

Araştırma Makalesi – Research Article

Ağır Ticari Araç Hidrolik Direksiyonlarında Kullanılan Burulma Millerinin Burulma Katsayılarının Deneysel Olarak Belirlenmesi

Experimental Determination of Torsional Coefficients of Torsion Shafts Used in Heavy Commercial Vehicle Hydraulic Steering

Ozan Özdemir^{1*}, İbrahim Savaş Dalmış², Sait Özmen Eruslu³

Geliş / Received: 13/09/2021

Revize / Revised: 07/03/2022

Kabul / Accepted: 04/04/2022

ÖZ

Bu çalışmada ağır ticari araç hidrolik direksiyonlarında geri toplamayı sağlayan burulma millerinin burulma katılıkları teorik, numerik ve deneysel olarak hesaplanmıştır. Numerik çalışmada ANSYS programı kullanılarak burulma milinin maksimum burulma miktarı olan 7° burulma halinde oluşan tork değeri elde edilmiştir. Tork-açı sensörü kullanılarak oluşturulan test düzeneğinde numunelerin tork-açı grafikleri elde edilmiş ve ekstrem burulma olan +/-7° aralığında burulma için burulma katsayıları deneysel olarak hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel burulma katsayısı değerleri teorik ve numerik değerler ile karşılaştırıldığında deneysel ölçüm teorik değerlere göre yüksek sonuç vermiştir. Efektif burulma katsayısının teorik değere göre yaklaşık %5 daha yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmamızda ayrıca burulma katılığına bağlı olarak burulma doğal titreşim frekansı 5 farklı numune için teorik ve numerik olarak elde edilmiş, burulma mili rezonansının direksiyon düzeneğine etkileri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Burulma Mili, SEA, Sonlu Elemanlar, ANSYS, Burulma Katsayısı

ABSTRACT

In this study, the torsional stiffness of torsion shafts that provide recovery in heavy commercial vehicle powersteering was calculated theoretically, numerically and experimentally. In the numerical study, using the ANSYS program, the neck torque value, which is the maximum torsion amount of the torsion shaft, which is 7° torsion, was obtained. Torque-angle graphs of the samples were obtained in the test setup using the torque-angle sensor, and the torsion coefficients were experimentally calculated for torsion in the extreme torsion range of +/- 7°. When the experimental torsion coefficient values obtained were compared with the theoretical and numerical values, the experimental measurement gave higher results than the theoretical values. It has been observed that the effective torsion coefficient is approximately %5 higher than the theoretical value. In our study, torsional natural vibration frequency depending on torsional stiffness was obtained theoretically and numerically for 5 different samples, and the effects of torsion shaft resonance on the steering mechanism were discussed.

Keywords- Torsional Shaft, FEA, Finite Element, ANSYS, Torsional Stiffness

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: ozdemir.ozan187999@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8945-9157>)

B/S/H GmbH, Kızılpınar, BSH Cd. Çerkezköy/Tekirdağ

²İletişim: idalms@nku.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4401-9155>)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Üniversite Adı, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ

³İletişim: oerulu@nku.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2942-378X>)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Üniversite Adı, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ

I. GİRİŞ

Dairesel kesitli millerin burulması ve burulmadan kaynaklanan titreşimi makine ve inşaat elemanlarının projelendirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Güç aktarma hatlarında, makine parçalarının tasarımında ve makinaların işlevlerinin uygulanma imkânı olan bölümlerinde; imkanlar dahilinde mümkün olduğu kadar dönme hareketi yapabilen eleman ve parçalar kullanılmaya çalışılmaktadır [1]. Literatürde burulmaya maruz kalan elemanlar üzerinde yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Wu ve ark. yüksek gerinim aralığında alüminyumun burulması üzerinde çalışmışlardır. Yüksek saflıkta dökme ve çekme alüminyum malzeme üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir [2]. Stanzl-Tschegg ve ark. malzemelerin burulma yükleri altında yorulma özelliklerini tespit edebilmek adına yeni bir deneysel ekipman ve metod geliştirmişlerdir [3]. Baranoğlu yüksek lisans tezinde statik burulmanın aşırı çekilmiş çelik tellerin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir [4]. Mutasher çalışmasında hibrid alüminyum/kompozit milin maksimum burulma kapasitesini araştırmak için ANSYS programında sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanmıştır [5]. Uymaz ve ark. direksiyon kutularında burulmaya bağlı titreşim etkilerinin azaltılması için giriş mili ve burulma milinin doğal frekanslarını düşürmek üzere bir yöntem önerisinde bulunmuştur [6]. Akın gerçekleştirmiş olduğu yüksek lisans çalışmasında kardan şaftların statik yorulma testlerinin gerçekleştirilebilmesi için hidrolik bir burulma test tezgâhı tasarlamıştır [7]. Patil ve ark. sonlu elemanlar yöntemi kullanarak kompozit burulma millerinin burulma ile bel verme (torsionalbuckling) mekanizmalarını araştırmışlardır. Çalışmalarında hem analitik hem de ANSYS programı ile sonlu elemanlar metodu kullanmışlardır [8].

Direksiyon sistemleri, araçlarda tekerlerin ve dolayısıyla aracın yönünü kontrol etmek amacı ile kullanıldığından taşıt içerisindeki yolcuların güvenliğini çok yakından etkileyen bir sistemdir. Ayrıca yol-sürücü arasındaki etkileşimde de büyük rol oynayan bir sistem olduğundan dolayı, sürüş konforunu da doğrudan etkiler. Sürüş konforu ve güvenliği kapsamında direksiyon sisteminden beklenen özellikler, direksiyonun istenen yöne kolaylıkla yönlendirilebilmesi, dar ve virajlı yollarda kolay ve güvenli bir dönüş yapabilmesi için iyi bir manevra kabiliyetine sahip olması, direksiyon simidini çevirmek için gereken kuvvetin uygun olması (araç hızlı giderken simidi çevirmek zor, araç dururken veya yavaş giderken kolay), direksiyon simidinin dönüşlerden sonra kendi kendini toplayarak orta konuma gelebilmesi, bozuk yol yüzeylerinden kaynaklanan darbelerin direksiyon hâkimiyetini en az düzeyde engelleyerek güvenli sürüşe engel olmaması, şeklinde sıralanabilir.

Direksiyon davranışının müşteriler üzerinde doğrudan etkisi vardır. Aracın karakterinin algılanması, direksiyon simidi sürüş durumu hakkında bilgi sağlar; bu nedenle direksiyon sistemi, sürücünün rehberlik davranışını doğrudan etkiler[9]. Bu alanda literatürde yapılmış çalışmalar mevcuttur. Johannesson ve Lillberg elektronik dümenleme sistemlerinde farklı kontrol stratejilerinden faydalanarak araç dinamiği, direksiyon torku ve direksiyon simidi açısı gibi değişkenler arasındaki transfer fonksiyonlarını elde etmişlerdir [10]. Data ve ark. elektronik ve hidrolik dümenleme sistemlerinin araç üzerinden demontajına gerek duyulmadan sistem parametrelerinin tayin edilmesini sağlamak üzere bir test sistemi oluşturarak dümenleme oranı, karakteristik eğri, sürtünme kuvvetleri dümenleme oranı gibi parametrelerin tespitini yapmışlardır [11]. Hidrolik direksiyon sistemlerinde kullanılan burulma milleri direksiyonun dönme hareketi sırasında burulma yayı görevi görerek enerjisi depolar ve direksiyonun geri toplamasını sağlar. Bu anlamda kullanılacak olan burulma mili seçilirken burulma katsayısının doğru bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Elektrohidrolik direksiyon sistemlerinde stabilitede önemli bir faktördür, stabilite sorunları direksiyon geri dönüşleri sırasında sınırlı döngüye sebep olabilir bu limitli döngü sistemde titreşim ve gürültü problemleri çıkartır [12]. Elektrohidrolik direksiyon sistemlerinde kritik direksiyon açısı ve burulma çubuğunun tork sönümleme oranı arasındaki ilişki Kurishige ve ark. tarafından ortaya konulmuştur [13]. Direksiyon sistemlerinde stabilite, direksiyonu tekerleğe bağlayan düzenek üzerinde direksiyon simidi, burulma yayı, tekerlek ve düzenek üzerinden veriler alınarak fonksiyonel modelleme teknikleri kullanılarak saptanır. Direksiyon sistemlerinde stabilite ve titreşim problemlerini ortaya koyan, direksiyon davranışını belirleyen temel testlerden birisi direksiyon histerisiz eğrileridir [14]. Histerisiz eğrileri direksiyona gelen tork ve direksiyon geriye dönme açısına göre çizilmekte olup, dönme yönünün değişimine bağlı tork-açı değişimi stabilitede belirleyici etkilerdendir. Son yıllarda elektro hidrolik direksiyon sistemlerinde sensörler yardımıyla yol koşullarına göre geri besleme sağlanarak direksiyon tork-açı değerlerinde optimizasyon sağlayan ve güvenlik seviyesini arttıran çalışmalar yapılmaktadır [15].

