

# Gelişmiş Bir Burun İniş Takımı Shimmy Modeli

## An Improved Nose Landing Gear Shimmy Model

Sena Koçak, Ali Fuat Ergenç

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
{kocaksen, aergenc}@itu.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada, iniş takımlarında görülen shimmy davranışına dair modelde çeşitli iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, tekerlek davranışının daha gerçekçi olmasını sağlamak adına uçak tekerleğine dair hibrid bir yaklaşım kullanılmıştır. Bununla birlikte, burulma toleransı etkisi modellenmiş ve ana modele entegre edilmiştir. Son olarak, tekerlek ve burulma toleransının shimmy davranışına etkileri simüle edilmiş ve yorumlanmıştır.

### Abstract

In this study, various improvements have been made in the model of the shimmy behavior in the nose landing gear. First, a hybrid approach to the aircraft tire is employed in order to present more realistic the wheel behavior. Additionally, the torsional tolerance effect is modeled and integrated into the primary model. Finally, the effects of tire type and torsional tolerance on shimmy behavior are simulated and discussed.

### 1. Giriş

Shimmy iniş takımı sisteminde taksi, iniş ve kalkış sırasında gözlenen ciddi bir titreşim davranışıdır. 10 ila 30 Hz frekansları arasında gözlemlenen bu titreşim hareketi, tekerlek ve yol etkileşiminden kaynaklanmakta ve kendinden uyarlamalıdır [1]. Literatürde, shimmy fenomeninin incelenmesi üzerine çeşitli çalışmalar tasarım parametrelerini optimize etmek ve aşınma gibi problemleri öngörmek adına sürdürülmektedir. Yaygın olarak burun iniş takımlarında görülmektedir.

Kütle, sönümleme katsayısı, geometrik özellikler, hız ve uyarma kuvveti gibi yapı, tekerlek ve süreç değişkenleri ile sürtünme, tekerlek elastikliği ve burulma toleransı gibi nonlineer etkiler shimmy titreşimine sebep olabilmektedir. Shimmy sonucunda, yolcu konforunu azalmakta ve hatta pilotun uçağı doğru şekilde yönlendirmesine engel olacak kadar kuvvette bir titreşim ortaya çıkabilmektedir. Bu durum; tekerlek aşırı aşınma, iniş takımında arıza, hatta kazalar gibi sonuçlara sebep olabilmektedir.

Literatürde, shimmy dinamiğinin incelenmesi üzerine çeşitli matematiksel modeller ve yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, shimmy titreşiminin hangi parametre ve koşullar altında tetikleneceğini anlamaya yönelik olarak sunulmuştur. Sarhoş bir tekerleğin kararlılığı ve mekanik davranışı ile çalışmalar oldukça eskiye dayanmaktadır. NACA tarafından yayınlanan bir çalışmada burun iniş takımı sistemine ait model ortaya konulmuştur [2]. Bunun ardından, yine bir başka

çalışmada sunulan bu teori deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır [3].

Farklı model yaklaşımlarının bulunmasının sebebi ise shimmy titreşimini incelerken kullanılan tekerlek modellerinin [4] değişiklik göstermesidir. Shimmy davranışının modellenmesi sürecinde kullanılan tekerlek modeli oldukça kritiktir ve literatürde bu konuyla ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Pajeka ve Besselink shimmy davranışını açıklayarak tekerlek davranışının kararlılık üzerine etkilerini tartışmıştır [5], [6]. Tekerleğin sürekli haldeki davranışını modellemek amacıyla *Magic Formula* yaklaşımına dayalı nonlineer yöntemler [7], [8] ve benzer deneysel nonlineer fonksiyonlar kullanılmaktadır [9]. Buna karşılık geçici haldeki davranışının gözlemek amacıyla *stretched string* model yaklaşımı araştırmacılarca kullanılmaktadır [10]. Daha sonra, *stretched string* model konseptinin farklı yaklaşımları da sunulmuştur [11-13]. Bir diğer tekerlek modelleme yaklaşımı ise olan *point contact* yöntemidir [5]. Bu çalışmalara ek olarak tekerlek modelinde tekerleğin elastikliğinden kaynaklanan gecikme veya tekerlek hafızası etkisi başka bir çalışmada açıklanmıştır [14] ve ardından yapılan deneyler yardımıyla gecikmeli model doğrulanmıştır [15]. Bunun yanı sıra, shimmy davranışının modellerken kullanılan farklı tekerlek yaklaşımları karşılaştırılmıştır [16].

