

Açısal Momentum Kontrolü İçin Rijit Dinamik Simülasyon Kullanılarak Mekanik Bir Jiroskop Volanının Tasarımı

M. Kürşat YALÇIN^{1*}

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0001-9484-1422>

*Sorumlu yazar: mkursatyalcin@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 12.01.2024

Kabul tarihi: 23.05.2024

Online Yayınlanma: 10.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Mekanik jiroskop
Optimizasyon
Nütasyon
Presesyon
Tasarım

ÖZ

Jiroskoplar, harici nesneyi referans almadan üç boyutlu uzayda dönüşü algılayan cihazlardır. Mekanik jiroskoplar ise tork üreten mekanizmalardır. Bu torka, jiroskopik tork da denmektedir. Kontrollü tork üretmek için kullanılan jiroskoplar, kontrol momenti jiroskopları olarak adlandırılmaktadır. Mekanik jiroskopların en hayati parçası ise volandır. Volan tasarımlarında boyut ve dönme hızı tasarım parametreleridir. Bu makalede, dikey yerleştirilmiş, ağırlık torku sayesinde çalışan, bir volanlı mekanik jiroskopun volanının tasarımı rijit cisim simülasyonu ile elde edilmiştir. Bu amaçla optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon için Latin Hypercube Sampling Design yöntemi kullanılarak yüz adet nokta oluşturulmuştur. Cevap fonksiyonunun elde edilmesinde non-parametrik regresyon metodu kullanılmıştır. Minimizasyon için genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Nütasyonun ve harcanan enerjinin minimum olması, jiroskopik torkun en fazla olması amaçlanmıştır. Bu amaçları sağlayan optimum hız $\omega=164,3941$ rad/s ve radyus ise $r=0,143839$ m olmaktadır.

Design of a Flywheel of a Mechanical Gyroscope Using Rigid Dynamic Simulation for Angular Momentum Control

Research Article

Article History:

Received: 12.01.2024

Accepted: 23.05.2024

Published online: 10.12.2024

Keywords:

Mechanical gyroscope
Optimisation
Nutation
Precession
Design

ABSTRACT

Gyroscopes are devices that detect rotation in three-dimensional space without reference to an external object. Mechanical gyroscopes are mechanisms that produce torque. This torque is also called gyroscopic torque. Gyroscopes used to produce controlled torque are called control moment gyroscopes. The most vital part of mechanical gyroscopes is the flywheel. In flywheel designs, size and rotational speed are the design parameters. In this paper, the design of the flywheel of a vertically placed mechanical gyroscope with a flywheel operating by means of weight torque is obtained by rigid body simulation. Optimisation method is used for this purpose. One hundred points were generated using the Latin Hypercube Sampling Design method for optimisation. Non-parametric regression method was used to obtain the response function. Genetic algorithm method was used for minimisation. It is aimed to minimise the variation and the energy consumed and to maximise the gyroscopic torque. The optimum speed $\omega=164.3941$ rad/s and radius $r=0.143839$ m.

To Cite: Yalçın MK. Açısal Momentum Kontrolü İçin Rijit Dinamik Simülasyon Kullanılarak Mekanik Bir Jiroskop Volanının Tasarımı.. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(5): 2094-2113.

1. Giriş

Jiroskoplar, harici nesneyi referans almadan üç boyutlu uzayda dönüşü algılayan cihazlardır. Mekanik, optik ve elektromekanik türleri mevcuttur. Jiroskopların temel kullanım amacı açışal yön tayini olsa da, ilave olarak mekanik jiroskoplar, denge ve titreşim kontrolü için kullanılabilen, tork üreten mekanizmalardır. Bu torka, jiroskopik tork da denmektedir. Denge ve titreşim kontrolü için kullanılan mekanik jiroskoplar; kontrol momenti jiroskopları (CMG'ler) olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, şeklen bir CMG'ye benzese de, reaksiyon volanı olarak adlandırılan ve başka bir teknik (etki-tepki) ile dengeleme sağlayan mekanizmalar da mevcuttur. Ancak bunlar, bu çalışma kapsamında değildir.

Bir CMG, dönen bir volan ve tahrik aktüatörlerinden oluşmaktadır. Mekanizmayı bir arada tutmak için; yataklama ve çerçeveler kullanılmaktadır. Her ne kadar üç eksen de dönme ve tork üretme kabiliyetine sahip olsalar da, volanın dönmesinin, yalnızca bir eksen etrafında olmasının, bir eksen de tork üretimine yol açtığı ve bunun da çoğu uygulamada, yeterli olduğu görülmektedir. CMG, jiroskopik torku, öncelikle açışal momentumunun yönünü değiştirerek üretmektedir. Bunun için kendi ağırlığını veya dış etki kullanmaktadır. Tork kullanmadan, jiroskop torku üreten CMG'ler de mevcuttur. Üretilen jiroskopik tork, CMG'nin monte edildiği gövdeye iletilmektedir. Bazı durumlarda CMG, diğer modern yöntemlere göre watt başına çok daha fazla tork üretebilmektedir. CMG'ler torku verimli bir şekilde uygulayabildikleri için çevik uzay araçları, gemiler ve robotik sistemler dâhil birçok uygulama için idealdirler. Ancak CMG'ler, sürekli olarak dönen volan nedeni ile uzun süreli çalıştırıldığında yüksek enerji sarfına neden olmaktadır.

Bu soruna çözüm olarak uygulanan yöntemlerden biri de minimum güç tüketimi için optimum tasarım kullanmaktır. Optimizasyon sırasında, tasarımcılar tarafından en yaygın kullanılan araçlardan biri, belirli koşullar altında incelenen olayın çoklu fizik sonuçlarına bakılmasına ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyan simülasyonlardır. Rijit cisimlerin dinamik simülasyonları sayesinde, cisimleri oluşturan parçaların birbirleriyle olan bağlantı noktalarının, çizgisel veya açışal, zamana bağlı yer değiştirme, hız, ivme, moment, yük analizleri yapılabilmektedir. Böylece örneğin bir şafta gelecek tork bulunabilmekte ve uygun bir motor seçimi yapılabilmektedir. Yükler, çoğu durumda, cisimler üzerine yavaşça uygulanmazlar, zamana (dolayısıyla da frekansa) göre değişirler. Bu da eylemsizlik (kütlesel atalet) ve sönümlenmeyi önemli hale getirmektedir. Atalet ve/veya sönüm etkileri önemliyse, bir sistemin dinamik tepkisini belirlemede, statik yapısal analizlerin kullanılması yeterli değildir. Bu gibi durumlarda rijit veya esnek dinamik analizler yapılmaktadır. Simülasyonlar, tasarım başta olmak üzere çoğu mühendislik uygulamasında, pratikliklerinden dolayı kullanılmaktadırlar. Rijit dinamik analizler bazı yazılımlarda; Kinematic/Dynamic, Multibody Dynamics, Rigid Body Dynamics (RBD) veya motion simulation, hareket analizi, mekanizma analizi olarak da geçmektedir. Esnek dinamik analizler ise time-history analizi veya transient yapısal analiz olarak da adlandırılabilir. Bir CMG dinamiğini elde etmede, simülasyon kullanıldığı bazı çalışmaların olduğu görülmüştür (Ahmed ve ark., 2016; Arena ve ark., 2017; Bayram, 2020; Boyce, 2012; Han ve ark., 2015; Kacar ve ark., 2021;

Kostyuchenko ve Indygasheva, 2018; Osman ve ark., 1982; Sucuoğlu ve ark., 2018; Ye ve ark., 2021). Simülasyon aracılığıyla CMG'lerin dinamik analizinde uygun bağlantı türlerinin kullanılması, sonuçların doğruluğunu etkileyen önemli bir faktördür.

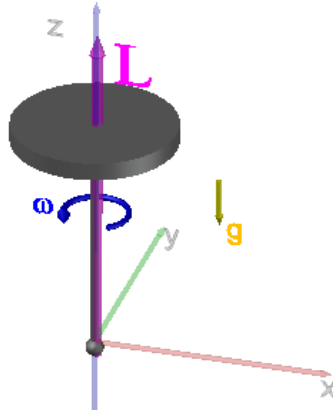
Aubrun ve Margulies (1978), titreşimleri azaltmak için jiroskop veya "çayro sönümleyici" kullanma fikrini 1960'lı yıllarda ilk ortaya atanlardandır (Margulies ve Aubrun, 1978). Vardıkları sonuçlardan biri, istenen sönümleme özelliklerini elde etmek için tek bir büyük CMG kullanmaktan çok sayıda küçük CMG kullanmanın daha iyi olduğuydu. Ayrıca, "jiroelastik" sürekli yaklaşım kullanan diğer bazı teorik gelişmeler ve sayısal örnekler de, jiroskopik müdahalenin, esnek yapıların hareketini kontrol etmek için çekici bir yaklaşım olduğu sonucuna götürmektedir. Bunun gibi keşifler dengeleme konusunun önem kazandığı uzay aracı, bicopter, bisiklet gibi araçlara montaj edilebilen daha sade ve daha hafif CMG'lerin tasarlanmasına yol açmıştır.

