



Elliptical Gear Design, Manufacturing, Analysis and Elliptical Gear Based Industrial Applications

İbrahim PAZARKAYA^{1*} Mehmet YAZAR² Ahmet ÖZDEMİR³

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 03200, AFYONKARAHİSAR

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 17020, ÇANAKKALE

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

Elliptical gears are a specific type of gear used in situations where tooth profiles are arranged with equal steps on an ellipse and the driven shaft speed is desired to be changed within the same turn. The studies that covered elliptical gears focused on the design of tooth profiles, and the research increased on prototype manufacturing of elliptical gears. The elliptical gear tooth profile is developed based on the fact that the tooth profiles of elliptical gears are not identical to cylindrical gears and are obtained by shaping tooth flanks with involute curves by the rolling method on the section ellipse with a rack or cylindrical spur gear cutter. It has been determined that the use of CNC electrical discharge machining (EDM) in the manufacture of elliptical gears has preferably become the manufacturability of elliptical gears in standard modules by developing electronic gearboxes for hobbing machines. Elliptical gear pairs are used in different machines, mechanisms and equipment, especially flow meters, and pumps with elliptical gear pairs are widespread. In today's world, where energy efficiency is of utmost importance, it is necessary to measure the flow rates of high volumes of fluids accurately and precisely, as well as to eliminate the losses in fluid transfer. In this compilation study, the design of elliptical gears, traditional and non-traditional manufacturing methods, strength and vibration analyzes, and various industrial applications in the literature were evaluated, and the common result of the literary works was obtained. It is predicted that elliptical gears will be an indispensable part of many smart products that contain mechanical parts soon.

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 14.04.2022
Düzeltilme: 22.06.2022
Kabul: 28.07.2022

Anahtar Kelimeler

Eliptik dişli
Debimetre
Hidrolik pompa
CNC tel erozyon
Azdırma tezgâhi.

Keywords

Elliptical gear
Flow meter
Hydraulic pump
CNC electrical discharge
machine
Hobbing machine.

Eliptik Dişli Tasarımı, İmalatı, Analizi ve Eliptik Dişli Esaslı Endüstriyel Uygulamalar

Öz

Eliptik dişliler, bir elips üzerine eşit adımlarla diş profillerinin dizildiği ve tahrik edilen mil hızının aynı dönüş içerisinde değiştirilmesi istenen durumlarda kullanılan özel bir dişli türüdür. Eliptik dişliler üzerine yapılan çalışmaların diş profillerinin tasarımı üzerine yoğunlaştığı ve prototip imalatlarına yönelik araştırmaların arttığı görülmektedir. Eliptik dişlilerin diş profillerinin silindirik dişliler gibi özdeş olmayacağından hareketle geliştirilen eliptik dişlinin diş profili; kramayer veya silindirik düz dişli formu kesicinin bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma yöntemine uygun olarak evolvent eğriye sahip diş yanaklarının şekillendirilmesiyle elde edilmektedir. Eliptik dişlilerin imalatında CNC tel erozyon tezgahlarından faydalanmanın yaygınlaştığı, bununla birlikte azdırma tezgâhları için elektronik dişli kutuları geliştirilerek eliptik dişlilerin standart modüle imalatının da mümkün olduğu tespit edilmiştir. Eliptik dişli çiftleri farklı makine ve teçhizatda kullanılmakta, özellikle eliptik dişli çiftine sahip debimetre ve pompaların yaygınlaştığı görülmektedir. Enerji verimliliğinin son derece önem kazandığı günümüzde, yüksek miktardaki akışkanların debilerinin doğru ve hassas ölçülmesi, aynı zamanda akışkan transferindeki kayıpların da giderilmesi de gerekmektedir. Bu derleme çalışmasında eliptik dişlilerin tasarımı, geleneksel ve geleneksel olmayan imal usulleri ile imalatı, dayanım ve titreşim analizleri ve literatürde yer alan muhtelif endüstriyel uygulamaları gözen geçirilmiş ve çalışmanın ortak bulguları elde edilmiştir. Eliptik dişlilerin yakın gelecekte bünyesinde mekanik kısım barındıran birçok akıllı ürünün vazgeçilmez bir organı olacağı öngörülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eliptik dişli, bir elips üzerine eşit adımlarla diş profillerinin dizildiği ve sabit bir hızla tahrik edilen mil hızının aynı dönüş içerisinde değiştirilmesi istenen durumlarda kullanılan özel bir dişli türüdür. Bu dişli türü otomatik makinelerde, değişken çevrim oranı istenen mekanizmalarda, tekstil ve baskı makineleri gibi bir çok endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Eliptik dişlilerin ilk örneği, İtalyan saatçi Giovanni Dondi'nin (1330 – 1388) el yazması Tractus Astarii' de Merkür ve Ay'ın hareketlerini takip eden bir saat mekanizmasında kullanılmıştır [1]. Bununla birlikte Leonardo da Vinci tarafından 17. yy' da anahtar açma tezgâhları, geneva mekanizmaları, müzik kutuları, otomatik oyun aletleri ve pompa gibi mekanik sistemlerde de yer aldığı tespit edilmiştir [2]. Ayrıca eliptik dişliler; paketleme, etiketleme, debimetre ve tekstil makinelerinde de kullanılmaktadır [3]. Düzlemsel çubuk mekanizmalarında, dairesel olmayan dişliler tarafından tahrik edilen donanımların artan doğruluk ve yüksek verimliliğe, özellikle dinamik yüklemelerde daha uygun dengeye sahip olduğu görülmektedir [4]. Eliptik dişli çarklarla ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalarda, kramayer biçimli kesici takımlarla eliptik dişlilerin diş profillerinin elde edilmesinde bilgisayar programlarından faydalanılmış, diş profilinin alttan kesimi incelenmiş, tel erozyon tezgahında imalatı yapılmış ve evolvent eğrisi ile üretilen dişliler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Eliptik dişlilerin diş profillerinin dizildiği bölüm elipsinin geometrik denklemlerinin literatürde ayrıntılı bir şekilde yer aldığı görülmüştür [5]. Evolvent yönteminde, eliptik dişlinin bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma hareketi yapan bir kesici takım ile dişlinin diş yanak profilleri oluşturulmakta ve bu yöntem için matematiksel modeller önerilmektedir [6].

Eliptik dişliler üzerine yapılan çalışmalar ülkemizde oldukça sınırlıdır. Yapılan bu derleme çalışmasında eliptik dişliler hakkında genel bilgilerin yanı sıra, literatürdeki çalışmalar hakkında bilgi verilmiş olup, araştırmacıların ilgisini eliptik dişliler üzerine çekmek ve ülkemizde eliptik dişli çiftlerine sahip katma değerli ürünlerin üretilmesine öncülük edilmesi amaçlanmıştır.

2. ELİPTİK DİŞLİLERİN TASARIMI

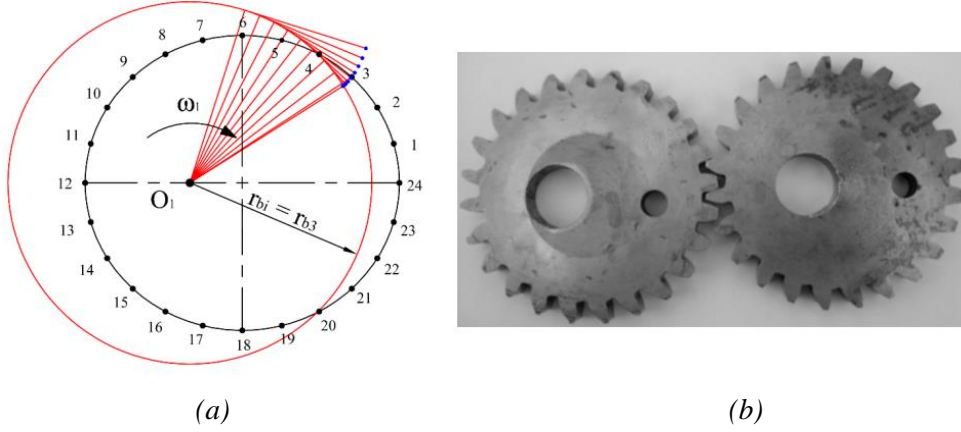
Eliptik dişliler, değişken hız oranlarına sahip hareketler için tasarlanabilmekte ve odak noktaları etrafında döndürüldüğünde düzgün bir şekilde dişler birbirini kavramaktadır. Eliptik dişlilerin adım eğrisi elips biçimli olduğundan tasarım ve imalatları zordur [7]. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrisi denklemi; sırasıyla, tahrik dişlisi adım eğrisi denklemi, merkezler arası uzaklık ve çıkış fonksiyonu olmak üzere üç veri ile belirlenmektedir [8]. Eliptik dişlilerin bir dönüşü sırasında dişli oranındaki sürekli değişim için bir adım ana hattı şekli tasarımı sunulmuş, dairesel olmayan dişlilerin bazı kinematik özellikleri gösterilmiş ve verilen parametreler için dairesel olmayan dişlilerin adım eğrilerinin tasarımının nasıl optimize edileceğini açıklanmıştır. Çalışılan dişli tertibatının kinematik özelliklerinin, silindirik düz dişliler gibi standart dairesel dişlilere nazaran farklı olduğu ortaya koyulmuştur. Dairesel olmayan dişlilerin, dairesel dişlilerin ve kam mekanizmalarının avantajlarının sentezlendiği ve sürekli değişken oran ile yüksek çıkış gücü ve mükemmel doğruluğun bir kombinasyonunu sunduğu görülmektedir [9]. Bazı çalışmalar, eliptik adım elipslerinin kinematik analizi ve bilgisayar destekli tasarımına odaklanmıştır [10]. Eliptik dişlilerin tasarım ve imalatlarında, standart modüllerin kullanılması için bölüm elipsinin çevre uzunluğunun doğru olarak hesaplanması gerekmekte ve buna yönelik farklı eşitliklerin ve revizyonlarının literatürde yer aldığı tespit edilmiştir [11]. Bölüm elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanması yaklaşık çözümler içermekte ve en yaygın karşılaşılan yaklaşık hesap Ramanujan denklemi olarak bilinmektedir [12]. Bölüm elipsinin çevre uzunluğunun hesaplanmasının bir diğer yöntemi analitik hesaplama yöntemidir. Yöntem, elipsin odak noktasından anlık yarıçapların hesaplanmasına ve eliptik eğri üzerinde oluşan noktalar arasındaki sonsuz küçüklükteki doğruların toplanması esasına dayanmaktadır. Eliptik dişlilerde bölüm elipsinin analitik olarak hesaplandığı bir çalışmada [13], analitik yöntem ile bölüm elipsinin çevre uzunluğunun, MATLAB ve CATIA V5 paket programından elde edilen çevre uzunlukları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Eliptik dişlilerin tasarımında karşılaşılan problemlerden birisi, aynı dişlinin tüm dişleri değil, aynı dişin iki yanak profilleri arasında dahi fark oluşmasıdır. Bu, karmaşık matematiksel denklemlerin dikkate alınmasını

