

DİREKSİYON MAFSAL PARÇASININ STATİK ANALİZİ ve TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Recep KARA¹, Vedat TAŞKIN², Pınar Aydan DEMİRHAN^{2*}

¹Tekyaz Teknolojik Yazılımlar Ve Makina Tic. A.Ş. İstanbul/Türkiye

²Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Makale Künye Bilgisi: Kara,R.,Taşkın,V., Demirhan,P.A.(2022). Direksiyon Mafsalları Parçasının Statik Analizi ve Topoloji Optimizasyonu, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 109-119.

Öne Çıkanlar

- Direksiyon Destek Parçası Tasarımı ve Statik Analizi
- Direksiyon Destek Parçası Topoloji Optimizasyonu
- Direksiyon Destek Parçası Son Tasarımı ve Statik Analizi

Makale Bilgileri	Özet
Makale Tarihi: Geliş: 6 Aralık 2022 Kabul: 17 Aralık 2022	Gelişen teknoloji ile birlikte tasarımlardaki hatalar üretim hızına bağlı olarak artmaktadır. Günümüzde CAD programları ve Topoloji optimizasyonu gibi yöntemler kullanılarak minimum hata ile tasarımlar geliştirmek mümkündür. Topoloji optimizasyonu sayesinde otomotiv, makine, endüstriyel vb. alanlarda tasarımsal optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada direksiyon sistemine ait bir oto yedek parça elemanı olan direksiyon mafsalı incelenmiştir. Bu parça tekerleklerin dönmesini sağlayan direksiyon sisteminin pivot noktasıdır. Yönlendirme ihtiyacı duyulan tüm araçlarda bu parça kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı direksiyon mafsalı için emniyet katsayısı yüksek ve araç süspansiyon sisteminden kaynaklı oluşabilecek gerilmelere dayanıklı bir tasarım geliştirmektir. Ayrıca analiz programları kullanılarak bu parçanın yapı itibarı ile hafif olacak şekilde tasarlanmasını başarmaktır. Analizler sonucunda direksiyon mafsalları parçasının ağırlığı %75 oranında azalmıştır. Emniyet katsayısı 2 kat olacak şekilde bir tasarım optimizasyonu çalışması yapılmıştır.
Anahtar Kelimeler: Optimizasyon; Topoloji; Statik Analiz; Direksiyon Mafsalları	

STATIC ANALYSIS AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF THE STEERING KNUCKLE PART

Highlights

- Steering Knuckle Design and Static Analysis
- Steering Knuckle Topology Optimization
- Steering Support Part Final Design and Static Analysis

Article Info	Abstract
Article History: Received: December 6, 2022 Accepted: December 17, 2022	With the developing technology, the errors in the designs increase depending on the production speed. Today, it is possible to design with minimum error using methods such as CAD programs and Topology optimization. Thanks to topology optimization, design optimization studies are carried out in the fields such as automotive, machinery, industrial. In this study, we examined the steering knuckle, is an auto spare part element of the steering system. It is the pivot point of the steering system that allows the wheels to turn. This part is used in all vehicles that need steering. The purpose of this study is to develop a design of a steering knuckle with a high safety coefficient and resistant to the stresses that may arise from the vehicle suspension system. Also, it is aimed to achieve light in structure by using the analysis programs of this steering joint part used in vehicles. The weight of the steering knuckle piece was reduced by 75%. A design optimization study was carried out with a factor of safety of 2.
Keywords: Optimization; Topology; Static Analysis; Steering Knuckle	

1. Giriş

Son yıllarda mekanik ve tasarım projelerinde özellikle otomotiv sektöründe model hafifletme çalışmaları hız kazanmıştır. Model ağırlığında yapılacak iyileştirmelerle birlikte yakıt tasarrufunda fayda sağlanacağı gibi karbon salınım oranlarında da düşüş meydana gelecektir. Trafığe çıkan araç sayısının artması ile birlikte bu alanlarda yapılan topoloji optimizasyonu çalışmaları önem kazanmaktadır.

Topoloji Optimizasyonu belirlenen sınır koşullara uygun olacak şekilde tasarımların yapılmasıdır. Ayrıca tasarım optimizasyonu ele alınan bir modeli minimize etmek olarak da tanımlanabilir. Günümüz şartlarında hammadde miktarını azaltmak ve sistemin verimliliğini artırmak önem taşıyan kavramlardır. Topoloji optimizasyonu hammadde maliyetlerini azaltmayı hedefleyen bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. (Türkey 2018)

Parça tasarımının belirlenen sınır koşullara göre modellenmesi, ergonomik açıdan kullanışlı olması ve uzun dönem ihtiyacı karşılayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Tasarımsal modellemeler çoğunlukla prototip çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmektedir. (Düzcan 2019)

Belirli sınır koşullarda tasarlanan modellerin minimum ağırlıkta olması beklenmektedir. Optimizasyon teknikleri sayesinde maksimum performans sergileyen modellerin oluşturulması önem arz etmektedir. (Lee vd. 2007).

Araştırmacılar topoloji optimizasyonu kullanılarak ağırlık azaltma sağlanırken, mukavemet değerlerinin de arttığını ortaya koymuşlardır. Krishna ve Anderson (2000), süspansiyon sisteminde kullanılan salıncak kolunun iyileştirmesinde topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır. ADAMS programını kullanarak modelden boşaltılması gereken alanları tespit etmişlerdir. Analiz çalışmaları sonucunda model ilk haline göre %15 hafiflerken, %29 oranında maksimum

gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Teknolojik yazılımlar kullanılarak araç ekipmanlarında bu tarz iyileştirmelerin yapılması üretim açısından ayrıca önem kazanmaktadır. Süspansiyon tasarımı sonrası yapılan analiz sonucu ile hem hafif hem de mevcut hammaddeler gereksiz yere kullanılmamaktadır.

