

## Otonom Taşıtlar İçin Hiposikloid Direksiyon Dişli Kutusu Tasarımı ve Prototip İmalatı

\*<sup>1</sup>Erkan Öztürk, <sup>2</sup>Selim Köroğlu, <sup>1</sup>Özer Can, <sup>1</sup>Ramazan Furkan Güler, <sup>1</sup>Fatma Merve Bıyıklı, <sup>1</sup>Murat Eren Balkan, <sup>3</sup>Buse Belli ve <sup>2</sup>Akif Demirçalı  
<sup>1</sup>Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Denizli, TÜRKİYE  
<sup>2</sup>Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, TÜRKİYE  
<sup>3</sup>Nesan Otomotiv, İzmir, TÜRKİYE

### Özet:

Otonom taşıtlar üzerine yapılan çalışmalardaki artışın neticesinde, taşıt üzerindeki mevcut sistemlerde değişimlere gidilmektedir. Günümüzde otomobillerde genel olarak kullanılan direksiyon dişli kutuları kremayer tipinde olup, bunların tahrikinde düşük hız ve yüksek momente sahip elektrik motorlarının kullanılması gereksinimi dişli kutularında yeni yaklaşımların ele alınmasını gerekli kılmıştır. Bu çalışmada düşük moment ve yüksek devirli bir elektrik motor ile tahrik için uygun redüksiyon oranına sahip olan, literatürde kullanımına rastlanmamış bir direksiyon dişli kutusu tasarlanmıştır. Hiposikloid dişli sistemlerinin hem istenilen redüksiyon oranının sağlanmasında hem de tekerlek dönüş açılarının hassasiyetinde büyük bir avantaja sahip olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Otonom, Hiposikloid, Direksiyon, Dişli kutusu, Dönüş açısı

## Design and Prototype of Hypocycloid Steering Gearbox for Autonomous Vehicles

### Abstract:

As a result of the increase in studies on autonomous vehicles, changes are being made in existing systems on the vehicle. Nowadays the steering gear boxes used in automobiles are the rack and pinion type and the need to use electric motors with low speed and high momentum in their drive has necessitated dealing with new approaches in gearboxes. In this study, a steering gearbox had a suitable reduction ratio for drive with low torque and high speed an electric motor with has been designed which has not been used in the literature. It has been found that the hypocycloid gear systems have a great advantage both in achieving the desired reduction ratio and in the precision of the wheel turning angles.

**Key words:** Autonomous, Hypocycloid, Steering system, Gearbox, Steering angle

### 1. Giriş

Maksimum yakıt ekonomisi, konfor, dönüş kararlılığı, güvenlik gibi etkenler taşıtın kapsamlı performansına etkisi oldukça yüksektir [1,2]. Taşıtın yönlendirilmesi esnasında oluşan yanıl kuvvetlerin gereğinden fazla artışı yakıt ekonomisinin yanı sıra taşıtın konfor ve kararlılığına da olumsuz etkileri vardır. Ayrıca taşıt ile sürücü arasında bağlantı sağlayan direksiyon sisteminin güvenlik açısından da yeterli düzeyde olması istenir [3]. Özellikle denemeleri elektrikli taşıtlar üzerinde gerçekleştirilen otonom sistemlerdeki enerji tüketiminin azaltılması, taşıtın menzil ve performansı üzerinde olumlu etkileri olacaktır.

Dört tekerlekli bir taşıtın tek akstan yönlendirilmesi esnasında iç ve dış teker dönüş açılarının birbirinden farklı olma gereksinimi, direksiyon sisteminin boyutlandırmasında hassas

\*Corresponding author: Address: Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering Pamukkale University, 20160, Denizli TURKEY. E-mail address: erkanozturk@pau.edu.tr, Phone: +902582964140

optimizasyonları gerektirmektedir. Bununla birlikte, Ackermann prensibi direksiyon sistemleri için teorikte yeterli tekerlek açılarını sağlasa da pratikte bu durum yeterince gerçekleştirilememektedir [1,4]. Sistem parçalarının düzlemsel hareketle kısıtlanamaması, kullanılan dişli kutularının dört-kol mekanizmasına elverişsizliği, ön düzen sistemindeki yetersizlikler bu duruma sebep olan bazı etkenlerdir [5].