Bu çalışmada, burun iniş takımında shimmy davranışının modellenmesi sürecinde gecikmeli bir model yaklaşımı kullanılmıştır [17]. Von Schlippe'nin tekerlek modeli, literatürde tekerlek hafızası olarak bilinen ve tekerlek elastikliğinden kaynaklanan gecikme etkisi göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenmiştir [18]. Bu modeller, shimmy fenomenine ait dinamiğinin kavranılmasını kolaylaştırmıştır.

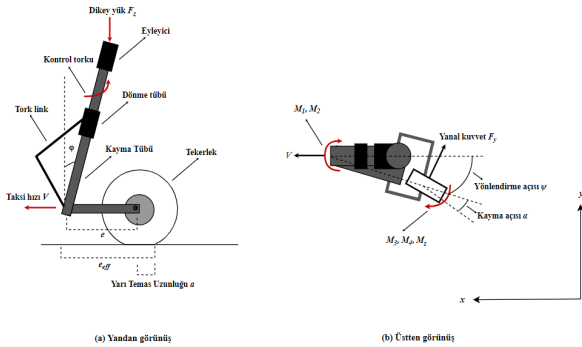
Üretim toleransları ve iniş takımındaki aşınmalar belirli bir freeplay etkisine sebep olmaktadır. Bununla birlikte şok dikmesinin ve yönlendirme collarlarının üst ve alt rulmanlarında Coulomb sürtünmesi oluşabilmektedir. Bu iki etkiden burulma toleransı kararlılığı azaltırken, sürtünme enerji kaybına sebep olsa da kararlılığı iyileştirmektedir. Shimmy hareket denklemleri oluşturulurken genel olarak çeşitli doğrusal olmayan etkiler ihmal edilmektedir. Buna karşılık bazı bilim insanları bu etkilerin shimmy davranışı üzerinde oldukça belirleyici olduğunu savunmaktadır. Howcraft ilk burulma toleransı etkisinin iki tekerlekli ana iniş takımı konfigürasyonu üzerine etkisini modellemiştir. Ana iniş takımı üzerindeki shimmy burulma toleransı olduğu ve ihmal edildiği koşullar için analiz etmiş ve burulma toleransının entegre edilmediği modelin kararlı olduğunu gösterirken, diğer modelin belirtilen

çalışma aralığında shimmyye girdiğini gözlemlemiştir [19]. Howcroft daha sonra burulma toleransının shimmy üzerine etkisi ile geometrik bağlaşım parametrelerini de göz önüne alarak incelemiştir [20]. Bunun yanı sıra, başka bir yayında freeplay etkisi altındaki iniş takımı için akım bağımlı Bouc-Wen modeli kullanılarak modellenen bir manyetoreolojik (MR) shimmy sönümleyici tasarlanmıştır [21]. Bir diğer çalışmada tek tekerlekli burun iniş takımı için shimmy burulma toleransı ve belirsizlikler altında modellenmiş ve shimmy sönümlemek için dayanıklı aktif kontrol sistemi önerilmiştir [22].

Bu çalışmada tekerlek modeli uçak tekerlekleri özelinde iyileştirilecek ve burulma toleransı etkisi modele entegre edilecektir.

## 2. Burun İniş Takımı Shimmy Modeli

Çalışmada incelenecek burun iniş takımı sistemine ait gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Burun iniş takımının görünümü.