CMG'ler uzay araçlarında, aracın durum ve titreşimini kontrol etmek veya bir konum hatasının etkisini ortadan kaldıracak bir kuvvet sağlamak için kullanılmaktadır (Hu ve ark., 2017; Leve ve ark., 2015; Somov, 2000; Sun ve ark., 2023; P.-F. Zhang ve ark., 2020). CMG'lerin bisikletlerin dengelenmesi amaçlı olarak kullanımı ise otonom sürüş ile birlikte gündeme gelmiştir. Bir bisiklet için kontrol momentum jiroskopu (CMG), kütle dengeleme, direksiyon kontrolünün ve reaksiyon volanı kullanılması gibi dört tür kendi kendini dengeleme yönteminin olduğu görülmektedir (Ahmed ve ark., 2016; Kacar ve ark., 2021; Y. Zhang ve ark., 2021).

Bütün bu çalışmalar, mekanik jiroskopun, yapısal bir ürün olarak kullanımının yaygın olduğunu göstermektedir. Yazarların bildiği kadarıyla; açık literatürde bir CMG'nin mekanik cevabını elde etmek için rijit dinamik simülasyon kullanan bazı çalışmalar olmasına rağmen tasarım için bu simülasyon ve optimizasyon yönteminin kullanıldığı bir çalışma yoktur. Bu çalışmada ağırlık torkunu dengeleme esaslı olan mekanik bir jiroskobun dikey olarak yerleştirilmiş bir volanın dönüşü sayesinde elde edilebilmesine ilişkin optimum tasarım parametreleri rijit cisim simülasyonu ile elde edilmiştir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde rijit dinamik analiz, optimizasyon işlemlerinin tekniği izah edilmiştir. Üçüncü bölümde elde edilen bulgular ve tartışma sunulmuş sonuçlar bölümünde ise bu çalışmanın en önemli çıkarımları maddeler halinde verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Şekil 1'de kendi ekseni etrafında dönen bir volana sahip, bir mekanik jiroskop verilmiştir. Bu jiroskopun volanının, sadece z doğrultusunda, kendi ekseni etrafında $\vec{\omega}$ açısal hızıyla dönüyor olması halinde, Şekil 1'den görüleceği üzere, dengelenmemiş herhangi bir kuvvet, moment mevcut değildir. Zira ağırlık, mesnet noktasınca dengelenmektedir. Diskin dönme ekseni etrafında $\vec{L} = I * \vec{\omega}$ ile hesaplanan bir açısal momentum oluşmaktadır. Yönü $\vec{\omega}$ ile aynıdır. Bu durumda $\vec{\omega}$ değişmediği sürece, açısal momentum $\vec{L} = \text{sabit}$ olup, herhangi bir jiroskopik tork elde edilmesi bu durumda mümkün değildir.



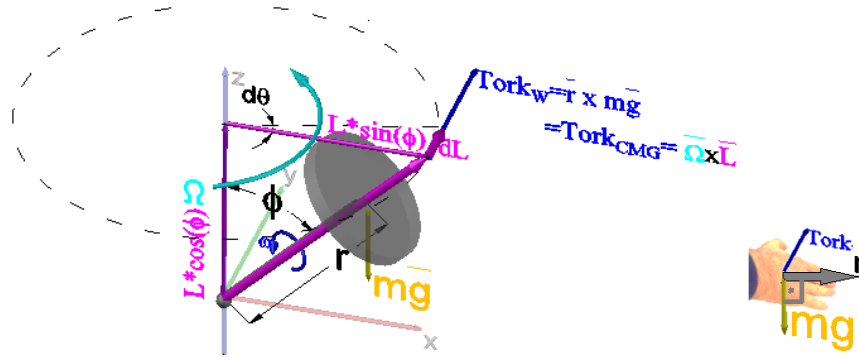
Şekil 1. Kendi ana eksenini etrafında dönen bir volana sahip, bir mekanik jiroskop

Açısal momentumun olduğu bir sistemde, jiroskopik torkun oluşabilmesinin şartı, açısal momentumun değişiyor olmasıdır. Jiroskop torkunu, üzerine gelen başka bir tork sayesinde üreten CMG'leri, klasik (Newtonian) mekanikle incelerken, cisme sabitlenmiş bir eksen takımına göre açısal momentumdaki değişimin genel denklemi, Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\sum \vec{M} = \frac{d(\vec{L})_{xyz}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{L} \quad (1)$$

Burada $\sum \vec{M}$ ifadesi net tork olup, yönü ise, bağıntıya göre, $d\vec{L}$ yönünde (veya $\vec{\Omega} \times \vec{L}$ yönünde) olmalıdır. $\vec{\Omega}$, yalpalama olarak adlandırılan bir açısal hızdır. Bu bağıntı; sistemin momentumunun değişmesi halinde, bir tork oluşturacağı anlamına geldiği gibi, dışarıdan herhangi bir tork uygulandığında da ($|Tork|_{uygulanan}$), bu torkun, sistemin açısal momentumu değiştiren tork hükmünde olması gerektiği anlamına da gelmektedir. Yani, $\sum \vec{M} = \overline{Tork}_{uygulanan}$ olmalıdır. $d\vec{L}$ biliniyorken, torkun yönünün, $d\vec{L}$ yönünde oluşması gerektiği gibi, tork biliniyorken de, momentum değişimi $d\vec{L}$ ise tork ile aynı yönde oluşmalıdır. Yani, açısal momentumu sabit olan bir jiroskopa, dışarıdan tork uygulandığında, jiroskopun momentumu, uygulanan dış tork kadarlık, değişime uğrayacaktır.

Volanın dönme ekseninin, z doğrultusu ile herhangi bir ϕ açısı yapmaya başladığı durumu inceleyelim. Şekil 2'de verilmiştir. Volanın ϕ açısı yapması halinde, sahip olduğu \vec{L} açısal momentumu; $|L|. \sin\phi$ ve $|L|. \cos\phi$ bileşenlerine sahip olacaktır. $|L|. \cos\phi$ bileşeni, tam z eksenini üzerinde olup, kararlı durum kabulü halinde bir değişime uğramadığı için, yalpalamaya bir etkisi olmamaktadır. Bu durumda $|L|. \sin\phi$ bileşeni, $|Tork|_{uygulanan}$ 'dan etkilenecek ve $d\vec{L}$ kadar değişecektir. Bu değişim; volanın, kütlelerini yukarı kaldırarak, $\phi = 0^\circ$ olduğu stabil konuma ulaşma çabasını da göstermektedir.



Şekil 2. Volan ekseninin, z doğrultusu ile bir ϕ açısı yapması hali ve sağ el kuralına göre torkun yönü

Volanın dönme eksenini, z doğrultusu ile ϕ açısı yapmaya başladığında, mesnet noktası etrafında, $\overrightarrow{Tork}_{uygulanan} = \vec{r} \times m\vec{g}$ ile hesaplanan ve volan kütlesi m , yerçekimi \vec{g} , ağırlık merkezinin mesnete olan \vec{r} mesafesinden dolayı, bir ağırlık torku ortaya çıkacaktır. Ağırlıktan kaynaklanan bu tork, volanı, aşağı düşürmeye çalışmaktadır. Ancak volan dönmekte olduğu için, aşağı düşmek yerine, sahip olduğu $|L| \cdot \sin\phi$ açısal momentumunu nedeni ile bu momentumunun yönünü, tork yönünde $d\vec{L}$ kadar değiştirmek mecburiyetinde kaldığı için, z eksenini etrafında $d\theta$ kadar, ufak bir dönme gerçekleştirecektir. Bu değişim, dt süresi içerisinde gerçekleşmektedir. Bu $d\theta$ dönme hareketi, z eksenini etrafında, adına “yalpalama veya devinim” denen bir $\vec{\Omega}$ açısal hızının meydana gelmesine vesile olmaktadır ve $\vec{\Omega} = \frac{d\theta}{dt} * \cos\phi$ ile hesaplanmaktadır. Bu yalpalama da, Denklem (1) kadarlık CMG torku üretimine yol açacaktır. Bütün bu işlemler aynı anda gerçekleşmektedir. Böylece jiroskop, yalpa hareketi yaparak, aşağı düşmesine engel olmaktadır.

