İKİ TEKERLEKLİ TAŞIT MODELİ İÇİN DENGELEYİCİ JİROSKOP KONTROLÜ

Vedat KARAMAN[1], Cihan DEMİR[2]

[1]Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul / Türkiye

[2]Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, İstanbul / Türkiye

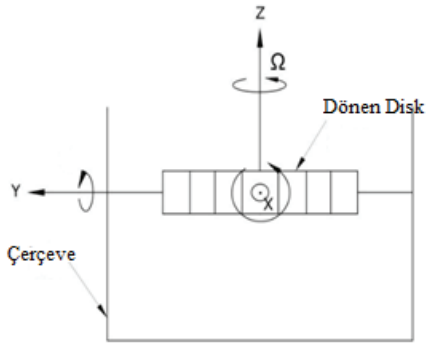
Öz: İnsanoğlunun yapmış olduğu teknoloji ürünlerinin içinde taşıtlar büyük bir öneme sahiptir. İcat edildikleri günden itibaren sürekli bir değişim ve gelişim içinde olan taşıtlar, farklı ihtiyaçlar doğrultusunda bu gelişime devam etmektedir. Taşıt teknolojisi konfor, hız, güvenlik, sağlamlık gibi ihtiyaçlardan dolayı sürekli bir araştırma konusu olmuştur. Taşıtların insan hayatını kolaylaştırma etkisi olmasının yanında kalabalıklaşan toplumlarla beraber çeşitli problemlere sebep olduğu da bilinmektedir. Bu problemlere örnek olarak hava kirliliği, trafik kazaları, kalabalık şehirlerdeki trafik sıkışıklığı gösterilebilir. İnsan hayatının vazgeçilmezi haline gelen taşıtlardan kaynaklı sorunlara çözüm ve taşıtları geliştirmeye yönelik bilimsel çalışmalar devam etmektedir. Geleneksel dört tekerlekli taşıt yapısından farklı olarak, 2 tekerlekli ve 3 tekerlekli taşıtlar da mevcuttur. 2 tekerlekli taşıtların küçük boyutlu olması, trafik problemini azaltıcı ve park sorununu giderici ekileri sebebi ile kullanımı günümüzde önem kazanmıştır. Bu çalışmada iki tekerlekli taşıt modelinin denge problemine çözüm olarak jiroskop tasarımı sunulmuştur. Jiroskop-taşıt için matematiksel model oluşturularak kutup yerleştirme yöntemi ile tasarlanan kontrolör ile doğrusal karesel düzenleyici [linear quadratic regulator (LQR)] kontrolör performans açısından birbiri ile kıyaslanmıştır. Amaç, jiroskobun devinim açısına göre daha iyi performans sunan kontrol stratejisini belirlemektir. MATLAB ortamında yapılan simülasyon çalışmaları, jiroskop devinim açısı ile oluşan devrilmeye ters yönde torkun iki tekerlekli taşıtı dengelediği gösterilmiştir. Bunun yanında simülasyon sonuçları tasarlanan kontrolörlerin taşıt sistemini başarıyla kontrol edebildiğini de göstermektedir. Sonuç olarak jiroskop ile iki tekerlekli taşıt dengelemenin mümkün olduğu ve kutup yerleştirme yöntemi ile tasarlanan kontrolörün daha iyi performans gösterdiği sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Jiroskobik Denge, İki Tekerlekli Taşıt, Kontrol

GİRİŞ

Günümüzde teknolojide meydana gelen gelişmeler, toplumsal ihtiyaçlar doğrultusunda ilerlemektedir. Son yıllarda nüfusun çok kalabalıklaşması, büyük şehirlerde trafik ve park sorunu oluşturmaktadır. Bu soruna çözüm olarak daha küçük boyutlara sahip iki tekerlekli taşıtlar önerilebilir. İki tekerlekli taşıtların denge problemi önerilen çözüm önerisi için problem yaratmaktadır. Bu sorun ilk olarak 1905'te Louis Brennan tarafından ele alınmıştır(Brennan, 1905). Ardından 1924 te Shilovski'nin (Schilowsky, 1915; Shīlovskīĭ, 1924) çalışmaları jiroskop ile bu sorununun çözülebileceğini göstermiştir. Jiroskop, sabit bir noktadan geçen anlık bir eksen etrafında yüksek açısal hızda dönebilen katı bir gövde olarak tanımlanmaktadır.(Scarborough, 1958) Genellikle çeşitli ebat ve ağırlıktaki bir disk olan bu gövdenin dönmesi, jiroskobik atalet olarak bilinen bir momentum