İniş takımı için shimmy modeli (1) denklemindeki gibi oluşturulmuştur [9], [23].

$$I_z \ddot{\psi} = M_1(\psi) + M_2(\dot{\psi}) + M_3(\alpha) + M_4(\dot{\psi}/V) + M_5 \quad (1)$$

(1) denkleminde;  $I_z$  z-ekseni etrafındaki eylemsizlik momenti,  $\psi$  yalpalama açısı,  $\alpha$  tekerleğin kayma açısı ve  $V$  uçağın ileri yöndeki hızını temsil etmektedir. (2) denkleminde ise verilen  $M_1$  dönme tübü tarafından sağlanan lineer yay torkudur. (3)'te verilen  $M_2$  ise amortisörlerdeki rulmanlarda oluşan viskoz sürtünme ile shimmy sönümleyicinin oluşturduğu torktan kaynaklanan sönümlenme torkudur.

$$M_1 = k\psi \quad (2)$$

$$M_2 = c\dot{\psi} \quad (3)$$

(4) denkleminde verilen  $M_3$  tekerleğin yanal deformasyonundan dolayı oluşan momenti,  $M_4$  tekerlek dış genişliğinden kaynaklanan sönümlenme momenti sembolize etmektedir.  $M_3$  momenti, öz hizalama momenti  $M_z$  ile viraj alma kuvveti  $F_y$  'nin efektif kaster uzunluğu  $e_{eff}$  ile çapımından oluşmaktadır.

$$M_3 = M_z - e_{eff}F_y \quad (4)$$

İniş takımına ait efektif kaster uzunluğu  $e_{eff}$  (5) denklemindeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$e_{eff} = e \cos(\varphi) + \tan(\varphi)(R + e \sin(\varphi)) \quad (5)$$

(5) denkleminde  $\varphi$  dönme tübünün eğim açısını,  $R$  ise burun iniş takımı tekerleğinin çapını göstermektedir.

Viraj alma kuvveti  $F_y$  ve öz hizalama momenti  $M_z$  dikey kuvvet  $F_z$ 'ye ve kayma açısı  $\alpha$ 'ya bağlıdır.

Verilen tekerlek karakteristiği fırça tipi tekerlek modeliyle ifade edilebilmektedir [24]. Ancak bu yaklaşımın yerine nispeten daha uygulanabilir olan bir konsept tercih edilmiştir [9].  $F_y$  ve  $M_z$  sırasıyla (6) ve (7) parçalı fonksiyonlarıyla gösterilmiştir.

$$F_y = \begin{cases} c_{F\alpha} \alpha F_z, & \alpha \leq \delta \\ c_{F\alpha} \delta_g F_z \text{sign}(\alpha), & \alpha \geq \delta \end{cases} \quad (6)$$

$$M_z/F_z = \begin{cases} c_{M\alpha} \frac{\alpha_g}{180} \sin\left(\frac{180}{\alpha_g} \alpha\right), & |\alpha| \leq \alpha_g \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_g \end{cases} \quad (7)$$

Tekerlek momentinin limit açısı  $\delta_g = 5^\circ$  ve tekerlek kuvvetinin limit açısı  $\alpha_g = 10^\circ$  dir.

$M_4$  sönümlenme momenti, hız ve yalpalama açısının türevine bağlı olarak (8)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$M_4 = \frac{\kappa}{V} \cos(\varphi) \dot{\psi} \quad (8)$$

Dış genişliği momenti katsayısı  $\kappa$ , aşağıdaki şekilde elde edilebilmektedir.

$$\kappa = -0.15a^2 c_{F\alpha} F_z \quad (9)$$

(1) denklemindeki diğer moment  $M_5$  ise bozucu ve kontrol girişlerinden kaynaklanan bir etki olarak tanımlanmaktadır.

