

Eliptik Düz Dişlilerin Bilgisayar Destekli Tasarımı ve CNC Tel Erozyon ile İmalatı

Mehmet YAZAR, Ahmet ÖZDEMİR

ÖZET

Silindirik olmayan dişli çarkların önemli bir üyesi olan eliptik düz dişli çarkların matematiksel denklemleri çalışmanın ilk aşamasında hazırlanmıştır. İkinci aşamasında denklemleri döngü içerisinde çözmek ve istenilen diş sayısı ve modülde eliptik dişlilerin imalat resimlerinin iki boyutlu modellenmesi için AutoLISP programlama dili ortamında bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Program aracılığıyla klasik imal usulleriyle üretilmesi oldukça zor olan ve özel tekniklerle donatılmış üretim tezgâhları isteyen eliptik dişli çark çiftinin beş farklı modülde üretimi CNC tel erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Dişlilerin çalışabilirliklerinin test edilmesi için üretilen her eliptik dişli çiftinin bölüm elipsleri salgıları, tasarımı ve imalatı yapılan bir deney seti ile kontrol edilmiştir. Salgı değerleri, imalatı yapılan beş farklı modüle sahip eliptik düz dişli çiftlerinin, çok sayıda mekanik sistemde kullanılabilir nitelikte olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Dairesel olmayan dişliler, Eliptik dişli, CNC Tel erozyonla işleme

Computer Aided Design of Elliptical Spur Gears and Manufacturing on CNC Wire EDM

ABSTRACT

The mathematical equations of elliptical gears, significant members of non-circular gears, have been firstly done. Software has been developed in order to solve the equations successively within the cycle and for 2-D models of production pictures of elliptical gears with desired numbers of teeth and modules at AutoLISP. Through this programme, the elliptical gears, which are too difficult to produce by traditional methods and require specific manufacture lines equipped with special techniques, have been produced at 5 different modules by wire EDM. The eccentricity of pitch diameters, the most important parameter for workability of the gears have been controlled by a test unit developed design and manufactured. The eccentricity values show that the elliptical gears manufactured can be successively applied in many mechanical systems.

Key words: Non-circular gears, elliptical gear, CNC Wire EDM

1. GİRİŞ

Dairesel olmayan dişli çarkların ilk örneği Leonardo da Vinci tarafından 17. yy'da geliştirilmiş, tarihsel süreçte saat mekanizmaları, müzik aletleri, otomatik oyun aletleri, anahtar açma tezgâhları, Geneva mekanizmaları ve pompalar gibi donanımlarda kullanıldığı tespit edilmiştir (1, 2, 3).

Dairesel olmayan dişli çarklar, çok yönlü mekanik uygulamalarda basit olarak kullanılmaktadır (4-6). Eliptik dişlilerin kese kâğıdı üreten makinelerde (7), debimetrelerde, yazı , paketleme, etiketleme, tekstil ve sigara makinelerinde başarılı bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir (8). Diğer taraftan; elektromekanik sistemlerin kontrolü için dairesel olmayan potansiyometrelerde, düşük kaymalı sürekli değişken hareket ile

kuvvet iletimi, tasarımı ve ölçümünde, doğru akım metreleri ve robot tahrik mekanizmalarında da eliptik dişlilerin tercih edildiği görülmüştür (9-11). Eliptik dişli çarklar, çizgisel olmayan hareket çıktısının giriş milinin düzenli dönüşüyle üretilmek zorunda olduğu hesap makinelerinde de kullanılmaktadır (12-14). Ayrıca, sabit girdi, değişken çıktı gereken mekanizmalarda, değişik frekanslı bir osilatörde, füze fırlatma yer donanımlarında ve uzay araçlarında dairesel olmayan dişli çarkların başarılı uygulama örnekleri de tespit edilmiştir (15-18).

Çok sayıda teorik ve deneysel çalışmanın yer aldığı literatürde tarak kesicilerle eliptik dişlilerin diş profilini elde etmek için bilgisayar programlarından faydalandığı diş profilinin alttan kesiminin incelendiği, tel erozyonla ve evolvent yöntemiyle üretilen dişlilerin mukayese edildiği görülmüştür (19). Eliptik dişlilerin imalatında bölüm elipsi üzerinde sadece yuvarlanma hareketi yapan bir kesicinin dikkate alındığı teorik model geliştirme çalışmalarına rastlanmıştır (20). Bilgisayar destekli tasarım yazılımlarında yaşanan gelişmelerin ve CNC tezgâhlarındaki ilerlemelerin, eliptik dişli çarkların tasarım ve imalatını daha ekonomik ve daha verimli hale getirmiştir (21-23).

Makale 09.02.2011 tarihinde gelmiş 15.04.2011 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

A. ÖZDEMİR, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü 06500 Teknikokullar/ ANKARA

e-posta : ahmetoz@gazi.edu.tr

M, YAZAR, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 06500 Teknikokullar/ANKARA

e-posta : mehmet_yazar@hotmail.com

Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.4, 245-253

Dairesel olmayan dişli çarkların alışılmamış hareket veya hız özelliklerini sağlamak amacıyla çeşitli mekanizmalarda kullanıldığı bilinmektedir (24). Dairesel olmayan dişli çark tahrikli bu mekanizmaların, kamli mekanizmalara göre basit, güvenli ve hassas çözümler sunduğu (25, 26), imalat maliyetleri açısından kamlara nazaran daha ucuz imal edilebildiği (27) ve uzmanlık gerektiren servo sistemlerle mukayese edildiğinde son derece ekonomik olduğu görülmektedir. Dört çubuk, beş çubuk ve altı çubuk mekanizmalarında (28), dairesel olmayan dişli çarkların tahrik amacıyla kullanıldığı ve düzensiz hareketin elde edilmesiyle hareket analizlerinin yapıldığı görülmüştür (29).

