



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Eliptik Dişli Çarkların Bilgisayar Destekli Doğal Frekans ve Mod Analizi

 Mehmet YAZAR^{a,*}

^a *Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, TÜRKİYE*

Sorumlu yazarın e-posta adresi: mehmetyazar@comu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.733371

ÖZET

Dairesel olmayan dişli çarkların önemli bir üyesi olan eliptik dişli çarkların tasarım denklemleri çalışmanın ilk aşamasında hazırlanmıştır. İkinci aşamasında hazırlanan denklemleri döngü içerisinde çözmek ve istenilen diş sayısı ve modülde eliptik dişli çarkın 2-D modellenmesi için AutoLISP programlama dili ile bilgisayar ortamında mini bir paket program yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen paket program ile AutoCAD ortamında modülü 2, diş sayısı 32 olan eliptik dişli çarkın tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan eliptik dişli çarkın sonlu elemanlar yöntemiyle doğal frekans ve modlarını belirlemek için ANSYS programı kullanılmıştır. Eliptik dişli çarkın tam 3-D modelini oluşturmak için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Eliptik dişli çarkın doğal titreşim özelliği, titreşim türleri ve doğal frekansları tespit edilmiştir. Bu yazılım eliptik dişli çarkların mühendislik uygulamaları ve dinamik analizleri için kullanılabilir. Bir eliptik dişli çarkın titreşim özelliğini belirlemek için her türlü dinamik yüklere nasıl yanıt verdiğini belirlemek ve herhangi bir tasarım veya uygulama yapmadan önce daha pratik ve düşük maliyetli bir analiz yapmak için bu yöntem kullanılabilir. Yapılan analizler sonucunda tam durmayı gerektirmeksizin düzensiz hareketin elde edilebileceği bir makine elemanı olarak eliptik dişli çarkların kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Eliptik dişli çark, Frekans analizi, Mod analizi*

Computer Aided Natural Frequency and Mode Analysis of Elliptic Gears

ABSTRACT

The design equations of elliptical gears, which are an important member of non-circular gear wheels, were prepared in the first stage of the study. In the second stage, a mini package program software was developed in computer environment with AutoLISP programming language to solve the equations prepared in the loop and to model the elliptical gear wheel in the desired number of teeth and module in 2-D. With the package program developed, an elliptical gear wheel with a module of 2 and a tooth number of 32 was designed in AutoCAD. ANSYS program was used to determine the natural frequencies and modes of the designed elliptical gear wheel using the finite element method. ABAQUS software was used to create the full 3-D model of the elliptical gear wheel. The natural vibration feature, vibration types and natural frequencies of the elliptical gear wheel have been determined. This software can be used for engineering applications and dynamic analysis of elliptical gears. This method can be used to determine how an elliptical gear wheel responds to any kind of dynamic loads in order to determine its vibration characteristics, and to perform a more practical and cost-effective analysis before making any design or application. As a result of the analysis, it has been determined that elliptical gear wheels can be used as a machine element in which irregular movement can be achieved without the need for a complete stop.

Keywords: *Elliptical gears, Frequency analysis, Mode Analysis.*

I. GİRİŞ

Eliptik dişli çarklar dairesel olmayan dişli çarkların en yaygın kullanılan tipidir [1-3]. Geometrik özellikleri iyi bilindiğinden dolayı, diğer tip dairesel olmayan dişlilere göre tasarım ve üretimleri daha kolaydır. Bu nedenle pratik uygulamalar için tercih edilmektedir. Bununla birlikte iki aynı tip eliptik dişli çark, değişik açı-hız oranlı dairesel dönüş hareket üretmek için kullanılabilir [4]. Günümüzde eliptik dişli çarkların üzerine yapılan çalışmalar, geometrik modellenmesi, kinematik özelliğinin belirlenmesi ve imalat usullerine yoğunlaşırken, dinamiği üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Eliptik dişli çarkların döndüğü hayali yüzeyi oluşturan adım eğrisi, tek sıralı eliptik veya eliptik iki sıralı dişli için basit bir elips (veya gerçek bir elips) olabilir. İki tek sıralı eliptik dişliler, eğer özdeş ve aynı odak noktasında dönmekte iseler dişler birbirini uygun bir şekilde kavrayabilmektedir. Diğer yandan, özdeş iki sıralı eliptik dişli çarklar geometrik merkezleri üzerinde dönecek şekilde kavramaktadır [5]. İki sıralı eliptik dişli çarklar tek sıralı eliptik dişliler ile aynı usulde çalışmaktadır. Ancak girdi milinin her bir döngüsü için iki tam hız devri oluşturmaktadır. Sonraki ise sadece bir tam devir üretmektedir [6].