### 2.1. Tekerlek Modeli

Tekerlek modeli oluşturulurken Von Schlippe tarafından ortaya konulan gergin ip yaklaşımı kullanılmıştır. Yaklaşımın doğruluğunu arttırmak adına tekerlek hafızası etkisi modele entegre edilmiştir. Bunun yanı sıra, modelleme esnasında uçak tekerleklerini baz alan hibrid bir modelleme tekniği kullanılmış ve burun iniş takımı davranışı yansıtılmaya çalışılmıştır.

#### 2.1.1. Von Schlippe Tekerlek Modeli

Von Schlippe'nin yaklaşımına göre tekerleğin yatay sapması gergin bir ip gibi modellenebilmektedir [10]. Bu yaklaşıma ait şematik Şekil 5'te verilmiştir.



$$a = 1.7R_0 \sqrt{\frac{\delta}{2R_0} - \left(\frac{\delta}{2R_0}\right)^2} \quad (14)$$

Tekerlek geri yükleme katsayısı ise (15)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$c_{F\alpha} = \begin{cases} c_t(1.2c_\delta - 8.8c_\delta^2), & c_\delta \leq 0.0875 \\ c_t(0.0674c_\delta - 0.34c_\delta^2), & c_\delta > 0.0875 \end{cases} \quad (15)$$

(15) denkleminde,

$$c_t = c_{tire} w_t^2 \frac{(p + 0.44p_r)}{F_z} \quad (16)$$

$$c_\delta = \frac{\delta}{R_0}$$

(15)'te  $w_t$  tekerlek genişliği,  $p$  tekerlek basıncı ve  $p_r$  nominal tekerlek basıncını temsil etmektedir. Geri yükleme gücü katsayısı  $c_{tire}$  ise tekerlek tipine göre değişmektedir. Bu katsayının değeri farklı tip lastikler için Tablo 1'de sunulmuştur [27].

Tablo 1: Tekerlek tipine göre  $c_{tire}$  katsayısı.

Lastik Tipi	$c_{tire}$	
	N, Kuvvet/radyan	N, Kuvvet/derece
I	63	1.1
III	69	1.2
VII	57	1

Gevşeme uzunluğu ve öz hizalama katsayısının hesaplanmasında yine Smiley ve Horne'a ait çalışmada kullanılan bir yaklaşım dikkate alınmıştır.  $c_{M\alpha}$  katsayısı pnömatik iz ile  $c_{F\alpha}$ 'nın çarpımına eşittir. Yazarlar, pnömatik izin küçük sapma açıları için  $0.8a$ 'ya eşit olduğunu ortaya koymuştur. Belirtilen yaklaşım, *stretched string* model sunduğu  $0.77a$  pnömatik iz değeri ve bu değere karşılık gelen gevşeme uzunluğu aşağıdaki gibidir [1].

$$\sigma = 3a \quad (17)$$

## 2.2. Burulma Toleransı Etkisi

Bu çalışmada kullanılan tolerans modeli [28-31]'te sunulan çalışmalara dayanmaktadır.

Bu çalışmada, tolerans etkisi doğrusal olmayan bir yay olarak modellenmiştir, burada bir kuvvet oluşmadan önce bir miktar sapma mümkündür ve genlik tolerans bandı içinde kalırsa yay kuvveti sıfırdır [1].

Nonlineer tolerans etkisi doğrusal olmaması, yapısal rijitliğin sürekli ve parçalı bir forma dönüşmesine sebep olmaktadır. Buna göre yay torku aşağıdaki gibi tekrar yazılmıştır. Burada  $\psi_{free}$  burulma toleransı açısıdır.

$$M(\psi) = \begin{cases} k(\psi - \psi_{free}), & \psi > \psi_{free} \\ 0, & -\psi_{fp} \leq \psi \leq \psi_{free} \\ k(\psi + \psi_{free}), & \psi < -\psi_{fp} \end{cases} \quad (18)$$

Ardından, iniş takımı shimmy modeline hareket denklemlerine burulma toleransı etkisi entegre edilmiştir. Burada, burulma toleransının  $0^\circ$ - $2^\circ$  arasında olduğu

varsayılmıştır. (1) denkleminde  $M_1$  yerine, (18) denklemindeki  $M(\psi)$  yazılarak model tekrar oluşturulmuştur.

