r}{4d}\right); l_r = 8 \quad (4.3)$$

n : Somun altının kayma direncine katkısı

d : Cıvatanın metriği (M16 için 16) (bkz. Tablo 4.1)

l_r : Cıvatanın ilk temas ettiği malzemenin kalınlığı (bkz. Şekil 3.3)

$n = 0,875$ olarak bulunur.

4.3 denkleminde bulunanlar, 4.2 denkleminde ilgili yerlere konulduğunda, bu tez kapsamında test edilen cıvatanın kayma direnci aşağıdaki gibi hesaplandı:

$$F_{\text{kayma}} = 19265 \text{ N}$$

Cıvatanın sıkıştırdığı malzemeler arasındaki sürtünme ise, 0,15'tir ve bu hesapla kayma direncinin 10265 N'luk kısmı karşılanmaktadır (%53). Somun altı sürtünmesi ise, 9000 N'luk değerle %47'lik kısmı karşılar. Yanal yüklemeli test cihazı, malzemeler arasındaki sürtünmeleri benzetecek yapıda olmadığı için, tez kapsamında kullanılacak olan kayma direnci değeri, yalnızca somun altı ve malzeme arasındaki sürtünmeden kaynaklı kayma direnci olarak aşağıdaki gibi alındı:

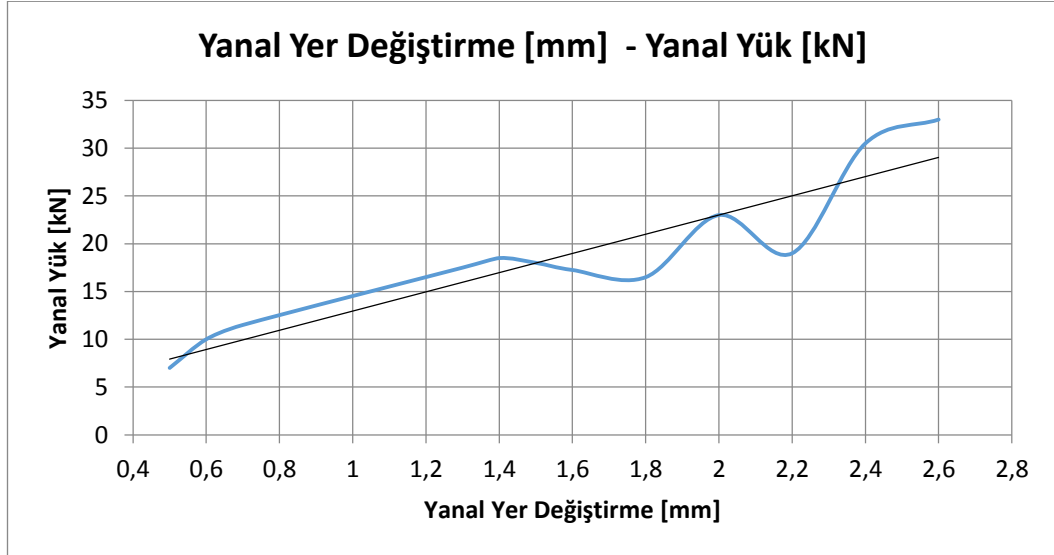
$$F_{\text{kayma}}^* = 9000 \text{ N (9 kN)}$$

Sıkma momentinin doğru uygulanması, sürtünme katsayılarındaki herhangi bir sapma ve elastik olarak cıvatanın kendisini bırakmasındaki kabulde bir takım farklılıklar bu hesabın sonucunu değiştirecektir. Testin bu hesapla tutarlı olması önemli olmakla birlikte, mertebe açısından doğruluğa bakmak yeterli olacaktır. Hesaptaki kabuller ve testteki bozucular, bire bir aynı sonucu bulmaya engel olmaktadır.

5. TEST CİHAZINDA CIVATANIN KAYMA DİRENCİ, YANAL YER DEĞİŞTİRME VE YANAL YÜK İLİŞKİLERİNİN GÖSTERİMİ

Test sırasında yanal yönde, hem yer değiştirme hem de kuvvet ölçülebilmektedir. Civata titreşim testlerinde, yanal yer değiştirmeyi dikkate alan, yanal kuvveti dikkate alan ve bu iki parametreyi birlikte değerlendiren çalışmalar vardır. Test sırasında ölçülen yanal yer değiştirme ve yanal yükü çarparak titreşim çarpanı (vibration product) büyüklüğü elde eden ve bu büyüklük ile civatanın gevşeme çevrimleri arasındaki ilişkiyi gösteren çalışmalar vardır [2].

Yanal yer değiştirme ile yanal yük ise, aslında birbirinden bağımsız parametreler değildir. Yanal yüklemeli test cihazında, 0,5 mm'den 2,6 mm'ye kadar artan yanal yer değiştirmelerle yanal yük ölçümleri yapıldığında Şekil 5.1'deki grafik elde edildi. Şekil 5.1 grafiğinde, mavi eğri test sonuç değerlerinin birleştirilmesi ile oluşturuldu. MS Excel'de, lineer regresyon komutu ile, bu değerlerden oluşan eğrinin, doğrusal regresyonu bulundu ve grafik üzerinde siyah renkte doğru olarak gösterildi.



Şekil 5.1. Yanal yer değiştirme ve yanal yük grafiği

Test edilen bağlantı için kayma direnci, Bölüm 4.3'te 9 kN olarak bulunmuştur. Yapılan testte de 0,6 mm'nin marjinal kayma değeri olduğu bulunmuş ve bunun

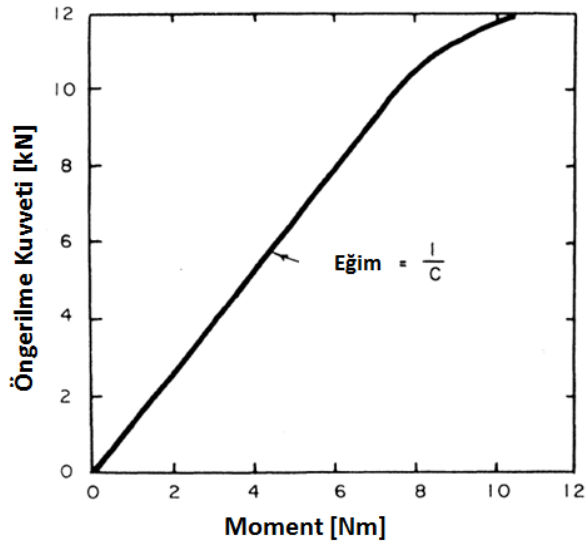
yanal yük karşılığı 10 kN olarak ölçülmüştür. Testin bir önceki adımı olan 0,5 mm yanal yer değiştirmeye denk gelen yanal yük değeri 7 kN olduğu için, bu değerde gevşeme olmaması test sonuçları ile teorik hesabı tutarlı çıkarmıştır.

