

Yağ Pompasında Kullanılan Sikloidal Dişlilerin Parmak Freze ile CNC Freze Tezgâhlarında İmalatının Araştırılması

Cihan ÖZEL¹, Yunus ORTAÇ¹, Turan GÜRGENÇ²

¹Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ

²Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 23119 ELAZIĞ
cozel@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 28.02.2017; Kabul/Accepted: 06.06.2017)

Özet

Bu çalışmada, hidrolik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan sikloidal dişlili yağ pompalarındaki iç rotorun, geleneksel imalat yöntemlerindeki zorlukları ortadan kaldırmak için CNC freze tezgâhlarında imalatı amaçlandı. Bunun için radyal kesme yöntemi belirlendi. Bu yöntemle göre, sikloidal dişlileri işlemek için imalat denklemleri türetilti. Bu dişlilerin CAM kodlarını elde etmek için bir C++ programı geliştirildi. Bu program ile otomatik CAM kodlarını oluşturma, G ve M kodları kullanılarak yapıldı. Bu CAM kodları ile Dyna 4M CNC freze tezgâhında çeşitli ölçülerde sikloidal dişliler imal edildi. Bu yöntemle imal edilen sikloidal dişlinin diş ölçüleri, elektronik bir kumpas ile ölçüldü. Daha sonra, bu ölçüler ile matematiksel bağıntılar kullanılarak hesaplanan diş ölçüleri bir tabloda karşılaştırıldı. Bulunan sonuçlara göre, bu dişlilerin CNC freze tezgâhlarında imal edilebilecekleri görüldü ve bu tezgâhlarda sikloidal dişlilerin imalatlarının genel bir değerlendirilmesi yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Sikloidal dişli pompa, İç rotor, İşleme.

Investigation of the Manufacturing of Cycloidal Gears Used in Oil Pumps with the End Mill in CNC Milling Machines

Abstract

In this study, the manufacturing of the internal rotor in the cycloidal gear oil pumps widely used in the hydraulic industry was aimed to be performed in CNC milling machines to remove the difficulties in conventional manufacturing methods. For this purpose, the radial cutting method was determined. According to this method, manufacturing equations were derived for machining cycloidal gears. A C++ program was developed to obtain the CAM codes of these gears. Automatic CAM coding was performed with this program using G and M codes. The cycloidal gears of various dimensions were manufactured with these CAM codes in Dyna 4M CNC milling machine. Tooth measurements of the cycloidal gear manufactured with this method were measured with an electronic calliper. Then, the tooth measurements calculated using mathematical relations were compared with these measurements in a table. According to the results obtained, it was observed that these gears could be manufactured in CNC milling machines, and a general evaluation of the manufacturing of the cycloidal gears in these machines was performed.

Keywords: Cycloidal gear pump, Inner rotor, Machining.

1. Giriş

Sikloidal dişliler hidrolik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle bu taşıma kabiliyetlerine sahiptirler. Diş profili boyunca adhezyon aşınmasının yayılışı, evolvent profiline göre çok daha düzgündür ve çok küçük diş sayılarında bile alt kesilme olayı meydana gelmez. Yine bilindiği gibi yüksek tahvil oranlarına ihtiyaç duyulan çoğu makinelerde,

dişlilerin, diş profilleri birbirinden farklı iki eğriden oluştuğundan hatasız bir diş profili açmak güçtür [1]. Sikloidal dişliler, diğer dişlilere göre daha büyük yüzey basınçlarını yüksek hız redüktörleri kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak en küçük dişli mekanizması olarak sikloidal planet dişli mekanizmasının olduğu bilinir [2]. Bu tür dişli sistemlerinin avantajı şöyle sıralanabilir; bir turda yüksek tahvil oranı, yüksek kavrama oranı, millerin eş eksenli olması ve

yuvarlanma sürtünmesi kafes içerisinde meydana geldiğinden enerji kaybı düşüktür [3-6]. Bütün bu üstün özelliklere sahip olan sikloidal dişliler işlenirken özel kesici ve takım tezgâhlarına ihtiyaç duyulması, imalat sektöründe karşılaşılan başlıca sorunlardır ve bu dişlilerin istenilen hassasiyette imal edilememesinden dolayı endüstrideki kullanım alanı yeterince yaygınlaşmamıştır [7 ve 8]. Bu durum özellikle küçük atölyeler için önemli bir problem oluşturmaktadır. Çünkü herhangi bir nedenle imal edilmesi gereken sikloidal dişliler küçük atölyelerde hassas bir şekilde işlenememektedir.

Son zamanlarda yapılan çalışmaların birinde, sikloidal bir pompanın rotor profillerinin geometrisi değiştirilmiş ve diş temas noktalarının analizleri yapılmıştır [9]. Başka bir çalışmada, otomobillerde kullanılan sikloidal dişli yağ pompalarının PM rotorlarındaki aşınmalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile malzeme özellikleri optimize edilerek yüksek dirençli PM rotorları ekonomik olarak üretilmiştir [10]. Malhatra ve arkadaşı, bir sikloidal hız redüktörünün teorik verimini ve bu redüktörün güç iletimini analiz ettiler. Ayrıca bu tip hız redüktörlerinin optimum tasarımını da yaptılar [11]. Jordan ve arkadaşı, yapmış oldukları çalışmada, hiposikloidal iç ve dış polihedral yüzeylerin torna tezgâhında, matkap tezgâhında ve freze tezgâhında işlenebilmesi için yeni bir takım geliştirmiş ve bu takımın geometrisini sunmuşlardır [12 ve 13]. Faydor ve arkadaşları, sikloidal pompa ve sonsuz vida çarkı için diş yüzeylerinin zarf oluşumlarını analitik olarak inceleyip sonuçları grafiksel olarak göstermişlerdir [14]. S. M. Shraibman tarafından yapılan çalışmada, çeşitli üretim tarzlarında diş kesme operasyonlarının istatistiki planı araştırılmıştır [15]. G. Elber ve E. Cohen, tarafından yapılan çalışmada, çeşitli yüzey modelleri için takım yollarını oluşturmaya yönelik bir algoritma geliştirmişlerdir [16]. L. P. Zhang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, kalıp yüzeyini mevcut uygulamalardan farklı bir şekilde modifiye ederek, 3 eksenli CNC freze tezgâhında küresel uçlu freze esas alınarak takım yolunun yeniden türetilmesi için bir algoritma önermişlerdir. Önermiş oldukları bu algoritmayı, çeşitli parçaların imalatlarında denemişler ve algoritmanın güvenilir olduğunu göstermişlerdir