Bir adım eğrisi ve merkez mesafesinin kutup denklemi bilindiği zaman, basit geometrik özellikler ile çift dişlinin adım eğrisinin kutup denklemi elde edilebileceği bilinmektedir [7]. Temel geometrik özellikleri ile açısal değişim, döndüren dişlinin hızı, ivmesi ve adım eğrisinin eğim açısı gibi eliptik dişli çarkların diğer kinematik özellikleri ile ilgili denklemler kullanılarak elde edilebilmektedir [8, 9].

Endüstride gürültü ve titreşim, dinamik kuvvetlerin yapıları harekete geçirdiği belirli süreçlerden kaynaklanmaktadır. Gürültünün ve titreşimin etkileri çalışanlar üzerinde yorgunluk, azalan iş konforu, güvenlik ve sağlık problemlerine neden olabilmektedir. Makinelerde ise düşük performans, hatalı çalışma veya geri dönüşü olmayan arıza ve hasarlara neden olabilmektedir. Dişli çarklarda dış titreşim frekansı, dişli çarkın doğal frekansı ile aynı olduğunda, rezonansa neden olmaktadır. Rezonansın büyük olduğu durumlarda, dişli hasar görmekte ve dişli çarkın ömrü kısalmaktadır [10]. Birçok gürültü ve titreşim sorunu rezonansla ilgili olarak ilgilidir.

Dişli çark gürültüsü ve titreşimi, birçok güç ve hareket aktarım uygulamasında önemli bir sorundur. Bu sorun, dişli çark aktarım hatasıyla ilişkili olan titreşim daha yüksek çalışma hızlarına sahip uygulamalarda daha önemli hale gelmektedir [11].

İç ve dış kuvvet altında dişli çarklarda mekanik titreşim meydana gelmektedir. Bu nedenle, dişli çark tasarımı sürecinde dişli tasarımı için temel parametrelere ek olarak, dişli çark doğal titreşim frekansı ve titreşim mod'unun yaygın olarak kullanılan sonlu eleman analizinin yapılması ve dişli çark aktarımının dinamik tasarımı için bir referans oluşturulması gerekmektedir [12].

Mod analizi, yapının titreşim özelliklerini belirleyebilir ve yapısal titreşim hatası teşhisi ve yapısal optimizasyon için temel sağlayabilir. Mod analizi, deneysel yöntem ve sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilebilmektedir [13]. Mod analizi, yapının içsel özelliklerini tanımlayan iyi bir tekniktir. Mod analizi, doğal frekansı ve mod şeklini ölçmek için kullanılmaktadır [14]. Buda modları incelemenin birinci nedenidir ve ikinci nedeni ise bir yapının eksiksiz bir dinamik tanımının temelini oluşturmaktır [15]. Mod analizi, yapısal dinamik problem analizi ve tasarım optimizasyonu için standart bir araç olarak geliştirilmiştir. Araştırma alanı, performans iyileştirmeye, test maliyetini düşürmeye ve yeni uygulama alanlarının geliştirilmesine odaklanmış bir analiz yöntemidir ve çok dinamiktir [13]. Mod analizi, test edilen yapının doğal (mod) frekanslarının, mod kütlelerinin, mod sönüm oranlarının ve mod şekillerinin belirlendiği bir nesnenin titreşim test şeklidir [14]. Bu parametreler, dinamik yükleme koşulları için bir sistemin tasarımında önemlidir. Sonlu Elemanlar Analiz yazılımları mod analizi çalışmaları yapmak için iyi bir potansiyele sahiptir [10].