Bölükbaş (2012), Otobüslerde yer alan çekme kancası üzerinde topoloji optimizasyonunu incelemiştir. Aşırı zorlanmalar sonucunda malzemenin akma değerlerinin aşması sonucunda yapıda meydana gelen kırılmaları önlemek için yeni bir tasarım geliştirmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre maksimum gerilmelerde %32,45 oranında azalırken son nihai tasarımın ağırlığı ise %45,49 oranında azalmıştır.

Motor braket parçasının model testlerinden kötü sonuçlar almaları nedeni ile Pan vd. (2007) topoloji optimizasyonu metodunu kullanmışlardır. Motor braket parçası üzerinde tasarımsal değişiklikleri sonlu analiz yöntemi ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Topoloji optimizasyonunda parçanın son nihai hali belirlenmiştir. Model ilk haline göre %12 hafif olurken, mukavemeti %50 oranında artmıştır.

Sunulan bu çalışmada direksiyon mafsal parçasının ağırlığı %75 oranında hafifletme hedefi ile birlikte emniyet katsayısı 2 kat olacak şekilde bir tasarım optimizasyon çalışması yapılacaktır. Bu çalışma ile üretimde meydana gelecek malzeme israfının önüne geçilmesi ve tasarımın bir CAD programı tarafından belirli şartlarda otomatik olarak oluşturulması hedeflenmektedir.

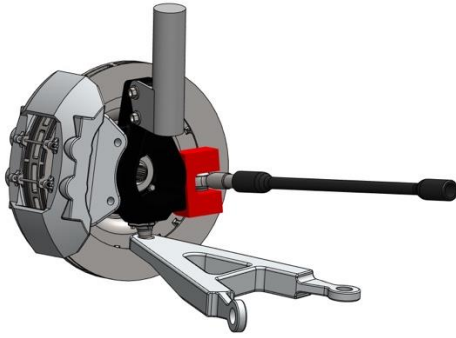
2. Materyal&Metod

Direksiyon destek parçası SOLIDWORKS programında tasarlanarak SOLIDWORKS Simulation programında statik analizi yapılmıştır. SOLIDWORKS Simulation Professional kullanılarak Topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen model Geomagic for SOLIDWORKS programı aracılığıyla tersine

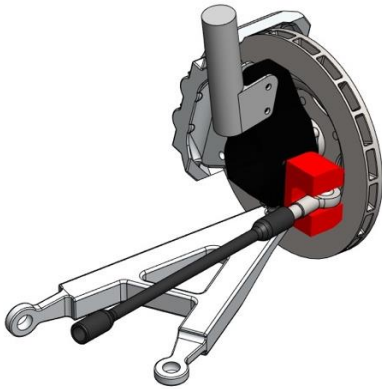
mühendislik yapılmıştır. Nihai tasarlanan model üzerinden statik analiz çalışması gerçekleştirilmiştir.

2.1. Araç Süspansiyon Sistem Tasarımı

Araç süspansiyon sistemi SOLIDWORKS CAD ortamında diğer aksamaları da içerecek biçimde tasarlanmıştır. Sistem montaj olarak tasarlanmış olup fren diski, fren kaliperi, tekerlek göbek parçası, bağlantı çubuğu, direksiyon bağlantı parçası, direksiyon rodu, alt kontrol kolu, alt kontrol mafsalı, dikme parçası ve eklem boğum parçalarından oluşmaktadır. Şekil 1 ve Şekil 2’de sistem tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 1: Araç Süspansiyon Sistem Tasarımı Genel Görünüm



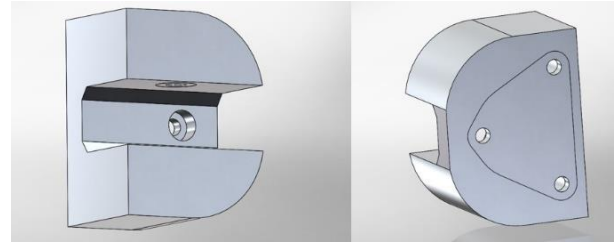
Şekil 2: Araç Süspansiyon Sistemi Fren Disk ve Kaliper Görünümü

Süspansiyon sistem tasarımı içerisinde yer alan bileşenlerin tasarımı ile birlikte kullanılan malzemeler de atanmıştır. Bileşenler içinde yer alan direksiyon destek parçası (Steering knuckle) analizin tasarıma

etkimesi ile yeni bir tasarım yaklaşımı olarak ele alınacaktır.

2.2. Direksiyon Destek Parçası ve Statik Analizi

Direksiyon destek parçası süspansiyon sistemi içinde kaba bir model olarak montaj yapılmıştır. Bu bağlamda tasarım olarak ağırlık ve hacim olarak yüksek değerlere sahiptir. Modelin mukavemeti ele alınarak topoloji optimizasyonu ile daha düşük kütle ve hacimde benzer mukavemet özellikleri ile yeni bir tasarım elde edilecektir. Direksiyon destek parçası modeli Şekil 3’te gösterilmiştir.