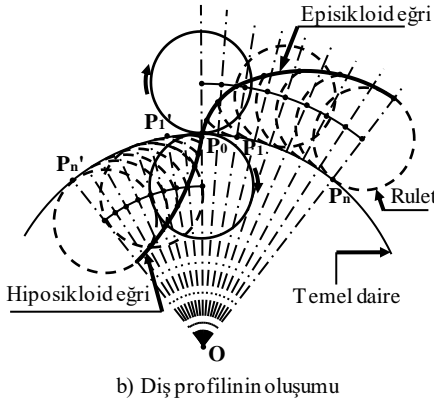
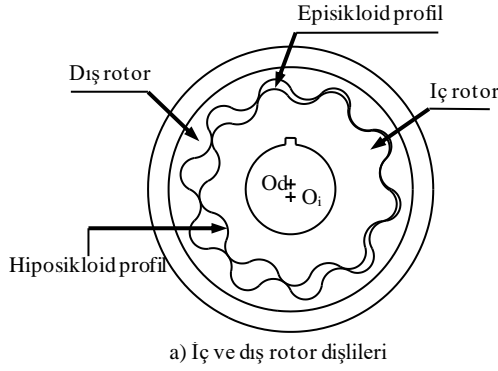
[17]. Özel C. ve arkadaşları, düz konik dişlilerin CNC freze tezgâhlarında imalatlarını araştırmışlar ve geliştirmiş oldukları CAM programı ile dik işlem merkezli CNC freze tezgâhlarında düz konik dişlilerin imalatlarını yapmışlardır [18]. Özel C., tarafından yapılan diğer çalışmada ise, CNC frezede düz dişlilerin üretim süreleri ve üretim hataları üzerine araştırmalar yapılmıştır [19 ve 20]. C. Özel ve Y. Ortaç, sikloidal dişlinin diş profilindeki kesilme hatalarını veren parametrik ifadeleri türetmişler ve dişlinin tasarım parametrelerine göre diş profili hatalarını MATLAB ortamında incelemişlerdir [21].

Bu çalışmada ise, piyasalardaki sikloidal dişli imalatlarına bir katkı sağlamak için bu tür dişlilerin işlenmesinde kullanılan özel kesici, aparat ve takım tezgâhlarına gerek kalmadan, parmak freze ile dik işlem merkezli CNC freze tezgâhında imalatları araştırılmıştır.

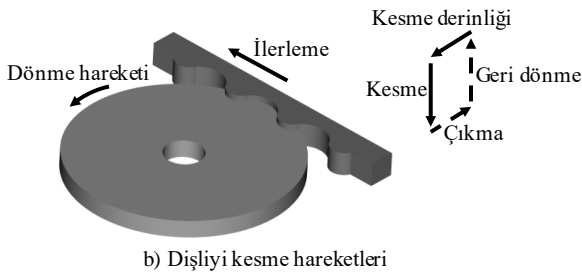
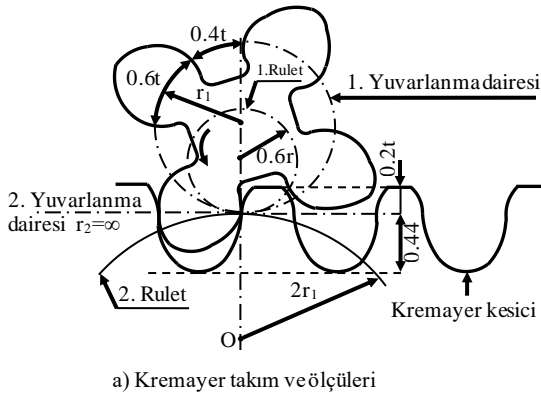
2. Materyal ve Yöntem

2.1. CNC freze tezgâhında sikloidal dişlilerin kesilmesi

Hidrolik endüstrisinde sikloidal dişli yağ pompaları iç ve dış rotor birlikte çalışarak yağ pompalama işlemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 1a). Bilindiği gibi, sikloidal dişlinin diş profilleri episikloid ve hiposikloid eğrilerden oluşmaktadır (Şekil 1b). Endüstride sikloidal dişliler genellikle yuvarlanma yöntemi ile işlenirler. Bu yöntem kullanılarak sikloidal dişliler işlenirken özel takım tezgâhlarına ve özel kesicilere ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Bu yöntemde kullanılan kremayer takımın, imal edilecek dişlinin tasarım parametrelerine uygun olması gerekir (Şekil 2a). Bu kesici ile diş açma işleminde dişli taslağı kendi eksenine etrafında dönerken, kremayer kesici aşağı-yukarı ve aksel olarak da ilerleme hareketi yaparak dişli taslağını keser (Şekil 2b) [7].

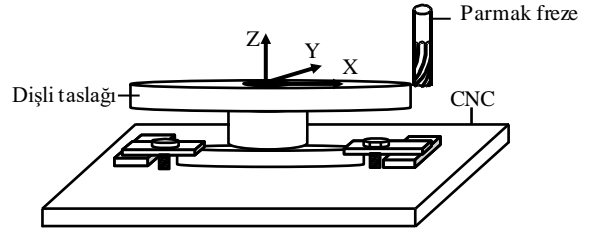


Şekil 1. Sikloidal dişli yağ pompası



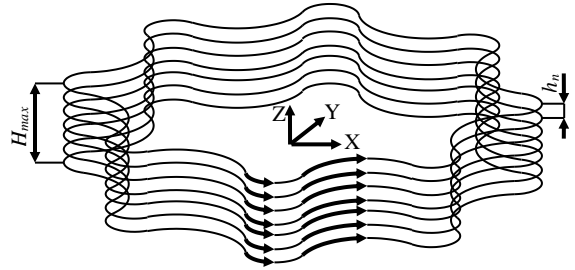
Şekil 2. Kremayer kesici ile sikloidal dişlinin işlenmesi

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen zorlukları ortadan kaldırmak için, yağ pompasının iç rotor dişlisinin CNC freze tezgâhında parmak freze ile imalatı amaçlandı. Dişlinin imalatı yapılırken kesici takımın aynı anda üç eksen üzerinde hareket edebildiği dik işlem merkezli Dyna 4M CNC freze tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 3). Bu tezgâhta sikloidal dişliyi işlemek için dişli taslağı tezgâh tablasına bir divizör, mengene veya direkt olarak cıvata ve pabuçlarla bağlanabilir (Şekil 3).



Şekil 3. Dişli taslağının CNC freze tezgâhına bağlanması

Sikloidal dişli taslağının, Şekil 3 deki gibi dik işlem merkezli CNC freze tezgâhının tablasına bağlanması durumunda, parmak freze dişli taslağını Z eksenı boyunca X-Y düzlemine paralel düzlemler boyunca radyal olarak keser (Şekil 4).