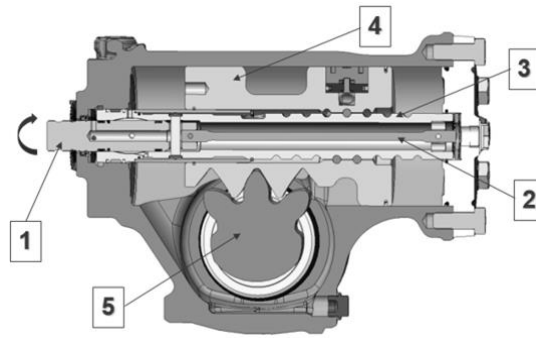
Hidrolik direksiyon sistemlerinin birçok avantajı vardır, ancak hidrolik ve mekanik bileşenler arasındaki bağlantıyla ilgili çözülmüş gürültü ve titreşim sorunları vardır. Matematiksel modelleme ve simülasyon, titreşim sorunlarını anlamak ve sistem performansını iyileştirmek için etkili bir araçtır [16].

Bu çalışmada ağır ticari araçlarda kullanılan hidrolik direksiyonların burulma millerinin burulma katsayılarının deneysel olarak tespit edilebilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemden elde edilen sonuçlar teorik ve SEA(Sonlu Elemanlar Analizi) ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yöntemin çalışma başarısı değerlendirilmiştir. Ayrıca elde edilen burulma katlıklarından yola çıkarak burulma millerinin doğal frekansları teorik ve SEA yardımıyla belirlenmiş, test edilen numunelerin titreşim davranışları da irdelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Test numuneleri

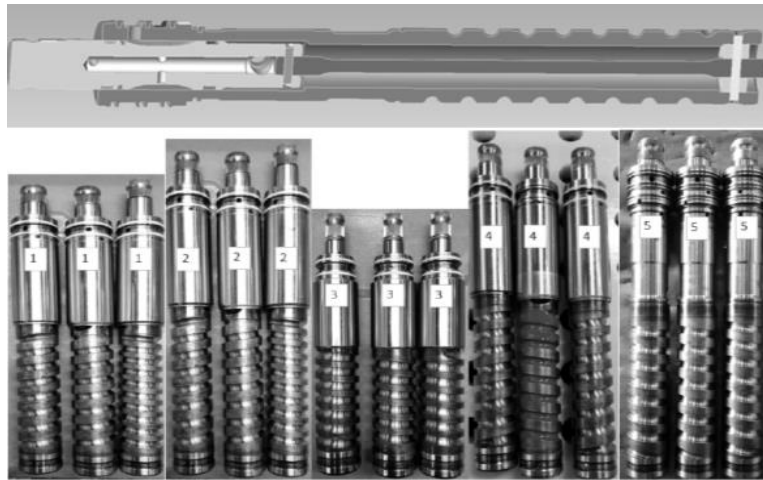
Burulma mili bir tarafından hidrolik direksiyonun giriş miline, diğer ucundan ise sonsuz vidalı mile montajlanmış bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanılan numunelerin hidrolik direksiyon kutularındaki yer ve işlevlerinin daha net anlaşılması için Şekil 1'de hidrolik direksiyon kesiti üzerinde burulma mili, giriş mili ve sonsuz vidalı mil ve direksiyonun diğer bileşenleri ile aralarındaki bağlantı gösterilmiştir.



Şekil 1. Hidrolik Direksiyon kesit görünümü (1: Giriş mili, 2: Burulma Mili, 3: Sonsuz Vidalı Mil, 4: Piston, 5: Sektör Mili)

Şekilde gösterilen giriş mili, ilk hareketin verildiği dairesel hareket yapan ekipmanı, burulma mili, ilk hareketin verilmesi ile birlikte 7° 'ye kadar burulmaya maruz kalan ekipmanı göstermektedir. Sonsuz vidalı mil ise pistonun aksenal hareketini sağlayan elemanı, piston, mekanik hareket ve hidrolik basınç desteği ile birlikte aksenal hareket yapan elemanı tahrik etmektedir. Sektör mili, pistondan aldığı aksenal hareketi dairesel harekete çevirerek tekerleklerle güç ve hareket ileten bileşeni göstermektedir.

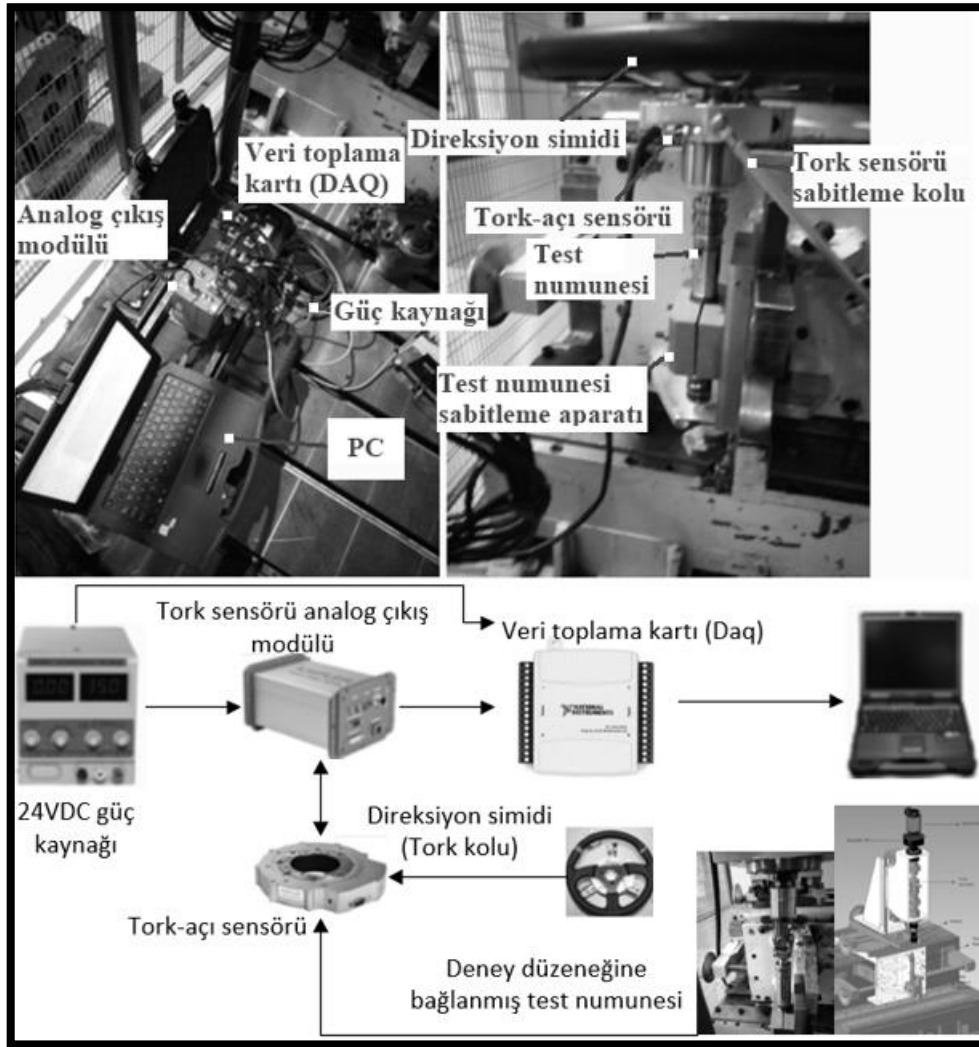
Test numunesi olarak hesaplamalarda ve deneylerde, Şekil 2'deki kesit görünüşü verilen, hidrolik direksiyonlarda kullanılan 5 adet farklı boy ve çap ölçülerinde burulma milleri kullanılmıştır. Test numuneleri uç kısımlardaki geniş çaptan bir tarafı mafsala bir tarafı da düzeneğin sabit kısmına kenetlenerek teste tabi tutulmuşlardır.



