

# HİBRİT DİŞLİ ÇARKLARIN FARKLI ORTAM SICAKLIKLARINDA ANALİZİ

Eren Onan<sup>1</sup>, Ece Nur Binbir<sup>2</sup>,  
Fatih Küçük<sup>3</sup>, Fatih Karpat<sup>4</sup>

## 1. GİRİŞ

Dişli çarklar; iki mil arasında şekil bağıyla kuvvet ve hareket ileten elemanlardır. İki bin yıldan daha fazla geçmişe sahip olan bu makine elemanları eski çağ ve orta çağda su çekme, yük kaldırma, değirmen taşını döndürme gibi işlevlerde kullanılmıştır. Son iki yüzyılın teknolojik gelişmeleri sayesinde, hemen her makede kullanılan elemanlar olmuşlardır [1].

Havacılık sektöründe kullanılan bileşenler, güvenlikten ödün vermeden minimum ağırlığa ulaşacak şekilde tasarlanır. Hava araçlarının tahrik sistemi toplam araç ağırlığının önemli bir kısmını oluşturduğundan, bu bileşen-

lerin güç / ağırlık oranını iyileştirmek için birçok yaklaşım uygulanmıştır. Tasarım değişiklikleri, yapılandırma düzenlemeleri ve gelişmiş malzemeler sayesinde güç/ağırlık oranında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir [2].

En az iki farklı malzemenin makro boyutlarda birleşerek oluşturduğu yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit kullanım alanlarına baktığımız zaman ilk sırada havacılık sanayinin geldiğini görmekteyiz. Kompozit malzemelerin hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikleri baz alınarak, uçaklarda ve helikopterlerde iç mekan tasarımında, yapısal malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Çok düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemete sahip olması, güç / ağırlık oranını doğrudan etkileyen iki önemli

<sup>1</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - [erenonan98@gmail.com](mailto:erenonan98@gmail.com)

<sup>2</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - [ecebinbir@gmail.com](mailto:ecebinbir@gmail.com)

<sup>3</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - [fatihkucuk1114@gmail.com](mailto:fatihkucuk1114@gmail.com)

<sup>4</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa - [karpat@uludag.edu.tr](mailto:karpat@uludag.edu.tr)

özelliğidir. Bu nedenle bu malzemelerin tahrik sistemlerinin bileşenlerine uygulanması, bu oran üzerinde ciddi bir etkiye sahip olur. Kompozit malzemelerin bu avantajlarının hava araçlarına uygulama potansiyeli NASA Glenn Araştırma Merkezi tarafından yapılan çalışmalarla desteklenmiştir.

2012 yılında NASA Glenn Araştırma Merkezinde hibrit dişli adı verilen yeni bir dişli tasarımı yapılmış ve test edilmiştir. Bu tasarımda kompozit malzeme, milin bağlandığı metalik yuva ile dişler arasında bir bağlantı ağı görevi görmektedir. Kompozit malzeme, tamamen metalik olan havacılık tipi bir dişlide altıgen şeklinde açılan bir yuvanın içerisine endüstriyel yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmıştır. Daha sonra bu dişli hem tamamen metalik hem de benzer bir hibrit dişli kullanılarak test edilmiştir [3].

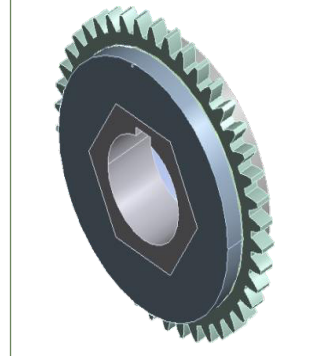
Titreşim modları, sönümlenme özellikleri ve gürültü testleriyle bu iki tip dişlinin karşılaştırması yapılmıştır. İlk alınan sonuçlardan bu tip hibrit tasarımın güçten ödün vermeden tahrik sistemi ağırlığı üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [4]. Ancak NASA bu çalışmalarında daha çok dinamik özelliklere odaklanırken ortam sıcaklığını ve bu sıcaklıktaki çalışma şartlarının hibrit dişli üzerindeki etkisi incelenmemiştir.

