

DİŞLİ ÇARK MEKANİZMALARINDAKİ HATALARIN AKUSTİK YÖNTEMLER VE TİTREŞİM METODU İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Şaban ULUS

Muzaffer KANAAN

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü - KAYSERİ

ÖZET

Dişli çarklar, hareketin belirli oranlarda dönüştürülüp bir miktar verim kaybı ile aktarıldığı mekanizmalardır. Dişlilerin diş kökünde oluşabilecek küçük çatlakların veya dişli temas yüzeylerinde oluşan çatlak veya pitting gibi çukurlaşmaların erken teşhis edilemeyişi nedeniyle birçok sistem tahrip olana kadar çalıştırılmaktadır. Özellikle, seri üretimde üretimin durmasının çok yüksek maliyetli olması ve güvenliğin yüksek düzeyde olması gereken taşıtlar, hava araçları vb. dişli kutularında bu hataların erken teşhisi çok büyük öneme sahiptir.

Bugüne kadar titreşim analizi, dişli hatalarının tespitinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Ancak, son zamanlarda, Akustik Emisyon (AE) tekniği ile hataların erken teşhis edilebilmesi için yapılan sınırlı sayıdaki çalışma ile bu yöntemin etkinliği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, hem titreşim hem AE metodu ile deneysel olarak alınan veriler analiz edilmiş ve oluşturulan yapay hatalar, hem düz hem de helisel dişliler ile karşılaştırmalı bir analize tabi tutulmuştur. Farklı çalışma hızları ve yükleme durumlarına göre, sonuçlar, RMS (Root Mean Square), kurtosis, Crest faktörü (CF), ortalama ve maksimum hata ile analiz edilerek iki yöntemin farklılıkları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: akustik emisyon, titreşim, hata teşhisi, dişli hataları

COMPARATIVE ANALYSIS OF FAULTS IN GEAR MECHANISMS USING ACOUSTIC AND VIBRATION METHODS

ABSTRACT

Gears are mechanisms that convert the motion in a specific gear ratio by the amount of yield loss. Because of the inability of early diagnosing the small cracks at the tooth root or cracks on the contact surfaces and pitting, so many systems are maintained to operate until they are damaged. Especially, early diagnosis of faults is so important in terms of high cost of stoppage in a production stage of the mass production and at vehicles or aircrafts' gearboxes that have to have high safety. Until today, vibration analysis has have a broad application area on gear fault diagnosing. However, nowadays, Acoustic Emission (AE) technique was investigated to diagnose faults in early stage by the limited studies.

In this study, data obtained from experimental system are analyzed with both vibration and AE technique and artificial faults are analyzed and compared by using both spur and helical gears. According to different running speed and loading conditions, results are examined in terms of RMS, kurtosis, Crest Factor (CF), average and maximum fault.

Keywords: acoustic emission, vibration, fault diagnosis, gear faults.

i. SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Sembol Açıklama

\mathcal{L}	Laplace operatörü
μ	Sürtünme katsayısı

Kısaltma Açıklama

FFT	Fast Fourier Transform
RMS	Root Mean Square

1. GİRİŞ

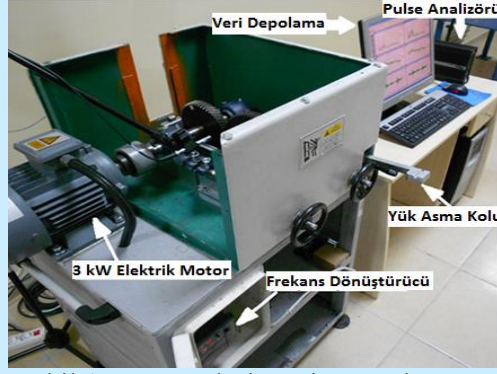
Dişli çarklar, bilindiği üzere mekanik sistemlerde güç aktarmada, hareketin yönünü değiştirmede kullanılan elemanlardır. Bu mekanizmalar bir miktar verim kaybı ile istenilen hareketi gerçekleştirmektedirler. Dişli çarklar, uzun süre yüksek çalışma hızlarına ve bazen de aşırı yüklenmelere maruz kalabilmekte ve bu çalışmalarını sırasında doğal olarak birtakım yüzey hasarlarına, diş dibinde oluşan küçük çatlaklara, pitting denilen ve temas yüzeylerinde oluşan çukurlaşmalara maruz kalabilmektedir. Diş dibinde veya temas yüzeylerinde oluşan çatlaklar ve çukurlaşmalar zamanla ilerleyerek sistemi tahrip edecek boyuta ulaşabilmektedir.