Eliptik dişli çark sistemlerinin kontrol edilebilir dinamik parametrelerini elde etmek için belirli mod şekilleri için mod frekanslarının incelenmesi, eliptik dişli çark sistemlerini yapmadan önce sistemin doğal frekanslarının bulunması, titreşimin önlenmesi, titreşim ve gürültüden ödün vermeden eliptik dişli çark sistemlerinin performansının artırılması amacıyla mod analizi yapılmıştır. Modellerin kullanılması ile tasarımın iyileştirilmesi ve eliptik dişli çarkların optimize edilmesi sağlanabilmektedir. Sonlu Elemanlar Analizi, dişli çarkların dinamik özelliklerini tahmin etmek için de kullanılmaktadır [15].

Bu çalışma kapsamında eliptik dişli çarkların hareket iletim tekniği, dişlerin adım eğrisi üzerindeki dağılımı, diş üstü eğrisinin, diş dibi eğrisinin ve diş profili eğrisinin tasarımı içeren eliptik dişli çarkın tasarım yöntemini incelemek için kullanılmıştır. Ayrıca eliptik dişlilerde dinamik model oluşturmak için dişli çark sistemi dinamikleri tanıtılmıştır. Sonlu elemanlar analizinin temel teorisi ve mod analizi yöntemi uygulanmış, eliptik dişli çarklar için sonlu eleman modeli oluşturulmuş, eliptik dişli çarkın doğal titreşim karakteristiği incelenmiştir. Eliptik dişli çark sistemlerinde titreşimin oluşumunu anlamak ve titreşimleri azaltmak için öneriler sunulmuştur.

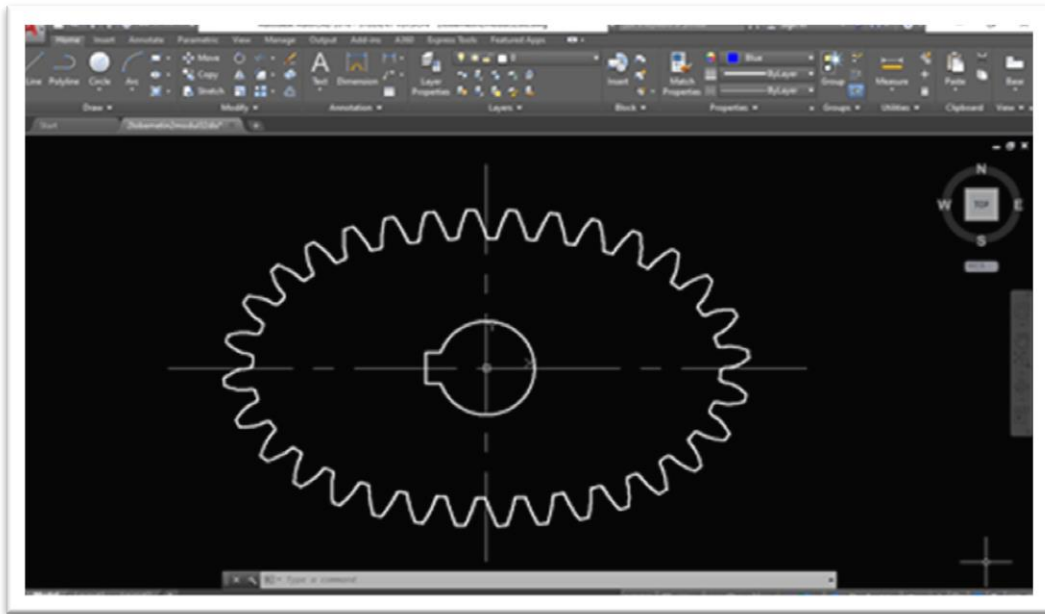
II. ELİPTİK DİŞLİ ÇARKIN TASARIMI

Elipsin kutupsal denklemleri ve kramayer kesici profil denklemleri ile yuvarlanma metoduna göre dişli profilinin elde edildiği formüller AutoLISP programlama diline aktarılmış ve AutoCAD ortamında eliptik dişli çarkların istenilen diş sayısında ve modülde, kullanıcı etkileşimi olmaksızın iki boyutlu çizimlerini gerçekleştiren mini bir paket program yazılmıştır.