Şekil 2. Test numunesi kesit görünümü ve test numuneleri

B. Test düzeneği

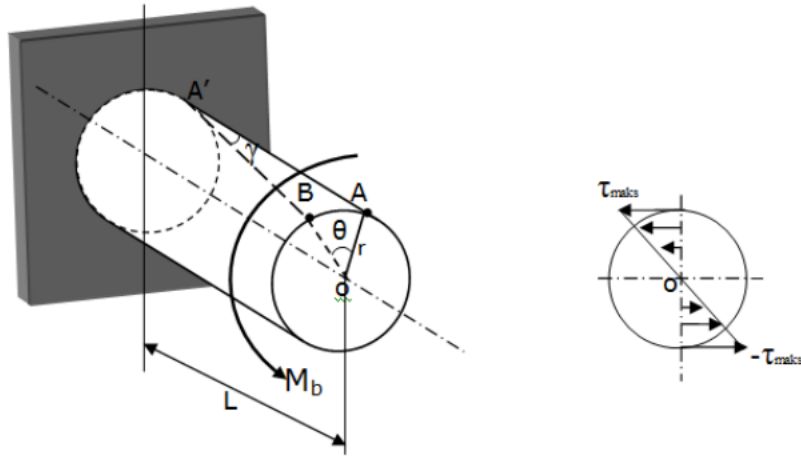
Burulma millerinin burulma katsayılarının deneysel olarak ölçülebilmesi için Kistler marka tork-açı sensörü kullanılan bir düzenek oluşturulmuştur. Test düzeneğinin şematik görünümü, düzeneği oluşturan bileşenler ve düzenek kurulumu Şekil 3'te görülmektedir. Tork-açı sensörü bir tarafından mil bağlantı aparatı ile giriş miline bağlanmakta, diğer tarafına ise döndürme hareketini sağlamak için 50 cm çapındaki direksiyon simidi ara bağlantı aparatları yardımı ile bağlanmaktadır. Sensörün gövdesinin hareketi, sabitleyici bir kol ile kısıtlanarak sensör sabitlenmektedir. Sensör ölçümleri NI veri toplama (DAQ) kartında toplanarak çevirici aracılığı ile bilgisayara aktarılmakta ve Labview görsel programlama programı ile yazılan program ara yüzünden ölçümler okunmaktadır.



Şekil 3. Deney düzeneği ve şematik gösterimi

C. Teorik model

Burulma testine tabi tutulan numunenin üzerinde meydana gelen yükler ve kesit üzerinde meydana gelen kayma gerilmeleri, Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Burulma deneyinin şematik gösterimi ve kesit üzerinde oluşan kayma gerilmeleri [17]

Teorik olarak “L” uzunluğunda içi dolu bir milin üzerine Mb burulma momenti uygulanarak, burulma başlangıcında A-A’ kesiti θ° kadar burulmanın sonunda A noktasına gelerek, B-A’ şeklini alır. A noktasının B noktasına olan hareketinin sonucunda O merkezine göre olan konumları arasında taranan açı burulma açısı(θ) ve A-A’ kesiti ile A’B kesiti arasında oluşan açı ise kayma açısı (γ) olarak ifade edilir. Milin deformasyonu sırasında maksimum kayma gerilmesi(τ_{max}) dış yüzeyde bulunan lifler üzerinde eşit ve zıt yönlerde meydana gelirken kayma gerilmesi milin merkezine doğru gittikçe lineer bir şekilde azalır ve merkezde sıfıra eşit olur [17].

Silindirik r yarıçapında bir numune de burulma momenti neticesinde meydana gelen kayma gerilmesi (τ) Hooke kanunundaki temel kayma gerilmesi yaklaşımı dikkate alarak Denklem (1) ile hesaplanabilir.

$$\tau = \frac{M_b r}{J} = G \gamma \quad (1)$$

Burada (τ) Kayma gerilmesi, (M_b) burulma momenti, (r) kayma gerilmesinin olduğu yarıçapı, (J) polar atalet momentini, G kayma elastisite modülünü, γ kayma genlemesini göstermektedir.

Bu denklemde kayma genlemesi Şekil 3’te gösterilen burulma açısı, numune yarıçapı ve numunenin boyu cinsinden Denklem (2)’de yer alan formülle tanımlanabilir.

$$\gamma = \frac{r}{L} \cdot \theta \quad (2)$$

Bu iki denklemden yararlanarak polar atalet momentini silindirik dolu kesitler için tanımlanır, tork değeri burulma katılığını bağlı olarak Denklem (3) ve Denklem (4)’teki formüllerle saptanır.

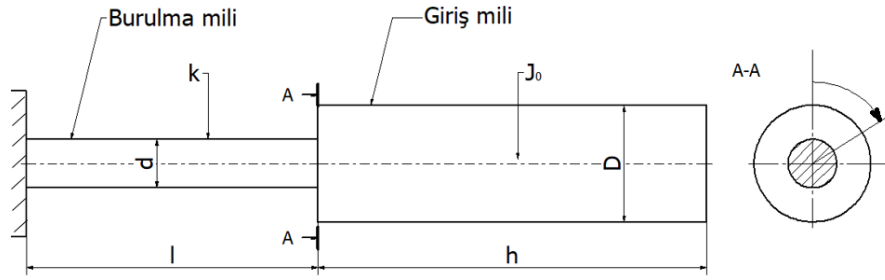
$$k = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot G}{32 \cdot L} \quad (3)$$

$$M_b = \theta \cdot k \quad (4)$$

Burada (k) burulma katılığını tanımlamaktadır.

Dairesel kesitli millerin burulması ve burulmadan kaynaklı titreşimler önemlidir. Burulma katılığını belirlediğimiz burulma mili, tekerleğe bağlı bir düzenek içerisinde çalıştığı için tekerlek kaynaklı burulma titreşimlerine maruz kalmaktadır. Burulma milinin doğal frekanslarının tespitiyle burulma miliyle direk temas halinde olan direksiyon simidinde gelen burulma titreşimlerine bağlı rezonans problemlerine önlem alınabilir. Bu sebeple çalışmada burulma milinin doğal frekansı teorik ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak belirlenmiştir.

Burulma frekansı bulunurken direksiyon dişli kutusunun içinde burulma titreşimine en çok etki ettiği düşünülen burulma mili ve giriş mili bir serbestlik dereceli bir burulma sarkacı olarak en basit haliyle, Şekil 5’teki gibi modellenmiştir [6].



Şekil 5. Burulma mili ve giriş milinin burulma sarkacı şematik gösterimi

Basit hale indirgenmiş modelin doğal frekansı Denklem (5) ile tanımlanabilir.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J_0}} \quad (5)$$

Burada k burulma katılığı, D şekilde belirtilen giriş mili çapı, J_0 milin kutupsal kütle eylemsizlik momentidir ve Denklem (6) ile tanımlanmıştır.

$$J_0 = \frac{\rho h \pi D^4}{32} = \frac{W D^2}{8g} \quad (6)$$

Burada ρ giriş mili yoğunluğunu, h giriş mili uzunluğunu, W burulma sarkacı ağırlığını g öz kütleyi tanımlamaktadır.