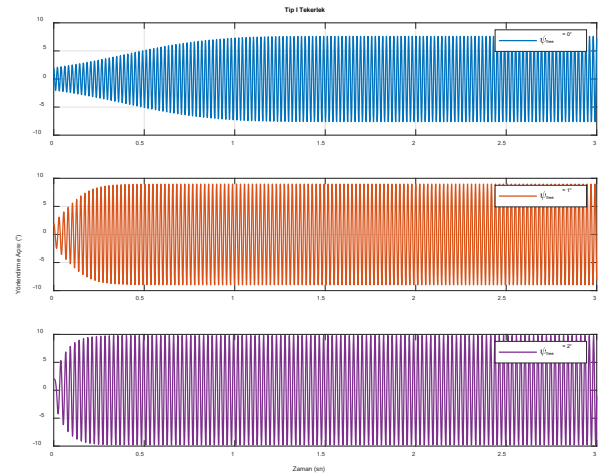
## 3. Simülasyonlar

Bu bölümde yapılan simülasyon çalışmaları sunulmuştur. Tablo 2'de simülasyonlar sırasında kullanılan iniş takımı parametreleri verilmiştir.

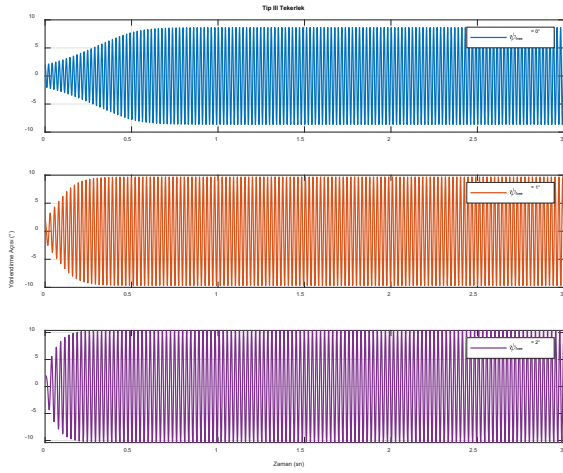
Tablo 2. Burun iniş takımı parametreleri.

Parametreler ve değerleri			
	Tanım	Değer	Birim
<b>Yapısal parametreler</b>			
$e$	Kaster uzunluğu	0.1	m
$c$	Dikmenin dönel yay katsayısı	-100000	N m rad <sup>-1</sup>
$k$	Dikmenin dönel sönümleme katsayısı	-25	N m s rad <sup>-1</sup>
$I_z$	Dikmenin atalet momenti	1	kg m <sup>2</sup>
$\varphi$	Eğim açısı	10	°
<b>Tekerlek parametreleri</b>			
$R$	Tekerlek yarıçapı	8.55	inç
$\delta_g$	Geri yükleme kuvvet açısı sınırı	5	°
$\alpha_g$	Öz hizalama momenti açısı sınırı	10	°
$R_0$	Yüklenmemiş tekerlek yarıçapı	7.5	inç
$\delta$	Tekerlek sapması	20	mm
$w_t$	Tekerlek genişliği	6	inç
$p$	Tekerlek basıncı	250	psi
$p_r$	Nominal tekerlek basıncı	200	psi
<b>Süreç parametreleri</b>			
$F_z$	NLG'deki dikey yük	9000	N
$V$	İleri yöndeki hız	90	m/s