Kremayer dişli kutuları özellikle otomobillerde yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu tip dişli kutuları sabit redüksiyon oranı ile iletim sağlarlar [6]. Aracın kullanım şartlarına bağlı olarak redüksiyon oranının değişimi önemli bir unsurdur. Şehir içi kullanım ve park etme süreçlerindeki düşük taşıt hızlarında büyük teker dönüş açlarına ve yüksek hızlarda nispeten düşük teker dönüş açlarına olan ihtiyaç bu tip sistemlerle tam olarak karşılanamamaktadır [5]. Bu eksiklik sürücüyü aşırı yük getirebileceği gibi otonom sistemlerde daha fazla enerji tüketimine sebebiyet verecektir.

De-Juan vd. [7] farklı direksiyon kombinasyonlarını incelemiş ve optimum dönüş açılarını yönlendirme merkezinin simetri merkezinde olması ile elde etmiştir. Benzer bir çalışmada ise sistemin kremayer dişli kutusunun hassas bir boyutlandırma ve konumlandırma gereksinimi olduğu vurgulanmıştır [8].

Dönüş eforunun azaltılması ve daha hızlı dönüş kabiliyeti amacıyla değişken redüksiyon oranlı bir sistem tasarımının gerçekleştirildiği bir çalışmada dişliler arası eksantrikliğin yüksek olması gerektiği vurgulanmıştır [9]. Planet dişli setinin kullanıldığı aktif direksiyon sistemi üzerine yapılan bir çalışmada, kontrol ve hakimiyet kararlılığının yanı sıra yol hissi ile dönüş kararlılığında gelişme elde edilmiştir [10].

Yapılan çalışmalar genel olarak kremayer tipi direksiyon dişli kutularının konum ve boyutlandırmasının oldukça hassas yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sürüş konforu ve kararlılığı açısından, dişli kutusunda tekerlek dönüş açısına bağlı olarak redüksiyon oranının değiştirilebilmesinin önemine vurgu yapmaktadırlar. Bu çalışma, kullanılan ve özgün tasarıma sahip hiposikloid dişli sisteminin bu problemlerin çözümüne olanak sağlanması ve enerji verimliliği açısından otonom sistemlerde kullanılabilirliği açısından yeterliliğinin belirlenmesini içermektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Tasarlanıp prototip imalatı gerçekleştirilen direksiyon sisteminin Şekil 1’de görülen ALATAY elektrikli otonom taşıtı üzerinde denenecektir. Direksiyon sisteminin boyutlandırılması ve yerleşimi taşıt aks genişliği ile akslar arası mesafeye göre düzenlenmiş ve Ackermann açıları dikkate alınmıştır. Tasarım parametreleri düzlemsel olarak belirlenmiş, taşıtın askı sistemindeki dikey hareketler ihmal edilmiştir. Sistem boyutları ve konumlandırma CATIA ve MATLAB programları kullanılarak optimize edilmiştir. Otonom bir taşıtta kullanılması planlanan bu sistemde hiposikloid dişli sisteminin önüne redüksiyon artırımı için planet dişli seti gereksinimi olmuştur. Belirlenen boyutlar ile kullanılacak olan tahrik motorunun parametrelerine göre 5 redüksiyon oranında bir planet dişli setinin kullanılması uygun görülmüştür. Bu redüksiyon oranına göre yörünge, güneş ve planet dişlileri için diş sayıları sırasıyla 96, 24 ve 36 olarak

belirlenmiştir. Belirlenen değerlere göre tasarımlar SOLIDWORKS programında gerçekleştirilmiş ve 3 boyutlu yazıcı üzerinden prototip ürün elde edilmiştir. Prototip ürün tasarımı Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. ALATAY elektrikli otonom aracı