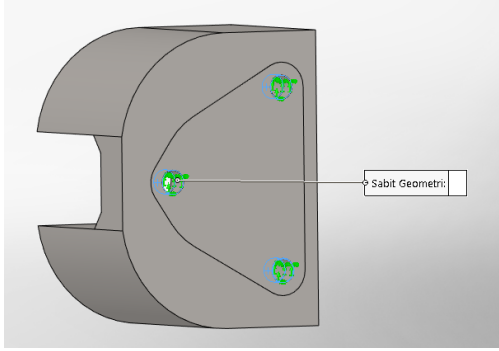
Şekil 3: Direksiyon Destek Parçası (Steering Knuckle) Modeli

Direksiyon destek malzemesi AISI 304 çelik malzemesi tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1: AISI 304 Çelik Malzemesin Özellikleri

Elastik Modülü	190 Gpa
Poisson Oranı	0.29
Yoğunluk	8000 Kg/M ³
Akma Gerilmesi	207mpa
Çekme Gerilmesi	517 Mpa

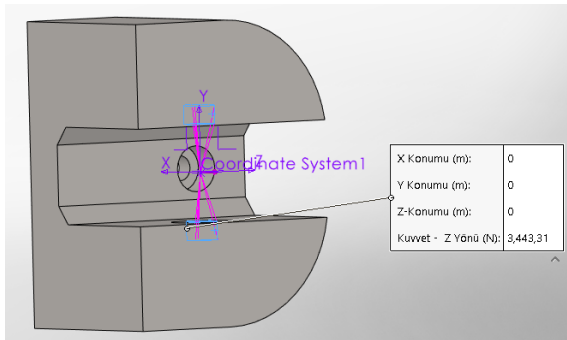
Modelin topoloji optimizasyonu yapılmadan önce mukavemet özellikleri statik analiz yapılarak incelenecektir. Model destek parçası üzerinde yer alan 3 adet bağlantı noktasından sabitlenmiştir.



Şekil 4: Modelin 3 Delik Yüzeyinden Mentеше Sabiti Yapılması

Khode, Patil ve ark., yaptığı çalışmada araç brüt ağırlığı $R=1350$ Kg (yolcu ve aksesuar ağırlığı dikkate alındığında) Newton cinsinden toplam ağırlık $W=1350 \times 9,81=13243$ N olmak üzere motorun ön tarafa montajından dolayı ağırlığın %52'si ön aks tarafından alındığı varsayılmaktadır. Kalan %48 ağırlık arka aks tarafından alındığı kabul edilmiştir (Khode ve diğ., 2017). Bu nedenle ön aks üzerindeki ağırlık (F_1) = $0,52 \times 13243,5=6886,62$ N. Her bir ön tekerlekteki tepki kuvveti, $R_w = \text{Ön ağırlık aks}/2 = 6886,62/2=3443,31$ N olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada destek parçasına etki eden kuvvet değeri $3443,31$ N olarak referans alınmıştır. Şekil 5'te gösterilmiştir.



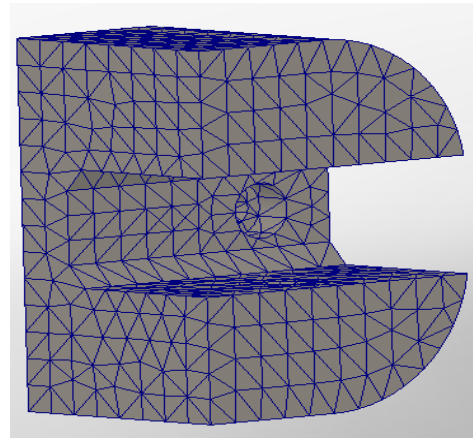
Şekil 5: Modelin Birbirine Paralel 2 Delik Yüzeyinden Eksen Takımıyla Kuvvet Uygulanması

Şekil 6'da mesh detayları gösterilmiştir.

Etüt adı	Static 5* (-Topology Study-)
DetaylarMesh tipi	Kati Mesh
Kullanılan Meshleyici	Standart
Otomatik Geçiş	Kapalı
Mesh Otomatik Döngülerini Ekle	Kapalı
Yüksek kaliteli mesh için jakoben noktalar	16 nokta
Eleman boyutu	7,62767 mm
Tolerans	0,381383 mm
Mesh kalitesi	Yüksek
Toplam düğüm	9934
Toplam eleman	6156
Maksimum En Boy Oranı	6,5491
En Boy Oranı < 3 olan elemanların yüzdesi	98,5
En Boy Oranı > 10 olan elemanların yüzdesi	0
Şekli bozulmuş elemanların yüzdesi	0
Bozulmuş eleman sayısı	0
Mesh tamamlama süresi (sa:dk:sn)	00:00:01
Bilgisayar adı	RKARAN

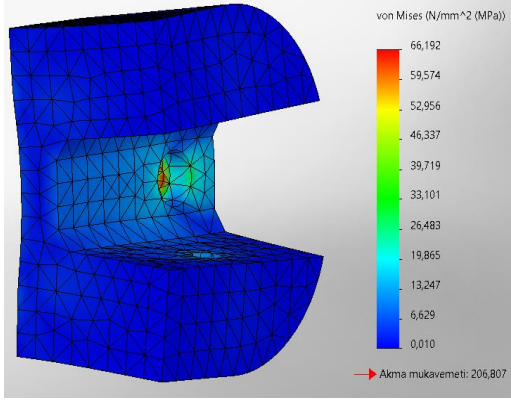
Şekil 6: Mesh Detayları

Tetrahedron mesh tipi ile model analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de model mesh yapısı gösterilmiştir.

