

MÜHİMMAT SİSTEMLERİ İÇİN KÜTLE ÖZELLİKLERİ ÖLÇÜMÜ YAPAN TEST DÜZENEĞİ TASARIMI

Berkay KILIÇ^(a), Aydın TÜZÜN^(a), Hüsnü DAL^(b)

^(a) Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, SAGE, 06261 Ankara, berkay.kilic@tubitak.gov.tr

^(b)Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Bulvarı 1, 06800 Ankara

ÖZET

Bu bildiride, mühimmatların ve alt bileşenlerinin kütle özelliklerini, tek bir test kurulumu ile ölçülebilen bir düzeneğin tasarımı anlatılmıştır. Kütle özellikleri ölçülmek istenen cisim, bu düzeneğe bağlanmakta ve cisme belirli bir nokta etrafında, üç boyutlu, salınımsal dönme hareketi verilmektedir. Bu hareket esnasında cismin hız ve ivme değerleri, cismin bağlantı noktasındaki kuvvet ve tork değerleri ile eşzamanlı olarak ölçülmektedir. Ölçülen hız, ivme, kuvvet ve tork değerleri, Newton'un hareket denklemlerinde kullanılarak cismin kütle özellikleri hesaplanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kütle Özellikleri, Atalet Momentleri, Atalet Çarpımsalları

ABSTRACT

In this paper, design of a device, which can measure mass properties of missiles or their sub-components in a single test setup, is expressed. An object, whose mass properties are going to be calculated, is attached to the device and three-dimensional, oscillatory motion about a specific point is supplied to that object. During this motion, velocity and acceleration values of the object are measured simultaneously with the force and torque values at the connection point of the object. Mass properties of the object are computed by using measured velocity, acceleration, force and torque values in Newton's equations of motion.

Keywords: Mass Properties, Moments of Inertia, Products of Inertia

1. GİRİŞ

Bir cismin kütle özellikleri; cismin kütlesi (m), ağırlık merkezi koordinatları (x_G, y_G, z_G), atalet momentleri (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) ve atalet çarpımsalları (I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}) ile ifade edilen on farklı parametreden oluşur. Kütle, cismin bir kuvvet etkisi altında doğrusal ivmelenmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Ağırlık merkezi, cismin her parçacığının kütlelerinin dengelendiği noktadır. Atalet momentleri, kütleye benzer olarak, cismin bir tork etkisi altında açısal ivmelenmeye karşı gösterdiği dirençtir. Atalet çarpımsalları ise cismin belirli bir düzleme göre olan simetrikliğini gösteren ölçüdür. Herhangi bir atalet çarpımsalının sıfır olduğu düzlem, simetri düzlemidir.

Bir cismin hareketini tanımlamak, izlemek ve kontrol etmek için, o cismin hız ve ivme değerlerinin yanı sıra kütle özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bir sistemin hareket kontrol algoritmaları geliştirilirken, veya bilgisayar simülasyonları yapılırken kütle özelliklerinin doğru olarak bilinmesi önemlidir.

Kütle özellikleri, bir katı model programı kullanılarak doğrudan ölçülebilir; ancak, gerçekteki sistemin kütle özellikleri, katı model programından elde edilen değerlere göre farklılık gösterir. Geometrik tolerans bozuklukları, malzemelerdeki hatalar veya homojen olmama durumları; bu farklılığın başlıca sebepleridir. Ayrıca katı model programında modellenmeyen kablaj veya hazır alınan alt sistemler, kütle özellikleri ölçümlerinde farklılığa sebep olabilir. Bu sebeple, sadece katı model programlarından alınan kütle özellikleri ölçümlere göre tasarım yapmak sağlıklı bir seçenek değildir. Kütle özelliklerini elde etmek için uygulanacak en güvenli yöntem, deneysel ölçüm yapmaktır.

