

EKLEMELİ İMALAT İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU: EL FRENİ MEKANİZMASI UYGULAMASI

Neslihan TOP¹, Harun GÖKÇE², İsmail ŞAHİN¹

¹Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara Türkiye

²TÜBİTAK Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, Ankara Türkiye

neslihan.top@gazi.edu.tr, harungokce@yahoo.ca, isahin@gazi.edu.tr

Özet

Üretimi gerçekleştirilecek bir tasarımı, çok fonksiyonlu, mukavemeti yüksek ve hafif bir hale dönüştürmek tüm tasarımcı ve mühendislerin beklentisidir. Topoloji optimizasyonu, bu doğrultuda uygulanan optimizasyon tekniklerinden biridir. Topoloji optimizasyonu ile karmaşık geometriye sahip, kafesli yapıdaki parçaların elde edilmesi mümkündür. Yeni tasarlanan veya mevcutta var olan bir katı model üzerine kısıtlamalar getirilerek, kuvvet uygulanır. Optimizasyon işleminin tamamlanmasından sonra malzeme dağılımı optimize edilmiş, hafif ve çok fonksiyonlu ürünler elde edilebilir. Ancak karmaşık yapıdaki bu parçaların geleneksel imalat yöntemleri ile üretimi imkansızdır. Model üzerinde bir takım değişiklikler yapılması gerekir ve bu durum tasarımcılarının özgürlüğünü kısıtlar. Günümüzde kullanımı giderek artan eklemeli imalat teknolojileri ile karmaşık geometrideki parçalar tek işlem basamağında üretilebilmektedir. Bu teknolojilerin kullanımı, topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen parçaların üretimini mümkün kılar. Bu çalışma kapsamında, fren braketinin topoloji optimizasyonu gerçekleştirilerek ideal forma ulaşması ve malzeme dağılımının düzenlemesiyle hafiflemesi sağlanmıştır. İşlem sonrası elde edilen parçanın eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Selective Laser Sintering (SLS) yöntemi ile destek parça kullanılmadan, modelin tamamlanmasından sonra ekstra bir işleme gerek olmaksızın üretimi planlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapısal optimizasyon, Topoloji optimizasyonu, Eklemeli imalat teknolojileri, Seçici lazer sinterleme (SLS).

TOPOLOGY OPTMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING: AN APPLICATION ON HANDBRAKE MECHANISM

Abstract

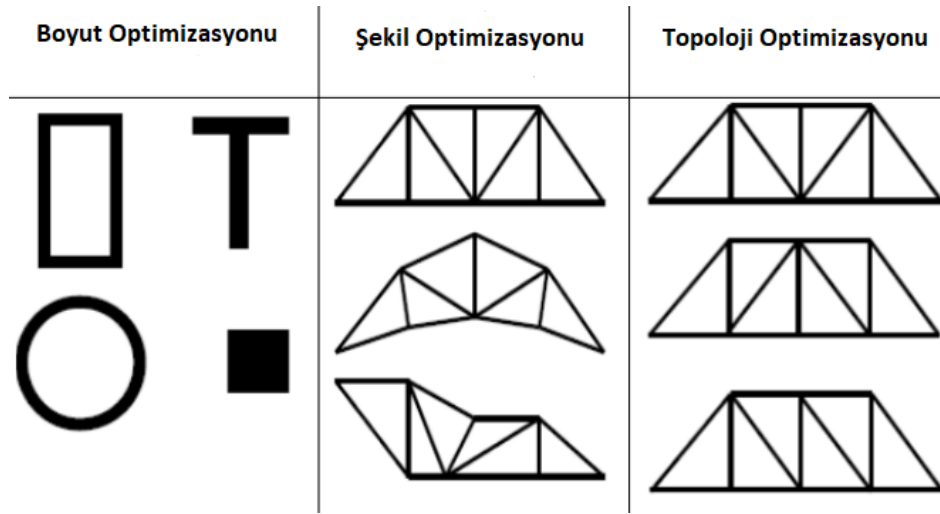
It is in the expectation of all designers and engineers to turn a design that will be produced, multifunctional, with high strength and light weight. Topology optimization is one of the optimization techniques applied in this direction. With topology optimization, it is possible to obtain parts with complex geometries and lattice structures. The force is applied by imposing restrictions on a newly designed or existing solid model. After the optimization process is completed, the material distribution is optimized, light and multifunctional products can be obtained. However, it is impossible to produce these complex parts with conventional manufacturing methods. A number of modifications have to be made to the model and this restricts the freedom of designers. With the increasing use of additive manufacturing technologies, parts in complex geometry can be produced in a single process step. The use of these technologies makes it possible to produce parts obtained as a result of topology optimization. Within the scope of this study, it was ensured that the handbrake bracket was optimized with topology optimization and reached the ideal form and the material distribution was alleviated. Selective Laser Sintering (SLS) method, which is one of the additive manufacturing methods of the part obtained after the process, is planned to be produced without any additional parts after the completion of the model.