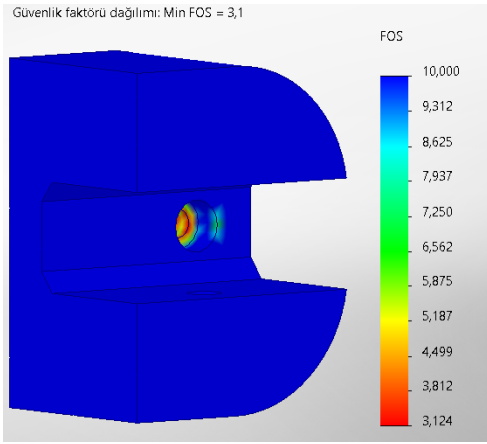


Şekil 7: - Model Mesh Yapısı

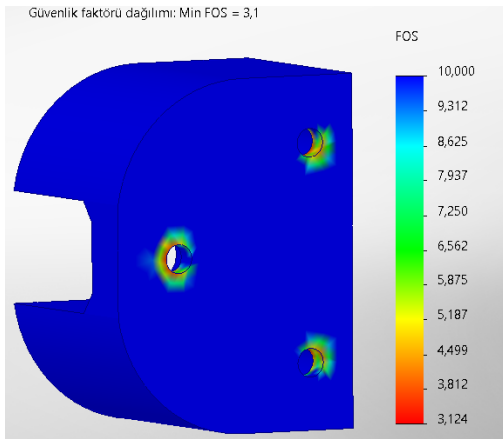
Model bu koşullar altında statik-mukavemet analizi yapıldığında Maksimum Von-Mises Gerilmesi $66,2$ MPa ölçülmüştür. AISI 304 çelik malzemesinin akma mukavemeti $206,8$ MPa'dır. Şekil 8'de gerilme değerleri gösterilmektedir. Bu sonuçlar ile model yaklaşık $3,12$ kat güvenli çıkmaktadır. Şekil 9 ve Şekilde 10'da güvenlik faktörü (emniyet katsayısı) gösterilmiştir.



Şekil 8: Model Von-Mises Gerilme Değerleri

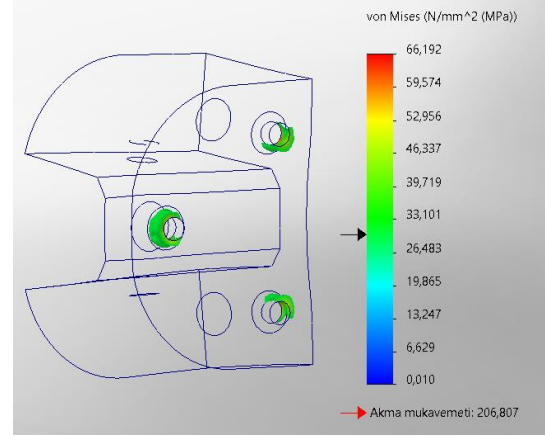


Şekil 9: Güvenlik Faktörü Dağılımı

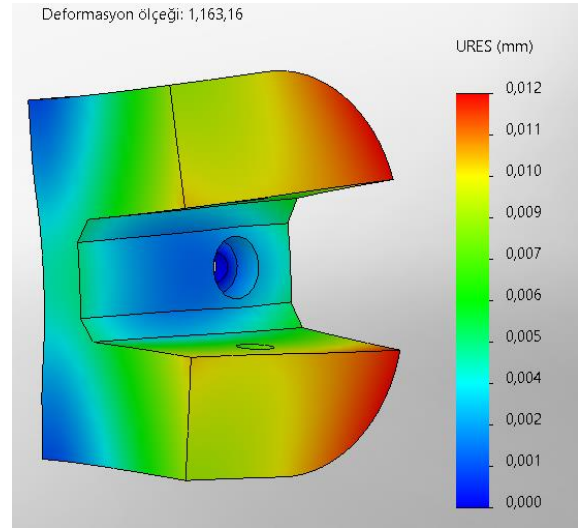


Şekil 10: Güvenlik Faktörü Dağılımı

Modelin büyük bir kısmında gerilme değerleri düşük çıkmıştır. En yüksek gerilme değerleri modelin mesnetlendiği deliklerde ortaya çıkmaktadır. Bu değerleri gerilme değer grafiğinde izo kırpmayla daha rahat görmek mümkündür. Şekil 11'de söz konusu gerilme değerleri gösterilmektedir

Şekil 11: Model Bölgesel Gerilme Değerleri
30MPa'dan Yüksek Gerilmeler

Statik analiz ile birlikte modelin aynı zamanda deformasyon değerleri de gözlemlenmiştir. Modelde oluşan en yüksek toplam deformasyon değeri 0,012mm'dir. Şekil 12'de bu değer gösterilmektedir.



Şekil 12: Model Toplam Deformasyon Değerleri

2.3. Direksiyon Destek Parçası Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonunda başlangıçta belirlenen kısıtlamalar göz önünde bulundurularak optimizasyon gerçekleştirilir. Program içerisinde emniyet katsayısı, doğal frekansı ve minimum ağırlık gibi kısıtlamalar yer almaktadır. Modelde yapılan boşaltma işlemleri ile

birlikte optimum tasarımlar ortaya çıkmaktadır. (Düzcan, 2019).