Literatürde, kütle özelliklerini tek tek ölçebilen test düzenekleri üzerine birçok kaynak bulunmaktadır [1], [2]. Bu tek tek ölçme işlemi, kütle özellikleri ölçülecek sistemin en az altı defa test düzeneğine bağlanması ve ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu durum, hem ölçüm aşamasını zorlaştırmakta hem de ölçüm süresini uzatmaktadır. Ayrıca bazı geometriler için sistemi altı farklı yönde test düzeneğine bağlamak mümkün olmamaktadır.

Kütle özelliklerini tek bir test konfigürasyonu ile ölçebilen, sistemin test düzeneğine birden fazla sökölüp takılmasını gerektirmeyen test düzenekleri de literatürde bulunmaktadır [3], [4]. Bu düzeneklerdeki temel fikir, sisteme üç boyutlu dönme hareketi sağlamak, bu hareket sonucu sistemin oluşturduğu yükleri ölçmek ve bu ölçümleri Newton'un hareket denklemlerinde kullanarak kütle özelliklerini elde etmektir. Kütle özellikleri ölçülecek sisteme sağlanacak olan üç boyutlu dönme hareketi; dengeleyici bir etkiyle salınımsal şekilde veya doğrudan eyleyiciler aracılığıyla olabilir.

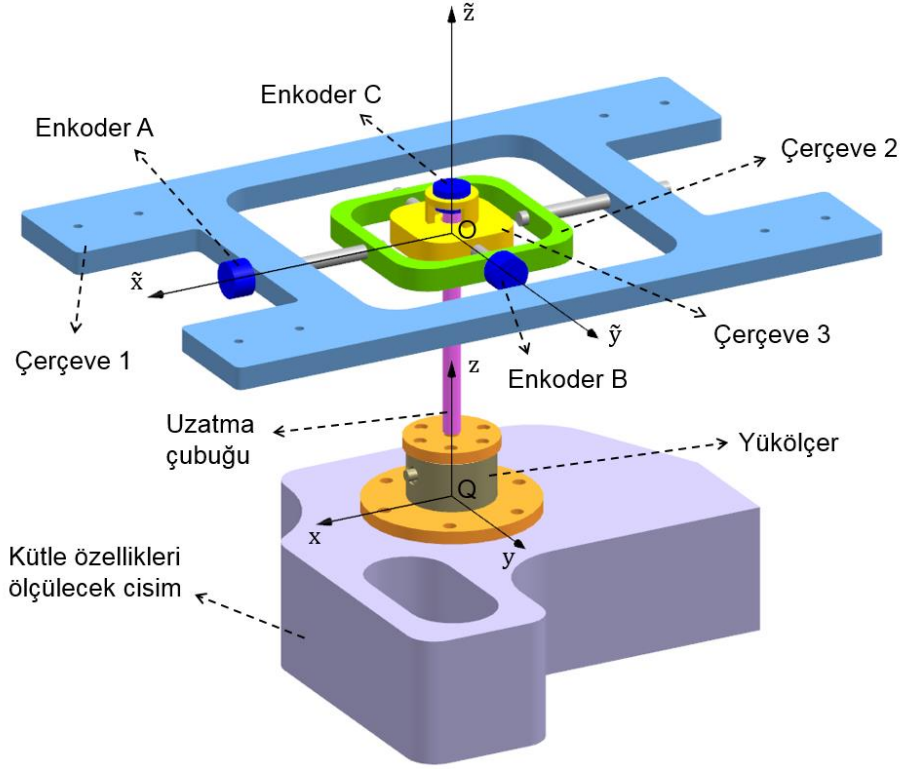
Kütle özelliklerini deneysel olarak ölçmek amacıyla, bir test düzeneği geliştirilmiştir. Bu düzenek, tüm kütle özelliklerini tek bir test konfigürasyonu ile ölçebilmektedir. Bu bildiride; öncelikle, geliştirilen test düzeneğinin tasarımı anlatılmış ve arkasında yatan teorik bilgiler özetlenmiştir. Daha sonra, test düzeneğinin doğruluğu, MSC Adams programı kullanılarak yapılan örnek bir testle kontrol edilmiştir.

