

## TAŞIT ELEMANLARININ OPTİMUM TOPOLOJİ YAKLAŞIMI İLE TASARIMI

Ali Rıza YILDIZ, Necmettin KAYA, Ferruh ÖZTÜRK\*

Otomotiv endüstrisinde karşılaşılan önemli problemlerden birisi, ürün geliştirmenin ilk aşamalarında üretim maliyetini ve ürün performansını düşünerek nasıl daha iyi yapısal tasarımlar elde edilebileceğidir. Topoloji tasarım optimizasyonu yaklaşımı tasarım sonrası işlemler için kullanılacak optimum yapısal modelin belirlenmesinde bilgisayar destekli tasarım sistemleriyle birlikte kullanılmaktadır. Bu yayında, topoloji optimizasyonu ile taşıt elemanlarının nasıl optimum şekilde tasarlanabileceği, ön süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncak kolu ve motor bağlantı elemanı örnek çalışmaları ile anlatılmıştır.

**Anahtar sözcükler :** Topoloji optimizasyonu, taşıt elemanları tasarımı

An important problem in automotive industry is how to achieve better design concepts by considering structural performance and manufacturing cost in the early stages of product development. The topology design and optimization provide an initial design concept for downstream applications, which leads to achieve a better design, by using computer-aided design techniques. In this article, vehicle wishbone and engine mount bracket design examples are presented to illustrate the application of topology optimization approach for optimal design of vehicle components.

**Keywords:** Topology optimization, vehicle components design

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

### GİRİŞ

Endüstriyel işletmelerde yüksek rekabet gücüne sahip ürünleri üretebilmek için tasarım ve imalat teknolojilerinde yapısal değişimlere gereksinim vardır. Üretim yeteneği önemlidir ve geliştirilmelidir, ancak tasarım ve tasarım doğrulama, teknoloji edinim ve teknoloji geliştirme yeteneklerine sahip olduğu oranda üretme yeteneği değerli olmaktadır. Üretim yeteneğinin yanında tasarım, tasarım doğrulama yeteneği ve temel teknolojilerin edinilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yeni teknolojilerin ve yöntemlerin tasarım ve tasarım doğrulama aşamalarında klasik yöntemlerin yerine kullanılması, teknolojiye dayalı rekabet ortamının oluşturulabilmesi için önem taşımaktadır. Bu yayında, ilk tasarım modelinin belirlenmesinde veya elemanların ağırlıklarının azaltılmasında kullanılan yapısal topoloji optimizasyonu yöntemi ile taşıt elemanlarının tasarımı anlatılmış ve yöntemin klasik optimizasyon yöntemlerine göre tasarımda sağladığı avantajlar üzerinde durulmuştur. Örnek uygulamalar olarak, ön süspansiyon ve motor bağlantı elemanlarının topoloji optimizasyonu çalışmaları ele alınmıştır.

Seçilen ürün yapısal modeli üretim maliyeti ve ürün performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Optimum yapısal modele sahip olmayan taslak model ile tasarım çalışmalarına devam edildiği takdirde sonradan yapılacak optimizasyon çalışmaları istenen amaçlara ulaşmada yeterli olmayacaktır. Eğer tasarımın ilk aşamasında optimum topolojiler belirlenemezse bu durum üretim maliyetini ve ürün

performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ürün tasarım aşaması, ürün ömrü içinde maliyet açısından en etkili olan aşamadır. Ürünün toplam yaşam çevrimi maliyetinin % 80-90' ının tasarım aşaması sırasında belirlendiği düşünülürse, etkin imalat açısından amaçlanan nokta, tasarım aşamasında istenen kriterleri sağlayan ürünlerin tasarlanmasıdır.

Bu çalışmada, ürün maliyetinin azaltılması ve pazara sunum sürelerinin kısaltılması için tasarım aşamasında optimum modelin belirlenmesine yönelik bir yaklaşım kullanılmıştır. Tasarım aşamasında yapılan optimizasyon çalışmaları, tasarım sonrası olarak adlandırılan analiz, montaj, işlem planlama ve imalat gibi uygulamaları etkilemektedir. Bu nedenle, ürün tasarım ve imalat sürelerinin azaltılması için, tasarım ile entegre bir optimizasyon yaklaşımının ürün yapısal modelinin belirlenmesi aşamasında uygulanması gerekmektedir.

