
Araştırma Makalesi / Research Article

Eklemeli İmalat Yöntemi ile Optimum Düz Dişli Çark Tasarımı ve Üretimi

Oğuz DOĞAN*, Muhammed Safa KAMER

*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Kahramanmaraş, Turkey
(ORCID: 0000-0003-4203-8237) (ORCID: 0000-0003-3852-1031)*

Öz

Dişli çarklar endüstride en çok kullanılan güç aktarma organı olarak karşımıza çıkmaktadır. Güç aktarımının olduğu hemen her yerde ilk sırada kullandıklarından dolayı, üzerlerinde buldukları makinelerin toplam ağırlıklarını önemli ölçüde arttırmaktadırlar. Bu nedenle dişli geometrisi üzerinde gerçekleştirilecek hafifletme çalışmaları ile birlikte daha hafif ve sürdürülebilir makine tasarımları gerçekleştirilebilecektir. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ve topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılarak, hafif yenilikçi ve sürdürülebilir bir dişli çark tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle standart bir dişli geometrisi oluşturulmuştur. Ardından standart dişli çarka topoloji optimizasyonu uygulanarak optimum malzeme dağılımı belirlenmiştir. Elde edilen malzeme dağılımı, üretilebilirlik ve mukavemet kısıtları dikkate alınarak yeni bir dişli çark tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan yeni ve standart dişliye birim yükler uygulanarak, dişli çarkların mukavemet performansları test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ardından tasarlanan standart ve optimize edilmiş dişli çarklar üç boyutlu yazdırma yöntemi ile üretilmiş ve kütle değişimleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, standart dişli çarka göre % 30 oranında hafifletme sağlanırken, gerilme değerlerinde ise %15'lik bir artış gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Düz dişli çarklar, Topoloji optimizasyonu, Eklemeli imalat yöntemi

Optimum Spur Gear Design and Production with Additive Manufacturing Method

Abstract

Gears are the most used powertrain elements in the industry. They significantly increase the total weight of the machines on which they are mounted, since they are used in the first place in almost every place where there is power transmission occur. For this reason, lighter and more sustainable machine designs will be able to be realized with the lightening studies to be carried out on the gear geometry. In this study, a lightweight, innovative and sustainable gear design has been implemented by using additive manufacturing and topology optimization methods. At first standard gear geometry has been created. Then, the optimum material distribution is determined by applying topology optimization to the standard gear. Considering the material distribution form the topology optimization, manufacturability and strength constraints, a novel gear design has been performed. The strength performances of gears are tested and compared by applying unit loads to the designed new and standard gear, then, designed standard and optimized gears are produced by 3D printing method and mass changes are measured. As a result of the study, 30% mass reduction is achieved however; the stress values are increase 15% compared to the standard gear.

Keywords: Spur gears, Topology optimization, Additive manufacturing

1. Giriş

Dişli çarklar diğer güç aktarma organları ile karşılaştırıldığında, yüksek mukavemet, sabit çevrim oranı, geniş sıcaklık aralığında çalışma, yüksek güç aktarma avantajlarından dolayı endüstride mikro elektromekanik sistemlerden, rüzgâr türbinlerine, hava ve uzay taşıtlarına kadar yaygın olarak

* Sorumlu yazar: oguzdogan@ksu.edu.tr

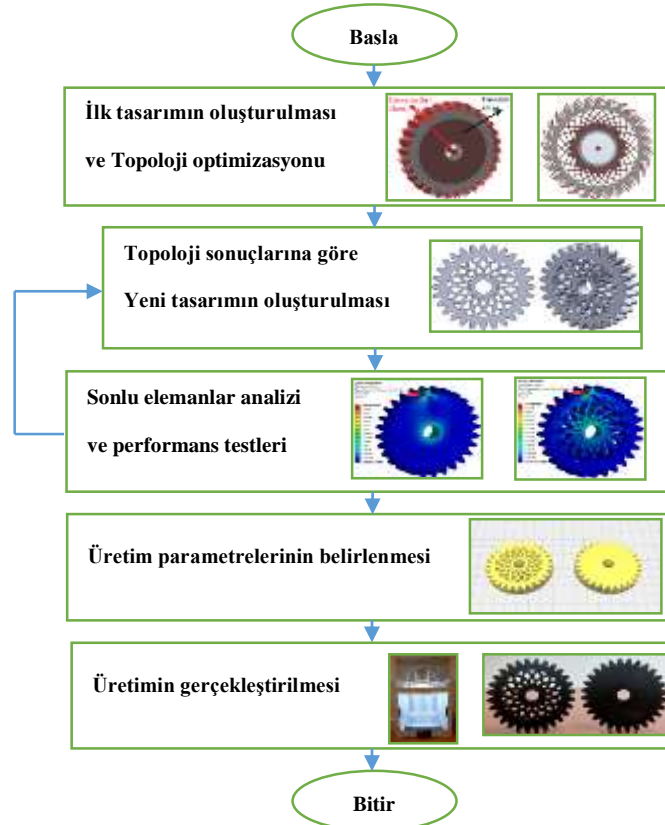
Geliş Tarihi: 09.04.2021, Kabul Tarihi: 09.06.2021

kullanılmaktadır. Dişli çarklar standartlaşmış boyut ve hesap yöntemine sahip makine elemanları olmasına rağmen günümüzde üzerinde en çok araştırmanın yapıldığı makine elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun nedeni dişli çarkların daha dayanıklı, uzun ömürlü, verimli, az hacimli, hafif, sessiz çalışma gibi talepleri karşılamak için tasarlanmak istenmesidir.