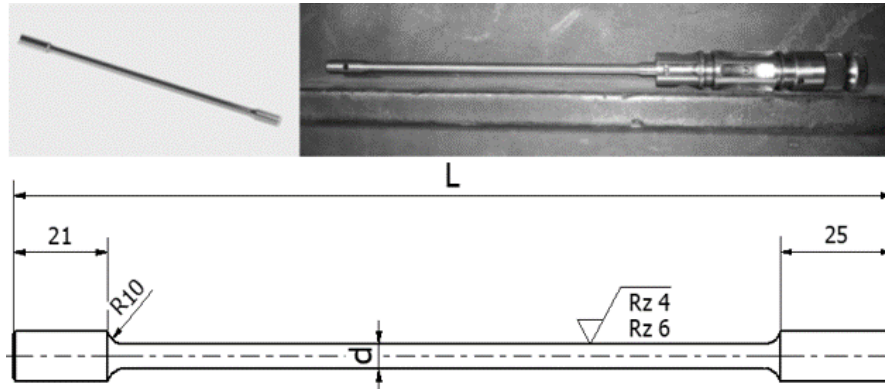
Test edilen burulma millerinin malzemesi 51CrV4 çelik olup burulma katılığı ve burulma frekansı hesaplamalarında malzeme özellikleri olarak aşağıdaki değerler kullanılmıştır.

Elastisite Modülü $E=205$ GPa, Poisson Oranı $\nu=0.28125$, Kayma Elastisite Modülü $G=79.98$ GPa, Özgül ağırlığı $\rho=7850$ kg/m³.

D. Sonlu Elemanlar Analizi

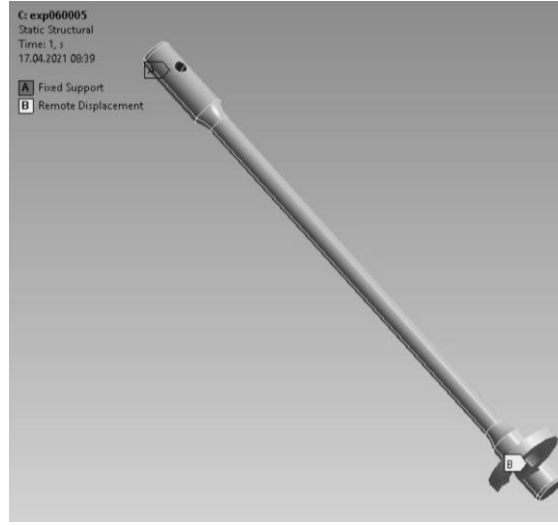
Yapısal Analiz (1):

Teorik modelde hidrolik direksiyon sistemine ait burulma milinin ANSYS V19.1 kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal ve doğal titreşim analizi yapılmıştır. Yapısal analiz sonucunda burulma mili üzerinde oluşan burulma momenti belirlenerek yay katsayıları hesaplanmıştır. Modeli sadeleştirmek adına Şekil 6'da görülen giriş mili ve burulma milinden oluşan bütüne, giriş milinden gelen hareket, burulma mili üzerinde oluşan açısaldelasman olarak modellenmiştir.



Şekil 6. Burulma mili (Sol üst), sonsuz vidalı milin içindeki giriş mili ve burulma mili kompleksi ölçüleri (Sağ üst) ve burulma mili ana ölçüleri (Alt)

Burulma milinin sınır koşulları Şekil 7'de gösterilen pim deliğinden sabit destek olarak ve diğer ucundan 7°'lik burulma açısı deplasman olarak belirlenmiştir. Modelde analiz sonucunda tork değerleri sabit mesnet noktasından mesnet tepkileri bulunarak belirlenmiştir.

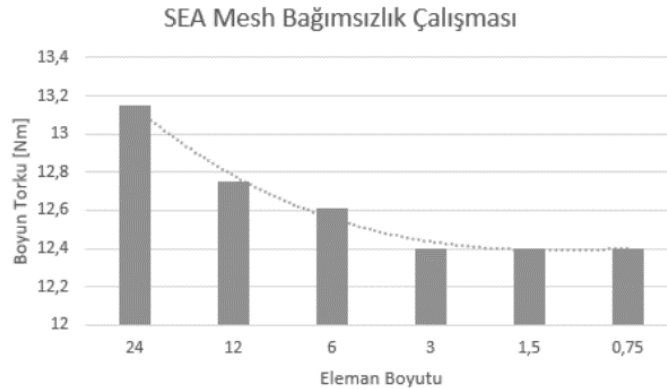


Şekil 7. 1 numaralı numune için sınır koşulları

Analiz için yeterli olacak düğüm ve eleman sayısına karar vermek için 2 numaralı numune kullanılarak eleman boyutu üzerinden mesh bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Yapılan yakınsama çalışması sonucunda 1.5mm ve 3mm eleman boyutları arasında %0.001'lik bir bağıl fark gözlenmiştir. Aynı hesaplama eleman boyutu 0,75mm için yapıldığında bir önceki hesaplama göre (1.5mm eleman boyutu) tork değerinde hiçbir değişim olmadığı görülmüştür. Çözümleme süresi dikkate alınarak hesaplamaların yapılması için 1.5 mm eleman boyutu alınmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Eleman boyutu 1.5 mm alınarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen mesh bağımsızlık çalışmasında seçilen eleman boyutuna göre hesaplanan tork'un değişimi Tablo 1 ve Şekil 8'de görülmektedir.

Tablo 1. SEA mesh bağımsızlık çalışması adımları

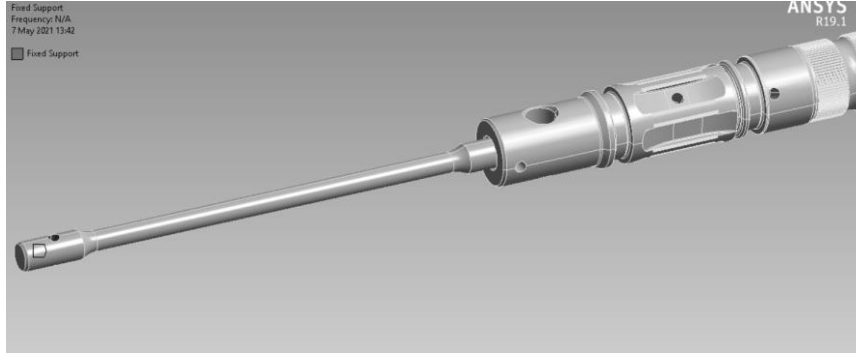
Eleman Boyutu [mm]	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Tork [Nm]	Bağıl Fark (%)
24	12908	7727	13.15	-
12	15584	9260	12.74	%3.054
6	19622	11811	12.60	%1.091
3	24460	14754	12.40	%1.647
1.5	70215	45488	12.40	%0.001
0.75	394658	273088	12.40	-



Şekil 8. SEA mesh bağımsızlık çalışmasının grafik olarak gösterimi

Doğal Titreşim Analizi (2):

Sonlu elemanlar analiz programı AnsysV19.1 kullanılarak doğal titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Teorik modelde gösterilen burulma sarkacı numerik modelde burulma mili ile giriş milinin birleşme noktalarından yekpare birleşik bağlanarak modellenmiştir. Sınır koşulu olarak burulma milinin pim bağlantı deliği Şekil 9'de gösterildiği gibi sabitlenmiştir. Burulma mili ve giriş mili malzemesi olarak ise çalışmamızda burulma katılığı belirlenmiş olan malzeme özellikleri kullanılmıştır. Analizde ilk 6 doğal titreşim modu çözdürülmüştür. Burulma titreşimini gösteren mod frekans değerleri içinde 5. mod olarak tespit edilmiştir.