Taşıtlarda kullanılan parçalar çalışma şartlarında genellikle dinamik zorlamalara maruz kalırlar. Bu nedenle, dinamik analiz yapılması elde edilen analiz sonuçlarına göre ideal tasarımların geliştirilmesi ve doğrulanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında otomobil ön süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncak kolunun ve motor bağlantı elemanının topoloji optimizasyonu yapılmıştır [1,2].

## OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Makina parçalarını optimum tasarlayabilmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Literatürde tasarım optimizasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [3-6]. Şekil optimizasyon (shape optimization) ve yapısal optimizasyon (structural optimization) yöntemleri tasarım çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal optimizasyon yöntemleri, ideal tasarımlara ulaşma hedefinden ortaya çıkmıştır. Şekil optimizasyonundan farkı, optimum yapı konusunda tasarımcıya tasarımın başlangıç aşamasında yardımcı olmasıdır. Tasarımcı bu yöntemle tasarımın takip eden aşamalarında kullanacağı en uygun yapıyı tasarımın ilk aşamasında tasarlayabilmektedir. Bu nedenle, tasarımcı ilk taslak modelini optimum yapıda belirleyebilmektedir. Tasarımın takip eden adımlarında yapılacak çalışmalar ve şekil optimizasyonu, tasarımın başlangıcında belirlenen optimum yapı ile olacaktır. Aksi takdirde, optimum olmayan bir yapı üzerinde şekil optimizasyonu uygulanması söz konusudur. Birçok optimizasyon çalışması, optimum olmayan yapısal modelin şekil optimizasyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür uygulamalarda, istenen eniyileme elde edilememektedir. Bu nedenle, tasarımda etkin eniyileme çalışmaları için optimum yapısal tasarım yaklaşımlarının kullanılması gerekmektedir.

Yapısal optimizasyon yöntemi olarak son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan topoloji optimizasyonunun temel mantığı, optimizasyonu yapılacak parçanın dış boyutlarında herhangi bir değişiklik olmaksızın, parçanın rijitliğini artıracak şekilde belirli bölgelerden malzeme boşaltılması esasına dayanır [6-8]. Topoloji optimizasyonun amacı, kompliansı minimum (rijitliği maksimum) yapan ya da doğal frekansı maksimum yapan en iyi malzeme dağılımını bulmaktır. Topoloji optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan homojenleştirme metodu 1988 yılında Bendsoe ve Kikuchi tarafından geliştirilmiştir [7]. Topoloji optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem olan yoğunluk metodu (density method) ise R.J. Yang ve C.H. Cuhang tarafından 1993 yılında geliştirilmiştir [8]. Bu method literatürde malzeme dağılım metodu (material distribution method) olarak da adlandırılmaktadır.

## TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Topoloji optimizasyon yöntemlerinin son yıllarda, tasarımcılar tarafından tercih edilmesinde rol oynayan en önemli özellik, optimum yapının tasarım çalışmalarının başlangıcında belirlenmesidir. Topoloji optimizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan iki yöntem: homojenleştirme ve malzeme dağılımıdır [7,8].

### Homojenleştirme Metodu:

Homojenleştirme metodu, 1988 yılında Kikuchi ve Bendsoe tarafından geliştirilmiştir [7].

Homojenleştirme metodu, kriter ve kısıtlayıcılar sağlanırken tasarım alanındaki optimum yapının kompozit mikroyapısal bir sistem üzerinde gerçekleştirir. Homojenleştirme metodu, sistemi kompozit ve mikroyapısal bir oluşum olarak kabul etmekte ve bu yapı homojenleştirilmektedir. Bu metoda göre bir mikroyapı; malzeme içermeyen (delik büyüklüğü =1), izotropik malzeme içeren (delik büyüklüğü= 0) ve ortotropik ( $0 < \text{delik büyüklüğü} < 1$ ) malzeme içeren genelleştirilmiş gözenekli malzeme olmak üzere üç grupta sınıflandırılır. Boşluk, gözenek ve katı mikroyapıların dağılımı bir yapının topolojisini gösterir. Homojenleştirme teorisi; tasarım alanındaki gözeneklerin farklı olmasından dolayı mikroyapıların elastik malzeme özelliklerinin eşdeğer olarak değerlendirilebileceğini kabul eder.

