

ÖNGERİLMELİ CİVATA BAĞLARINDA ÇÖZÜLME PROBLEMLERİ

*Kadir ÇAVDAR **

Özet: Bu yayında, nedenleri üzerinde henüz tam bir fikir birliği sağlanamayan ve teknik uygulamalarda oldukça sık karşılaşılan civatalı bağlantılarda sıkma torkunun kısmen veya tamamen kaybolması problemi hakkında, literatürde mevcut çalışmalar analiz edilerek civata bağlarında tork kaybının tespiti ve alınabilecek önlemler konusunda bazı öneriler sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: öngerilmeli civata bağları, kendinden çözülme, derleme

Self-Loosening Problems of Preloaded Bolted Joints

Abstract: In this paper, self-loosening problem of the preloaded bolted joints which is sufficiently unknown or no consensus yet not be obtained was described and analyzed. End of the paper, determination of the torque loss of bolt was explained and some suggestions against to self-loosening of bolts were given.

Keywords: preloaded bolted joints, self-loosening, review

1. GİRİŞ

Bir civata rijitliği yüksek bir yay olarak düşünülebilir, sıkma işlemi esnasında ve sonrasında bu yay elastik olarak şekil değiştirir; çekme, burulma ve eğilme gerilmesine zorlanır. Civataya sıkılması esnasında yüklenen enerji, dışarıdan etkiyen kuvvetler nedeni ile serbest kalır ve civata bağı artık görevini yapamaz hale gelir.

Civatalı bağlantıların çözülme davranışını belirleyen en büyük etken titreşimli yüklerdir. Belirli koşullar altında tüm öngerilmeli civatalar çözülürler. Bu problem birçok endüstriyel makinede ve tesisatta görülür. Ancak çözülme probleminin azaltılması veya engellenmesi de mümkündür. Civatalarda tekrarlı yükler nedeniyle öngerilme kuvveti kaybını *sıkma kuvvetinin istikrarsızlığı* olarak da tanımlayabiliriz.

Tekrarlı yükler altında öngerilme kaybı oluşumlarının yanı sıra sıkılan parçaların enine yer değişim hareketleri, bağlama elemanlarının esnekliği, ısı değişimleri ve diğer bilinmeyen etkiler de civata bağını çözebilir.

Bir civatanın titreşim, darbe, ısı değişimleri ve benzeri durumlarda neden gevşediği veya çözüldüğü ile ilgili literatürde çalışmalar olmakla birlikte henüz tam olarak çözülme olayını açıklayan bir teori mevcut değildir. Mevcut teoriler, civata ve somun dişlerini birbirine bağlayan sürtünme kuvvetlerinin, dışarıdan etkiyen kuvvetler nedeniyle kaybolması sonucunda çözülmenin olduğu konusunda birleşirler. Ancak bunun oluşum mekanizması hakkında bir fikir birliği yoktur.

* Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa.
İletişim Yazarı: K. Çavdar (cavdar@uludag.edu.tr)

Şok, titreşim veya ısıl değişimler sonucunda cıvata bağının aniden tüm öngerilme kuvvetinin tamamını kaybetmeyeceği ancak öngerilmenin izafi olarak yavaş yavaş azalmaya başlayacağı yaklaşımı genel kabul görmektedir. Sürekli artan bu kaybın oluşumu tam olarak bilinmezken kayıp süreci ile ilgili birçok deney süreci tanımlanmıştır.

Bhattacharya ve diğ. (2010) tarafından vidalı bağlama elemanlarının çözülmesi konusu detaylı şekilde araştırılmıştır. Parçaların vidalar ile birbirine bağlandığı bir sistemde, cıvata eksenini üzerindeki çekme kuvveti ile parçalar üzerindeki sıkma kuvveti birbirini dengeler ve sıkılan parçalara dışarıdan bir kuvvet etki etmedikçe bu iki kuvvet denge halinde kalır. Bu iki kuvvete *öngerilme kuvveti* adı verilir. Montaj işlemi esnasında öngerilme kuvveti cıvatalara uygulanır, ancak geçen zaman içerisinde dış etkilerden dolayı bu öngerilme kuvveti azalır. Bu genel olay *cıvatanın çözülmesi* olarak isimlendirilir.

Cıvatanın uzamasında, bağlanan parçaların kısılmasında, somun başı altındaki veya dişler arasındaki parlak yüzeylerde oluşan kaymalarda her zaman bazı artık plastik deformasyonlar görülebilir. Bu problemler ancak cıvata ve somun malzemelerinin uygun şekilde seçilmesi ile çözülebilirler.

Cıvata bağında iki tip izafi hareketle karşılaşılabilir: Cıvata ile somun arasındaki cıvata/somun ile bağlanan parçalar arasındaki hareketler. Cıvata ve somun dişleri arasında izafi hareket oluşumunun yani çözülme başlangıcının üç ana nedeni vardır:

- Sürtünen yüzeylerde meydana gelen kuvvetler nedeniyle bağlanan parçalar üzerinde oluşan eğilme zorlamaları kaymaya neden olur, cıvata başı ve dişleri gevşer.
- Sıkılan parçalardaki farklılıklar ve sıcaklık değişimleri de çözülme davranışını etkiler.
- Bağlantıya etki eden titreşimli kuvvetler bağlantı yüzeylerinin kaymasına neden olarak çözülme neden olabilirler.

Bağlantıya dışarıdan bir titreşim kuvveti etki ettiğinde cıvata başı ile somun arasında sıkılmış olan parçalara çeki ve bası şeklinde zamanla değişen kuvvetler etki eder. Dış kuvvet, dişlerin eğim açısı ve flanş açısı nedeni ile üç bileşene ayrılır. Bu bileşenlerden ilki cıvatanın eksenini boyunca, diğeri radyal yönde ve sonuncusu da yüzeylere teğet yönde etki eder. Cıvata eksenini boyunca etkileyen kuvvet bileşeni şaftı uzatıp deforme ederken radyal kuvvet de diş profilini eğmeye çalışır. Teğetsel kuvvet ise ters yönde bir moment oluşturarak çözülmenin oluşmaması için çalışır.

Sıkılan veya bağlanan parçalar arasında dış kuvvetler sonucu teğetsel veya radyal yönde bir izafi hareket oluşacak olursa çevresel yönde de sürtünme bağı kalmayacağından somun dönme açısından serbest kalır. Yani başlangıçta oluşturulan öngerilme kuvveti ortadan kalkar ve cıvata gevşer.

Eksenel olarak yüklenen bağlantılarda, değişken gerilmeler cıvata/somun dişleri arasında veya bağlanan parçaların temas yüzeyleri arasında radyal yönde kayma hareketleri meydana getirirler. Bunun nedenleri; poisson oranına bağlı olarak cıvata kesitinin daralması ve eksenel gerilme nedeni ile somun duvarlarının genişlemesidir. Böylece somun, bağladığı parçaların üst yüzeyleri üzerinde de bir miktar genişler. Bu da cıvata ve somun arasında izafi bir harekete neden olarak cıvatayı çözülmeye götürür.