Yapılan bu çalışmada ise, NASA Glenn Araştırma Merkezinde tasarımı yapılan hibrit dişliye benzer bir tasarımın sıcaklık analizlerinin ANSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

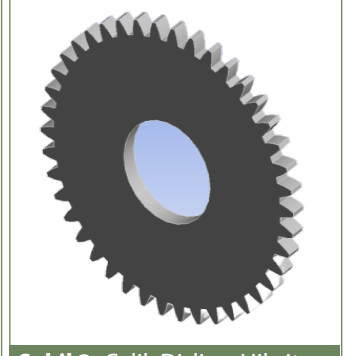
## 2. MALZEME VE YÖNTEM

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1940'ların başında A. Hrennikoff ve R. Courant tarafından havacılık ve inşaat sektöründe kompleks elastisite ve yapısal analiz problemlerinin çözülmesinde uygulanmaya başladı. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte günümüzde bu teknoloji, birçok mühendislik alanının içine girmiş biyomekanikten nükleer teknolojiye kadar yapısal analiz, ısı transferi, akışkanların akışı, kütle transferi, elektromanyetik potansiyel gibi analizlerde kullanılmaktadır [5].

NASA Glenn Araştırma Laboratuvarında prototipi üretilen dişlinin termal analizinin yapılması çalışmamızda Sonlu Elemanlar Analizi kullanılmış olup, NASA tarafından üretilen dişli ile aynı diş sayısı, modül ve kalınlık değerlerine sahip bir dişli üç boyutlu ortamda Şekil 1 ve Şekil 2'deki



Şekil 1. Hibrit Dişli Tasarımı



Şekil 2. Çelik Dişli ve Hibrit Dişli Tasarımı



Şekil 3. Bursa Uludağ Üniversitesinde Üretilen Çelik Dişli Prototipi



Şekil 4. Bursa Uludağ Üniversitesinde Üretilen Hibrit Dişli Prototipi

gibi modellenmiştir. Bursa Uludağ Üniversitesi'nde üretilen prototipler ise Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

3 boyutlu ortamda modellenen bu cisimlere NASA'nın kullandığı malzemeler olan AISI 9310 ve Toray T700 ile

**Tablo 1.** AISI 9310 Çelik Malzemesinin Özellikleri [6]

Malzeme Özelliği	Değeri (Birimi)
Brinell Sertliği	550
Elastisite Modülü	200 (GPa)
Akma Mukavemeti	510 (MPa)
Kopma Mukavemet	865 (MPa)
Poisson Oranı	0,29
Kesme Mukavemeti	540 (MPa)
Yoğunluk	7861 (kg/m <sup>3</sup> )
Isıl iletkenlik	55 (W/(m <sup>2</sup> ))
Genleşme Katsayısı	11.1 **10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> )
Özgül Isı	470 J/(kg K)

**Tablo 2.** Toray T700 Karbonfiber Malzemesinin Özellikleri [7]

Malzeme Özelliği	Değeri (Birimi)
Elastisite Modülü	134 GPa
Çekme Mukavemeti	2550 (MPa)
Kopma Uzaması	%2,1
Poisson Oranı	0,3
Kesme Mukavemeti	136 (MPa)
Yoğunluk	1800 (kg/m <sup>3</sup> )
Isıl iletkenlik	9,4 (W/(m <sup>2</sup> ))
Genleşme Katsayısı	-0,38 · 10 <sup>-6</sup> (K <sup>-1</sup> )
Özgül Isı	0,752 J/g ·°K

kompozit ve çelik arasındaki bağlantıyı sağlayan yapıştırıcının değerleri de ANSYS yazılımı üzerinden Tablo 1 ve Tablo 2'deki gibi tanımlanmıştır.