Homojenleştirme teorisinde yapı, periyodik mikroyapıların bileşimi olarak kabul edilir ve eşdeğer malzeme özellikleri, mikroskobik büyüklükte azalma içeren bir sınır süreç ile belirlenir. Ayrıca, malzeme eksenlerinin oryantasyonu, malzeme özelliklerini tanımlamada dikkate alınmak zorundadır. Böylelikle bir yapının elastik malzeme özellikleri, mikroyapısal deliklerin oryantasyonu ve büyüklüğü ile tanımlanabilir. Optimizasyon sürecinde mikroyapılar, katı ve boşluk arasında değişir. Eğer mevcut malzeme miktarı belli ise malzeme yapının bir kısmından diğer bir kısmına hareket edebilir. Bu nedenle yapıların topoloji tasarımı, belirlenen uygun yapısal alan içinde optimal malzeme dağılımının bulunması olarak ele alınabilir. Homojenleştirme metodunda, amaç fonksiyonu olarak rijitlik maksimizasyonuna eşdeğer olan komplians minimizasyonu ya da doğal frekans maksimizasyonu ve kısıtlayıcı fonksiyon olarak da malzeme azalması seçilmektedir.

### Malzeme Dağılımı Metodu:

Malzeme dağılımı metodu 1993 yılında R.J. Yang ve C.H. Chuang tarafından geliştirilmiştir [8]. Yoğunluk metodu olarak da adlandırılmaktadır. Homojenleştirme metodunda, her bir elemanın Young modülü için ek işlemler yapılmakta ve her bir eleman için çoklu değişkenler kullanımı gerekmektedir. Bu nedenle, problemin yapısı daha karmaşık hale gelmekte ve çözüm için gerekli işlem hacmi artmaktadır. Malzeme dağılımı metodunda, homojenleştirme metodundan farklı olarak; her bir sonlu elemanın yoğunluğu tasarım değişkeni olarak kabul edilir. Mlejnek and Schirrmacher (1993) homojenleştirme metodunda ek işlemler gerektiren Young modülü kullanımını enerji yaklaşımı ile daha basit işlemlere indirgemıştır [9].

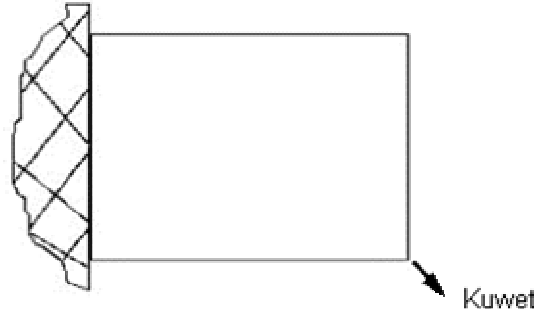
Malzeme dağılımı metodunda, Young modülü bağıntısı aşağıda verilen şekilde tanımlanır:

$$\rho^n = \left( \frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^n = \frac{E_i}{E_0}$$

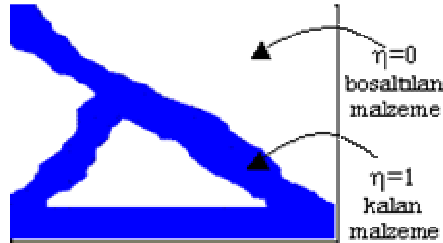
$\rho$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_0$ , sırasıyla normalleştirilmiş, ara (optimizasyon sürecinde kullanılan) ve gerçek malzeme yoğunluğunu ifade eder.  $\rho$ ,  $0 \leq \rho \leq 1$  ifadesindeki bir değere sahiptir. 0, yoğunluğu sıfır olan elemanın boşaltıldığını ve 1, yoğunluğu bir olan elemanın tasarım alanında kalacağını (boşaltılmayacağını) ifade eder.  $E_i$  ve  $E_0$  sırasıyla ara ve gerçek malzeme yoğunluğudur.  $n$ , üs' ü ifade eder.  $n > 1$  olduğunda ara yoğunluk cezalandırılır ve normalleştirilmiş yoğunluk 0 veya 1 olmaya zorlanır. Homojenleştirme

metoduna benzer şekilde topoloji tasarımı için amaç, rijitliğin maksimum olmasına eşdeğer olan kompliansı minimize etmektir.