5.1. Sıkma Momenti ve Öngerilme Kuvveti Arasında Doğrusal İlişkinin Gösterimi

Test cihazı üzerinde, torkmetre ile 3 farklı sıkma momenti seviyesinde, aynı tipte cıvatalar sıkılarak cıvatanın öngerilmesinin ölçümü yapıldı. Cıvatanın sıkma momenti ve öngerilme kuvveti arasındaki doğrusal ilişki Şekil 5.2'deki ve Denklem 5.1'deki gibi olmalıdır [1] ;

Sıkma Momenti = Önyük x Sabit

$$T_{in} = F_p \times C \quad (5.1)$$

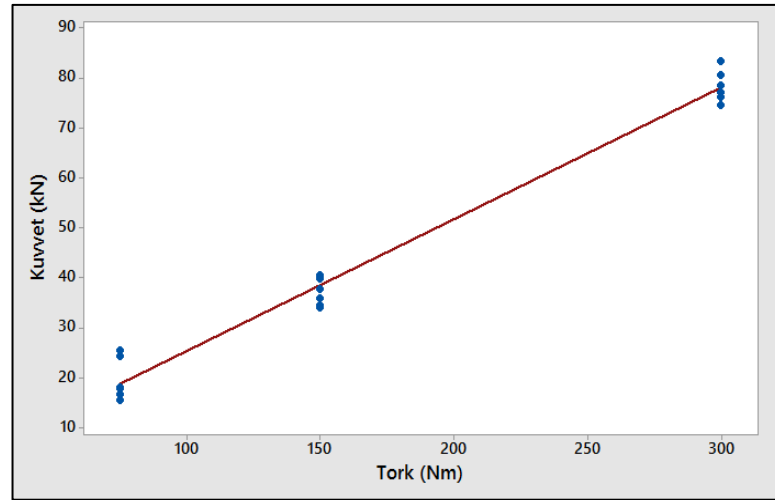


Şekil 5.2. Öngerilme yükü ve sıkma momenti grafiği [1]

Tablo 5.1'de görülen ve Şekil 5.3'te grafiğe dökülen bu ölçümlerde, sıkma momenti ile öngerilme arasında doğrusal bir ilişki gözlemlendi. Bu durum, Şekil 5.2'deki teorik olarak beklenen grafikteki doğrusallıkla tutarlılık gösterdi. Sıkma momentindeki yüzdesel kayıp/artış, öngerilmedeki yüzdesel kayıp/artışa denktir denir.

Tablo 5.1. Sıkma momenti ve öngerilme kuvveti karşılıkları

C3	C4
Tork (Nm)	Kuvvet (kN)
300	83,5
300	80,7
300	76,3
300	77,2
300	78,6
300	74,6
150	40,6
150	40,0
150	37,9
150	34,6
150	34,2
150	36,0
75	25,5
75	24,4
75	16,7
75	15,5
75	18,1
75	17,8



Şekil 5.3. Sıkma moment ve öngerilme kuvveti karşılıklarının doğrusallığının gösterimi

4.1 denklemine göre, test cihazımızda bu bağlantı tipi için C değeri aşağıdaki gibi hesaplandı:

$$C=3,65$$

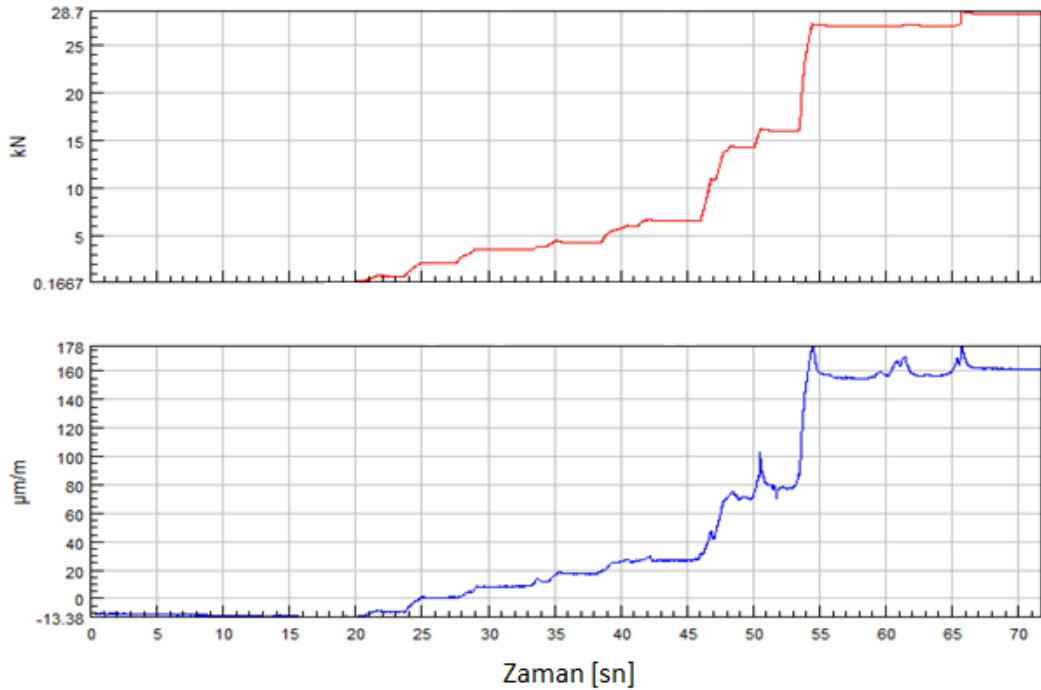
Tablo 5.1'deki değerlerin doğrusal regresyonu alınarak ölçümlerden hesaplanan C değeri ise, aşağıdaki gibidir:

$$C=3,7 \text{ mm}$$

C değerinin tutarlılığı ve sıkma momenti ile öngerilme kuvvetinin arasındaki doğrusal ilişkinin gösterimi ile test cihazındaki öngerilme kuvvetinin ölçümü yapılarak sıkma momenti ile de doğrudan ilişki kurulabileceği gösterildi. Cıvatanın akma değerine yakın değerlerde bu doğrusallık bozulmaktadır ancak cıvata sıkma momenti belirlenirken bu plastik bölgeden kaçınacak şekilde belirlenmektedir.

5.2. Öngerilme Kuvveti ve Gerinim Arasında Doğrusal İlişkinin Gösterimi

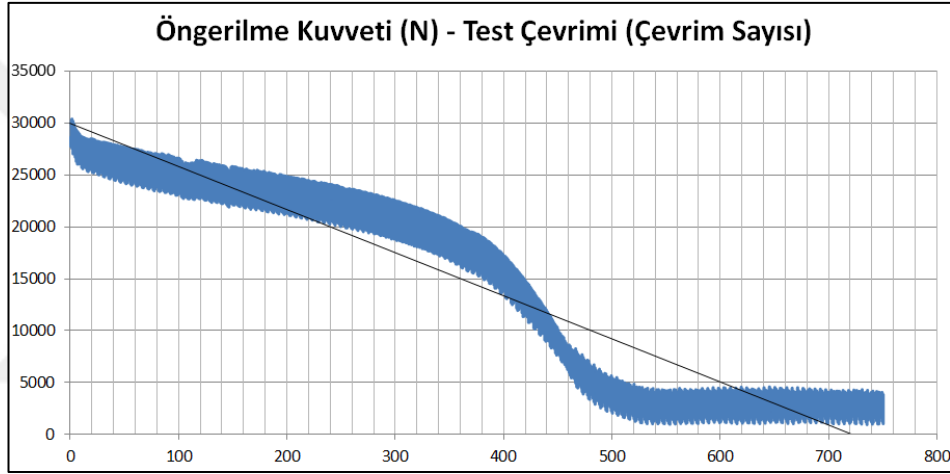
Test edilen cıvata için manuel olarak anahtarla sıkılırken hem öngerilme kuvveti hem de gerinim verisi toplandı. Statik koşullarda yapılmış olan bu test için şekil 4.4'teki grafiklerde duyarlılıklar görülebilir:



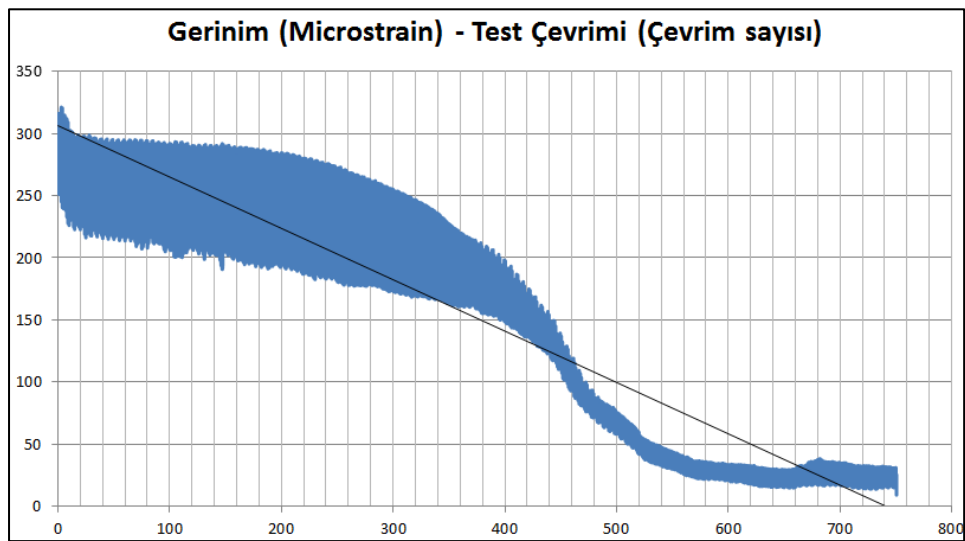
şekil 5.4. Öngerilme kuvveti-zaman ve gerinim-zaman grafikleri

Cıvata her sıkıldığında, hem yük algılayıcısı hem de gerinim ölçer bu sıkımı algıladı. Bu iki algılayıcının aralarındaki doğrusal ilişki, adımlara bakılarak Şekil 5.4'te görülmektedir. Yukarıdaki grafikte, yatay eksen zaman ve dikey eksen kN cinsinden öngerilme kuvvetidir. Aşağıdaki grafikte ise, yatay eksen zaman ve dikey eksen de microstrain cinsinden gerinim değerleridir.

Gerinim ölçer bağlanmış başka bir cıvatayla ise, dinamik koşullardaki durum incelendi. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 grafikleri aynı cıvata için aynı anda alınmış gerçek zamanlı verilerdir ve bir cıvata gevşetme testi sırasında, yanal yüklemeli test cihazından alınmış ölçümlerdir.



Şekil 5.5. Öngerilme kuvveti (N) – test çevrimi (çevrim sayısı) grafiği



Şekil 5.6. Gerinim (microstrain) – test çevrimi (çevrim sayısı) grafiği

Bu iki grafik incelendiğinde, zaman bazında gerinim ve öngerilme kuvvet kayıplarının orantılı olarak azaldığı görülür.

Hem statik hem de dinamik koşullarda, cıvata içi gerinim ölçer verileri, öngerilme kuvvetleri ile orantılı bir şekilde azalmakta veya artmaktadır. Veri toplama çalışmalarında, cıvata içi gerinim ölçerden veri toplanarak cıvatanın öngerilme kuvveti ve sıkma momenti hakkında çıkarsama yapılabilir.

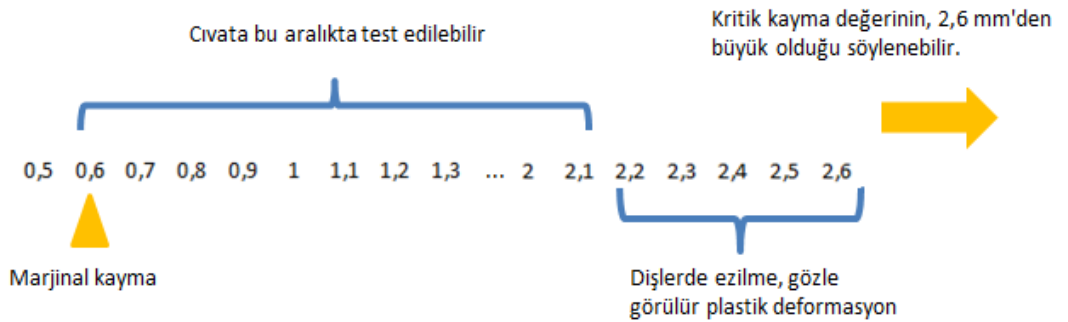


6. DENEYSEL TASARIM

Frekans ve yanal yer değiştirme, test değişkenleri seçilerek deneysel tasarım senaryoları belirlendi. Toplam 60 adet test yapıldı. Her bir frekans ve yanal yer değiştirme adımı için üçer test yapıldı. Testler tamamıyla rastgele bir sıralama ile yapıldı. Bu rastgele sıralama, MS Excel’de random foksiyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Bu sayede, testler yapıldıkça test sisteminde zamanla görülebilecek bozulmaların, sonuçlar üzerindeki etkisi yok edilmekle birlikte, testlerin üçer kez yapılması sonuçların güvenilirliğini artırdı.

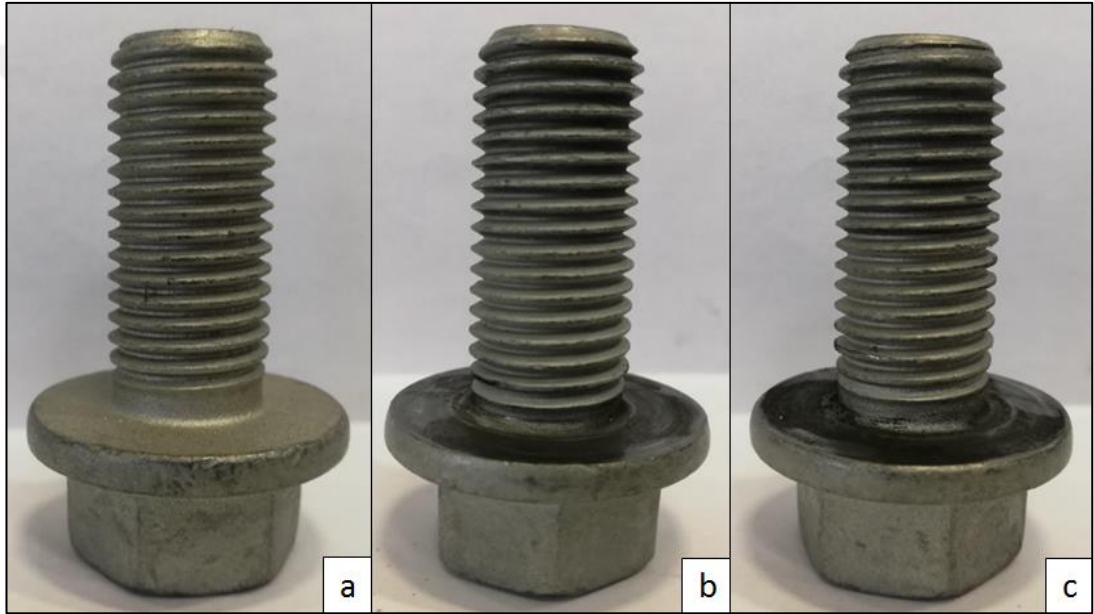
Testler için seçilen frekans adımları 7,5 Hz ; 10 Hz; 12,5 Hz; 15 Hz; 17,5 Hz ve yanal yer değiştirme adımları 1 mm ; 1,1 mm ; 1,2 mm ; 1,3 mm’dır. Cıvata sıkma momenti ise sabit 250 Nm’dır.

Testlerde yanal yer değiştirme adımları, marjinal kayma değerinden yüksek olacak Şekilde seçildi. Bunu sağlamak için de, önce cıvatalı bağlantı 0,3 mm gibi görece küçük yanal yer değiştirmeler ile 5000 çevrime kadar test edildi ve herhangi bir gevşeme gzlemlenmeyince, yanal yer değiştirme değerleri 0,1 mm aralıklarla artırıldı. Sonuçta, bu cıvatalı bağlantı için marjinal kayma değeri 0,6 mm olarak bulundu. Deneysel tasarımda seçilecek olan yanal yer değiştirme değerlerinin bundan yüksek olması gerekmektedir [4].