Şekil 2. Tasarlanan direksiyon dişli kutusu montajı

Tablo 1’de araç ve direksiyon sistemi parçalarının ana boyutları verilmiştir. Bu boyutlara göre direksiyon sisteminin tam turu sonucu 9 m çaplı bir virajı alabilme kabiliyeti vardır. Şekil 3’te olgunun daha iyi anlaşılabilmesi için 1/3 çap oranına sahip hiposikloid dişli mekanizması ve tanımlamaları görülmektedir. P noktasının X ve Y koordinatında yer değişim miktarları sırasıyla Eş. 1 ve 2’de görülen formüllerle belirlenmiştir [11]. Burada  $\theta$  taşıyıcının dönüş açısını,  $r_b$  planet dişli yarıçapını ve  $r_a$  yörünge dişli çapını ifade etmektedir. Bu çalışmada kullanılan yörünge ve planet dişlileri 2 çap oranına sahiptir. Bu nedenle P noktası sadece X ekseninde gezinecektir.

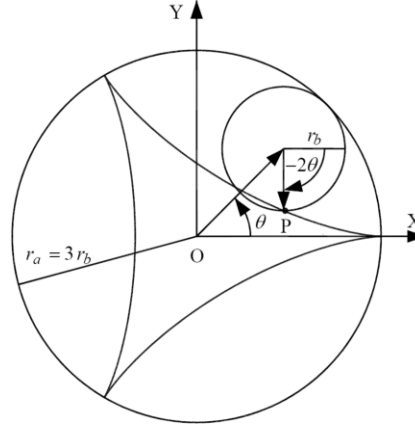
$$X = (r_a - r_b)\cos(\theta) + r_b\cos\left(\frac{r_a - r_b}{r_b}\theta\right) \quad (1)$$

$$Y = (r_a - r_b)\sin(\theta) - r_b\sin\left(\frac{r_a - r_b}{r_b}\theta\right) \quad (2)$$

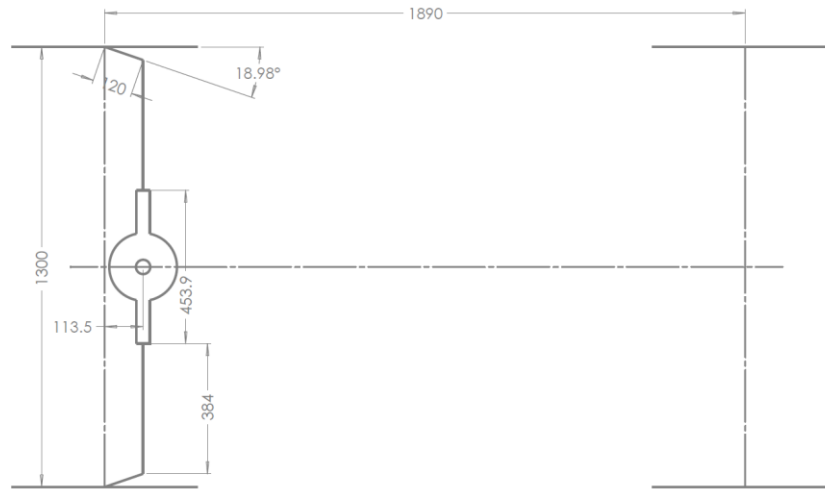
Şekil 4'te Ackermann prensibine göre belirlenen deveboynu açısı ile boyutlandırmalar mevcuttur. Bu değerlere göre direksiyon kutusunun Y eksenine göre simetrik yerleştirilmesi en ideal yaklaşımı vermiştir.

**Tablo 1.** Araç ve direksiyon sistemine ait ana boyutlandırmalar

Araç	Birim	Değer
Aks genişliği	mm	1300
Akslar arası mesafe	mm	1890
Teker çapı	mm	550
Direksiyon sistemi		Değer
Deveboynu uzunluğu	mm	120
Ackermann açısı	°	18.98
Rot kolu uzunluğu	mm	384
Ara kol uzunluğu	mm	453.9
Ön aks eksenine mesafe	mm	113.5