ve çözümlemede bilgisayar destekli tasarım programlarından faydalanmayı gerektirmektedir [14]. Diş profillerinin oluşturulması ile ilgili literatürde muhtelif çalışmalar bulunmakta ve dişli modellerinin elde edilmesinde çoğunlukla kramayer veya silindirik dişli formlu kesiciler tercih edilmektedir. Bu kesicilerle bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma ve doğrusal kesme hareketi esnasında diş formları elde edilmektedir. Diş profillerinin oluşturulması amacıyla MATLAB paket programında bir algoritma geliştirilmiş ve diş profillerini elde edilmiştir [15]. Diğer bir çalışmada, merkezleri birbirine bağlı yaylar ile oluşturulan bir bölüm elipsi modeli önerilmiş, düz dişli formunda bir kesici takımla yuvarlanma yöntemine dayalı olarak eliptik dişli modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu model, eliptik dişlilerde sadece diş profilini değil aynı zamanda dişin alttan kesme unsurunu da belirlemede kullanılmıştır. Bu model esas alınarak üretilen eliptik dişlilerin yağ, fuel-oil ve su iletiminde yer alan hidromakinelerde tercih edilebileceği beyan edilmiştir [16].

Standart düz dişli diş profili dışındaki farklı tip diş profiline sahip eliptik dişlilerin diş profillerini elde etmenin bir başka yolu, farklı diş profillerine sahip kramayer kesiciyi bölüm elipsi üzerinde yuvarlama yöntemi olarak önerilmiştir. Diş profili çift dairesel yay olan helisel dişlilerin matematiksel modeli geliştirilmiş, kinematik hataları dikkate alınmış ve anlık temas elipsleri analiz edilmiştir [6]. Benzer şekilde dışbükey-içbükey diş profili temas yüzeyine sahip dairesel yaylı diş profilli eliptik dişlilerin matematiksel modeli geliştirilmiş ve bir bilgisayar programı yazılmıştır. Diş profili kramayer bir kesiciye dönüştürülerek, yuvarlanma yöntemi ile eliptik dişli oluşturulmuştur. Dairesel yaylı diş profilli eliptik dişlinin tahrik yük kapasitesinin, evolvent diş profilli eliptik dişlinin tahrik kapasitesinden daha büyük olduğu görülmüştür. Yağ pompasında dairesel yaylı diş profilli eliptik dişli tahriki kullanıldığında, diş sayısı az olan dişlilerin seçilmesi halinde, eliptik adım eğrilerinin eksantrikliğini artırabileceği ve pompalama hacminin artmasına neden olabileceği tespit edilmiştir [17]. Eliptik dişlilerin diş profillerinin elde edilmesine yönelik çalışmalarda, bilgisayar destekli modelleme ortamında, makro program yazılarak istenilen modül ve diş sayılarında tasarlamak daha kolay hale gelmiştir. Bir elipsin evolvent eğrisi ve elipsin çevresini eliptik integral ve Fourier serisi ile yaklaşık bir çözümünü MAPLE paket programında modellenmiş ve örnek uygulama yapılarak ortaya koyulmuştur [18]. Diğer bir çalışmada, dairesel olmayan dişli, çift basınç açısına sahip simetrik olmayan diş profilli olacak şekilde tasarlanmıştır. Dairesel olmayan dişli için adım eğrisi boyunca simetrik olmayan diş profili merkez hattının ve yuvarlanma durumunun matematiksel modeli elde edilmiş ve dairesel olmayan dişli çifti oluşturulmuş, dişlilerin hareketleri, mekanik ve kinematik simülasyon yoluyla doğrulanmıştır. Çift basınç açılı dairesel olmayan dişlinin, tek basınç açılı dairesel olmayan dişlilere göre tercih edilebilir mekanik özelliklere sahip olduğu beyan edilmiştir [19]. Bilgisayar destekli 2B'lu çizim ortamında; eliptik düz dişlilerin literatürdeki denklemleri kullanılarak istenilen modül ve diş sayısına göre eliptik dişli oluşturacak bir LISP programı [20] geliştirilmiştir. Program ile 5 farklı eliptik dişli modellenmiş, CNC tel erozyon tezgahında dişliler üretilmiş ve eliptik dişliler bir hidrolik pompa düzeneğinde çalıştırılmıştır. Pompanın rotor dişlisinin devir sayısındaki artışın, eliptik düz dişlilerin çevresel hızlarında artışa yol açtığı, bu durumda gürültü seviyesinin dişlilerin modüllerinin artmasıyla birlikte 100 dev/dk' da 50 – 65 desibel (dB) aralığında, 1000 dev/dk' da 85 – 95 dB aralığında olduğu tespit edilmiş ve diş profilinin aşınmasında artışa neden olduğu beyan edilmiştir. Devir sayısının artmasıyla birlikte pompalama basıncının da arttığı tespit edilmiştir. Eliptik dişlinin rotor dişlisinin 40 dev/dk' da oluşturduğu basınç 4 bar, 175 dev/dk' da 10 bar olduğu görülmüştür [20].

Eliptik dişliler, değişken çevrim oranı istenen şanzımanlarda da tercih edilmektedir. Bu dişlilerin iletim oranlarının rijitliğinden dolayı değişik tipte diş profilli eliptik dişliler tasarlanmış ve kinematik analizleri yapılmıştır [21,22]. Çevrim oranları sırası ile 0,5; 1 ve 2 olan sürekli değişken çevrim oranlı bir şanzıman geliştirildiği, bu şanzıman için bir çift özdeş eliptik dişli ve uygun bölüm elipsi tasarım prosedürü önerilmiştir. Dişlilerin her birinin dönüş merkezinin, elips odakları ile çakışması için dişliler eksantrik olarak yerleştirilmiş ve eliptik dişli çiftlerinin diş profilleri asimetric olarak elde edilmiştir (Şekil 1). Ayrıca değişken çevrim oranlı şanzımanın, sabit çevrim oranlı dairesel dişlilerden oluşan şanzıman ile olan farklılıkları ve kinematik özellikleri tartışılmıştır [23].



Şekil 1. a) Eliptik dişlinin dış profil eğrisinin oluşturulması. b) İmal edilen eliptik dişli çifti [23].

Bir diğer çalışmada, bölüm elipsinin çizim yöntemi açıklanmış ve ProE ortamında farklı eksantrikliğe sahip birden fazla eliptik dişli modellenmiştir [24]. Eliptik dişlilerin hareketleri ADAMS paket programında simüle edilmiş ve eliptik dişlilerin hareket iletim özellikleri tartışılmıştır. Ayrıca gerçek ve sanal ortamdan elde edilen hareket verilerinin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Eliptik dişlilerin bir debimetrede kullanılabilceğini, farklı eksantrikliğe sahip eliptik dişlilerin süpürdüğü hacmin hesaplanabileceği ve eksantriklik aralığına göre en uygun eliptik dişli çifti seçiminin önceden yapılabileceği ortaya koyulmuştur [24]. Eliptik dişlilerin tasarım parametreleri ile ilgili literatürden elde edilen bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Literatürdeki tasarımı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						Yöntem	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Dairesel yaylı diş profilli eliptik dişli tasarımı	5	35-49	125			20°	Tasarım	[17]
Eliptik dişli tasarımı ve kinematik analizi	2,00	19	20,337	17,644	1,152	20°	Tasarım	[24]
			21,045	16,836	1,250			
Eliptik dişli tasarımı	0,7	62	27,067	14,574		30°	Tasarım	[77]

3. ELİPTİK DİŞLİLERİN İMALATI

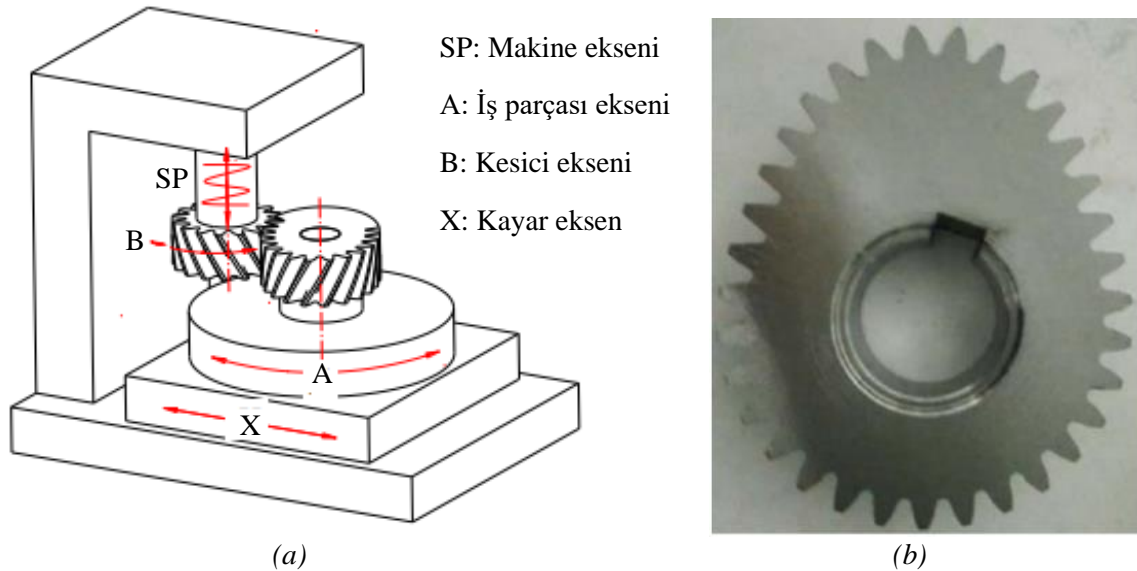
Eliptik dişlilerin imalatı üzerine yapılan çalışmalarda, üretim yöntemleri tartışılmış ve modern endüstride dairesele olmayan dişliler iyi bir şekilde imal edilebilmiştir [25]. Farklı imalat yöntemleri arasında hem dış hem de iç dişliler için kullanılabilen, kesici yarıçap ayarıyla adım ayarlanabilmektedir ve alttan kesme unsurunu önleyebilen dişli şekillendirmenin, eliptik dişli imalatı için uygun olduğu kabul edilmektedir [26,27]. Dairesel olmayan dişli şekillendirme ile ilgili, bilgisayarlı diş profili hesaplanması ve alttan kesme unsurunun analizi dahil olmak üzere dairesele olmayan dişli üretiminin matematiksel modeli açıklanmıştır [28]. Dairesel olmayan dişlilerin imalat işleminin grafik algoritması belirlenmiş ve sayısal bir hesaplama yöntemiyle de gösterilmiştir [29]. Düz dairesele olmayan dişlinin teorik bağlantı modeli ve pratik süreci tartışılmış, dairesele olmayan iç ve helis dişlilerin işleme süreci geliştirilmiş ve her türlü dairesele olmayan dişlinin 3 eksenli bir takım tezgahında imalatı gerçekleştirilmiştir [30,31]. Daha yakın zamanlarda, aynı özelliklere sahip olmayan bir yuvarlanma yöntemi önerilmiş ve dairesele olmayan dişlilerin seri üretimi