üretir. Bu momentum, dönüş eksenine dik bir etkinin harekette oluşturacağı değişikliği engeller. Momentumun bu direnç kuvveti, bir jiroskobun uygulandığı çeşitli cisimlerin dengelenmesini sağlayan şeydir. Çünkü jiroskobik momentum cisme uygulanan momentlere karşı koyabilir, onları iptal eder ve cismin orijinal pozisyonunda kalmasına izin verir. Jiroskop; deniz, havacılık, askeri, sensör, kontrol ve ulaşım alanlarında çok çeşitli uygulamalara sahiptir.



Şekil 1. Jiroskop Genel Görünümü (Zhang, 2014)

Günümüzde de iki tekerlekli taşıtları dengeleme amaçlı çalışmalar jiroskop uygulamaları ile devam etmektedir. Jiroskobun deniz araçlarında da dengeleyici olarak kullanımı mevcuttur. N.C. Townsend,A.J. Murphy, R.A. Shenoi yaptıkları çalışmada; deniz araçlarının dışardan aldığı darbeleri engelleyici aktif jiroskop stabilizatör sisteminin kullanılabilirliğini teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir (Townsend, Murphy, & Shenoi, 2007). 2014te Harun Yetkin ve çalışma arkadaşları(Yetkin et al., 2014) tarafından; iki tekerlekli taşıt modeli olarak kullanılan bisikletin dinamik ve statik stabilizasyonu için yerçekimi ivmesinin oluşturduğu devrilme torkunu ve dinamik kuvvetlerin oluşturduğu kuvvetleri, jiroskobun ters yönde oluşturduğu tork ile dengelemenin mümkün olduğu teorik ve deneysel olarak gösterilmiştir. Aynı çalışmada deneysel düzenekler kurulmuş ve jiroskobun ürettiği torku kontrol etmek için sliding mode control ve PID kontrolör performansları karşılaştırılmıştır(Yetkin et al., 2014). Diğer bir çalışmada, Tao Zhang tarfından iki tekerlekli bir taşıtın dengelenme problemine çözüm olarak jiroskop uygulaması önerilmiş ve taşıtın düşük hızlarda ve statik durumda stabil durmasını sağlayıcı jiroskop tasarımı geliştirilmiştir(Zhang, 2014). Stephen C. Sprya ve Anouck R.Girard jiroskobik dengeleme sistemi için tam geri besleme kontrolör geliştirerek sistem analizini yapmışlardır(Spry & Girard, 2008). Yapılan araştırmalar doğrultusunda; çalışmada, iki tekerlekli taşıtın teorik analizi yapılarak, iki tekerlekli taşıtlarda meydana gelen denge problemini engelleyici jiroskop devinim açısını kontrol etmek amaçlanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalardan farklı olarak jiroskobun dönen parçası olarak bilenen diskin konum ve hızının sistem üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Teorik olarak elde edilen sonuçların deneysel çalışmalara öncülük etmesi hedeflenmektedir.

AMAÇ

Bu çalışmada iki tekerlekli taşıtın denge problemine çözüm olarak, jiroskop sisteminin uygulanabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır. Taşıtın hareket denklemleri ile MATLAB ortamında simülasyon yapılarak iki farklı

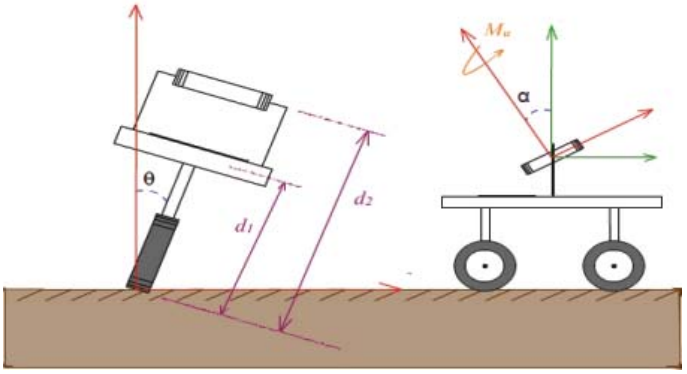
kontrolör karşılaştırılıp, simülasyon sonucuna göre uygun kontrolör tasarım önerisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

KAPSAM

İki tekerlekli taşıt modelinin denge problemine yönelik yapılan araştırmalar giriş bölümünde açıklanmış ve bu çalışmanın farklılıkları belirtilmiştir. Sistemin hareket denklemleri Lagrange yöntemi ile oluşturularak durum uzay formunda yazılmıştır. Modern kontrol teorisinde durum uzay modeli kullanılarak tasarlanan, LQR ve kutup yerleştirme olarak adlandırılan tam geri besleme kontrolcüleri tasarlanmıştır. Bulgular kısmında sistemin farklı kontrolcüler ile birim basamak cevapları analiz edilmiştir. Bunun yanında disk parametreleri değiştirilerek simülasyon sonuçlarına etkisi araştırılmıştır.