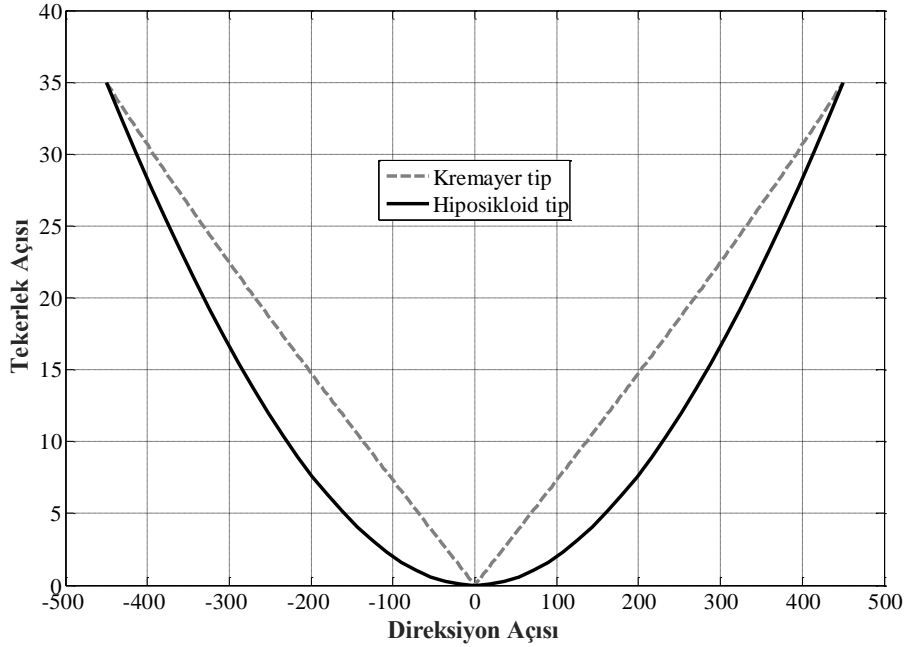
**Şekil 3.** Hiposikloid dişli sistemi ve tanımlamalar



**Şekil 4.** Ackermann prensibine göre belirlenen boyutlar

### 3. Bulgular ve Tartışma

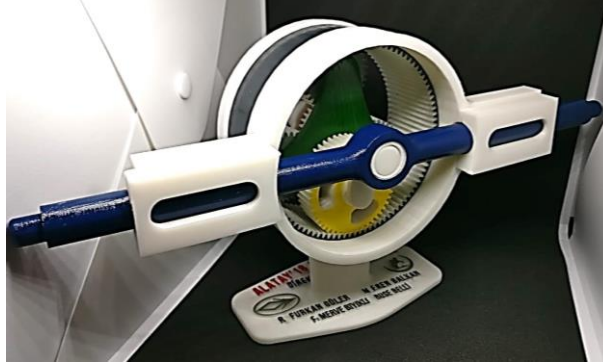
Direksiyon dişli kutusu tasarımı sürecinde kremayer ve hiposikloid dişli kutusunun tekerleği döndürme açıları karşılaştırılarak kıyaslama yapılmıştır. Şekil 5'te direksiyon açısına bağlı olarak tekerlek açılarının karşılaştırmalı bir grafiği verilmiştir. Planet dişli seti 5 redüksiyon oranına sahiptir. Hiposikloid dişli redüksiyonu 1/2 olduğundan dolayı toplam redüksiyon oranı 5/2 dir. Direksiyon açısının 0 değeri tekerlerin düz konumunun temsil etmektedir. Toplam redüksiyonun 1/2 si sağa diğer kısmı ise sola dönüş için kullanılmıştır. Bu nedenle her iki yönde 450°'lik açılarda (direksiyon giriş mili için 1.25 tur) dönüş için tekerlek açısı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Kremayer ve hiposikloid dişli kutularında tekerlek açılarının karşılaştırılması