Dişli çarklar güç aktarma organının kütlesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle aktarılabilecek güce göre en küçük ve en hafif dişli çark tasarımının yapılması gerekmektedir. Literatür incelendiğinde dişli kutusu ve dişli çarkların hafifletilmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur [1-6]. Bu çalışmaların büyük çoğunluğunda farklı optimizasyon yöntemlerinin kullanılmıştır. Bu yöntemlerden en önemlisinin ise topoloji optimizasyonu olduğu görülmektedir.

Topoloji optimizasyonu temelde, bir eleman üzerine gelen yükler ve kısıtlar doğrultusunda o elemanı olabildiğince en hafif, diğer taraftan en rijit yapan malzeme dağılımının belirlenmesine yarayan bir yöntemdir. Topoloji optimizasyonu birçok yapısal problemin boyutsal iyileştirmenin yapıldığı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde çok farklı elemanların topoloji optimizasyonu ile boyutsal olarak iyileştirildiği görülmektedir [7-8]. Ancak bu yöntemde elde edilen malzeme dağılımları bazı durumlarda geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek kadar karmaşık yapıda olduğu görülmektedir. Bu nedenle son yıllarda bu tarz yapıların üretiminde yeni sayılabilecek bir yöntem olan eklemeli üretim yöntemine geçilmiştir.

Eklemeli imalat yöntemi son on yıl içerisinde hızla gelişen yeni bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Eklemeli imalat yönteminde üç boyutlu olarak tasarlanan ürün geometrisi, geleneksel yöntemlerden farklı olarak katmanlar şeklinde ürünün inşa edilmesi prensibine dayanır. Bu nedenle geleneksel üretim yöntemleri ile üretilemeyecek veya üretimi çok pahalı olan ürünler ucuz ve kolay bir şekilde üretilmektedir [9]. Ayrıca bu yöntemle malzeme israfının da önüne geçilmektedir. Son yıllarda, eklemeli imalat, özel küçük parti üretimi veya prototipleme için güvenilir bir üretim yöntemi haline gelmiştir ve CAD tasarımlarının gerçeğe dönüştürülmesini hızlandırmıştır.



Şekil 1. Bu çalışmada izlenen akış diyagramı

Eklemeli imalat yöntemi güvenilir bir yöntem olmak ile birlikte, tasarım hazırlık sürelerini kısaltır ve geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zor olan geometrilerin üretimini basit ve ucuz hale getirmektedir. Bu yönüyle de geleneksel makine mühendisliğinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır

[10-12]. Eklemeli imalat yöntemi özellikle 1000 adet altı özel dişli çark üretimleri için günümüzde maliyet bakımından en uygun üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Eklemeli imalat yöntem ile dişli çark üretiminin gerçekleştirildiği birçok çalışma bulunmaktadır [13].

Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu ve üç boyutlu üretim yöntemi kullanılarak hafifletilmiş yenilikçi ve sürdürülebilir bir dişli tasarım süreci detaylı olarak anlatılmaktadır. Öncelikle standart bir dişli geometrisinden yararlanılarak topoloji optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen malzeme dağılımına göre, yeni tasarım dişli geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni ve eski dişli geometrileri için sonlu elemanlar analiz yöntemi ile performans kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Performans olarak yeterli bulunan dişli çarklar üretim parametrelerinin belirlenmesinin ardından üç boyutlu yazdırma yöntemi ile üretilmiştir. Bu çalışmada izlenen akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmektedir. Akış diyagramı incelendiğinde, ilk tasarım ve topoloji optimizasyonun ardından, yeni dişli gövde tasarımı gerçekleştirilmiştir. Akabinde sonlu elemanlar testleri ile tasarlanan yeni ve eski standart dişli çarkın mukavemet özellikleri belirlenmiş son aşamada ise üç boyutlu yazdırma tekniği ile tasarlanan dişli çarklar üretilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar analizi (FEA) endüstrinin çok farklı alanlarında ürün tasarımı, optimizasyonu ve doğrulama aşamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi ise özellikle son yıllarda metal üretim kabiliyetlerinin artması ile birlikte endüstride hızla kullanım alanı artmaktadır. Bu çalışmada, optimum boyutlara sahip dişli çark tasarımının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle, topoloji optimizasyonu tekniği kullanılarak en uygun malzeme dağılım yapısı elde edilmiştir. Elde edilen malzeme dağılım deseninden yararlanılarak üç boyutlu yazıcılar ile üretilebilir yeni tasarıma geçilmiştir. Yeni tasarım sonlu elemanlar analizi performans testine tabi tutulmuştur. Performans testinden başarı ile geçen optimum boyutlara sahip dişli geometrisi üç boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilmiştir.