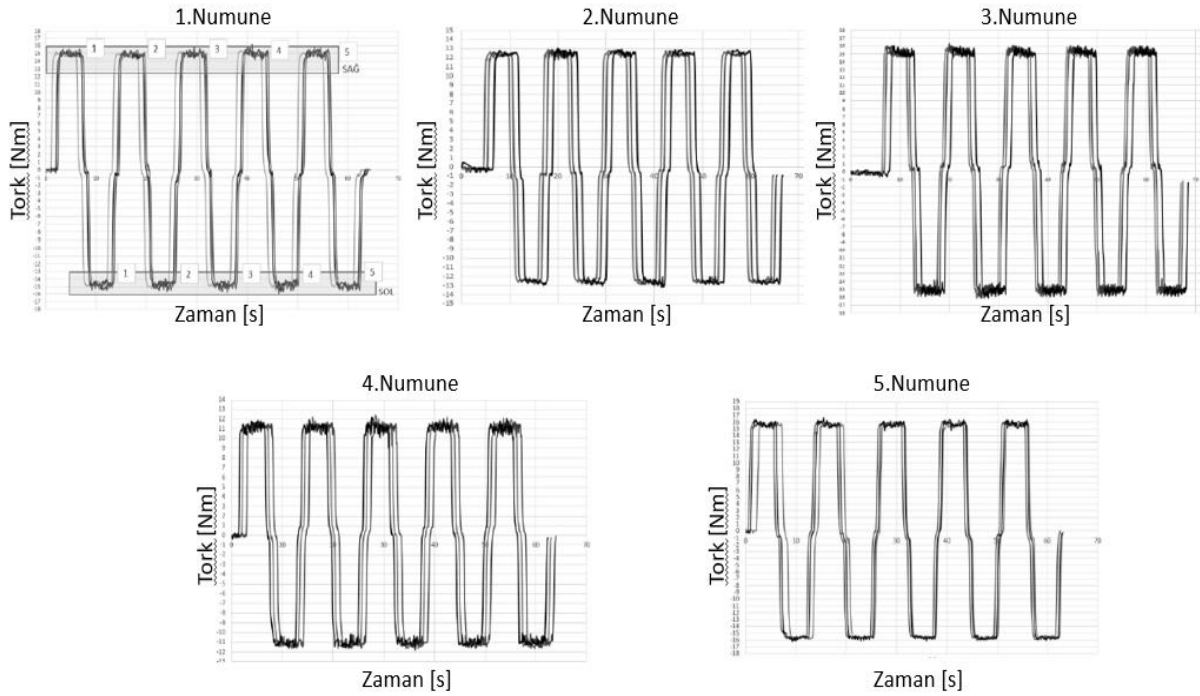


Şekil 9. Burulma sarkacı modeli sabitleme noktası

III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

A. Test düzeneği ile burulma katsayısının belirlenmesi

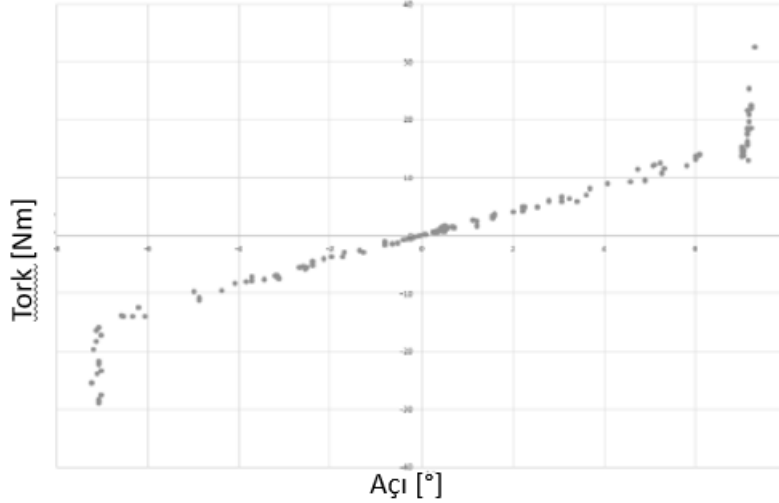
Çalışmada Şekil 2'de gösterilen 5 farklı numune kullanılmıştır. Her numuneden 3 örnek ve 5 tekrar olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da test düzeneğinde burulma deneyleri yapılan numunelerden elde edilen tork zaman grafikleri sunulmuştur. Grafiklerdeki her renk bir numuneyi temsil etmektedir.



Şekil 10. Test numunelerinin ölçülen zamana bağlı tork değişimi grafikleri

Tork-açı sensörü ölçümü sırasında kaydedilen tork ve açı değerleri ile Şekil 11'de gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Numune 1 Tork-Açı Sensörü ölçümü [-7°/7°]



Şekil 11. 1 Numaralı numune için tork-açı sensörü ile elde edilen veriler

Toplanan veriler değerlendirilirken burulma eğrisi orijinden geçirilerek burulma katsayısı hesaplanmıştır. Bu yöntemle burulma katsayısı hesaplanırken hidrolik direksiyonun çalışma prensibi gereği giriş mili ve burulma milinin sonsuz vidalı mil içindeki hareketi bir bükse aracılığı ile +/- 7° de sınırlandırılmaktadır. Bu nedenle ölçümde +/-7° açığı geçen değerlerde okunan tork değerleri burulma milinin döndürülmesinden değil, bükse'nin sonsuz vidalı mil içinde eğilmeye maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Ölçümden elde edilen veriler değerlendirilirken yalnızca +/-7° arasında kalan verilerle yeniden düzenlenmiş ve uç noktadaki değerleri hesaplamaya dahil edilmemiştir.

Orijinden geçen bir eğri Denklem (7) ile ifade edilebilmektedir. “a” ile ifade edilen eğrinin eğimi ve hesaplanan eğimin kullanılan veri setine göre göreceli hatası sırasıyla Denklem (8) ve Denklem (9) ile ifade edilmektedir [18].

$$y = ax \quad (7)$$

$$a = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \quad (8)$$

$$\text{Eğim Hatası} = S_{0,0} \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{\sum x_i^2}} \quad (9)$$