için bir makine geliştirilmiştir [32]. Eliptik dişliler geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle üretilebilmektedir.

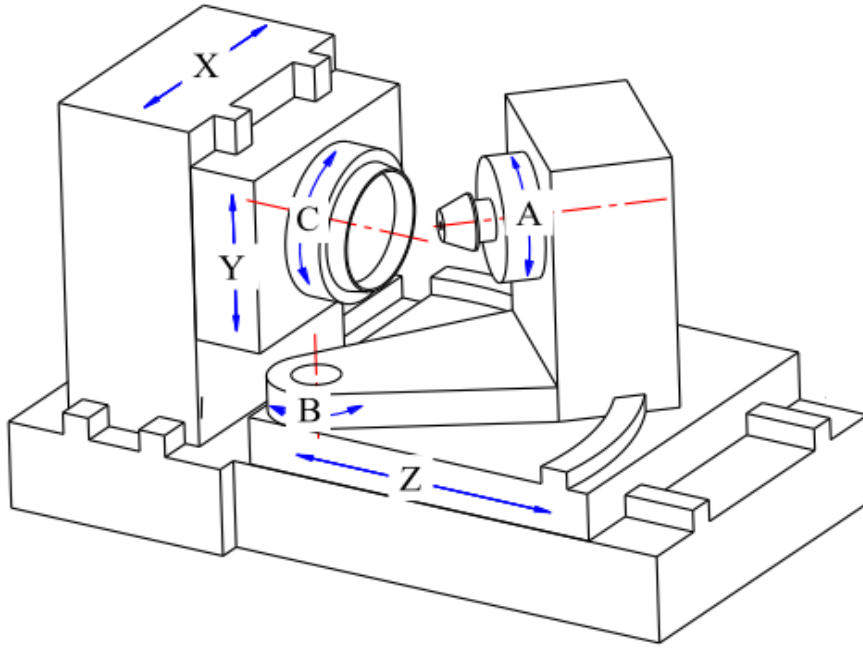
Eliptik dişlilerin geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi için dişli üretim tezgahlarının yapılandırılması gerekmektedir, diğer taraftan geleneksel olmayan imalat yöntemi olarak CNC tel erezyon tezgâhı tercih edilmektedir.

3.1. Geleneksel İmal Usulleri ile İmalat

Dişlilerin geleneksel imal usulleriyle üretilmesinde, azdırma, Fellow ve Maag yöntemlerinden birisi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisini kullanan takım tezgâhları, uyguladığı yöntem ile adlandırılmaktadır. Örneğin azdırma tezgâhı, fellow tezgâhı gibi isimlendirilmektedir. Literatürde azdırma ve Fellow yöntemi ile üretilmiş eliptik dişlilere rastlanılmıştır. Fellow yöntemi, silindirik dişli formu bir kesicinin, yukarı, aşağı ve kendi eksenini etrafında dönme hareketiyle birlikte, iş parçasının kendi eksenini etrafında dönmesiyle, yuvarlanma esasına dayanan dişli şekillendirme işlemidir. Dairesel olmayan dişlilerin adım eğrisi normalleri işleme sırasında sürekli değiştiğinden, adım eğrisi normalleri ile kesici takımın arasında açı oluşmaktadır. Bu durum kesici takımın geri kaçmasına neden olmaktadır. Kesici takımın geri kaçmasını önlemeye yönelik bir Fellow tezgâhı için 4 eksenli, programlanabilir bir tezgâh modeli geliştirilmiş (Şekil 2), matematiksel modelin ardından dairesele olmayan dişlinin imalatı gerçekleştirilmiştir. [33]. Spiral konik dişli imalatında yaygın olarak kullanılan yüzey frezeleme yöntemi ile bir dişli tezgâhı (Şekil 3), dairesele olmayan dişli imalatına uyarlanmış ve yeni tip dairesele olmayan bir dişli türü imal edilmiştir. Yeni tip dairesele olmayan dişlinin dişleri, diğer dairesele olmayan dişlilerin dişleri gibi doğrusal formu değil, yay parçası şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 4). Bu yay biçimli diş formu daha yüksek temas oranına sahip ve helisel dairesele olmayan dişlilere kıyasla daha küçük aksenal kuvvet oluşturduğunu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yeni tip dairesele olmayan dişli çiftlerinin çalışma esnasında, diş profillerinin iç bükümlerinde yağı tutabilme özelliği ile daha fazla yağlama yaptığı çalışmada vurgulanmıştır [34].



Şekil 2. A) 4 eksenli takım tezgahının şematik görüntüsü. B) Yapılandırılmış tezgah ile üretilmiş dairesele olmayan dişli [33].



- A: İş mili eksen.
 B: Taban aç eksen.
 C: Kesici eksen.
 X: Yatay kayar eksen.
 Y: Dikey kayar eksen.
 Z: Talaş derinliği eksen.
 X ve Y: Sanal beşik eksenleri.

Şekil 3. Spiral konik dişli tezgahı [34].



(a)



(b)

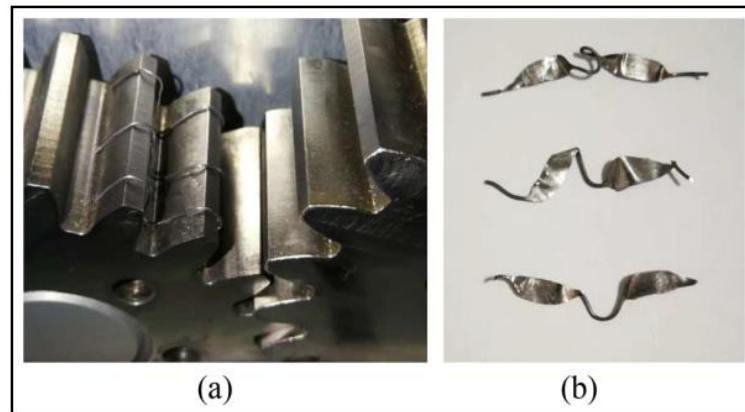
Şekil 4. a) Yeni tip dairesel diş formu dairesel olmayan dişli. b) Doğrusal diş formu dairesel olmayan dişli [34] [20].

Literatürde eliptik dişlilerin azdırma tezgahında imalatları ile ilgili yapılan çalışmalar yer almaktadır. Eliptik dişlilerin azdırma tezgahında imalatı sırasında meydana gelen bağlantı modelleri ve azdırma frezesinin talaş derinliğine doğru hareketi tarafından üretilen ek hareketi üzerine araştırmalara rastlanılmıştır. Dairesel olmayan dişlileri azdırma tezgahında üretebilmenin yolu, birden fazla eksen arasında zamanla değişen hız oranının korunabilmesidir. Elektronik dişli kutusu, dairesel olmayan dişlilerin üretilmesinde etkili bir çözüm olduğu tespit edilmiştir [35,36]. Dairesel olmayan dişlilerin imalatında, kesici takım ile iş parçası arasında sürekli temas sağlamak amacıyla işleme enterpolasyonu geliştirilmiştir. Enterpolasyon yöntemi, CNC tezgahının donanım yapısına dayalı olarak bir azdırma tezgahına uygulanılarak deneysel olarak doğrulanmıştır. Doğrulama işlemi için, bir çift eliptik dişli imal edilmiş ve dişli çiftinin performansını değerlendirmek için imal edilen bir pompada deneyler yapılmıştır. Geliştirilen

yönteme göre bölüm elipsinin, hızı ve ivmesinin işleme sürecinde sürekli olduğu ve hataların %90'dan daha fazla azaldığı sonucuna varılmıştır [37]. Jiang Han ve arkadaşları tarafından, dairesel olmayan bir helisel dişlinin azdırma tezgahında imalatı incelenmiş, geliştirilmiş bir azdırma bağlantı modeli üzerine çalışılmış, kinematik simülasyon testi gerçekleştirilmiş, enterpolasyon prosesi analiz edilmiş ve azdırma deneyi yapılmıştır. İki elektronik dişli kutusu şemasıyla enterpolasyon hataları iyileştirilmiş, hız oranı bağlantı modeline göre tasarlanan şemayla ve her bağlantı ekseninin yer değiştirme fonksiyonuna dayalı olarak azdırma şeması da ortaya koyulmuştur. Azdırma ve diş formu oluşturma deneyleri, azdırma bağlantı modelinin kesinliği ve enterpolasyon hesaplama hatalarının iyileştiği doğrulanmıştır [38].