2.1. Düz Dişli Çarklar için Topoloji Optimizasyonu Modeli

Topoloji optimizasyonu yöntemi, bir makine elemanı, yapı veya sistem üzerine gelen yükler altında o makine elemanı veya yapı için, optimum malzeme dağılımının bulunmasını sağlar. Topoloji optimizasyonun amacı yüklemeler altında, parça rijitliği en üst düzeye çıkartarak parçanın kütlelerinin en aza indirilmesidir. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu, geleneksel yöntemlerle üretilen bir dişli çarkın, mukavemet değerlerinden feragat etmeden gövde tasarımının değiştirilmesi ile hafif ve yenilikçi ve üç boyutlu üretim teknikleri ile üretilebilen bir dişli çarkın tasarımında kullanılmıştır.

Topoloji optimizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için öncelikle mevcut sistemlerde kullanılan standart bir dişli tasarımı oluşturulmuştur. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan standart dişli çark tasarım parametreleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

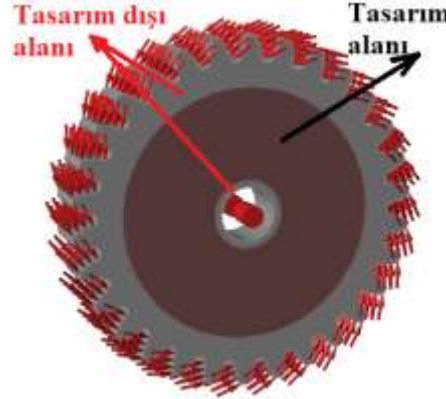
Tablo 1. Dişli tasarım parametreleri

Modül (m) / (mm)	2
Diş sayısı	28
Diş başı faktörü (h_a)	1*m
Diş dibi faktörü (h_f)	1,25*m
Diş genişliği (b) / (mm)	10
Kesici takım uç yarıçapı (ρ_f)	Tam yuvarlak uçlu takım
Topoloji tasarım dışı alanı rim kalınlığı	2,25*m

Topoloji optimizasyonu yapılırken yapı üzerindeki tüm bölgelerden malzeme çıkarımının yapılması doğru bir yaklaşım değildir. Yüklemeler ve mesnetlerin uygulandığı, bölgeler ile kritik öneme sahip bölgelerin topoloji alanı dışında bırakılması gerekmektedir. Bu nedenle topoloji optimizasyonu gerçekleştirilirken topoloji tasarım alanı ve tasarım dışı alanların belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, dişli çarkın dış yüzeylerinden başlayarak 2,25*m rim kalınlığına kadar olan kısım ile merkez bölgesindeki 3 mm kalınlığındaki bölge tasarım dışı alan olarak tanımlanmıştır. Geriye kalan iç bölgeler

ise tasarım alanı olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilecek olan topoloji optimizasyonu sadece bu alan içerisinde meydana gelecektir.

Topoloji optimizasyonu çalışmalarında uygulanan yüklerinin büyüklüklerinin malzeme dağılımı ile doğrudan ilişkisi bulunmadığından dönme yönüne göre tek taraftan olmak üzere sabit birim yükleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dişli çarkın mil bağlantı bölgesi altı serbestlik derecesi sıfır olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 2’de topoloji optimizasyonu için sınır şartları gösterilmektedir.



Şekil 2. Topoloji optimizasyonu sınır şartları

Üretilebilirlik topoloji optimizasyonu için ana kısıtlamalardan bir tanesidir. Bu nedenle topoloji tasarımında üretilebilirlik kriterleri altında revize edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, üretim metodu olarak eklemeli imalat yöntemi kullanıldığından topoloji optimizasyonu sınır şartları belirlenirken üretilebilirlik kısıdı olarak sadece simetri tanımlaması yapılmıştır. Optimizasyon probleminin amacı maksimum rijitlik olarak belirlenmiştir. Ayrıca tasarım alanı için %50 hacim azaltılması kısıt olarak tanımlanmıştır. Topoloji optimizasyonu problemi Solidthinking Inspire paket programı kullanılarak tanımlanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

2.2. Optimize Edilmiş Dişli için Gerçekleştirilen Performans Analizleri

Topoloji optimizasyonu sonucunda yeniden tasarlanan dişli çark ile standart dişli çark arasındaki mukavemet ve kütle açısından performans kıyaslamasının yapılması için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak birim yük altında her iki dişli çarkta oluşan gerilme değerleri kıyaslanmıştır.