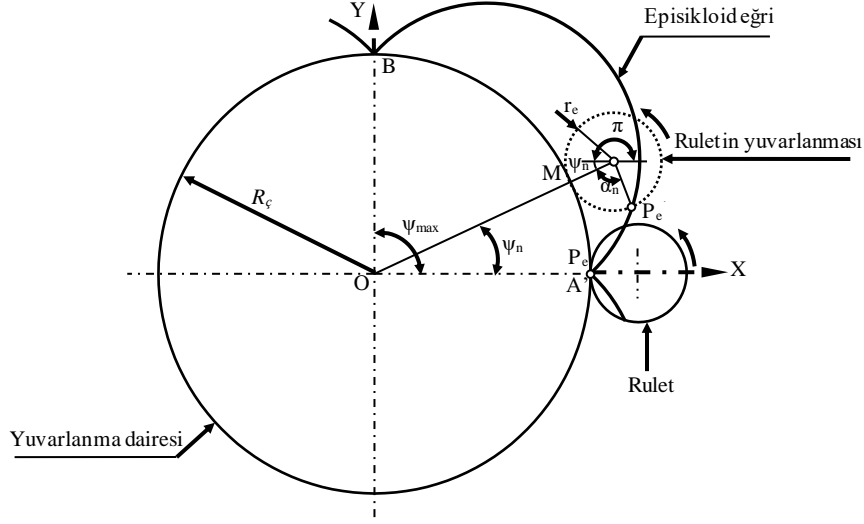
Şekil 4. Radyal işleme için takım yolları

Burada, iki tabaka arasındaki h_n yüksekliği, parmak frezenin kesebileceği maksimum talaş kesme kalınlığı ve H_{max} ise sikloidal dişlinin dış boyunun uzunluğu olarak tanımlandı. Bu yöntemde göre, dişliyi işleyebilmek için sikloidal dişlinin dış profil eğrilerinin oluşum prensipleri dikkate alınarak, parmak frezenin parametrik takım yolu denklemleri aşağıdaki bölümde verildi.

2.2. Sikloidal dişlinin dış profil eğrileri

Bilindiği gibi, sikloidal dişlilerin dış üstü profili episikloid bir eğridir. Episikloid eğri bir

dairenin üzerinde kaymadan yuvarlanan bir başka dairenin (rulet) üzerindeki bir P_e noktasının takip ettiği yörüngedir (Şekil 5).



Şekil 5. Episikloid dış profilinin oluşumu

Şekil 5' de ruletin üzerindeki P_e noktası, rulet yuvarlanmaya başlamadan önce rulet üzerindeki bir noktadır. Ruletin yuvarlanma dairesinin üst tarafında yuvarlanması sonucu, P_e' noktasının koordinatları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n + r_e \cdot \cos(\pi + \psi_n + \alpha_n) \quad (1)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n + r_e \cdot \sin(\pi + \psi_n + \alpha_n) \quad (2)$$

Burada, (1) ve (2) denklemleri düzenlenirse aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n - r_e \cdot \cos(\psi_n + \alpha_n) \quad (3)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n - r_e \cdot \sin(\psi_n + \alpha_n) \quad (4)$$

Yine Şekil 5' den aşağıdaki (5) ifadesi yazılabilir.

$$R_ç \cdot \psi_n = r_e \cdot \alpha_n \quad (5)$$

Bu eşitlikten de (6) ifadesi yazılabilir.

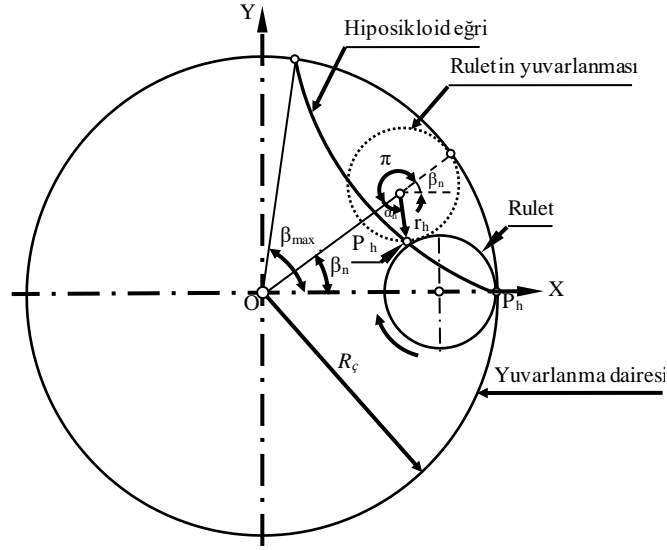
$$\alpha_n = \frac{R_ç \cdot \psi_n}{r_e} \quad (6)$$

Bulunan bu ifadeye göre, (3 ve 4) denklemleri düzenlenirse, episikloid profil için parametrik denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$xe_n = (R_ç + r_e) \cdot \cos \psi_n - r_e \cdot \cos \left[\frac{(R_ç + r_e)}{r_e} \cdot \psi_n \right] \quad (7)$$

$$ye_n = (R_ç + r_e) \cdot \sin \psi_n - r_e \cdot \sin \left[\frac{(R_ç + r_e)}{r_e} \cdot \psi_n \right] \quad (8)$$

Sikloidal dişlilerin dış dibi profili ise hiposikloid bir eğridir. Bilindiği gibi hiposikloid eğri, bir dairenin iç kısmında kaymadan yuvarlanan bir başka dairenin (rulet) üzerindeki bir noktanın oluşturduğu eğridir. Şekil 6' da rulet üzerindeki P_h noktası, rulet yuvarlanmaya başlamadan önce onun üzerindeki bir noktadır.



