



T.C.

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

ROTORLARDA STATİK VE DİNAMİK DENGE
(BALANS) DENEY FÖYÜ

1. DENEYİN AMACI

Rotorlarda dengeleme yapılmazsa mesnetlerde ilave reaksiyon kuvvetleri ortaya çıkar. Rotor döndüğü için bu kuvvetlerin doğrultusu ve açıl hıza bağlı olarak şiddeti değişken olur. Söz konusu kuvvetler titreşimlere sebep olur, bu da uzun vadede rotor ve yataklarına zarar verir. Bu deneyde bir rotorda statik ve dinamik dengeleme olmak üzere iki farklı dengeleme durumundan bahsedilecek, ne anlama geldikleri deneysel olarak izah edilecek.

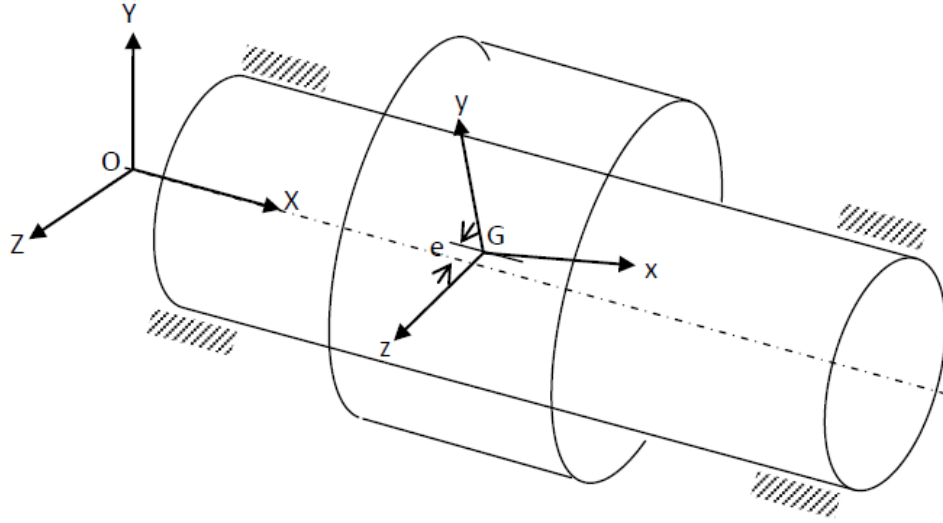
2. DENEYİN ÖĞRENME ÇIKTILARI

Bir mil ve üzerindeki kasnak, dişli, kavrama vs cisimler grubuna rotor denir. Taşıyıcı mil ve diğer parçalar imalat toleransına sahiptirler. Dolayısıyla rotorun kütle merkezi tam olarak dönme ekseninin üzerinde bulunmayabilir. Ayrıca, rotorun asal atalet ekseni ile dönme ekseni çok az da olsa farklı olabilir. **Şekil 1**'de böyle bir rotor temsili olarak gösterilmiştir. Sabit OXYZ takımının X ekseni dönme ekseni olup, rotora bağlı Gxyz takımının merkezi rotorun kütle merkezinde olsun ve x ekseni rotorun asal atalet eksenlerinden birini gösterebilir. x ekseni X ile paralel değil ve G dönme ekseninden "e" kadar kaçaktır. Şu halde, özellikle yüksek açıl hızlarda, dengelenmemiş kuvvetler ve momentler oluşur. Bunlar mesnetlerde ilave yüklerle ve böylece titreşim ve gürültüye sebep olurlar. Dengesizliği gidermenin yolu yapıya eksen üzerinde mesnetlerden belli uzaklıkta ve belli yarıçaplarda kütle eklemektir. Böylece rotorun kütle merkezi (G) X ekseni üzerine getirilir, x ekseni de X ile çakıştırılmaya çalışılır. Kütle merkezini dönme ekseni üzerine getirme işlemine **statik dengeleme** denir. Statik dengelenmiş rotor döndürüldüğünde dengesizlikler sebebiyle ortaya çıkan merkezkaç kuvvetlerin vektörel toplamı sıfırdır, fakat bir noktaya göre momentleri toplamı sıfır değildir. Momentlerin toplamının da sıfır olması sağlanırsa yapı **dinamik dengelenmiş** olur. Dinamik dengelenmiş rotor aynı zamanda statik olarak da dengelidir. Bu deney için öğrenme çıktıları;

- Dengesizliğin, tanımı, tespiti ve ölçümünün gerçekleştirilmesi,
- Rotorlarda statik ve dinamik dengelemenin teorik olarak hesaplanması,
- Dengesizlik içeren rotorların, kütle ekleyerek statik ve dinamik olarak dengelenmesi.

3. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR

Deney kapsamında kullanılacak tesisatla uyumlu olarak statik ve dinamik dengeleme bahisleri ayrı ayrı ele alınacaktır.

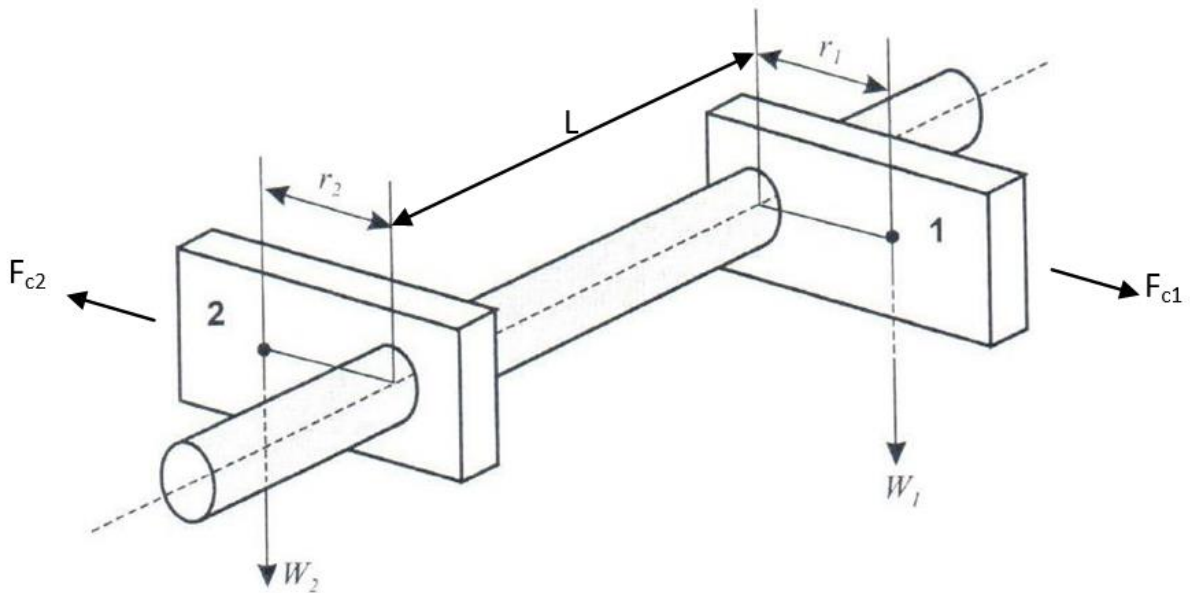


Şekil 1. Dengelenmemiş rotor

a) Statik Dengeleme

Şekil 2’de üzerinde iki ek kütle taşıyan bir rotor gösterilmiştir. Rotor mili simetrik kabul edilirse tüm yapının kütle merkezinin konumu kütlelerin birbirlerine göre açısıl konumlarına bağlı olur. Ağırılığı W_1 olan kütle saat ibresi yönünde, diğeri ters yönde moment oluşturmaya çalışır. Bunların birbirine eşit olması halinde rotor statik olarak dengelenmiştir:

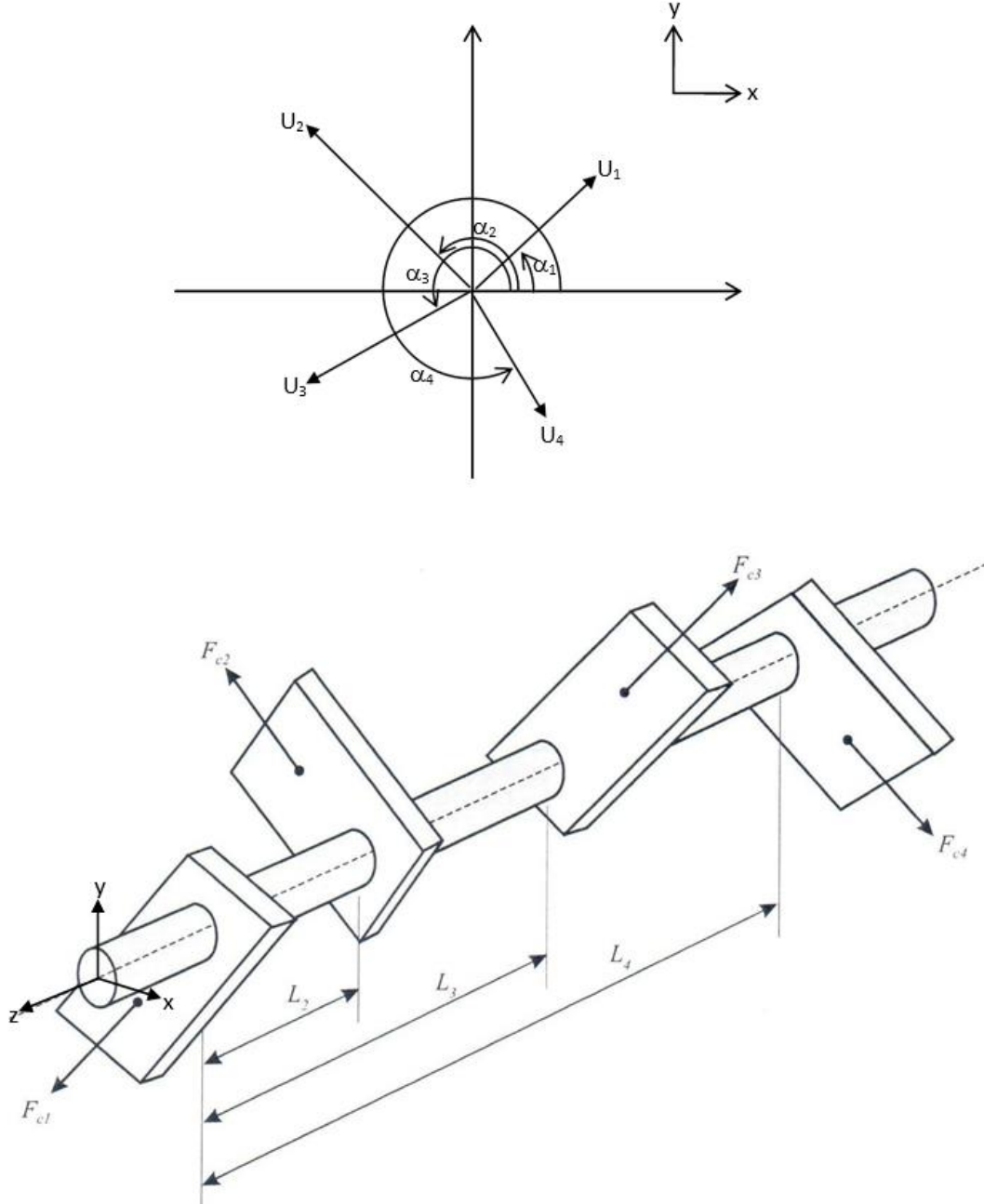
$$W_1 r_1 = W_2 r_2 \quad (1)$$



Şekil 2. İki kütleli rotor

Şekil 2’de gösterilen rotor sabit ω açısal hızı ile dönerse $F_{c1}= U_1\omega^2$ ve $F_{c2}= U_2\omega^2$ merkezkaç kuvvetleri oluşur. Burada $U_1=(W_1/g)r_1$ ve $U_2=(W_2/g)r_2$ olup (g: yerçekimi ivmesi) bunlara **dengesizlik** denir. Statik dengeleme için $\Sigma F=0$ olmalıdır. Bu durumda F_{c1} ve F_{c2} ’nin şiddetçe eşit, aynı doğrultuda ve ters yönde olması gerektiği anlaşılır ki, buradan (1) eşitliği ortaya çıkar.

Şimdi Şekil 3’deki sisteme bakalım.



Şekil 3. Dört kütleli rotor

Rotor üzerinde dört adet kütle olup bunlara ait dengesizlikler: $U_n=(W_n/g)r_n$ ve bu dengesizliklerin referans eksen ile yaptıkları açılar α_n 'dir (burada $n=1,2,3,4$). Bir dengesizlik vektörünü $U_n=U_n\{\mathbf{i}\cos(\alpha_n) + \mathbf{j}\sin(\alpha_n)\}$ olarak yazabiliriz. Şu halde, statik denge şartı dengesizlik vektörleri cinsinden $\Sigma U_n = \mathbf{0}$ şeklinde yazılabilir. Bu vektörel eşitliğin \mathbf{i} ve \mathbf{j} li katsayılarının eşitliğinden aşağıdaki denklemler bulunur:

$$U_1\cos(\alpha_1) + U_2\cos(\alpha_2) + U_3\cos(\alpha_3) + U_4\cos(\alpha_4) = 0 \quad (2.1)$$

$$U_1\sin(\alpha_1) + U_2\sin(\alpha_2) + U_3\sin(\alpha_3) + U_4\sin(\alpha_4) = 0 \quad (2.2)$$