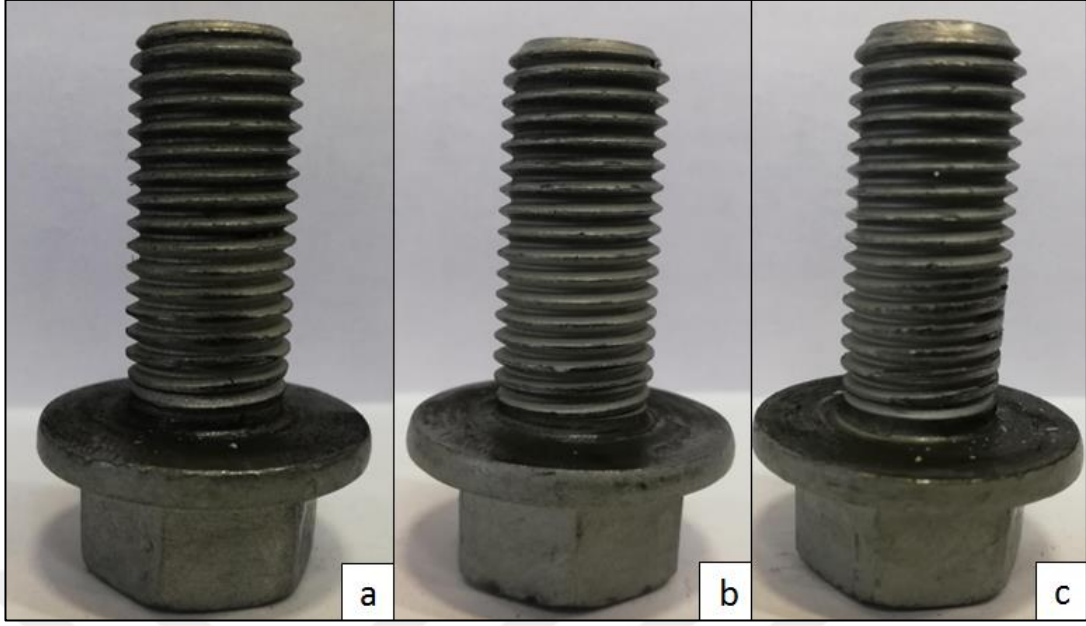
Şekil 6.1. Cıvatanın test edilebileceği yanal yer değiştirme aralığı

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, yanal yer değiştirme değerlerinin minimum değerini marjinal kayma değeri belirlerken, maksimum değerini de kritik kayma değeri belirler. Şekil 6.2’de fotoğrafları görülebilen cıvatalarla yanal yer değiştirme adımları 0,1 - 0,2 mm aralıklarla artırılmaya devam edildiğinde, cıvatanın dişlerinde 2,2 mm’de ezilme gözlemlendi. Yanal yer değiştirme belirli bir değerin üstüne çıktığında, cıvatada kırılma gözlemlenmesi gerekir. Bu değer kritik kayma değeri olarak adlandırılır [8]. Bu değer, test sisteminin üst sınırları zorlandığı için tespit edilemedi. Ancak 2,6 mm’den büyük olduğu söylenebilir. Deneysel tasarımda, seçilebilecek yanal yer değiştirme değerinin üst sınırı da 2 mm olarak belirlendi.



Şekil 6.2. a) Teste girmemiş cıvata b) Marjinal kayma değeri olan 0,6 mm ile yapılan test sonrası cıvata c) 1,4 mm ile yapılan test sonrası cıvata

Marjinal kayma değeri alt sınır ve kritik kayma değeri üst sınır olacak şekilde, alt ve üst limitleri belirlenmiş bir aralıkta testin yapılabileceği yanal yer değiştirme değeri belirlenebilir. Ancak bu değer, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’teki bulgulara istinaden, dişlerde plastik deformasyonun başladığı kritik değere yakın seçilmemesi doğru olacaktır.



Şekil 6.3. a) 2,2 mm ile yapılan test sonrası cıvata b) 2,4 mm ile yapılan test sonrası cıvata c) 2,6 mm ile yapılan test sonrası cıvata

Şekil 6.3'te, yüksek yanıl yer değıştirmeyle yapılan testlerin sonucunda cıvata dişlerindeki ezilmeler görülebilir. Bu şekilde ezilme oluşturan testler, cıvataların gevşemesinden çok, yorulma veya darbe kaynaklı olarak cıvataların kıyaslanmasına hizmet edecektir.

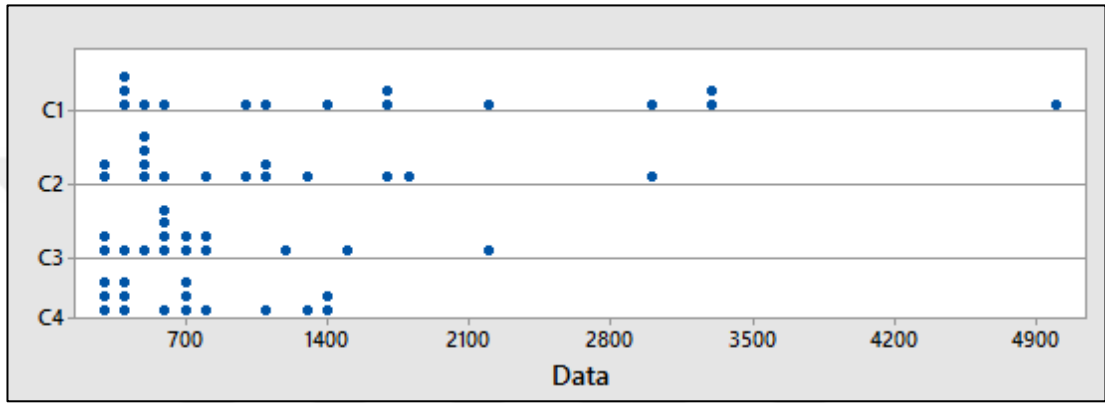
Bu testlerden sonra deneysel tasarım uygulandı. Tablo 6.1'de, solda ilk sütunda test frekans adımları, üstte ilk satırda testin yapıldığı sabit sıkma moment değeri ile ikinci satırda ise test yanıl yer değıştirme adımları sıralandı. Tabloda bunların karşılıklarında görülen sayılarsa, test edilen cıvatanın ilgili frekans ve yanıl yer değıştirme eşleşmesinde ne kadar test çevriminde, öngerilme kuvveti ve sıkma momentini tamamını kaybederek gevşediğini göstermektedir.

Tablo 6.1. Deneysel tasarım tablosu

Tork	Deneysel Tasarım Senaryoları											
	250 Nm											
	1 mm			1,1 mm			1,2 mm			1,3 mm		
Frekans / Yer Değıştirme	test1	test2	test3	test1	test2	test3	test1	test2	test3	test1	test2	test3
Tekrar sayısı	1100	2240	1740	1100	970	1293	274	780	713	752	1425	294
7,5 Hz	1405	430	360	1050	284	614	1202	517	581	1402	618	433
10 Hz	567	974	3271	789	547	540	607	419	765	720	730	303
12,5 Hz	5000	1717	436	484	343	2956	588	2180	730	398	325	725
15 Hz	531	3282	3046	1784	505	1712	317	632	1451	1054	1278	393

Tablo 6.1'de görülen bu veriler Minitab yazılımında Şekil 6.4'te olduğu gibi nokta gösterimi ile görselleştirildi ve ANOVA analizi ile incelendi.