Şekil 6. Hiposikloid dış profiline oluşumu

Bu durumda, P_h ' noktasının koordinatları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \cos \beta_n + r_h \cdot \cos(\beta_n + \pi + \alpha_n) \quad (9)$$

$$y_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \sin \beta_n + r_h \cdot \sin(\beta_n + \pi + \alpha_n) \quad (10)$$

Burada (9) ve (10) denklemleri düzenlenirse, aşağıdaki (11) ve (12) denklemleri yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \cos \beta_n - r_h \cdot \cos(\beta_n + \alpha_n) \quad (11)$$

$$y_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \sin \beta_n - r_h \cdot \sin(\beta_n + \alpha_n) \quad (12)$$

Yine Şekil 6' dan aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$R_c \cdot \beta_n = r_h \cdot (\pi - \alpha_n) \quad (13)$$

$$\alpha_n = \pi - \frac{R_c \cdot \beta_n}{r_h} \quad (14)$$

Bulunan bu ifadeye göre (11) ve (12) denklemleri düzenlenirse, hiposikloid profil için parametrik denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \cos \beta_n + r_h \cdot \cos \left[\frac{(R_c - r_h)}{r_h} \cdot \beta_n \right] \quad (15)$$

$$y_{h_n} = (R_c - r_h) \cdot \sin \beta_n - r_h \cdot \sin \left[\frac{(R_c - r_h)}{r_h} \cdot \beta_n \right] \quad (16)$$

2.3. Sikloidal dişlinin takım yolu denklemleri

(7), (8), (15) ve (16) denklemlerine göre sikloidal dişli işlenirse, işlenmek istenen sikloidal dişliden farklı boyutlarda bir sikloidal dişli imal edilir. Çünkü bu ifadeler, takım yarıçapı eklenmemiştir. Bu ifadeler, Şekil 7' den aşağıdaki gibi yazılabilir [21].

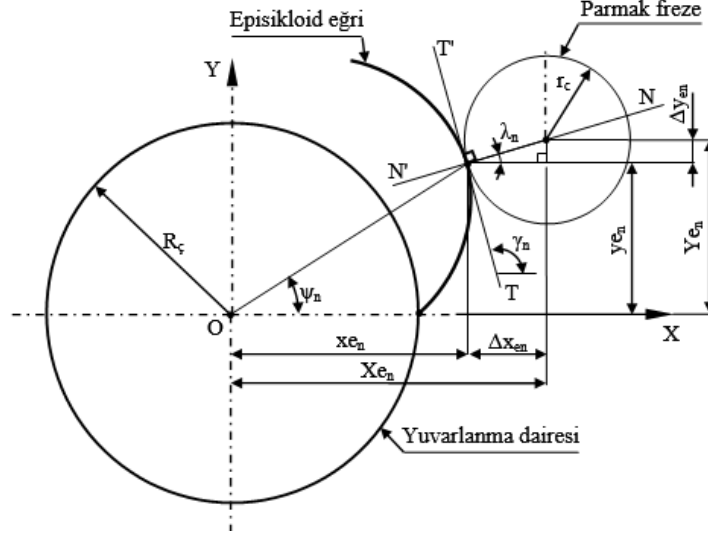
$$X_{e_n} = x_{e_n} + \Delta x_n \quad (17)$$

$$Y_{e_n} = y_{e_n} + \Delta y_n \quad (18)$$

Yine Şekil 7' den Δx_n ve Δy_n için aşağıdaki ifadeler de yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \lambda_n \quad (19)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \lambda_n \quad (20)$$



Şekil 7. Parmak frezenin episikloid eğri üzerindeki konumu (üst görünüş)

(19) ve (20) denklemlerindeki λ_n açısı, episikloid profil için türetilen (7) ve (8) denklemlerinin ψ_n açısına göre türevleri alınarak hesaplanabilir.

$$\frac{dx_{e_n}}{d\psi_n} = -(R_c + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_c + r_e) \cdot \sin\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right) \quad (21)$$

$$\frac{dy_{e_n}}{d\psi_n} = (R_c + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_c + r_e) \cdot \cos\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right) \quad (22)$$

Bu denklemlerden, Şekil 7' deki T-T' teğetinin eğimi için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$m_{te} = \tan \gamma_n = \frac{dy_{e_n}}{dx_{e_n}} \quad (23)$$

Bilindiği gibi, teğetin eğimi ile normalin eğimi arasındaki ilişki, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m_t \cdot m_n = -1 \quad (24)$$

Bu durumda, (23) ve (24) ifadelerinden normalin eğimi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$m_n = \tan \lambda_n = -\frac{dx_{e_n}}{dy_{e_n}} \quad (25)$$

λ_n açısı ise (25) ifadesinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\lambda_n = \tan^{-1}\left(-\frac{dx_{e_n}}{dy_{e_n}}\right) \quad (26)$$

Yine (21) ve (22) ifadeleri, (26) denkleminde yerine yazılırsa λ_n açısı için aşağıdaki denklem türetilir.

$$\lambda_n = \tan^{-1}\left(\frac{-(R_c + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_c + r_e) \cdot \sin\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right)}{(R_c + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_c + r_e) \cdot \cos\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right)}\right) \quad (27)$$

(27) ifadesi, (19) ve (20) denklemlerinde yazılırsa Δx ve Δy ifadeleri sırası ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_c + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_c + r_e) \cdot \sin\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right)}{(R_c + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_c + r_e) \cdot \cos\left(\frac{R_c + r_e}{r_e} \cdot \psi_n\right)} \right) \right] \quad (28)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (29)$$

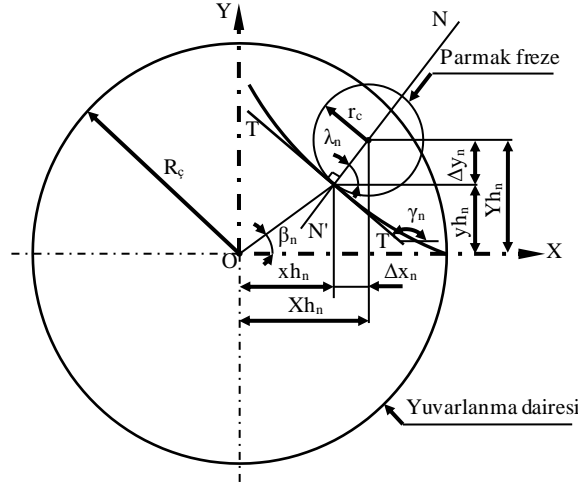
$$y_{e_n} = y_{e_n} + r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (31)$$

(28) ve (29) ifadeleri de, (17) ve (18) denklemlerinde yazılır ise episikloid profil için takım yolu denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$X_{e_n} = x_{e_n} + r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (30)$$

$$Z_{e_n} = H_{\max} \text{ (sabit)} \quad (32)$$

Sikloidal dişlinin hiposikloid profili için takım yolu denklemlerinin türetilmesi de, episikloid profile benzer şekilde yapıldı (Şekil 8) [21].