Keywords; Structural optimization, Topology optimization, Additive manufacturing technologies, Selective laser sintering (SLS).

1. Giriş

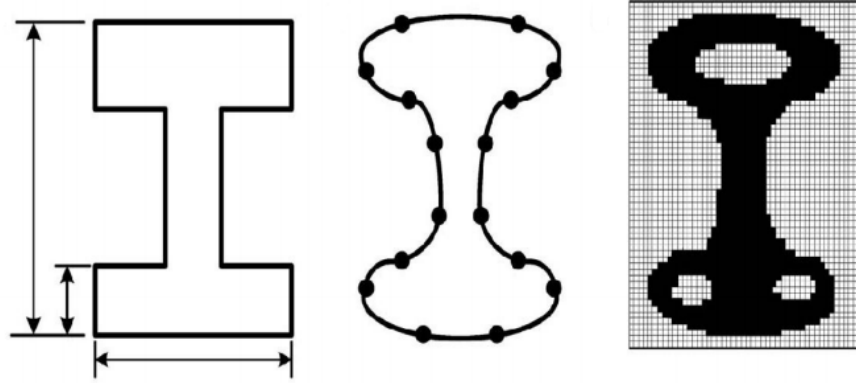
Gelişen teknoloji ile birlikte, yüksek performanslı ve hafif ürünlerin tasarım ve üretim süreci büyük önem kazanmıştır. Bu amaçla tasarım süreçlerinde, ürüne yapısal optimizasyon uygulanarak ideal yapıya ulaşması sağlanır. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olarak üçe ayrılan yapısal optimizasyon yöntemleri arasında topoloji optimizasyonu, mühendis ve tasarımcılara önceden düşünülmüş bir tasarıma gerek olmaksızın yeni tasarım fikirleri sağlaması sebebiyle en kapsamlı yöntem olarak kabul edilir [1]. Boyut optimizasyonu, ideal forma ulaşmak için yapıdaki her bir elemanın

optimal kesit alanını bulmak ve boyutlarını değiştirmektir. Şekil optimizasyonu, yapının bağlantıları değiştirilmeden dış şeklinin optimize edilmesidir. Topoloji optimizasyonu ise yapıyı oluşturan elemanların en iyi şekilde nasıl bağlantı oluşturabileceğini açıklar [2]. Bu sebeple topoloji optimizasyonu, yapısal optimizasyonun en genel tanımıdır. İdeal yapıya ulaşabilmek adına malzeme dağılımının optimize edilmesidir [3]. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu yöntemlerinin grafiksel gösterimi Şekil 1 ve 2'de belirtilmiştir.



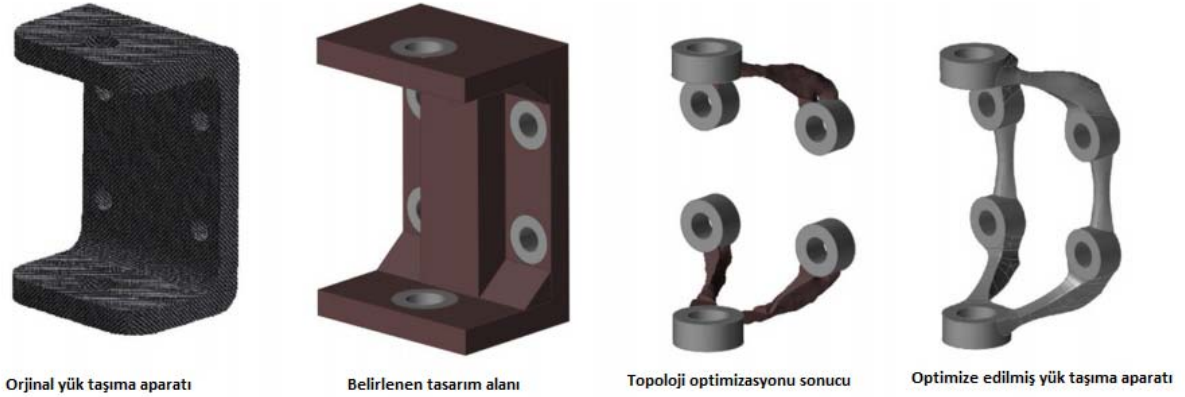
Şekil 1. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu grafiksel gösterimi [3]