CMG torku, volanın ana eksenini etrafındaki dönmesinden kaynaklanan açısal momentum ve ayrıca yalpalama hızıyla orantılıdır. Yani, sabit bir dönme devrinde, açısal momentum sabittir. Bu durumda jirasyon torku, yalpalama hızıyla doğru orantılıdır. Teknik olarak, volan çok hızlı, hatta sonsuz hızla hareket ederse, o zaman bir CMG sonsuz tork üretebilir sonucu çıkmaktadır. Bu nedenle; üretilen CMG tork miktarını sınırlamak ve kontrol altına almak için yalpalama hızı kontrol edilmeli veya sınırlandırılmalıdır. Yalpalamanın açısal frekansı (yani dönme hızı) sabit veya salınımlı olabilmektedir. Dışarıdan uygulanabileceği gibi, volanın dönüş hızı nedeni ile müdahale olmadan da oluşabilmektedir. Eğer volan dönme hızı yanı sıra nütasyon da varsa, ikisinin birleşmesi neticesinde, salınımlı yalpalama meydana gelmektedir. Neticede de; salınımlı yalpalama (Anonimouse, 2023); volan açısal momentumu ile CMG'nin monte edildiği cismin yalpalamaya olan katkısından kaynaklanan momentumu birleştirerek, daha güçlü tork üretilmesini sağlamaktadır.

“Kararlı durum (sabit) yalpalaması” olarak adlandırılan özel bir halde $\vec{\Omega}$ sabit, $\vec{\omega}$ sabit ve ϕ sabittir.

Örneğin, $|\omega_y| = 0$ iken $\vec{\Omega}_z$ sabit olacaktır. Bu durumda, Denklem(1)'de verilen ilk terim, $\frac{d(\vec{L})_{xyz}}{dt} = 0$ olacak ve açısal momentumdaki değişim denklemi, Denklem (2)'deki gibi ifade edilebilecektir.

$$\sum M = \vec{\Omega} \times \vec{L} \quad (2)$$

Bu denklem, “jiroskop torku” olarak da bilinmektedir. Yönü ise \vec{L} ve $\vec{\Omega}$ vektörleri dikkate alınarak, sağ el kuralı ile bulunmaktadır. Şimdiye kadar jiroskopik hareketin en yaygın mühendislik örnekleri, rotor eksenine normal olan tek eksen etrafında yalpalama gerçekleşmesi hali olup, bu hal için, genel denklem açık olarak yazıldığında Denklem (3)’ün elde edileceği literatürde verilmiştir (Kacar ve ark., 2021).

$$\begin{aligned} \sum |M|_y &= \Omega \sin \phi [I(\Omega \cos \phi + \omega) - I_0 \Omega \cos \phi] \\ \sum |M|_x &= 0 \\ \sum |M|_z &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$\sum |M|_y$ ile hesaplanacak jiroskop momentini, rotorun ağırlığından kaynaklanan $|Tork|_{uygutanana}$ momentine eşit olmalıdır. Zira yapıya etkiyen başka moment yoktur. Bu şekle göre, moment hesabında kullanılacak dik mesafe $|\vec{r}| = r * \sin \phi$ olmaktadır. Ağırlık momentinin yönü, \vec{r} konum vektörü ve \vec{g} yerçekimi vektörlerinin yönleri dikkate alınarak, sağ el kuralına göre bulunmaktadır ve Şekil 2’de gösterilmiştir. Denklem (3), eşitleme neticesinde Denklem (4)’e indirgenebilecektir.

$$\begin{aligned} \sum |M|_y &= \Omega \sin \phi [I(\Omega \cos \phi + \omega) - I_x \Omega \cos \phi] \\ r * \sin \phi * m * g &= \Omega \sin \phi [I(\Omega \cos \phi + \omega) - I_x \Omega \cos \phi] \\ r * m * g &= I \Omega^2 \cos \phi + I \Omega \omega - I_x \Omega^2 \cos \phi \\ r * m * g &= I \Omega \omega + (I - I_x) \Omega^2 \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

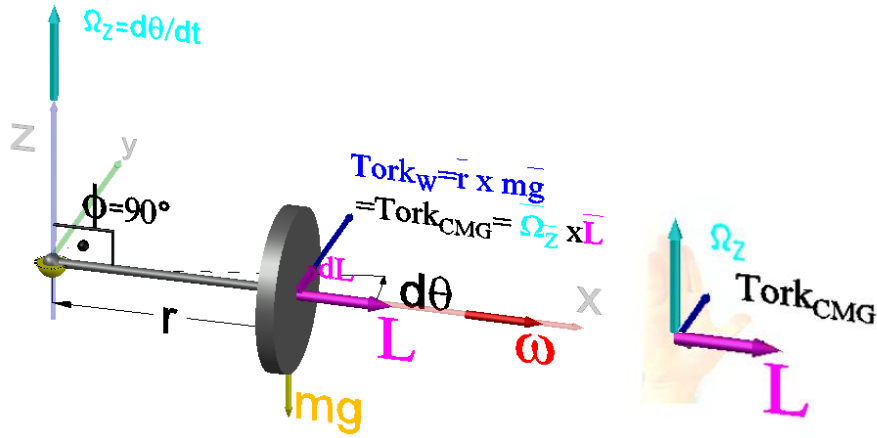
Bu denklem yalpalama $\vec{\Omega}$ ’ya bağlı, ikinci dereceden bir denklemdir ve $\cos \phi$ teriminden dolayı harmonik harekete yol açmaktadır. Dönme ekseninin yaptığı ϕ açısındaki yükseliş ve düşüşe, “nütasyon” denmektedir.

ϕ açısının 90° olduğu özel bir durum olan, rotor eksenine normal olan bir eksen etrafındaki yalpalama durumunu inceleyelim. Tek eksenli ve kararlı yalpalama hali geçerli olsun. Bu durumda $\sin 90^\circ = 1$ olacağı için, $|L| * \sin \phi \rightarrow |L|$ dir. İlave olarak, $\cos 90^\circ = 0$ olacağından dolayı Denklem (4)’teki $(I - I_0) |\Omega|^2 \cos \phi$ terimi sifira gidecektir. Bu durumda jiroskopik tork, Denklem (5)’teki gibi olacaktır.

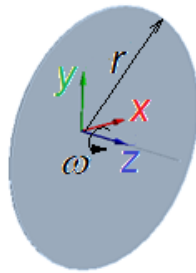
$$r * m * g = \Omega I \omega \quad (5)$$

Yönü ise Şekil 3’ten görüleceği üzere $\vec{\Omega}$ ve \vec{L} vektörleri dikkate alınarak, sağ el kuralı ile bulunmaktadır. Bu denklemden, yalpalama çekildiğinde, $|\Omega| = \frac{|r| * m * |g|}{I |\omega|}$ olacaktır. Formüle göre; $\vec{\omega}$ arttıkça, $\vec{\Omega}$ azalmaktadır. Denklemlerdeki I , volanın kütleli atalet momenti olup, Şekil 4’te disk şekilli bir cisim için, farklı eksenlere göre kütleli atalet momenti hesaplama formülleri, verilmiştir. Burada m, r

terimleri, sırası ile diskin kütlesi ve yarıçapıdır. I_z rotorun dönme eksenindeki kütle atalet momenti olup, kullanım kolaylığı olması için I ile de gösterilmektedir. T ise kinetik enerjidir.



Şekil 3. $\phi = 90^\circ$ iken CMG'nin serbest cisim diyagramı ve sağ el kuralına göre jiroskopik torkun yönü



$$I_z = I = \frac{1}{2} * m * r^2$$

$$I_x = I_y = \frac{1}{4} * m * r^2$$

$$T_{\text{gyroscope}} = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Şekil 4. Disk şekilli cisimlerde kütle atalet momentleri ve kinetik enerji formülü

Analizimize dayanarak, volan sadece Denklem (5)'i karşılayan bir değerle harekete geçirilirse, sabit ϕ açısında, sabit bir yalpalamaya sahip olacaktır. Bu koşullar karşılanmadığında, yani nütasyon varken, yalpalama kararsız hale gelir ve $|\omega|$ dönüş hızı azaldıkça, ϕ açısı artan bir genlikle salınabilir.

Bunun yanı sıra, yerçekimi olmadığında, $\sum |M|_x = 0$ sıfır moment ile sabit yalpalama elde edilmesi de mümkündür. Yerçekimsiz ortamda asılı duran ve simetrik bir şekle sahip olan uzay araçlarında, kütle merkezi etrafında hiçbir dış moment mevcut değildir. Ayrıca mermilerde de görülmektedir. Ancak bu durumlar, bu çalışmanın kapsamı içerisinde değildir.