Son yıllarda dairesel olmayan dişli çarklar üzerindeki araştırmalar temel matematiksel analizler, tasarım, üretim ve uygulama alanları (30-32), olmak üzere değişiklikler göstermekte ve eliptik dişli çarkların farklı tiplerinin tamamına uygulanabilecek bazı genel tasarım kriterleri literatürde yer almaktadır (33, 34). Sürekli Değişen İletim Sistemlerinde (CVT) gerek teorik (35), gerekse deneysel çalışmaların yanında bilgisayar ortamında oluşturulan matematiksel eşitliklerin (36), çözümlerinin gerçekleştirildiği görülmüştür (37). CAD/CAM yazılımlarından etkin olarak faydalanılan araştırmalarda, diş gövdelerinin farklı tiplerinin bütünlük etkili tasarım ve üretimleri için yöntemler geliştirilmiştir (37). Eliptik dişli çarkların hassas tasarımı ve üretimi için yapılan endüstriyel uygulamalara CNC makinelerde talaşlı imalat; kimyasal teknikler, döküm, özel azdırma yöntemleri örnekler olarak sıralanmıştır (38-39).

Bu çalışmada, yapılan literatür çalışmalarından faydalanılarak AutoCAD ortamında, kullanıcının tasarım etkileşimli olmasının AutoLISP dilinde hazırlanan mini yazılım ile beş farklı modül ve diş sayısında eliptik dişli sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu tasarım verileri MasterCAM aracılığıyla imalat verilerine dönüştürülmüş her çift dişli için ayrı CNC satırları üretilmiş ve beş çift dişlinin CNC tel erozyon makinesinde imalatı yapılmıştır. İmal edilen dişlilerin lite-

ratür çalışmalarında rastlanmayan, ancak dişlilerin salgisız, gürültüsüz ve en az aşınmayla çalışmalarına yol açan elips dairesi salgıları, çalışma kapsamında geliştirilen bir masa üstü test donanımı ile ölçülmüştür.

2. ELİPTİK DÜZ DİŞLİ ÇARKLARIN TASARIMI

Silindir veya koni gibi cisimlerin tabanına eğik olarak kesilerek elde edilen yüzeyleri çevreleyen eğri elips olarak adlandırılmaktadır. Odak denilen iki noktadan, uzaklıkları toplamı sabit ve büyük eksenine eşit olan noktaların geometrik yerine eliptik koordinatör adı verilmektedir. Eliptik eğrilerin kutupsal denklemi aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

Eliptik eğrilerin kutupsal denklemi;

$$R_k = \frac{P_k}{1 - e_k \cos(k\phi)} \quad P_k, e_k \in \mathbf{R}, k=1,2,\dots,r \quad (1)$$

Şeklinde Eş. 1'de R , gerçek sayılar kümesidir ($k=1$ olduğunda adım eğrisi klasik elipstir ve tahrik dişli mili dönme merkezlerinden biriyle çakışır). Bu eşitlikle bulunan e_k değeri,

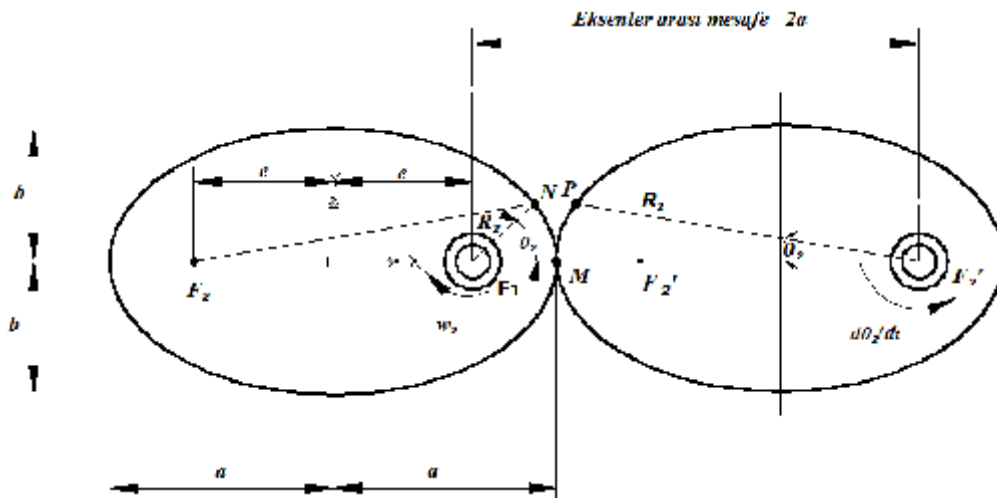
$$e_k = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (2)$$

eliptik eğrinin eksantrikliğini vermektedir (Eş. 2). Diğer taraftan,

$$P_k = a(1 - e_k^2) \quad \text{dir.} \quad (3)$$

k indisine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Eş. 3).