Optimizasyon çalışması sonucunda ortaya çıkan model belirlenen sınır koşulları sağlamak zorundadır. Modelin hesaplanmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Analizin çözümlenebilmesi için ilgili malzemenin mekanik özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elastisite Modülü, yoğunluk ve Poisson oranı malzemenin mekanik özellikleridir. (Aslan, 2019)

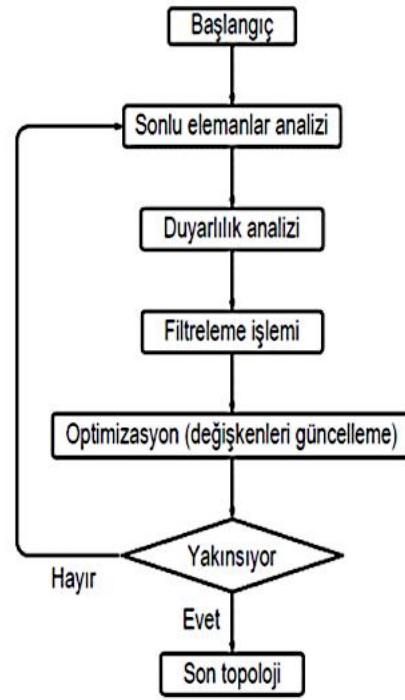
Topoloji optimizasyonunu geliştirmek için bazı etkin metotlar sunulmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki sıralanabilir (Göv ve Kütük, 2007), (Aslan, 2019).

- Optimizasyon Kriterleri Metodu (OCM)
- Penalizasyon ile Katı İzotropik Malzeme Metodu (SIMP)
- Seviye Kümesi Yaklaşımı (LSA)
- Homojenleştirme Metodu (HM)
- Evrimsel Yapı Optimizasyonu (ESO)

Bu çalışmada SIMP metoduna göre topoloji çalışması yapılmıştır.

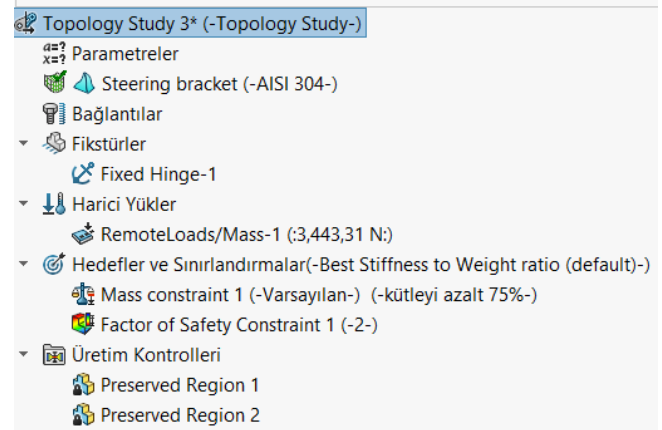
SIMP ile optimizasyon problemini çözmenin yoğunluk ve homojenleştirme yöntemi gibi iki ana çözüm yolu bulunmaktadır (Hatipoğlu, 2015).

Şekil 13'de (SIMP metodu) topoloji optimizasyonu işlem basamakları görülmektedir.



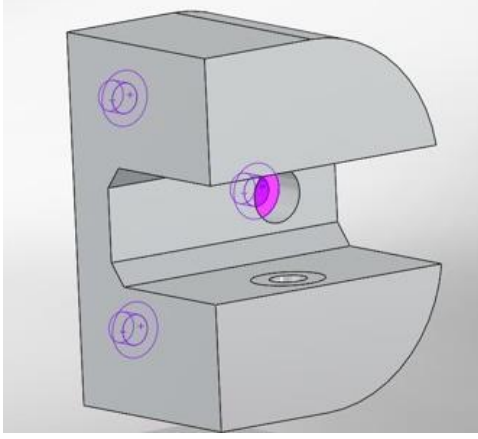
Şekil 13: Topoloji Optimizasyonu İşlem Basamakları (SIMP Metodu) (Topaç ve diğ., 2017)

Bölüm 2.2'de direksiyon destek parçasının yüksek mukavemet ve düşük sehim değerlerine sahip olduğu irdelenmiştir. Bu bağlamda modelin daha hafif ve küçük ebatlı tasarlanabilir olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumdan yola çıkarak destek parçasında topoloji optimizasyonu yöntemi uygulanmıştır. Güvenlik katsayısı 2, %75 oranında kütle azaltma hedefi belirlenerek analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 14'de Topoloji Optimizasyonu sınır koşulları gösterilmektedir



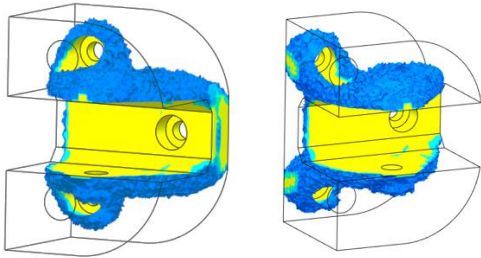
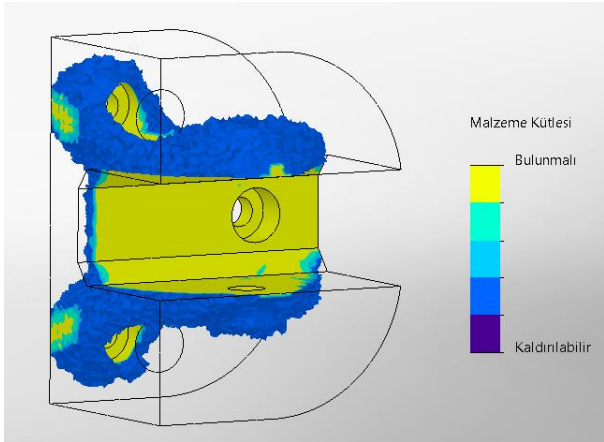
Şekil 14: Topoloji Optimizasyonu Sınır Koşulları

Sabitlenen bölgelerde herhangi bir şekilde sadeleştirme işleminin yapılmaması için bu bölgelerin seçimi yapılarak korunması gerektiği programa belirtilmiştir. Şekil 15'te korunan bölgeleri gösterilmiştir.