Malzeme dağılımı optimizasyonu ile ilgili örnek bir uygulama Şekil 1' de verilen kirişin yapısal optimizasyon çalışmasıyla gösterilmiştir. Bu örnekte, amaç fonksiyonu olarak kompliansın minimizasyonu, kısıtlayıcı olarak hacmin % 60 azalması seçilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucunda  $h=0$  ile gösterilen bölge boşaltılması önerilen bölgeyi,  $h=1$  ile gösterilen bölge de optimizasyon sonucu kalacak bölgeyi göstermektedir. Topoloji optimizasyonu sonucu, malzeme dağılımı ve % 60 hacim azalması için elde edilen kirişin yeni yapısal modeli Şekil 2' de verilmiştir. Dış sınırların düzgün olmadığı görülmektedir. Önemli olan, şeklin düzgünlüğünden ziyade taslak yapının nasıl oluşacağını belirlemesidir. Elde edilen yapıyı düzgünleştirmek için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Düzgünlüğü gidermek için, standart eleman kullanımı veya eğri uydurma tercih edilen işlemlerdir. Bu çalışmalar etkileşimli olarak tasarımcının müdahalesi ile veya otomatik olarak yapılmaktadır. Lin ve Chao (2000) bu konuda yaptıkları bir çalışmada malzeme boşaltma için standart elemanlar ve B-spline eğrilerini önermişlerdir [10].