Dinamik olarak yüklenen bağlar için, diş flanşları ve diğer bağlanan parça yüzeyleri arasındaki izafi hareket için izin verebileceği maksimum yer değiştirmeye kadar çıkabilir. Enine yüklerin etki ettiği durumda büyük yer değiştirmeler görülebilir ve sıkılan parçaları bir arada tutan sürtünme bağı ortadan kalkar. Sıkılan parçalar arasındaki enine yönde oluşan sonuç kayma hareketi cıvata sarkaç hareketi yapmaya zorlar, bunun sonucu olarak da diş boşluğu ve diş flanşlarında izafi bir hareket görülür. Enine yöndeki bu hareketlerin genlikleri yeterli büyüklüğe ulaştığında somun ve cıvata başı parça yüzeyleri üzerinde kayar ve sürtünme bağı kalmadığından cıvata dönme yönünde tamamen serbest kalır. Eksenel yüklemdeki şartların aksine enine yönde kuvvet nedeni ile bağlantı kaymaya başladığında somunun tüm dişleri arasındaki sürtünme bağı ortadan kalkacaktır. Uygulamada yanıl (enine) yöndeki kuvvetlerin etkisiyle oluşan, bağlanan parçalar arasındaki kayma olayının dişler arasındaki kaymadan daha çabuk şekilde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu tür bağların çok daha kolay çözüldüğü ise deneylerle kanıtlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde literatürdeki mevcut çalışmalar alt gruplara ayrılarak analiz edilmiştir. Oluşturulan alt gruplar şunlardır:

1. Kendinden çözülme olayının incelendiği çalışmalar
2. Öngerilme kontrolünün incelendiği çalışmalar
3. Öngerilme kaybını engellemek için alınabilecek önlemler

2.1. Kendinden Çözülme Olayı

Cıvataların özellikle titreşimli yükler altında kendi kendine çözülme olayını anlamlandırmak için çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu bölüm için literatürden seçilen çalışmalar şunlardır:

Ramey ve Jenkins tarafından 1995 yılında NASA için yapılan araştırmanın sonuç raporunda, titreşime bağlı cıvata bağlarındaki çözülme olayının anlaşılabilmesi için ana tasarım parametreleri açıklanmış ve cıvata çözülme olayının önemi vurgulanmıştır. Titreşim testleri, Marshall Uzay Uçuş Merkezi (MSFC)'nin Yapısal Test Birimindeki dinamik test laboratuvarında, kontrollü rastgele giriş yapılabilen titreşim düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Deneysel, bir cıvatayla sıkılan test numunesi belirli bir süre titreştirilmiş ve öngerilmedeki azalma tespit edilmiştir. Test edilen her numuneye, Taguchi deney metodolojisi kullanılarak tasarlanan 11 tasarım parametresi birkaç kombinasyonda uygulanmıştır. Cıvatanın çözülmesinde etkili olan en önemli 11 parametre; cıvata çapı, cıvatanın yağlanma durumu, boşluk toleransı, öngerilme değeri, somun kilitleme gereci, bağlama uzunluğu, hatve, sıkılan parçalar arasındaki yağlama durumu, sıklık derecesi, bağlantı konfigürasyonu ve bağlantının kütlesi olarak belirlenmiştir. Her tasarım parametresi için iki değer belirlenip, test edilen her parametre kombinasyonu iki farklı yönde ve iki farklı ivme değerinde titreşime maruz bırakılmıştır. Deneysel hata için bazı ipuçları elde etmek, tekrarlanabilirlik ve verilere istatistiksel güvenilirlik dereceleri vermek amacıyla her test için fazladan bir test daha yapılmış olup toplamda 96 adet test kullanılmıştır. Araştırmanın sonucunda; somun kilitleme gereci, bağlantı biçimi, bağlantı elemanı boyutu ve kütleinin titreşime bağlı cıvata çözülmesinde önemli etkenler olduğu görülmüş, bu test sonuçlarının sonraki araştırmalar için yol gösterici olabileceği vurgulanmıştır.

Öngerilmeli cıvata bağlarında öngerilmenin titreşim kaynaklı çözülmedeki etkinliği üzerine bir araştırma çalışması Yang ve Nassar (2010) tarafından sunulmuştur. Çalışmada, titreşimden kaynaklanan öngerilme kaybını hesaplamak için lineer olmayan bir model önerilmiştir. Bu modelde cıvatalar enine yönde kuvvetler ile zorlanmaktadır. Bildirinin sonucunda, deneysel ve analitik sonuçlarının uyumlu olmasıyla önerilen modelin cıvatalı bağlantılarda kendinden çözülme performansını karakterize edebileceği vurgulanmıştır.

Cıvatayı şaftı boyunca zorlayan tekrarlı yükler altında somunun çözülmesi olayını Sawa ve diğ. (2010) teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada özellikle somun başı altında kalan yüzeylerin eğimli olması hali üzerinde durulmuştur. Bu uygulamada ihmal edilen ancak sık karşılaşılan bir durumdur. Eğim açıları $0,2^{\circ}$ - 3° arasında değiştirilip sonlu elemanlar analizi ile bağlantının davranışı araştırılmıştır. Sonuçların doğrulanması için ise Junker makinesinde yapılan testler kullanılmıştır. Çalışmanın belirtilen sonuçları arasında; yüzey açısı değerinin büyümesinin çözülme olayını kolaylaştırdığı ve eksantrik somun gibi bilinen çözülme engelleyici uygulamaların aslında kolayca çözülebileceği dikkat çekicidir.

Sonlu eleman modelleri cıvata bağlarının araştırılmasında sıkça kullanılmaktadır. Literatürde çok farklı özelliklere sahip genellikle lineer olmayan modellere rastlanmaktadır. Modellerin gerçekte ilişkisini deneylerle kurma ve modelin etkinliğini kanıtlama çalışmalarından bir tanesi de Pratt ve Pardoen (2002) tarafından yayınlanmıştır. Çalışmada bir disk üzerinde sıralanan eğilme momentine maruz cıvatalar incelenmiştir. Doğru sonuçlar için mutlaka sürtünme

katsayılarının deneysel olarak tespit edilmesi ve sonlu elemanlar modelinin deney parçalarının geometrisini tam olarak yansıtması önerilmektedir.

Tekrarlanan eğilme momentine maruz cıvata-flanş bağlantı türleri ve bu bağlantılardaki çözülmeyi önlemek için yapılabilecekler Ishimura ve diğ. (2010) tarafından sunulmuştur. Çalışmada, çözülme olayı sonlu elemanlar hesaplamaları ve deneyler yardımıyla incelenmiştir. Deneylerde altı köşe başlı somun kullanılmış olup flanşın yatak yüzeylerinde dış eğilme momentine bağlı hareketleri de izlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre sıkma torku değeri arttıkça bağlantının çözülmesinin zorlaştığı vurgulanmakta ve en efektif bağlantı seçeneğinin önceki çalışmada savunulan tezin aksine eksantrik somun kullanmak olduğu savunulmaktadır.

Yüksek hassasiyetli bilgisayarlı analiz yaklaşımlarında kullanmak üzere gelişmiş bir model Takahashi ve diğ. (2010) tarafından önerilmektedir. Bu model, gerçek uygulamalarda kullanılan cıvataların sıkma analizlerinde kullanılmıştır. Model yaklaşımı dört adımdan oluşmaktadır:

- Cıvatanın sıkılması olayı tanımlanır ve sıkmanın teknolojik temeller analizi yapılır.
- Problem tespit edilip görselleştirilir ve cıvata sıkma deneyleri yapılır.
- İki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak istatistiksel simülasyon yapılır.
- Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak istatistiksel simülasyon yapılır.

Çalışmada, uygulanan tork ve eksenel kuvvet grafiğinden sürtünme katsayısı ölçülmüş olup ortaya konan modelin cıvataların çözülme davranışlarının analizi için uygun olacağı vurgulanmaktadır.