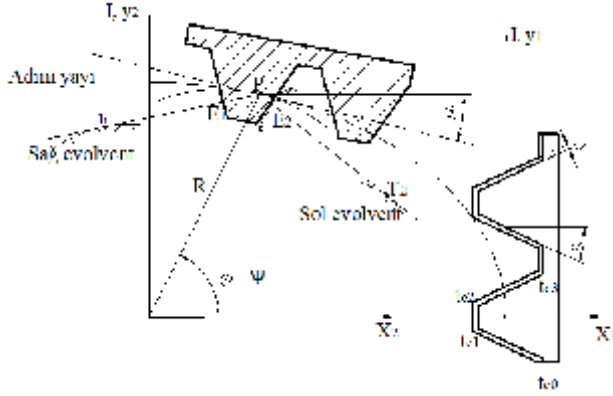
Eğri, R_k , yarıçapın k_{Rkmax} değerleri ve k_{Rkmin} değerlerine sahiptir. Adım eğrisi k_{Rkmax} ve k_{Rkmin} değerleri arasında $2k$ parçasına sahiptir, bunlar rotasyon ve/veya aynalama yoluyla birbirine dönüştürülebilmektedir. Yukarıdaki eşitliklerden elde edilen 2, 3 ve 4 loblu eliptik eğrilerin hazırlanan AutoLISP programı ile AutoCAD ortamında çıktıları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. İki özdeş elips.

eşitliklerinden bulunmaktadır. Bu eşitlikler kullanılarak AutoCAD ortamında çizilen elipsin evolventi Şekil 4.b’de verilmiştir.

Dişlerin temel evolvent profil eğrileri, kremayer tipli kesicinin dişlerinin normal profil rakamlarıyla belirlenebilmektedir. Normal hatları temas noktasındaki teğetsel hat ile çakışmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Kesicinin yuvarlandığı bölüm elipsi

CAD sistemlerinde bu yöntemle eliptik dişlilerin 90°'lik yaydaki diş profilleri elde edildikten sonra; taşı, döndür, kopyala ve aynala gibi standart tasarım komutları kullanılarak eliptik dişli çark elde edilebilmektedir. Şekil 5’de gösterilen Δ farkı, tel erozyonda tel yarı çapı ve kıvılcım aralığı mesafesi olarak prosesin kendisinden gelmektedir.

Kesicinin adım hattı, eliptik adım eğrisi üzerinde kaymadan yuvarlanmaktadır. Adım eğrisinin açısal konumu $\varphi = \psi$ kabul edildiğinde kesici takımın

adım çizgisi gerçekte, adım eğrisinin tanjantını oluşturmaktadır. Kremayer kesicinin dişlerinin S’inci köşe noktasının kompleks koordinatları,

$$w = (t_s - I \int_0^w \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \phi} \cdot \rho\right)^2} d\phi) \cdot e^{(I\mu)} + \rho \cdot e^{(I\psi)} \quad (9)$$

eşitliğiyle, teğetsel hattın eğim açısı;

$$\mu = \psi + \frac{\pi}{2} + \theta \quad (10)$$

eşitliğiyle, yarıçap vektörü ve teğetsel hattın arasındaki açı,

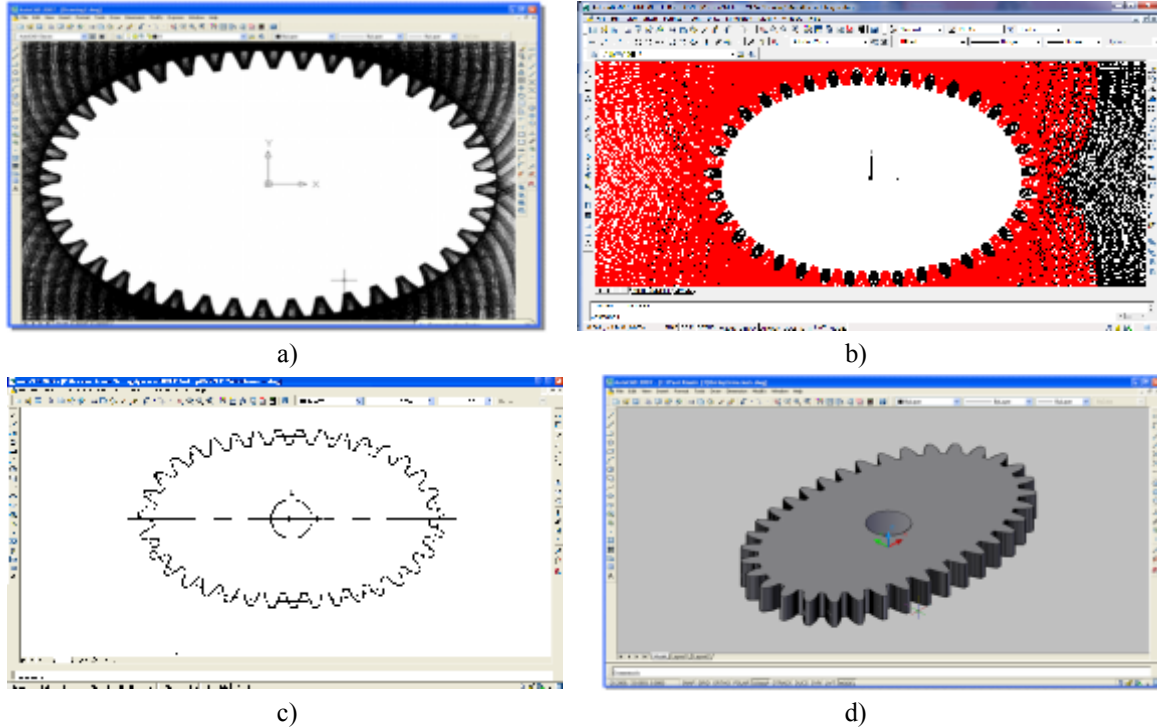
$$\theta = \arctan \left(\frac{\rho}{\frac{\partial}{\partial \phi} \rho} \right) \quad (11)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (3-6, 16).