Belirtilen malzemelerle tanımlanan 3 boyutlu model ise ardından ANSYS üzerinde analiz yapılması için ağlara bölündü. Modellerin ağıllı halleri Şekil 5 ve Şekil 6'daki gibidir. Düğüm ve eleman sayıları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Boyutlu Parçaların Düğüm ve Eleman Sayıları

Parça	Çelik Dişli	Hibrit Dişli
Düğüm Sayısı	38233	77908
Eleman Sayısı	7266	23841

**Şekil 5.** Hibrit Dişlinin Sonlu Elemanlar Modeli**Şekil 6.** Tamamen Çelik Dişlinin Sonlu Elemanlar Modeli**Tablo 4.** Başlangıç Şartları

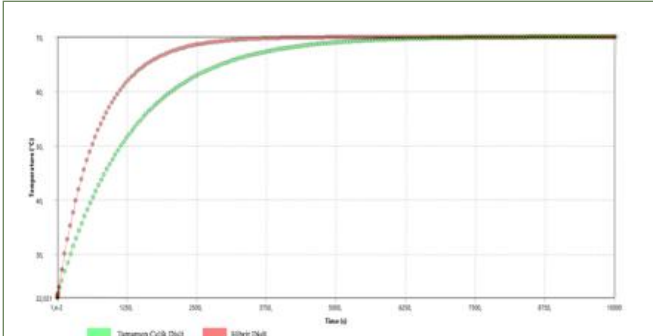
Başlangıç Sıcaklığı	22 °C
Film Katsayısı (Hava)	5 W/m <sup>2</sup> ·°C
Film Katsayısı (Yağ)	49,8 W/m <sup>2</sup> ·°C
Başlangıç Zaman Adımı	0,01 s
Minimum Zaman Adımı	0,01 s
Maksimum Zaman Adımı (Hava)	50 s
Maksimum Zaman Adımı (Yağ)	20 s
En Son Zaman Adımı (Hava)	10000 s
En Son Zaman Adımı (Yağ)	2000 s

70°C, 100°C, 120°C, 150°C ve 180°C hava ve yağda cisimlerde gerçekleşecek sıcaklık dağılımını incelemek üzere yapılmış olan analizlerde kullanılan başlangıç şartları Tablo 4'te belirtilmiştir.

### 3. ANALİZ SONUÇLARI

Hibrit dişli ile tamamen çelik dişli arasında yapılan analizler incelendiğinde, hibrit dişli üzerindeki ortalama sıcaklığın çelik dişliye göre daha hızlı yükseldiği Şekil 7'de açıkça görülebilmektedir.

Kompozit malzemelerin ısıl kapasiteleri düşünüldüğünde, zaten böyle bir sonuç beklenmektedir. Fakat bu durum, genel anlamda dişli yapısı için çok fazla enerjiyi absorbe etmesi ve buna bağlı olarak bazı sorunların ger-



Şekil 7. Hibrit Dişlinin ve Çelik Dişlinin Sıcaklık Karşılaştırması

çekleşme olasılığının bulunması anlamına gelmektedir.

Bu nedenden dolayıdır ki hibrit dişli kullanımlarında yağ seçimi, yağın sadece sürtünme ve aşınmaya karşı bir koruyucu değil aynı zamanda bir soğutucu olması gerektiği de akılda tutularak yapılmalıdır.

Ayrıca hibrit dişlide, kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcı malzeme termal anlamda kritik bölgelerden biridir. Üretici bilgilerine göre, yapıştırıcı 100°C derece ve üzeri sıcaklıklarda bağlama mukavemetini yitirmekte ve bu da yapısal sorunlara neden olabilmektedir.

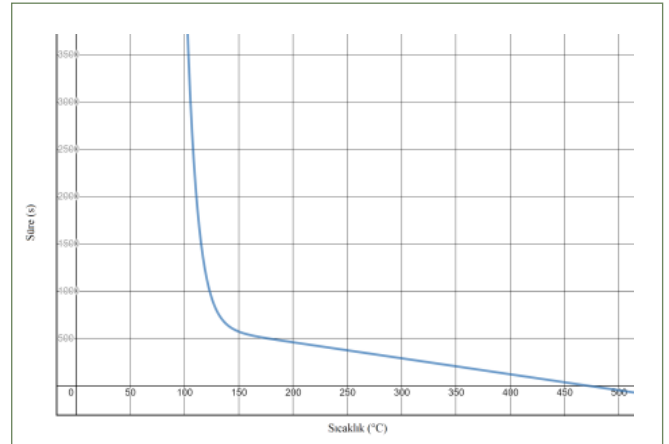
Bu bilgiler ışığında 100°C ve daha üzeri sıcaklıklarda yapılan analizlerden 100°C'ye ulaştığı noktalar üzerinden enterpolasyon yapılarak hibrit dişlinin, belirtilen ortam ve sıcaklıkta çalışabileceği en fazla süreler hesaplanmıştır.