Şekil 8. Parmak frezenin hiposikloid eğri üzerindeki konumu (üst görünüş)

Hiposikloid eğri üzerinde kesici merkezinin konumu ile ilgili ifadeler, Şekil 8' den aşağıdaki gibi türetilir.

$$Xh_n = xh_n + \Delta x_n \quad (33)$$

$$Yh_n = yh_n + \Delta y_n \quad (34)$$

Yine Şekil 8' den Δx_n ve Δy_n , için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \lambda_n \quad (35)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \lambda_n \quad (36)$$

Daha sonra, (15) ve (16) denklemlerinin β_n açısına göre türevleri alınırsa, aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{-(R_\zeta + r_e) \cdot \sin \psi_n + (R_\zeta + r_e) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)}{(R_\zeta + r_e) \cdot \cos \psi_n - (R_\zeta + r_e) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta + r_e}{r_e} \cdot \psi_n \right)} \right) \right] \quad (37)$$

$$\frac{dxh_n}{d\beta_n} = (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right) \quad (38)$$

Şekil 8' den teğetin eğimi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$m_t = \tan \gamma_n = \frac{dyh_n}{dxh_n} \quad (39)$$

$$m_t \cdot m_n = -1 \quad (40)$$

(39) ve (40) ifadelerinden normalin eğimi için aşağıdaki ise eşitlik yazılabilir.

$$m_n = \tan \lambda_n = -\frac{dxh_n}{dyh_n} \quad (41)$$

(41) ifadesinden λ_n açısı için, aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\lambda_n = \tan^{-1} \left(-\frac{dxh_n}{dyh_n} \right) \quad (42)$$

(37) ve (38) denklemleri, (42) ifadesinde yerlerine yazılırsa aşağıdaki ifade bulunur.

$$\lambda_n = \tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \quad (43)$$

(43) ifadesi de, (35) ve (36) denklemlerinde yazılır ise aşağıdaki ifadeler türetilebilir.

$$\Delta x_n = r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (44)$$

$$\Delta y_n = r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (45)$$

Sonuç olarak, (44) ve (45) ifadeleri, (33) ve (34) denklemlerine ilave edilirse hiposikloid profil için takım yolu denklemleri aşağıdaki gibi türetilir.

Yine bilindiği gibi teğet ve normalin eğimi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$Xh_n = xh_n + r_c \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (46)$$

$$Yh_n = yh_n + r_c \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(-\frac{-(R_\zeta - r_h) \cdot \sin \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \sin \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)}{(R_\zeta - r_h) \cdot \cos \beta_n - (R_\zeta - r_h) \cdot \cos \left(\frac{R_\zeta - r_h}{r_h} \cdot \beta_n \right)} \right) \right] \quad (47)$$

$$Zh_n = H_{\max} \quad (\text{sabit}) \quad (48)$$

2.4. Diş profillerinin döndürülmesi

Parmak freze, (30), (31), (32), (46), (47) ve (48) denklemlerine göre hareket ederse, sadece bir diş profili işlenir. Sikloidal dişlinin dişlerini işleyebilmek için, bu diş profilinin X-Y düzleminde sikloidal dişlinin diş sayısı kadar döndürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için matematiksel ifadeler, sikloidal dişlinin episikloid ve hiposikloid profillerini oluşturan açılar dikkate alınarak matris formunda, sırası ile aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{e_n} \\ Y_{e_n} \\ Z_{e_n} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Geliştirilen CAM programında, (49) denkleminde göre episikloid profil işlenip bitirildiği zaman ϕ açısı, $\phi = \phi + \psi_{\max}$ değerine ulaşır. Daha sonra, CAM programında hiposikloid profil (50) denklemi kullanılarak işlenir.

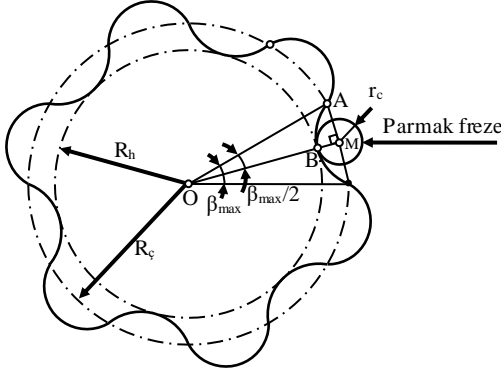
$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{h_n} \\ Y_{h_n} \\ Z_{h_n} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Bu işlem sonucunda, sikloidal dişlinin episikloid profili ve hiposikloid profili bitirilmiş olur. Bu durumda ϕ açısı, $\phi = \phi + \beta_{\max}$ değerine ulaşır. Bu işlemler, sikloidal dişlinin diş sayısı

kadar tekrarlanır. Burada ϕ açısı, β_n ve ψ_n açılarındaki değişimlere göre oluşan açıdır.

3. CNC Frezede Sikloidal Dişlinin İşlenmesi İçin Parmak Frezenin Seçimi

Bu çalışmada, sikloidal dişlileri işlemek için parmak frezenin seçilmesinde, sikloidal dişlinin diş dibi profili dikkate alındı (Şekil 9).



Şekil 9. Diş dibine göre takımın konumu (üst görünüş)

Maksimum takım yarıçapının belirlenebilmesi için, Şekil 9' daki OAM üçgeninden aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$R_ç^2 = (AM)^2 + (R_h + r_c)^2 \quad (51)$$

(51) denklemindeki $R_ç$ ve R_h için sırası ile, $R_ç = (r_e + r_h).N$ ve $R_h = R_ç - 2r_h$ ifadeleri kullanılabilir [14]. Yine Şekil 9' dan AM uzunluğu için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$AM = R_ç \cdot \sin \frac{\beta_{\max}}{2} \quad (52)$$

(52) ifadesi (51) ifadesinde yazılır ve bu denklem düzenlenirse, takım yarıçapı için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$r_{c_{\max}} \leq N \cdot (r_e + r_h) \cdot \left[\sqrt{1 - \left[\sin \frac{r_h \cdot 180}{(r_e + r_h) \cdot N} \right]^2} - 1 \right] + 2 \cdot r_h \quad (53)$$

Sonuç olarak, piyasada kullanılan en küçük çaplı kesici çapının 2 mm olduğu da dikkate