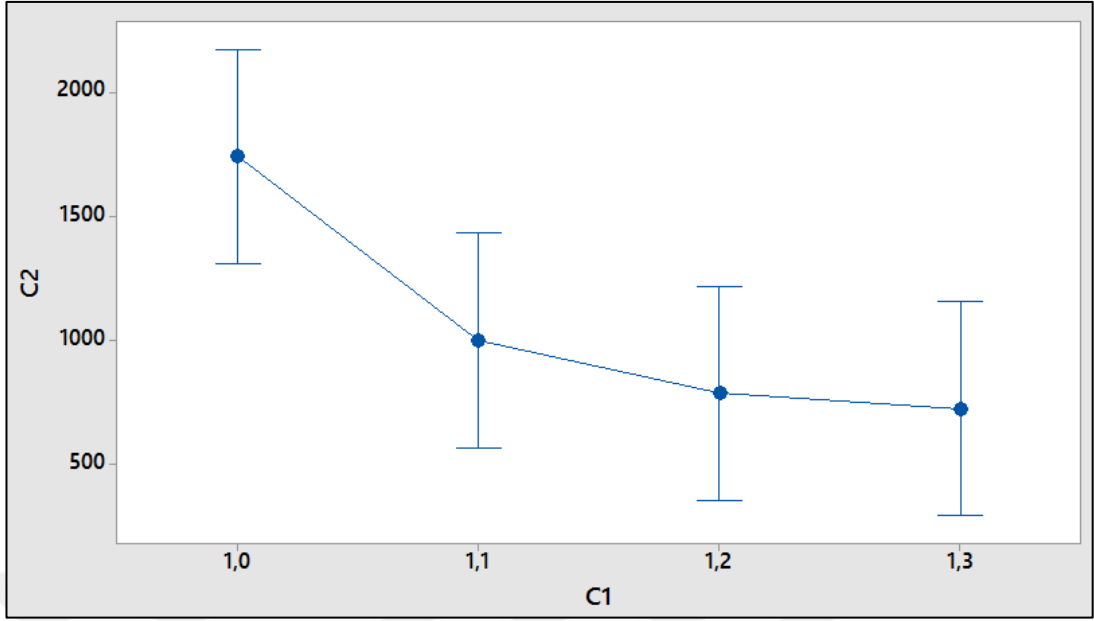
ANOVA analizi, açılımı varyans analizi olan, bir sistemin girdilerindeki değişimin çıktılarındaki değişim üzerinde anlamlı bir değişiklik yapıp yapmadığını incelemek için kullanılan bir analizdir. Bu analizde bir parametre olarak p değeri, seçilen güvenilirlik aralığına göre belli bir değerin altında olduğunda, söz konusu girdi çıktı üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir denir. Aksi halde, çıktıda görülen değişikliğin ya da varyansın girdideki değişiklikle ilgili olmadığı söylenir. Güvenilirlik aralığı %95 olarak belirlenen bu çalışma için, p değerinin 0,05'ten küçük olması gerekmektedir.



Şekil 6.4. Yanal yer değiştirmeye göre civata gevşeme çevrimleri dağılımının nokta gösterim grafiği

Şekil 6.4'te, dikey eksendeki C değerleri yanal yer değiştirmeyi ifade ederken, yatay eksen ise civata gevşeme test çevrim sayılarıdır.

Bu grafikte görülebileceği gibi 1 mm yanal yer değiştirme için gevşeme değerleri (C1) 5000 çevrime kadar çıkabiliyorken, yanal yer değiştirme arttıkça ulaşılan çevrim sayıları düşmektedir. Dağılımın geniş olması sistemdeki bozucuların fazlalığı ile ilgilidir denebilir. Bu bozucuların azaltılması (sistemdeki aşınmalar, yıpranmalar, montajla ilgili problemler) ile bu dağılım daraltılabilir. Ancak çalışmanın bu aşamasında testlerin üçer kez tekrarı, testlerin tamamen rastgele olarak dağılık bir sırada yapılması ve ANOVA analizi ile sonuçlar yorumlandı.



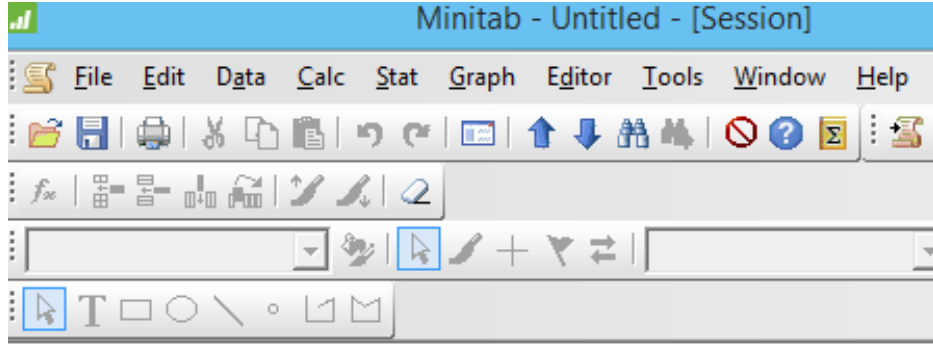
Şekil 6.5. ANOVA analiz grafiği

Şekil 6.5'teki grafikte, C1 yanal yer değiştirmeleri gösterirken C2 cıvata gevşeme test çevrim sayılarıdır. Her bir yer değiştirme adımında cıvataların gevşeme çevrim değerlerinin ortalaması ise bir çizgi ile birleştirildi.

Yanal yer değiştirme parametresinin cıvata gevşeme test çevrimini etkilediği ve $p=0,006$ ($p<0,05$) değerıyla %95 güvenilirlik aralığında anlamlı bir sonuç verdiği görüldü.

Aynı yöntemle, yanal yer değiştirmenin 1 ; 1,1 ; 1,2 ve 1,3 mm olduğu test verileri ile test frekansı adımları için analiz edildiğinde, sırasıyla p değerleri 0,661 ; 0,673 ; 0,67 ; 0,71 çıktı ve bu değerler anlamlı sonuçlara tekabül etmemektedir.

1 mm yanal yer değiştirme değeri için frekans parametresinin değişiminin p değer sonucu Şekil 6.6'da görülebilir. Burada, C1 seviyeleri olarak görülen satır, frekans adımları girişleridir (C1 factor levels). Varyans analizi (Analysis of variance) başlığı altında da P değer (P-Value) 0,661 olarak yazılım tarafından hesap edilmiştir [12].



Welcome to Minitab, press F1 for help.

One-way ANOVA: C2 versus C1

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis At least one mean is different
Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
C1	5	7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
C1	4	5253166	1313292	0,62	0,661
Error	10	21319431	2131943		
Total	14	26572597			

Model Summary

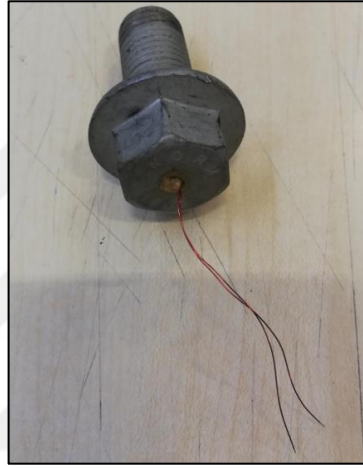
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1460,12	19,77%	0,00%	0,00%

Şekil 6.6. Minitab yazılımında 1 mm yanal yer değiştirmede frekans parametresinin sonuçlara etkisinin incelenmesi