(2) eşitlikleri geneldir. Mesela sadece iki kütle ($U_3=U_4=0$) halinde $U_1\cos(\alpha_1) + U_2\cos(\alpha_2) = 0$ yazılır. U_1 ve U_2 eşit ise $\alpha_2=\alpha_1+180^\circ$ sonucu ortaya çıkar ki bu da (1) eşitliği ile aynı sonuca götürür. W_n ve r_n cinsinden (3.1) ve (3.2) eşitlikleri;

$$W_1r_1\cos(\alpha_1) + W_2r_2\cos(\alpha_2) + W_3r_3\cos(\alpha_3) + W_4r_4\cos(\alpha_4) = 0 \quad (3.1)$$

$$W_1r_1\sin(\alpha_1) + W_2r_2\sin(\alpha_2) + W_3r_3\sin(\alpha_3) + W_4r_4\sin(\alpha_4) = 0 \quad (3.2)$$

şeklinindedir. İki denklemden iki bilinmeyen bulunabileceğine göre bu eşitlikler çözülürken yeterli sayıda bilinen olmalıdır.

b) Dinamik Dengeleme

Bu durumda, $\Sigma U_n = 0$ şartına ek olarak, dengesizliklerin rotor eksenini üzerindeki bir noktaya göre momentleri toplamı da sıfır olmalıdır; $\Sigma L \times U_n = \mathbf{0}$. Mesela 2 kütle için Şekil 2'ye bakarsak, dengesizlik kuvvetlerinin 2 düzlemine göre momenti $M_2=LF_{c1}$ 'dir. 1 düzlemine göre moment alsak $M_1=LF_{c2}$ buluruz. Statik denge gereği F_{c1} ve F_{c2} eşit olduğundan $M_1=M_2$ 'dir. Rotor eksenini üzerinde 1 ve 2 den farklı bir noktaya göre moment alsak ve buna M desek sonuç yine aynı çıkar; $M=M_1=M_2$. M 'nin sıfır olması için $L=0$ olmalıdır. Bu ise deney düzeneğimizde mümkün değildir. Demek ki iki kütle halinde mevcut deney düzeneği ile dinamik dengeleme yapamıyoruz. Dört kütle halinde Şekil 3'de 1 nolu kütle bulduğu konuma göre moment alırsak;

$$L_2 \times U_2 + L_3 \times U_3 + L_4 \times U_4 = \mathbf{0}$$

$$(-L_2\mathbf{k}) \times (U_2\{\mathbf{i}\cos(\alpha_2) + \mathbf{j}\sin(\alpha_2)\}) + (-L_3\mathbf{k}) \times (U_3\{\mathbf{i}\cos(\alpha_3) + \mathbf{j}\sin(\alpha_3)\}) + (-L_4\mathbf{k}) \times (U_4\{\mathbf{i}\cos(\alpha_4) + \mathbf{j}\sin(\alpha_4)\}) = \mathbf{0}$$

Bu son denklem **i** ve **j** li katsayılar ayrıştırılarak;

$$L_2U_2\sin(\alpha_2) + L_3U_3\sin(\alpha_3) + L_4U_4\sin(\alpha_4) = 0 \quad (4.1)$$

$$L_2U_2\cos(\alpha_2) + L_3U_3\cos(\alpha_3) + L_4U_4\cos(\alpha_4) = 0 \quad (4.2)$$