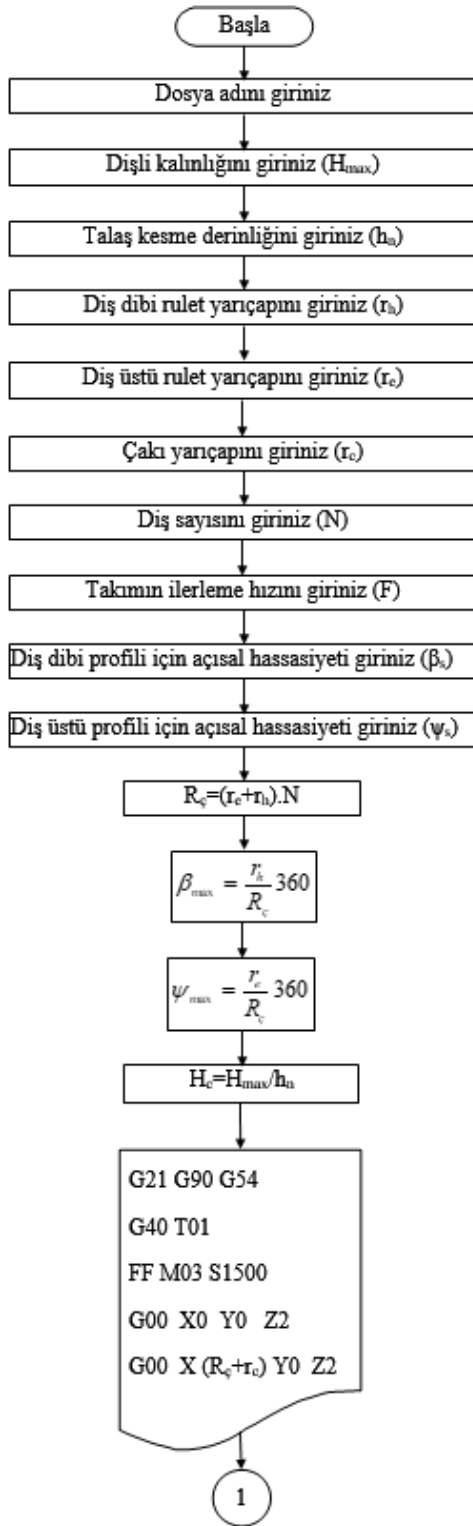
alınırsa, parmak frezenin seçimi için aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$1 \leq r_c \leq r_{c_{\max}} \quad (54)$$

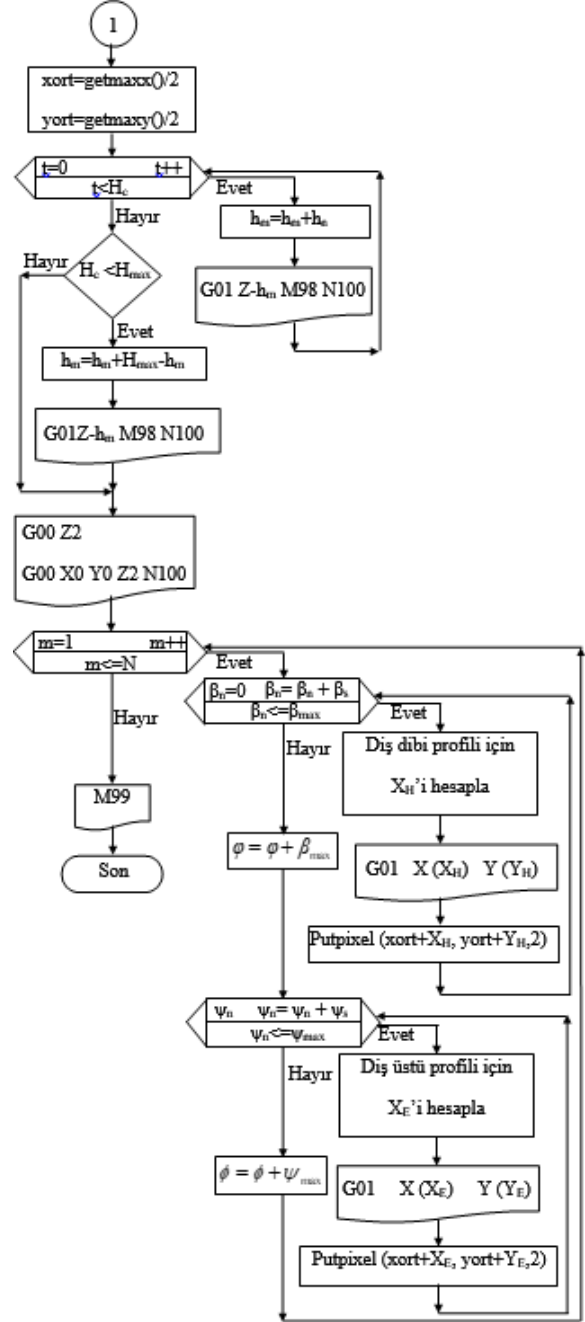
4. Sikloidal Dişli İmalatı İçin Cam Programı Algoritması

Sikloidal dişliyi CNC frezede işleyebilmek için imalat kodlarının türetilmesinde C++ dili kullanılmıştır. Bu programda sikloidal dişlinin CAM kodları C++ programı içerisinde açılan bir dosyaya yazdırılmıştır. CAM kodlarının türetilmesinde ise standart ISO (G ve M) kodları kullanılmıştır. Hazırlanan bu programda, sikloidal dişlinin CAD modeli sikloidal dişlinin tasarım parametrelerine göre oluşturulmuştur. Bu programın algoritması Şekil 10 da verilmiştir [21].

Bu algoritma h_n , ψ_s ve β_s gibi üç hassasiyet değerine göre çalışmaktadır. Programda h_n için girilen değerler, parmak frezenin dişliyi işlerken talaş kesme yüksekliğini ifade eder. ψ_s (derece) ve β_s (derece) için girilen değerler ise, sırası ile dişlinin episikloid ve hiposikloid eğrilerini işleme doğruluğunu (hassasiyetini) ifade eder (Şekil 10).



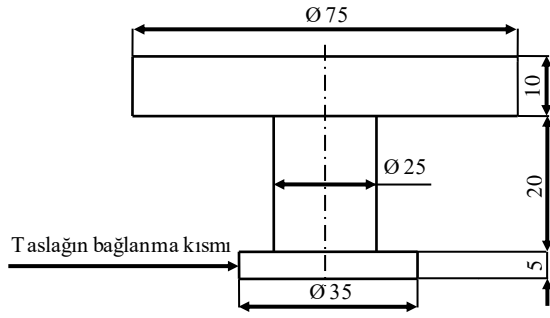
Şekil 10. CAM kodlarını türetmek için kullanılan algoritma



Şekil 11. (Algoritmanın sonu)

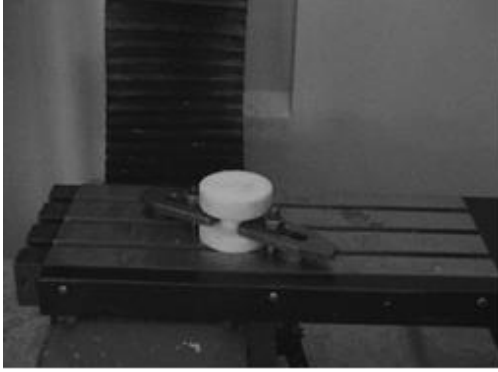
4.1. Taslağı CNC freze tezgâhına bağlanması

Dişli taslağının malzemesi, polyamid türü plastik bir malzemeden seçildi. Daha sonra, bu malzeme işlenmesi düşünülen dişlinin boyutlarına uygun olarak klasik bir torna tezgâhında işlenerek dişli taslağı haline getirildi (Şekil 12).