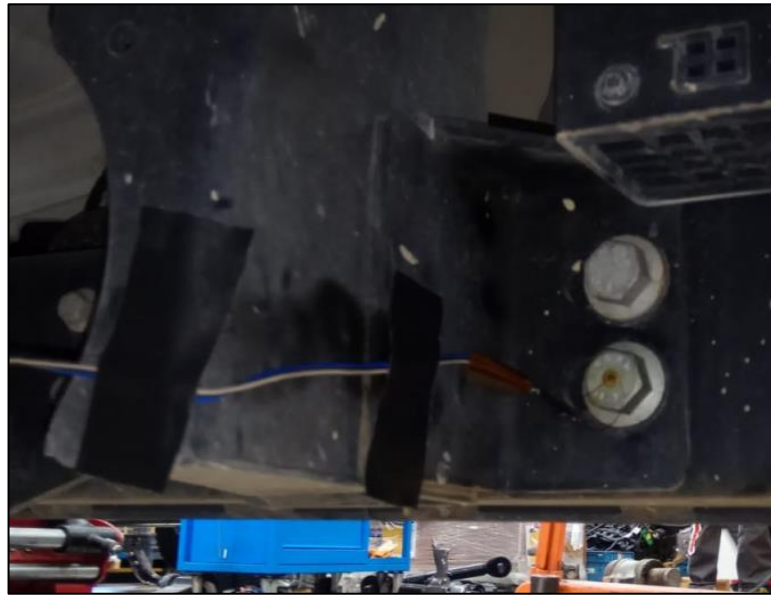
Testte kullanılan yanal yer değiştirme artarken, civatanın gevşeme çevrim sayısı düşmekte ancak, testin frekansı civatanın gevşeme çevrimini etkilememektedir. Test sonuçlarından yapılan bu çıkarım literatür ile paralellik göstermektedir.

7. ARAÇ TESTİ İLE CIVATAYA GELEN KUVVETLERİN TAYİNİ

Şekil 7.1’de görülebileceği gibi test edilen civata içerisine gerinim ölçer yapıştırılmıştır. Şekil 7.2’de görüldüğü gibi civata test aracına monte edilmiştir. Bu gerinim ölçer ile civataya araçta monte haldeyken gelen dinamik yükler gerinim cinsinden ölçümlenmiştir.

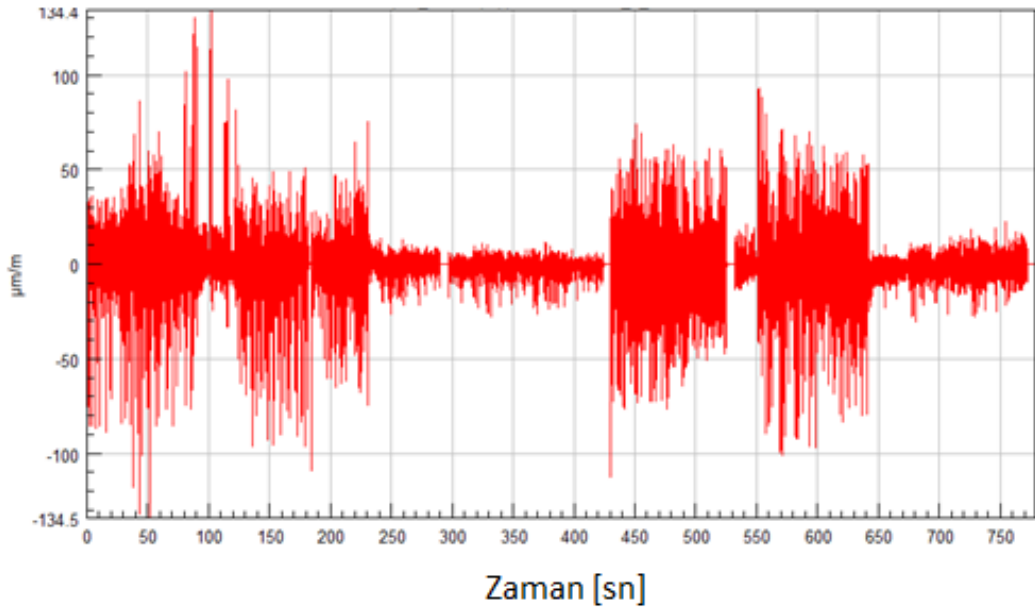


Şekil 7.1. İçine gerinim ölçer yapıştırılmış olan test civatası



Şekil 7.2. Civatanın test aracında ilgili yere bağlanması

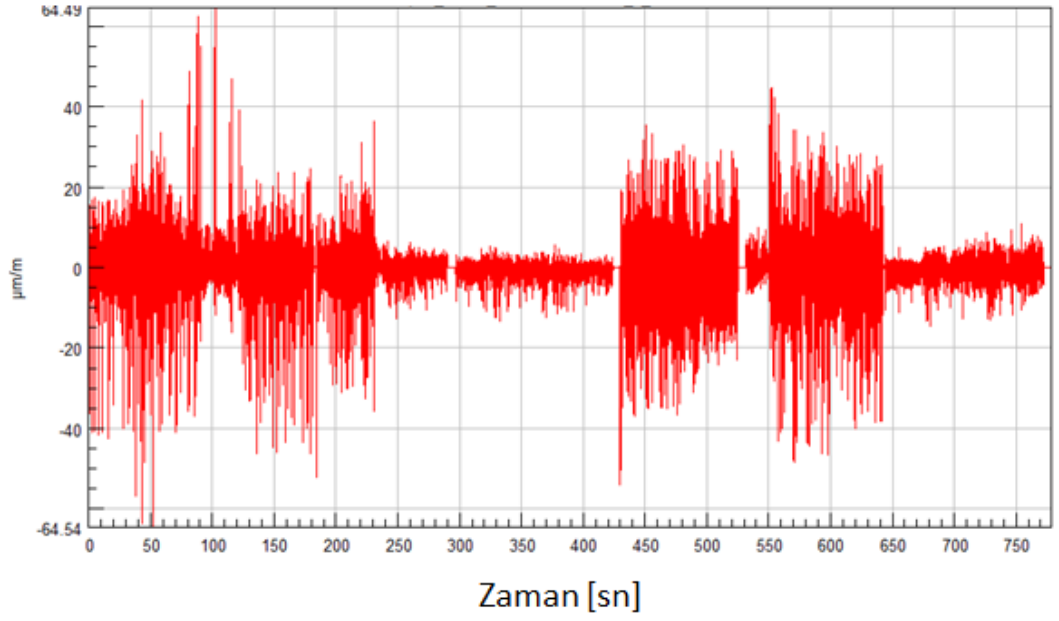
Gerinim ölçer bağılı cıvata, araç üzerinde monte haldeyken, test aracı test pistindeki özel yollardan belirli hızlarda geçirilerek veri toplandı. Bu özel yolların her birinden geçerken, gerçek zamanlı olarak toplanan bu veriler Ncode yazılımında görüntülenip birleştirilerek yaklaşık 800 saniyelik, Şekil 7.3'teki veri ortaya çıktı [13]. Bu yollardan test aracının belirli bir sayıda geçmesi sonucunda, müşterideki kullanım koşullarını kapsayan bir test yapılmış olur ve aracın ömrünü karşılayacak bir hasar verilmiş olur.



Şekil 7.3. Zaman bazında gerinim verisi

Bu gerinim değerleri, cıvataya gelen hem yanal hem de aksenal yüklerden kaynaklanmaktadır. Tez için seçilen cıvata, kesmeye çalışan bir cıvata olduğu için bu değerlerin büyük bölümünün yanal yüklerden kaynaklandığı söylenebilir ancak bunun bir ölçüsü yoktur. Bu sebeple, en kötü durumu test cihazında yaratmak ve güvenli tarafta olmak için gerinimin tamamen yanal yükten kaynaklandığı varsayılarak ilerlenecektir.

Bölüm 7.3'te hesaplanan gerinim değerlerini yaratan yanal kuvvetin araçta en fazla bizim bağlantı tipimiz için %47'si somun altı kayma direnci tarafından karşılanacağı için, bu gerinimlerin %47'sini test cihazında yaratacak olan yanal yer değiştirme ve yanal yüklerle test gerçekleştirilebilir. Zaman verisinin %47'lik kısmına daraltılmış hali Şekil 7.4'te görülebilir.