Eliptik dişlilerin imalatında gerekli olan diş üstü elipsinin de hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Dairesel olmayan CNC tornalama, kamlar, eksantrik milleri ve dış bükey elips pistonlar gibi elemanları üretmek oldukça yaygındır [39,40]. Dairesel olmayan tornalamada, tornalama işlemi sırasında eğrilik ve kesme yarıçapı anlık olarak değişir. Bu nedenle, iş mili geleneksel tornalama işleminde olduğu gibi sabit devir sayısında dönerse, kesici ucun ve iş parçasının bağıl hareketi ile oluşan kesme açısı ve ilerleme hızı periyodik olarak değişir. Bu durum büyük kesme kuvveti dalgalanmalarına ve düşük yüzey kalitesine sebep olur [41]. Form şekil tamlığı ve mevcut dairesel olmayan tornalamayı esas alarak, konumlandırma doğruluğu üzerine çalışılmış ve hızlı radyal servo sürücüler ile eksenleri kontrol edilen yeni tip torna tezgâhı üretilmiştir. Bu torna tezgâhı, biçim hatasını doğrudan bir amaç olarak ele alan yeni bir kontrol yapısına sahip olduğu görülmüştür. Prototip torna tezgahıyla yapılan deneyler sonucunda, önerilen yöntemin yalnızca motor sürücülerinin hata kontrolünü izlemeye odaklanan geleneksel kontrolörlere kıyasla form hatalarını yaklaşık %30 azalttığını saptanmıştır [42].

Dairesel olmayan dişlilerin iletim doğruluğu ve kararlılığını artırmak amacıyla, bir konik silindirik dişli tasarım yöntemine benzer şekilde, konik dairesel olmayan dişli çifti tasarlanmıştır. Bu dişli, C eksenli bir CNC torna tezgahında, küresel uçlu kesici takımla eliptik konik dişli üretilmiş ve dişlilerden bir tanesi üzerine Şekil 5'te gösterildiği gibi kurşun tel yerleştirilmiştir. Dişlilerin çalışma esnasında düzleşen kurşun tellerin toplam kalınlığı, normal çalışma boşluğu olarak kabul edilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular; konik helisel dairesel olmayan dişlilerle, eksenel yer değiştirme yöntemi kullanılması diş boşluğu için uygun olmadığı ve konik düz dairesel olmayan dişlilerde boşluk ayarı yapılabildiği sonucuna varılmıştır. Konik dairesel olmayan dişli çiftinin diş yüzeylerinin anlık teması, düz bir çizgi oluşturmuş, diş yüzeyi tipinin çizgili bir yüzey olduğu ve dişlilerin diş yüzeyi, birbirine geçme etkisini azaltabilen bir helisel dairesel olmayan dişlinin özelliklerini sergilediği tespit edilmiştir. Normal boşluğun sayısal değişiminin orantılı ilişkisi, eksenel yer değiştirmenin orantılı ilişkisine eşit olduğu belirlenmiştir. Kesme prensibine dayalı olarak elde edilen diş yüzeyinin geometrik modelinin, gerekli iletim gereksinimlerini karşılayabilmiştir. Boşluk ayarının, bilgisayarlı sayısal kontrol işleme deneyleriyle birlikte kurşun telin ezilme analiziyle de doğrulanabilir olduğunu gösterilmiştir [43].



Şekil 5. a) Diş boşluklarına yerleştirilen kurşun tel. b) Çalışma sonrası düzleşen kurşun tel [43].

Modern endüstride, mekanik tahrikin yüksek doğruluğunun istenmesi nedeniyle eliptik dişlilerin taşlanması da gereklidir. Dişlilerin özellikle ısı işlem sonrası diş formlarının ve yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi gereksiniminden dolayı dişli taşlama işlemi yapılmaktadır. Dişli taşlama tezgâhı ve dişli tipi, taşlama taşının biçim ve özelliklerini belirlemektedir. Dişli taşlamada diş profillerinin yan yüzeyleri taşlanmaktadır ve

azdırma freze çakısı yerine, taş bağlanarak yapılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte CNC taşlama tezgahlarından faydalanılmaktadır. Dişli taşlama, sonsuz vida, konik dişli ve profil taşlama işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır ve eliptik dişliler üzerinde de uygulanabilir durumdadır. Özellikle sertleştirilmiş eliptik dişliler için taşlama ana yöntemdir. Ancak, eliptik dişlilerin taşlanması hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Eliptik dişlilerin, dişleri birbirinden farklı olduğundan dolayı eliptik dişlilerin taşlanabilmesine yönelik matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel modeller; hareket oluşturma, diş profiline göre pozisyonlanma analizine göre, her bir diş için uzunluk formülü geliştirilmiş ve CNC konik dişli taşlama tezgâhı ile eliptik dişlilerin taşlanması mümkün olduğunu gösterilmiştir [44].

Dairesel olmayan dişliler, dairesel dişliler gibi azdırma ve fellow dişli açma yöntemleriyle açılabilir. Dairesel olmayan dişlileri, geleneksel yöntemlerle imal edebilmek için, mekanik dişli açma tezgahlarına elektronik sistemler eklenerek veya CNC dişli açma tezgahlarında üretilebilir. Ancak geleneksel imalat yöntemiyle standart modüldeki dairesel olmayan dişliler açıldığı görülmüştür. Eliptik dişlilerin geleneksel imal usulleriyle üretim parametreleri literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Literatürdeki geleneksel imal usulleri ile imalatı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						Yöntem	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	42				20°	Freze tezgahında vargelleme usulü imalat	[32]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	33				20°	Fellow tezgâhı ile imalat	[33]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	2,00	32					Yüzey frezeleme yöntemiyle imalat	[34]
		48						
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,00	54	67,355	36,268		20°	Azdırma tezgâhı ile imalat	[37]
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	4,00	21					Azdırma tezgâhı ile imalat	[38]

3.2. Geleneksel Olmayan İmal Usulleri ile İmalat

Eliptik dişlilerin bir diğer üretim yöntemi CNC tel erozyon tezgahında (CNC tel EDM) kesilmesidir. Bu yöntemin avantajı standart modüle bağımlı olunmamasıdır. Tel erozyon tezgahında işleme (WEDM) yöntemi kullanılarak dairesel olmayan dişlilerin işlenmesinde yenilikçi bir yöntem ortaya koyulmuştur [45]. CNC tel EDM yönteminin kullanılabilmesi için bilgisayar destekli modelleme ve imalat programlarından faydalanılmaktadır. Eliptik dişlilerin imalatına yönelik, AutoCAD bünyesinde yer alan AutoLISP ortamında paket program yazılmış, paket programla 5 farklı modül ve diş sayısına sahip eliptik dişli çifti oluşturulmuş ve CNC tel EDM yöntemi ile imal edilmiştir. Dişlilerin ANSYS paket programında doğal frekansları bulunmuş, eksen kaçıklıkları bir deney düzeneği ile belirlenmiş ve eksen kaçıklıklarının doğrusal olduğu, sapmanın 5,6 µm olarak saptanmış ve modüldeki artışa bağlı olarak hesaplanabildiği ortaya koyulmuştur [46]. WEDM yönteminin; eliptik dişlilerin imalatı performans bakımından diğer

yöntemlere göre daha kötü olmadığı vurgulanmış, bu yöntemle yüzey kalitesinde bozulma ve malzemede faz değişimi olmadan dişli çark imal edilebileceği beyan edilmiştir [47]. Eliptik dişli prototiplerinin imalatında eklemeli imalat (3D yazıcı) ile üretimin tercih edildiği literatürde görülmüştür. 0,01 mm köşe keskinliğine, yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,6\mu\text{m}$ 'ye sahip eliptik dişli eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve SolidWorks ortamında döndüren eliptik dişlinin açılma hızı 100 rad/s ile hareket analizi yapılmıştır. Döndürülen eliptik dişlinin en küçük açılma hızı 50 rad/s ile 12. dişte olduğu tespit edilmiştir [23].

Eliptik dişlilerin her bir dişinin hatta aynı dişin, iki yan profilindeki farklılıklarından dolayı geleneksel olmayan imal usulleri imalatı daha uygundur. Bu yöntemler arasında öne çıkan WEDM yöntemidir. Bunun nedeni, WEDM tezgâhları için bilgisayar destekli imalat programları ile G kodlarının rahatlıkla üretilebilmesi ve tasarıma en yakın sonucun bu yöntemle alınabilmektedir. Ayrıca WEDM yöntemi ile istenilen sertlikteki eliptik dişliler metal malzemelerden kesilebilmektedir. Su jeti ve CNC lazer tezgâhlarında eliptik dişlilerin kesilmesi ile ilgili literatürde bir bilgiye rastlanılmamıştır. Bunun nedeni, su jeti ve CNC lazer kesimlerinde, malzemenin kesilmesi esnasında suyun veya lazerin giriş noktası ile çıkış noktası arasında açı oluşmasıdır, özellikle genişliği büyük dişlilerde bu durum net bir şekilde görülmektedir. Bu sebepten dolayı su jeti gibi diğer geleneksel olmayan imal usulleri tercih edilmemiştir.

Eliptik dişlilerin diğer dişli türlerinde olduğu gibi toz metalürjisi ile üretimi bir kalıp yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ile WEDM yöntemine göre eliptik dişlilerin çok daha seri bir şekilde üretimi mümkündür. Ancak literatürde eliptik dişlilerin toz metalürjisiyle üretimi hakkında yayımlanmış bir esere ulaşılamamıştır. Eliptik dişlilerin tasarım ve imalat parametreleri ile ilgili literatürden elde edilen bilgiler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Literatürdeki geleneksel olmayan imal usulleri ile imalatı yapılmış eliptik dişliler.

Endüstriyel Uygulama	Tasarım Bilgileri						İmal Usulü	Kaynak
	Modül (m)	Diş sayısı (z)	Büyük yarıçap (a), (mm)	Küçük yarıçap (b), (mm)	a/b oranı	Basınç açısı		
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,50	36	32,770	19,630	1,669	20°	CNC tel erezyon tezgâhı ile imalat	[78]
	1,75	33	35,040	21,025	1,521			
	2,00	32	38,850	23,300	1,667			
	2,25	31	42,330	25,400	1,666			
	2,50	30	45,510	27,310	1,666			
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı	1,50	36	33,491	19,596	1,709	20°	CNC tel erezyon tezgâhı ile imalat	[20]
	1,75	33	35,444	21,441	1,653			
	2,00	32	39,649	23,300	1,701			
	2,25	31	43,199	25,399	1,700			
	2,50	30	46,451	27,302	1,701			
Eliptik dişli tasarımı ve imalatı		24	45	42,426		20°	Eklemeli (3D yazıcı) imalat	[23]

4. ELİPTİK DİŞLİLERİN DAYANIM VE TİTREŞİM ANALİZİ

Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte birçok sektörde olduğu gibi mühendislik alanında da bilgisayar sistemlerinin kullanımı artmıştır. Mühendislik alanında özellikle bilgisayar destekli tasarım, imalat ve analizleri (CAD/CAM/CAE sistemler) ile ilgili birçok yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılımlar sayesinde, geliştirilen mekanik donanımların sonlu elemanlar analizi ile çalışma esnasındaki davranışı önceden tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte, bu donanımların hem teoriye dayalı hem de deneysel yöntemlerle de davranışları tespit edilmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu

deneysel yöntemlerle elde edilen analiz sonuçlarının, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve elde edilen verilerin uyumlu olduğu görülmüştür.