haline getirilir. Bunları **W** ve **r** cinsinden

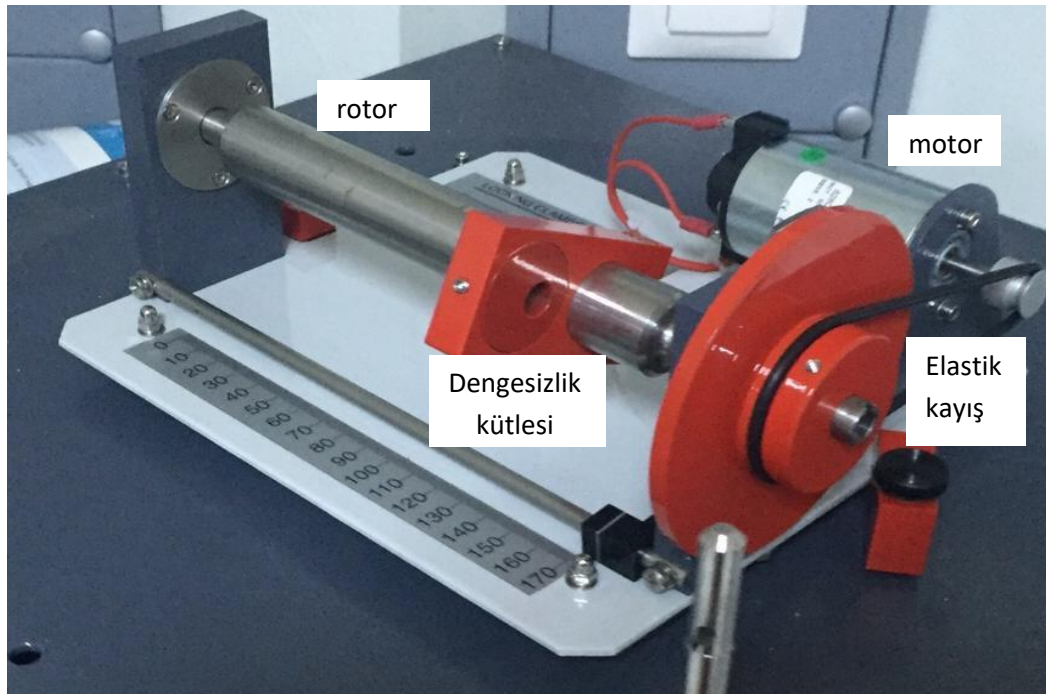
$$L_2W_2r_2\sin(\alpha_2) + L_3W_3r_3\sin(\alpha_3) + L_4W_4r_4\sin(\alpha_4) = 0 \quad (5.1)$$

$$L_2W_2r_2\cos(\alpha_2) + L_3W_3r_3\cos(\alpha_3) + L_4W_4r_4\cos(\alpha_4) = 0 \quad (5.2)$$

şeklinde yazabiliriz. Demek ki sadece statik dengeleme için iki, dinamik dengeleme için de iki olmak üzere toplam dört eşitlik mevcuttur. Denklem sayısı kadar bilinmeyen bulunabildiğinden diğer parametrelerin biliniyor olması gerekir.

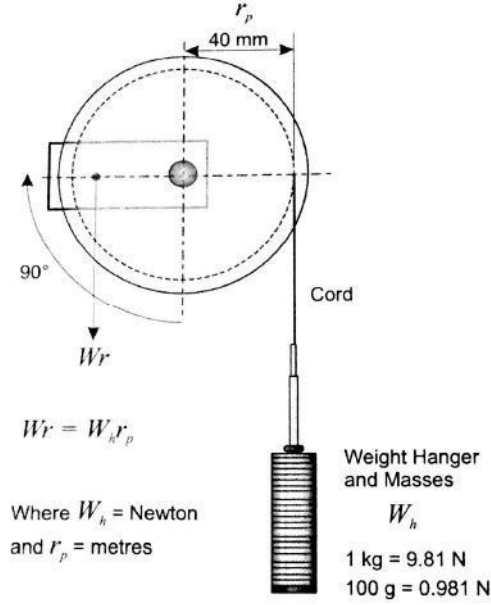
4. DENEYİN YAPILIŞI

Deney tesisatı Şekil 4'te gösterilmiştir. Motor çalıştırıldığında sabit hızla döner. Motor milinden elastik kayışla alınan hareket rotora aktarılır. Rotor üzerinde farklı konumlara takılabilen prizmatik kütleler mevcuttur. Bu kütlelerin miktar ve açısal konumları ayarlanarak farklı dengesizlikler elde edilebilir.



Şekil 4. Deney tesisatı

Dengesizlikleri ölçmek üzere Şekil 5'deki sistemden yararlanılır. Bunun için rotorun motorla irtibatını sağlayan elastik kayış çıkarılır (Şekil6), rotorun ucuna başka bir milli disk takılır (Şekil 7). Dengesizliği ölçülmek istenen kütle düşeyle 90° açı yapana kadar kancalı çubuğa her biri 10 g ve 1 g olan yassı disklerden yeterli sayıda takılır (Şekil 5). Moment dengesinden dengesizlik ölçülür.



Şekil 5. Dengesizlik ölçümü



Şekil 6.