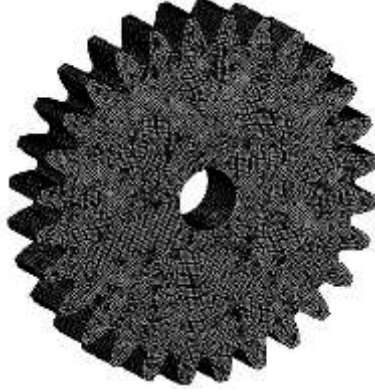
Bu çalışmada ANSYS Workbench 19.1 sonlu elemanlar paket programının static – structural modülü analizlerde kullanılmıştır. Genel sonlu elemanlar analiz prosedürü incelendiğinde öncelikle analiz edilecek elemanların 3D CAD geometrilerinin oluşturulması gerekmektedir. Analizlerde kullanılacak dişli çarkların CAD geometrileri Solidworks programında oluşturularak ANSYS programına aktarılmıştır.

Tablo 2. PLA malzemesi için analizlerde kullanılan mekanik özellikler

Elastisite Modülü (MPa)	2400
Poisson Oranı	0,35
Özkütke (g/cm ³)	1,24
Akma Gerilmesi (MPa)	49,5
Kopma Gerilmesi (MPa)	45,6

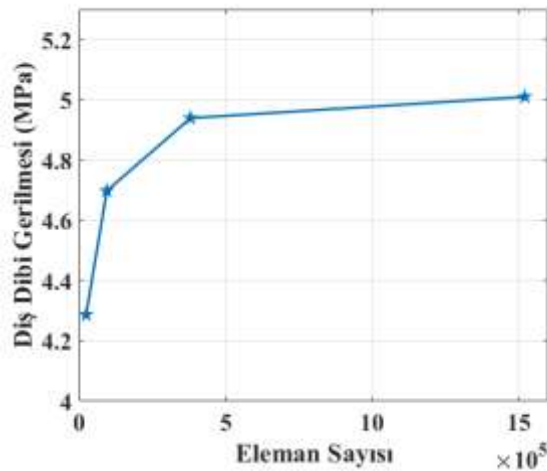
Sonlu elemanlar analiz prosedürünün ikinci adımı olarak tasarımları tamamlanan dişli çarkların malzeme tanımları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada üretilen dişli çarkların malzemesi PLA (Polylactic acid) olarak belirlendiğinden analizlerde de PLA malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Yapısal statik analizlerde eğer akma değerinin üzerine çıkılmayacaksa sadece elastisite modülü ve poisson oranı değerlerinin tanımlanması yeterli olacaktır. Ancak, analizi yapılan eleman üzerinde herhangi bir hasar olup olmadığını tespit etmek için akma ve kopma gerilmesi bilgilerine ihtiyaç olmaktadır. PLA malzemesi için bu çalışmada kullanılan mekanik özellikler tablo 2’de verilmektedir.

Sonlu elemanlar analizinin en önemli aşamalarından bir tanesi de ağ yapısının tanımlanmasıdır. Ağ yapısının yanlış tanımlanması durumunda, elde edilecek olan sonuçta doğrudan yanlış olacaktır. Bu nedenle sonlu elemanlar analizleri yapılırken ağ yapısının doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Yapısal analizlerde ANSYS Workbench ortamında birbirinden farklı eleman tipleri bulunmaktadır. Yapısal analizlerde geometrinin müsaade etmesi durumunda, hexahedral eleman tipinin kullanılması bazı çalışmalarda önerilmektedir [7]. Ancak analizi yapılacak eleman geometrisinin karmaşık olduğu durumlarda tetrahedral veya bu iki eleman tipinin karışımı olarak da ağ yapısının oluşturulması mümkün olacaktır. Dişli çark geometrisi çok karmaşık detaylara sahip olmadığından bu çalışmada hexahedral eleman tipi ağ yapısında kullanılmıştır. Tanımlanan ağ yapısı yaklaşık olarak 380000 eleman ve 647000 düğüm noktasının bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Şekil 3’de bu çalışmada kullanılan ağ yapısının genel görünümü verilmektedir. Optimize edilmiş dişli çark geometrisinin bir miktar farklı olmasından dolayı eleman ve düğüm noktası sayısında bir miktar azalma söz konusudur ancak genel eleman büyüklüğü ve sıklığı her iki analizde de aynıdır.