Yazılan bu paket program kullanılarak AutoCAD ortamında Tablo 1’de teknik özellikleri verilen 2D boyutlu eliptik dişli çarkın çizimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

Tablo 1. Deneysel çalışmalar için kesilen dişli çiftlerine ait parametreler

Module, m	Teeth Number, Z	a value of ellipse, mm	b value of ellipse, mm	Rate, a/b	Eccentricity, e
2.00	32	39.649	23.300	1,701	0,809



Şekil 1. Modülü 2 ve diş sayısı 32 olan eliptik dişli çarkın tasarımı

III. DOĞAL MOD VE DOĞAL FREKANSIN HESAPLANMASI

Mekanik sistem dinamikleri teorisi ve sonlu elemanlar teorisine göre, çok serbestlik dereceli sisteminin hareket diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir,

Genel hareket eşitliği:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Serbest titreşimlerin kabul edilip sönümlenmeler dikkate alınmadığında:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

Burada

$[M]$ -Kütle matrisi, $\{\ddot{u}\}$ - İvme matrisi, $[C]$ Sönümlenme matrisi, $\{\dot{u}\}$ - Hız matrisi, $[K]$ -Rijitlik matrisi, $\{u\}$ - Yer değiştirme matrisi, $\{F(t)\}$ -Dış yük matrisidir.

Sönümlenme kuvveti ihmal edildiğinde ve sistem yükten muaf olduğunda sönümlenmesiz serbest titreşim sisteminin hareket diferansiyel denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\left([K] - w^2[M]\right)\{u\} = 0 \quad (3)$$

Burada,

w - Sistemin frekansı, $\{u\}$ Öz vektör sistemidir.

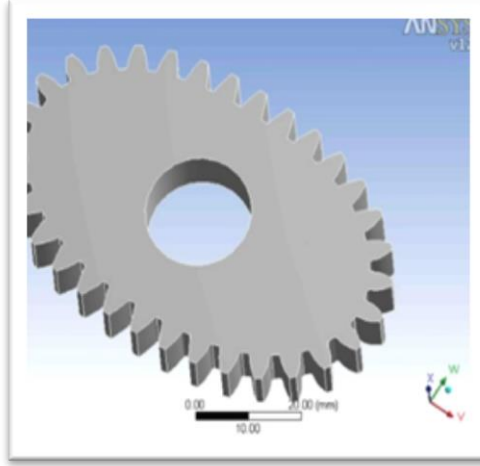
Mod parametreleri, işlemsel mod analiz olarak bilinen süreci hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen işlemsel modlar deneysel mod analizi olarak, prosesin mod parametrelerini elde etmek için sistemde girdi ve çıktı parametrelerini tanımlamak için analizde kullanılmıştır.

LANCZOS metodu ve alt uzay iteratif yöntemi özgün değeri hesaplamak için kullanılmıştır. Sistemde çok serbestlik olduğunda ve çok karakteristik mod'lar istendiğinde, LANCZOS metodu daha kullanışlı olmaktadır. Az karakteristik mod istendiğinde (<20) alt uzay iteratif yöntemi önerilmektedir. Bu çalışmada LANCZOS yöntemi analizlerde uygulanmıştır.

IV. ELİPTİK DÜZ DİŞLİ ÇARKIN SONLU ELAMANLAR MODELİ

Sonlu eleman yazılımları içerisinde ABAQUS günümüzde kullanılan en ileri ve geniş çaplı yazılımlardan biridir. Bu yazılım gerilme-uzama ilişkileri, doğrusal olmayan sınır şartları için çözümler, statik ve dinamik gerilme analizleri yapabilecek güçlü fonksiyonlara sahiptir.