Hava için enterpole edilen denklem, Denklem 1'de verilmiş ( $R2 = 0,9989$ ) ve bu denklemin grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Yağ için enterpole edilen denklem, Denklem 2'de ( $R2 = 0,9995$ ) verilmiş ve bu denklemin grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu denklemlerde ortam sıcaklığı  $T$  (°C) girilerek yapıştırıcının dayanabileceği maksimum süre  $t$  hesaplanabilmektedir.

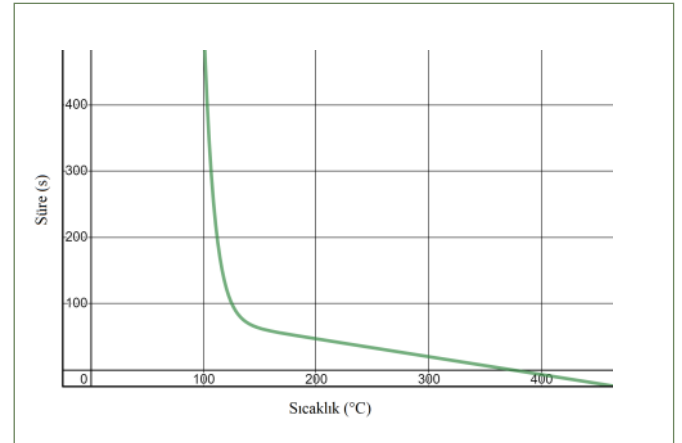
$$t = 8,7662.107.e^{-0,0995915.T} - 1,69158.T + 797,536 \quad (1)$$

$$t = 1,7739.107.e^{-0,10536.T} - 0,270335.T + 100,794 \quad (2)$$

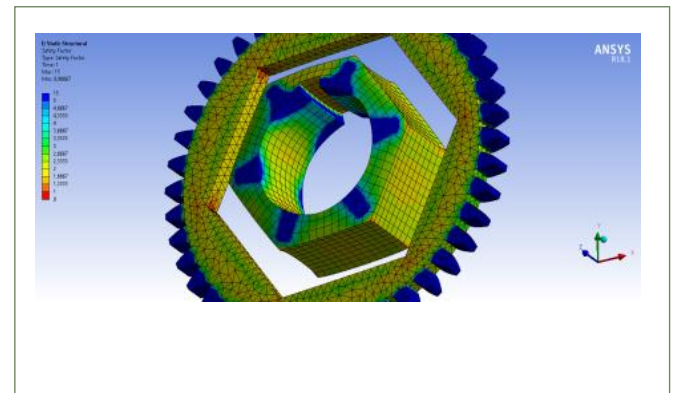
Analizler sonucunda görülmüştür ki, sıcaklık değişimleri sonucunda hibrit dişli üzerinde  $6,7 \cdot 10^{-8}$  milimetreye kadar deformasyon gerçekleşmektedir. Her bir parça üzerinde gerçekleşen deformasyon diğer parçaları etkilediğinden birbirleri üzerinde gerilmelere sebebiyet vermektedir. Bu gerilmelerden en büyüğü ise Şekil 10 ve Şe-



Şekil 8. Hava Sıcaklığına Bağlı Olarak Yapıştırıcının Dayanabileceği En Fazla Sürenin Grafiği



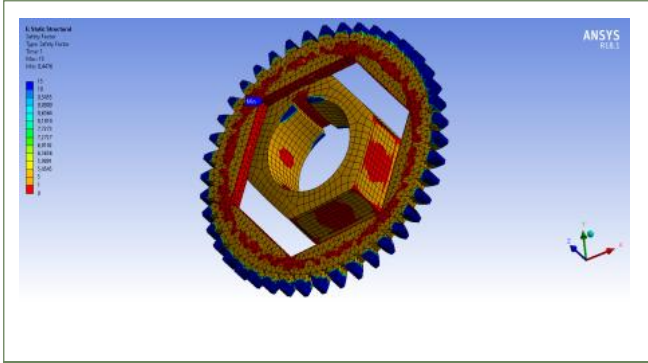
Şekil 9. Yağ Sıcaklığına Bağlı Olarak Yapıştırıcının Dayanabileceği En Fazla Sürenin Grafiği