YÖNTEM

Jiroskobik sistemin hareket denklemleri; momentum yaklaşımı ve Lagrange enerji yaklaşımı olmak üzere iki yöntem kullanılarak oluşturulabilir. Lagrange yöntemi, karmaşık sistemler için daha basit ve kullanışlıdır. Bu çalışmada, sistem simülasyonu için Lagrange yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2. İki Tekerlekli Jiroskop Taşıt Modeli

Hareket denklemlerinde kullanılacak parametreler;

T=Taşıt, J=Jiroskop;

Simülasyon yapılırken değiştirilmeyen sabit parametreler;

mt=Taşıt kütlesi(1.5 kg)

mj=Jiroskob diskinin kütlesi(0.420 kg)

rj= Jiroskob diskinin yarıçapı (0.05 m)

h= Jiroskob diskinin yüksekliği (0.015 m)

ht=Taşıtın kütle merkezinin yükesekliği (0.08 m)

a,b=Taşıtın boyutları (a=0.1,b=0.015 m)

Simülasyon yapılırken değiştirilen ve bozucu giriş ile değişen parametreler;

hj=Jiroskubun kütle merkezinin yüksekliği

Vt=Taşıtın çizgisel hızı

Vj=Jiroskob diskinin çizgisel hızı

wt=Taşıtın açısal hızı

wj=Jiroskob diskinin açısal hızı

θ =Taşıtın yan yatma (devrilme) açısı

α =Jiroskobun devinim açısı (Devrilmeyi engelleyen tork oluşturma açısı)

Ω=Volan açısal hızı

Itx,Ity,Itz=Taşıt atalet momentleri

Ijx,Ijy,Ijz=Jiroskop atalet momentleri

Jiroskop taşıt modeli iki kütleden oluşmuş gibi kabul edilerek sistem parametreleri belirlenmiştir. Langrange yöntemi sisteme uygulanarak hareket denklemleri elde edilmiştir. Lagrange yönteminin genel denklem yapısı;

$$L = Ek - Ep \quad (1.1)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (1.2)$$

Ek =Kinetik enerji

Ep=Potansiyel enerji

Burada q_i bir sistemin i. genel koordinatını, Q_i ise bu koordinata etki eden kuvvetlerin toplamını (Genel Kuvvet) ifade eder. Kontrol tasarımı yapılmadan önce sistem denklemleri 0 noktası etrafında aşağıdaki kabuller ile doğrusallaştırılmıştır (Nise, 2007).

$sin\alpha \cong \alpha$

$cos\alpha \cong \alpha$

$\dot{\alpha}^2 = 0$

Doğrusallaştırılmış sistemin Lagrange yöntemi ile elde edilen denklemleri;

$$\ddot{\alpha} = \frac{(\Omega * Ijy * \dot{\theta}) + Mu}{Ijx} \quad (1.3)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(\Omega * \mathrm{Ijy} * \dot{\alpha}) - (mt * ht + mj * hj) * g * \theta}{Itz + (mt * ht^2 + mj * hj^2) + Ijz} \quad (1.4)$$

Doğrusallaştırılmış sistemin durum uzay formu;

$$k1 = \frac{-\Omega * \mathrm{Ijy}}{Ijx} \quad (1.5)$$

$$k2 = \frac{\Omega * \mathrm{Ijy}}{(mt * ht^2 + mj * hj^2) + Itz + Ijz} \quad (1.6)$$

$$k3 = \frac{g * (mt * ht + mj * hj)}{(mt * ht^2 + mj * hj^2) + Itz + Ijz} \quad (1.7)$$