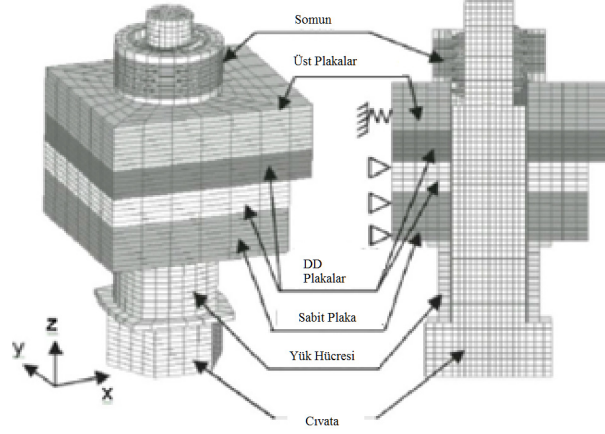
Kurban (1985) hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında, işletme kuvvetini dikkate alarak basınçlı kapların sızdırmazlığı için önemli olan elemanların özelliklerini ve yaylanma rijitliğinin öngerilmeye etkilerini araştırmıştır. Çalışmada:

- Cıvata bağlantısında öngerilmenin çalışma sırasında değişmemesi için yüzeylerin çok iyi işlenmesi gerektiği,
- Yorulma kırılmasını önlemek için Wöhler eğrisine göre cıvataadaki gerilme ve gerilme genliği değerleri azaltılarak daha uzun ömür sağlanabileceği,
- Bağlantıda sağlanacak uygun öngerilmenin bağlantının sızdırmazlığı sağlayacağı ve öngerilme değerinin flanş çapına bağlı olarak değiştiği,
- Cıvatanın ön yükleme değerinin cıvata malzemesinin akma gerilmesinin %75'ini geçmemesi gerektiği,
- Bağlantı güvenliği açısından az sayıda büyük çaplı cıvata yerine çok sayıda küçük çaplı cıvata kullanmanın daha uygun olacağı,
- Bağlantıya verilecek öngerilme değerini azaltmak için elastisite modülü daha küçük contaların kullanılabilmesi,
- Rijitlik oranının azalması parçalarda kalan öngerilme kuvvetini azaltacağından sızdırmazlık bakımından uygun olmayacağı ve
- Cıvata ve bağlanan parçaların malzemesi ve boyutları değiştirilmeden, elastik elemanlar kullanılarak rijitlik oranının değiştirilebileceği,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

Zhang ve diğ. (2007) tarafından cıvata bağlantısında kendi kendine çözülme olayındaki ikinci aşamayı ifade edebilmek amacıyla helis açısını da dikkate alan üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Kendiliğinden çözülmenin ikinci aşaması, "somunun ters yöne dönmeye bağlı olarak sıkma kuvvetinin kademeli olarak azalması" şeklinde ifade edilmektedir. Çalışmada bir cıvata ve somun ile tutturulmuş iki levha için simülasyonlar yapılmıştır. M12x1,75 cıvatanın kullanıldığı bağlantılar yanal veya kayma yüklerine maruz bırakılmıştır. Öngerilmenin uygulaması olayı, ortogonal genişleme sıcaklık metodu kullanılarak benzetilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri, çeşitli öngerilme ve iki kenetli levha arasındaki bağıl yer değiştirme durumları için yapılmıştır. Periyodik enine yük uygulanması sonucu cıvata ve somunu bağlayan dişlerin kontak yüzeyleri arasında küçük kaymalar olduğu gözlenmiştir. Enine eğilme momenti

dişlerin temas yüzeyleri üzerindeki basıncı değiştirmiştir. Cıvata bağlantısının kendiliğinden çözülmesine etkiyen ana mekanizmalar; dişler arasındaki küçük kayma ve dişlerin temas yüzeylerindeki basıncın değişimi olarak sunulmuştur. Bu mekanizmaları doğrulamak için geliştirilen sadeleştirilmiş sonlu elemanlar modeli Şekil 1'de görülmektedir.



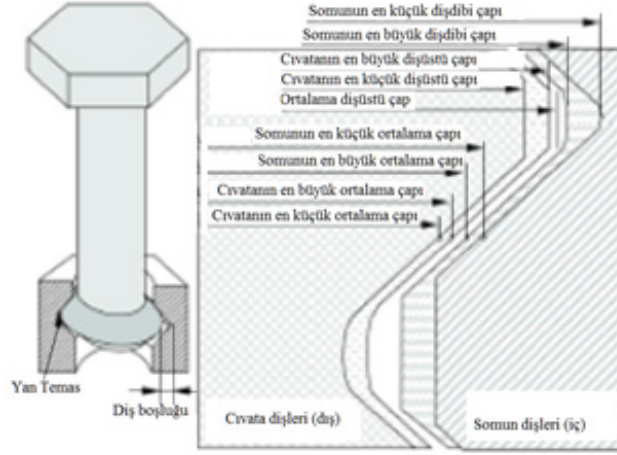
Şekil 1:
Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli

Bir diğer bilgisayarla model çalışmasında Shoji ve Sawa (2011) dış yükler ve sıcaklık etkileriyle cıvata bağının kendi kendine çözülme olayını Abaqus programını kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Bazı somunlarda yatay yük olduğunda çözülme daha zor oluşmaktadır.
- Statik ve dinamik koşulların her ikisinde de çözülme mekanizması, diş yüzeyleri arasında değişken sürtünme veya kesme gerilmesiyle ilişkilidir.
- Kendinden çözülmeyi azaltmak için, değişken gerilmeyi önleyerek daimi bir sürtünme bağının korunması önemlidir.
- Cıvata ve somun arasında sıcaklık farkının olması ve bu sıcaklığın periyodik olarak değişmesi durumunda da kendiliğinden çözülme olayı meydana gelebilir.
- Gerilme değerindeki değişimlerin somun çözülmesinde çok fazla bir etkisi olmayabilir.
- Cıvata ve somun arasındaki bağlı hareket, özellikle radyal yönde, değişken kayma gerilmesi üreterek kendiliğinden çözülmeye büyük bir etkiye sahiptir.

Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analizi kullanan çalışmalarında Pai ve Hess (2002) küçük kayma yüklerinde dahi kendinden çözülmenin meydana gelebileceğini göstermişlerdir. Bu durumun öngeri için cıvata bağlantılarının tasarımında dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Nassar ve Housari (2007) yayınlarında öngeri için bağlama elemanlarında (Şekil 2), titreşim kaynaklı çözülmelere delik boşlukları ve toleranslarının etkisi üzerine yaptıkları teorik ve deneysel çalışmaları sunmuşlardır. Çalışmada lineer olmayan bir model, periyodik enine yükleme altındaki kapağın titreşim kaynaklı çözülmesiyle oluşan öngeri kuvvetindeki azalmayı tahmin etmek için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda da sıkma torku varyasyonları ve öngeri değerinin enine yer değiştirmeye etkileri gözlenmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırıldığında, önerilen modelin kendiliğinden çözülme performansını doğru bir şekilde tahmin edebildiği anlaşılmıştır. Deneysel ve matematiksel model sonuçlarına göre cıvata ile somun dişleri arasındaki geçme değeri ne kadar sıkı olursa çözülme olayı da o kadar az oluşmaktadır. Ancak analitik sonuçlarda, diş boşluğu artırıldığında çözülme oranının neredeyse katlanarak arttığı görülmüştür.