Şekil 10. 100°C'de Hibrit Dişli Üzerindeki Kritik Bölgelerdeki Emniyet Katsayıları

kil 11'de gösterildiği gibi iç kompozit malzemenin dıştaki çelik diş bölgesinde sivri noktalara yaptığı gerilmedir. Bu noktalardaki emniyet katsayısı 100°C sıcaklıktan itibaren





**Şekil 11.** 180°C'de Hibrit Dişli Üzerindeki Kritik Bölgelerdeki Emniyet Katsayıları

1 değerinin altına inmektedir; bu nedenden dolayı bu noktada yapısal hatalar oluşacaktır. Ayrıca içteki çelik yuva veya açılan kama yuvasında da 120°C sıcaklıktan yüksek değerlerde emniyet katsayısı 1 değerinin altına inmektedir. Bu da dişlinin mile bağlantısı konusunda sorunlara neden olabilecektir.

#### 4. SONUÇ

Son yıllarda dişli çarklarda performans / ağırlık oranının geliştirilmesi için birçok inovatif tasarım literatürde ve uygulamada görülmektedir. Kompozit malzemeler yüksek dayanımlarının yanında sahip oldukları düşük yoğunlukları ve yüksek sönümlenme kabiliyetleri nedeniyle birçok yapısal elemanda olduğu gibi dişli çarkların tasarımında da artık iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Ortaya çıkarılan hibrit (Çelik/Kompozit malzeme) dişli çarkların döner kanatlı hava taşıtlarında dahi uygulama potansiyeli bulunduğu özellikle NASA Glenn Enstitüsünün araştırmalarıyla ortaya çıkmıştır.

Şu anki tasarımı ile hibrit dişlinin yüksek sıcaklıklarda uzun süreli kullanıma uygun olmayacağı gözlemlenmiştir. Bu şartlar altında uygun çalışma koşullarına ulaşmak için dişlinin tasarımında optimizasyona gidilmesi gerekmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, hibrit dişlinin iç kompozit kısmının işlenmiş dişliyle olan bağlantısı, sıcaklık sonucu

deformasyona bağlı gerilmenin en çok gözlemlendiği bölge olarak belirlenmiştir.

Altıgen şeklin köşelerinde yüzey alanının çok küçük olması dolayısıyla deformasyonun ardından çentik etkisi nedeniyle yüksek gerilmelerin oluşması beklenen bir durumdur. Araştırmamızda, oluşan bu yüksek gerilmelerin çelik malzemesinin dayanamayacağı kadar yüksek olduğu görülmüştür. Böylece hibrit dişlinin bu çalışmamızda kullanılan tasarımının geometrisi yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle geometride değişimler yapılmalıdır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Çalışmamız süresince desteklerini esirgemeyen TUSAŞ Lift Up Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Programı yöneticilerine ve projenin sanayi danışmanı Sayın Mehmet Ali YAVUZ'a, teşekkür ederiz.

#### KAYNAKÇA

1. **Babalık, F.C., Çavdar, K.** 2015. "Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri", Dora Yayınları, Bursa.
2. **Black, S.** 2015. "New aerocomposites niche: Helicopter transmission gears?", <https://www.compositesworld.com/articles/new-aerocomposites-niche-helicopter-transmission-gears>, son erişim tarihi: 12 Nisan 2020.
3. **Handschuh, R.F., Roberts, G.D., Sinnamon, R.R., Stringer, D.B., Dykas, B.D., Kohlman, L.W.** 2012. "Hybrid Gear Preliminary Results — Application of Composites to Dynamic Mechanical Components", NASA Glenn Research Center, Ohio.
4. **Handschuh, R.F., LaBerge, K.E., DeLuca, S., Pelagalli, R.** 2014. "Vibration and Operational Characteristics of a Composite-Steel (Hybrid) Gear", NASA Glenn Research Center, Ohio.
5. **Kundi, A.** 2018. "Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Dişli Kırılma Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
6. **AzoM.** 2012. "AISI 9310 Alloy Steel (UNS G93100)"
7. Toray Composite Materials America Inc. 2018. "T700S Standard Modulus Carbon Fiber"