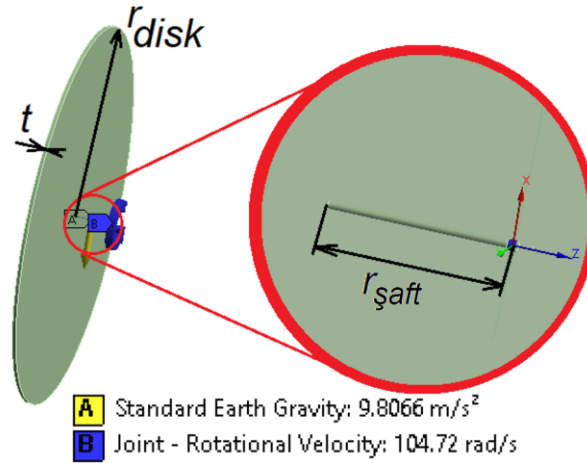
2.1. Rijit Dinamik Simülasyonu

Ansys© yazılımı (Ansys®, 2023) kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Ansys®, 2023). Analiz, toplam süresi 2 saniye olan iki adımda gerçekleştirilmiştir. İterasyonlarda minimum zaman adımı $1, e-7$ s ve maksimum zaman adımı $5, e-2$ s ile sınırlıdır. Malzeme yapısal çelik olup özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. 3.40 GHz dört çekirdekli CPU, 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda her bir simülasyon 13.26 saniye sürmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

| Özellik | Değer |
|-------------------------------|-------|
| Yoğunluk (kg/m ³) | 7850 |
| Çekme akma dayanımı (MPa) | 250 |
| Basınç akma dayanımı (MPa) | 250 |
| Çekme nihai dayanımı (MPa) | 460 |
| Basınç nihai dayanımı (MPa) | 460 |

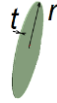
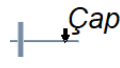

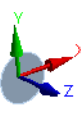

CMG'yi temsil etmek üzere, geometri olarak, bir volan ve milden oluşan bütünleşik sistem katı modeli çizilmiştir. Volan havadadır ve milin serbest ucu mekanik olarak zemine şöyle bağlanmıştır: Sadece zemine bağlı desteğin yukarı ve aşağı (Şekil 5'e göre x doğrultusunda) hareketi kısıtlanmıştır. Diğer iki öteleme hareketleri serbest bırakılmıştır. Üç doğrultu etrafındaki tüm dönüşler serbesttir ve gerekirse her eksen etrafında serbestçe dönmesine izin verilmiştir. Bu bağlantı türü, programda evrensel bağlantı adı verilen bir bağlantı türü aracılığıyla elde edilmiştir.



Şekil 5. Dinamik simülasyonda kullanılan CMG modeli ve yere bağlamayı sağlayan mesnetin referans eksen takımının detay görünümü

Yerçekimi ivmesi, Şekil 5'te gösterilen yönde uygulanmıştır. Dinamik analizlerde, bağlantının z eksenini, dönme eksenini temsil ettiğinden dolayı, ω açısal dönme hızı, volana, Şekil 5'te z ile gösterilen ana eksenini etrafında uygulanmıştır. Milin çapı, volan ağırlık merkezinin koordinatlarını mümkün oldukça az etkilemesi için, mümkün olduğunca ufak seçilmiştir. Bütün parçalar, rijit cisimdir. Bu nedenle esneme, kopma mümkün değildir. Kontak kullanılmamıştır. Dolayısıyla eleman ağı oluşturulmamıştır. Bağlantının referans koordinat eksen takımının, tam mesnet noktası üzerinde olmasına dikkat edilmelidir. Zira moment için mesafe, bu noktaya göre hesaplanmaktadır. Volan ve milin tek parça olmasına dikkat edilmelidir. Volan, mil etrafında değil, milli volan, mesnet noktası etrafında dönmelidir. Volana ait geometrik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Değerler, volan ve milin toplamına aittir.

Tablo 2. Volana ait geometrik özellikler

| Özellik | | Değer |
|---|---|-------------|
| Hacim (m ³) | | 7,8554e-003 |
| Disk kalınlığı (mm) |  | 10 |
| Disk yarıçapı (mm) | | 500 |
| Mil çapı (mm) |  | 4 |
| Kütle (kg) | | 61,702 |
| Ağırlık merkezi, X (m) | | 0 |
| Ağırlık merkezi, Y (m) |  | 0 |
| Ağırlık merkezi, Z (m) | | 0,115 |
| Atalet momenti, I _z (kgm ²) |  | 7,6288 |
| Atalet momenti, I _x , I _y (kgm ²) | | 3,8168 |
| Dönme hızı, ω (rad/s) |  | 104,7 |

Bütün sayısal yöntemlerde, doğrulama büyük önem taşımaktadır. Simülasyonda elaman ağı oluşturulmadığı için, elemandan bağımsızlık analizi yapılmasına gerek yoktur. Bununla birlikte, teorik formüller mevcut olduğu için simülasyon sonuçları, teori ile karşılaştırılarak doğrulanacaktır.

2.2. Optimizasyon

İncelenen bölgedeki değişkenlerin minimum, maksimum veya bir hedef değerini araştırma problemleri, optimizasyon ile çözülmektedir. Bir optimizasyon işleminde esas olarak; değişken(ler), kısıt(lar) ve amaç fonksiyonu(ları) tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ω ve $|r|$ moment kolunun, CMG davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Optimize edilen girdi değişkenleri ve başlangıç değerleri ve alt-üst aralıkları Tablo 3'te verilmiştir. Çıkış değişkenleri ise, yapılan simülasyon neticesinde bulunacaktır. Deney tasarım noktası olarak, Latin Hypercube Sampling Design (Viana, 2016) yöntemi kullanılmıştır. Böylece yüz adet kombinasyon oluşturulmuştur. Hesaplamaların, bütün noktalarda gerçekleştirilmiş olduğu görülmüştür. Toplam hesaplama süresinin 132,3 dakika tuttuğu tespit edilmiştir.

Optimizasyonda amaç fonksiyonu olarak; nütasyon değeri ve enerji sarfıyatı en az olacak şekilde, en fazla CMG torku elde edebilmek uygulanmıştır. Kısıt olarak; nütasyonun $\pm 3^\circ$ içerisinde kalması istenmiştir. Non-parametrik regresyon metodu (Yildiz ve Topal, 2001) cevap fonksiyonunun elde edilmesinde kullanılmıştır. Optimizasyon için MOGA yöntemi kullanılmıştır (Şahin ve Önder, 2020).

Tablo 3. Optimizasyon değişkenleri

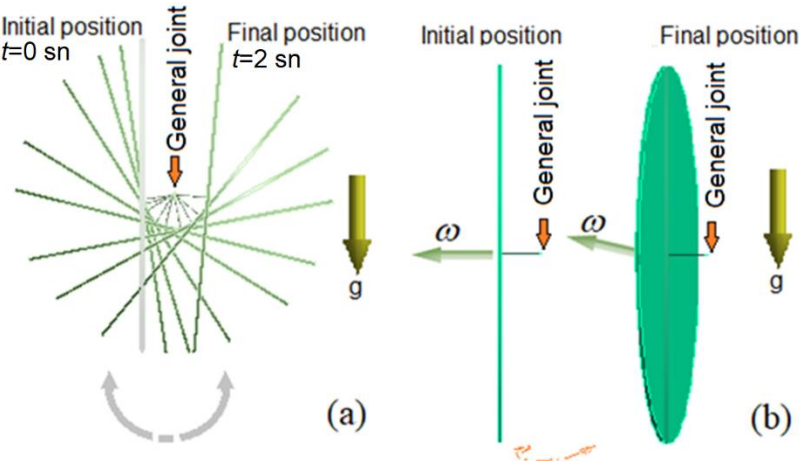
| Giriş değişkenleri | Alt sınır | Üst sınır |
|--|-----------|-----------|
| Moment kolu, r (m) | 0 | 0,5 |
| Dönme hızı, ω (rad/s) | 0 | 1000 |
| Çıkış değişkenleri | | |
| CMG torku, $\sum M _y$ (kgm ² /s ²) | -- | -- |
| Ağırlık torku, $ Torq _{weight}$ (kgm ² /s ²) | -- | -- |
| Momentum, $ L $ (kgm ² /s) | -- | -- |
| Nutation, ϕ (°) | -- | -- |
| Yalpalama hızı, Ω (rad/s) | -- | -- |

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Doğrulama

Herhangi bir sayısal yöntemde olduğu gibi, doğrulama büyük önem taşımaktadır. CMG için analitik çözüm mevcuttur. Bu nedenle, teorik hesaplanan yalpalama, tork sonuçları ve yönleri, simülasyondan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca simülasyondan yerçekiminin dönme varken ve yokken, hareketin rotası üzerine olan etkileri Şekil 6'daki gibi elde edilmiştir. Dönme yokken, umulduğu gibi, yerçekimi etkisi ile disk, sarkaç salınımı hareketi yapmaktadır.