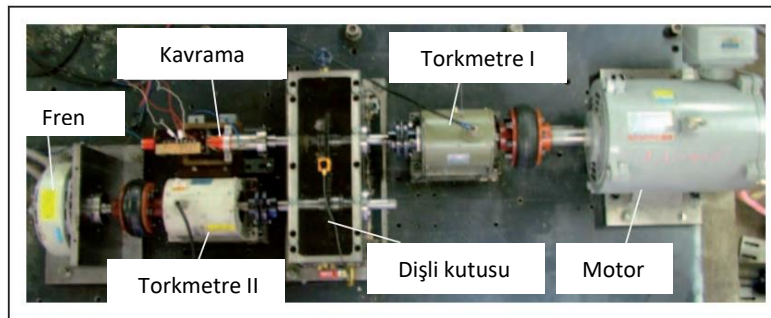
Bu bölümde, eliptik dişli çarklar üzerinde yapılmış çalışmalar analitik, deneysel ve bilgisayar destekli mühendislik olarak üç başlıkta toplanmış ve literatürde bulunan bazı çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. Analitik Yöntem ile Analiz

Son yıllarda eliptik dişlilerin dinamik davranışları da incelenmiş ve dişli dişlerinin temas noktalarındaki deformasyon, dinamik davranış ve titreşim odaklı yapılan çalışmalar literatürde yerini almıştır. Eliptik dişlilerin eksantriklik ve değişken aktarım oranı dikkate alınarak dinamik davranışlarını incelemek amacıyla bir eliptik dişli çifti modellenmiştir [48]. Diğer bir çalışmada, doğrusal olmayan dinamik bir model kurulmuş ve frekans değişimi incelenmiştir [49]. Planet dişlilerin doğrusal olmayan dinamik özelliklerinin ele alındığı ve analitik yöntemlerle çözümlerin önerildiği çalışmalar da literatürde bulunmaktadır [50]. Eliptik dişlilerin zamanla değişen, eksantrikliği ve dış torka maruz kalan eliptik dişli çiftinin parametrik titreşimleri ve kararsızlıkları araştırılmış, bölüm elipsinin değişen yarıçapı, kinematik teoriye dayalı formüle edilmiş, doğal frekanslar ve titreşim modları hesaplanmıştır [50]. Eliptik dişlilerin doğal frekansları, titreşim modları ve parametrik kararsızlıkları sistematik olarak araştırılmıştır [51]. Dişli mekanizmalarındaki rezonansları önlemek için, dairesel olmayan dişlilerin uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmıştır [52].

4.2. Deneysel Yöntem ile Analiz

Eliptik dişlilerin titreşim ve dayanımlarını ele alan deneysel çalışmalar literatürde yer almaktadır. Eliptik dişlilerin titreşim özellikleri üzerine bir simülasyon yöntemi önerilmiş, burulma titreşim simülasyon modeli kurulmuş ve bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Bu model ile eliptik dişlilerin tork değişimleri, dönüş hızı değişimleri, çevresel titreşim ve ivme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, eliptik dişli tahriklerinin diş ayırımının kritik dönüş hızları elde edilmiş (Şekil 6) ve bunların yük torkları ile ilişkileri de ortaya konmuştur. [53].



Şekil 6. Titreşim deney düzeneği [53].

Eliptik dişlilerin tork, dönüş hızı, diş dibi geriliminin araştırıldığı, deneysel doğrulamasının gerçekleştirildiği, bir tek eliptik dişli ve bir çift eliptik dişli olan iki eliptik dişlinin hesabının yapıldığı tespit edilmiştir [54]. Eliptik dişlinin dinamik giriş tork değişiminin, tahrik dişlisi dönüş hızının artmasıyla birlikte daha büyüdüğü ve deneysel olan Diş Ayırımının Kritik Dönüş Hızı (DAKDH) üzerinden hesaplanandan çok daha hızlı artmakta olduğunu görülmüştür. Tahrik edilen dişlinin giriş dönüş hızı ve giriş torku değişimi, çıkış dönüş hızıyla istenen çıkış hızı arasında farka yol açtığı tespit edilmiştir. DAKDH' nin hesaplama sonuçlarının, eliptik dişliler üzerinde deneysel olanlara neredeyse eşit olduğunu belirlenmiş, hesaplama ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır [54].

4.3. Bilgisayar Destekli Mühendislik ile Analiz

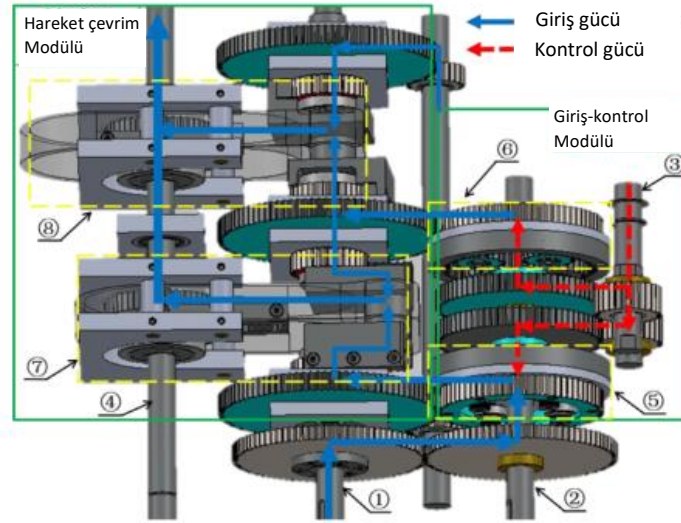
Günümüzde bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte makine elemanlarının statik ve dinamik analizlerinin paket programlar aracılığı ile yapıldığı bilinmektedir. Eliptik dişlilerin de yapısal analizleri bilgisayar destekli paket programlar aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Dairesel olmayan dişlilerin temas noktalarındaki deformasyonunun belirlenmesine yönelik, sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ve sonuçlarının, düz dişlilerin sonuçları ile kıyaslandığı tespit edilmiştir [55]. Dairesel olmayan dişlilerin düz dişliler ile kıyaslanma nedeni, literatürde düz dişliler ile ilgili verilerin detaylı bir şekilde bulunması ve dairesele olmayan dişlilerin, düz dişliler yerine kullanılıp kullanılmayacağı hakkında bilgi sahibi olunmak istenmesidir. Yapılan bir diğer çalışmada, dairesele olmayan dişlilerin değişken çevrim oranından dolayı dişli 3 bölgeye ayrılmış, dairesele olmayan dişlinin deformasyonunun, her bir dişte teğetsel kuvvetin değişmesi ve kavrama hattının uzunluklarının, dolayısıyla kavrama süresinin farklılığından kaynaklı olarak, standart düz dişliye göre farklı olduğunu görülmüştür [55]. Bölüm elipsini sonlu mikro dilimlere bölünerek dinamik bir model oluşturulan çalışmada, modelleme doğruluğunu artırmak için zamana bağlı sonlu elemanlar yöntemini esas almışlardır [56]. Sonlu elemanlarla analiz yöntemine dayalı olarak, bir eliptik dişli tahrikli dört çubuk mekanizmasının kinematik analizinin çalışıldığı, Solidworks paket programının Cosmosworks modülüyle diş gerilme dağılımlarının incelendiği ve ANSYS paket programı ile eliptik dişlilerin modal analizlerinin yapıldığı tespit edilmiştir [46].

Bir diğer bilgisayar destekli analiz paket programı olan ABAQUS ile farklı eksantrikliğe sahip eliptik dişlilerin modal analizlerini yaparak doğal frekanslarını bulmuşlar, her titreşim modunda tüm dişlilerin benzer özellik gösterdiğini ancak, doğal frekansları arasında büyük farkların oluştuğunu beyan etmişlerdir. Bunun sebebinin her dişlinin farklı yapıya sahip olmasına, tek taraflı bükülme titreşiminin, dairesele titreşimin ve burulma titreşiminin, dairesele olmayan dişlinin ana modları olmasından dolayı neredeyse hiç radyal titreşimin oluşmadığına atfedildiği görülmüştür [57]. Küçük shaft ivmeleri elde etmek amacıyla eliptik dişlinin bölüm elips eğrilerinin, bölüm elipslerinin gereken en yüksek hızlanmasına ve düzgünlüğüne bağlı olarak kontrol edildiği, sinüsoidal ve eliptik dişliler arasında bir karşılaştırma yapıldığı tespit edilmiştir [58]. En yüksek açısız ivme, teğetsel ivme ve basınç açısında önemli farklılıklar meydana geldiği, eliptik dişlilerin, yalnızca küçük shaft ivmeleri değil, aynı zamanda küçük teğetsel ivmeler ve basınç açıları da sağladığı sonucuna varılmış, açısız hız değişken bileşeninin büyük değerleri için daha düşük teğetsel ivmeler ve basınç açıları sergileyebileceği sonucu elde edilmiştir. Ayrıca, eliptik dişliler için mil, diş yükleri ve gerilmelerin daha düşük çıktığı tespit edilmiştir [58]. Eliptik dişlilerin bir başka çeşidi olan oval dişlilere sahip şanzımanın kinematik analizlerini ADAMS ortamında yapılmış, oval dişlilerin açısız hızının zamana göre değişimini incelemiş ve teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu tespit edilmiştir [59].