Özellikle üretimin durmasının çok büyük mali külfet getirdiği seri üretim yapan işletmelerde, güvenlik faktörünün üst düzeyde tutulması gereken taşıtlar, hava araçları vb. sistemlerde bu tür ilerleme kaydeden hasarların sistem tahrip olmadan teşhis edilmesi ve buna göre koruyucu bir bakım yapılması gerekmektedir. Bu hataların teşhisi için bu güne kadar en yaygın olarak kullanılan teknik olan titreşim tekniği bazı bakımlardan yetersiz kalmakta ve hasarın neden kaynaklandığı veya ilerleme durumu kolayca anlaşılammaktadır. Bu bakımdan AE metodu, dişli çarklardan gelen sinyallerin alınması, temassız bir ölçüm sağlaması ve gürültünün herhangi bir engele çarpmadan doğrudan dişli çark kavrama noktasından alınması nedeniyle birtakım avantajlara sahiptir. Bu çalışmada hem titreşim hem de AE metodu ile elde edilen grafikler ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Literatürde titreşim üzerine birçok araştırma mevcuttur ancak AE tekniğinin kullanılması son zamanlarda ilgi çekmektedir. Dişli çarklarda AE tekniği, hata teşhisinde bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [1, 2]. Bununla birlikte, diğer araştırmacılar düz dişlilerde eğilme yorulmasının incelenmesinde AE ile analizler yapmış, rijitlik, yüzey hasarları ve çatlak ilerleme durumlarına karşı AE yönteminin daha hassas olduğunu belirtmişlerdir[3].

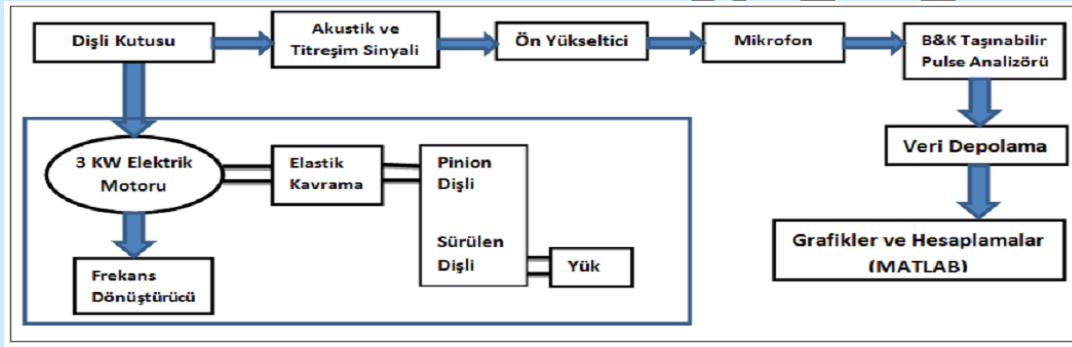
2. MATERYAL VE METOT

AE tekniği ve titreşim tekniğini karşılaştırmalı analizi amacıyla, taşıtlardaki dişli kutularına benzer bir yapıda tek kademeli karşı yük asılabilen kuru ve hidrodinamik yağlama şartlarında çalışabilecek bir sistem tasarlanmıştır. Bu çalışmada kuru sürtünme şartlarında sistem çalıştırılmış olup, pinyon dişlinin tahriki 3 KW ve 3 fazlı elektrik motoru ile sağlanmıştır. Pinyon dişliler 51 dişe sahip iken büyük dişli 70 dişe sahiptir. Dişli çarklar 300 d/dk ve 700 d/dk çalışma hızlarında çalıştırılmış buna karşın yüksüz ve 3Nm yüklü durumlar dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Bu çalışma hızlarına karşılık gelen dönme frekansları sırasıyla $f_{R1}=5$ Hz, and $f_{R2}=11,67$ Hz olmaktadır. Diş kavrama frekansları ise 255 Hz ve 595 Hz olarak hesaplanmıştır. Deneysel sistem stabil duruma geçmesi için ölçümlerden önce bir müddet çalışmaya bırakılmıştır. Şekil 1.'de deneysel sistemin genel bir görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 1. Deneysel Sistemin Genel Yapısı