Şekil 12. Sikloidal dişli taslağı ve ölçüleri

Daha sonra, dişli taslağı CNC freze tezgâhının tablasına Şekil 13 deki gibi bağlandı.



Şekil 13. Dişli taslağının CNC frezeze bağlanması

4.2. Sikloidal dişlinin işlenmesi

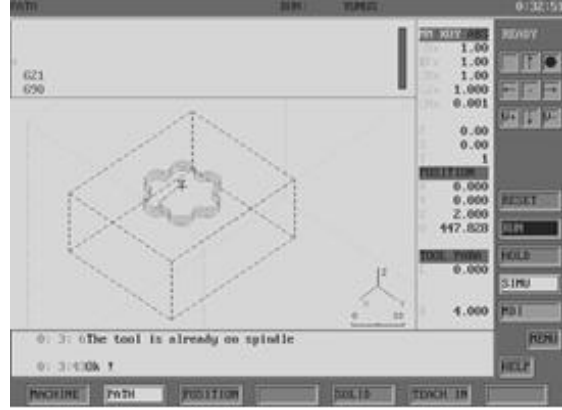
CNC frezede işlenmesi düşünülen sikloidal dişlinin tasarım parametreleri Tablo 1' de verildi. Dişliyi işlemek için, takım kesme hızı 70 m/dak ve devir sayısı da 1500 dev/dak olarak seçildi. Geliştirilen C++ programı, bu tasarım ve işleme parametrelerine göre çalıştırıldı ve çift ruletli bir sikloidal dişlinin CAD modeli C++ grafik ortamında oluşturuldu. Programda, bir taraftan sikloidal dişlinin CAD modeli oluşturulurken, diğer taraftan da bu CAD modeline göre dişlinin CAM kodları, bir dosya içerisine yazdırıldı. Bu CAM kodlarına göre, dişlinin Dyna 4M CNC programında simülasyonu yapıldı (Şekil 14). Daha sonra, bu program kullanılarak farklı tasarım parametrelerine göre Dyna 4M CNC freze tezgâhında çeşitli sikloidal dişliler üretildi (Şekil 15).

Bu dişlilerin diş profilinin üzerindeki ölçümler 0.01 hassasiyetli Cadar marka bir dijital kumpas ile ölçüldü. Bu ölçüm sonuçları ve

literatürde [14] verilen formüller kullanılarak hesaplanan teorik değerler Tablo 2' de verildi.

Tablo 1. Dişlinin tasarım parametreleri

H_{max} (mm)	N	r_h (mm)	r_e (mm)	β_n	ψ_n	r_c (mm)	h_n (mm)
12	6	1.65	2.1	0.1	0.1	2	3



Şekil 14. Dişlinin CNC programında simülasyonu



Şekil 15. İmal edilen sikloidal dişliler

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, sikloidal dişliler klasik imalat yöntemlerinden farklı olarak CNC freze tezgâhında parmak freze ile işlendi. Bu şekilde bir imalat için radyal kesme yöntemi olarak tanımlanan bir yöntem kullanıldı (Şekil 3 ve 4). Bu yöntemde, sikloidal dişlileri işlemek için özel tezgâh, kesici ve yardımcı aparatlara ihtiyaç kalmadı (Şekil 2).

Tablo 2. Çift ruletli sikloidal dişlilerin boyutlandırılması ve diş profil ölçüm noktaları

Tasarım Parametreleri	Formüller	Hesaplanan değerler (mm)	Kumpas ile ölçülen değerler (mm)
Hatve (p)	$2\pi(r_e+r_h)$	23.55	23.51
Yuvarlanma dairesi yarıçapı (R_c)	$N(r_e+r_h)$	22.50	22.45
Diş dibi dairesinin yarıçapı (R_h)	R_c-2r_h	19.20	19.19
Diş üstü dairesinin yarıçapı (R_e)	R_c+2r_e	26.70	26.68
Diş dibinin yüksekliği (d_h)	$2r_h$	3.30	3.26
Diş üstünün yüksekliği (d_e)	$2r_e$	4.20	4.23
Diş dibi genişliği (p_h)	$P_h=2\pi r_e$	13.18	10.23
Diş üstü genişliği (p_e)	$P_e=2\pi r_h$	10.36	13.28

Makalede, bu yöntemle göre dişlileri işlemek için genel bir imalat programı geliştirildi. Bu program kullanılarak dişliler farklı işleme hassasiyetinde ve farklı diş sayılarında imal edildi (Şekil 14). İmal edilen bu dişlilerin diş profili üzerindeki ölçümler ile bu ölçüm noktaları için hesaplanan teorik değerler Tablo 2’de verildi. Bu sonuçlara göre, sikloidal dişlilerin dik işlem merkezli CNC freze tezgâhında işlenebilecekleri görüldü. Geliştirilen CAM programı, β_s , ψ_s ve h_n gibi üç hassasiyet değerine göre çalışmaktadır. Programda girilen β_s verisi diş dibi profilini ve ψ_s için girilen datalar ise diş üstü profilinin işleme hassasiyetini belirler. Yine h_n için girilen değerler de, dişlinin Z ekseninde talaş kesme kalınlığını ifade eder. Bu değerlerin programda çok küçük girilmesi halinde, diş profilinin hassasiyeti artmaktadır. Ancak bu değerlerin büyük seçilmesi halinde ise, diş profilinin

hassasiyeti azalmaktadır. Bu çalışmada, mevcut CAD/CAM yazılımlarında kullanılan yaklaşık eğri oluşturma yöntemleri kullanılmadı. Çünkü bu yöntemlerin kullanılması durumunda, gerçekte sikloid eğri olmayan, sadece noktalar arasından geçen en uygun eğri oluşturulmaktadır. Bu durum kremayer kesici ile diş profili oluşturma prensiplerine uygun düşmediği için, makalede yaklaşık eğri oluşturma yöntemleri kullanılarak CAM kodları oluşturulmadı. Tüm bunlarla beraber, sikloidal dişlileri CNC freze tezgâhlarında işleye bilmek için parmak freze çapının belirlenmesi de önemli bir durumdur. Parmak freze seçilirken, diş profilini oluşturan rulet çapı dikkate alındı. Çünkü hiposikloidal ve episikloidal profillerinin oluşumu ruletin çapına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 14).