Topoloji optimizasyonu, belirlenen bir tasarım alanında malzemenin optimal dağılımı amacı ile kullanılır. Yapının genel mukavemetine ve doğal frekansına en az etki yapan bölgeler tespit edilerek yapıdan çıkarılması gereken bölgeler tanımlanır. Mevcut tasarımları güçlendirmek, ağırlığını azaltmak ve ideal forma ulaşmasını sağlamak amacıyla kullanılmasının verimli olduğu tespit edilmiştir [4]. Topoloji optimizasyon yöntemi ile malzeme dağılımının düzenlenmesi sürecinde, yapıdaki deliklerin, çıkıntılarının, olukların oluşturulması, yeni elemanların oluşturulması veya silinmesi gerçekleştirilir [5]. Bu uygulama ile parçanın işlevi değiştirilmeksizin ağırlığı azaltılarak ideal yapıya ulaşması sağlanır. Bu sebeple, en hafif ve yüksek performanslı parçaların tasarımı için uzay, havacılık, otomotiv ve tıp sektörlerinde etkili bir araç haline gelmiştir [6].



Şekil 2. Sırasıyla boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu [7]

Topoloji optimizasyonunun uygulanması sürecinde, ilk olarak tasarlanan veya mevcutta var olan bir parçanın katı modeli üzerinde optimizasyonun uygulanacağı tasarım alanı belirlenir. Daha sonra parça üzerine gerekli sınırlandırmalar getirilir ve kuvvet uygulanır. Analiz işleminin tamamlanmasından sonra elde edilen parça incelenir ve istenilen sonucun elde edilmemesi durumunda işlem tekrarlanabilir [8-9]. Topoloji optimizasyonu uygulanmış yük taşıma aparatı örneği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Yük taşıma aparatı topoloji optimizasyon süreci [10]

Topoloji optimizasyonu, farklı mühendislik disiplinlerinde güçlü bir kavramsal tasarım aracı olarak uygulanmaktadır. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen ideal yapıdaki parçanın bilgisayar destekli tasarım verisi haline getirilmesi ve üretimi sürecinin karmaşıklığı sebebiyle uygulama zorlukları çekilmiştir [11]. İşlem sonucu elde edilen modelin hazır baskı modeline dönüştürülmesinin en kolay yolu, karmaşık geometrideki yapıları tek işlem basamağında üretmeyi sağlayan eklemeli imalat teknolojileri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi sonrası elde edilen model, stereolithography (STL) formatında kaydedilerek doğrudan üretime gönderilip baskısı

alınabilmektedir. Model üzerinde malzeme dağılımı optimal hale getirildiği için baskıda kullanılan malzeme miktarı da azalacak, dolayısıyla üretim maliyetleri de düşürülecektir.

Bu çalışma kapsamında, eklemeli imalat teknolojilerinden selective laser sintering (SLS) yöntemi ile üretimi gerçekleştirilecek olan el freni bağlantı elemanının gerekli kısıtlamalar getirilerek topoloji optimizasyonu yapılmıştır. İşlem sonucunda, parçanın işlevi değiştirilmeksizin ideal forma ve ağırlığa ulaşması amaçlanmıştır.

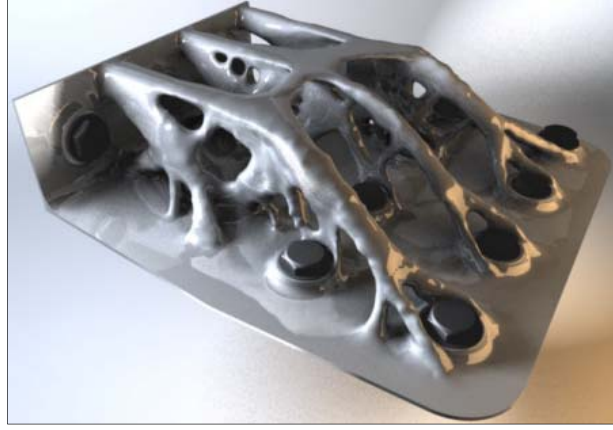
2. Eklemeli İmalat Yöntemleri İçin Topoloji Optimizasyonu

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojileri olarak da bilinen eklemeli imalat yöntemleri, bilgisayar destekli ortamda 3B modeli bulunan parçanın katman katman oluşturulmasını sağlayan bir üretim tekniğidir. Karmaşık geometrideki ve yüksek seviyede optimize edilmiş fiziksel bileşenlere sahip modelleri üretmede, malzeme çıkartarak/eksilterek istenilen parçanın 3B modelinin oluşturulduğu geleneksel imalat yöntemlerine göre çok daha fazla etkindir. Malzeme dağılımının öngörülen alana en verimli şekilde dağıtılmasını sağlayarak fonksiyonel ve hafif ürünler tasarlamayı sağlayan topoloji optimizasyonu ise eklemeli imalat teknolojileri birlikte uygulanabilecek en etkin yöntemlerden biridir [12-14].