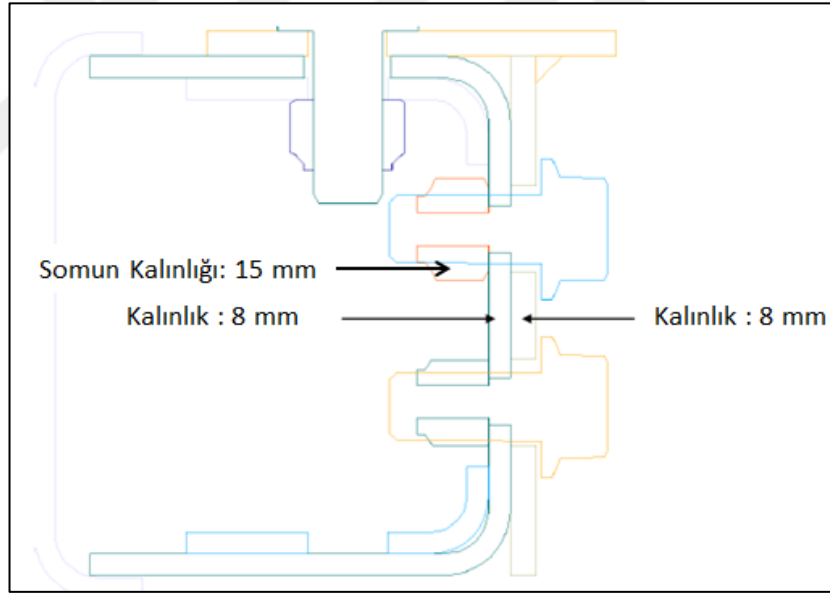


Şekil 7.4. Zaman bazında gerinim verisinin %47'sine daraltılmış hali

Burada maksimum ve minimum değerler seçilebilir ancak, verinin tekrarlı olarak birkaç kez geçtiği bir seviyede kuvveti seçmekte fayda vardır. Yol verisindeki tüm çevrimler sayıldığında tüm veri setinin %99'unu kapsayacak şekilde ± 45 microstrain değerleri testte yakalanmak üzere iyi bir aday olacaktır.

8. “TESTED-BY-ME” YAKLAŞIMININ UYGULANMASI

Şekil 8.1’deki kesit görünüşe göre, cıvatanın sıkıştırma uzunluğu (clamping length) 15 mm ve gövde uzunluğu (body length) 16 mm’dir. Bağlantının “tested-by-me” yaklaşımına uygun olarak test edilebilmesi için, bağlantının geometrik olarak test cihazında da araçta olduğu gibi monte edilmesi gerekmektedir. Bu yöntemle göre, bağlantının test cihazında ortaya çıkarılmasından sonra, araçta gelen yanal yüklerden daha yüksek kuvvetlerle test edilmesi ve bu şekilde doğrulanması gerekir [4]. Test cihazımızda araçtaki gibi bir montaj yapılabilmesi adına bu uzunluklar benzer tutulmuştur. Cıvata ile parçalar arasındaki sürtünme katsayısı, test cihazında 0,15’tir ve bu değer araç parçaları ile cıvata arasında da benzerdir.



Şekil 8.1. Bağlantının kesit görünüşü

Bölüm 7’de anlatılan ölçümlerden ve analizlerden çıkan sonuçlara göre, test edilen cıvatanın ± 45 microstrain gerinim değerlerini yakalayacak bir laboratuvar testiyle test edilerek doğrulanabileceği söylenir. Tablo 8.1’de görüldüğü üzere bu cıvata test etmek üzere, cıvata içinde 42 microstrain gerinim oluşturan 0,4 mm yanal yer değiştirme değeri seçilir. 4,5 kN mertebelerinde bir yanal yüke denk gelen bu yanal yer değiştirmenin cıvata gevşetmesi beklenmez.

Tablo 8.1 Yanal yer değiştirme-yanal yük-gerinim değeri karşılıkları

Yanal yer değiştirme [mm]	Yanal Yük [kN]	Gerinim değerleri [microstrain]
0,3	3	30
0,4	4,5	42
0,5	7	60
0,6	10	75
0,7	11,5	135
1	15	185

Yol verisi işlenerek ulaşılan sayılara göre parçalara maksimum durumda yaklaşık 4,5 kN yük gelmektedir. Pichoff ve ekibinin [4] ortaya koyduğu yaklaşıma göre, bu bağlantının F_T değeri test cihazında 10 kN olarak bulunmuştur.

Eğer araçta bu parçaya gelen yükler (F_R), parçanın tasarımında parçaya geleceği öngörölen kuvvetten (F_C) küçükse, bu parçanın gevşememesi gerekir. Bu parça özelinde, müşteride ve test pistlerinde herhangi bir gevşeme Őikayeti gelmemiştir ve $F_C > F_R$ denir.

Yol verilerinden bulunan F_R değeri de, F_T değerinden küçüktür ve C_F aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_R = F_T \times C_F \quad (8.1)$$

$$C_F = 0,45$$

C_F 'nin 1'den küçük olarak bulunması sebebiyle, test cihazında parçaya araçta gelenden daha yüksek kuvvetler uygulanarak gevşeme başlatıldığı görölmektedir.

C_F değerinin 0,45'e eşit olduğu 0,4 mm yanal yer değiştirme değeri ile bu bağlantının testlerinin gerçekteştirilmesi yeterli olacaktır. Bağlantıda yapılacak olan cıvata boyu uzatma, diş adımı değiştirme, pul koyma vs. gibi herhangi bir değişiklik, bu değer ile test edilip doğrulanabilir. Burada en önemli esas, bağlantının araçtaki özellikleriyle test cihazında modellenmesi ve bu Şekilde montajının yapılmasıdır [4]

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, cıvatalı bağlantıların kendiliğinden gevşeme ve öngerilme kaybı problemine yönelik olarak endüstride ve literatürde genel olarak kabul görmüş olan periyodik sinüsoidal yanal yük uygulayarak cıvataların gevşemesini mukayese eden yanal yüklemeli test cihazı tasarlanıp imal edildi ve çalıştırıldı. Bu cihazla, seçilen bir araç bağlantısı için deneysel tasarım tablosu oluşturulup testler yapıldı ve sonuçların literatürle paralellığı ve kendi içinde tutarlılığı istatistik yöntem ve yazılımlarla gösterildi. Test edilebileceği yanal yük aralığı belirlenen bu bağlantı, test aracına monte edildi ve bağlantı üzerinden gerinim verisi toplandı. Teorik olarak öngerilme kuvveti ve kayma direnci hesaplanan bu bağlantı için, gerinim verileri yorumlandı ve test cihazında benzer ve daha zorlayıcı koşulları yaratacak olan yanal yük değerleri bulundu. Belirlenen yanal yük değeri ile bağlantı test edildi.

Çalışmanın sonucunda da, cıvatalı bağlantıların kendi arasında kıyaslanmasından öte, mutlak olarak test edilmesi, yani müşteri koşullarının laboratuvar ortamında test cihazında gerçekleştirilerek test edilebilmesi için bir yöntem önerildi.