Şekil 2:

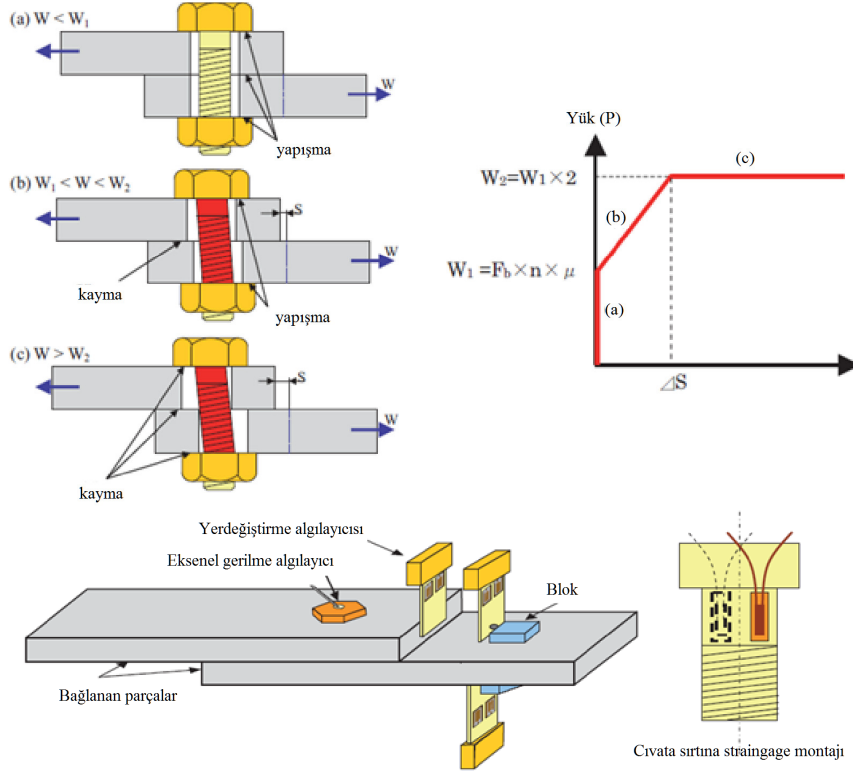
Cıvata ve somun dişleri arasındaki boşluk

Hattori ve diğ. (2010) ise cıvata-somun bağı ile birbirine bağlanan parçaların ara yüzeylerindeki kaymaların somunu gevşetecek şekilde dönmelere yol açtığı ve öngerilme kuvvetinin azaldığı sonuçlarını ortaya koymuştur. Yazarların plakaların izafi hareketlerini anlatan ve bu hareketlerin ölçülmesi için kullandıkları yaklaşım Şekil 3'te görülmektedir. Özellikle cıvata üzerine *straingage* montajı araştırmalar açısından yeni bir yaklaşımdır.

Sanclemente ve Hess (2007), cıvata bağlantılarında periyodik enine yüklere bağlı mekanik çözümler için deneysel çalışmalarını sunmuşlardır. Öngerilme kuvveti, bağlama elemanının elastisite modülü, nominal çap, delik boşluğu ve yağlama gibi ana parametrelerin çözümlere direnci üzerindeki etkisi çalışmada yer almıştır. Nominal çapın, hatve ve delik boşluğunun öngerilme kuvvetine etkisini analiz etmek için 64 adet deney yapılmış ve ardından çözülmeye karşı direncin tespiti için de istatistiksel analizlere başvurulmuştur. Çözülme davranışında en etkili parametrelerin öngerilme kuvveti ve cıvata elastisite modülü olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda çözülmeyi engelleyecek optimal koşulların; büyük öngerilme, düşük elastisite modülü, büyük çap, yağlama ve deliğe sıkı şekilde geçme şeklinde sıralanabileceği vurgulanmıştır.

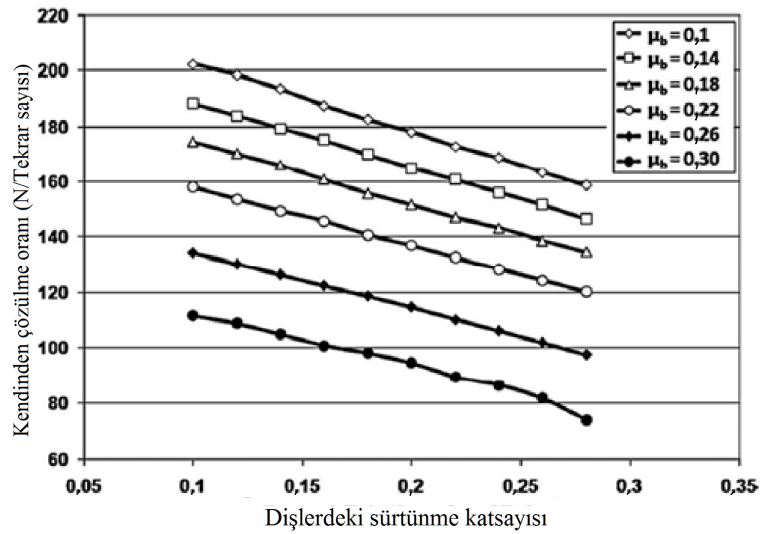
Periyodik kuvvetlere maruz havşa başlı cıvataların, kendiliğinden çözülme davranışını incelemek için lineer olmayan bir model Zaki ve diğ. (2010) tarafından önerilmiştir. Cıvata üzerinde etkiyen burulma momenti bileşenlerinin, vida diş sürtünmesine giden ve faydalı moment (çözülmeye karşı direnç momenti) olarak ikiye ayrıldığı modelde, kalan net burulma momentinin yanal dış tahrik kuvvetlerine karşı cıvatanın çözülme davranışını belirlediği görülmektedir (Şekil 4). Çalışmada ayrıca ince ve kaba dişlere sahip bağlama elemanlarının çözümlerinde diş ve baş altı sürtünme katsayılarının etkileri üzerinde de durulmuş ve sunulan kendiliğinden çözülme davranış modelinin doğrulanması için deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Radyoaktif malzeme paketleri genel olarak cıvataların sığıdığı kapaklar tarafından kapatılır. Bu cıvata bağları, paketin kapağını muhafaza etmeli ve üzerine gelecek iç basınç, titreşim ve darbe yüklerine karşı koyabilecek dayanıma sahip olmalıdır. Böyle önemli bir bağlantıda, cıvataların normal paketleme şartları esnasında cıvataya gelen yüklerle ve uygulanan sıkma torku arasındaki ilişki Smith (2010) tarafından araştırılmıştır. Deneylerde cıvata dişlerinin yağlanmış ve kuru olduğu hal incelenmiş ve sonuçların neredeyse her cıvata bağında önemli sapmalar gösterebildiği vurgulanmıştır. Ayrıca dişlerin yağlanması halinde cıvataya daha fazla tork aktarılabileceği hesap ile gösterilip deneysel olarak da kanıtlanmıştır.



Şekil 3:
Sıkılan parçaların birbirine göre izafi hareketinin tespiti

Yokoyama ve diğ. (2012) tarafından eksenel yüke maruz kalmış cıvatalardaki çözülme mekanizması üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan model önceki teorilere de uyumu denenmiş bir modeldir. Model için ayrıca bir test makinesinde çözülme olayı da incelenmiştir. Somun dönme açısı ile uygulanan tork arasındaki bağıntıların doğrulandığı bir çalışmadır.