Bilgisayar destekli doğal frekans ve mod analizi yapılan eliptik dişli çarkın malzemesi AISI 1045, elastikiyet modülü $E = 2,0 \times 10^{11} \text{N/mm}^2$, Poisson oranı $\mu = 0,3$ ve yoğunluğu $\rho = 7,85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ olarak seçilmiştir. ANSYS programının malzeme modülü altında çelik malzeme seçilerek, eliptik dişli çark bölümü oluşturulmuş ve eliptik dişli çarkın malzemesi AISI 1045 olarak alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. ANYS ortamına transfer edilen AutoCAD verilerinden hazırlanan eliptik düz dişli çarkın 3D boyutlu modeli

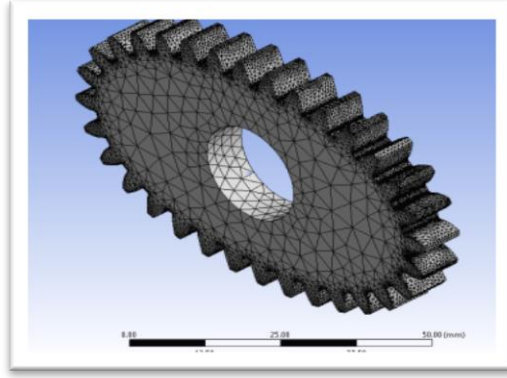
Eliptik dişli çark için sonlu eleman modelinde analizi basitleştirmek için;

- Sınır şartları gerçek çalışma şartlarına göre ayarlanabilir,
- Eliptik dişli çark yüzey örme işleminde iç yüzey ile eksen yayı arasında sıkı geçme uygulanabilir,
- Sonlu eleman modelinde dişli sıkı geçme bağlantılı olarak düşünülebilir,
- Yayın etkisi ihmal edilebilir

bu basitleştirme toleransı dinamik çalışmalar için göz ardı edilebilir.

Bu çalışma kapsamında, eliptik dişli çarkın örülmesinin (mesh) gerçek şartlarını doğru olarak yansıtmak için eliptik dişli çarkın iç yüzeyi X , Y , Z eksenleri boyunca yer değiştirmeleri sınırlandırılmıştır. Ayrıca X ve Y eksenleri etrafındaki rotasyonlarda sınırlandırılmıştır. ABAQUS’de 3D boyutlu katı ünitesi sadece 3 yer değişimi yapabilmektedir. Eliptik dişli çarkın iç yüzeyinin rotasyon serbestliğini sınırlamak için; eliptik dişli çarkın merkezi rotasyon eksenini üzerindeki bir noktaya sabitlemiştir. Eliptik dişli çark iç yüzeyinin serbestlikleri ve referans noktalarının serbestlikleri düzenlenerek sınırlandırılmıştır. Eliptik dişli çarkın sınır şartları başlangıç aşamasında uygulanmıştır.

Eliptik dişli çarkın doğal davranışı, hesaplama sonucu elde edilen mod’lar aracılığıyla belirlenmiş ve dış yüklerden bağımsız olarak elde edilmiştir. Bu nedenle eliptik dişli çark için dış yük sınır şartlarını belirlemeye ihtiyaç duyulmamıştır. Yüzey örme sürecinde, çarpılma en aza indirilebilmekte, çarpılma problemi için küçük ölçekli doğrusal azalan toplama birimi kullanılmıştır. 3D boyutlu problem çözümü için, ABAQUS’de altı yüzlü hexahedron birim eleman kullanılması, küçük unsurlara sahip nesnelere için en iyi sonucu vereceği için tercih edilmiştir. Dört üçgen yüzlü tetrahedron birim eleman ile alınan sonuçlar kesin olmadığı için tercih edilmemiştir. Yukarıdaki bilgiler ışığında süpürme yüzey örme tekniği bu modelde kullanılmış 576451 düğüm oluşması temin edilmiştir. Örgüleri (mesh) atanan eliptik dişli çark sonlu eleman modeli Şekil 2’de örgü stratejisi Tablo 2’de verilmiştir. Bu örgü sistemi tüm dişli gövdesine uygulanmıştır.