Çalışma sonunda ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Yanal yüklemeli test cihazında yanal yük arttıkça, cıvataların gevşeme test çevrimleri düşmektedir.
- Yanal yer değiştirme ile yanal yük değerlerinin bağımlı oldukları bulundu. İki parametreden birisi arttığında/azaldığında, diğeri de doğrusal bir şekilde arttı/azaldı.
- Yanal yüklemeli testlerde, test frekansı, cıvata gevşeme test çevrimlerini etkilemedi.
- Testte seçilecek olan yanal yer değiştirme değerini, alt değer olarak kısıtlayan değer marjinal yer değiştirme değeri iken, üst değer olarak kısıtlayan değer kritik yer değiştirme değeridir. Ancak kritik yer değiştirme değerine yakın değerlerin

- seçilmesinin, cıvata dişlerinde plastik deformasyona neden olduğu görüldü. Bu sebeple, çalışma kapsamında bu değerler kullanılmadı.
- Cıvata içi gerinim değerleri ile cıvatanın öngerilme kuvveti ve sıkma momenti arasında doğrusal bir ilişki kuruldu. Ölçülen gerinim değeri arttığında/azaldığında, diğer iki ölçüm de doğrusal bir şekilde arttı/azaldı.
- Cıvata içi gerinim ölçer, cıvataya gelen yükleri aksenal ve kesme yönünde olmak üzere ayırt edemeyecektir. Bunların teorik hesapla ve kabullerle, güvenilir tarafta kalacak şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme sonucu ulaşılan gerinim değerleri ile, laboratuvar ortamında araçtaki gibi ortaya çıkarılmış bağlantı ile doğrulama testleri yapıldı.
- Cıvataların araçta üzerine gelen yükler ile test cihazında gevşemesine yol açan yanal yük arasındaki katsayı olan C_F değeri, laboratuvar testlerinde 1'e eşit olarak bulunduğu, cıvatanın araçta gevşiyor olması gerekir.

İleride yapılacak çalışmalarda aşağıdaki gibi iyileştirmeler gerçekleştirilebilir:

- Yanal yüklemeli test cihazında, somun altı ile bağlanan malzeme arasındaki sürtünme benzetilirken, bağlanan malzemeler arasındaki sürtünme benzetilmemektedir. Bu durum, malzemeler arasındaki göreceli hareketi vermek adına bilyeler kullanılmasından ileri gelmektedir. Bilyeler olmadan, doğrudan bağlantı yapılarak malzemeler arasındaki sürtünme de olacak şekilde montaj yapılabilir.
- Test cihazında test edilecek bağlantıya moment uygulamanın daha doğru bir yöntem veya gelişmiş bir teknikle, daha dar bir toleransla ve doğrulukla yapılması yöntemin hassasiyetini arttıracaktır.
- Farklı geometri ve malzemelerden oluşan bağlantılar için bu yöntemin uygulanması, yöntemin uygulama alanını geliştirecek ve güvenilirliğini arttıracaktır.
- Tez çalışmasının kapsamı dışında olan ancak devamı niteliğinde, yöntemin diğer bağlantı tipleri için yaygınlaştırılabilmesi için tamamen algılayıcılar ile donatılmış bir altın araç (golden car) niteliğinde test aracı ile veri toplanarak, bu verilerin bir veritabanına aktarılması sağlanabilir. Araçtaki diğer bağlantılarda çeşitli nedenlerle yapılacak olan değişiklikler, araç testine gerek duymadan belirli

bir güvenilirlik aralığında bu verilerle yanal yüklemeli test cihazında doğrulanabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Bickford J., *An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*, Revised and expanded ed., Routledge, New York, 2018.
- [2] Junker G.H., New Criteria for Self-Loosening of Fasteners under Vibration, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1969, **44**(10), 14-16.
- [3] DIN 25201-4, Test Specification for Demonstrating the Resistance to Self-Loosening of Secured Bolted Joints, *Deutsches Institut für Normung e.V.*, Berlin, 2010.
- [4] Pichoff F., Kummel M., Schiff M., Dynamic Vibration Testing of Fasteners: Fastener Self-Loosening Theory, Vibration Testing Practical Applications, Comparison of the International Standards and Recommendations on How to Set-up a Meaningful Testing Protocol, *Matériaux & Techniques*, 2018, **106**(3), 307.
- [5] Motosh N., Development of Design Charts for Bolts Preloaded up to the Plastic Range, *Journal of Engineering for Industry*, 1976, **98**(3), 849-851.
- [6] ESNA, Maintaining the Tightness of Threaded Fasteners, *ESNA Division of Amerace Corporation Union*, New Jersey, 1976.
- [7] Hattori T. ve diğ., Loosening and Sliding Behaviour of Bolt-Nut Fastener under Transverse Loading, *EDP Sciences*, DOI: 10.1051/epjconf/20100608002.
- [8] Jiang Y. ve diğ., An Experimental Study of Self-Loosening of Bolted Joints, *J. Mech. Des.*, 2004, **126**(5), 925-931.
- [9] Hareyama S. ve diğ., Working Load Analysis and Strength Estimation for Bolted Joints During Actual Machine Operation, *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, DOI: 10.1115/IMECE2014-39193.
- [10] Hareyama S. ve diğ., Residual Clamping Force Estimation and Lifetime Prediction to Loosening Failure of Bolted Joints, *SAE Technical Paper 2017-01-0479*, DOI: 10.4271/2017-01-0479.
- [11] VDI 2230-1, Systematic Calculation of Highly Stressed Bolted Joints - Joints with one Cylindrical Bolt, *Vereins Deutscher Ingenieure*, Düsseldorf, 2015.
- [12] Sarip S., MINITAB User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools, ABD, https://shamsulsarip.files.wordpress.com/2015/07/minitab_book.pdf (Ziyaret tarihi: 2 Ağustos 2020).

- [13] BM United Kingdom Limited, DesignLife Theory Guide, Birleşik Krallık, <http://oss.jishulink.com/caenet/forums/upload/2014/09/25/191/45541828203375.pdf> (Ziyaret tarihi: 2 Ağustos 2020).





EKLER

EK-A

Testlerde kullanılan, öngerilme yükünü ölçen yük hücresinin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Marka	HBM
Ürün adı	Force Washer (Pul tipinde yük hücresi)
Model	KMR 400
Ölçüm aralığı	20 – 400 kN
Hassasiyet	1,7 – 2,3 mV/V
Tekrar edilebilirlik (aynı montaj için)	<%1
Besleme voltajı	0,5 – 12 V
Giriş direnci	560±190 Ω
Çıkış direnci	400±5 Ω
30 dakika sonundaki sürünme	<%2
Çalışma sıcaklık aralığı	-10°C ile +70 °C aralığı

EK-B

Testlerde kullanılan, cıvata içindeki gerinim değerini ölçen gerinim ölçerin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

Marka	HBM
Ürün adı	Doğrusal cıvata içi gerinim ölçer
Model	LB11
Nominal direnç	120 Ω
Direnç toleransı	$\pm 0,3$
Ölçüm faktörü (Gage factor)	Yaklaşık 2
Maksimum Besleme voltajı	7 V
Ölçülebilecek maksimum gerinim	50000 microstrain
Uygulanabilecek yapıştırıcı	EP 150
Çalışma sıcaklık aralığı	-200 °C ile +140 °C aralığı

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Ayık V.**, Zeren S., Ağır Ticari Araçlarda Cıvatalı Bağlantıların Tork Kaybı için bir Test Metodu, *The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC'20)*, İstanbul, Türkiye, 24-26 Haziran 2020.
- [2] Görürgöz M., Başaran M., Kozan K., **Ayık V.**, Çakır O., Çok Eksenli Yük Hesaplamasında Yük Yapılandırmasının Ağır Ticari Araç Uygulaması, *9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2018)*, Bursa, Türkiye, 7-8 Mayıs 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Volkan Ayık, lise eğitimini Beşiktaş Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde İmalat Mühendisliği lisans programından mezun olduktan sonra askerlik görevini yaptı. 2015 yılında Ford Otosan Ürün Geliştirme Departmanı'nda Araç ve Sistem Testleri Mühendisi olarak kariyerine başladı. Halen aynı görevde çalışma hayatına devam etmektedir.