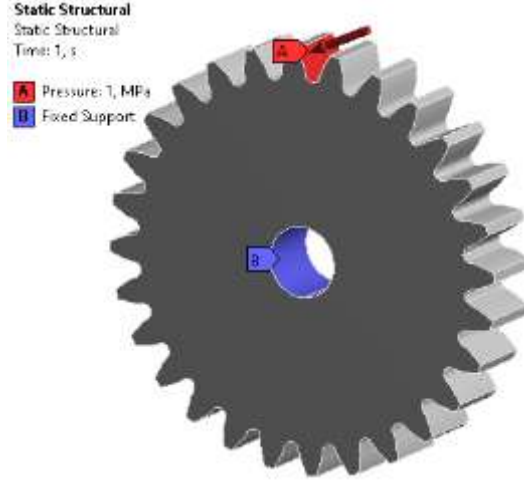
Şekil 3. Sonlu elemanlar ağ yapısı

Ağ yapısı belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan bir tanesi de sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçların ağdan bağımsız olarak doğru sonuçlar verdiğini gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan ağ yapısı için ağdan bağımsızlık çalışması (mesh yakınsaması çalışması) yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada içi dolu standart dişli çark için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Şekil 4 incelendiğinde, dört farklı eleman boyutu için elde edilen toplam eleman sayısı (24000 – 95000 – 380000 – 1500000) ve her bir durum için elde edilen maksimum dış dibi gerilmesi değişimi gösterilmektedir. 24000 ve 95000 elemanın olduğu durumlar için elde edilen gerilme değeri arasındaki fark oldukça yüksek olmasına rağmen, 380000 eleman ile 1500000 eleman arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir. Bu nedenle 380000 eleman ve üzeri eleman sayılarında sonuç ağdan bağımsız hale gelmektedir. Bu nedenle hem hızlı çözüm hem de bilgisayar belleğinde az yer kaplaması bakımından 380000 elemana sahip eleman boyutu analizlerde kullanılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ağdan bağımsızlık çalışması Şekil 4’ te gösterilmektedir.



Şekil 4. Ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları

Ağ yapısının doğru bir şekilde tanımlanmasından sonra, sonlu elemanlar analizinin sınır şartları tanımlanmıştır. Bu çalışmada, standart bir dişli çark ile gövdesi optimize edilmiş dişli çark arasındaki gerilme değişimleri incelendiği için birim yük altındaki değişimler dikkat alınmıştır. Bu nedenle şekil 5’de gösterildiği gibi dişli çarkın bir dişi üzerinden yüzeye dik olacak şekilde 1 MPa ‘lık bir basınç uygulanmış ve dişlinin mil ile temas eden noktaları ise altı serbestlik derecesi sıfır olacak şekilde sabitlenmiştir.



Şekil 5. Sonlu elemanlar analizi sınır şartları

Malzeme, ağ yapısı ve sınır şartlarının tanımlanmasının ardından, sonlu elemanlar analiz modeli çözüme bırakılmıştır. Analiz tipi statik yapısal analiz olduğu için çözüm oldukça kısa bir süre içerisinde elde edilmiştir. Çözüm 2 adet Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 işlemciye ve 64 GB RAM’e sahip bir iş istasyonunun yaklaşık olarak 30sn’ de çözüme ulaşmıştır. Yapısal statik analizde sistem üzerinden tüm kuvvet ve momentlerin toplamı, reaksiyon kuvvetlerine ve momentlerine eşittir. Sonlu elemanlar modeli bu koşulu model üzerinde bulunan tüm düğüm noktaları için ayrı ayrı çözerek sonuçları hesaplar. Yapısal statik analizde çözülen temel sonlu elemanlar denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$[F] = [K][u] \quad (1)$$

Burada $[F]$ toplam yük vektörü, $[K]$ rijitlik matrisi ve $[u]$ yer değiştirme vektörüdür. F değerleri uygulanan yükler ve sabitlemeler ile hesaplanır. K ise malzeme ile tanımlanan elastisite modülü değerinden elde edilir. Sonlu elemanlar çözücüsü yukarıdaki denklemden u (gerinim) değerlerini hesaplar. Ardından Hooke yasası, sonlu eleman modelinin gerilim dağılımını hesaplamak için kullanılır. Basit şekli ile Hooke yasası aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$[\sigma] = [E][\varepsilon] \quad (2)$$

Burada σ gerilme, E elastisite modülü ve ε ise hesaplanan gerinim değerleridir. Hooke yasası kullanılarak model üzerinde meydana gelen gerilme değerleri her bir eleman için ayrı ayrı hesaplanır.

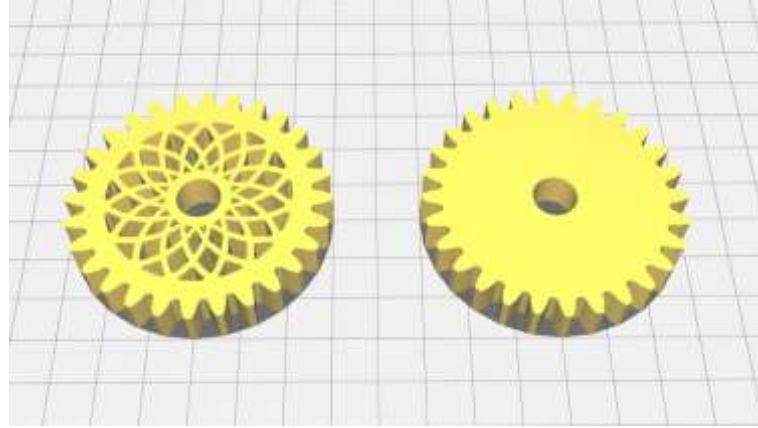
2.3. Eklemeli İmalat Yöntemi ile Dişli Üretimi

Üç boyutlu yazıcıların günlük hayatta kullanımının artması ile birlikte eklemeli imalat yönteminin kullanım oranı gün geçtikçe artmaktadır. Eklemeli imalat temel olarak yazıcı mantığı ile çalışan yeni bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi, üretilecek olan elemanın katmanlar halinde bir bütün olarak üretilmesine imkân sağlar. Bu sayede, geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor hatta imkânsız denebilecek tasarım üretilmektedir. Karmaşık iç kanallara sahip elemanların da kolayca üretilebilmesinden dolayı eklemeli imalat yöntemi bu çalışmada optimizasyon sonucu elde edilen dişli geometrisinin üretiminde kullanılmıştır.