Şekil 4:
Dişler üzerindeki sürtünme katsayısının kendinden çözülmeye etkisi

Sakai tarafından 1978 yılında gerçekleştirilen temel çalışmada vidalı bağlantılardaki sürtünme katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Cıvatalardaki ve somunlardaki yağlamanın etkisi, dağılımı ve sürtünme katsayısına etkisi elde edilmiştir. Bazı kaplama materyallerinin sürtünme katsayısını düşürdüğü öngörülerek çeşitli deneyler ile kontrol edilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısı sabitleyicileri ile yapılan testler sonucunda bu malzemelerin sürtünme katsayısını sabitlemede etkili olduğu bulunmuş, kullanılabilirlikleri ispatlanmıştır. Dişlerdeki sürtünme katsayısının belirlenmesi ve sürtünme katsayısının çözülme olayına etkilerinin açıklanması açılarından temel bir çalışmadır.

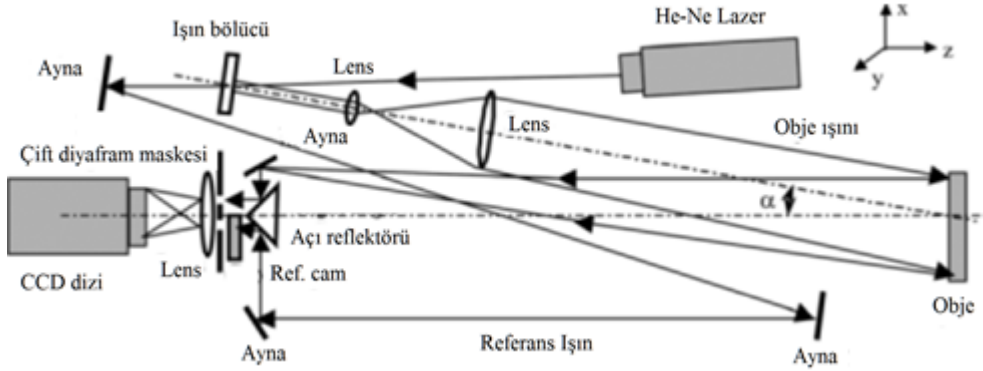
Bir cıvatanın eksenel rijitlik değeri, titreşimli yükler altında bağlantının çözülme davranışını belirlemede kritik bir rol oynar. Bağlantı elemanlarında en sık görülen hata olduğundan kendiliğinde çözülme olayının mekaniğini anlamak önemlidir. Çözülme davranışının araştırılması amacıyla Zadoks ve Kokatam (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada cıvatanın eksenel rijitliğini belirlemek için bir plakaya sabitlemiş bir cıvatanın 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Cıvatanın bağlı olduğu plaka da cıvatanın eksenel rijitliğini etkilediğinden modele eklenmiştir. Plakaya bağlanan cıvatanın dışında küçük pimler oluşturulmuş ve bu pimler üzerinden modele eksenel çekme kuvveti uygulanmıştır. Etki eden kuvvetler ve buna bağlı cıvata üzerindeki uzamaları temel alan modelin sonuç hedefi cıvata çözülme davranışının daha iyi bir şekilde ifade edilebilmesidir. Ayrıca kurulan modelin enine yüklerle zorlanan cıvata bağları için de önemli bir yaklaşım olabileceği savunulmaktadır.

Öngerilmeli cıvata bağlantılarında sıkma torklarının cıvatanın yorulma ömür performansına etkisi teorik olarak Minguez ve Vogwell (2005) tarafından araştırılmıştır. Öncelikle, sıkma torkunun bağlanan parçada bası, cıvata çekme gerilmesi oluşturduğu, dışarıdan etkiyen çekme kuvvetinin uygulandığı halde bunun parçalar tarafından alındığı, bu durumun cıvata gerginliğinde hafif bir azalma meydana getirmesine rağmen basıncı da azalttığı vurgulanmıştır. Bu sayede bağlantıdaki öngerilmeli cıvata yorulma davranışına etkisinin, yüksek değişken yüklerle düşük ortalama yükten, düşük bir değişken yüklerle yüksek bir ortalama yüke doğru olduğu ve bunun yorulma davranışı için faydalı olacağı belirtilmiştir.

Alkatan ve diğ. (2007) cıvata bağının sıkma süreci ve yorulma davranışlarında önemli olan bağlantının eksenel rijitlik hesabı için bir modelleme tekniği önermişlerdir. Sonlu elemanlar modeli deformasyona uğrayan parçaların enerjisindeki artış üzerine kurulmuş olup modelde sürtünme katsayısı ve malzeme tipi de dikkate alınmaktadır. Teorik yaklaşım ayrıca bir deneysel çalışma ile de desteklenmiş olup sunulan model basit bir yapıda olmasına rağmen çok kompleks uygulamalar için de kullanılabilir.

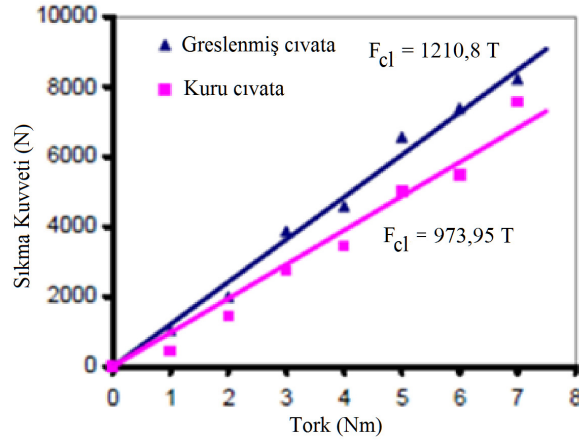
2.2. Öngerilme kontrolü

Öngerilmeli cıvata bağları oluşturulurken sıkma torkunun doğru şekilde uygulanması çok önemlidir. Yeni bir sıkma torku uygulama metodu Hashimura ve diğ. (2008) tarafından önerilmektedir. Bu metot ile sıkma torku çok daha hassas şekilde kontrol altında tutulabilmekte, böylece cıvata bağları da daha uzun ömürlü olabilmektedir. Sıkma işlemi, istenilen sıkma kuvvetine karşılık gelen bir kuvvetle cıvata somuna doğru çekilerek aynı anda da somunun sıkılmasıyla yapılmaktadır (Şekil 5). Bu yöntemin uygunluğunu kanıtlamak için yapılan deneysel çalışmalar da yayında sunulmaktadır. Normal sıkma torku uygulamalarında görülen $\pm\%50$ 'ye varan sapmalar bu metot ile $\pm\%10$ 'a düşürülmüştür.



Şekil 6:

Düzlem dışı deformasyon ölçümü için geliştirilen DSPI sisteminin şeması



Şekil 7:

Cıvata dişlerinin yağlanmasıyla öngerilme kuvveti oluşumuna etkisi

Yağlamanın cıvata sıkma torku ve öngerilme üzerine etkisini inceleyen detaylı bir çalışma Zou ve diğ. (2007) tarafından sunulmuştur. Deneysel farklı alt türleri de olmak üzere; yağ, gres ve katı yağ şeklinde üç farklı yağlama elemanı parçaya değen cıvata başına altına, cıvata ve somun dişlerine sürülmüş ve laboratuvar ortamında giriş torku, şafttaki gerilme, dişlerde harcanan sürtünme momenti ve cıvata başının açılma dönme miktarı değerleri ölçülmüştür. Her bir testte; cıvata beş kez sökölüp takılmış, bu arada hız değerleri de 1 ile 100 d/dk arasında değiştirilmiştir. Araştırmaların sonucunda yağlamanın sürtünme ve sıkma torku davranışında belirleyici etken olduğu gözlenmiştir. Gres ve yağın birbirine benzer özellikler gösterdiği sonuçlara göre en iyi bağlama davranışı katı yağlayıcılar ile yapılan bağlantılarda gözlenmiştir.