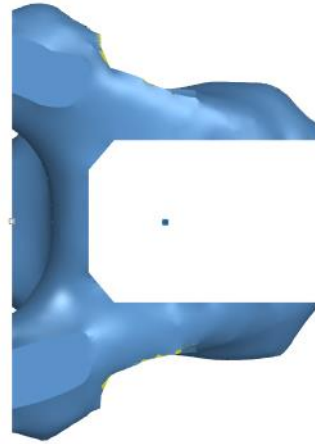
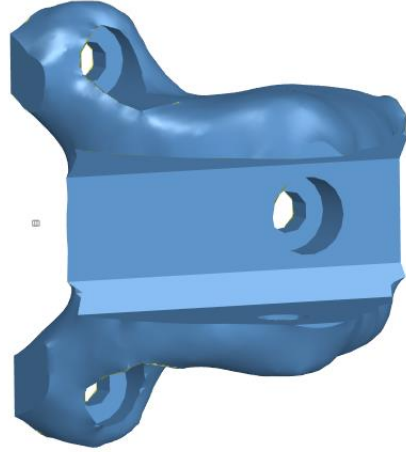
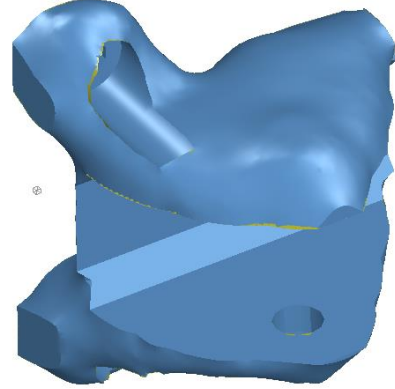
Şekil 15: Modelde Korunan Bölgeler

Belirlenen bu sınır koşulları neticesinde topoloji optimizasyonu ile belirlenen hedeflere ulaşılmış olup Şekil 16'deki gibi bir model ortaya çıkmıştır.



Şekil 16: Topoloji Optimizasyonu Sonucu Model Kalan ve Çıkarılabilir Bölgeler

2.3. Direksiyon Destek Parçası Son Tasarımı ve Statik Analizi

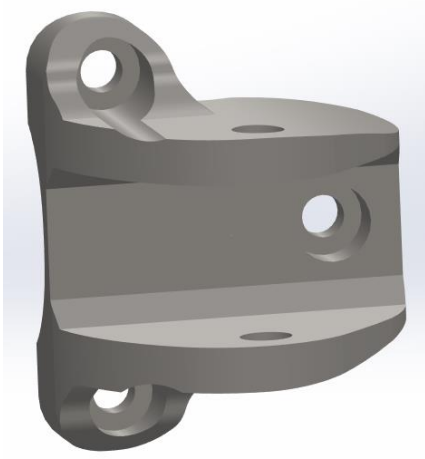


Şekilde 17: Topoloji Optimizasyonu Sonucu Elde Edilen Model Çalışması

Topoloji optimizasyonu sonucunda oluşan model, mesh data (STL) olarak kayıt edilebilmektedir. Bu model Geomagic for SOLIDWORKS programı

sayesinde katı model çalışması yapılacaktır. Şekilde 17'de topoloji sonrası elde edilen model gösterilmiştir.

Topoloji sonuçlarına göre model yeniden tasarlanmıştır. Şekil 18'de yeniden tasarlanmış halini gösterilmiştir.



Şekil 18: STL Modelden CAD Tasarımı Oluşturulması

Şekil 19'da yeni tasarlanan modelin kütleli özellikleri gösterilmiştir.

Mass properties of Parça8
Configuration: Varsayılan
Coordinate system: -- default --
Density = 0.01 grams per cubic millimeter
Mass = 577.90 grams
Volume = 72237.80 cubic millimeters
Surface area = 21797.75 square millimeters
Center of mass: (millimeters)
X = 0.95
Y = 0.01
Z = 3.35

Şekil 19: Yeni Tasarlanan Modelin Kütleli Özellikleri

Şekilde 20'de ilk modelin kütleli özellikleri gösterilmiştir.

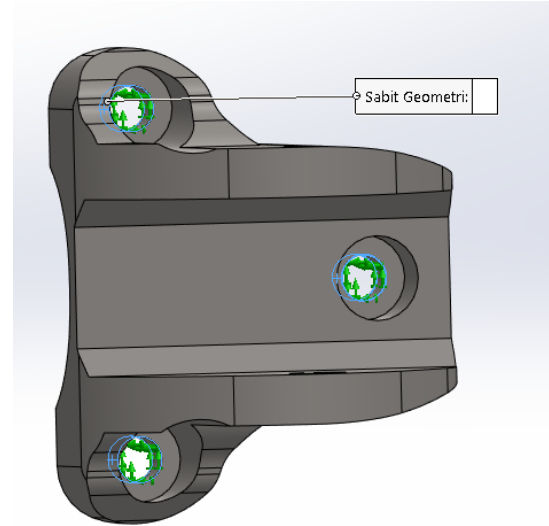
Mass properties of Steering bracket
Configuration: Topology Study
Coordinate system: -- default --
Density = 0.01 grams per cubic millimeter
Mass = 2332.47 grams
Volume = 291559.18 cubic millimeters
Surface area = 40650.67 square millimeters
Center of mass: (millimeters)
X = 27.61
Y = 0.00
Z = -29.47