2. TASARIM VE YÖNTEM

Tasarlanacak test düzeneğinin amacı, bir sistemin kütle özelliklerini tek bir test kurulumu ile ölçmektir. Bunun için, literatürdeki genel konseptlerin olumlu ve olumsuz yanları göz önünde bulundurularak tasarım gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarıma göre kütle özellikleri ölçülecek cisme üç boyutlu, salınımsal dönme hareketi sağlanmaktadır. Bu hareket sonucu, cismin konumu ölçülerek hız ve ivme değerleri elde edilmektedir. Aynı zamanda hareket esnasında cismin test düzeneğine aktardığı kuvvet ve tork değerleri ölçülmektedir.

2.1. TEST DÜZENEGİ

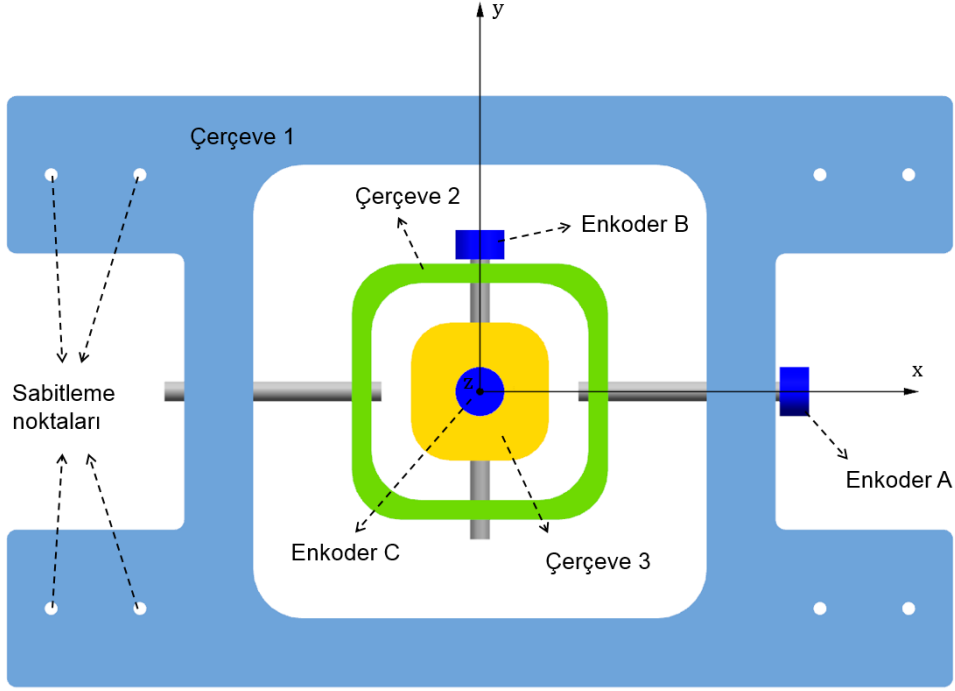
Test düzeneğinin temel parçaları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Test düzeneğinin genel görünümü ve temel parçaları