$$x(1) = \alpha$$

$$x(2) = \dot{\alpha}$$

$$x(3) = \theta$$

$$x(4) = \dot{\theta}$$

$$\dot{\mathrm{x}} = \mathrm{Ax} + \mathrm{Bu} \quad (1.8)$$

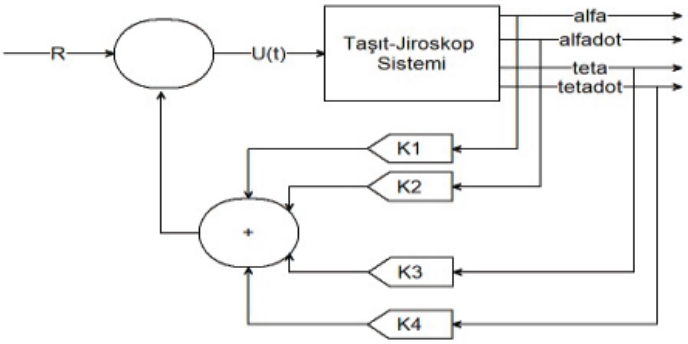
$$\mathrm{y} = \mathrm{Cx} + \mathrm{Du} \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x(1)} \\ \dot{x(2)} \\ \dot{x(3)} \\ \dot{x(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & k2 & k3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/Ijx \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \end{bmatrix} + 0 \quad (1.11)$$

LQR KONTROLÖR

LQR; modern kontrol teorisinde, durum uzay yöntemini kullanarak mümkün olan en az zamanda en az kontrol çabasıyla kazanç matrisini belirleme yöntemidir. Aynı zamanda çok çıkışlı sistemler için etkili bir kontrol yöntemidir(Wang, Dong, He, Shi, & Zhang, 2010). Şekil 3'te, LQR ile tasarlanmış tam geri beslemeli Taşıt-Jiroskop sistemi gösterilmektedir. LQR kontrolcü tasarlanırken, taşıtın jiroskop sistemi ile dengede tutulması amaçlanmıştır. Kontrol yöntemi, sistem değişkenlerinin hata değerlerinin geri beslenmesi yoluyla uygulanmaktadır.



Şekil 3. LQR Kontrol Yöntemi ile Tasarlanan Geri Besleme Kontrolörün Blok Diyagramı.

Durum uzay modeli oluşturulan sistem için kazanç matrisi (optimal kontrol matrisi);

$$K = [K1\ K2\ K3\ K4]$$

$$u(t) = -Kx(t) \quad (1.12)$$

LQR yönteminde durum uzay denklemleri kullanılarak J performans indeksi tanımlanır.

$$J = (x^T Qx + u^T Ru)dt \quad (1.13)$$

$$Q = \begin{bmatrix} qi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & qi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & qi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & qi \end{bmatrix}$$

$$R = ri$$

Kullanıcının belirleyeceği qi ve ri katsayılarına göre performans indeksini minimize edecek (u) girdisi belirlenir. Sistem girdisi u=K*x eşitliğinde bulunan $K = R^{-1}B^TP$ denkleminden meydana gelmektedir. Burada bulunan P ise Ricatti eşitliğinden bulunan simetrik bir matristir.(Ogata & Yang, 2002)

$$PA + A^TP + Q - PBR^{-1}B^TP = 0 \quad (1.14)$$

Şekil 4 MATLAB ile K değerlerinin nasıl bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 4. LQR Kontrol Yöntemi MATLAB Paket Programı

Taşıt-Jiroskop Sistemi için;

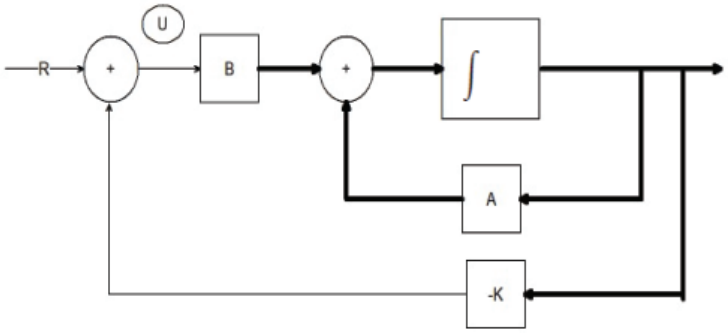
$$\boldsymbol{Q = C' * C}$$

$$\boldsymbol{R = 1}$$

Q ve **R** matrisleri belirlendikten sonra sistem denklemleri MATLAB ile çözülerek, **K** matrisi oluşturulmuştur.