Şekil 1. Sınır Şartları

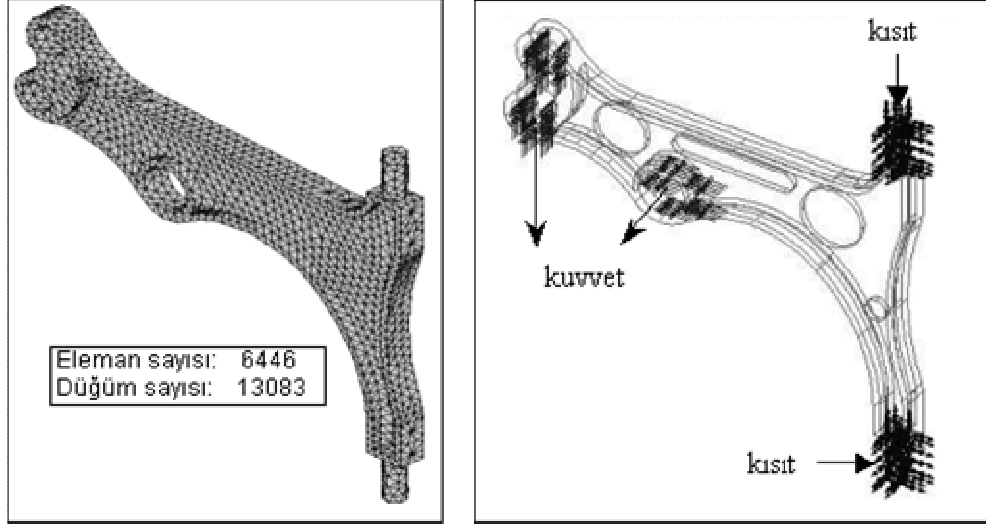


Şekil 2. Topoloji Optimizasyon Sonrası Yeni Yapısal Model

### Salıncak Kolunun Topoloji Optimizasyonu

Taşıtlarda kullanılan süspansiyon sisteminin amacı; temelde minimum aşağı-yukarı salınma hareketi ile taşıtın öne doğru hareket etmesine imkan vermek ve yol ile lastik arasında teması kaybetmeden viraj almayı sağlamaktır [11]. Topoloji optimizasyon çalışmasına, ilk taslak parçanın sonlu elemanlar (SE) modelinin oluşturulması ile başlamıştır (Şekil 3). Şekil 3' te mevcut sınır şartları görülmektedir [1]. Bu çalışmada,  $F_1=2000$  N (-X yönünde) ve  $F_2=1000$  (-y yönünde) değerleri analizler için kullanılmıştır. Frenleme, ivmelenme ve viraj durumlarına göre farklı yük durumları için çalışmalar yapılması gerekmektedir. Örnek olarak verilen uygulama, yöntemin işlem adımlarını ve sonuçlarını göstermeye yöneliktir, nihai ürün modeli değildir. Topoloji optimizasyonu parçanın dış boyutlarında herhangi bir değişiklik olmaksızın, parçanın rijitliğini artıracak şekilde belirli bölgelerden malzeme boşaltılması şeklinde uygulanabilir. Bu

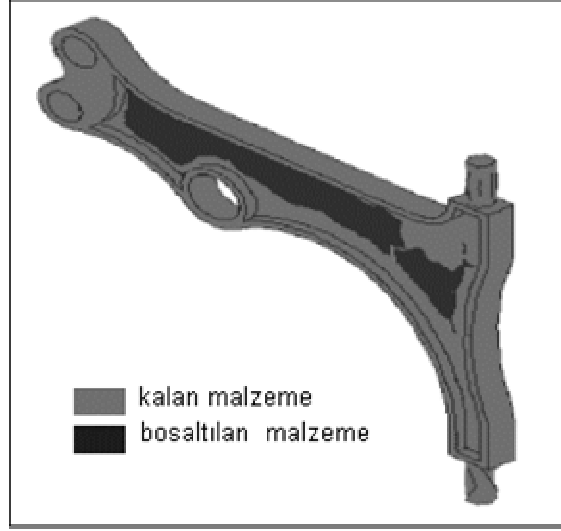
nedenle, parça dış sınırlarında malzeme boşaltılması kısıtlanmıştır. Bu çalışmada, malzeme dağılım yöntemi ve analizler için ANSYS programı kullanılmıştır [12]. Topoloji optimizasyonu sonucu oluşan salıncak kolunun yeni modelinde şekil optimizasyon çalışması yapılmıştır. Şekil optimizasyonu için parametrik tasarım, hassasiyet analizi yaklaşımları ve analizler için I-DEAS programı kullanılmıştır [13].



Şekil 3. Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları

Amaç fonksiyonu olarak komplians minimizasyonu, kısıtlayıcı olarak % 50 hacim azalması seçilerek yapılan topoloji optimizasyonu sonucunda Şekil 4' deki dağılım elde edilmiştir. Elde edilen yapı %50 hacim azalmasına karşılık optimum sonuçlardır. Farklı hacim azalması değerlerine ve kısıtlara göre farklı yapılar elde edilebilir.

Şekil 4' de görülen dağılım ve üretilebilirlik göz önünde bulundurularak salıncak kolundan malzeme boşaltılmıştır. Daha sonra, amaç fonksiyonu olarak kütlenin minimizasyonu ve kısıt olarak ta maksimum gerilme değerinin  $75 \text{ N/mm}^2$  yi aşmaması istenerek şekil optimizasyonu yapılmış ve elde edilen optimum modelin gerilme dağılımı Şekil 5' de verilmiştir. Şekil 5' de gösterilen tasarım malzeme dağılımını temel alan ve standart delik şekillerini temel alan bir malzeme çıkarma çalışmasıdır. Farklı yaklaşımlar ile gerilme dağılımlarını göz önünde tutarak farklı malzeme çıkarma çalışmaları yapılabilir [14]. Birçok çalışmada üretilebilirlik bağlamında standart unsurlar ile malzeme boşaltılması tercih edilmektedir [10, 14]. Bu nedenle, Şekil 4' de elde edilen taslak yapıya tamamen uyum söz konusu olamayabilir.