Deneysel verilerin elde edilmesinde, Bruel-Kjaer (B&K) taşınabilir, çok kanallı pulse 3560-B-X05 ses ve ivme analizörü kullanılmıştır. AE ve titreşim ivme sinyalleri ön yükseltici ile kuvvetlendirilmekte ve bir bant geçiren filtre ile filtrelenmektedir. Şekil 2.'de ise deneysel sistemin blok yapısı verilmektedir.



Şekil 2. Deneysel Sistem Blok Diyagramı

2.1. İstatistiki Verilerin Elde Edilmesi

Deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler çeşitli istatistiki parametreler ile analiz edilmiştir. Literatürde kullanılan yöntemlerden olan kurtosis ve CF özellikle titreşimde yaygın bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada bu gibi özellikler hem titreşim hem de AE yöntemi açısından değerlendirilmiştir. Bu parametreleri kısaca ifade edecek olursak,

$$P_{Rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} \quad (1)$$

$P(t)$, anlık ses basınç değerini, T ise ortalama zaman aralığını göstermektedir. Titreşimde ise $P(t)$ 'nin yerini ivme almaktadır. CF ise maksimum tepe değerinin RMS değerine oranı olarak ifade edilir ve hatanın büyüklüğü hakkında bir bilgi vermektedir.

$$CF = \frac{x_{peak}}{P_{RMS}} \quad (2)$$

Kurtosis değeri ise elde edilen sinyallerin grafiklerde oluşturduğu çarpıklık ve basıklığın bir ölçüsüdür. Bu değer yüksek olması aniden yükselen piklerden kaynaklanabilmektedir. Gauss normal dağılımı için bu değer 3 olarak literatürde belirtilmektedir. Bu değerden yüksek sonuçlar hata varlığına işaret etmektedir.

$$Kurtosis = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - x_{ort})^4}{[\sum_{i=1}^N (x_i - x_{ort})^2]^2} \quad (3)$$

x_i , i. sinyal verisi ve x_{ort} tüm sinyal değerlerinin ortalamasıdır. N ise kayıtlı verilerin toplam sayısıdır.

2.2. Diğer alt başlıklar varsa

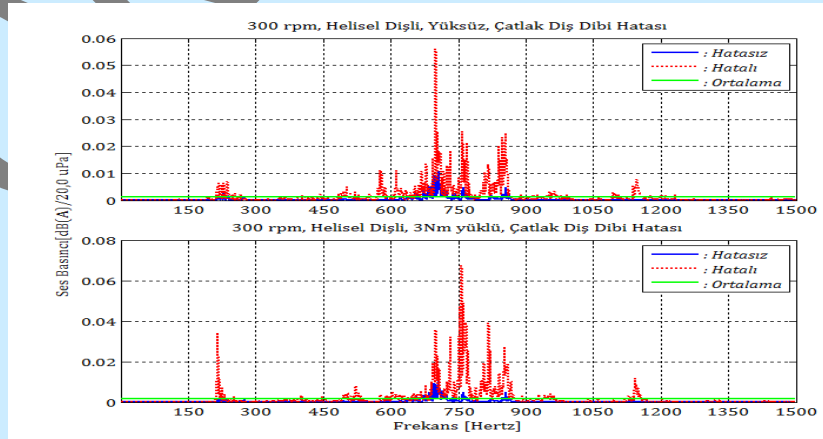
Buraya eklenecek alt başlıklar varsa yazılmalıdır.