KUTUP YERLEŞTİRME

Bu sistem için tam durum geri beslemeli şema, şekil 5'te verilmiştir. Kapalı çevrim sistem için karakteristik denklem (**sI-(A-BK)**)'nın determinantıdır(Bingül, 2006). **A** ve **BK** (4x4) boyutunda birer matris olduğu için sistemde 4 kutup bulunmaktadır. **-BK** matrisi kutuplarının, istenilen yere yerleştirilebilmesi için sistemin kontrol edilebilir olması gerekmektedir(Ogata & Yang, 2002). Bu şartı sağlayan sistemde, kutup yerleştirme yöntemi kullanılarak **K** matrisi belirlenmiştir.

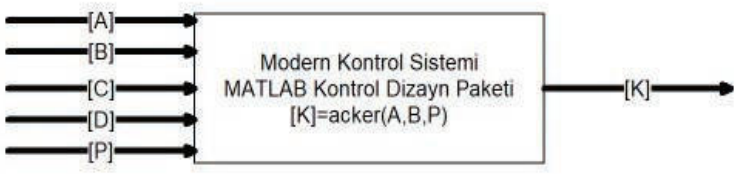


Şekil 5. Kutup Yerleştirme Kontrol Yöntemi İle Tasarlanan Geri Besleme Kontrolörün Blok Diyagramı.

Kapalın döngü kutupları {p1,p2,p3,p4} olan sistemin K matrisinin veren denklem;

$$\det(\boldsymbol{sI - A + BK}) = (s-p1)(s-p2)(s-p3)(s-p4) \quad (1.15)$$

Şekil 6'da MATLAB ortamında, **K** matrisi değerlerinin nasıl belirleneceği gösterilmiştir.



Şekil 6. Kutup Yerleştirme Kontrol Yöntemi MATLAB Paket Programı.

Kapalı döngü kutupları, kontrol tasarımında sistem karakteristiğini gösteren önemli bir referanstır.

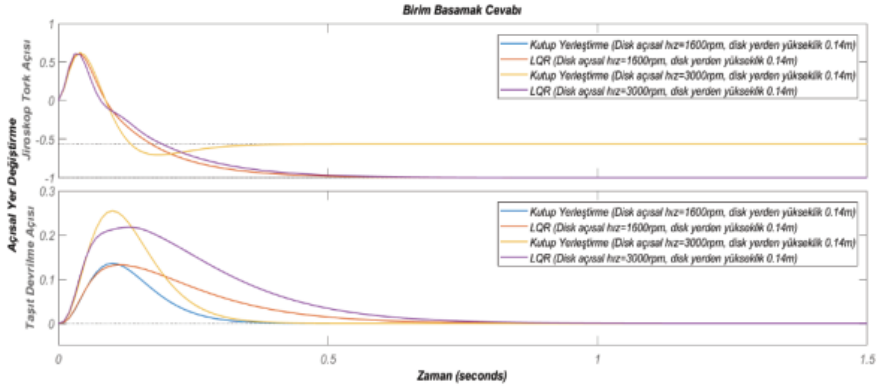
Taşıt-Jiroskop Sistemi için;

$$P = [p1, p2, p3, p4]$$

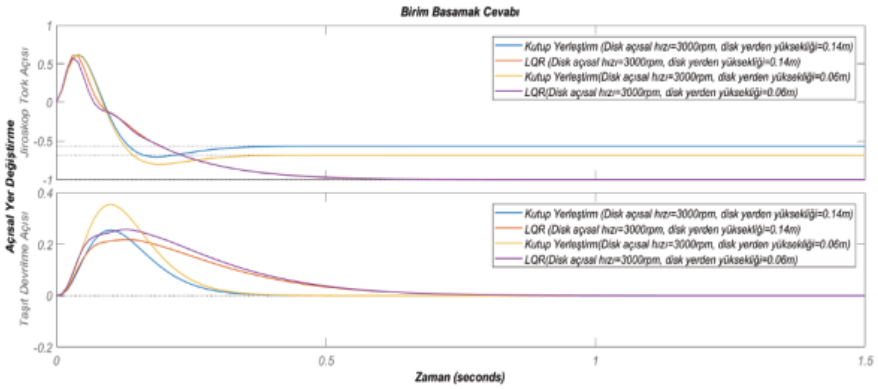
Kontrol edilebilen sistemimizde MATLAB için **P**=kapalı döngü kutupları, p1=-30, p2=-30, p3=-30, p4=-30 olarak seçilmiştir.