*Şekil 4. Topoloji Optimizasyonu Sonucu Malzeme Dağılımı*

*Şekil 5. Optimum Modelin Gerilme Dağılımı*

Sonuç olarak salıncak kolu ilk tasarım modelinin başlangıç şartlarına göre kütlesi %14.3 azaltılmış ve maksimum gerilme değeri % 32.97 artmıştır. Salıncak kolu modeliyle ilgili optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 1'de karşılaştırılarak verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, malzeme dağılımını temel alan optimizasyon yaklaşımının taşıt elemanlarının tasarımında kullanımının katkılarını göstermektedir.

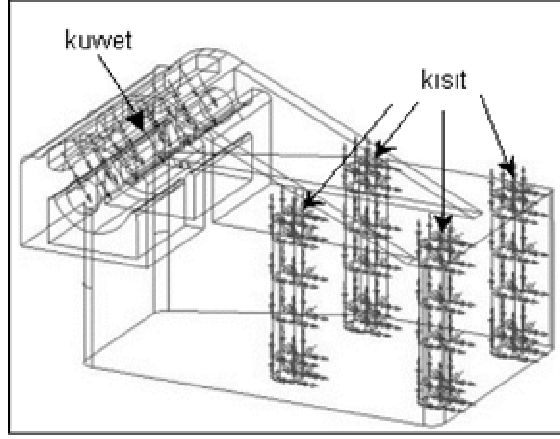
*Tablo 1. Optimizasyon Öncesi ve Sonrası Sonuçlar*

Salıncak kolu	Hacim (mm <sup>3</sup> )	Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Yer değiştirme (mm)

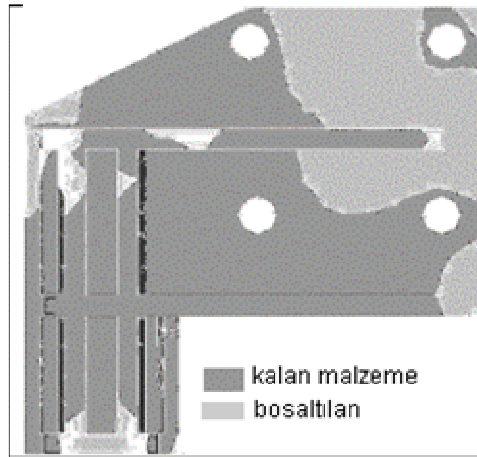
Başlangıç	212619	54.9	8.1e-4
Topoloji Optimizasyonu Sonrası	184887	63.0	9.8e-4
Şekil Optimizasyonu Sonrası	182210	73.0	10.1e-4
Değişim	-% 14.3	+ % 32.97	+ % 23.47

### Motor Bağlantı Elemanının Topoloji Optimizasyonu

Motor bağlantı elemanı otomobillerde dinamik zorlamalara maruz kalan parçalardandır. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu olarak doğal frekansın artırılması ve hacmin % 35 azalması seçilmiştir [2]. Sınır şartları Şekil 6' da verilen modelde 400 N analiz çalışmaları için uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonu sonucunda Şekil 7' de verilen malzeme dağılımı elde edilmiştir. Şekil 7'de verilen açık gri ton renkli bölgeler malzemenin boşaltılabileceği bölgelerdir.

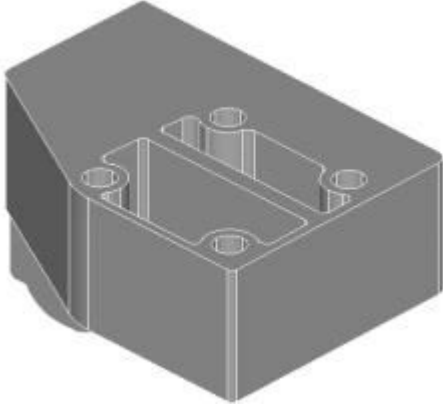


Şekil 6. Kuvvet ve Sınır Şartları Uygulama Bölümleri



Şekil 7. Topoloji Sonrası Malzeme Dağılımı

Parçanın üretilebilirliği göz önünde bulundurularak alt bölgeden boşaltma yapılmış ve Şekil 8' de görülen yapı elde edilmiştir.



*Şekil 8. Malzeme Boşaltılmış Model*

Sonuç olarak, bu çalışma ile motor bağlantı elemanının ilk tasarım modelinin başlangıç şartlarına göre kütlesi % 21,46 kütlesi azaltılmıştır. Motor bağlantı elemanı ile ilgili optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Farklı malzeme boşaltma değerleri ile çeşitli çalışmalar yapılarak performans ve imalat açısından en etkin ve ekonomik yapısal model seçilebilir.