Alüminyum malzemeden imal edilmiş motosiklet süspansiyon elemanlarının cıvata kullanılarak yapılan bağlantılarında sürtünme katsayılarını belirlemek ve sıkma torku ile öngerilme kuvvetini ilişkilendirme amacıyla bir deneysel yöntem Majzoobi ve diğ. (2005) tarafından önerilmiştir. Bu tür bağlantılarda cıvatalar özel olarak öngerilme kuvvetinden kaynaklanan eğilme gerilmesine de maruz kalmaktadır. Çalışmada; cıvatalar bir İngiliz anahtarı ile yüklenmiş olup şekil değiştirmelerin ölçümünde *straingage* kullanılmıştır. Sıkma kontrol metodunun tespiti ve doğru bir matematik model için yapılan ön denemelerde, gerekli sürtünme katsayısı değerleri ve bunların sıkma momentine etkisi ile birlikte cıvataların ömrü de deneysel olarak incelenmiştir.

Koshti (1998) tarafından cıvata bağlarındaki öngerilmenin ölçülmesinde bir ultrasonik metot önerilmiştir. Deneylede kullanılan cihaz ile cıvata oluşan eğilme gerilmeleri de ölçülebilmektedir. Çalışmada öncelikle ultrasonik ölçüm deneyleri yapılmış ve bunların sonuçlarından yararlanılarak öngerilme değerinin ifade teorisi geliştirilmiştir. Cıvata şaftında oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler buradan yansıyan sesin yapısında da değişikliklere neden olmaktadır. Bu yaklaşımla ultrasonik dalgalarla cıvata üzerindeki eğilme gerilmelerinin de ölçülebileceğini kanıtlamıştır.

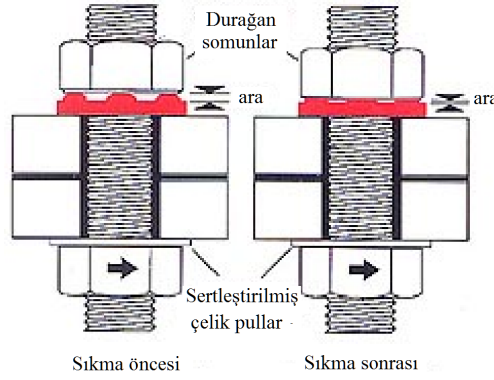
Özellikle kritik cıvata bağlantılarında bağlantının çözülmemesi için sıkma torklarının doğru şekilde uygulandığına karar vermek için ölçme olayı önem kazanmaktadır. Marshall ve diğ. (2010) de çalışmalarında ultrasonik temellere dayanan ve cıvata sıkma momentinin değerinin anlaşılmasını amaçlayan bir yöntem önermektedirler. Çalışmada ayrıca bağlantının en iyi şekilde yüzeye dağıtılmış bir basınç oluşturabilmesi için farklı pulların kullanımı da incelenmiştir. Bağlantı modeli oluşturulmuş ve önerilen hesaplamalar deneyler ile uyumu açısından kontrol edilmiştir.

2.3. Kendinden çözülmenin engellenmesi

Çözölmeye karşı emniyet için kullanılan çeşitli modern kilitlemeli bağlantı elemanları (örneğin nylock somunu, aerotight somunu, kimyasal kilitleme yöntemi (yapıştırma), cleve loc somunu, düz rondela, nylon rondela, dişli rondela, yaylı rondela) Bhattacharya ve diğ. (2010) tarafından değişik malzeme, boyut ve tipteki cıvatalar için, test düzeneğinde oluşturulan hızlandırılmış titreşim koşullarında, çeşitli sıkma kuvveti değerlerinde bağlantı emniyeti testlerine tabi tutulmuşlardır. Deney sonuçlarına göre sıkma kuvvetindeki azalmanın, çözölmeye derecesini belirlediği görölmüştür. Ayrıca cıvata bağındaki çözölmeye başlangıç sıkma torku ile ilişkisi de ortaya konmuştur. Yapılan kıyaslama çalışmasının sonucunda, kimyasal kilitlemenin nylock ve aerotight somununa göre daha etkin bir yöntem olduğu görölmüştür.

Friede ve Lange (2009), özellikle tekrarlı yüklerin olduğu vinç, asansör, baca ve köprülerde karşılaşılan cıvata bağının kendiliğinden çözölmeye mekanizmalarını analiz etmek için TU Darmstadt'ta gerçekleştirilen çalışmaları tanıtmışlardır. Cıvata bağlantılarını kendiliğinden çözölmeye olayından korumak için yapısal bir çözüm bulma amacıyla başlatılan çalışmalarda, önemli parametreleri belirlemek için çeşitli ön testler yapılmıştır. Özellikle sıkma boyundaki değişimler incelenmiş ve sıkma boyunun, yük çevrimine bağlı öngerilmeye etkileri grafiklerle gösterilmiştir. İki parçanın bir arada tutulduğu klasik bir cıvata bağında kendinden çözölmeye engellemek için beş öneri şu şekilde sıralanmıştır: Öngerilmeye arttır, uzun ve ince cıvata kullan, sıkma boyunu büyüt ve olası cıvata yer değiştirmelerini daha uygun cıvata kullanarak küçült ve sürtünme katsayısını büyüt. Çalışmanın sonucunda, bağlantıda kayma nedeniyle meydana gelen periyodik enine yer değiştirmelerin, öngerilme kuvvetini azaltarak kendinden çözölmeye kolaylaştırdığı vurgulanmıştır. Oluşan enine yer değiştirmeler bağlantıyı bir miktar gevşettiği takdirde, çok düşük bir yük çevriminde dahi öngerilmenin tamamen kaybolacağı da belirtilmiştir.

1998 yılında yapılan çalışmanın ardından hazırlanmış olan raporda bağlantı elemanlarının ayarlarında Doğrudan Gerilim İndikatörleri (DTI, Şekil 8) kullanımının sonuçları araştırılmıştır. Denemelerde somun-cıvata-rondela montajı ile somun-cıvata-DTI montajı Junker'ın enine titreşim-çözölmeye test düzeneği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarının, titreşim kaynaklı çözölmeye önlemede veya tamamen önlenemeyen yerlerde etkilerini azaltmada, cıvata ile bağlama stratejilerinin düzenlenmesinde faydalı olacağı vurgulanmıştır. DTI'nin titreşim kaynaklı çözölmeye karşı çok iyi direnç gösterdiği yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır.



Şekil 8:

Direct Tension Indicators (DTIs), (Kaynak: <http://fastorq.com>)

Çift somun ve yaylı rondela kullanılarak, M10 cıvata bağının enine yükler karşısında çözülmeye karşı emniyete alınma mekanizmaları Izumi ve diğ. (2009) tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, eğer sıkma prosedürüne dikkat edilirse çift somunun çözülmeyi önleyebileceği ancak yaylı rondelanın çözülmeyi kolaylaştırıcı yönde etkideği vurgulanmıştır.