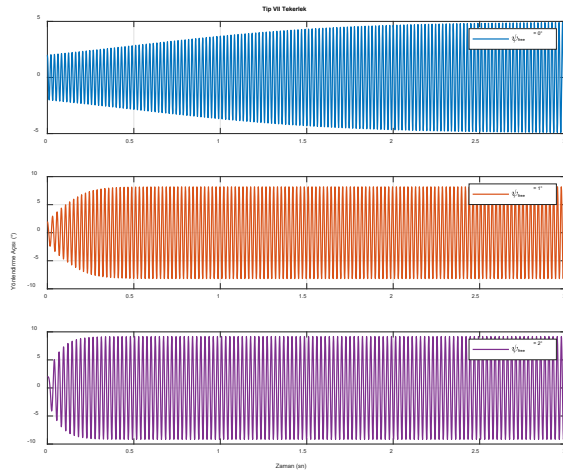
Sırasıyla I, III ve VII tekerlek tipleri için farklı burulma toleransı değerleri test edilmiştir. Burulma tolerans değerleri  $0^\circ$ ,  $1^\circ$  ve  $2^\circ$  olarak alınmıştır.



Şekil 4. Tip I tekerlek için yönlendirme açısı.



Şekil 5. Tip III tekerlek için yönlendirme açısı.



Şekil 6. Tip VII tekerlek için yönlendirme açısı.

Tekerlek tipleri dikkate alındığında Tip VII'nin titreşim sönümleme performansının daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Tip VII'nin uçak tipi göze alındıktan sonra seçilmesi daha uygun gözükmektedir.

Bununla birlikte burulma toleransının artması beklendiği gibi shimmy genliğini arttırmıştır. İniş takımlarında bakım çalışmalarının önemi bu analizle ortaya çıkmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iniş takımlarında görülen shimmy davranışına gelişmiş bir model ortaya konulmuştur. Tekerlek davranışının doğruluğunu arttırmak ve hava araçlarıyla ilgili bir yaklaşım sunmak amacıyla deneye dayalı formüller kullanılmıştır. Ayrıca, burulma toleransı etkisi de modele aktarılmıştır. Modelleme süreci tamamlandıktan sonra, geliştirilmiş burun iniş takımı shimmy modeli farklı koşullar altında etkileri simüle edilmiştir. Simülasyonlar hakkında yorumlar paylaşılmıştır.

Gelecek çalışma olarak sunulan model lineerize edilmesi hedeflenmektedir.

#### Kaynakça

- [1] I. J. M. Besselink, Shimmy of Aircraft Main Landing Gears. 2000.
- [2] C. Bouncier de Carbon, "Analytical Study of Shimmy of Airplane Wheels," NACA, no. 1, 1952.
- [3] Moreland, "The Story of Shimmy," J. Aeronaut. Sci., vol. 21, no. 12, pp. 793–808, 2012.
- [4] Maas, J. W. L. H, A comparison of dynamic tyre models for vehicle shimmy stability analysis. (Master Tezi). Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven, 2009.
- [5] I. J. M. Besselink, Shimmy of Aircraft Main Landing Gears. 2000.
- [6] H. B. Pacejka, "Theory of the wheel shimmy phenomenon," in Tyre and Vehicle Dynamics, 2007, pp. 295–338.
- [7] C. Howcroft, B. Krauskopf, M. Lowenberg, S. Neild, and B. Krauskopf, "Effects of Freeplay on Aircraft Main Landing Gear Stability," 2012.
- [8] S. Li and Y. Lin, "Study on the bifurcation character of steering wheel self-excited shimmy of motor vehicle," Veh. Syst. Dyn., vol. 44, no. SUPPL. 1, pp. 115–128, 2006.
- [9] G. Somieski, "Shimmy Analysis of a Simple Aircraft Nose Landing Gear Model Using Different Mathematical Methods," Aerosp. Sci. Technol., vol. 1, no. 8, pp. 545–555, 1997.
- [10] B. Von Schlippe and R. Dietrich, "Das Flattern eines bepanzten Rades," 1941.
- [11] H. B. Pajeka, "The Wheel Shimmy Phenomenon," Delft University of Technology, 1966.
- [12] H. K. Brewer and L. C. Rogers, "Synthesis of tire equations for use in shimmy and other dynamic studies," J. Aircr., vol. 8, no. 9, pp. 689–697, Sep. 1971.
- [13] R. F. Smiley, "Correlation, Evaluation, and Extension of Linearized Theories for Tire Motion and Wheel Shimmy," Jan. 1956.
- [14] D. Takács, G. Orosz, and G. Stépán, "Delay effects in shimmy dynamics of wheels with stretched string-like tyres," Eur. J. Mech. A/Solids, vol. 28, no. 3, pp. 516–525, 2009.
- [15] D. Takács and G. Stépán, "Experiments on Quasiperiodic Wheel Shimmy," J. Comput. Nonlinear Dyn., vol. 4, no. 3, p. 031007, 2009.
- [16] S. Ran, I. J. M. Besselink, and H. Nijmeijer, "Application of nonlinear tyre models to analyse shimmy," in Vehicle System Dynamics, 2014, vol. 52, no. SUPPL. 1, pp. 387–404.
- [17] Koçak, S. Burun iniş takımlarında shimmy davranışının modellenmesi, analizi, testi ve kontrolü. (Master Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, İstanbul, 2021.
- [18] Von Schlippe, B. ve Dietrich, R. Das Flattern eines bepanzten Rades (NACA Report TM 1365). Stuttgart: NACA Technical Memorandums, 1941.
- [19] Howcroft, C., Krauskopf, B., Lowenberg, M., Neild, S., & Krauskopf, B. Effects of freeplay on aircraft main landing gear stability, AIAA Atmospheric Flight Mechanics