Eklemeli imalat teknolojilerindeki gelişmeler, tasarım sürecinde paradigma değişikliğine sebep olmuştur. Bu teknoloji ile karmaşık geometrideki parçaların dahi tek işlem basamağında üretilebiliyor olması, üretilebilirlik endişesini ortadan kaldırmış ve yaratıcılığın artmasına sebep olmuştur. Eklemeli imalat teknolojileri sayesinde kolaylıkla üretilebilen kafesli yapıdaki tasarımlar bu durumun en iyi örneğidir. Tasarımda kafesli yapıların kullanılma sebebi; geleneksel katı formdaki malzemeleri değiştirmek, ağırlığı azaltmak ve çok fonksiyonlu özellikleri arttırmaktır. Kafesli yapılar üretmek için kullanılan yöntemlerden birisi olan topoloji optimizasyonunun optimal formlar elde etmek için etkili bir araç olduğu dikkat çekmiştir [15]. Topoloji optimizasyonunun eklemeli imalat sürecinde kullanılması ile, optimizasyon sonucu elde edilen parçanın deneme üretimleri yapılarak yapısal performansının değerlendirilmesi kolaylaşmakta böylece tasarım döngüsü etkin bir şekilde kısaltılabilmektedir [16-18].

Topoloji optimizasyonu, kavramsal yapılar oluşturmak amacı ile uygulanan simülasyon odaklı bir yöntemdir. İşlem sonucu elde edilen yapılar genellikle organikdir

ve geleneksel imalat yöntemleri ile model basitleştirilmeden üretimin gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu sebeple eklemeli imalat teknolojilerinin ortaya çıkışı, topoloji optimizasyonu sonuçlarının uygulanabilmesini sağlamıştır [19]. Topoloji optimizasyonu gerçekleştirildikten sonra metal malzeme kullanarak eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen havacılık braketleri örneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



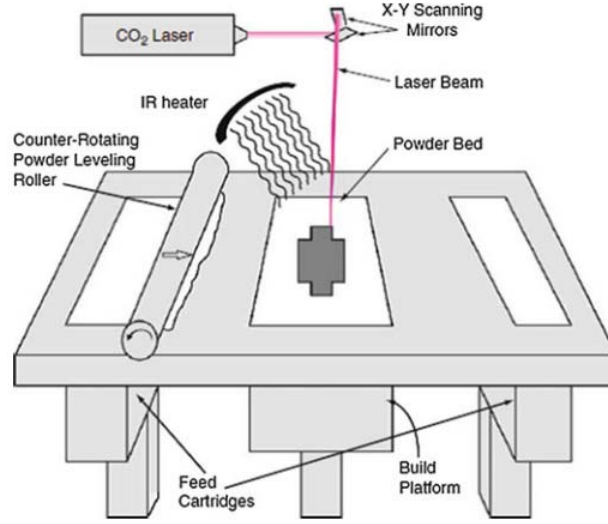
Şekil 4. Eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi için topoloji optimizasyonu gerçekleştirilen havacılık braketleri [20]

3. Selective Laser Sintering (SLS)

1980'li yıllarda Teksas Üniversitesi'nde Dr. Carl Deckard ve Dr. Joe Beaman tarafından geliştirilen selective laser sintering (SLS) yönteminde, ısıtıldığı zaman kaynaşabilen toz haldeki hammadde kullanılır. İnce bir tabaka halinde hareketli bir platforma serilen toz malzemenin seçilen yüzeyindeki bölgeler lazer ışınıyla taranır ve bu ışının etkisi ile eriyen ve sinterlenen toz tanecikleri temas halinde olduğu diğer toz tanecikleri ile birbirine yapışır. İşlemin tamamlanmasından sonra platform bir katman kalınlığı kadar aşağı hareket eder ve model tamamlanana kadar her bir katman için aynı işlem devam eder. Üç boyutlu modelin inşa edilmesi süresince doğal bir destek malzeme olarak kullanılan artık toz parçacıkları, işlemin tamamlanmasından sonra manuel olarak veya vakumlu bir sistemle temizlenir [21,22].

Tipik bir SLS işlemi üç aşamada gerçekleşir. İlk aşamada, hareketli platform bir katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve hammadde olarak kullanılacak olan toz parçacıkları platform üzerine bir rulo yardımı ile serilir. İkinci aşamada, gerekli lazer ışını enerjisini minimuma indirmek için toz yatağı erime sıcaklığının hemen altında

ısıtılır. Üçüncü aşamada ise üretimi gerçekleştirilecek katmanın şekline göre, lazer ışını sıradaki katmanı tarar ve toz parçacıklarını eriterek birbirine kaynaşmasını sağlar. Bu işlem model tamamlanana kadar her bir katman için uygulanır [23]. SLS işleminin şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. SLS işlemi şematik gösterimi [24]