Dişlinin modül hesabı ise;

$$m = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{k}} \sqrt{R^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \phi} \cdot R\right)^2} d\phi}{\xi \pi} \quad (12)$$

Eşitlikler, AutoLISP programlama diline aktarılmış, AutoCAD ortamında $a=32 \text{ mm}$, $b=53,33 \text{ mm}$, $Z=35$ diş ve $m=2,5$ olan eliptik dişlinin, AutoLISP aracılığıyla AutoCAD ortamında yuvarlanma yöntemine göre hazırlanan iki ve üç boyutlu çizimleri Şekil 6’da verilmiştir.

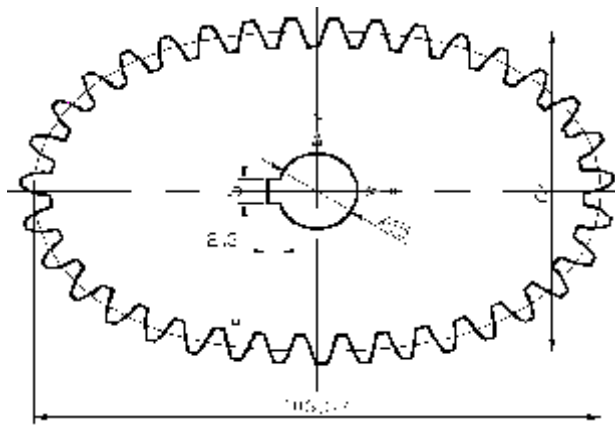


Şekil 6. Yuvarlanma yöntemine göre eliptik dişli çarkın sanal imalatı a) Yuvarlanma yöntemi, b) Karşılık dişlisi de bindirilmiş görüntü, c) Tel erozyon için hazırlanan iki boyutlu çizim, d) Katı model

3. ELİPTİK DÜZ DİŞLİ ÇARKLARIN İMALATI

Eliptik düz dişli çarklar, geleneksel imal yöntemleriyle üretilmesi oldukça zor olduğundan, CNC kumandasıyla donatılmış tel erozyon makinesinde işlenmiştir. Çalışma kapsamında, CNC tel erozyon makinesinde yer alan döndürme, kopyalama, ölçeklendirme ve makro programlama gibi APT fonksiyonları da kullanılmış ve eliptik düz dişli çarkın imalatı gerçekleştirilmiştir.

Tasarımda olduğu gibi elipsin a ve b değerleri, 2,5 standart modül değeri karşılanacak şekilde ($a=55,335$ mm, $b=32$ mm) ve diş sayısı 35 olarak ilk prototip imalat yapılmıştır. Eliptik düz dişli çarkın tek diş sayılı olmasına özen gösterilmiştir. Bu tek diş sayısına sahip eliptik dişli çiftinin tasarımında kesicilerin yuvarlanma başlangıç noktaları arasında 90° lik bir açı olması gerekliliğinden doğmuştur. Diş sayısı çift olan eliptik düz dişli çarklarda bu durum söz konusu değildir. Belirlenen dişli parametrelerine göre AutoCAD paket programı ortamında tasarımı yapılan eliptik düz dişli çark çiftinin genel boyutları Şekil 7.a'da verilmiştir.



Şekil 7. Diş sayısı 35 ve modülü 2.5 olan eliptik düz dişli çark çiftinin ölçüleri, b) Tel erozyon tezgahında kesimi gerçekleştirilen eliptik düz dişli çark çiftinin prototipi

AutoCAD paket programı ortamında tasarımı yapılan dişlilerin kesim kodları MasterCAM paket programı aracılığıyla türetilmiştir. Türetilen kodlar tel eroz-

yon tezgahına yüklenerek alüminyum malzemesinden 5 takım eliptik dişlinin prototipi elde edilmiştir. Prototipi gerçekleştirilen eliptik dişlilerin montajı bir platform üzerinde yapılmış ve karşılıklı çalışabilirlikleri incelenmiştir (Şekil 7.b). Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için standart modül değerleri ve diş sayıları tespit edilerek buna uygun değerlerde elipsin ana eksen uzunlukları yarısı olan a ve b ölçüleri tespit edilmiştir. Klasik dişli açma usulleri ile ileride açılacak dişlilerle bir mukayesede göz önünde bulundurularak modül değerlerinin standart modül olmasına özen gösterilmiştir.