Şekil 6. Ultimaker S5 3D yazıcı

Bu çalışmada Ultimaker S5 üç boyutlu yazıcı dişli çark üretimlerinde kullanılmıştır. Şekil 6' da Ultimaker S5 yazıcısının genel görünümü gösterilmektedir. Ultimaker S5 yazıcısı çift nozul sistemi sayesinde üretim esnasında destek gerekli noktalara suda çözünen PVA malzemenin kullanılması ile elle ulaşılamayacak noktalardaki boşlukları hassas bir şekilde üretme yeteneğine sahiptir. Üretilen parça suda bekletilerek, PVA malzemesinin suda çözünmesi sağlanmakta ve elle ulaşılamayacak noktalardaki destekler kolaylıkla parça üzerinden uzaklaştırılmaktadır.



Şekil 7. CURA programında dişli çarkların konumlandırılması

Eklemeli imalat yönteminin ilk aşaması üretilecek parçaların CAD geometrilerinin oluşturulmasıdır. Topoloji optimizasyonu sunucunda önerilen malzeme dağılımına göre optimum geometriye sahip dişli çarklar Solidworks ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan geometriler stl. dosya formatında, CURA programına aktarılmaktadır. CURA programında, üç boyutlu üretim parametreleriyle birlikte üretilecek parçaların yazıcı üzerindeki konumları duruş açıları vb. parametrelerde belirlenmektedir. Ayrıca nozulun takip edileceği koordinatlar yine CURA programında dilimleme işlemi ile oluşturulmaktadır. Şekil 7'de bu çalışmada üretilen dişli çarkların CURA programındaki konumlandırılması gösterilmektedir. Tablo 3'te ise bu çalışmada kullanılan PLA malzemesi için temel üç boyutlu üretim parametreleri verilmektedir. Bu parametrelerin dışında CURA programının ara yüzünden onlarca farklı yazdırma parametresi kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, yazdırma parametrelerinin doğru seçilmesidir. Aksi halde istenilen boyut hassasiyeti yakalanmayacaktır.

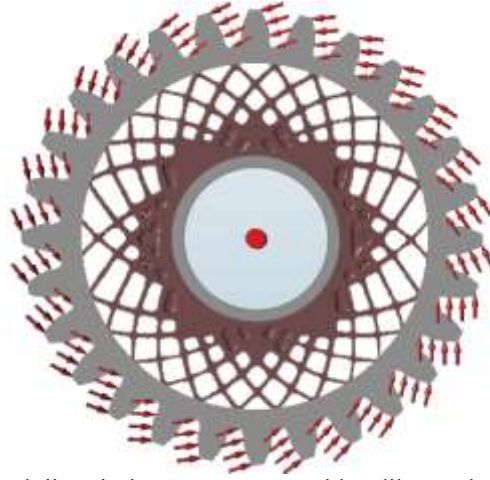
Tablo 3. Temel üç boyutlu üretim parametreleri

Üretim Parametresi	
Yazdırma hızı	70 mm /s
Nozul çapı	0.4 mm
Yazdırma sıcaklığı	205 °C
İlk yazdırma sıcaklığı	195 °C
Tabla sıcaklığı	60 °C
İç dolgu oranı	% 100

3. Bulgular ve Tartışma

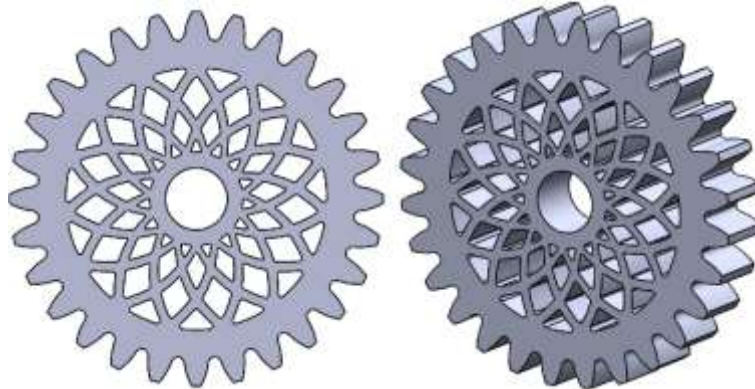
3.1. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları

% 50 hacim azaltılması için topoloji optimizasyonunun sonucu Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde önerilen şeklin geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesinin mümkün olmadığı görülmektedir. Ayrıca dişlinin sabit bırakılan rim bölgesi ile gövde arasındaki bağlantı noktalarının çok ince olduğu görülmektedir. Buda mukavemet açısından sorun oluşturacaktır. Bu nedenle önerilen tasarımın tekrardan ele alınarak güncellenmesi gerekmektedir.