Düzenekteki iç içe duran çerçeveler ve uzatma çubuğu, birbirlerine göre dönme hareketi yaparak ölçümü yapılan cismin üç boyutlu dönme hareketi yapmasını sağlamaktadır. Bu parçaların birbirlerine göre dönme hareketlerini yaptıkları eksenler, şekilde gösterilen O noktasında kesişmektedir. Dolayısıyla, O noktası hareketsizdir ve cisim, bu nokta etrafında üç boyutlu dönme hareketini gerçekleştirmektedir. Şekil 2’de gösterilen 1 numaralı çerçeve, bağlantı noktalarından sabitlenmiştir. 2 numaralı çerçeve, mevcut pim bağlantıları sayesinde 1 numaralı çerçeveye göre x ekseninde dönmektedir. Bu dönme hareketi sonucu çerçeveler arasında oluşan bağıl dönme açısı, enkoder-A ile ölçülmektedir. Aynı şekilde, 3 numaralı çerçeve ise 2 numaralı çerçeveye göre y ekseninde dönmektedir ve bu dönme açısı enkoder-B ile ölçülmektedir. Benzer biçimde, cismin sabitlendiği uzatma çubuğu, 3 numaralı çerçeveye göre z ekseninde dönmekte ve aralarındaki dönme açısı enkoder-C ile ölçülmektedir. Kütüphane özellikleri ölçülecek cisim, test düzeneğine, uzatma çubuğunda ucunda bulunan 6 eksenli yük ölçer aracılığıyla bağlanmaktadır. Bu yük ölçer, cismin hareketi boyunca test düzeneğine aktardığı kuvvet ve tork değerlerinin x, y, z eksenlerindeki bileşenlerini

ölçmektedir. Bu ölçüm, konumu O noktasına göre bilinen Q noktasında yapılmaktadır. Kuvvet ve tork değerlerinin bu noktada ölçülmesi sayesinde, ölçülmek istenen cisim dışında düzenekteki diğer parçaların neden olduğu yükler ve çerçevelerin birbirine göre hareketi esnasındaki sürtünmeden dolayı ortaya çıkan kayıplar, yük ölçümüne yansımamış olur.



Şekil 2. Test düzeneğinin üst görünüşü

Ölçüm yapılacak cisme dönme hareketi, cismi el ile O noktası etrafında döndürerek belli bir konuma getirip serbest bırakılarak sağlanmaktadır. Verilen bu başlangıç yerdeğiştirme koşulu ile cisim salınımsal bir şekilde üç boyutlu dönme hareketi yapar. Çerçevelerin x ve y eksenleri etrafındaki dönme hareketinin salınımsal olmasının sebebi, yerçekimi kuvvetinin dengeleyici kuvvet olarak etki etmesidir. Ancak z ekseninde dönme hareketinde yerçekimi, salınımsal hareketi sağlamaz. Bu yüzden 3 numaralı çerçeve ile uzatma çubuğu arasına burulma yayı yerleştirilmiştir. Burada burulma yayı, dengeleyici kuvvet olarak etki ederek z ekseninde dönme hareketinin olmasını sağlar. Test düzeneğinden okunan ve kütle özellikleri hesaplamalarında kullanılacak olan veriler şu şekilde özetlenebilir:

- 3 açısal yerdeğiştirme verisi ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)
- 3 kuvvet verisi (F_x, F_y, F_z)
- 3 tork verisi (T_x, T_y, T_z)

2.2. ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Test düzeneğinden alınan verileri kullanarak kütle özelliklerini hesaplamak için Newton'un hareket denklemlerinden faydalanılmıştır. Test düzeneğinde, kuvvet ve tork değerleri, Q noktasında ölçüldüğü için, bu noktaya göre Newton'un doğrusal ve açısal hareket denklemleri aşağıdaki şekilde yazılmıştır [3].

$$\begin{Bmatrix} \Sigma F_{Qx} \\ \Sigma F_{Qy} \\ \Sigma F_{Qz} \end{Bmatrix} = m \begin{Bmatrix} a_{Qx} + g_x \\ a_{Qy} + g_y \\ a_{Qz} + g_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2 & -\alpha_z + \omega_x \omega_y & \alpha_y + \omega_x \omega_z \\ \alpha_z + \omega_x \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & -\alpha_x + \omega_y \omega_z \\ -\alpha_y + \omega_x \omega_z & \alpha_x + \omega_y \omega_z & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \Sigma T_{Qx} \\ \Sigma T_{Qy} \\ \Sigma T_{Qz} \end{Bmatrix} = m \begin{bmatrix} 0 & a_{Qz} + g_z & -a_{Qy} - g_y \\ -a_{Qz} - g_z & 0 & a_{Qx} + g_x \\ a_{Qy} + g_y & -a_{Qx} - g_x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de verilen tüm değişkenler, merkezi Q noktasında olan ve cisimle birlikte hareket edip dönen eksen takımında tanımlıdır. Bu eksen takımı, yerel eksen takımı olarak tanımlanmıştır. Şekil 1'de gösterilen, merkezi O noktasında olan ve hareket etmeyen eksen takımı ise genel eksen takımı olarak tanımlanmıştır. Denklem 1 ve 2'deki değişkenler, şu şekilde açıklanabilir:

m	: Cismın kütlesi
$x \ y \ z$: Cismın Q noktasına göre ağırlık merkezi koordinatları
$F_{Qx} \ F_{Qy} \ F_{Qz}$: Q noktasındaki kuvvet değerleri
$T_{Qx} \ T_{Qy} \ T_{Qz}$: Q noktasındaki tork değerleri
$g_x \ g_y \ g_z$: Yerçekimi ivmesinin bileşenleri
$\omega_x \ \omega_y \ \omega_z$: Cismın açısal hız değerleri
$\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z$: Cismın açısal ivme değerleri
$a_{Qx} \ a_{Qy} \ a_{Qz}$: Q noktasının doğrusal ivme değerleri
$I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz}$: Cismın atalet momentleri
$I_{xy} \ I_{xz} \ I_{yz}$: Cismın atalet çarpımsalları

Denklem 1 ve 2'de; cismın kütlesi, ağırlık merkezi koordinatları, atalet momentleri ve çarpımsalları bilinmeyen değerlerdir. Cismın kütlesi, yapılacak statik bir ölçümle test düzeneği kullanarak kolayca ölçülebilmektedir. Bu sebeple, ilk olarak cismın kütlesi ölçülmekte ve bilinen bir değer olarak denklemlerde kullanılmaktadır. Böylece denklem 1 ve 2, çözümü daha kolay bir duruma gelir. Denklem 1 ve 2'deki kuvvet ve tork değerleri, doğrudan yükölçerden okunan değerlerdir. Yükölçer, cisimle bir bütün olarak dönme hareketini gerçekleştirdiği için, okunan verilerde koordinat dönüşümü yapmaya

gerek yoktur. Yerçekimi ivmesinin bileşenlerini bulmak için ise genel eksen takımındaki yerçekimi ivmesinin dönüşüm matrisi kullanılarak yerel eksen takımına dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm matrisi, Euler açıları kullanılarak oluşturulabilir. Genel eksen takımından yerel eksen takımına dönüşümde sırasıyla x, y, z eksenleri etrafında dönme hareketi olduğu için dönüşüm matrisi x-y-z Euler dönüşüm sıralaması kullanılarak elde edilir [5]. Buradaki Euler açıları, doğrudan enkoderlerden okunan açısal yerdeğiştirme değerleridir. Buna göre, genel eksen -z yönünde olan yerçekimi ivmesinin yerel eksendeki bileşenleri aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$\begin{Bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & \cos \theta_x \sin \theta_z + \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z & \sin \theta_x \sin \theta_z - \cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z \\ -\cos \theta_y \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & \sin \theta_x \cos \theta_z + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sin \theta_y & -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g_0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Denklem 3'teki g_0 , standart yerçekimi ivmesidir ve değeri 9.80665 m/s²'dir. Denklem 1 ve 2'deki açısal hız değerlerini bulmak için ise ölçülen Euler açılarının türevleri alınmalı ve elde edilen değerler, yine Euler dönüşümü kullanılarak yerel eksen takımında tanımlanmalıdır. Buna göre açısal hız formülü aşağıdaki gibidir [5].

$$\{\boldsymbol{\omega}\} = \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ \sin \theta_x & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Açısal ivme değerleri ise, doğrudan açısal hızların türevi alınarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\boldsymbol{\alpha} = \dot{\boldsymbol{\omega}} \quad (5)$$

Q noktasının doğrusal ivme değerleri ise aşağıdaki formülle ifade edilir [6].