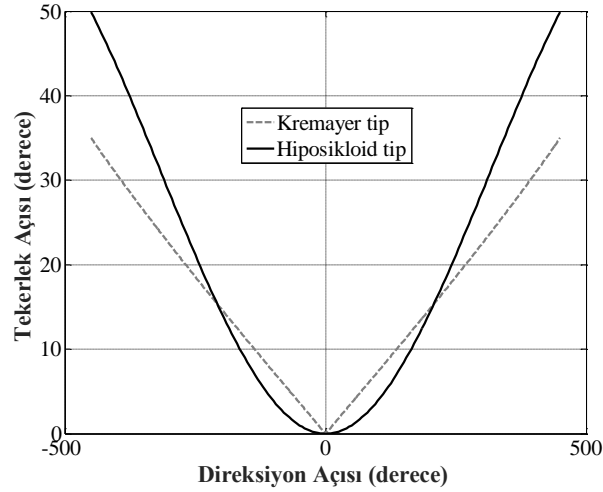
Şekil 5'ten de görülebileceği gibi kremayer dişli kutusunda lineer bir tekerlek açısı artışı vardır. Bu çalışmada tasarlanan hiposikloid dişli sistemine sahip direksiyon kutusu ise küçük direksiyon açısı sapmalarında kremayer tipe göre daha düşük tekerlek açıları vermektedir. Direksiyon açısının 100° olduğu durumda kremayer dişli kutusu ile 7.381° tekerlek açısı elde edilirken, hiposikloid dişli sistemi ile bu açı 2.1° olmuştur ve %72 oranında bir fark söz konusudur. Hiposikloid tip direksiyon kutusu ile aynı tekerlek açısı 195° direksiyon açısında elde edilmiştir. Son 50° direksiyon açısı içerisinde ise hiposikloid tip sistem daha hızlı yönelmeye sahiptir. Kremayer tp direksiyon kutusu ile 50°'lik direksiyon açısında tekerlek açısı 4,38° değişim gösterirken, hiposikloid tipte bu değişim 6.85° düzeyine çıkmıştır. Bu durum Cho [5] tarafından da belirtildiği gibi yüksek hızlarda taşıt kontrol hassasiyetini artıracak gibi düşük hızlarda ise yeterli manevra kabiliyetine olanak sağlayacaktır. Tekerleklerdeki toplam dönüş açıları ise bir değişme

görülmektedir. Şekil 6’da bu sonuçlar doğrultusunda üretimi yapılan dişli kutusu prototipi görülmektedir.



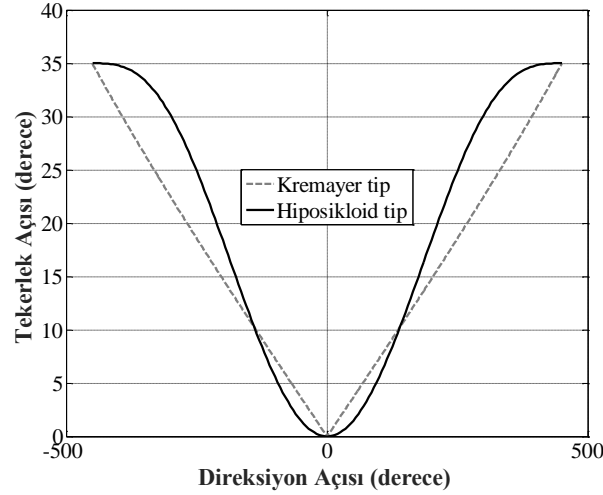
Şekil 6. Hiposikloid dişli kutusu prototipi

Yörünge ve planet dişli yarıçaplarının belirli oranlar içerisinde değiştirilmesi ile çeşitli kombinasyonlar elde edilebilmektedir. Bununla birlikte redüksiyon oranının 2’den farklı bir değerde kullanılması durumunda ara kol bağlantısı düz bir hat çizemeyeceği için direksiyon sisteminde dört kol mekanizması kullanılma gereksinimi oluşmuştur. Ara kol bağlantı ekseninin başlangıç konumu sabit kalmak koşulu ile, iki farklı dişli çap oranında (3 ve 4) elde edilen sonuçların karşılaştırılması sırasıyla Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Dişli çap oranları 3 olan hiposikloid sistem ile kremayerin karşılaştırması

Şekil 7’den görülebileceği gibi yörünge ve planet dişlileri arasında çap oranının 3 olarak ayarlanması durumunda hem düşük direksiyon açısı sapmalarında daha hassas tekerlek açıları elde edilebilmekte hem de yüksek direksiyon açıları için daha fazla teker dönüşü sağlanabilmektedir. Şekil 8’de ise bu oran 4 olarak ele alınmıştır. Toplam teker dönüş açısı çap oranları hem çap oranları 2 olan hiposikloid hem de kremayer tip dişli kutuları ile aynı değerde kalmış, bununla birlikte 140° direksiyon açısından sonra kremayere göre daha yüksek teker açısına ulaşmıştır.