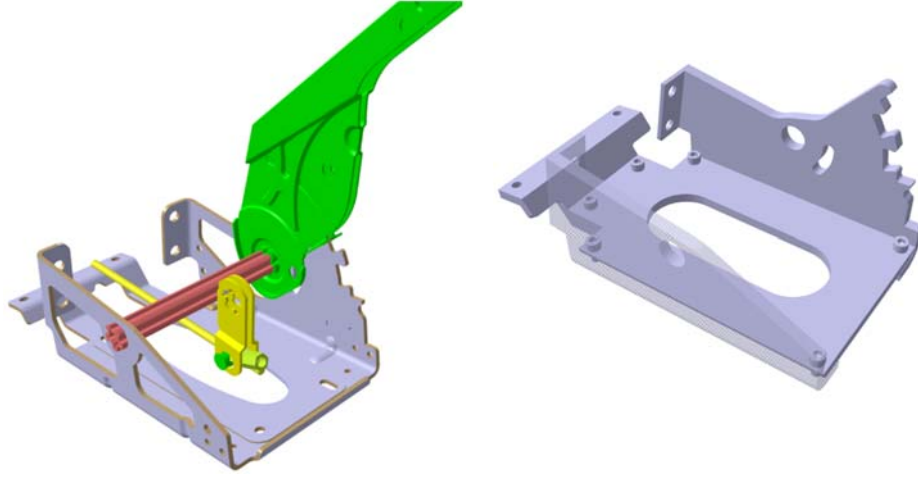
Bu işlem, diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan en önemlisi, birçok malzemenin iyi mekanik özellikler ile işlenebilmesidir [25,26]. Bu yöntemde kullanılan malzemeler; toz halindeki plastik, metal, seramik veya polimerdir [27].

Bu yöntemde kullanılacak plastik malzemeler; karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid, polistren, poliamid (naylon) iken, metal malzemeler; paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel krom, titanyum gibi metal alaşımlarıdır. Ayrıca alüminyum silikat gibi seramik malzemelerin de kullanımı mümkündür. SLS teknolojisi ile mukavemeti yüksek parçalar üretilebilir. Bu sebeple, hızlı döküm ve kalıp için gerekli parçaların imalatı için tercih edilebilir [28].

4. El Freni Braketinin Topoloji Optimizasyon Süreci

Bu çalışmada, araçların el freni mekanizması için kullanılan braketin, eklemeli imalat teknolojileri referans alınarak yapılan ağırlık hedefli topoloji optimizasyonu tanıtılmıştır. Tasarımı var olan el freni braket elemanı modelinin Fusion 360 yazılımına alınması ile süreç başlar. Topolojik optimizasyonun uygulanacağı tasarım alanı, ürün

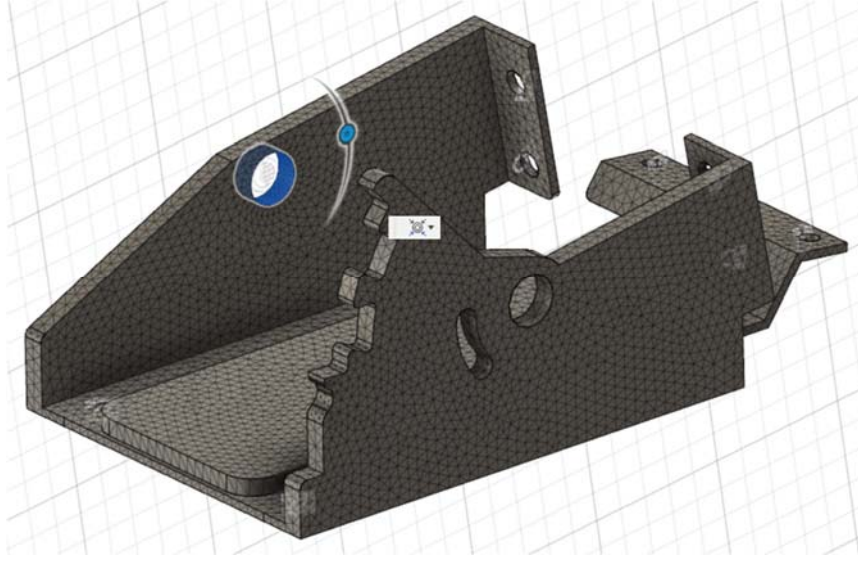
ağacında "Simulation Model" sekmesi altındaki "Model Components" komutu ile tek bir gövde olarak gösterilir. Ardından optimize edilecek ilgili alanın rengi bordoya dönüşür (Şekil 6).