Yuvarlanma yöntemine göre eliptik dişlilerin diş profilini oluşturan mini programdan elde edilen dişli parametrelerine ait değerler, Çizelge 1'de ve dişlilerin imal edildiği malzemenin özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Tasarım verileri MasterCAM programına aktarılan eliptik dişlilerin tel erozyon makinesinde işlenmesi için kodlar türetilmiş, 8 mm kalınlığında ve dişli çark yapımında yaygın olarak kullanılan Ç1040 malzemeden eliptik dişli çiftleri imal edilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel çalışmalar için kesilen dişli çiftlerine ait parametreler

Modül, m	Diş Sayısı, Z	Elipsin a değeri, mm	Elipsin b değeri, mm	a/b Oranı
1.50	36	32.770	19.630	1,669
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

Çizelge 2. Karbon çeliklerinin kimyasal özellikleri

KARBON ÇELİKLERİ KİMYASAL ÖZELLİKLERİ						
	C	Si	Mn	P	S	Kullanım Alanları
Ç 1035	0,32 0,38	0,15 0,35	0,60 0,90	0,040	0,050	Cıvatalar, taşıyıcı dingil, uskur mili, dişli çarklar yapımında. İndüksiyon ve alevle sertleştirilebilir.
Ç 1040	0,37 0,44	0,15 0,35	0,60 0,90	0,040	0,050	Transmisyon milleri, raylar, dişliler vs. yapımında. İndüksiyon ve alevle sertleştirilebilir.
Ç 1045	0,43 0,50	0,15 0,30	0,60 0,90	0,040	0,050	Dişli çarklar, kancalar, çapa, kazma, kürek vs. yapımında. İndüksiyon ve alevle sertleştirilebilir.

Ç1040 malzemeden olan ve boyutları 600 x 375 mm değerinde bir plaka, yüzey frezeleme, taşlama ve 860 °C'de suda serleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Tel erozyonda işleme öncesi ölçülen sertlikler 197 HV (kgf/mm^2) olarak tespit edilmiştir. Bu sertlik değerlerinin, uygulamadaki sertlik değerleri ile uyumlu olması düşünülmüştür. İmal edilen beş farklı modüldeki eliptik dişli çiftleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Deneyel çalışmalar için üretilen eliptik düz dişli çark çiftleri.

Eliptik düz dişli çark çiftlerinin hepsinde, ileride yapılacak deneysel çalışmalarda kolaylık sağlaması ve referans olması açısından, 5 mm genişliğinde ve 2,3 mm derinliğinde kama kanallı silindirik göbekler, CAD ortamında tasarlanmış ve tel erozyon makinesinde tasarlanan ölçüde işlenmiştir. Tel erozyon tezgahında, her bir eliptik düz dişli çarkın önce kamalı göbeği, sonra

bölüm eliptik hattı boyunca oluşan dişler işlenmiştir. Dolayısıyla eliptik düz dişli çarkların dönme merkezinden geçen eksen ile, eliptik düz dişlilerin yanaklarını oluşturan düzlemlerin paralel olması sağlanmıştır. Ayrıca kesme sonunda dişli çarkların diş yüzeylerinin pürüzlülükleri işleme kalitesinin tespiti için ölçülmüştür. Pürüzlülük ölçümü dişli çark bölüm dairesi üzerinde Mahr Perthometer M1 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak tek diş yüzeyinde üç kez yapılmış ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri 1,5 Ra (μm) olarak hesaplanmıştır. Bu değer, elde edilen taşlanmış yüzey kalitesine sahip dişlilerin yanak pürüzlülükleriyle kıyaslandığında, oldukça pürüzsüz bir yüzeyin elde edilmiş olduğu görülmüştür.

Üretilen eliptik düz dişli çarkların eksantriklik (çalışma salgısı) değerlerinin tespit edilebilmesi amacıyla bir deney aparatı tasarlanmış ve ölçülerine uygun olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Deney aparatında düz sehpa üzerine taşlanmış bir pleyt yerleştirilmiş ve bu pleyt üzerine döndüren dişli çark mili taşlanarak ve bir çift bilyalı rulman ile yataklanarak bağlanmıştır. Döndürülen dişli çark mili de taşlanarak bir çift bilyalı rulman ile yataklanmış ve pleyt üzerine tespit edilen dört adet bilyalı doğrusal kızaklar üzerine taşlanmış bir tabla monte edilerek doğrusal ve boşluksuz hareketli mekanizma oluşturulmuştur. Hareketli tabla, çift taraftan yay ile pleyt üzerine monte edilmiştir.

Eliptik dişli çarkların salgı (eksantriklik) deneyi geliştirilen deney aparatında 1/1000 hassasiyetinde dijital komparatör kullanılarak yapılmıştır (Şekil 9.a). Modül değerlerine bağlı olarak en büyük ve en küçük sapma değerleri Şekil 9.b'de verilmiştir.