Şekil 3. Eliptik düz dişli çark örgü modeli

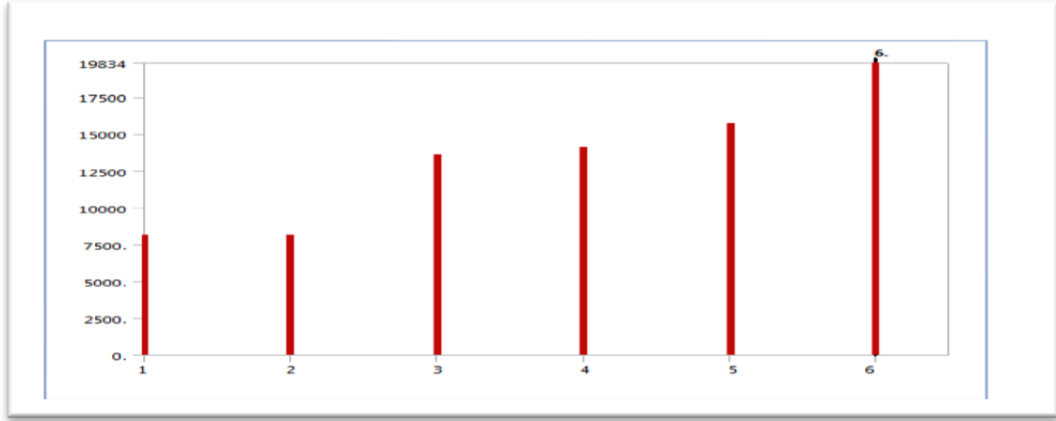
Tablo 2. Örgü sisteminin stratejisi

Nesne Adı	Örgü
Durum	Çözülmüş
Varsayılanlar	
Fiziksel Tercih	Mekanik
Uygunluk	0
Geliştirilmiş	
İlişki Merkezi	Büyük
Eleman Boyutu	Var Sayılan
Şekil Kontrolü	Standart Mekanik
Katı Eleman Orta Taraf Düğümleri	Program Kontrollü
Düz Kenarlı Elemanlar	Hayır
Başlangıç Boyutu Görünümü	Aktif Montaj
Düzeltilme	Yüksek
Dönüşüm	Hızlı
İstatistikler	
Düğümler	576451
Elemanlar	371808

Bu bölümde doğal titreşimlerin analizi için uygulanan yük ayrıntıları ve analiz sınır koşulları belirlenmiştir. Mod analizi 6 mod da yapılmış ve detayları Tablo 3 ve Şekil 4’te verilmiştir.

Tablo 3. Sınır koşullarının ayrıntıları

Nesne Adı	Sabit Mesnet
Durum	Tam Tanımlı
Kapsam	
Kapsam Belirleme Yöntemi,	Geometri Seçimi
Geometri	1 Örgü
Tanım	
Tip	Sabit Destek
Sabitlemek	Hayır



Şekil 4. Normal titreşim için 6 mod'a karşılık gelen frekans sonuçları grafiği

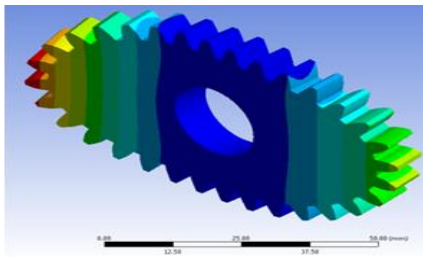
Bu sonuçlardan elde edilen 6 titreşim frekansları Tablo 4. 'de verilmiştir.

Tablo 4. Doğal titreşim analizi için düşük frekanslar

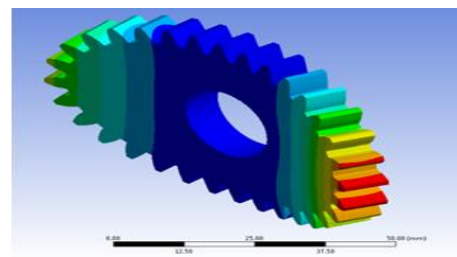
Mod	Frekans [Hz]
1.	8147,3
2.	8162,7
3.	13627
4.	14119
5.	15757
6.	19834

Titreşim yapısı her bir sınırlı doğal titreşim şeklinin doğrusal kombinasyonu olarak ifade edilebilir. Düşük sıralı titreşim şekli, titreşim yapısı üzerinde büyük etkiye sahiptir ve yapının dinamik karakterinde karar verici rol oynamaktadır.