Şekil 6. El freni mekanizması

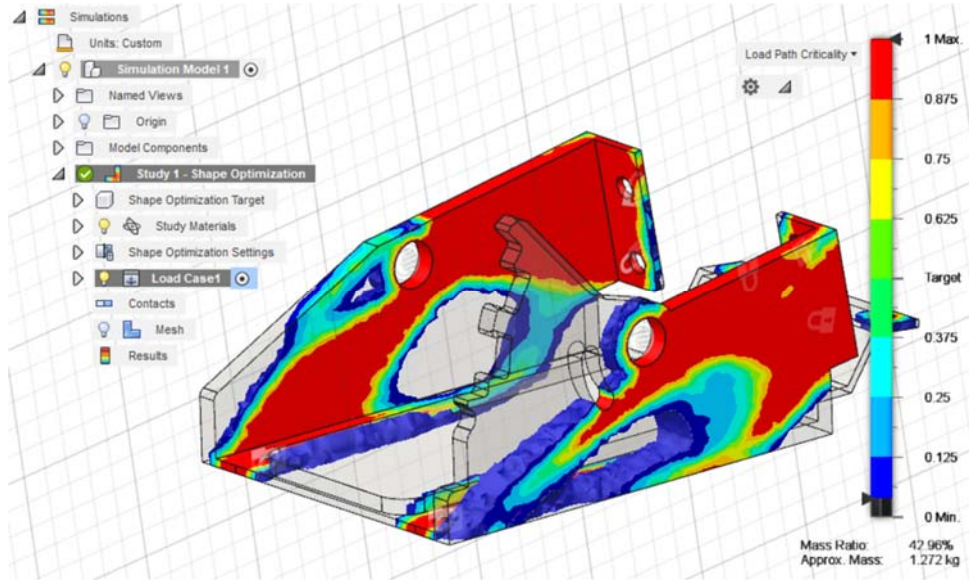
Optimizasyon sürecinin ana girdisi yapısal kısıtlardır. Bu nedenle çalışmanın bu aşamasında, hesaplama ağının oluşturulması, bağlantı yüzeylerinin belirlenmesi ve yüklerin geleceği bölgelerin tanımlanması ile süreç başlayacaktır. Fren mekanizmasının braket bütünü içerisinde çalıştığı bölgeler, yüke maruz kalan bölgeler olmakla beraber cıvata ile gövdeye bağlı alanlar ise sabitleme bölgeleri olarak tanımlanır. Bunun için Fusion 360 programının, üst penceresindeki komutlardan yararlanır. "Structure" sekmesi altındaki "Loads" komutu ile sisteme gelen yükler belirlenir. Bu arada sisteme gelen burkulma momenti 500N olarak döndürme eksenini boyunca mekanizmanın bağlı olduğu delik içlerine uygulanmıştır. Daha sonra 4 adet cıvata ile bağlanan delikler "Constraint" ile X, Y ve Z eksenlerinde sınırlandırılır. Böylece optimizasyon sonucu elde edilecek yapının şekli sınırlandırılmış olur (Şekil 7).

"Simulation" menüsü içerisinde "Shape Optimization" komutu ile optimizasyon işlemi başlatılır. Ekranı gelen pencerede oluşacak yapıda istenilen boşluk-doluluk oranı, istenilen minimum kalınlık, hassaslık, temas eden yüzeyler gibi özellikler belirlenebilir. Şekil 8'de optimizasyon uygulanacak sınır koşulları gösterilmektedir. Sonlu elemanlar tabanlı çözüm ağı oluşturduğundan dolayı üçgen ağ örme yöntemi ile ağ modeli elde edilir. Optimizasyon işeminin tamamlanmasından sonra ekrana gelen pencereden, oluşan yapının figürlerinin kalınlıkları değiştirilebilir.



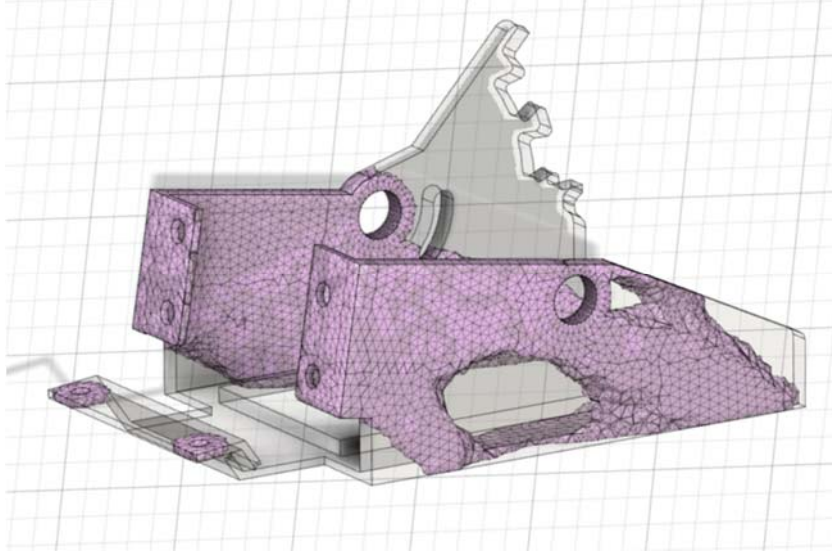
Şekil 7. Braket bütünü sınır koşulları

Optimizasyon işleminden sonra elde edilen yapının düzenlenmesi için "Result" sekmesi altındaki "Promote" komutundan "Existing Simulation Model" seçeneği seçilir ve model oluşturulmaya başlanır (Şekil 8).