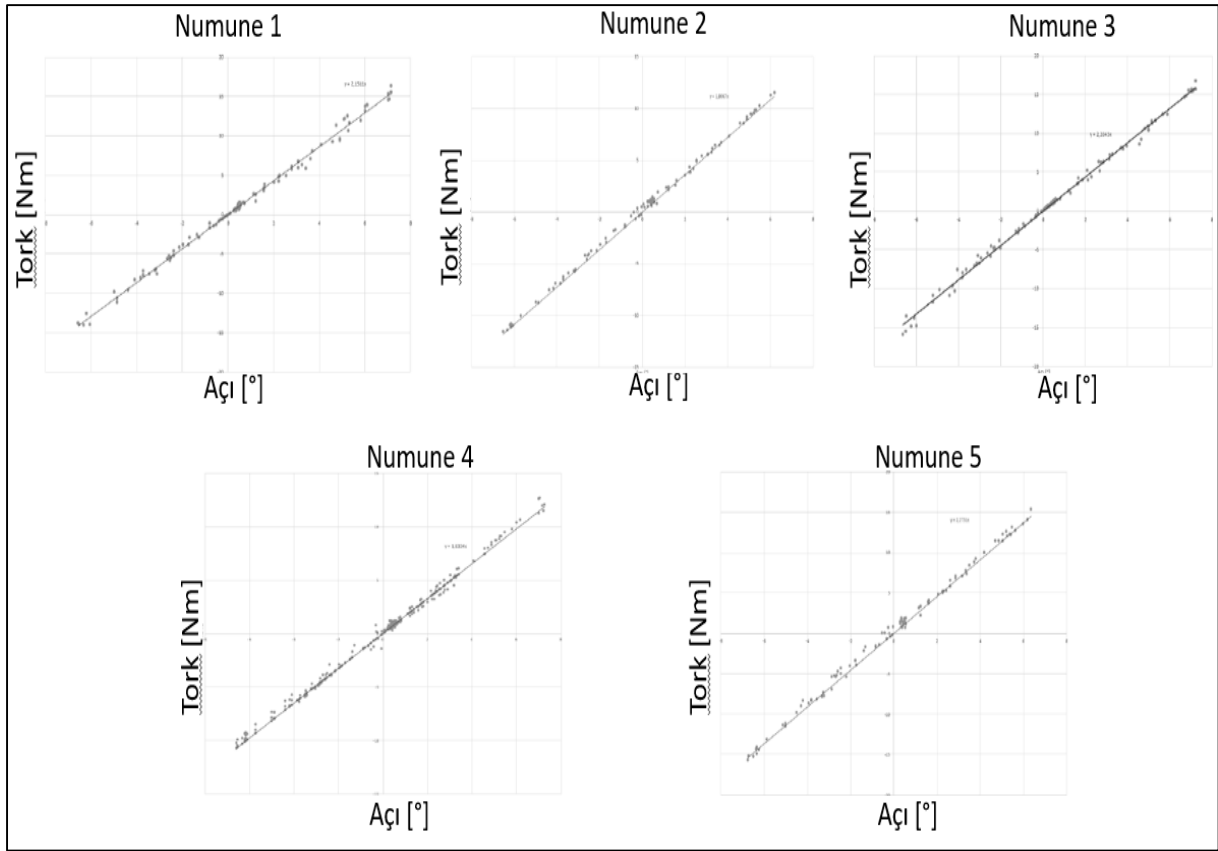
Denklem (9)'da verilen $S_{0,0}$ terimi denklemi standart sapma miktarını göstermekte olup Denklem (10)'daki şekilde ifade edilir,

$$S_{0,0} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - ax_i)^2}{n-1}} \quad (10)$$

Denklem (7)'de verilen lineer fonksiyon, testteki değişken parametreler burulma tork değeri “ M_b ”, burulma açısı “ θ ” ve burulma katılığı “ k ” cinsinden aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir.

$$M_b = k\theta \quad (11)$$

Testlerden toplanan veriler; yukarıda belirtilen Denklem (10) ve Denklem (11) kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntem kullanılarak Şekil 10'deki grafiğin +/-7° aralığına getirilmiş ve orijinden geçirilmiş hali Şekil 12'de görülmektedir. Alınan verilerden geçen eğrinin eğimi burulma katsayısına eşittir.



Şekil 12. Test numunelerinin burulma katsayısı eğrileri

Toplanmış olan veriler bir araya getirilerek burulma katsayısı ve tork belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada her bir numune için örnek sayısı 3 tekrar sayısı 5’tir. Tabloda örneklemeler arasındaki standart sapma verilmiştir.

Tablo 2. Deney düzeneği ile hesaplanan burulma katsayısı ve tork değerleri

Numune Numarası,	Çap, Ø d [mm]	Efektif Uzunluk, L [mm]	Burulma Katsayısı, k [Nm/°]	+7°/7°’de Ortalama Tork [Nm]	Tork Ölçümlerinde Ortalama Standart Sapma (%)
1	Ø6.8	138.8	2.12	14.85	7.5
2	Ø7	185.4	1.78	12.48	7.7
3	Ø6.4	106.8	2.16	15.16	5.6
4	Ø6.8	185.4	1.59	11.13	8.0
5	Ø7.4	185.4	2.23	15.63	4.7

B. Teorik Model ile Burulma Katılığı ve Burulma Frekansının Belirlenmesi

Teorik modele göre burulma katılığı, numune geometrik ölçüleri Tablo 3’te verilmiştir. Burulma frekansı hesaplamalarında kütle ve kütle eylemsizlik moment değerleri Tablo 4’ de verilmiştir.

Malzeme özelliklerinde verilen kayma elastisite modülü (G) ve Tablo 3’te verilen numune boyutları Denklem (3)’de kullanılarak burulma katılıkları hesaplanmıştır. Burulma frekansları, elde edilen burulma katılıkları ve kütleli parametrelerin Denklem (5)’te kullanılmasıyla hesaplanmış, her bir numune için Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3. Matematiksel modele göre hesaplanan teorik burulma katsayısı değerleri

Numune Numarası	Çap (d), [mm]	Efektif Uzunluk, L [mm]	Teorik Burulma Katsayısı, k [Nm/°]	Tork (7°) [Nm]
1	Ø6.8	138.8	2.11	14.78
2	Ø7.0	185.4	1.78	12.42
3	Ø6.4	106.8	2.15	15.06
4	Ø6.8	185.4	1.58	11.06
5	Ø7.4	185.4	2.22	15.52

Tablo 4. Matematiksel modele göre hesaplanan teorik burulma titreşimi değerleri

Numune numarası,	Çap, D[mm]	Kütle, m[kg]	Jo[kgm ²]	k[Nm/rad]	fn[Hz]
1	26	0.376	3.1810-5	120.89	310.45
2	26	0.376	3.1810-5	101.98	285.14
3	21	0.210	1.1610-5	123.19	519.17
4	26	0.376	3.1810-5	90.53	268.65
5	26	0.376	3.1810-5	127.20	318.44

Tablo 4 ve hesaplamalarda kullanılan denklemler incelendiğinde; burulma katılığının burulma mili çapı ve uzunluğuna bağlı olarak değişim gösterdiği, burulma katılığı değeri düşüktüçe burulma frekanslarının da düştüğü görülmektedir.

C. Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Burulma Katılığı ve Burulma Frekansının Belirlenmesi

Tablo 5 'de 5 farklı numune için 7°'lik burulma açısı değişimine bağlı olarak mesnet noktasından belirlenen tork değerleri ve burulma milinde oluşan maksimum gerilme değerleri verilmiştir. Belirlenen tork değerleri denklem 4' de kullanılarak, Tablo6'da verilen burulma katılıkları elde edilmiştir.

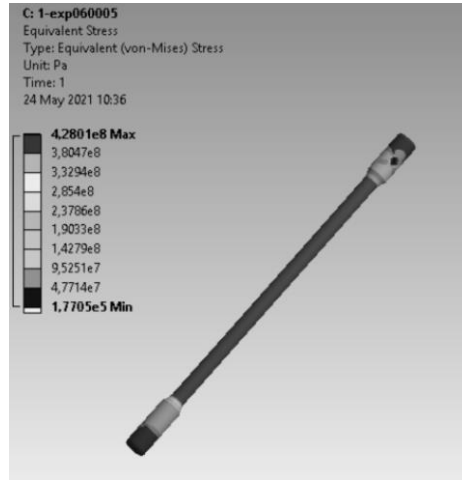
Tablo 5. SEA Mesh bilgileri ve analiz sonuçları

Numune Numarası	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Maksimum Von-Mises Gerilmesi [MPa]	Maksimum kayma Gerilmesi [MPa]	Tork [Nm]
1	39813	61186	428.01	247.1	14.65
2	45488	70215	330.82	191.0	12.40
3	18246	29144	535.91	309.4	15.30
4	43968	67803	320.78	185.2	10.99
5	43998	67119	343.95	198.5	15.19

Tablo 6. SEA ile hesaplanan burulma katsayısı değerleri

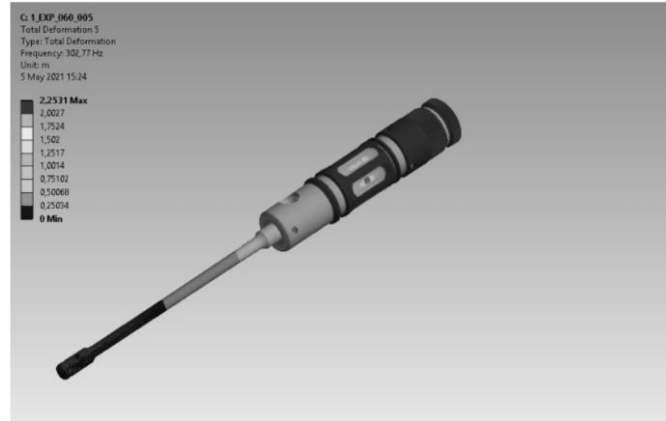
Numune Numarası	Çap, Ø [mm]	Efektif Uzunluk, L [mm]	SEA Burulma Katsayısı, k [Nm/°]	Tork(7°) [Nm]
1	Ø6.8	138.8	2.09	14.65
2	Ø7	185.4	1.77	12.40
3	Ø6.4	106.8	2.19	15.31
4	Ø6.8	185.4	1.57	10.99
5	Ø7.4	185.4	2.17	15.19

1 nolu numune için burulma milinde VonMises gerilme dağılımı Şekil 13'te verilmiştir. Burulma mili malzemesi (51CrV4) akma mukavemeti 700MPa olup, maksimum VonMises akma gerilmesi değerlerine bakıldığında burulma yayının elastik bölgede zorlandığı görülmektedir.