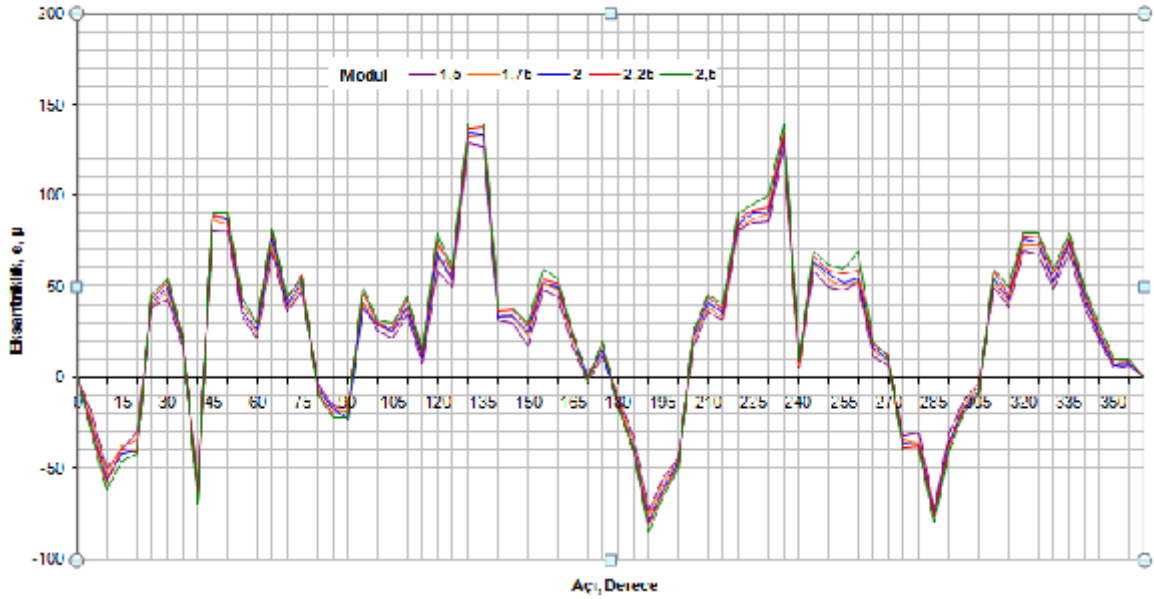
(a)

Modül değerleri	En küçük eksantriklik, e_{\min} , μm	En büyük eksantriklik, e_{\max} , μm	Eksantriklik farkı, μm
1,5	-2	129	131
1,75	-1	133	134
2	-6	135	141
2,25	-8	138	146

(b)

Şekil 9. a) Eliptik düz dişli çark eksantriklik deney düzeneği, b) Ölçülen sapma değerleri

MODÜL ELİPTİK DİŞLİ İÇİN EKSANTRİKLİK DENEY SONUÇLARI



Şekil 10. İmal edilen eliptik düz dişli çarklara ait eksantriklik grafiği

Beş farklı modülde ve diş sayıları farklı olarak imal edilen eliptik düz dişli çarklara ait eksantriklik deney sonuçlarına göre oluşturulan grafiğin (Şekil 10) incelenmesinden anlaşılacağı üzere sistematik olarak belli açılarda eksantriklik değerlerinin artıp azaldığı görülmüştür.

İmal edilen beş farklı modül ve diş sayısına sahip eliptik düz dişli çarklara ait elde edilen en büyük sapmayı gösteren değerlerin dikkate alındığı grafik Şekil 11'de verilmiştir. Bu grafik oluşturulurken en büyük pozitif değerle en büyük negatif değer toplanmış

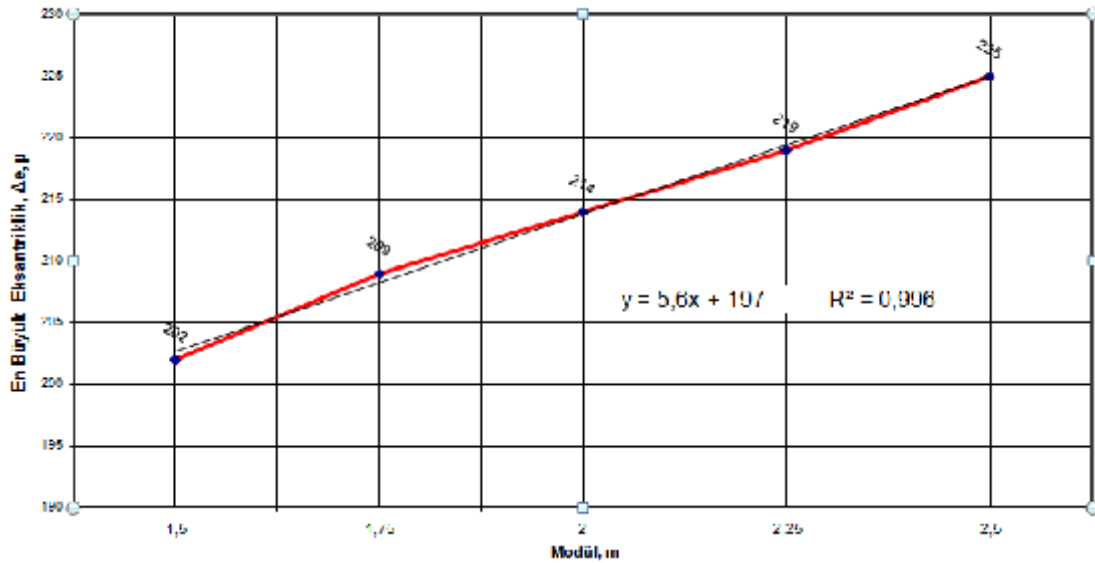
ve en büyük sapma miktarı bulunmuştur. Bu grafiğin incelenmesinden de anlaşılacağı üzere modül değeri büyüdükçe eksantriklik oranında artış olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Mekanik sistemlerin vazgeçilmez elamanları olan dişli çarkların, klasik dairesel modelleri yerine bu çalışmada, dairesel olmayan dişli çarklar ailesinin en önemli bireyi olan eliptik düz dişli çiftlerinin tasarımı, imalatı ve çalışabilirlik testleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma ile hem ticari hem de akademik düzeyde eliptik dişli çarkların tasarım ve imalatına uluslar

En Büyük Eksantriklik Grafiği



Şekil 11. Modül'e karşılık gelen eksantrikliğinin en büyük değerleri

arası kabul görmüş bir yaklaşım uygulanmış, eliptik dişlilerin tasarım ve imalatının parametrik olarak gerçekleştirilmesi bilgi ve beceri alt yapısı hazırlanmıştır.