Şekil 8. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen malzeme dağılımı

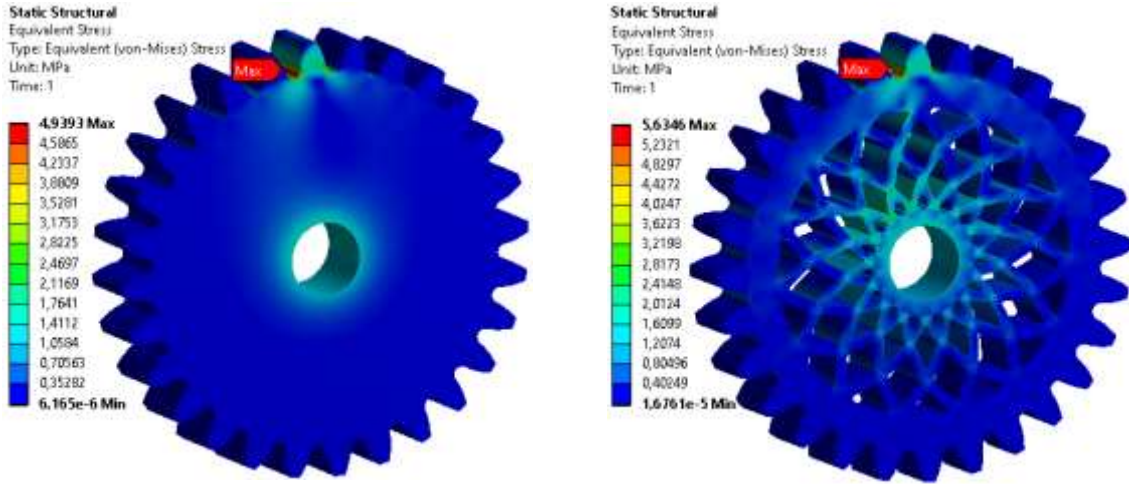
Topoloji optimizasyonu yöntemi tasarımcıya temel olarak yeni bir tasarımın oluşturulması için bir tasarım taslağı görevi gören sonuçlar vermektedir. Tasarımcı topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen malzeme dağılımından ilham alarak, mukavemet açısından sorun oluşturmayacak ve üretilebilir tasarım oluşturması gerekmektedir. Bu doğrultuda şekil 8' deki optimum malzeme dağılımından yararlanılarak şekil 9' daki tasarıma geçilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde geliştirilen yeni dişli gövdesi tasarımın, topoloji optimizasyonu sonucunda olduğu gibi oldukça karmaşık ve geleneksel yöntemlerle üretilmeyeceği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada üretilen dişli çarklar için eklemeli üretim yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 9. Topoloji optimizasyonu sonucunda tasarlanan optimum geometriye sahip dişli tasarımı

3.2. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Yapısal statik analizler sonucunda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 10’ da gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, maksimum gerilmenin her iki durum için de dış dibi bölgesinde olduğu görülmektedir. İçi dolu standart dişli çark için birim yükleme altında 4,9393 MPa’ lık bir gerilme değerinin olduğu tespit edilirken, optimize edilerek hafifletilmiş dişli çarkta ise gerilme değerinin bir miktar artarak 5,6346 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca optimize edilmiş dişli gövdesinde de bir miktar gerilmenin olduğu görülmektedir. Ancak bu gerilme değeri dişli geometrisine herhangi bir zarar verecek büyüklüklere ulaşamayacaktır. Genel olarak değerlendirildiğinde, optimize edilmiş dişli çark üzerinde oluşan gerilme değerleri yaklaşık olarak %14 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. Sonlu elemanlar sonucu elde edilen gerilme dağılımları

3.3. Eklemeli Üretim Sonuçları ve Kıyaslanması

Şekil 11’ de üç boyutlu yazdırma işlemi sonucunda üretilen optimize edilmiş ve standart dişli çarkların genel görünümü gösterilmektedir. Eklemeli üretim sayesinde geleneksel yöntemlerle üretilmesi hemen hemen çok zor hatta imkânsız denilebilecek hafifletilmiş bir dişli tasarımı kolaylıkla üretilmiştir.