Ayrıca simülasyondan dönme varken ve yokken, yerçekiminin hareketin rotası üzerine olan etkileri Şekil 6'daki gibi elde edilmiştir. Dönme yokken, volanın sarkaç salınımı hareketi yaptığı görülmüştür. Bu da yerçekiminin sebep olduğu bir etkidir.



Şekil 6. Yerçekimi varken hareketin rotası (a) ω açısal hız yok (b) ω açısal hız var

$\omega = 104,7 \text{ rad/s}$ iken, Denklem (4)'e, değişkenlerin sayısal değerleri yazılarak $\vec{\Omega}$ çekildiğinde aşığıdaki denklem elde edilmiştir. Denklem, yalpalama hızına ve nütasyon açısına bağlıdır.

$$7,6288 * \Omega * 104,7 + 3,8144 * \Omega^2 * \cos(\phi) = 69,58498582$$

Bu denklem çözüldüğünde kökleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Kökler, nütasyon açısına bağlıdır.

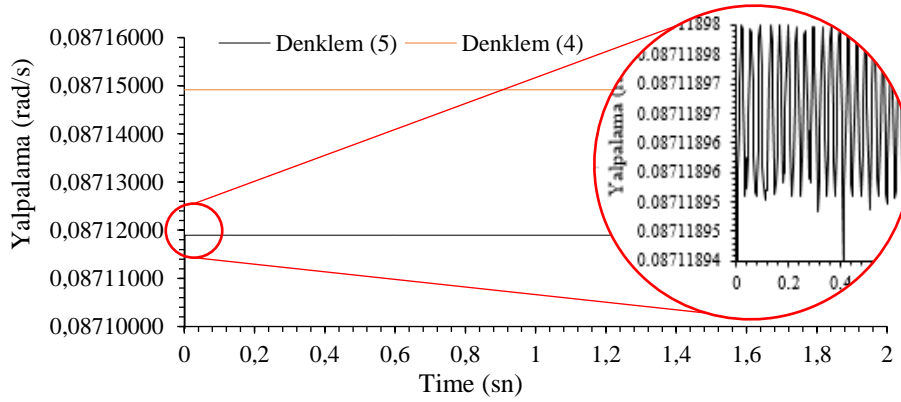
$$\Omega_{1,2} = \frac{\pm 0,00004195 * (3125 * \sqrt{(1061,7 * \cos(\phi) + 637978,2) \mp 2496048})}{\cos(\phi)}$$

Eğer nutasyon açısı çekilirse, aşağıdaki değerler elde edilecektir. Bu değerler sadece $\omega = 104,7 \text{ rad/s}$ iken geçerlidir.

$$\phi_{1,2} = \pi \pm \arccos\left(\frac{\frac{1047\Omega}{5} - 18,2427}{\Omega^2}\right)$$

Denklem (5)'teki değişkenlerin sayısal değerleri, Tablo 2 kullanılarak, yazıldığında, aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

$$\bar{\Omega} = \frac{r * m * g}{L} = \frac{0,115 * 61,702 * 9,8066}{7,6288 * 104,72} = 0,08711895 \text{ rad/s}$$



Şekil 7. Denklem (4) ve (5) ile bulunan yalpalama değerleri ve nütasyonun sebep olduğu salınım

Şekil 7'den görüleceği üzere, her iki denklem sonuçları arasında yüzbinde üç'lük bir fark mevcut olup, ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bununla birlikte, her ne kadar her iki eğri de sabit gibi gözükse de, Denklem (4) detayına bakıldığında salınımlar görülecektir. Salınımların nedeni, $3,8144 * \Omega^2 * \cos(\phi)$ terimi olup, etkisinin çok ufak olduğu görülmektedir.

Ayrıca, ağırlıktan kaynaklanan tork, jiroskopun ürettiği tork değerleri ve kinetik enerji değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$L = I * \omega = \left(\frac{1}{2} * 61,702 * (0,5)^2\right) * 104,7 = 7,6288 * 104,7 = 798,735 \text{ kgm}^2/\text{s}$$

$$\overrightarrow{Tork}_{CMG} = \vec{\Omega} \times \vec{L} = \Omega * L * \sin\phi = 798,73536 * 0,08711895 * \sin 90^\circ = 69,58 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$$

$$Tork_W = \vec{r} \times m\vec{g} = 0,115 * 61,702 * 9,8066 * \sin 90^\circ = 69,58 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$$

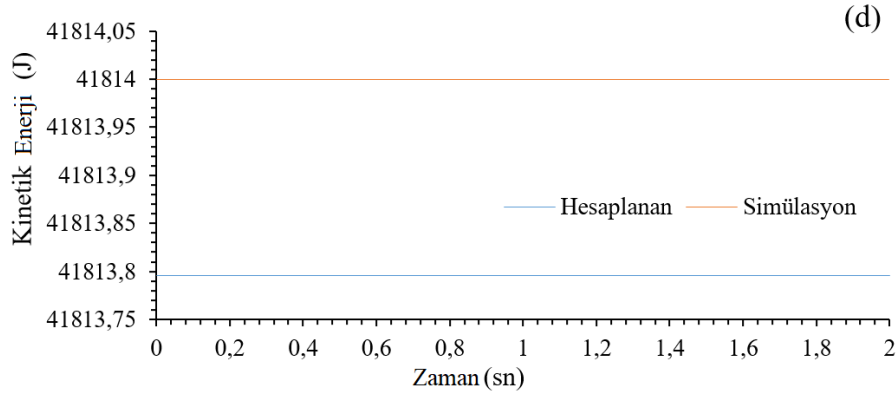
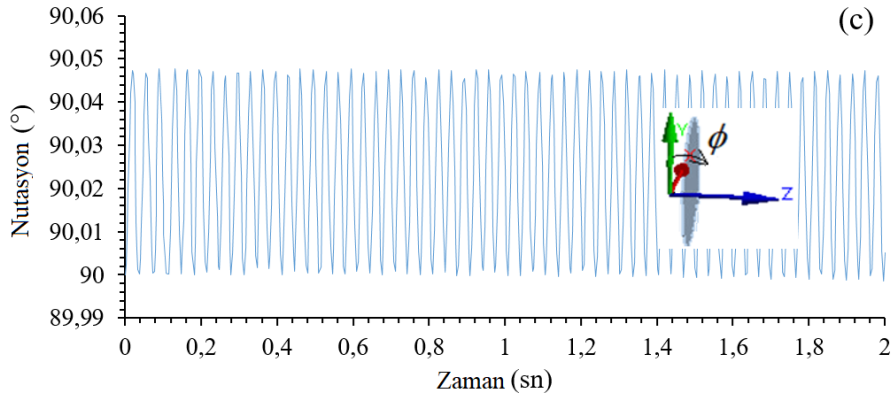
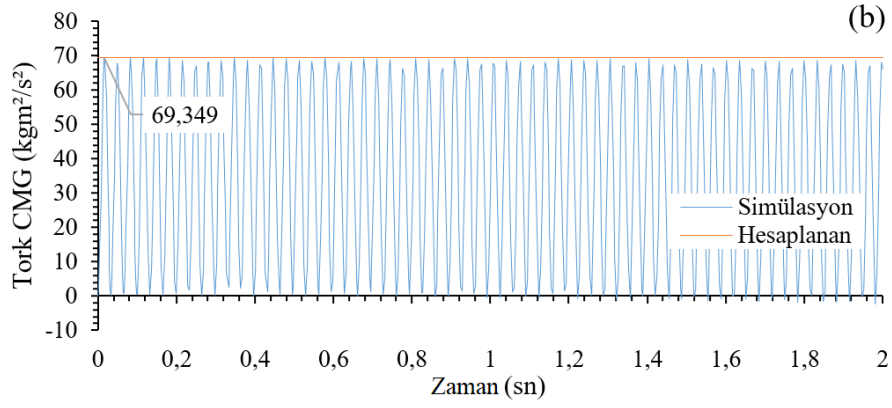
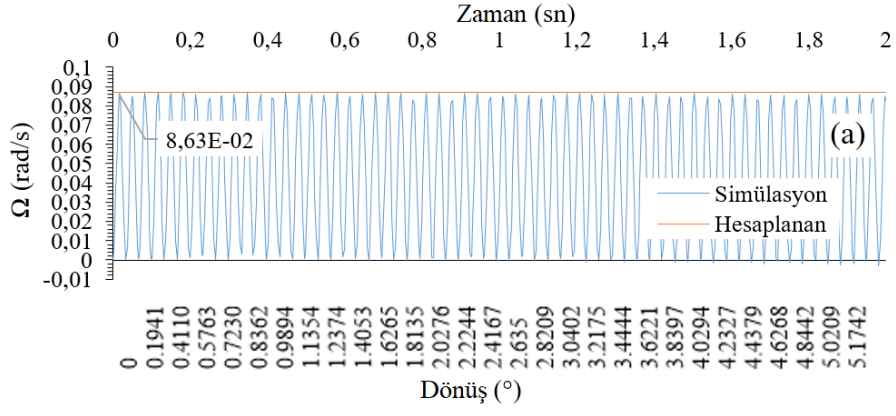
$$T_{gyroscope} = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} * 7,6288 * 104,7^2 = 41813,8 \text{ J}$$