Eliptik düz dişli çarkların tasarım eğrilerinin kutupsal denklemlerinden ve kompleks sayılardan faydalanılarak, "AutoLISP" dili aracılığıyla tasarım eşitliklerinin CAD ortamında programlanabilir olması sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında istenilen diş sayısı ve modülde eliptik düz dişli çarkların tasarımının AutoCAD ortamında kullanıcı etkileşimi olmaksızın elde edilmesi sağlanmış, üretimi istenilen her eliptik düz dişli çarkın imalatının gerçekleştirilebileceği ispat edilmiştir. Geleneksel olmayan yöntemlerden tel erozyon tezgâhı ile üretimin yapılabilir olması, metal ve plastik ekstrüzyon, plastik enjeksiyon yöntemiyle eliptik düz dişli çark üretiminin önü açılmıştır.

Yukarıda ifade edilen genel çıktıların dışında çalışmaya özgü elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- İmal edilen dişlilerin yüzey pürüzlülüğü, geleneksel yöntemlerle elde edilen dişlilerin yüzey pürüzlülüğüne nazaran oldukça düşüktür ($R_a=1,5 \mu\text{m}$). Bu değer, CNC tel erozyon işlemi sonrasında önceden sertleştirilmiş yapıdaki dişlilerin doğrudan hareket ve hız sistemlerinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir.
- Eliptik düz dişli çiftlerinin tüm modül değerlerinde ve diş sayılarında benzer sapma grafikleri oluşturduğu görülmüştür. Bu, tasarım ve imalat hatalarının sistematik olduğunu göstermektedir. En büyük aksenal sapma ile en küçük aksenal sapma arasındaki farkın $146 \mu\text{m}$ olması, tasarlanan ve imal edilen eliptik düz dişli çarkların çalışabilir olduğunun göstergesi olarak değerlendirilmiştir.
- Silindirik dişliler için kabul edilen çalışma boşluğu üst sınırının $0,025\text{m}$ olduğu dikkate alındığında, üretilen tüm eliptik dişlilerin çalışma boşluğunun bu sınırın altında kaldığı tespit edilmiştir.
- Aksenal salgı (eksantriklik) miktarının en büyük değerinin modüle bağlı değişiminin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Modül artışına bağlı olarak $y=5,6x+197$ ifadesi aracılığıyla muhtemel eksantriklik değerlerinin bulunması imkanı getirilmiştir.

Literatür çalışmalarından hareketle, eliptik adımlı eğrilerin kinematik analizine ve bilgisayar destekli tasarımı üzerine yapılacak çalışmaların ilerleyen yıllarda yoğunluğunun artması beklenmektedir.

5. KAYNAKLAR

- 1- Lai M. J., "An Investigation of The Dynamic Behaviour of Systems With, Noncircular Gears", *Cnkijournal*, Beijing, 377-388, (1996)
- 2- Litvin, F. L. and Varsimashvili, R. S., "Cutting Noncircular Bevel Gears by the Intermittent Generating