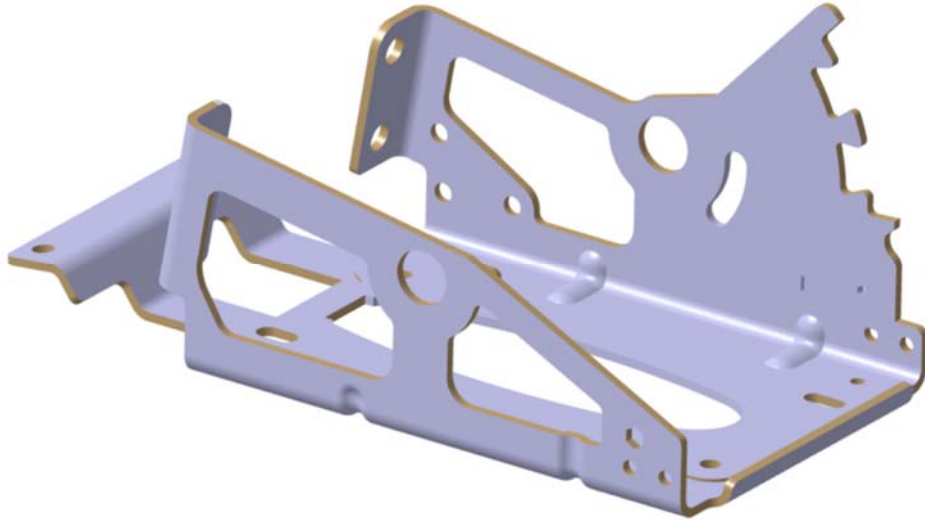
Şekil 8. Bağlantı parçası topolojik optimizasyonu

Tekrar tasarım süreci tamamlandıktan sonra mevcut modelden gösterilen hacimler "boolean" operasyonları ile çıkartılır (Şekil 9). Daha sonra parçanın risk faktörlerinin belirlenmesi için tekrar analizi yapılır. Öncelikle optimizasyonu yapılan alan tekrar tasarım alanı olarak belirlenir ve ardından "Structure" aracı altındaki "Analyze" komutu seçilerek işlem başlatılır.



Şekil 9. Bağlantı parçası optimizasyon sonucu.

Analizin tamamlanması ile birlikte oluşturulan yeni modeldeki risk taşıyan bölgeler belirlenmiştir. Mavi olan kısımlar risk taşımayan bölgeleri gösterirken mavinin tonu açıldıkça risk faktörü de artmaktadır. Kırmızı ile gösterilen alanlar ise risk olan bölgeleri belirtmekte ve kırmızının tonu koyulaştıkça risk de artmaktadır. İşlemin tamamlanmasının ardından elde edilen modelin görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Optimizasyon sonucu elde edilen braket modeli.

5. Sonuçlar

Topoloji optimizasyonu ile klasik yöntemlerle üretilmiş mevcut katı modellerin veya yeni tasarlanan bir ürünün optimum forma dönüşmesi amaçlanır. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden selective laser sintering (SLS) ile üretimi gerçekleştirilecek olan fren braketinin topoloji optimizasyonu yapılarak ideal yapıya ulaşması sağlanmıştır. Parça üzerine gerekli sınırlandırmalar getirilmiş ve kuvvet uygulanmıştır. Optimizasyon işlemi sonrasında parçanın işlevi değişmeksizin malzeme dağılımının optimize edilmesiyle kullanılan malzeme miktarı azaldığı ve parçanın hafiflediği tespit edilmiştir. Elde edilen parça kafesli ve karmaşık bir yapıdadır ve klasik imalat yöntemi ile üretilmesi, basitleştirme yapmadan imkansızdır. Bu sebeple elde edilen kafesli yapıdaki tasarımın eklemeli imalat teknolojilerinden SLS yöntemi ile tek işlem basamağında kolaylıkla üretilmesi planlanmıştır. SLS yönteminin tercih edilme sebebi; destek malzeme gerektirmemesi ve lazer ile sinterlenen parçanın katı olması sebebiyle işlem sonrası kütleme işlemine gerek duyulmamasıdır.