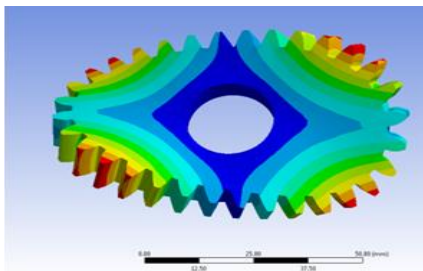
Eliptik dişli çarkın dinamik karakterini açıklamak için sonlu eleman modelleri (0 derece, 30 derece, 60 derece, 90 derece) belirlenmiş ve doğal titreşimler, doğal frekanslar hesaplanarak analiz edilmiştir. 1'inci, 2'inci, 3'üncü, 4'üncü, 5'inci, 6'ıncı mod titreşim şekilleri Şekil 5'de verilmiştir.



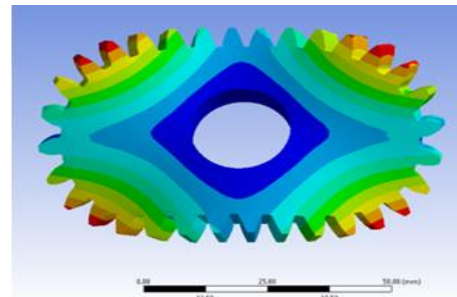
(a)



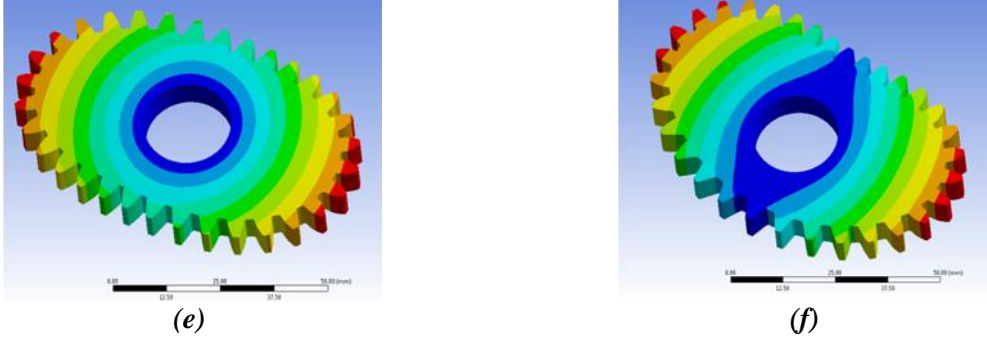
(b)



(c)



(d)



Şekil 5. a) Birinci mod 8147 Hz, b) İkinci mod, 8162 Hz, c) Üçüncü mod, 13627 Hz, d) Dördüncü mod, 14119 Hz, e) Beşinci mod, 15757 Hz, f) Altıncı mod, 19834 Hz

Şekil 5 incelendiğinde mod derecesi artıkça doğal frekansında artığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında 2 modüle ve 32 diş sayısına sahip olan eliptik dişli çarkın frekans analizi gerçekleştirilmiş ve eşdeğeri olan silindirik dişli kapsam dışı tutulmuştur.

IV. SONUÇ

Eliptik dişli çark sistemleri ile hareket iletiminin dinamik özellikleri üzerine çalışmanın amacı, hareket iletiminde, titreşim ve gürültüyü azaltma, eliptik dişli çark hareket iletim sistemlerinin ömrünü uzatma, eliptik dişli çark tasarımına rehberlik etmektir.

Titreşim yapısı her bir sıralı doğal titreşim şeklinin doğrusal kombinasyonu olarak ifade edilebilir. Düşük sıralı titreşim şekli, titreşim yapısı üzerinde büyük etkiye sahiptir ve yapının dinamik karakterinde karar verici rol oynamaktadır.

Eliptik dişli çarklarda oluşan hareket ve güç iletim sistemlerinde, çalışma frekansından dolayı, frekanstan uzak tutulmasına dikkat edilmesi ayrı bir önem taşımaktadır. En düşük titreşim modunda yakalanan 8147,3 Hz frekansının tasarımlar açısından dikkate alınması, güç ve hareket iletim sistemlerindeki eliptik dişli çark sistemlerinin rezonans durumundan kaçınmak için önemli bulunmuştur.