Şekil 11. PLA malzemesinden üretilen optimize edilmiş ve standart düz dişliler

Tablo 4. PLA malzemesi için analizlerde kullanılan mekanik özellikler

	İlk Tasarımı	Optimize Edilmiş Tasarımı	% Değişim
Kütle (g)	30,01	21,47	-28,45
Gerilme (MPa)	4,939	5,634	+14,07

Üretilen dişli çarkların kütle özelliklerinin değerlendirilmesi için her iki dişli çark da hassas terazi ile tartılarak kütleleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, içi dolu standart dişli çarkın kütlesi 30,01g

gelirken optimize edilmiş tasarımın kütlesi 21,47g gelmektedir. Yeni tasarımın yaklaşık olarak %30 daha hafif olduğu ancak mukavemet bakımından ise %15 daha kötü performansa sahip olduğu belirlenmiştir. Dayanımın her ne kadar % 15 civarında kötüleşme durumu söz konusu ise de kütledeki üçte bir oranındaki azalış yeni tasarım dişliyi değerli kılmaktadır. Bu tip bir tasarımın metal olarak dişlilerde kullanılacağı düşünürse %15 lik bir gerilme artışın kütle kazanımlarına göre çok daha önemsiz olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle geliştirilen yeni içyapının sadece plastik dişliler için değil metal dişliler içinde kullanılması ile sürdürülebilir tasarımlar oluşturulabilecektir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ve topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılarak, hafifletilmiş, sürdürülebilir ve yenilikçi bir dişli tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle standart boyutlara sahip bir dişli geometrisinin topoloji optimizasyonu yöntemi ile optimum malzeme dağılımı belirlenmiş ardından bu dağılımdan hareketle yeni dişli geometrisi tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni ve standart dişli geometrileri ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak statik mukavemet analizleri gerçekleştirilmiş ve mukavemet açısından performansları kıyaslanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise tasarlanan standart ve optimize edilmiş dişli çarklar eklemeli imalat yöntemi ile üretilerek kütle değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak mukavemet açısından yaklaşık olarak %15 daha kötü ancak kütle açısından yaklaşık %30 hafifletilmiş bir dişli geometrisi elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ardından, elde edilen yeni tasarımın metal üç boyutlu yazıcılar ile üretilerek, gerçek uygulama alanlarında kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, yeni tasarımın dinamik performansı çeşitli bilgisayar modelleri veya deneyler ile araştırmaya açıktır.

Teşekkür

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi Tarafından 2020 / 7 – 17 M. Numaralı proje ile desteklenmektedir. Yazarlar Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunmaktadır.

Yazarların Katkısı

Yazarlar bu araştırma makalesine eşit katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Mura A., Cura F., Pasculli L. 2018. Optimisation Methodology For Lightweight Gears To Be Produced By Additive Manufacturing Techniques. Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science, 232 (19) : 3515-3523.
- [2] Yang G., Zhang J., Zhang Q., Wei X. 2014. Research On Lightweight Optimization Design For Gear Box. 7th International Conference Intelligent Robotics and Applications, 17 – 20 Aralık 2014, Guangzhou, 576-585.
- [3] Shah C., Thigale S., Shah R. 2018. Optimizing Weight of a Gear Using Topology Optimization. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 7 (6) : 403-406.
- [4] Petel M., Valiulla H., Khatod V., Chaudhary B., Gondalia V. 2019. Topology Optimization of Automotive Gear using FEA. International Journal of Recent Technology and Engineering, 8 (4) : 1079-1084.

- [5] Ramadani R., Belsak A. Kegl M. Predan J. Pehan S. 2018. Topology Optimization Based Design of Lighthweight and Low Vibration Gear Bodies. *Int J. Simul. Model*, 17 (1) : 92-104.
- [6] Liang M., Hu J., Li S., Chen Z. 2018. Topology Optimization of Transmission Gearbox under Multiple Working Loads. *Advances in Mechanical Engineering*, 10 (11): 1-7.
- [7] Dogan O., Karpat F., Yuce C., Kaya N., Yavuz N., Sen H. 2016. A novel design procedure for tractor clutch fingers by using optimization and response surface methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (6): 2615-2625.
- [8] Kaya N., Karen İ., Öztürk F. 2010. Re-Design of a Failed Clutch Fork Using Topology and Shape Optimization by the Response Surface Method, *Materials and Design*, 31: 3008-3014.
- [9] Yaykaşlı H., Kamer M.S., Akay O.E., Kaya A. 2019. Tabla Isıtmalı 3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Hızlarında Üretilen PLA Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Symposium on Advanced Engineering Technologies*, 2-4 Mayıs 2019, Kahramanmaraş, 1194-1199.
- [10] Kamer M.S., Yaykaşlı H., Temiz Ş., Kaya, A. 2019. 3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Renklerde ABS ve PLA Filamentler Kullanılarak Üretilen Çekme Numunelerinin İncelenmesi. 3. Uluslararası Matematik – Mühendislik – Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, 29 Kasım – 1 Aralık 2019, Şanlıurfa, 420 – 426.
- [11] Tatlı O., Özgül H.G. 2020. Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, İmalatı Ve Dolgu Geometrisinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *International Journal of Surveys, Engineering, Technology*, 13 – 24.
- [12] Solmaz M.Y., Çelik E. 2018. 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteđi Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 30 (1): 277-286.
- [13] Uzun M., Gür Y., Usca Ü.A. 2018. Manufacturing of new type curvilinear tooth profiled involute gears using 3D printing. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20 (1): 278-286.