Kaynaklar

- [1] Liu S, Li Q, Junhuan Liu, Chen W, Zhang Y. A Realization Method for Transforming a Topology Optimization Design into Additive Manufacturing Structures, *Engineering* 2018; 4: 277-285.
- [2] Christensen P, Anders K. *An Introduction to Structural Optimization*, Springer 2008; ISBN 978-1-4020-8665-6.
- [3] Thummar, D R. *Truss Topology Optimization Using Modified Genetic Algorithm*, Master of Technology in Machine Design, Department of Mechanical Engineering School of Engineering, RK University, Rajkot, Gujarat-360020, 2014.
- [4] Nadir W, Kim Y, Weck O L. "Structural Shape Optimization Considering Both Performance and Manufacturing Cost" *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- [5] Saleem W, Yuqing F, Yunqiao W. *Application of Topology Optimization and Manufacturing Simulations - A new trend in design of Aircraft components*, *Engineers and Computer Scientists* 2008; volume II, Hong Kong.
- [6] Zhu J H, Zhang W H, Xia L. *Topology optimization in aircraft and aerospace structures design*, *Arch. Comput. Methods Eng.* 2016; 23: 595–622.

- [7] Luh GC, Lin CY, Lin YS. “A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization” *Applied Soft Computing* 11, Elsevier Science, 2011; pp. 2833-2844
- [8] Top, N., Şahin, İ., Gökçe, H., 2018, 3B Yazıcı Teknolojisi için Topoloji Optimizasyonu: Otomotivde Salıncak Kolu Üzerine bir Çalışma, *Third International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE)*, 2018.
- [9] Şahin, İ., 2018, Mühimmat Sistemlerinde Kullanılan Askı Kancalarında Geometri Tabanlı Topoloji Optimizasyonu, *Third International Symposium on Industrial Design & Engineering (ISIDE)*, 2018.
- [10] Hands, C H, Plessis A, Minnaar N, Blakey-Milner B A, Burger E. Can Additive Manufacturing Help Win the Race?, Preprints; 2018.
- [11] Chuang C H, Chen S, Yang R J, Vogiatzis P. Topology optimization with additive manufacturing consideration for vehicle load path development, *Internat. J. Numer. Methods Engrg.* 2017.
- [12] Cheng K T, Olhoff N. An investigation concerning optimal design of solid elastic plate, *Int. J. Solids Struct* 1981; 17: 305–323.
- [13] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 1988; 71: 197–224.
- [14] Rozvany G I N. A critical review of established methods of structural topology optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.* 2009; 37: 217–237.
- [15] Cheng L, Liu J, Liang X, Albert C. To. Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2018; 332: 408–439.
- [16] Liu S, Li Q, Chen W, Tong L, Cheng G. An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures, *Front Mech Eng* 2015;10(2):126–37.
- [17] Li Q, Chen W, Liu S, Tong L. Structural topology optimization considering connectivity constraint, *Struct Multidiscip Optim* 2016; 54(4): 971–84.
- [18] Wang K, Ho CC, Zhang C, Wang B. A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ applications, *Engineering* 2017; 3(5): 653–62.

- [19] Brackett D, Ashcroft I, Hague R, 2011, Topology Optimization For Additive Manufacturing, *in SFF Symposium 2011*, Austin, TX.
- [20] Brackett D, Ashcroft I, Hague R, 2011. Topology optimization for additive manufacturing, *22nd Annual Solid Freeform Fabrication Symposium (2011)* 348–362.
- [21] Deckard C. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US Patent 1989; 4:863,538.
- [22] Partee B, Hollister S J, Das S. Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds, *Journal of Manufacturing Science and Engineering(ASME)* 2006; 128: 531-540.
- [23] Laumer T, Wudy K, Drexler M, Amend P, Roth S, Drummer D, Schmidt M. Fundamental investigation of laser beam melting of polymers for additive manufacture. *J. Laser Appl.* 2014; 26: 042003. <http://dx.doi.org/10.2351/1.4892848>.
- [24] Gibson I, Rosen D, Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. ISBN 978-1-4939-2113-3 (eBook).
- [25] Kruth J P, Wang X, Laoui T, Froyen L. Lasers and materials in selective laser sintering, *Assem. Autom.* 2003; 23: (4) 357–371.
- [26] Akande S O, Dalgarno K W, Munguia J, Pallari J. Assessment of test for use in process and quality control systems for selective laser sintering of polyamide powders, *J. Mater. Process. Technol.* 2016; 229: 549–561.
- [27] Deckard C. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, U.S. Patent 1989; 4: 863–538.
- [28] Çelik İ, Karakoç F, Çakır M C, Duysak A. Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2013; 31: ISSN – 1302 – 3055.