Şekil 20: İlk Modelin Kütleli Özellikleri

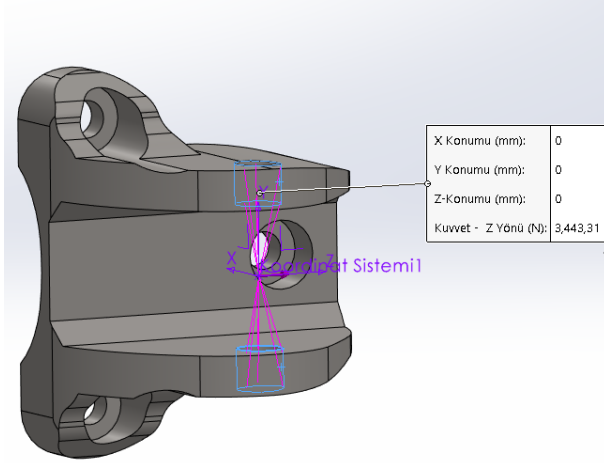
Topoloji optimizasyonu sonrası tasarlanan model 2 kat emniyetli ve %75 oranında ilk modele göre hafif olduğu gözlemlenmiştir.

Yeni model üzerinden aynı şekilde statik analiz gerçekleştirilip beklenen değerleri gösterip göstermediği irdelenmiştir.

Model aynı sınır koşulları ve AISI 304 çelik malzemesi ile statik analize tabi tutulmuştur. Şekil 21'de sınır koşulları gösterilmiştir.

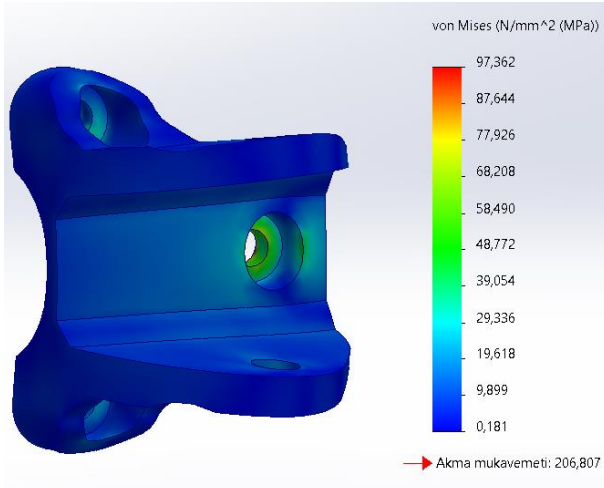


Şekil 21: Model Sabitlenen Bölgeleri



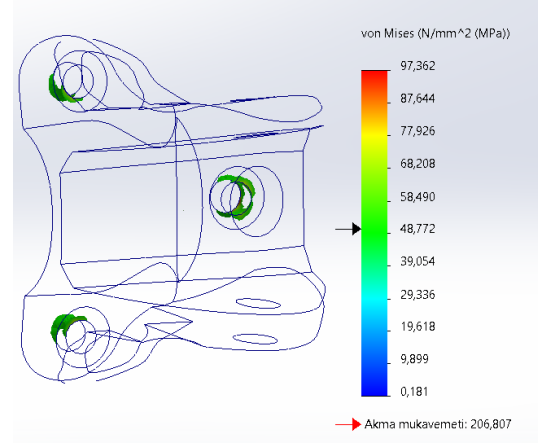
Şekil 22: Yeni Model Kuvvet Sınır Koşulu

Belirlenen sınır koşullar altında statik analiz çözdürüldüğünde modelde oluşan maksimum Von-Mises gerilme değeri 97,3 MPa ölçülmüştür. AISI 304 çelik malzemesinin akma mukavemeti 206,8 MPa'dır. Bu değerler birbirine oranlandığında güvenlik katsayısı 2.12 çıkmakta olup topoloji optimizasyonu mukavemet verileri doğrulanmıştır. Model gerilme değerleri Şekil 23'te gösterilmiştir.



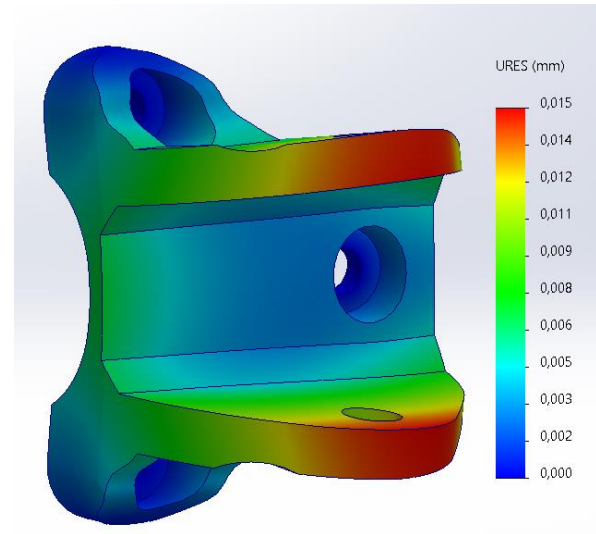
Şekil 23: Yeni Model Von-Mises Gerilme Değerleri

Yeni modelde eski modele benzer şekilde mesnetlenen delik yerlerinde yüksek gerilmeler çıkmıştır. İlgili değerler izo kırpmaya metodu ile gözlemlenebilmektedir. Şekil 24'de bölgesel gerilme değerleri gösterilmiştir.