Şekil 8. Dişli çap oranları 4 olan hipsikloid sistem ile kramayerin karşılaştırması

## Sonuçlar

Bu çalışma, otomobillerde yaygın olarak kullanılan kramayer tip direksiyon dişli kutusunda görülen yönelme eksikliklerinin giderilmesi amacıyla tasarlanan ve prototipi imal edilen bir dişli kutusu sistemin analizini içermektedir. Bu dişli kutusu Pamukkale Üniversitesi ATAY takımı tarafından üretilen elektrikli ve otonom özelliği olan ALATAY aracında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Literatürde bir örneğine rastlanmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre; yörünge ve planet dişlileri arasındaki çap oranı 2 olduğunda küçük direksiyon açıları için daha hassas tekerlek açısının sağlanması olanaklı kılınmıştır. Bu çalışma için toplam 5 redüksiyon oranı yeterli görülmüştür. Farklı dişli çap oranları ile aracın manevra kabiliyetinin direksiyon açısına bağlı olarak şekillendirilebileceği belirlenmiştir. Direksiyon sisteminin konumu, ve diğer sistem parçalarının boyutlarındaki değişimlerin etkilerinin araştırılması ve yönelme açlarına bağlı olarak optimum parametrelerin belirlenmesi gerekli olduğu ortaya çıkmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 2018KRM004 numaralı proje kapsamında yapılmıştır. Yazarlar Pamukkale Üniversitesine desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirlir.

## Referanslar

- [1] N.W. Troupe, "Optimization of Steering Geometry For Ultra - High - Mileage Vehicles", Pennsylvania State University, (2011).
- [2] L. Li, C. Zhang, Z. Wang, M. Liu, J. Shi, Motion simulation and optimization design of double-front axle steering system based on ADAMS, IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc. (2014) 1–5. doi:10.1109/ITEC-AP.2014.6940642.
- [3] S. Biswas, Design of steering system through optimization of TCD and steering effort, Proc. Int. Conf. Front. Automob. Mech. Eng. - 2010, FAME-2010. (2010) 356–362. doi:10.1109/FAME.2010.5714859.

- [4] J.P.K. Knapczyk, Simplified planar model of a car steering system with rack and pinion and McPherson suspension, *Sci. Conf. Automot. Veh. Combust. Engines, KONMOT 2016*.
- [5] Y.G. CHO, Vehicle Steering Returnability with maximum Steering Wheel Angle At low Speeds, *Int. J. Automot. Technol.* 10-4 (2009) 431–439.
- [6] Y. Shimizu, T. Kawai, J. Yuzuriha, Improvement in Driver-Vehicle System Performance by Varying Steering Gain with Vehicle Speed and Steering Angle: VGS (Variable Gear-Ratio Steering System), *SAE Tech. Pap.* 108 (1999) 630–639. doi:10.4271/1999-01-0395.
- [7] A. De-Juan, R. Sancibrian, F. Viadero, Optimal synthesis of function generation in steering linkages, *Int. J. Automot. Technol.* 13-7 (2012) 1033–1046.
- [8] A. Rahmani Hanzaki, P.V.M. Rao, S.K. Saha, Kinematic and sensitivity analysis and optimization of planar rack-and-pinion steering linkages, *Mech. Mach. Theory.* 44 (2009) 42–56. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2008.02.014.
- [9] P. Alexandru, D. MacAveiu, C. Alexandru, A gear with translational wheel for a variable transmission ratio and applications to steering box, *Mech. Mach. Theory.* 52 (2012) 267–276. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2012.02.005.
- [10] W. Zhao, H. Zhang, Y. Li, Displacement and force coupling control design for automotive active front steering system, *Mech. Syst. Signal Process.* 106 (2018) 76–93. doi:10.1016/j.ymssp.2017.12.037.
- [11] M. Hsu, Planetary Hypocycloid ( Epicycloid ) Mechanisms Design, *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 38:4 (2008) 19–21.