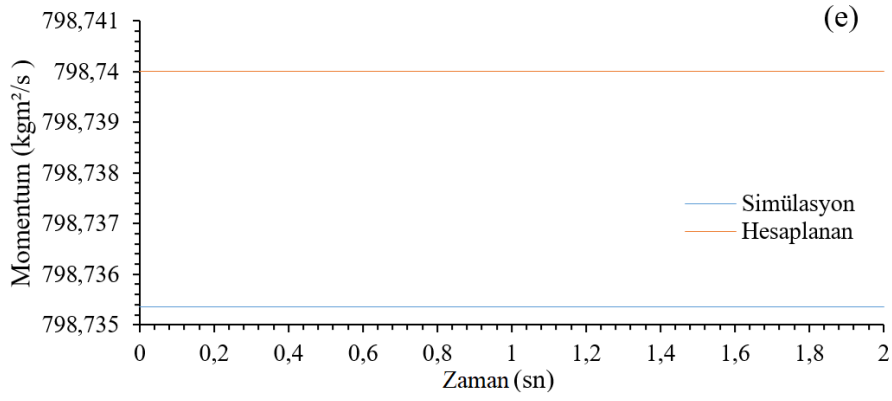
$$T_{\text{external}} = M * \phi = 69,58 * 18,58 = 1263,52 J$$

3.2. Simülasyon Sonuçları

Yalpalama, tork, nütasyon, kinetik enerji için simülasyondan elde edilen çözümler Şekil 8’de verilmiştir. Simülasyon, hareketin iki saniyelik süre içerisindeki durumunu 1,e-007 saniyelik aralıklarla hesaplamıştır. Bu nedenle simülasyon sonuçları, zamana bağlı pek çok değer içermektedir. $\omega = 104,7 \text{ rad/s}$ iken volan 2 saniyelik sürede, yalpalama yönünde 5° acı süpürmektedir. Yalpalama eğrisinin, periyodik bir desene sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun, nedeninin nütasyon olabileceği ilk olarak akla gelse de, nütasyondan kaynaklanan salınımın genliğinin çok ufak olduğu Şekil 7 ile izah edilmişti. Bu nedenle, buradaki salınımın nedeni nütasyon olmayıp, simülasyonun ilk adımından itibaren ω ve g ’nin adım şeklinde uygulanması ve bunun neticede de kütleden kaynaklanan atalet nedeni ile yalpalamanın salınım yapmasıdır. Cisme veya bağlantıya sönüm verilmediği için de hareket zamanla sönümlenmemiştir. Eğer ω veya yerçekimi ivmesi, rampa şeklinde uygulansaydı, salınım gözlemlenmeyecekti. Ancak kullanılan yazılım; yerçekimi ivmesini, sabit ve tüm adımlarda kesintisiz uygulamayı gerektirdiğinden dolayı, bu işlem yapılamadı. ω ’nın rampa şeklinde uygulanması mümkün idi ancak bu durumda da, düşük frekanslarda aşırı nütasyona uğrayan volanın, stabilitesini yitirdiği ve ω hızı, istenen değerine ulaştığında bile, umulan dinamik davranışı sergileyemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenlerle, bu açıklama ile birlikte, salınımlı grafikler verilmiştir. Zaten salınımların pik değerinin, hesapla elde edilen değerler ile kıyaslanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Optimizasyon esnasında da pik değerler işleme alındığından dolayı ilave işlem yapmaya gerek kalmamıştır. Bununla birlikte, yalpalama hızının, kasıtlı olarak osilasyon yaptırılarak, elde edilecek CMG torkunun daha fazla olmasının sağlandığı tekniklerin varlığı da, Ünker (2015) ve pek çok çalışmadan görülmüştür (Ünker ve Çuvalcı, 2015). Tork formülünde, yalpalama değeri kullanıldığı için, yalpalamanın salınımlı olması, doğal olarak torkun da salınımlı olmasına yol açmaktadır. Ancak buradaki salınımın nedeni bu değildir. Nutasyon eğrisindeki salınımın da, yalpalama ile aynı desende olması, atalet etkisine işaret etmektedir. Genliğin çok ufak olması ve genlikte bir artışın söz konusu olmaması, CMG’nin kararlı bir yalpalama hareketine sahip olduğunu göstermektedir. Volanın ω dönüşü, denge noktası etrafında küçük bir titreşim genliği ile CMG’yi yatay konumda tutmayı başarmaktadır.

Bununla birlikte, kinetik enerji, yerçekimine bağlı olmadığından dolayı ve ω sabit olduğu için, simülasyondan elde edilen kinetik enerji değerlerinde bir salınım gözlemlenmemiştir. Simülasyonda volanın ω dönme hızından kaynaklanan kinetik enerji çözülmüştür. Hesaplanan ve çözüm ile bulunan değerlerin birbirleri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

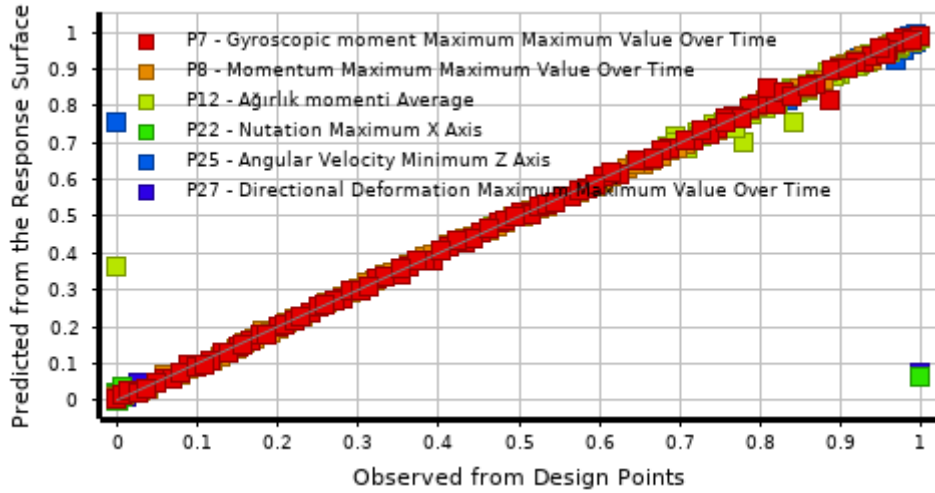




Şekil 8. Yerçekimi var, ω açısal hız varken, zamanla (a) yalpalama, (b) jiroskop torku, (c) nütasyon, (d) kinetik enerji, (e) momentum

3.3. Parametreler Arasındaki İlişkiler

Cevap eğrisi-yüzeyi; değişkenlere ait, yüz adet nokta için elde edilmiş olan değerlerin, üzerinden geçen matematiksel fonksiyonun interpolasyonla tespit edilerek çizdirilen ve değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkilerini her noktada gösterebilen eğrilerdir (üç boyutlu halde yüzeylerdir). Şekil 9’da elde edilen cevap fonksiyonunun yaptığı tahminler ile hesaplanan noktalardan elde edilen değerlerin kıyaslanması verilmiştir. Açısal hız, yer değiştirme ve nütasyona ait değerlerin sıfır olduğu haller haricinde, birbirleri ile iyi bir uyuma sahip olduğu görülmektedir. Sıfır değeri, her ne kadar matematiksel olarak uygulanabilir olsa da, CMG dinamiği açısından öngörülenin dışında bir davranışa yol açabilmektedir. Bu da beklenmedik bir durum değildir.