5. ELİPTİK DİŞLİLERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Dairesel veya silindirik dişli çiftleri, otomotiv ve madencilik makineleri gibi farklı uygulamalarda, çoğu dişli şanzımanında hareket ve güç iletimi amaçlı görev yapan rutin makine elemanlarıdır [60]. Bu dişli şanzımanları, istenilen çevrim oranına göre belirli sayıda dişli çiftiyle, sabit hız oranlarıyla hareket ve gücü iletmek üzere tasarlanmıştır. Sabit hız oranlarına sahip dişli çiftleri, dişli şanzımanlarının hız oranlarının aralıklarını sınırlamakta ve düşük yakıt verimliliğine yol açmaktadır [61]. Güç aktarımı için sürekli değişken hız oranlarına sahip diğer dişli şanzımanlar, yani sürekli değişken şanzımanlar (CVT'ler); hız kutularının sürekli değişen girdi-çıkış hız oranları sıfır ile belirlenen hız oranında sağlayacak şekilde sonsuz değişken şanzımanlar (IVT'ler) geliştirilmiştir [62]. Eliptik dişliler, istenilen hareket dönüşümü sayesinde, değişken hız oranlarıyla tasarlanabilen, dairesele olmayan dişlilerin yaygın bir türüdür [63]; CVT ve IVT tip şanzımanlarda ve hız kutularında tercih edilmektedir. IVT şanzıman için modifiye edilmiş yüksek dereceli eliptik adım eğrisine dayanan dairesele olmayan dişli tasarlanmış ve dairesele olmayan dişli çiftinin güç kaybı incelenmiştir [7]. Şekil 7'de çalışılan ve prototipi üretilen şanzımanın kısımları; giriş mili 1, ikinci giriş mili 2, kontrol mili 3, çıkış mili 4, birinci planet dişli sistemi 5, ikinci planet dişli sistemi 6, birinci Scotch Yoke mekanizması 7, ikinci Scotch Yoke mekanizması 8 numara ile gösterilmiştir [7]. Eliptik dişli çarkların da yer aldığı bir mekanik sistem kurgulanmış; dönmeyi, karşılıklı dönme hareketine dönüştürmek için planet mekanizması kurulmuş ve kinematik analizini yapılmıştır [64]. Mekanizmanın düz ve eliptik dişlilerden oluştuğu ve klasik planet dişlilerden dolayı kompakt ve güvenilir olduğunu beyan edilmiştir.

Mekanizmanın çeşitli takım tezgahlarında, karıştırıcı tanklarda, alternatif içten yanmalı motorlarda, sondaj kulelerinde ve dönme hareketini karşılıklı dönme hareketine dönüştürmenin gerekli olduğu diğer cihaz ve makinelerde uygulanabileceği değerlendirilmiştir [64].



Şekil 7. Sonsuz değişken şanzımanın şematik görünümü [7].

Eliptik dişlilerin kullanım alanından bir diğeri ise debimetre ve pompa rotorlarıdır. Eliptik rotorlu debimetrede iç akış alanı karakteristikleri hakkında ayrıntılı bilgi gerekliliğine rağmen, çok az sayıda yayın bulunmaktadır. Akış analizinin sonucunu doğrulamak maksadıyla akış görselleştirmesi yapılan bir çalışmada, eliptik dişliye sahip debimetrenin, akış hızının esas olarak rotor devrine bağlı olduğu, rotor ve gövde arasındaki boşluğun hassas bir şekilde ayar gerektirdiği tartışılmıştır. Bir eliptik dişliye sahip debimetrenin akış alanının FSI (Fluid Structure Interaction) analizi, rotorun bir noktasındaki açılma hız ve basınçta periyodik değişimler olduğunu göstermiş ve gerçek debimetrenin, akış görselleştirmesinde, benzer akış alanının olduğu görülmüştür [65].

Debimetre ve pompalarda oluşan akış dalgalanmalarını azaltmaya yönelik, harici dairesel olmayan dişli tahrik seti kullanan yeni bir yaklaşım üzerine çalışma yapıldığı görülmüştür [66]. Dairesel olmayan dişliler motor ve eliptik dişli pompa arasına takılarak, eliptik dişli pompanın düşük frekanslı ve büyük genlikli akış şiddetini teoride tamamen ortadan kaldırılabildiği tespit edilmiştir. Düşük maliyetli ve basit yapısıyla, akış dalgalanmasını azaltmaya yönelik bu yöntem, daha büyük deplasmanlı ve küçük akış dalgalanmalarına sahip yüksek performanslı eliptik dişli pompa tasarımıyla yüksek uygulama değeri göstermiştir [66].

Diğer taraftan; eliptik dişli çiftine sahip debimetreler, petrol, doğalgaz gibi enerji kaynaklarının ve enerji tüketiminin ölçümünde yaygın olarak tercih edilmektedir. Mekanize tarımda makine performansının iyileştirilmesi ve az enerji tüketimi büyük önem taşımaktadır. Mekanize tarımda kullanılan bir traktörün yakıt sistemi üzerinde yapılan çalışmada, arkadan çekişli (RWD), dört çekişli (4WD) ve önden çekişli (FWD) traktör sürüş sisteminin, toprak işleme çalışması sırasında traktör performansı ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir [67]. Daha sonra sürüş sistemi tipinin etkisini araştırmaya yönelik arazi deneyleri yapılmıştır. Deneyler yakıt tüketim ölçümünü 0,01 l/dk hassasiyetli iki eliptik dişli çiftine sahip debimetre kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dizel motorlarda enjektör pompasının fazla yakıtı depoya geri döndüğünden dolayı, enjektör pompasına giden yakıt yoluna takılan debimetreye ek olarak, yakıt deposuna doğru olan yakıt dönüş yoluna da başka bir debimetre yerleştirilmiş ve motorun tüketim akış hızı, iki debimetrenin farklılaşan akış miktarına göre belirlenmiştir [67]. Denizcilik sektöründe yüzer donanımların yakıt tüketiminin ölçülmesi ve gemi yöneticilerinin, bilimsel olarak bir gemi enerji harcama yönetim sisteminin kurgulanması son derece önemlidir. Enerji tasarrufu, rutin motor bakım programı yapmak için geminin operasyonda olduğu sürede yakıt tüketimini doğru bir şekilde ölçen, kapsamlı ve iyileştirilebilir bir sisteme gerek duyulmaktadır [68]. Diğer bir çalışmada, Deforme Helis Ferroelektrik Sıvı Kristalin (DHFLC) özelliğinden faydalanılarak bir eliptik dişli çiftine sahip debimetre ağına küçük voltaj

sinyallerini optik alana doğrusal ve pasif olarak iletmek amacıyla uygulanmıştır [69]. Birden fazla sensörden gelen sinyaller tek bir optik fiberde çoğaltılmış ve çalışma için pozitif deplasmanlı oval dişli çiftine sahip debimetreyi, kısa aralıklı darbe üretmek amacıyla manyetik anahtar olabilme yönüyle tercih edilmiştir. Çok küçük akışlar dahil tüm akış hızlarında hatasız akış iletimi sağlanmıştır [69]. Konsantr güneş enerjisi (CSP) santralleri, genellikle su kaynakları kıt olan bölgelerde veya sistemin genel verimliliğini etkileyen kuru soğutmalı soğutma sistemleri gerektirmektedir. Güneş enerjisi tesislerinin sürdürülebilirliğini sağlamaya yönelik hibrit bir soğutma sistemi ile daha düşük su tüketimi, daha yüksek verimlilik için bir çözüm bulunduğu literatürde tespit edilmiştir [70].

Dünyadaki fosil yakıtlar ile elektrik üretimi çok yaygındır. Kömürün yanması sonucu oluşan baca gazında çok fazla ısı ve su buharı bulunmaktadır [71]. Bu nedenle baca gazındaki ısı ve suyun geri kazanımı, su kıtlığına ve yüksek enerji talebine karşı çözüm olabilir. Son zamanlarda, birçok araştırmacı tarafından taşıma membran kondansatörünün (TMC) oluşturduğu baca gazından ısı ve su geri kazanımı üzerine bir dizi deneysel çalışma ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [72]. Isı ve kütle transfer modeline dayalı olarak, taşıma TMC durum-uzay modeli geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Baca gazı fanla tahrik edilmiş, gaz kütle akış ölçer (0-40 l/dak, doğruluk: $\pm\%1$) ve bir eliptik dişli çiftli debimetreyle (90-900 ml/dak, doğruluk: $\pm 0.5\%$), sırasıyla baca gazı ve su akışlarının akış hızları ölçülmüştür [73].

Petrol sahalarında, çok fazlı debimetreler (MPFM), petrol-gaz üretim verimini en üst düzeye çıkarmak için önemli veriler elde edilmesini sağlar. Çok fazlı akış ölçümündeki en son bulguları ve karşılaşılan zorlukları, pozitif deplasmanlı (PD) debimetrelerin, günümüzde petrol akışı ölçüm uygulamalarında türbin debimetrelerin yerini alabileceği tartışılmıştır [74]. Çok fazlı debimetreler ile ilgili diğer bir çalışmada, yağ-su iki fazlı akışı ölçmeye yönelik bir venturi ölçer ve bir oval dişli akış debimetreyi birleştiren hibrit akış ölçer dikkate alınmıştır [75]. Hibrit akış ölçerin, toplam hacim akış hızı, toplam kütle akış hızı ve yoğunluk açısından petrol-su iki fazlı akışının ölçümü için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. İlave araştırmalar yapılması halinde, hibrit akış ölçerlerin, Coriolis sayaçlarına göre düşük maliyetli bir alternatif sunabileceği görülmüştür [75].

İnsan nüfusunun artışıyla beraber üretim sektörlerinin çeşitlenmesi, enerji tüketiminde büyük bir artışa yol açmıştır. Bu enerji tüketim artışına örnek olarak, tropikal bölgelerde kullanılan bir frigorifik kamyonuna soğutma sistemi geliştirilmiş, iklimlendirme, dondurma özellikleri üzerine CFD (Computational Fluid Dynamics) simülasyonları gerçekleştirilmiş ve soğutma sisteminin, hava debisi ölçmek amacıyla yüksek hassasiyete sahip eliptik dişli çiftli debimetreler, hava debisini ölçebilecek konumlara monte edilmiştir [76].