3. SONUÇLAR

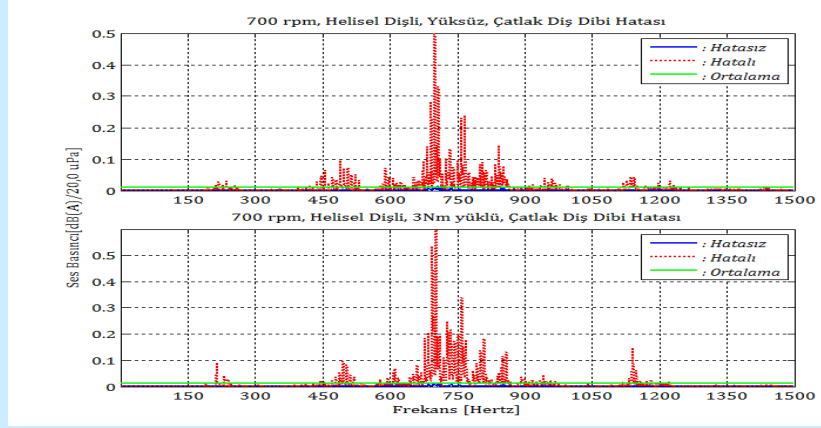
Çalışmada elde edilen AE ve titreşim sinyalleri çalışma hızı ve yükleme durumlarına göre değerlendirilmiştir. 300 d/dk ve 700 d/dk çalışma hızlarına karşılık yüksüz ve 3 Nm yüklü durumlar değerlendirilmiştir. Frekans aralığı 0-1500 Hz olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistik parametrelerle değerlendirilmiştir. Crest faktörü yüksüz durumda CF0, yüklü durumda CF3 olarak kısaca ifade edilmektedir. RMS yüksüz durumda RMS0, yüklü durumda RMS3, kurtosis yüksüz halde KURT0, yüklü halde KURT3, ortalama hata yüksüz halde ORT-0, yüklü halde ORT-3, maksimum hata yüksüz halde MAX0, yüklü halde MAX3 olarak ifade edilmektedir.

Şekil 4-7. helisel dişlilerde ses basıncına ait yüksüz ve 3 Nm yüklü durumlar için grafikleri göstermekte iken Şekil 8-11. helisel dişlilerde titreşime ait grafikleri göstermektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere titreşim sinyalleri dişli kavrama frekansı ve katlarında titreşim piklerine sahiptir. Bu pikler etrafında da oluşan yan bantlar da hata varlığına işaret etmektedir. AE grafiklerinde elde edilen maksimum piklerde dişli kavrama frekanslarında ve yan bantlar şeklinde ortaya çıkmıştır.

Şekil 4-5. helisel dişlide çatlak olma durumundaki ses basıncı grafiklerini Şekil 8-9. ise titreşim grafiklerini içermektedir. Burada elde edilen CF ses basıncı değerleri, yükleme ile belirgin oranda artarken çalışma hızının artışı ile daha az artış göstermiştir. CF titreşim değerleri de yine yükleme ile belirgin artış gösterirken çalışma hızında bu artış belirgin değildir. RMS değerleri, çalışma hızı ve yükleme ile hem ses basıncı hem de titreşim ivmesi açısından artış göstermiştir. Ortalama hata ve maksimum hata seviyesi iki durum içinde artış göstermiştir. Kurtosis için ses ve titreşim ölçümünde yükün artışı ile düşme olurken çalışma hızının artışı ile yükselme görülmüştür.



Şekil 4. Helisel Dişli Çatlak Hatası için 300 rpm'de Yüksüz ve 3 Nm Yüklü Ses Basıncı Değerleri



Şekil 5. Helisel Dişli Çatlak Hatası için 700 rpm’de Yüksüz ve 3 Nm Yüklü Ses Basınç Değerleri

Tablo 3.1. deneysel ölçümlerden elde edilen grafiklerin istatistiki verilerini göstermektedir. Burada ses basıncına ait CF, RMS, kurtosis, ortalama ve maksimum hata verileri çalışma hızı ve yüklenme şartlarına göre tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3.1. Ses Basınç Verilerinden Elde Edilen İstatistiki Sonuçlar