Şekil 9. Oluşturulan cevap fonksiyonunun yaptığı tahminler ile hesaplanan noktalardan elde edilen değerlerin kıyaslanması

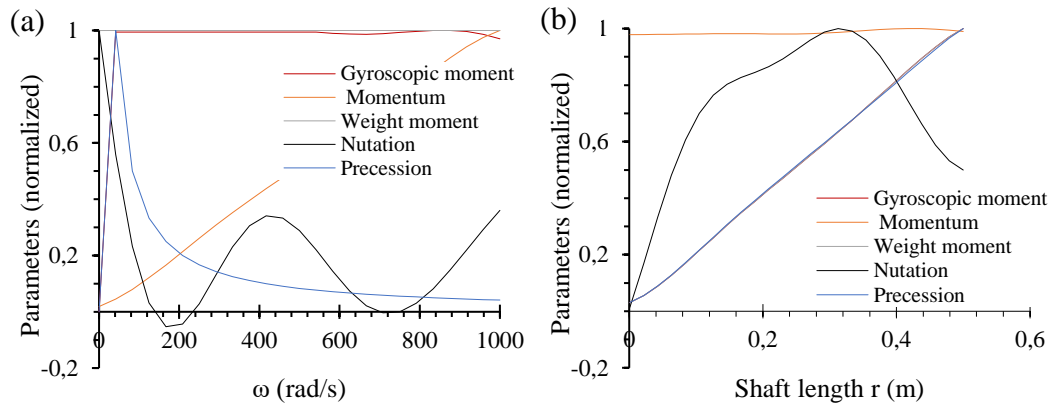
Cevap fonksiyonunun verimliliğini değerlendirmek için hata analizi ve regresyon analizi yapılmıştır. Hata analizi için RMSE, MAE olarak adlandırılan hata fonksiyonları kullanılmıştır. RMSE, MAE

değerlerinin sıfıra yakın olması istenmektedir. RMSE incelenen veri ile aynı birimdeyken MAE ise yüzde birimindedir. Değişkenlerin birbirleri ile ilişkisini tespit etmenin bir yolu da korelasyon katsayısı R ifadesini kullanmaktır. Korelasyon katsayısının 1'e (veya -1'e) yakın olması, iki değişken arasında çok yüksek lineer ilişkinin (çok yüksek ters ilişkinin) olduğunu göstermektedir. 0'a yakın değerler ilişki olmadığını göstermektedir. R 'nin birimi yoktur. Bu bilgiler ışığında Tablo 4'te verilen değerler incelendiğinde, cevap fonksiyonu ile hesaplanan CMG momenti, momentum, ağırlık momenti tahminleri ile simülasyondan elde edilenler arasında yüksek bir ilişki varken, nütasyon, yalpalama ve yer değiştirme tahminlerinde bu ilişkinin azaldığı görülmektedir. Cevap fonksiyonu, CMG momentini $3,2083 \text{ kgm}^2/s^2$ hata ile tahmin edebilirken, momentum tahmininde $52,622 \text{ kgm}^2/s$ kadarlık sapma yapmaktadır. Bu çalışmada non-parametrik regresyon yöntemine dayalı olarak cevap fonksiyonu oluşturulmuştur. Diğer yöntemlerin, performansları ise bu çalışma kapsamına dâhil edilmemiş olup müteakip çalışmalarda incelenme potansiyeline sahiptir.

Tablo 4. Cevap fonksiyonunun performans kriterleri

| | CMG Moment | Momentum | Ağırlık momenti | Nütasyon | Yalpalama |
|---------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------|-------------|
| R^2 | 0,99867 | 0,99943 | 0,91516 | 0,10855 | 0,4142 |
| RMSE | 3,2083 kgm^2/s^2 | 52,622 kgm^2/s | 0,0017645 kgm^2/s^2 | 16,966 (°) | 0,40491 (°) |
| MAE (%) | 2,3833 | 2,0572 | 9,3355 | 18,73 | 16,507 |

Cevap fonksiyonunun, parametre tahminleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekillerde parametrelerin ω ve r ile olan ilişkisi verilmiştir. Bu ilişkiler cevap fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 10. Cevap fonksiyonunun parametre tahminleri (a) parametrelerin diskin dönme hızı ile ilişkisi (b) parametrelerin mil uzunluğu ile ilişkisi

Her bir parametrenin aralıkları ve değerleri farklı olduğu için tek grafik içerisinde birbirleri ile kıyaslamalı incelemek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle bütün parametrelerin değerleri normalize edilerek hem aralıkları hem de hem de değerlerin aynı grafik üzerinde gösterilebilmesi sağlanmıştır. Parametrelerin maksimum değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Şekil 9 (a)'da mil boyu değişmiyorken hem CMG torku hem de ağırlıktan kaynaklanan tork değişmemektedir. Zira CMG torku, ağırlık torkundan kaynaklandığı için eşit olması beklenen bir sonuçtur. Ağırlık torku ise, ağırlık ve yerçekimi değişmediği sürece sadece mil uzunluğuna bağlıdır. Uzunluk değişmediği sürece tork da değişmemiştir. CMG momenti, volanın ω dönme hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu da beklenen bir sonuçtur zira momentum; atalet momenti ve ω değerine bağlı olup, atalet momenti sabit kaldığı için sadece ω ile lineer ilişkili olmalıdır. Yalpalama, artan ω ile azalmaktadır. Nutasyon ise, artan ω ile azalmakta ancak daha sonra kararlılığını yitirmektedir. Nutasyondaki bu kararsızlığın sebebi; cevap fonksiyonunun nutasyon ve yalpalama tahminindeki düşük başarısı olabilmektedir.

Tablo 5. Parametrelerin normalizasyonda kullanılan maksimum değerleri

| | CMG moment kgm^2/s^2 | Momentum kgm^2/s | Ağırlık momenti kgm^2/s^2 | Nutasyon (°) | Yalpalama (°) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Şekil 9 (a) | 170,18 | 7372,23 | 69,61 | 10,65 | 1,17 |
| Şekil 9 (b) | 304,19 | 3880,41 | 69,61 | 3,32 | 0,14 |

Şekil 9 (b)'de $\omega = 500 \text{ rad/s}$ iken r değiştiğinde parametrelerdeki değişim verilmiştir. Hem CMG torku, hem yalpalama hızı hem de ağırlıktan kaynaklanan tork mil boyu ile lineer olarak değişmektedir. Yalpalama hızının artmasıyla CMG torku da artmıştır. Momentum sabit kalmıştır, Zira ω sabittir. Nutasyon ise, artan mil boyu ile artmakta ancak daha sonra kararlılığını yitirmektedir. Nutasyondaki bu kararsızlığın sebebi; cevap fonksiyonunun nutasyon ve yalpalama tahminindeki düşük başarısı olabilmektedir.

3.4 İşletme Parametreleri Aralarındaki Korelasyon

Parametreler arasındaki karşılıklı korelasyon, Tablo 6'da gösterildiği gibi Pearson korelasyon matrisi kullanılarak elde edilmiştir. Pozitif işaret, parametreler arasındaki pozitif doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir. Daha yüksek değer daha fazla ilişki olduğunu gösterirken, daha düşük korelasyon daha az anlamlılık demektir. ω değeri momentum ve nutasyon ile pozitif doğrusal ama yalpalama ile ters ilişkiye sahiptir. Mil uzunluğu da CMG torku ve yalpalama hızı ile yüksek ilişkilidir. CMG değeri, mil uzunluğu ve yalpalama ile pozitif, ağırlık momenti ile ters ilişkiye sahiptir. Momentum değeri ω ve nutasyonla doğru, yalpalama ile ters ilişkiye sahiptir. Ağırlık torku değeri; CMG torku, yalpalama hızı ve mil uzunluğu ile ters nutasyonla doğru orantılıdır. Nutasyon değeri; ω , momentum ağırlık momenti ile

doğru, mil uzunluğu, CMG torku ve yalpalama ile ters orantılıdır. Yalpalama ise ω , momentum, ağırlık momenti, nutasyon ile ters mil uzunluğu, CMG torku ile doğru ilişkiye sahiptir.

Tablo 6. Pearson korelasyon matrisi

| | ω (rad/s) | r (m) | $\sum M _y$ (kgm ² /s ²) | $ L $ (kgm ² /s) | $ Tork _{weig}$ (kgm ² /s ²) | ϕ (°) | Ω (rad/s) | |
|--|---------------------|---------|--|--------------------------------|--|------------|---------------------|-------|
| ω (rad/s) | 1,00 | -0,08 | -0,07 | 1,00 | 0,13 | 0,78 | -0,75 | |
| r (m) | -0,08 | 1,00 | 1,00 | -0,08 | -0,99 | -0,57 | 0,71 | |
| $\sum M _y$ (kgm ² /s ²) | -0,07 | 1,00 | 1,00 | -0,07 | -0,99 | -0,57 | 0,71 | |
| $ L $ (kgm ² /s) | 1,00 | -0,08 | -0,07 | 1,00 | 0,13 | 0,78 | -0,75 | 1,00 |
| $ Tork _{weig}$ (kgm ² /s ²) | 0,13 | -0,99 | -0,99 | 0,13 | 1,00 | 0,60 | -0,74 | 0,75 |
| ϕ (°) | 0,78 | -0,57 | -0,57 | 0,78 | 0,60 | 1,00 | -0,93 | 0,50 |
| Ω (rad/s) | -0,75 | 0,71 | 0,71 | -0,75 | -0,74 | -0,93 | 1,00 | 0,25 |
| | | | | | | | | 0,00 |
| | | | | | | | | -0,25 |
| | | | | | | | | -0,50 |
| | | | | | | | | -0,75 |
| | | | | | | | | -1,00 |