Eliptik dişli çiftine sahip debimetre üretimini yerli imkanlarla geliştirmek istenmektedir ve çalışmalar ulusal düzeyde artmaktadır. Güney Kore’de dışa bağımlı olunan eliptik dişli çiftine sahip debimetre üretimini, yerli teknoloji geliştirmek ve teknik becerinin dışa bağımlılığını ortadan kaldırmak amacıyla yapmışlardır. Çalışmada 30° basınç açısına sahip eliptik dişlilerde diş çakışması olduğunu, daha büyük basınç açılarında ise diş kökünün geniş, dişin üst kısmının sivri olduğu tespit etmişler ve eliptik dişli tasarımlarını 2D ve 3D simülasyon aracılığıyla doğrulamışlardır [77].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde eliptik dişli çarkların; sadece mekanik ürünlerin tasarım ve imalatında değil, aynı zamanda sıvı ve gaz nakli yapılan tesislerde gerek pompa gerekse debimetre donanımlarında yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir. Bununla birlikte tasarım ve imalatlarının güçlüğünden dolayı, tasarım ve imalat süreçlerini iyileştirmek ve hızlandırmak için imalat teknolojilerini geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmektedir.

- Eliptik dişli çarkların tasarımlarında kramayer veya düz dişli formlu kesici, bölüm elipsi üzerinde yuvarlanma yaparak diş formlarını ortaya çıkarmaktadır. Diş formları bilgisayar destekli tasarım ortamında makro programlama ile etkileşimli olarak hazırlanabilmektedir.
- Bölüm elipsinin eksantrikliği ve basınç açısı diş profillerinin sivrilikliğini etkileyen en önemli parametredir.
- Eliptik dişlilerin standart modülde tasarlayabilmek, bölüm elipsinin çevre uzunluğunun tam hesaplanması gerektirmektedir. Analitik yaklaşımların tercih edilebildiği tespit edilmiştir.

- Eliptik dişlilerin imalatları için CNC tel erozyon veya azdırma tezgâhında işleme yaygınlaşmaktadır.
- Azdırma tezgahlarında eliptik dişli imalatı için, tezgâha özel aparatların veya elektronik dişli kutularının kullanılması gerekmektedir.
- Eliptik dişli çiftleri ile değişken çevrim oranına sahip dişli kutusu tasarım ve imalatlarının yapıldığı tespit edilmiştir.
- Eliptik dişlilerin çalışma şartları altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla hem deneysel hem de bilgisayar destekli analizleri ile ilgili yapılan çalışmalar literatürde yerini aldığı görülmüştür.
- Eliptik dişli çiftine sahip debimetreler, pervaneli tip debimetreler göre çok daha hassas ölçüm yapabilmektedir. Bununla birlikte eliptik dişliye sahip debimetrelerde rotor dişlisinin açılal konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir.
- Eliptik dişliye sahip debimetreler petrol ve doğalgaz sahalarında, çıkarılan kaynağın miktarını hassas olarak ölçebilmektedir.
- Çin örneğinde olduğu gibi ülkemizde, termik santrallerin bacalarında oluşan su ve baca gazının geri kazanımı için debimetre ile yapılacak ölçümlere dayalı sistem uygulanması su kıtlığını hafifletilebilecek ve artan enerji talebini azaltılabilecektir.
- Ülkemizin geniş tarımsal arazilerinin iş makinası olan traktör, biçerdöver gibi tarım makinelerinin yakıt ölçümleri ve tasarrufları için eliptik dişliye sahip debimetrelerden faydalanılmalıdır.
- Soğutma sistemlerinde, hava sirkülasyonu hassas bir şekilde ölçülmesinde eliptik dişliye sahip debimetreler meyve ve sebze buz hanelerinde de kullanılabilir.
- Beyaz eşya sektöründe, özellikle çamaşır ve bulaşık makinelerinde su ve elektrik tasarrufu için eliptik dişliye sahip pompa ve debimetreler tercih edilmelidir.
- Farklı akışkanların belirli oranlarda karıştırıldığı mikser donanımlarında karışımın kalitesini etkileyen akış davranışları eliptik dişliye sahip debimetreler ile belirlenebilir.
- Kore örneğinde olduğu gibi, eliptik dişliye sahip debimetre tasarımının ve üretiminin ulusal düzeyde gerçekleştirilmesi, teknolojik gelişmişlik düzeyimize katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Addomine, G. Figliolini, and E. Pennestrì, “A landmark in the history of non-circular gears design: The mechanical masterpiece of Dondi’s astrarium,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 122, pp. 219–232, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.027.
- [2] M. J. LAI, “An Investigation of The Dynamic Behaviour of Systems With, Noncircular Gears,” *Cnkijournal, Beijing*, pp. 377–388, 1996.
- [3] D. Mundo, “Geometric design of planetary gear train with non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory Elsevier Ltd*, pp. 456–472, 2006.
- [4] Y. A. Yao and H. S. Yan, “A new method for torque balancing of planar linkages using non-circular gears,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 217(5), pp. 495–503, 2003.
- [5] S. L. Chang, C. B. Tsay, and L. I. Wu, “Mathematical model and undercutting analysis of elliptical gears generated by rack cutters,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 31, no. 7, pp. 879–890, 1996, doi: 10.1016/0094-114X(95)00121-E.
- [6] F. L. Litvin, “Gear Geometry and Applied Theory,” *PTR Prentice-Hall, New Jersey*, pp. 300–400, 1994.
- [7] L. Gang and Z. Weidong, “Design and power loss evaluation of a noncircular gear pair for an infinitely variable transmission,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 156, 2021.
- [8] W. Junfeng, L. Xiaobo, L. Chuan, L. Bo, and Z. Fangyan, “Three-dimensional design and motion analysis of non-circular gear [J].,” *J. hubei Univ. Technol.*, vol. 29(04), pp. 69–72, 2014.
- [9] S. MEDVECKÁ-BEŇOVÁ, “DESIGNING PITCH CURVES OF NON-CIRCULAR GEARS,” *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 99, pp. 105–114, Jun. 2018, doi:

- 10.20858/sjsutst.2018.99.10.
- [10] S. H. Tong and C. H. Yang, "Generation of Identical Noncircular Pitch Curves," *ASME J. Mech. Des.*, vol. 120(2), pp. 337–341, 1998.
- [11] F. L. Litvin and A. Fuentes, "Gear Geometry and Applied Theory," *Cambridge Univ. Press. New York*, 2004.
- [12] D. D. Chung and R. Wolfgramm, "Maxillary arch perimeter prediction using Ramanujan's equation for the ellipse," *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, vol. 147, no. 2, pp. 235–241, 2015, doi: 10.1016/j.ajodo.2014.10.022.
- [13] İ. PAZARKAYA and A. ÖZDEMİR, "Eliptik Dişli Çarklarda Bölüm Elipsinin Analitik Olarak Hesaplanması," *1. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ VE MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLAR KONGRESİ*, pp. 490–498, 2021.
- [14] J. Han, D. Z. Li, T. Gao, and L. Xia, "Research on Obtaining of Tooth Profile of Non-circular Gear Based on Virtual Slotting," *14th IFToMM World Congr. (Taipei Taiwan)*, no. URL:<http://www.iftomm2015.tw/IFToMM2015CD/PDF/PS6-001.pdf>, pp. 25–30, 2015.
- [15] X. Wang, "A numerical algorithm of tooth profile of non-circular cylindrical gear," in *AIP Conference Proceedings*, Jul. 2017, vol. 1864, doi: 10.1063/1.4992991.
- [16] A. A. Lyashkov, K. L. Panchuk, and I. A. Khasanova, "Automated Geometric and Computer-aided Non-Circular Gear Formation Modeling," in *Journal of Physics: Conference Series*, Jul. 2018, vol. 1050, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012049.
- [17] B. W. Bair, "Computer aided design of elliptical gears with circular-arc teeth," *Mech. Mach. Theory*, vol. 39, no. 2, pp. 153–168, Feb. 2004, doi: 10.1016/S0094-114X(03)00111-3.
- [18] J. BETTEN, "involute of an ellipse," *Math. Model. Mater. Sci. Contin. Mech. Augustinerbach*, pp. 4–20, 2009.
- [19] J. HAN, D. LI, L. XIA, and B. JIANG, "Research on Design Method of Non-Circular Gear Pair with Double Generating Angles, , Computer Aided Drafting," *Des. Manuf. Vol.*, vol. 25, p. 52, 2015.
- [20] M. YAZAR and Ö. Ahmet, "COMPUTER-AIDED DESIGN, MANUFACTURE AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PAIR OF ELLIPTICAL SPUR GEARS," *ANADOLU Univ. J. Sci. Technol. A - Appl. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 869–869, Dec. 2016, doi: 10.18038/aubtda.279855.
- [21] Y. Hou and C. Lin, "Kinematic analysis and experimental verification of an oval noncircular bevel gears with rotational and axial translational motions," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, p. 60, 2019.
- [22] A. Prikhodko, "Experimental kinematic analysis of an intermittent motion planetary mechanism with elliptical gears," *J. Meas. Eng.*, vol. 8, pp. 122–131, 2020.
- [23] S. Maláková, M. Urbanský, G. Fedorko, V. Molnár, and S. Sivak, "Design of geometrical parameters and kinematical characteristics of a non-circular gear transmission for given parameters," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–24, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11031000.
- [24] K. Zhou, Y. Guo, and X. Li, "Modeling and Dynamics Analysis of Non-Circular Gears," in *PervasiveHealth: Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, Apr. 2020, pp. 442–447, doi: 10.1145/3436286.3436434.
- [25] F. Zheng, L. Hua, D. Chen, and X. Han, "Generation of Noncircular Spiral Bevel Gears by Face-Milling Method," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138(8), p. 081013, 2016.
- [26] F. L. Litvin, I. Gonzalez-Perez, K. Yukishima, A. Fuentes, and K. Hayasaka, "Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper," *Comput.*

- Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 196, no. 41–44, pp. 4321–4336, 2007, doi: 10.1016/j.cma.2007.05.003.
- [27] A. Katz, K. Erkorkmaz, and F. Ismail, “Virtual Model of Gear Shaping— Part I: Kinematics, Cutter–Workpiece Engagement, and Cutting Forces,” *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 140(7), p. 071007, 2018.
- [28] B. W. Bair, “Computerized tooth profile generation of elliptical gears manufactured by shaper cutters,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 122, no. 2–3, pp. 139–147, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(01)01242-0.
- [29] J. Li, X. Wu, and S. Mao, “Numerical computing method of noncircular gear tooth profiles generated by shaper cutters,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 33, no. 11–12, pp. 1098–1105, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0560-0.
- [30] F. Zheng, L. Hua, X. Han, B. Li, and D. Chen, “Linkage model and manufacturing process of shaping non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 96, pp. 192–212, 2016, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.09.010.
- [31] F. Zheng, L. Hua, X. Han, B. Li, and D. Chen, “Synthesis of Shaped Noncircular Gear Using a Three-Linkage Computer Numerical Control Shaping Machine,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 7, 2017, doi: 10.1115/1.4035794.
- [32] F. Zheng, X. Guo, and M. Zhang, “Non-uniform flank rolling measurement for shaped noncircular gears,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 116, pp. 207–215, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.048.
- [33] F. Zheng, H. Lin, X. Han, M. Zhang, W. Zhang, and X. Guo, “Avoidance of Cutter Retracting Interference in Noncircular Gear Shaping Through 4-Linkage Model,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 141, no. 5, 2019, doi: 10.1115/1.4043193.
- [34] F. Zheng, H. Xinghui, L. Hua, M. Zhang, and W. zhang, “Design and manufacture of new type of non-circular cylindrical gear generated by face-milling method,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 122, pp. 326–346, 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.01.007.
- [35] X. Tian, J. Han, L. Xia, and L. Wu, “A flexible electronic helical guide controller,” *Procedia CIRP*, vol. 56, pp. 173–177, 2016.
- [36] J. Han, L. Wu, B. Yuan, X. Tian, and L. Xia, “A novel gear machining CNC design and experimental research,” *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 88, pp. 1711–1722, 2016.
- [37] L. Wu, J. Han, Y. Zhu, X. Tian, and L. Xia, “Non-circular gear continuous generating machining interpolation method and experimental research,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 12, pp. 5171–5180, 2017, doi: 10.1007/s40430-017-0873-y.
- [38] J. Han, D. Li, X. Tian, and L. Xia, “Linkage model and interpolation analysis of helical non-circular gear hobbing,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 11. 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02663-1.
- [39] W. Dan, C. Ken, and W. Xiankui, “An investigation of practical application of variable spindle speed machining to noncircular turning process,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 44, pp. 1094–1105, 2009.
- [40] W. Dan, Z. Tong, and W. ChenXiankui, “Application of active disturbance rejection control to variable spindle speednoncircular turning process,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, pp. 419–423, 2009.
- [41] Q. Li, W. Ai, and B. Chen, “Variable angle compensation control of noncircular turning,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 70(1):735, p. 46, 2014.
- [42] J. Yang, P. Rao, B. Chen, H. Ding, and W. Ai, “Form error on-line estimation and compensation

- for non-circular turning process,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 184, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105847.
- [43] H. Jiang, L. Dazhu, T. Xiaoqing, and X. Lian, “Meshing principle and transmission analysis of a beveloid non-circular gear,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12(11), pp. 1–11, 2020.
- [44] Y. Liu, J. Gong, and X. Wu, “Investigation on the grinding of elliptical gears with CNC conical wheel gear grinder,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 1–4, pp. 349–356, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4028-0.
- [45] T. Sałaciński, A. Przesmycki, and T. Chmielewski, “Technological aspects in manufacturing of non-circular gears,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, 2020, doi: 10.3390/app10103420.
- [46] M. Yazar, “Design, Manufacturing and Operational Analysis of Elliptical Gears,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 8, pp. 1441–1451, 2021, doi: 10.1007/s12541-021-00549-3.
- [47] C. García-Hernández, R. M. Gella-Marín, J. L. Huertas-Talón, N. Efkolidis, and P. Kyratsis, “WEDM manufacturing method for noncircular gears, using CAD/CAM software,” *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 62, no. 2, pp. 137–144, 2016, doi: 10.5545/sv-jme.2015.2994.
- [48] M. Lai, “An investigation of the dynamic behavior of systems with noncircular gears,” *hD Thesis, Univ. Wisconsin-Madison, USA.*, 1997.
- [49] A. Kahraman and R. Singh, “Non-linear dynamics of a spur gear pair,” *J. Sound Vib.*, vol. 142, pp. 49–75, 1990.
- [50] N. Gao, C. Meesap, S. Wang, and D. Zhang, “Parametric vibrations and instabilities of an elliptical gear pair,” *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 26, no. 19–20, pp. 1721–1734, 2020, doi: 10.1177/1077546320902543.
- [51] J. Lin and R. G. Parker, “Mesh stiffness variation instabilities in two-stage gear systems,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 124(1), pp. 68–76, 2002.
- [52] O. Karpov, P. Nosko, and P. Fil, “Prevention of resonance oscillations in gear mechanisms using non-circular gears,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 114, pp. 1–10, 2017.
- [53] X. Liu, K. Nagamura, and K. Ikejo, “Simulation on the vibration characteristics of elliptical gears,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 227, no. 4, pp. 819–830, 2013, doi: 10.1177/0954406212454372.
- [54] X. LIU, K. NAGAMURA, and K. IKEJO, “Analysis of the Dynamic Characteristics of Elliptical Gears,” *J. Adv. Mech. Des.*, vol. 6, p. 4, 2012.
- [55] S. MALÁKOVÁ, “TEETH DEFORMATION OF NON-CIRCULAR GEARS,” *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 110, 2021.
- [56] D. W. Liu, R. . . Zhi, and J. Xin, “Dynamic model and its application of transmission system in noncircular gears,” *J. Mach. Des.*, vol. 33(1), pp. 35–39, 2016.
- [57] K. Zhou, Y. Li, C. Wang, and C. Li, “Non-circular Gear Modal Analysis Based on ABAQUS,” in *Proceedings - 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2015*, May 2016, pp. 576–579, doi: 10.1109/ICICTA.2015.147.
- [58] L. V. Vanegas-Useche, M. M. Abdel-Wahab, and G. A. Parker, “Nuevo par de engranajes no circulares para reducir las aceleraciones del eje: Comparación con engranajes sinusoidales y elípticos,” *DYNA*, vol. 83, no. 198, pp. 220–228, Sep. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n198.49170.
- [59] K. Zhou, Y. Li, C. Li, and C. Wang, “Non-circular Gear Kinematics Simulation Based on ADAMS,” *Proc. - 8th Int. Conf. Intell. Comput. Technol. Autom. ICICTA 2015*, pp. 572–575, 2016, doi: 10.1109/ICICTA.2015.146.

- [60] K. J. Waldron, G. L. Kinzel, and S. K. Agrawal, "Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery, 3th Edition," Wiley, New York, 2004.
- [61] Z. X. Sun and K. Hebbale, "Challenges and opportunities in automotive transmission control," *Proc. 2005 Am. Control Conf. Portl.*, pp. 3284–3289, 2005.
- [62] X. F. Wang and W. D. Zhu, "Design, modeling, and simulation of a geared infinitely variable transmission," *ASME J. Mech. Des.*, vol. 136(7), p. 071011, 2014.
- [63] F. Litvin and A. Fuentes-Aznar, "Noncircular Gears: Design and Generation," Cambridge Univ. Press, New York, 2009.
- [64] P. A.A. and S. A.I., "Kinematic analysis of mechanism for converting rotational motion into reciprocating rotational motion," *Procedia Eng.*, vol. 129, pp. 87–92, 2015.
- [65] G. S. Lee and M. Y. Park, "FLOW FIELD CHARACTERISTICS IN THE HOUSING OF NONCIRCULAR GEAR FLOWMETER," no. July, 2008.
- [66] D. Liu, Y. Ba, and T. Ren, "Flow fluctuation abatement of high-order elliptical gear pump by external noncircular gear drive," *Mech. Mach. Theory*, vol. 134, pp. 338–348, 2019, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.011.
- [67] A. M. Moinfar, G. Shahgholi, Y. A. Gilandeh, and T. M. Gundoshmian, "The effect of the tractor driving system on its performance and fuel consumption," *Energy*, vol. 202, p. 117803, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117803.
- [68] K. Rongping, "Port Ship Energy Consumption Management Based On Beidou Satellite Communication[J]," *Jimei Univ.*, 2017.
- [69] J. Firth, F. Ladouceur, Z. Brodzeli, M. Wyres, and L. Silvestri, "A novel optical telemetry system applied to flowmeter networks," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 48, pp. 15–19, 2016, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.01.006.
- [70] A. Zaza, E. G. Bennouna, N. E. Laadel, and Y. El Hammami, "Experimental Study of Fouling in Hybrid Cooling Tower Used in CSP Plants: Effects of the Polymer and galvanized steel tubes," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 25, no. June, p. 101005, 2021, doi: 10.1016/j.tsep.2021.101005.
- [71] L. Xiao, M. Yang, S. Zhao, W. Z. Yuan, and S. M. Huang, "Entropy generation analysis of heat and water recovery from flue gas by transport membrane condenser," *Energy*, vol. 174, pp. 835–847, 2019.
- [72] S. Soleimanikutanaei, C. X. Lin, and D. Wang, "Numerical modeling and analysis of Transport Membrane Condensers for waste heat and water recovery from flue gas," *Int J Therm Sci*, vol. 136, pp. 96–106, 2019.
- [73] Y. Yang, N. F. Li, S. M. Huang, C. H. Liang, and L. Xiao, "State-space model for transient behavior of transport membrane condenser," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 165, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120667.
- [74] M. Meribout, A. Azzi, N. Ghendour, N. Kharoua, L. Khezzar, and E. AlHosani, "Multiphase Flow Meters Targeting Oil & Gas Industries," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 165, p. 108111, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108111.
- [75] X. Li, Z. Huang, Z. Meng, B. Wang, and H. Li, "Oil-water two-phase flow measurement using a venturi meter and an oval gear flow meter," *Chem. Eng. Commun.*, vol. 197, no. 2, pp. 223–231, 2010, doi: 10.1080/00986440902938469.
- [76] J. Yan, S. Li, and R. Li, "Numerical study on the auxiliary entrainment performance of an ejector with different area ratio," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 185, no. August 2020, p. 116369, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116369.

- [77] J. J. Park and E. S. Lee, "A study on the elliptical gear design for oval flowmeter," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 37, no. 8, pp. 1029–1033, 2013, doi: 10.3795/KSME-A.2013.37.8.1029.