SES BASINÇ DEĞERLERİ İÇİN İSTATİSTİKİ SONUÇLAR								
	HELİSEL DİŞLİ (DİŞ KÖKÜNDE ÇATLAK)		HELİSEL DİŞLİ (PITTING)		DÜZ DİŞLİ (DİŞ KÖKÜNDE ÇATLAK)		DÜZ DİŞLİ (PITTING)	
	300 rpm	700 rpm	300 rpm	700 rpm	300 rpm	700 rpm	300 rpm	700 rpm
RMS0	0.0038	0.0286	0.0023	0.0055	0.000453	0.0011	0.0021	0.002
RMS3	0.0055	0.0423	0.0044	0.0065	0.0036	0.0058	0.0028	0.0036
CF0	23	25.4	21.21	19.3	14.5	26	19.6	19.05
CF3	30.2	31.2	45.2	43.6	56.1	45	49.4	49.7
KURT0	63.2	138.7	39	41.6	221.5	189.8	105.8	54
KURT3	46.2	95.1	41	32	88.8	32.6	57.6	56
HATA ORT0	0.0013	0.0095	0.00062	0.0016	3.16e-5	1.05e-4	0.00029	0.00028
HATA ORT3	0.0018	0.0085	0.0012	0.0022	0.001	0.002	0.00069	0.0009
MAX. HATA0	0.0546	0.53	0.0268	0.0507	0.0024	0.0225	0.0202	0.0169
MAX. HATA3	0.067	0.603	0.0418	0.0571	0.0592	0.0554	0.0327	0.043

4. DEĞERLENDİRMELER

Tek kademeli olarak üretilen dişli çark deney sisteminden elde edilen AE ve titreşim sinyalleri farklı çalışma hızı ve yüklenme koşullarına göre düz ve helisel dişliler için ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen sinyaller Fast Fourier Transform (FFT) aracılığıyla zaman alanından frekans alanına aktarılmıştır. Zaman alanında elde edilen sinyallerde hatanın yerinin belirlenme zorluğu nedeniyle frekans alanı tercih edilmiştir. Elde edilen veriler ile grafiklerden hata durumları, maksimum ve ortalama hata, RMS, CF, kurtosis parametreleri hesaplanmıştır.

Çalışmalar sonunda hata türünün helisel dişli ve düz dişlide farklı ses basıncı ve titreşim seviyeleri gösterdiği görülmüştür. Helisel dişlilerde diş kökünde oluşturulan çatlak hasarının pitting hatasından daha yüksek genlikte ses basıncı ve titreşim oluşturduğu gözlemlenmiştir. Artan çalışma hızının ve yüklenme durumunun ses basıncı ve titreşimi arttırdığı helisel dişlilerde belirgindir. Yüklenme halinde çalışma hızına oranla daha yüksek tepcecik oluşumu görülebilmektedir.

Düz dişli çarklarda oluşturulan hasarda ise pitting hatasının çatlak hatasına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. 300 d/dk çalışma hızında bu pikler belirgin değildir ancak çalışma hızının artması hasarı daha belirgin göstermektedir. Düz dişlilerin teması sırasında yüzeysel temasın helisel dişliye göre fazla olması nedeniyle temas yüzeyinde oluşturulan pitting hatası düz dişlilerdeki

çatlak hasarından daha yüksek tepecik oluşumuna sebep olmuştur. Ses basıncı seviyesi titreşime nazaran daha yüksektir. Yine yükleme durumunda hasarın daha belirgin pikler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Helisel dişlilerde ses basıncı ve titreşim değerleri düz dişlilerden daha yüksek olmasına karşın pitting hasarı daha geniş yüzeysel temastan dolayı düz dişlilerde daha yüksektir.

Kurtosis, grafiğin basıklığı ile ilgili bir değer vermektedir. Grafiklerde oluşan ani tepe değerleri bu değerlerin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Literatürde Gauss normal dağılımı 3 olarak belirtilmektedir. Titreşime ait sonuçlar genel olarak bu sınır üzerindedir ve hasar hakkında bilgi vermektedir. Bununla beraber, yine yüksek kurtosis değerleri ses basıncına ait verilerde genel olarak elde edilmiştir. Ancak, kurtosis'in çalışma hızı ve yükleme ile arasında orantısız bir değişim gözlenmemiştir.