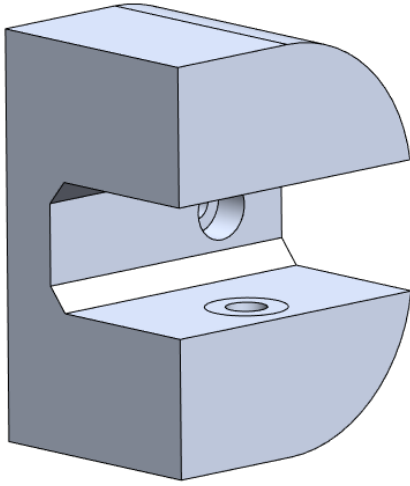


Şekil 24: Yeni Model 50 MPa Üstünde Olan Von-Mises Gerilme Değerleri

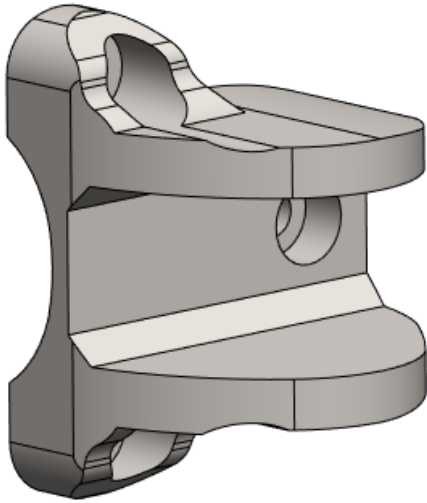
Yeni model deformasyon değerleri düşük çıkmıştır. En yüksek toplam deformasyon değeri 0,015 mm ölçülmüştür. Şekil 25'te toplam model deformasyonu gösterilmiştir.



Şekil 25: Yeni Model Toplam Deformasyon Değerleri



Şekil 26: Destek Parçasının İlk Hali



Şekil 27: Tasarlanan Destek Parçasının Son Hali

Tablo 2’de topoloji optimizasyonu yapılan modelin optimizasyon öncesi ile karşılaştırması yer almaktadır.

Tablo 2: İlk Model ile Tasarlanan Modelin Karşılaştırması

	Topoloji Öncesi	Topoloji Sonrası
Model Ağırlık (Gr)	2332,5	577,9
Emniyet Katsayısı	3,12	2,12
Yer Değiştirme (Mm)	0,012	0,015

Yapılan çalışmalar sırasında yer değiştirmeler birbirine yakın değerler gözlenmiştir. Tablo 2’de bu değerler gösterilmiştir.

Destek parçasının ilk ve son hali Şekil 26 ve Şekil 27’de gösterilmiştir.

3.Sonuç

Bir araç süspansiyon modeli tasarımı ele alınarak bu montaj tasarımı içindeki direksiyon destek parçası (Steering Knuckle) için topoloji optimizasyonu methodu yapılmıştır. Modelin ilk hali statik analiz testine tabi tutularak belirlenen kütle ve mukavemet hedefleri doğrultusunda topoloji çalışması yapılarak yeni model elde edilmiştir.

Topoloji optimizasyonu çalışmasında modelin 2 kat emniyetli olması ve %75 ağırlık azaltma koşulu sınır koşul olarak verilmiştir. Elde edilen yeni model statik analiz testine tabi tutularak topoloji optimizasyonu çalışmasında elde edilen verilerin doğrulanması sağlanmıştır.

Tasarım için SOLIDWORKS CAD ve Geomagic for SOLIDWORKS programları kullanılmıştır. Geomagic for SOLIDWORKS programı STL dosyalarında çalışmada kolaylık sağlamaktadır. Statik analiz ve topoloji optimizasyonu için SOLIDWORKS Simulation Professional programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

Türkay, M. 2018. Optimizasyon modelleri ve çözüm metodları.<http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/Optimizasyon.pdf> (Erişim tarihi: 12.03.2019)

Düzcan Y.2019. Yapısal Optimizasyon Teknikleri İle Taşıt Süspansiyon Bileşenlerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisan Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

- Krishna, M. M., Anderson, S. V. 2000. Shape optimization application in upper control arm design. SAE technical paper, No. 2000-01-3445. <https://doi.org/10.4271/2000-01-3445>
- Lee, S., Lee, D., Lee, J., Han, C., Hedrick, K. (2007). Integrated process for structural – topological configuration design of weight-reduced vehicle components. *Finite Elements in Analysis and Design* 43, 620-629.
- Pan, X. Y., Zonni, D., Chai, G. Z., Zhao, Y. Q., & Jiang, C. C. 2007. Structural optimization for engine mount bracket. SAE Technical Paper. No. 2007-01-2419. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2419>
- Bölükbaş, T. 2012. Otobüslerde kullanılan arka çeki kancası taşıyıcı yapısının optimum tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze.
- Khode, S., Patil, N., ve Gaikwad, B. (2017). Design Optimization of a Lower Control Arm of Suspension System in a LCV by using Topological Approach. *International Journal of Innovative Research in Science*. Maharashtra
- Aslan, B. (2019). Yenilikçi Tasarım Yöntemleri Kullanarak Eklemeli İmalata Yönelik Optimum Ürün Geliştirilmesi. Bursa: Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Göv, İ., ve Kütük, M. A. (2007). Topoloji Optimizasyonunda Eleman Silme Metodunun Uygulanması. *XV. Ulusal Mekanik Kongresi*, (s. 438-446). Isparta.
- Hatipoğlu, M. (2015). Topology Optimization Method And Automotive Bracket Optimization. İstanbul: İstanbul Technical University Department of Mechanical Engineering.
- Topaç , M. M., Bahar, E., Kaplan, A., ve Sarıkaya, E. Z. (2017). Topoloji Optimizasyonu Yardımıyla, Askeri Taşıt Bağımsız Ön Süspansiyonu için Alt Salıncak Tasarımı. *İdefis 2017*. Uluslararası Savunma Sanayi II. Sempozyumu.