$$\boldsymbol{a}_Q = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{r}_Q + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_Q) \quad (6)$$

Denklem 6'daki \boldsymbol{r}_Q vektörü, Q noktasının O noktasına göre olan konumunu ifade etmektedir. Test düzeneğinin boyutları bilindiği için, \boldsymbol{r}_Q vektörü de bilinmektedir. Denklem 1 ve 2, bilinmeyenlerden oluşan bir vektör kurularak aşağıdaki biçimde birleştirilerek yeni bir denklem sistemi elde edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \Sigma \boldsymbol{F}_Q - m\{\boldsymbol{a}_Q + \boldsymbol{g}\} \\ \Sigma \boldsymbol{M}_Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m[\boldsymbol{A}_3] & [\mathbf{0}] \\ m[\boldsymbol{A}_4] & [\boldsymbol{A}_5] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{r}_G \\ \boldsymbol{I}_Q \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Denklem 7'deki terimler aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\boldsymbol{r}_G = [x \ y \ z]^T, \boldsymbol{I}_Q = [I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz} \ I_{xy} \ I_{xz} \ I_{yz}]^T,$$

$$\begin{aligned}
 [A_3] &= \begin{bmatrix} -\omega_y^2 - \omega_z^2 & -\alpha_z + \omega_x \omega_y & \alpha_y + \omega_x \omega_z \\ \alpha_z + \omega_x \omega_y & -\omega_x^2 - \omega_z^2 & -\alpha_x + \omega_y \omega_z \\ -\alpha_y + \omega_x \omega_z & \alpha_x + \omega_y \omega_z & -\omega_x^2 - \omega_y^2 \end{bmatrix}, \\
 [A_4] &= \begin{bmatrix} 0 & a_{Qz} + g_z & -a_{Qy} - g_y \\ -a_{Qz} - g_z & 0 & a_{Qx} + g_x \\ a_{Qy} + g_y & -a_{Qx} - g_x & 0 \end{bmatrix}, \\
 [A_5] &= \begin{bmatrix} \alpha_x & -\omega_y \omega_z & \omega_y \omega_z & \alpha_y - \omega_x \omega_z & \alpha_z + \omega_x \omega_y & \omega_y^2 - \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_z & \alpha_y & -\omega_x \omega_z & \alpha_x + \omega_y \omega_z & \omega_z^2 - \omega_x^2 & \alpha_z - \omega_x \omega_y \\ -\omega_x \omega_y & \omega_x \omega_y & \alpha_z & \omega_x^2 - \omega_y^2 & \alpha_x - \omega_y \omega_z & \alpha_y + \omega_x \omega_z \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Denklem 7, daha düzenli bir biçimde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\{A_6\}_{6 \times 1} = [A_7]_{6 \times 9} \{X\}_{9 \times 1} \quad (8)$$

$$\{X\} = [x \ y \ z \ I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz} \ I_{xy} \ I_{xz} \ I_{yz}]^T.$$

8 numaralı denklem sistemi, 6 farklı denklemden oluşmaktadır. Toplanan veriler ile her bir anda, 6 tane denklem elde edilebilir. Toplamda n farklı andaki veriler kullanılarak, 6n tane denklem edilebilir. Elde edilen yeni denklem sistemi, en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülebilir [7].

$$\{X\} = ([A_9]_{9 \times 6n}^T [A_9]_{6n \times 9})^{-1} [A_9]_{9 \times 6n}^T \{A_8\}_{6n \times 1} \quad (9)$$

Denklem 9'dan elde edilen atalet tensörü, Q noktasındaki yerel eksene göre hesaplanmıştır. Atalet değerlerini genellikle ağırlık merkezine göre tanımlamak daha uygundur. Ağırlık merkezine göre atalet tensörü ise paralel eksenler teoremi ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir [6].