Şekil 13. 1 nolu numune için VonMises gerilmesi

Burulma katlıkları belirlenen numunelerin yapısal analizi sonrasında doğal titreşim analizi frekans sonuçları Şekil 5'te gösterilen basit sarkaç modelinde sınır koşulları uygulanarak belirlenmiştir. Şekil 14'te 1 numaralı numunenin burulma doğal frekansı 5. mod için elde edilen mod şekli verilmiştir.



Şekil 14. 1 numaralı numunenin burulma doğal frekansı mod şekli

Elde edilen burulma titreşim doğal frekansları, 5 farklı numune için Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. SEA kullanılarak elde edilen burulma frekansı değerleri

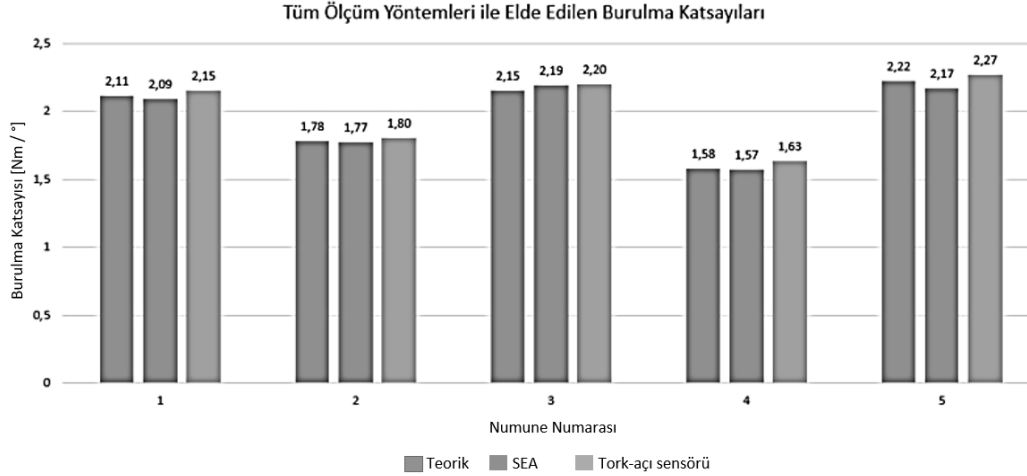
Numune	Düğüm sayısı	Eleman Sayısı	f_n [Hz] (SEA)
1	293808	181936	302.77
2	291531	182527	276.64
3	332090	209642	517.98
4	293789	183994	261.96
5	290428	181914	307.46

Sonlu elemanlar modeli kullanılarak belirlenen burulma frekansı değerleri teorik frekans değerlerine yakın sonuçlar vermiştir. Burulma frekansı değerleri burulma mili uzunluğu, tasarım ve kütleli değişimlere bağlı olarak 260-520 Hz frekans aralığında değişim göstermektedir. Burulma ve giriş mili direksiyon simidiyle direk temas halinde olduğu için burulma mili titreşim karakteristiği direksiyon ünitesi titreşim davranışını değiştirecektir.

D. Deneysel, Analitik ve Numerik Burulma Katlıklarının Karşılaştırılması

Şekil 15'te tüm yöntemler ile elde edilen ortalama burulma katsayıları grafik şeklinde gösterilmiştir. Burada ilk göze çarpan deneysel yöntemde analitik ve numerik yöntemlere göre daha yüksek burulma katsayısı

ölçülmüştür. Numerik yöntem ve analitik yöntemin sonuçları birbirine oldukça yakındır. Deneysel yöntem ile analitik ve numerik yöntem arasındaki mutlak hata en düşük 2 numaralı numune içindir. En yüksek mutlak hata ise 1., 3., 4., 5. numunelerde ortalama %5-8'dir. Teorik hesaplanan burulma katsayısına göre SEA ve deneysel hesaplanan burulma katsayılarının göreceli hataları Tablo 8'de verilmiştir. Teorik yöntemden sapmalar %1-%3 arasında değişmektedir.



Şekil 15. Analitik, numerik ve deneysel yöntemlerle elde edilen burulma katsayılarının karşılaştırılması

Tablo 8. Burulma katsayısı için kullanılan metotların teorik değere göre sapmaları

Numune Numarası	Çap, Ø d [mm]	Efektif Uzunluk, L [mm]	Teorik Burulma Katsayısı, k [Nm/°]	SEA Burulma Katsayısı, k [Nm/°]	SEA-Teorik değer arasındaki bağıl fark	Deneysel burulma katsayısı, k [Nm/°]	Deneysel-Teorik değer arasındaki bağıl fark
1	Ø6.8	138.8	2.11	2.09	0.9%	2.15	1.9%
2	Ø7.0	185.4	1.78	1.77	0.6%	1.8	1.1%
3	Ø6.4	106.8	2.15	2.19	1.9%	2.2	2.3%
4	Ø6.8	185.4	1.58	1.57	0.6%	1.63	3.2%
5	Ø7.4	185.4	2.22	2.17	2.3%	2.27	2.3%

Deneysel çalışmada direksiyon ünitesinde oluşturulan burulma test düzeneğinde gerçekleştirilen ölçümlerde $\pm 7^\circ$ açısal değişimlerde sağ yönde ve sol yönde burulmalar için ortalama tork değerlerinde ortalama %1 bağıl farklar hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen ölçümlerde tekrar bazında hesaplanan ortalama değerler ile sağ ve sol yöndeki tork değişimleri ve burulma katılıkları sırasıyla Tablo 9 ve Tablo 10'da 1 no'lu numune için verilmiştir.

Tablo 9. 1 nolu numune $\pm 7^\circ$ açısal değişimlerde tork değişimi

Tekrar	Tork ($+7^\circ$) [Nm]	Tork (-7°) [Nm]	Tork ($+7^\circ$) [Nm]	Tork (-7°) [Nm]	Tork ($+7^\circ$) [Nm]	Tork (-7°) [Nm]
1.Tekrar	14.89	14.7	14.84	14.6	15	14.85
2.Tekrar	14.79	14.8	14.76	14.67	14.89	14.76
3.Tekrar	14.89	14.8	14.85	14.68	14.95	14.82
4.Tekrar	14.97	14.87	14.93	14.74	15.04	14.91
5.Tekrar	14.92	14.86	14.91	14.71	15.04	14.91
Tekrarların Ortalaması	14.89	14.81	14.86	14.68	14.98	14.85
Ortalama Ölçümler	14.85		14.77		14.92	