Şekil 7.

Statik Dengeleme

İki kütle halinde statik denge için dengesizliklerin eşit ve açısal konumları arasında 180° olması gerektiği önceden ifade edilmişti.

Üç kütle halinde, (2) denklemleri aşağıdaki hali alır:

$$U_1 \cos(\alpha_1) + U_2 \cos(\alpha_2) + U_3 \cos(\alpha_3) = 0 \quad (6.1)$$

$$U_1 \sin(\alpha_1) + U_2 \sin(\alpha_2) + U_3 \sin(\alpha_3) = 0 \quad (6.2)$$

Tüm dengesizlikler ve ek olarak bunlardan birinin açısı biliniyorken, diğer iki açı bu denklemlerden bulunabilir.

Dört kütle halinde (2) denklemlerinde dört dengesizlik miktarına ek olarak herhangi iki dengesizliğin açısı bilinmeli, diğerleri denklemlerden çözülmelidir.

Dinamik Dengeleme

Mevcut deney düzeneği ile iki kütle için dinamik dengeleme yapılamıyordu (çünkü $L=0$ şartı sağlanmıyor). Üç kütle halinde (6) denklemlerine ek olarak, (5) denklemleri aşağıdaki gibi olur:

$$L_2 U_2 \sin(\alpha_2) + L_3 U_3 \sin(\alpha_3) = 0 \quad (7.1)$$

$$L_2 U_2 \cos(\alpha_2) + L_3 U_3 \cos(\alpha_3) = 0 \quad (7.2)$$

Şimdi elimizde toplam dört denklem var, yani dört bilinmeyen bulabiliriz. Dengesizlik değerlerine ek olarak, açılardan birini verirsek diğer açılara ilaveten L_2 ve L_3 ü bulabiliriz. Ya da uzunluklardan birini belirleyip diğer uzunluğu ve açıları bulabiliriz. Benzer şekilde dört kütle için (2) denklemlerine ek olarak (4) denklemleri kullanılarak bilinmeyen açı, uzunluk veya dengesizlik değerleri bulunabilir.

Uygulama:

Üç kütle halinde $U_1=U_3=U$ ve $U_2=2U$ alınıp $\alpha_1=\alpha_3=180^\circ$ ve $\alpha_2=0$ yapılır ve dengesizlikler arasındaki mesafeler eşit alınırsa aynı anda (6) ve (7) eşitliklerinin sağlandığı görülebilir. Bu durumda rotor dinamik dengelenmiştir.

Rotor sadece statik dengeli ise, bu rotor motor milinden ayrılıp (aradaki elastik kayış çıkarılıp)

yavaşça döndürülerek kendi haline bırakıldığında açısal hızı doğrusal bir şekilde azalarak sıfır olur. Statik dengeli olmayan rotorda açısal hız doğrusal azalmaz, salınımlı bir şekilde azalır. Bu iki durumu deney düzeneğinde gözlemlemek mümkündür. Sadece statik dengeli rotor motora bağlanıp döndürülürse deney düzeneğinde gözle görülür (veya hissedilir) sarsıntılar oluşur. Bunun sebebi rotorun dinamik olarak dengelenmemesidir. Dinamik dengeli rotorda ek olarak bu sarsıntılar da ortadan kalkar. Tamamen dengesiz rotor döndürüldüğünde sarsıntılar çok daha fazla olur.

Dört kütle halinde $U_1=U_2=U_3=U_4=U$ ve $\alpha_1=\alpha_4=180^\circ$, $\alpha_2=\alpha_3=0$ alınıp dengesizlikler arasındaki mesafeler eşit yapılırsa rotorun dinamik dengeli olduğu görülebilir.

Bunun dışında, farklı dengesizlikler oluşturulup statik ve dinamik dengenin sağlandığı farklı konfigürasyonlar elde edilir ve bu halde statik ve/veya dinamik dengeli rotorun tabii özellikleri deney düzeneği ile gözlenir.

RAPOR İÇİN İSTENENLER

Araştırma projesi istenilecek olup deney esnasında gerekli açıklamalar yapılacaktır.

KAYNAKLAR

[1]<http://ocw.metu.edu.tr/mod/resource/view.php?id=1124>

[2][http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=bearings in internal combustion engines](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=bearings%20in%20internal%20combustion%20engines)

[3][Gunt Hamburg GL 112Cam Analysis Apparatus Experiment Instructions, Publication No: 913.000.00 A 112 12. \(11/2013\)](#)