Bu makalede, sikloidal dişlileri işlemek için uygun olan parmak frezenin seçimi için (53) denklemi türetildi. Bu denklem kullanılarak

hesaplanan takım çapının 2 mm den küçük olması halinde, bu dişliler CNC freze tezgâhlarında işlenememektedir. Çünkü 2 mm den daha küçük çaplı parmak freze piyasalarda bulunmamaktadır. Ek olarak parmak frezenin ömrü, geleneksel işleme yönteminde kullanılan kremayer kesicinin ömrüne göre daha az olacaktır. Çünkü kremayer kesici bu dişliyi işlerken takımın bütün kesici yüzeyleri kullanılmaktadır (Şekil 2). Oysa makalede belirlenen kesme yöntemine göre, parmak frezenin sadece taban kenarları kullanılmaktadır. Ancak parmak frezelerin fiyatları kremayer takımların fiyatına göre daha ucuzdur. Yine parmak frezelerin mukavemetleri kremayer takımlara göre daha düşüktür. Bu sebepten dolayı CNC freze tezgâhlarında sikloidal dişlilerin işlenmesi durumunda, talaş kesme yüksekliği, ilerleme hızı ve devri gibi işleme parametreleri seçilirken, parmak frezenin çapı ve dişli malzemesinin sertliği dikkate alınmalıdır. Kremayer takımın mukavemeti parmak frezeyle göre daha yüksek olduğu için, bu kesicilerle sikloidal dişliler işlenirken, takım ilerleme hızı ve talaş kesme derinlikleri çok daha büyük değerlerde verilebilir. Bu değerlerin büyük olması, sikloidal dişlilerin kremayer takımlarla çok daha kısa sürelerde imal edilebileceklerini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu makalede geliştirilen CAM programı ile 2 mm ve daha üzerindeki rület değerlerine sahip olan her türlü standart ve standart dışı ölçülerde sikloidal dişlilerin genel amaçlı dik işlem merkezli CNC freze tezgâhlarında işlenebilecekleri görüldü.

6. Genel Sonuçlar

Bu çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Geliştirilen programla, standart ve standart olmayan sikloidal dişlilerin imal edilebileceği görüldü. Ancak klasik yöntemlerde, sadece standart olan sikloidal dişliler üretilebilmektedir.
2. Sikloidal dişlileri imal etmek için klasik yöntemlerde kullanılan özel kesici, takım tezgâhları ve aparatlara gerek kalmadı.

3. Makalede, sikloidal diş profillerinin kesilme hassasiyetinin 0,001 seviyesine kadar çıkabileceği, ancak bu durumda dişlinin imalat süresinin çok uzun olacağı görüldü.

4. Rület çapının 2 mm den daha küçük olması durumunda, bu tür sikloidal dişlilerin imal edilemeyeceği görüldü.

5. Dişliyi parmak frezeyle kesmenin daha uzun sürede olacağı, kremayer kesiciyle kesmenin ise daha kısa sürede olacağı görüldü.

7. Kaynaklar

1. Shigley, J. E. (1969). Kinematic Analysis of Mechanisms. *McGraw-Hill, Inc.*, New York.
2. Dooner, D. and Seireg, A. (1995). The Kinematic Geometry of Gearing. Wiley, New York.
3. Kudriavcev, V. (1966). Planetaryje peradici, Masinostroenije, Moskva-Leningrad.
4. Lehmann M. (1976). Berechug und Messung der Krafte in einen Zykloiden-Kurvenscheiben-Getriebe, Dissertation der Technischen Universität, München.
5. Müler H. W. (1971). Die Umlaufgetriebe, Springer verlog, Berlin.
6. Müler L. (1983). Przekladnie obiegowe, PWN, Warszawa.
7. Akkurt, M. (2000). Makina Elemanları, İstanbul.
8. Hamilton, H. M. and Fred, W. O. (1963). Mechanisms and Dynamics of Machinery. John Wiley and Sons, Inc., second edition. New York, London.
9. Demenego, A., Vecchiato, D., Litvin, F. L., Nervegna, N. and Manco, S. (2002). Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mechanism and Machine Theory*, **37**, 311-332.
10. Ranganathan, G., Hillson Samuel Raj, T. and Monhan Ram, P.V. (2003). Wear characterisation of small PM rotors and oil pump bearing. *Tribology International*, **37**, 1-9.
11. Malhotra, S. K. and Parameswaran, M. A. (1983). Analysis of a cycloid speed reducer. *Mechanism and Machine Theory*, **18**(6), 491-499.
12. Maximov, J. and Hristov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around paralel axes, Part I: Kinematics of The Method and Rational Field of Application. *Trakya Univ J Sci*, **6**(1), 1-11.
13. Maximov, J. And Hriztov, H. (2005). Machining of hypocycloidal surfaces by adding rotations around paralel axes, Part II: Geometry of The Body of The Tool. *Trakya Univ J Sci*, **6**(1), 13-18.
14. Litvin, F. L., Demengo, A. and Vecchiato, D. (2001). Formation by branches of envelope to parametric families of surfaces and curves. *Computer method in Applied Mechanics and Engineering*, **190**, 4587-4608.

15. Sahraibman, S. M. (1989). A statistical survey of gear-cutting operations in various production model. *Sovient Engineering Research*, **60**(2), 29-31.
16. Elber, G. and Cohen, E. (1993). Proc 2 Symp Solid ModelAppl. *In Publ by ACM*, 419-428.
17. Zhang, L. P., Fuh, J. Y. H. and Nee, A. Y. C. (2003). Tool path regeneration for mold design modification. *Computer-Aided Design*, **35**, 813-823.
18. Özel, C., İnan, A., Özler, L., (2005). An investigation on manufacturing of the straight bevel gear using end mill by CNC milling machine, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transaction of the ASME*, vol. 127, 503-511.
19. Özel, C. (2012). A study on cutting errors in the tooth profiles of the spur gears manufactured in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **59**(1-4), 243-251.
20. Özel, C. (2011). Research of production times and cutting of the spur gears by end mill in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **54**(1-4), 203-213.
21. Özel, C. and Ortaç, Y. (2016). A study on cutting errors in tooth profiles of cycloidal gears manufactured in CNC milling machine. *Int. J. Materials and Product Technology*, **53**(1), 42-60.