Tablo 10. 1 nolu numune +/-7° açısız değişimlerde burulma katılığı değişimi

Tekrar	Burulma Katsayısı (+7°) [Nm/°]	Burulma Katsayısı (-7°) [Nm/°]	Burulma Katsayısı (+7°) [Nm/°]	Burulma Katsayısı (-7°) [Nm/°]	Burulma Katsayısı (+7°) [Nm/°]	Burulma Katsayısı (-7°) [Nm/°]
1.Tekrar	2.13	2.1	2.12	2.09	2.14	2.12
2.Tekrar	2.11	2.11	2.11	2.1	2.13	2.11
3.Tekrar	2.13	2.11	2.12	2.1	2.14	2.12
4.Tekrar	2.14	2.12	2.13	2.11	2.15	2.13
5.Tekrar	2.13	2.12	2.13	2.1	2.15	2.13
Tekrarların Ortalaması	2.13	2.12	2.12	2.1	2.14	2.12
Ortalama Ölçümler		2.12		2.11		2.13

Çalışmada numunelerde tekrarlar arasındaki maksimum standart sapma oranı sağ yönlü ölçümlerdeki tork değerleri için ortalama %6, sol yönlü ölçümlerdeki tork değerleri için ortalama %5,8 bulunmuştur.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada ağır ticari araç hidrolik direksiyonlarında kullanılan burulma millerinin burulma katsayılarının deneysel olarak ölçülebilmesi için bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde tork açısı sensörü kullanılarak, tork açısı grafikleri +/-7° açısız değişimler için elde edilmiştir. Elde edilen eğrilerin eğimlerinden yola çıkarak burulma katılıkları deneysel olarak bulunmuştur. Elde edilen burulma katılıkları teorik ve numerik modellerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

Burulma katsayısının hesaplanmasında kullanılan mukavemet hesaplamalarına dayanan teorik model, burulma katsayısını deneysel sonuçlara göre yaklaşık %5'lik bir yakınlıkla bulmaktadır. Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı iyileştirildiğinde matematiksel modele yakın yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir.

Test düzeneği ile elde edilen tork açısı değişimleri her iki yöndeki gerçek direksiyon tepkilerine göre alınan ölçümler olduğu için direksiyon düzeneğiyle ilgili kayıpları da içeren daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Test düzeneği ölçümünde kullanılan numunelerin burulma katsayıları sonsuz vidalı mil ve giriş milinden demonte edilmeden ölçülmesi nedeniyle aradaki aksel eğneli yatak ve destek halkası gibi elemanların sürtünmeleri ölçümü etkilemiştir ve bu nedenle daha yüksek burulma katsayıları elde edildiği düşünülmektedir.

Tork-açısı sensörü kullanılarak oluşturulan bu test düzeneği, içindeki burulma milinin geometrik ölçümleri ve malzemesi bilinmese dahi hidrolik direksiyonun giriş mili ve sonsuz vidalı mil kompleksinin demontajına gerek kalmadan burulma milinin burulma katsayısını ölçmek için kullanılabilir.

Deneysel çalışmada her bir numune tipi için 3 örnek ve 5 tekrar gerçekleştirilmiş olup deneysel çalışmada elde edilen veriler düşük sapma oranlarında sonuçlar vermiştir. Örneklemeler arası ortalama standart sapma oranları %5-8 aralığında değişmektedir. Tekrarlar arası ortalama standart sapma oranları %5-6 aralığında hesaplanmıştır. Örneklemeler arasındaki sapmanın üretilen numunelerin tolerans değerleriyle ilgili olduğu düşünülmektedir.

Burulma mili ve giriş mili direksiyon simidinde direk temas halinde olduğu için uygulamada direksiyon simidinde tekerlek kaynaklı burulma titreşimi problemleri gözlemlenmektedir. Bu sebeple burulma katılığı belirlenen burulma millerinin, burulma rezonans frekansları teorik ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak tespit edilmiştir.

Burulma millerinin burulma frekansları tasarimsal boy ve kütle oranlarına bağlı olarak 260-520 Hz frekans aralığında elde edilmiş olup, direksiyon kutusu titreşim problemlerinde belirleyici etkileri olduğu düşünülmektedir.

İleriki çalışmalarda test düzeneğinde yapılan ölçümlerde saniyede alınan veri sayısı, direksiyon simidinin çevrilme hızı ve döndürme süresi boyunca toplanan veri sayısı gibi parametreler ölçüm sisteminde değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma HEMA Endüstri A.Ş. Ar-Ge birimince yüksek lisans tezi olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Yaylı, M. (2018). Elastik Sınır Koşullarında Fonksiyonel Derecelendirilmiş Bir Çubuğun Burulma Titreşimi Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 98-104.
- [2] Wu, H., Xu, Z., & Wang, P. (1997). Torsion Test of Aluminum in the Large Strain Range. *International Journal Of Plasticity*, 13(10), 873-892.
- [3] Stanzl-Tschegg, S., Mayer, H., & Tschegg, E. (1993). High frequency method for torsion fatigue testing. *Ultrasonics*, 31(4), 275-280.
- [4] Baranoğlu, G. (2012). *Influence of Static Torsion on the Mechanical Properties of Heavily Drawn Steel Wires*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
- [5] Mutasher, S. (2009). Prediction of The Torsional Strength of the Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft. *Materials Design*, 30(2), 215-220.
- [6] Uymaz, G., Aydoğdu, M., & Cen, G. (2018). Direksiyon Kutusu Doğal Frekansını Değiştirmek İçin Bir Yöntem Önerisi. *9th Proceedings of the International 9th Automotive Technologies Congress (Otekon 2018)*, 07-08 Mayıs, Bursa, 1826-1833.
- [7] Akın, S. (2019). *Endüstriyel alanlarda kullanılan kardan şaftların statik yorulma testleri için hidrolik test düzeneği tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ
- [8] Patil, S., Chavan, P., & Kavade, P. (2012). Investigation of Composite Torsion Shaft for Torsional Buckling Analysis using Finite Element Analysis. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 4(3), 26-31.
- [9] Nippold, C., Küçükay, F., & Henze, R. (2016). Analysis and Application of Steering Systems on a Steering Test Bench. *Automotive and Engine Technology*, 1(1-4), 3-13.
- [10] Johannesson, M., & Lillberg, H. (2018). *Investigation of Steering Feedback Control Strategies for Steer-by-Wire Concept*. Master Thesis, Division of Automatic Control Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden
- [11] Data, S., Pesce, M., & Reccia, L. (2004). Identification of steering system parameters by experimental measurements processing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218(8), 783-792.
- [12] Rösth, M. (2007). *Hydraulic power steering system design in road vehicles*. Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations No. 1068. Linköping University Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:23027/fulltext01>. (Erişim Tarihi:04/03/2022)
- [13] Kurishige, M., Nishihara, O. & Kumamoto H. (2011). Analysis on Desirable Damping Coefficient of Torsion Bar in View of Self-Centering of Steering System. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Part C*, 77(777), 1813-1823.
- [14] Gröndahl A. (2018). *Functional Modelling and Simulation of an Electric Power Assisted Steering*. Master Thesis. Chalmers University of Technology Department of Mechanics and Maritime Sciences, Sweden
- [15] Xu, G., Chen, M., He, X., Pang, H., Miao, H., Cui, P., Wang, W., & Diao, P. (2021) Path Following Control of Tractor with an Electro-Hydraulic Coupling Steering System: Layered Multi-Loop Robust Control Architecture. *Biosystems Engineering*, 209, 282-299.
- [16] Wang, M., Zhang, N., Jeyakumaran, J., & Misra, A. (2005) Modelling and Simulation of Speed Sensitive Hydraulic Power Steering Systems. Proceedings of the 11th Asia-Pacific Vibration Conference At: Institute of Noise and Vibration, University of Technology Malaysia.
- [17] Yıldızlı, K. (2012). *Burulma Deneyi Föyü*. On dokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun. <https://mak-muhendislik.omu.edu.tr/deney-foyeri>. (Erişim Tarihi:04/03/2022)
- [18] Shine, A., (2006). Fitting Experimental Data to Straight Lines Including Error Analysis. <https://cbe.udel.edu/wp-content/uploads/2019/03/FittingData.pdf>. (Erişim Tarihi:04/03/2022)