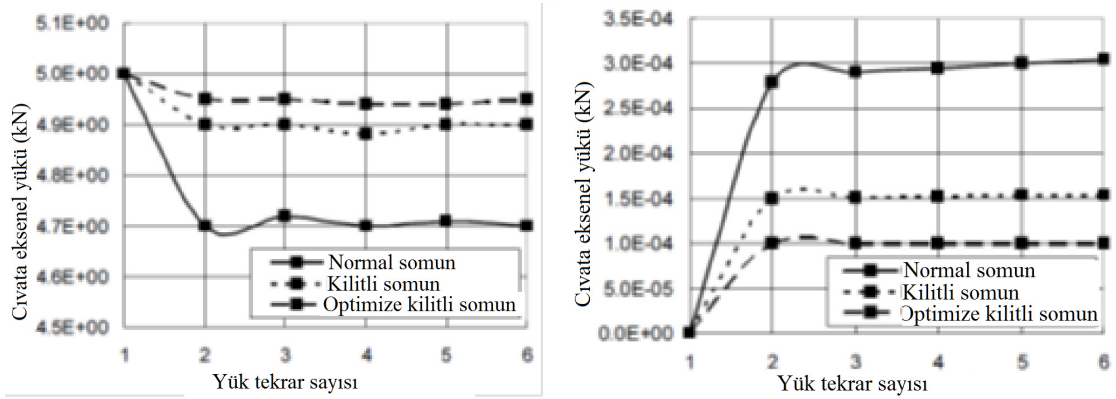
Cıvata bağlarının kendi kendine çözülmesini engellemek amacıyla bağlantıda, şekil hafızalı alaşımlardan (SMA: Shape Memory Alloys) imal edilmiş pullar kullanımı Antonios ve diğ. (2006) tarafından analiz edilmiştir. Elektronik olarak hazırlanan sıcaklık değişimleri ile kontrol edilebilen SMA malzemeden imal edilen rondelalar çok hassas kullanımlar için, bağlantıdaki yükte uyumlu şekilde uzayıp kısılmakta ve öngerilme kuvvetinin kaybolmasını engellemektedir.

Yang ve diğ. (2010) tarafından sunulan çalışmada tekrarlı enine yüklerle zorlanan mekanizmalarda cıvatalı bağlantıların kendinden çözülmesini engellemek için bir yöntem önerilmektedir. Bu model deneysel olarak da doğrulanmış olup kendi kendine çözülmeyi doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Çalışmanın sonucunda oluşturulan modelin ışığında daha az rijit olan, boyu daha uzun ve elastisite modülleri düşük cıvataların daha zor çözülmeye olayı ile karşılaşacağı vurgulanmıştır.

Cıvata bağının çözülmesini engellemek amacıyla ortaya konmuş tekniklerin bir tanesi de Jung ve diğ. (2009) tarafından getirilen, aksel tekrarlı yüklemelerden sonra gevşeyen vidaların çözülmesini engellemek için cıvata bağına yay ekleme önerisidir. Bu yöntemde yay somuna sürekli bir öngerilme kuvveti uygulanmasını sağlayarak çözülmeye mekanizmasının oluşmasını önleyecektir. Çalışmada; cıvatanın, somunun, yayın ve titreşim plakasının üç boyutlu modelleri oluşturulup sonlu elmalar analizlerine tabi tutulmuşlardır. Bu testler sonucunda kullanılacak yay optimize edilmiş ve üretilmiştir. Bu üretilen yeni yaylı bağlantının klasik cıvata-somun bağlantısıyla karşılaştırması yapılmış ve yeni modelin etkinliği doğrulanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen optimizasyon çalışması ile bağlantı daha da iyileştirilmiştir. Geliştirilen sistem elemanları ve deneysel sonuçlar Şekil 9'da görülmektedir.



Geliştirilen somun ve yay



Şekil 9:

Cıvata-somun-yay bağlantısı ve deneysel sonuçlar

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu yayında; öngörülmesi gereken cıvata bağlarında yaşanan çözülme olayının nedenleri irdelenmiş ve literatürde mevcut bazı çalışmalardan örnekler verilmiştir. Buna göre cıvata ile somun arasındaki izafi dönme hareketi nedeni ile yaşanan çözülme engellemenek için aşağıdaki tedbirler alınabilir:

1. Vida helis açısı küçültülebilir: İzafi kayma helis açısıyla doğru orantılıdır. Helis açısı sürtünme açısından büyük olursa otoblokaj şartı sağlanmaz, sürtünme bağı oluşmaz. Helis açısı sıfıra düşürülürse de bu kez dişe döndürme momenti uygulanamaz.
2. Diş tepe açısı mümkün olduğunca küçük yapılabilir: Küçük flanş açıları cıvatanın sıkılması için gereken torku büyütür, bu durum ve titreşim esnasında somunun ters yönde dönmesini engeller.
3. Somunun alt yüzeyi ve bağlanan parçaların üst yüzeyi arasındaki izafi kaymayı azaltmak için araya konik bir eleman konulabilir. Bu uygulamada temas alanındaki sürtünme kuvvetleri büyürken montaj zorlaşır.

Bu önerilerin dışında çözülme engellemenek amacıyla literatürde mevcut *kilitleme elemanları* ortak adı ile gruplanan çeşitli elemanlar da mevcuttur. Birçok kilitleme elemanı günümüzde çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Amerikan ulusal standartlar alt komitesine göre üç temel kilitleme kategorisi vardır: Serbest dönenler, sürtünmeli kilitler ve kimyasal kilitler.

- a) Serbest dönen mekanizmalar: Bu mekanizmada düz cıvata ve cıvata başının altında dişler yer alır. Bu dişler, cıvatanın sıkma yönünde dönmesine izin verecek şekilde eğimlidirler. Çözülme yönünde dönmek istediğinde ise yüzeye kilitlenerek buna izin vermezler.
- b) Sürtünmeli kilitler: Bu grup iki alt bölüme ayrılabilir; metalik ve metalik olmayanlar. Mekanik sürtünme kilidinde genellikle çarpıtılmış dişleri olan bir somun, sıkma torkunun

kaybolmamasını sağlar ki bu gruba Philidas somunu örnek verilebilir. Metal olmayan bağlarda ise plastik ara elemanlar vardır ve bunlar dışi kilitlerler.

- c) Kimyasal kilitler: Cıvata ve somun dişleri arasındaki boşlukları doldurarak bunları birbirine bağlayan yapıştırıcılar bu gruba girerler. Mikro kapsüller şeklinde elde edilen bazı yapıştırıcılar cıvata üzerine sıkılma işlemi öncesinde sürülerek kullanıma sunulmaktadır.

Cıvata bağlarını doğru şekilde ortaya koyabilmek için sonuç olarak şunlara dikkat edilmelidir:

1. Cıvata malzemesinin yanısıra sıkılan parça malzemesinin de kendinden çözülme davranışı üzerine önemli katkısı olduğu unutulmamalıdır.
2. Paslanmaz çelikten yapılmış cıvatalar yüksek mukavemetli çelik ve düşük karbonlu çelikten yapılmış cıvatalara göre çözülmeye karşı daha dirençlidirler.
3. Farklı çözülme emniyet mekanizmalarının test sonuçlarına göre; en iyi sonuç yapıştırma bağında ardından da nylock ve aerotight somunlarında görülmüştür. Kötü titreşim koşullarında nylock ve aerotight somunlar özelliklerini kaybetmekle birlikte tork kaybını önemli ölçüde azalttıkları için kullanılabilirler. Bunun gibi yeni çözümler sürekli takip edilmelidir.
4. Yaylı rondela ve iç/dış tırtıllı rondelalar da çözülme olasılığını düşürürler ancak sadece bir kez kullanılıp atılmalıdır.
5. Düz pullar ile naylon pulların çözülmeyi engelleme konusunda bir etkileri yoktur ama yaylı rondela ve çift somun uygulaması az da olsa çözülmeye karşı bir direnç gösterebilir.
6. Metrik vidalar sıkma kuvvetlerinin artırılması ile daha büyük bir temas alanına sahip olduklarından olası deformasyonu düşürürler.