Conference, Minneapolis, Minnesota: August 13-16, 2012.

- [20] Howcroft, C., Lowenberg, M., Neild, S., Krauskopf, B., & Coetzee, E. Shimmy of an aircraft main landing gear with geometric coupling and mechanical freeplay, *J. Comput. Nonlinear Dyn.*, 10(5), 1-18, 2015.
- [21] Atabay E. & Ozkol, I. Application of a magnetorheological damper modeled using the current-dependent Bouc-Wen model for shimmy suppression in a torsional nose landing gear with and without freeplay, *JVC/Journal Vib. Control*, 20(11), 1622-1644, 2014
- [22] Orlando, C. & Alaimo, A. A robust active control system for shimmy damping in the presence of free play and uncertainties, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 84(A), 551-569, 2017.
- [23] H. Tourajizadeh and S. Zare, "Robust and optimal control of shimmy vibration in aircraft nose landing gear," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 50, pp. 1–14, 2016.
- [24] H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [25] S. Ran, I. J. M. Besselink, and H. Nijmeijer, "Energy analysis of the von Schlippe tyre model with application to shimmy," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 53, no. 12, pp. 1795–1810, 2015.
- [26] D. Takacs and G. Stepan, "Dynamics of Towed Wheels: Nonlinear Theory and Experiments," Budapest University of Technology and Economics, Department of Applied Mechanics, 2010.
- [27] Smiley, R. F. & Horne, W. B. Mechanical properties of pneumatic tires with special reference to modern aircraft tires (NACA Report TN 4110). Washington: NACA Technical Reports, 1958.
- [28] Atabay E (2012) Dynamics of a landing gear mechanism. Dissertation, Istanbul Technical University.
- [29] Atabay E and Ozkol I (2012b) On dynamics of a landing gear mechanism with torsional freeplay. *Global Journal of Researches in Engineering, Aerospace Engineering* 12(1): 35–49.
- [30] Sura NK and Suryanarayan S (2007b) Lateral response of nonlinear nose–wheel landing gear models with torsional freeplay. *Journal of Aircraft* 44(6): 1991–1997.
- [31] Dimitrijevic Z, Mortchelewicz GD and Poirion F (2000) Nonlinear dynamics of a two dimensional airfoil with freeplay in an inviscid compressible flow. *Aerospace Science and Technology* 4: 125–133.