Sonuç olarak;

- Mod analizinin tasarım aşamasında yapılması tasarlanan sistemin titreşimlerini önlemek veya kabul edilebilir sınırlar içinde bir frekansta titreşim sağlanması,
- Sistemin tasarım aşamasında sistemin farklı dinamik yüklere karşı nasıl tepki vereceğini görülmesi,
- Diğer dinamik analizlerin çözümüne yardımcı olması,
- Eliptik dişli çarkların dinamik modelini kurmak için dişli sistemlerinin dinamik ilkeleri kullanılması.
- Sonlu elamanlar mod analiz metodunun temel teorisinin uygulanması

için, eliptik dişli çarkın sonlu elamanlar modeli belirlenmiş ve eliptik dişli çarkın doğal titreşim karakteristikleri çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar eliptik dişli çarkın dinamik performansını yansıtmaktadır. Dinamik araştırma ve eliptik dişli çarkın mühendislik uygulamaları için ANSYS Sistem programı kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile eliptik dişli çarkın dinamik performansının araştırılması eliptik dişli çark ve sistemlerinin mühendislik uygulaması için bir temel oluşturulmuştur.

V. KAYNAKLAR

- [1] Mundo, D., "Geometric design of planetary gear train with non-circular gears", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 41, no. 4, pp. 456-472, 2006
- [2] Laczik B., "A cometarium-mechanizmus", *Fizikai Szemle*, vol. 58, pp. 50-54, 2008.
- [3] Mundo, D., Fragomeni, G., "A First Experimental Comparison Between Non-Circular Gears Characterized By Teeth Designed According To Different Meshing Laws", *EuCoMeS*, Obergurgl, Austria, 2006
- [4] Barkah D., Shafiq B., Dooner D., "3D Mesh Generation for Static Stress Determination in Spiral Noncircular Gears Used for Torque Balancing" *Journal of Mechanical Design ASME*, vol. 124, no. 2, pp., 313-319, 2002
- [5] Bair B.-W. "Tooth Profile Generation and Analysis of Crowned Elliptical Gears" *Journal of Mechanical Design ASME*, vol. 131, no. 7, pp., 503-509, 2009
- [6] Chao L., Kai C., Datong Q., Caichao Z., Hua Q., Xiaohu R., "Design And Finite Element Mode Analysis of Noncircular Gear" *Research (ICMR08)*, Brunel University, UK, 2008
- [7] Lai M. J., "An Investigation of The Dynamic Behaviour of Systems With, Noncircular Gears", *China Academic Journal*, pp., 377-388, 1996
- [8] Kerr, J. H. and Ferguson, R. J., "An Infinitely-variable Vehicle Transmission Using Noncircular Gears" *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp., 187-191, 1979
- [9] Pathan, N. H., Singh, V.P., Kulkarni, S. S., "Modal Analysis of Spur Gear to Determine The Natural Frequencies and It's Effect Over The Geometry of The Gear", *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, pp. 76-78, 2014
- [10] Saxenaa, A., Pareya, A., Choukseyb, M., "Study of Modal Characteristics of A Geared Rotor System", *3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering (ICIAME)*, pp. 225-231, 2016
- [11] Kaihong, Z., Yunpeng, L., Congyi, W., Cheng, L., "Non-circular gear modal analysis based on ABAQUS" *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, pp. 576-579, 2015
- [12] Chavan, D.S., Mahale, A.K. , Thakur A.G., "Modal Analysis of Power Take Off Gearbox", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol.3, pp.70-76, 2013
- [13] Zhang, Q., Mei, L., Han, W., "Modal Analysis of Carburized Cylindrical Gear", *International Journal of Trend in Research and Development (IJTRD)*, vol. 5, no.2, pp. 308-311, 2018
- [14] Chavan, D.S., Mahale, A.K. , Thakur A.G., "Modal Analysis of Power Take Off Gearbox", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol.3, pp.70-76, 2013
- [15] Quadri S. A. N., Dolas D. R., "Comparative Modal analysis of Conventional Spur Gear with Modified Involute Spur Gear", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 02, pp. 1752-1756