KAYNAKLAR

1. Alkatan F., Stephan P., Daidie and Guillot J. (2007). Equivalent axial stiffness of various components in bolted joints subjected to axial loading, *Finite Elements in Analysis and Design*, 43, 589 – 598.
2. Antonios C., Inman D. J. and Smaili A. (2006) Experimental and theoretical behavior of self-healing bolted joints, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17, 499-509.
3. Bhattacharya A., Sen A. and Das S. (2010) An investigation on the anti-loosening characteristics of threaded fasteners under vibratory conditions, *Mechanism and Machine Theory*, 45, 1215–1225.
4. Friede R. and Lange J. (2009) Self loosening of prestressed bolts, *Nordic Steel Construction Conference NSCC2009*, Malmö, 2-4 Sept. 2009, 272-279.
5. Hashimura S., Komatsu K., Inoue C. and Nakao T. (2008) A new tightening method of bolt/nut assembly to control the clamping force, *Journal of Advanced Mechanical Design*, 2 (5), 896-902.
6. Hattori T., Yamashita M., Mizuno H. and Naruse T. (2010) Loosening and sliding behaviour of bolt-nut fastener under transverse loading, *EPJ Web of Conferences* 6, 08002, DOI:10.1051/epjconf/20100608002.
7. Ishimura M., Sawa T., Karami A. and Nagao T. (2010) Bolt-nut loosening in bolted flange connections under repeated bending moments, *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels&Piping Division/K-PVP Conference PVP2010*, July 18-22, 2010, Bellevue, Washington, USA, 1-9.

8. Izumi S., Yokoyama T., Kimura M. and Sakai S. (2009) Loosening-resistance evaluation of double-nut tightening method and spring washer by three-dimensional finite element analysis, *Engineering Failure Analysis* 16, 1510–1519.
9. Jung P., Park T., Yoon J., Jun K. and Chung W. (2009) Design optimization of spring of a locking nut using design of experiments, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(4), 77-83.
10. Koshti A. (1998) Ultrasonic measurement of the bending of a bolt in a shear joint, *Experimental Mechanics*, 38(4), 270-277.
11. Kurban A.O. (1985) *Cıvata bağlantılarında ve sızdırmazlığın önemli olduğu sistemlerde ön gerilmenin dinamik yükleme açısından incelenmesi*, Erciyes Ün. Fen Bil. Enst. Yüksek Lisans Tezi, 1985. s 143.
12. Majzoobi G.H., Farrahi G.H, Hardy S.J., Pipelzadeh M. K. and Habibi N. (2005) Experimental results and finite-element predictions of the effect of nut geometry, washer and teflon tape on the fatigue life of bolts. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 28, 557–564.
13. Marshall M. B., Zainal I. and Lewis R. (2010) Influence of the interfacial pressure distribution on loosening of bolted joints, *Strain*, 47, 45-78.
14. Meng A. and Nassar S.A., (2011) A novel optical method for real-time control of bolt tightening, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 133 Dec 2011, 1-5.
15. Minguez J.M. and Vogwell J. (2005) Theoretical analysis of preloaded bolted joints subjected to cyclic loading, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 33(4), 349-357.
16. Nassar S.A. and Housari B.A. (2007) Study of the effect of hole clearance and thread fit on the self-loosening of threaded fasteners, *Transactions of the ASME*, 129, 586-594.
17. Pai N.G., and Hess D.P. (2002) Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load, *Engineering Failure Analysis*, 9, 383–402.
18. Pratt J. D. and Pardoen G. (2002) Numerical modeling of bolted lap behavior, *Journal of Aerospace Engineering*, Jan. 20-30.
19. Ramey G.E. and Jenkins R.C. (1995) Experimental analysis of thread movement in bolted connections due to vibrations, Research Project NAS8-39131, *Final Report*, 176.
20. Report: *Transverse vibration loosening characteristics of high-strength fastened joints using direct tension indicators (DTIs)*, Research Report, SPS Contract Research, Jenkintown, PA, July 1998.
21. Sakai T. (1978) The friction coefficient of fasteners, *Bulletin of the JSME*, 21, 333-340.
22. Sanclemente J.A. and Hess D.P. (2007) Parametric study of threaded fastener loosening due to cyclic transverse loads, *Engineering Failure Analysis*, 14, 239–249.
23. Sawa T., Ishimura M. and Karami A. (2010) A bolt-nut loosening mechanism in bolted connections under repeated transverse loadings, *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division/K-PVP Conference PVP2010 July 18-22, 2010*, Bellevue, Washington, USA. 1-7.
24. Shoji Y. and Sawa T. (2011) Self-loosening of nuts due to external Load, *SIMULIA Customer Conference*, 1-15.

25. Smith A. C. (2010) Evaluation of torque vs closure bolt preload for a typical containment vessel under service conditions, *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels&Piping Division/K-PVP Conference PVP2010 July 18-22, 2010, Bellevue, Washington, USA.* 1-8.
26. Takahashi T., Ueno T., Yamaji M. and Amasaka K. (2010) Establishment of highly precise CAE analysis model using automotive bolts, *International Business & Economics Research Journal*, 9 (5), 103-113.
27. Vand E.H., Oskouei R. H. and Chakherlou T. N. (2008) An experimental method for measuring clamping force in bolted connections and effect of bolt threads lubrication on its value, *Proceedings of World Academy of Science and Technology*, 36, 457-460.
28. Yang X., Nassar S. and Wu Z. (2010) Formulation of criterion for preventing self-loosening of threaded fasteners due to cyclic transverse loading, *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels&Piping Division/K-PVP Conference PVP 2010 July 18-22, 2010, Washington, USA.* 1-11.
29. Yang X. and Nassar S. (2010) Vibration-induced loosening performance of threaded fasteners, *Proceedings of the ASME 2010 Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels&Piping Division/K-PVP Konferansı PVP 2010 July 18-22, 2010, Washington, USA.* 1-10.
30. Yokoyama T. Olsson M., Izumi S. and Sakai S. (2012) Investigation into the self-loosening behavior of bolted joint subjected to rotational loading, *Engineering Failure Analysis*, 23 35-43.
31. Zadoks R. and Kokatam D. (2001) Investigation of the axial stiffness of a bolt using a three-dimensional finite element model, *Journal of Sound and Vibration*, 246 (2), 349-373.
32. Zaki A.M., Nassar S.A. and Yang X. (2010) Effect of thread and bearing friction coefficients on the self-loosening of preloaded countersunk-head bolts under periodic transverse excitation, *ASME Journal of Tribology*, 132, 031601-1-11.
33. Zhang M., Jiang Y. and Lee C.H. (2007) Finite element modeling of self-loosening of bolted joints, *Transactions of the ASME*, 129, Feb. 2007, 218-226.
34. Zou Q., Sun T.S., Nassar S.A., Barber G. C. and Gumul A.K. (2007) Effect of lubrication on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners, *Tribology Transactions*, 50, 127-136.

Alınma Tarihi (Received) : 09.04.2013
Düzeltilme Tarihi (Revised) : 21.03.2015
Kabul Tarihi (Accepted) : 27.03.2015