BULGULAR

Durum uzay modeli oluşturulan sistemin, MATLAB ortamında modellenmesi ile farklı kontrolcülerin aynı şartlar altında, taşıt gövdesine uygulanan birim basamak girişine karşı cevapları şekil 7 ve şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. LQR ve Kutup Yerleştirme Yöntemleri İle Tasarlanan Kontrolörlerin Farklı Disk Açısal Hızlarında Performans Grafikleri



Şekil 8. LQR ve Kutup Yerleştirme Yöntemleri İle Tasarlanan Kontrolörlerin Farklı Disk Yüksekliklerinde Performans Grafikleri

Tablo 1. 3000rpm Hız ve 0.06m Disk Yüksekliğinde LQR ve Kutup Yerleştirme Yöntemleri ile Tasarlanan Kontrolörlerin Taşıt Devrilme Açısı İçin Performans Karakteristikleri.

Sistem Cevabı Karakteristikleri	LQR	Kutup Yerleştirme Yöntemi
Oturma Zamanı Ts	0.741	0.358
En Yüksek Genlik	0.257	0.354
Sürekli Hal Hatası	0	0

LQR ve kutup yerleştirme yöntemi ilen tasarlanan kontrolcülerin aynı koşullarda birim basamak girdisine tabi tutulması sonucunda performansları gözlenmiştir. Jiroskop disk konumunun 0.6m ve 0.14m olmak üzere iki farklı yükseklikte, aynı disk hızlarında sistem üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Benzer şekilde diskin dönme hızı, 1600rpm ve 3000rpm olarak değiştirilerek sistemin davranışı gözlemlenmiştir. MATLAB ortamında yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre; düşük disk yüksekliklerinde ve yüksek disk hızlarında sistem dengeleme çalışması daha iyi sonuç vermiştir. Bunun yanında tasarlanan her iki kontrolörün de sistemi kontrol edebildiği gözlemlenmiştir. Fakat, tablo 1'den anlaşılacağı gibi; kutup yerleştirme yöntemi ile tasarlanan kontrolörün daha iyi performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada iki tekerlekli taşıt denge probleminin dengeleyici jiroskop uygulaması ile ortadan kaldırılabileceği araştırılmıştır. Bunun sonucunda jiroskobun uygun fiziksel özelliklere sahip olması durumunda bozucu etkileri ortadan kaldırdığı gösterilmiştir. Tasarlanan LQR ve kutup yerleştirme kontrolcülerinin başarılı bir şekilde uygulanabilirliği anlaşılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarının deneysel olarak yapılacak çalışmalara öncülük etmesi için fiziksel özelliklerin sistem üzerindeki etkileri sunulmuştur.

KAYNAKÇA

Bingül, Z. (2006). *Matlab ve Simulink'le modelleme/kontrol II*: Birsen Yayınevi.

Brennan, L. (1905). Means for imparting stability to unstable bodies: Google Patents.

Nise, N. S. (2007). *CONTROL SYSTEMS ENGINEERING, (With CD)*: John Wiley & Sons.

Ogata, K., & Yang, Y. (2002). *Modern control engineering* (Vol. 4): Prentice-Hall.

Scarborough, J. B. (1958). *The Gyroscope*: Interscience Publishers Limited.

Schilowsky, P. (1915). Gyroscope: Google Patents.

Shīlovskīĭ, P. P. (1924). *The Gyroscope: Its Practical Construction and Application, Treating of the Physics and Experimental Mechanics of the Gyroscope, and Explaining the Method of Its Application to the Stabilization of Monorailways, Ships, Aeroplanes, Marine Guns, Etc*: E. & FN Spon, Limited.

Spry, S. C., & Girard, A. R. (2008). Gyroscopic stabilisation of unstable vehicles: configurations, dynamics, and control. *Vehicle System Dynamics, 46*(S1), 247-260.

Townsend, N., Murphy, A., & Shenoi, R. (2007). A new active gyrostabiliser system for ride control of marine vehicles. *Ocean Engineering, 34*(11-12), 1607-1617.

Wang, H., Dong, H., He, L., Shi, Y., & Zhang, Y. (2010). *Design and simulation of LQR controller with the linear inverted pendulum.* Paper presented at the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering.

Yetkin, H., Kalouche, S., Vernier, M., Colvin, G., Redmill, K., & Ozguner, U. (2014). *Gyroscopic stabilization of an unmanned bicycle.* Paper presented at the American Control Conference (ACC), 2014.

Zhang, T. (2014). Analysis of Active Gyro Based Roll-Stabilization of Slender Boat Hulls.