3.5 Tartışma

Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum değerler Tablo 7'deki gibi elde edilmiştir. Bu değer optimizasyon işlemcisinin, cevap fonksiyonu kullanarak tahmin ettiği değerler arasından seçildiği için, giriş değişkenlerini, simülasyonda kullanarak elde edilecek sonuçlar da, doğrulama amaçlı olarak tabloda verilmiştir. Aradaki farkın ufaklığı, cevap fonksiyonunun iyi bir yaklaşımla tahminde bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 7. Optimizasyon sonunda elde edilen parametreler

| Giriş değişkenleri | En uygun | | |
|---|-----------------|-----------|----------|
| r (m) | 0,143839 | | |
| ω (rad/s) | 164,3941 | | |
| Çıkış değişkenleri | Cevap fonk,'dan | Doğrulama | Fark (%) |
| $\sum M _y$ (kgm ² /s ²) | 88,99097 | 89,93 | 1,04 |
| $ Tork _{weight}$ (kgm ² /s ²) | 88,07658 | 89,85 | 1,97 |
| $ L $ (kgm ² /s) | 1226,441 | 1254,13 | 2,21 |
| ϕ (°) | 0,024768 | 0,02503 | 1,05 |
| Ω (rad/s) | 0,06178 | 0,07171 | 13,85 |

4. Sonuçlar

Bir CMG tasarımında, dinamik davranış simülasyon ile elde edilmiş ve optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarım yapılmıştır. Volan dikey yerleştirilmiş olup ağırlık torqu sayesinde çalışan, bir volanlı mekanik jiroskopun hareketine ilişkin dinamik cevaplar, klasik (Newtonian) mekanikle esaslı incelenmiştir. Parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri cevap fonksiyonu sayesinde elde edilmiştir. Elde edilen temel çıkarımlar aşağıda sıralanmıştır.

CMG içerisinde kullanılabilcek olan bir volanın dinamik davranış simülasyon ile elde edilmiştir. Optimizasyon yöntemi ile volanın mekanik tasarımı yapılmıştır. Dikey olarak yerleştirilmiş ve kütle momentiyle çalıştırılan volanın hareketi klasik (Newton) mekaniği esaslı olarak incelenmiştir. Parametrelerin birbirleri ile ilişkisi cevap fonksiyonu ile elde edilmiştir. Ulaşılan temel sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- CMG'lerde tork üretimi, yalpalama oluşturularak sağlanmaktadır. Yalpalama açısız frekansı dışarıdan, sabit uygulanabileceği gibi, salınımlı olarak da uygulanabilmektedir. Ayrıca, nütasyon, volan dönme hızı ile birleştiğinde de, salınımlı yalpalama meydana gelmektedir.
- Dinamik simülasyonlarda mesnet noktası oluşturmak üzere kullanılacak mil ucunun yere bağlantısı oluşturulurken yukarı-aşağı öteleme hareketi kısıtlanmış ve geriye kalan tüm öteleme ve dönmeler serbest bırakılmıştır. Bağlantının referans koordinat eksen takımının, tam mesnet noktası üzerinde olmasına dikkat edilmelidir. Zira moment için mesafe, bu noktaya göre hesaplanmaktadır. Volan ve milin tek parça olmasına dikkat edilmelidir. Volan, mil etrafında değil, milli volan, mesnet noktası etrafında dönmelidir.
- Tasarım noktası oluşturmak üzere Latin Hypercube Sampling Design yöntemi kullanılmıştır. Yüz adet nokta oluşturulmuştur. Cevap fonksiyonunun elde edilmesinde non-parametrik regresyon metodu kullanılırken, optimum değerlerin tespitinde çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Neticede de; ϕ 'nin ve harcanan enerjinin en az olması, $\sum|M|_y$ 'nin en

fazla olması amaçlanarak ve ϕ 'nin hareketinin $\pm 3^\circ$ içerisinde kalması şart koşulduğunda; bu amaç ve kısıtlar $\omega = 164,3941 \text{ rad/s}$ ve $r=0,143839 \text{ m}$ iken sağlanabilmektedir, Bu durumda da $\sum |M|_y = 89,93 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$, $L = 1254,13 \text{ kgm}^2/\text{s}$, en fazla $\phi = 0,02503^\circ$ ve $\Omega = 0,07171 \text{ rad/s}$ olmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı; editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- Ahmed A., Adnaik I., Bhavsar D., Sargar TS. Design and analysis of gyro wheel for stabilization of a bicycle, International Journal for Scientific Research Development, 2016; 4(04): 349-351.
- Anonimouse. Nutation Wikipedia®, en.wikipedia.org: Wikimedia Foundation, Inc., 2023.
- Ansys®. Academic research mechanical products, 2021 R2, Help system, ANSYS Mechanical User's Guide: ANSYS, Inc., 2023.
- Arena L., Piergentili F., Santoni F. Design, manufacturing, and ground testing of a control-moment gyro for agile microsatellites, Journal of Aerospace Engineering, 2017; 30(5): 04017039. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000754
- Bayram H. Design and implementation of autonomous surface vehicle for inland water, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2020; 10(1): 101-111. doi: 10.21597/jist.642503
- Boyce MP. 5 - Rotor dynamics. In M. P. Boyce (Ed.), Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition), Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012; 215-250.
- Han B., Zheng S., Wang Z., Le Y. Design, modeling, fabrication, and test of a large-scale single-gimbal magnetically suspended control moment gyro. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015; 62(12): 7424-7435. doi: 10.1109/TIE.2015.2459052
- Hu Q., Guo C., Zhang J. Singularity and steering logic for control moment gyros on flexible space structures, Acta Astronautica, 2012; 137, 261-273. doi: 10.1016/j.actaastro.2017.04.030
- Kacar İ., Eroğlu MA., Yalçın MK. Design and development of an autonomous bicycle, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 10(1): 364-372. doi: 10.28948/ngumuh.628580

- Kostyuchenko T., Indygashcheva N. Computer-aided design system for control moment gyroscope. MATEC Web Conf., 2018; 158, 01021.
- Leve FA., Hamilton, BJ., Peck, MA. Spacecraft momentum control systems (1st ed. 2015 edition ed. Vol. 1010), Springer-Verlag GmbH, Heidelberg: Springer, Cham, 2015.
- Margulies G., Aubrun J. Geometric theory of single-gimbal control moment gyro systems. Journal of the Astronautical Sciences, 1978; 26.
- Osman MOM., Sankar S., Dukkipati RV. Design synthesis of a gyrogrinder using direct search optimization. Mechanism and Machine Theory, 1982; 17(1): 33-45. doi: 10.1016/0094-114X(82)90022-2
- Şahin HA., Önder H. The use of genetic algorithm and particle swarm algorithm in determining egg freshness. Black Sea Journal of Engineering and Science, 2020; 3(3): 81-88. doi: 10.34248/bsengineering.684613
- Somov YI. Nonlinear synthesis, optimization and design of the spacecraft gyromoment attitude control systems, IFAC Proceedings Volumes 2020; 33(16): 337-342. doi: 10.1016/S1474-6670(17)39653-2
- Sucuoglu HS., Bogrekeci I., Gultekin A., Demircioglu P. Design, analysis and development of mobile robot with flip-flop motion ability. IFAC-PapersOnLine 2018; 51(30): 436-440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.323>
- Sun J., Cai Z., Sun J., Jin D. Dynamic analysis of a rigid-flexible inflatable space structure coupled with control moment gyroscopes. Nonlinear Dynamics 2023; 111(9): 8061-8081. doi: 10.1007/s11071-023-08254-8.
- Ünker F., Çuvalcı O. Vibration control of a column using a gyroscope. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2015; 195, 2306-2315. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.182
- Viana FAC. A tutorial on Latin Hypercube design of experiments. Quality and Reliability Engineering International 2016, 32(5): 1975-1985. doi: <https://doi.org/10.1002/qre.1924>
- Ye X., Xu X., Wen T., Han B. Design and optimization of repeatable locking/unlocking device for magnetically suspended control moment gyro. Acta Astronautica 2021; 186, 24-32. doi: 10.1016/j.actaastro.2021.05.025
- Yildiz N., Topal M. Nonparametrik regresyon metodlarının incelenmesi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2021; 32(4): 429-435.
- Zhang PF., Hao JH., Chen Q. Gyro-less angular velocity estimation and intermittent attitude control of spacecraft using coarse-sensors based on geometric analysis. Aerospace Science and Technology, 2020; 103, 105900. doi: 10.1016/j.ast.2020.105900
- Zhang Y., Zhao G., Li H. Multibody dynamic modeling and controlling for unmanned bicycle system. Isa Transactions 2021; 118, 174-188. doi: 10.1016/j.isatra.2021.02.014