- Method", *Machines and Tooling*, Chicago, 31-35, (1970)
- 3- Laczik, B., "Non-Circular Gears with Logarithmic Pitch Curve", *A Dunaujvarosi Fiiskola Kozlemenyei*, Dunaujvaros, 211-229, (2006)
- 4- Laczik, B., "Valtozo Atteteló Fogaskerekek Tervezese", Gyartasa Es Meretellenirzese, Gepgyartas, Budapest, Cilt 4, 17-21, (2007)
- 5- Laczik B., "Design and Manufacturing of Non-Circular Gears by Given Transfer Function", Proc. of ICT 2007 Miskolc, 101-109, (2007)
- 6- Laczik B., "Centroids Mechanizmusok Atteteli Fuggvenyei", A Dunaujvarosi Fiiskola Kozlemenyei, Unaujvaros, 70-75, (2007)
- 7- Seireg, A., Shah, S. C. and Khazekhan, K., "Dynamic Stresses in Gear Teeth Under Conditions of Sustained Oscillations Through the Backlash" *Proc. of the 4th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, 205-208, (1975)
- 8- Mundo, D., "Geometric design of planetary gear train with non-circular gears", *Mechanism and Machine Theory Elsevier Ltd*, 456-472, (2006)
- 9- Tan Weiming., Hu Chibing., Wei Zhouhon., "Simultaneous-Control Structures of CNC System For Hobbing Non-Circular Gears", *Mechanical Engineering*, China, 42-44, (1998)
- 10- Reinhart, W. R., Ferguson, R. J., and Kerr, J. H., "Noncircular Gear Tooth Bending Strength by Finite Element Analysis" *Trans. of the ASME*, Cilt 6, No. 2, 71-77, (1980-1981)
- 11- Rowan, M. J. et al., "Building the New Tank Range Finder" *American Machinist*, 95-99, (1951)
- 12- Laczik, B., "Valtozo atteteló fogaskerekek", *Mószaki Magazin*, Budapest, 68-72, (2003)
- 13- Laczik, B., Ciklois Bolygomó Fogazat Kapcsolodasa, *A Dunaujvarosi Fiiskola Kozlemenyei*, Dunaujvaros, 281-291, (2004)
- 14- Artobolevsky, I.I., "Mechanisms in Modern Engineering Design" *Gear Mechanisms*, Mir Publisher, Moscow, 85-90, (1977)
- 15- Cunningham, F. E. and Cunningham, D. S., "Rediscovering the Noncircular Gear" *Machine Design*, 80-85, (1973)
- 16- Laczik B., "Involute Profile of Non-Circular Gears", *World Congress in Mech. and Machine Sciences*, Tianjin, China, 994-705, (2003)
- 17- Freudenstein, F. and Primrose, E. J., "On the Synthesis of Closed, Twin, Noncircular Cylindrical Gears" *The 4th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, Canada, 93-96, (1975)
- 18- Doege, E., Schaprian, M., "Unrunde Zahnrad für Pressenantriebe", Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Universität Hannover, 73-82, (2001)
- 19- Chang, S.L., Tsay, C.B., Wu, L.I., "Mathematical Model and Undercutting Analysis of Elliptical Gears Generated by Rack Cutters" *Mech. And Machine Theory*, Cilt 31, no. 7, 879-890, (1996)
- 20- Litvin, F.L., "Gear Geometry and Applied Theory" *PTR Prentice-Hall*, New Jersey, 300-400, 1994
- 21- Dooner, D. B., "Use of Noncircular Gears to Reduce Torque and Speed Fluctuations in Rotating Shafts", *Transaction of the ASME Journal of Mechanical*

- Design*, Cilt. 119, 299-308, (1997)
- 22- Danieli, G.A., Mundo, D., "New Developments in a Variable-Radius Gear Using Constant Pressure Angle Teeth", *Mechanism and Machine Theory*, Cilt 40, 203-217 II, (2005)
- 23- Egerszegi, J., Laczik B., "Nem Kor Alaku Fogaskerekek A Fegyvertechnikaban", ZMNE Bolyai J. Katonai Mőszaki Kar, Budapest, 286-295, (2002)
- 24- Ogawa, K., Yokoyama, Y., and Koshiha, T., "Studies on the Noncircular Planetary Gear Mechanisms with Nonuniform Motion", *Bull of the ASME*, 1433-1442, (1973)
- 25- Cunningham, F. W., "Noncircular Gears", *Trans. of the Fifth Conf. on Mechanisms, Purdue Univ.*, West Lafayette, IN, 96-103, (1958)
- 26- Mckinley J.R., Crane C. III., Dooner D. B., Kammath J.-F. "Planar Motion Generation Incorporating a 6-Link Mechanism and Non-Circular Elements" *ASME 29th Mechanisms and Robotics Conference*, 393-403, (2005)
- 27- Olsson, U., "Noncircular Cylindrical Gears", *Acta Polytechnics Mechanical Engineering Series*, Vol. 2, Stockholm, Sweden, 10-15, (1953)
- 28- Dooner, D. B., , Seireg, A., "The Kinematic Geometry of Gearing: A Concurrent Engineering Approach", *Wiley Series in Design Engineering*, New York, 123-125, (1995)
- 29- Kowalczyk L, Urbanek S., "The Geometry and Kinematics of a Toothed Gear of Variable Motion", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Poland,60-62, (2003)
- 30- Litvin, F.L., "Theory of Gearing" *NASA Publication*, Washington D.C., RP 1212, (1989)
- 31- Litvin, F. L., "Noncircular Gears, 2nd ed." *Gos Tech Isdat*, Russian, 47-50, (1956)
- 32- Cunningham, F. W., "Designing and Using Noncircular Gears to Generate Mathematical Functions," *Machine Design*, 161-164, (1959)
- 33- Cunningham, F. E., "Elliptical Gears", *ASME Paper*, 68-70, (1970)
- 34- Dooner, D.B., "Effects in gear-type continuously variable transmissions", *Journal of Automobile Engineering*, Cilt 212, no. 6, 463-478, (1998)
- 35- Bloomfield, B., "Noncircular Gears" *Product Engineering*, 59-66, (1960)
- 36- Dooner, D. B. and Seireg, A. A., "The Kinematic Geometry of Gearing, Wiley Series in Design Engineering" *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, (1995)
- 37- Kochev, I. S., "Full Shaking Moment Balancing of Planar Linkages by a Prescribed Input Speed Fluctuation," *Mech. Mach. Theory*, Cilt. 25, No. 4, 459-466, (1990)
- 38- Seireg, A. and Dooner, D. B., "A Concurrent Engineering Approach to the Synthesis of Toothed Bodies" *Inter. Congress-Gear Transmissions 95*, Sofia, Bulgaria, 165-170, (1995)
- 39- Laczik, B., "Re-Discovery of the Non-Circular Gears", *Proc. of Manufacturing-2006 Conference*, Budapest, 8-14, (2006)