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}_Q - m \begin{bmatrix} y^2 + z^2 & -xy & -xz \\ -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -xz & -yz & x^2 + y^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tablo 1. Hesaplanan kütle özelliklerinin gerçek değerler ile olan farkı

	Gerçek	Hesaplanan	% Hata
x (m)	0.075	0.0752	0.27
y (m)	0.050	0.0497	0.56
z (m)	0.046	0.0459	0.31
I _{xx} (Nm)	0.1622	0.1636	0.89
I _{yy} (Nm)	0.1467	0.1469	0.08
I _{zz} (Nm)	0.2410	0.2412	0.10
I _{xy} (Nm)	0.0481	0.0473	1.62
I _{xz} (Nm)	0.0442	0.0423	4.47
I _{yz} (Nm)	0.0295	0.0291	1.41

2.3. DURUM ÇALIŞMASI

MSC Adams programı kullanılarak Şekil 1'de gösterilen test düzeneği için örnek bir simülasyon modeli hazırlanmıştır. Bu modelde, 12.8 kg'lık cisme, başlangıç

koşulu Euler açıları, $\theta_x = 20^\circ$, $\theta_y = 25^\circ$, $\theta_z = 30^\circ$ olarak verilmiştir. 4 saniye boyunca, 2500 Hz frekansta veri toplanarak denklem 9'daki sistem oluşturulmuştur. Bu simülasyon sonucunda cismin ağırlık merkezi koordinatları, atalet momentleri ve çarpımsalları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin gerçekteki değerler ile kıyaslanarak Tablo 1 oluşturulmuştur.

Tablo 1'deki sonuçlar incelendiğinde, ağırlık merkezi koordinatları ve atalet momentleri sonuçlarındaki hataların %1'den daha az olduğu görülmektedir. Atalet çarpımsallarındaki hatalar ise %1-5 arasındadır. Bu hatalar, 4 ve 5 numaralı denklemlerde alınan türevlerden kaynaklanmaktadır. Euler açıları ve açısal hızlar, ayrık veri noktaları olduğu için, türevleri alındığında gerçek değerleri ile aralarında farklar olmaktadır. Kütle özellikleri çözümünde kullanılan ve türev alınarak elde edilen değerler ($\omega_x, \omega_y, \omega_z, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, a_{Qx}, a_{Qy}, a_{Qz}$), doğrudan MSC Adams programından alınarak hesaplamalar yapıldığında; Tablo 1'deki hata değerleri, %0.0001'in altına düşmektedir.

3. SONUÇ

Kütle özelliklerini, tek bir test kurulumu ile ölçebilen bir test düzeneğinin tasarımı ve arka planında kullandığı hesaplama yöntemi anlatılmıştır. Geliştirilen test düzeneği, MSC Adams programı kullanılarak modellenmiştir ve örnek bir test simülasyonu yapılmıştır. Yapılan bu örnek simülasyon ile kütle özellikleri hesaplanmış ve gerçek değerler ile karşılaştırılarak test düzeneğinin doğruluğu kontrol edilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] M. Cooper and P. Titchener, "Trifilar Pendulum : Measurement and Error Analysis," vol. 2013, pp. 1–30, 2013.
- [2] M. R. Eicholtz, J. J. Caspall, P. V Dao, S. Sprigle, and A. Ferri, "Test Method For Empirically Determining İnertial Properties Of Manual Wheelchairs," vol. 49, no. 1, pp. 51–62, 2012.
- [3] M. Gobbi, G. Mastinu, and G. Previati, "A method for measuring the inertia properties of rigid bodies," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 1, pp. 305–318, 2011.
- [4] R. Brancati, R. Russo, and S. Savino, "Method and equipment for inertia parameter identification," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, no. 1, pp. 29–40, 2010.
- [5] D. T. Greenwood, *Advanced Dynamics*. 2003.
- [6] R. C. Hibbeler, *Dynamics*. 2010.
- [7] E. Ientilucci, "Using the singular value decomposition," *Rochester Inst. Technol.*, pp. 1–8, 2003.