Grafiklerdeki hata ortalaması ve maksimum piklerin oluşumu da çalışma hızı ve özellikle yüklemenin artması ile artma eğiliminde görülmüştür.

Elde edilen veriler ve yapılan incelemeler AE tekniğinin hasarın erken algılanmasında birtakım avantajlarını ortaya koymaktadır. Ölçümlerin hasarın olduğu noktaya yakın bir noktada ve temassız bir şekilde olması ve herhangi bir engele çarpmadan sinyallerin alınması dişli çark hasarını algılamada titreşime oranla daha etkilidir. Dişli çarklar için rulman yataklarından kaynaklanan hasarlarında titreşim grafiklerine yansımaları AE tekniğinin daha uygun olabileceğini göstermektedir. İstatistiksel sonuçlara göre ses basıncında yüksek CF, RMS ve kurtosis vb. parametrelerin elde edilmesi de AE sonuçlarının daha çok hataya işaret ettiğini gösterebilmektedir.

5. ÇEVRESEL ETKİ ANALİZİ

Proje Çevresel Sürdürülebilirliğe yönelik faaliyetleri içermemektedir.

Proje Çevresel Sürdürülebilirliğe yönelik faaliyetleri içermektedir.

Proje, Çevresel Sürdürülebilirliğe yönelik faaliyetleri içermekte ise aşağıda verilen Tablo'da ilgili kısımları doldurunuz.

Tablo 5.1. Çevre etkisi ve sürdürülebilirlik tablosu

	(EVET)	(HAYIR)	AÇIKLAMA (EVET ise lütfen kısaca açıklayınız)
Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının uygulamalarına yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Çevresel Sürdürülebilirliğe yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Tarımsal Sürdürülebilirliğe yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Geri Dönüşüm uygulamalarına yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Karbon veya benzeri zararlı gazların tespit edilmesine / kontrol edilmesine yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Tarımsal veya çevresel uygulamalarda kullanılan faydalı gazların tespit edilmesine/kontrol edilmesine yönelik faaliyetleri içermekte midir?			
Enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik faaliyetleri içermekte midir?			

6. MALİYET ANALİZİ TABLOSU

Maliyet Kalemi	Maliyet (TL)
Bruel-Kjaer (B&K) taşınabilir, çok kanallı pulse 3560-B-X05 ses ve ivme analizörü	45.000
MATLAB Yazılım Lisansı	15.000
TOPLAM	60.000

7. KAYNAKÇA

- [1] Eftekharijad, B., Mba, D. (2009). Seeded fault detection on helical gears with acoustic emission, *Applied Acoustics*, 70(1), 547–555.
- [2] Mba, D., Cooke, A., Roby, D. ve Hewitt, G. (2011) Detection of shaft-seal rubbing in large-scale power generation turbines with acoustic emissions; case study, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 218 (2), 71-81.
- [3] Metwalley, S. M., Hammad , N. and Abouel-Seoud, S. A., (2011). Vehicle gearbox fault diagnosis using noise measurements, *International Journal of Energy and Environment*, 2 (2) , 357-366.
- [4] Tan, C.K. and Mba, D., (2005). Correlation between acoustic emission activity and asperity contact during meshing of spur gears under partial elasto-hydrodynamic lubrication, *Tribology Letters*, 20(1).
- [5] Ulus, Ş. (2013). Dişli Mekanizmalarındaki Hataların Akustik Yöntemler ile Analizi ve Tespiti, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Söylemez, E. (2013). Mekanizma Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] Ulus Ş., (Eylül 2019), Dişli Çark Kusurlarının Viskoz Sürtünme Şartında Gürültü ve Titreşim Analizi. *19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2019)*, Hatay, Türkiye, ss.493-501.
- [8] http://guides.library.uwa.edu.au/mendeley/citation_styles, Erişim: 12 Eylül 2019.