*Tablo 2. Topoloji Optimizasyonu Öncesi ve Sonrası Sonuçlar*

<b>Motor Bağlantı Elemanı</b>	<b>Topology optimizasyonu öncesi</b>	<b>Topology optimizasyonu sonrası</b>	<b>% değişim</b>
Doğal Frekans (Hertz)	112.8	121.5	+7,71
Maksimum Gerilme ( N/mm <sup>2</sup> )	1.34	1.59	+18,65
Maksimum Deplasman (mm)	5.38e-4	5.86e-4	+8,92
Hacim (mm <sup>3</sup> )	772010	606310	-21,46

## SONUÇ

Bu çalışmada, ürün maliyetinin azaltılması ve pazara sunum sürelerinin kısaltılması için ürün geliştirme aşamasında optimum tasarım modelinin belirlenmesine yönelik, topoloji optimizasyon yaklaşımı kullanımı anlatılmıştır. Malzeme dağılımını temel alan bu yaklaşım ile otomobil ön süspansiyon sistemlerinde kullanılan salıncak kolunun ve motor bağlantı



elemanının optimum yapısal modelleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, topoloji optimizasyon yaklaşımının taşıt elemanlarının tasarımında etkin olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Örnek olarak verilen uygulamalar, yöntemin işlem adımlarını ve sonuçlarını göstermeye yöneliktir, nihai ürün modelleri değildir. Bu nedenle, tasarımcının belirlediği kriterler doğrultusunda malzeme boşaltma değerleri veya istenen kısıtlar doğrultusunda diğer model parametreleri değiştirilerek farklı yapısal modeller elde edilebilir.

## KAYNAKÇA

- 1. A. R. Yıldız, N. Kaya, O. Alankuş ve F. Öztürk,** Taşıt Salıncak Kolunun Optimum Boyutlarının Bulunması, OTEKON'02 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Haziran, Bursa, 2002.
- 2. A. R. Yıldız, N. Kaya, O. Alankuş ve F. Öztürk,** Motor Bağlantı Elemanının Optimum Tasarım Modelinin Belirlenmesi, OTEKON'02 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Haziran, Bursa, 2002.
- 3. K. Steen, O. Niels and R. John,** Concept of an Optimisation System, Computer Aided Optimum Design of Structures, Springer, pp.79-88, 1989.
- 4. B. Torsten,** Application of Structural Optimisation Software in the Design Process, Computer Aided Optimum Design of Structures, Springer, p. 13-22, 1989.
- 5. T. Jean,** CAD meets CAE, Mechanical Engineering, 121 (10), pp. 66-70, 1999.
- 6. B. Esping,** Design Optimisation as an Engineering Tool, Structural Optimisation, 10, pp. 137-152, 1995.
- 7. M.P. Bendsoe and O. Sigmund,** Material Interpolation Schemes in Topology Optimization, Arch. Appl. Mech., 69, pp. 635-654, 1999.
- 8. M. P. Bendsoe and N. Kikuchi,** Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng, 71, pp. 197-224, 1988.
- 9. R.J Yang. and C.H. Chuang,** Optimal Topology Design Using Linear Programming, Structural Optimization, 68, pp. 265-290, 1993.
- 10. H.P. Mlejnek and R. Schirmacher,** An engineer's Approach to Optimal Material Distribution and Shape Finding, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 106, pp. 1-26, 1993.
- 11. C.Y. Lin and L.S. Chao,** Automated Image Interpretation for Integrated Topology and Shape Optimization, Struct Multidisc Optim, 20, pp. 125-137, 2000.
- 12. Gillespie, T. D.,** Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, 1992.
- 13. Ansys 5.7,** Help, Swanson Analysis Systems Inc., USA, 2001.
- 14. I-DEAS,** SDRC-Structural Dynamics Research Corporation, Milford, USA, 1998.

**15. A.R. Yıldız, Şekil Parametrelerinin Optimizasyonu, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 2001.**