

## DÖKÜM BRAKETLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM ENİYİLEMESİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

(A NOVEL APPROACH FOR COMPUTER AIDED DESIGN OPTIMIZATION OF CAST BRACKETS)

Umud Esat ÖZTÜRK<sup>1</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada kara taşıtlarında kullanılan döküm braketlerin tasarım eniyilemesi için bir yaklaşım önerilmiş ve içten yanmalı motor takozu braket için uygulaması gösterilmiştir. Bu yaklaşım sonlu elemanlar yöntemi ile topoloji eniyilemesi yönteminin kullanılmasına dayanmaktadır. Eniyileme sırasında elde edilecek tasarımın aynı zamanda üretilebilir olması için de kesit genişliği ve kalıplama yönü gibi eniyileme kısıtları kullanılmıştır. Eniyileme çalışması sonrasında elde edilen topoloji baz alınarak baştan tasarlanan braket ile ilk tasarımın dayanım ve titreşim performansı sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır. İlk tasarım braket ile aynı performansın sağlandığı, buna ilaveten yüzde 23 kadar ağırlık azaltılmasının başarıldığı görülmüştür. Uygulaması gösterilen bu yaklaşım değişik taşıtlardaki benzer braket parçaları için de başarılı bir şekilde uygulanabilir.

Anahtar Kelimeler: sonlu elemanlar yöntemi, topoloji eniyilemesi, içten yanmalı motor takozu braket

### ABSTRACT

*In this study, a novel approach has been proposed for design optimization of cast brackets used in ground vehicles and an application has been presented for internal combustion engine mount bracket. This approach is based on using finite elements method with topology optimization algorithms. Cross section width and mold drawing direction have been used as optimization constraints to obtain a manufacturable optimized design. Durability and vibration performances of the new design based on optimum topology and the original design were compared using finite element method. It is seen that equivalent performance was successfully achieved while having 23 percent weight reduction. Having shown its application, this novel approach can also be successfully used in design optimization of similar brackets used in different vehicles.*

**Keywords:** *finite elements method, topology optimization, internal combustion engine mount bracket.*

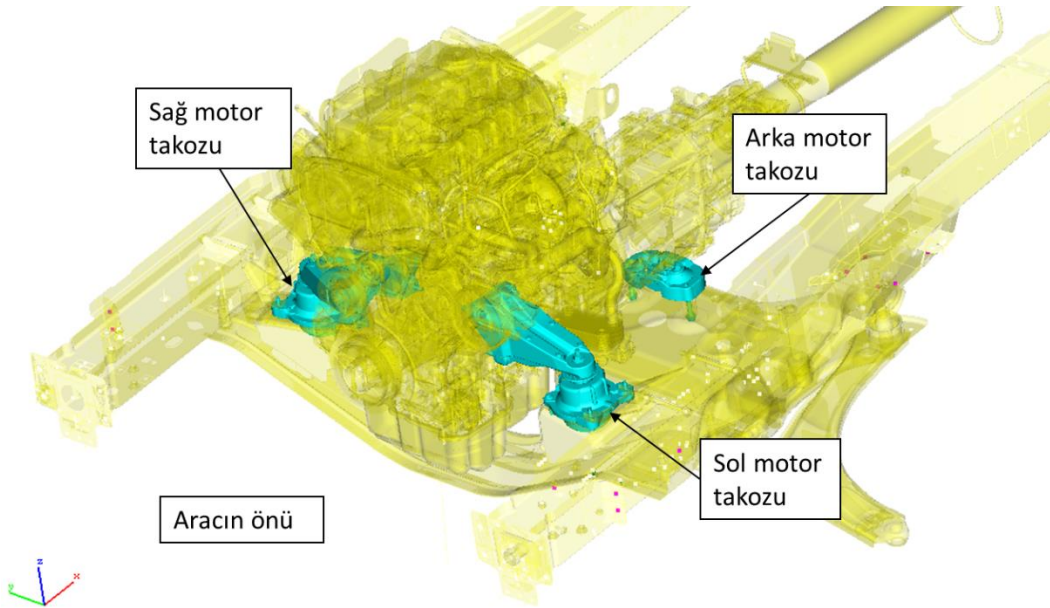
<sup>1</sup> Ford Otomotiv Sanayi A.Ş. Sancaktepe Arge Merkezi, İstanbul, uozturk@ford.com, umudozturk@yahoo.co.uk (sorumlu yazar)

## 1. GİRİŞ

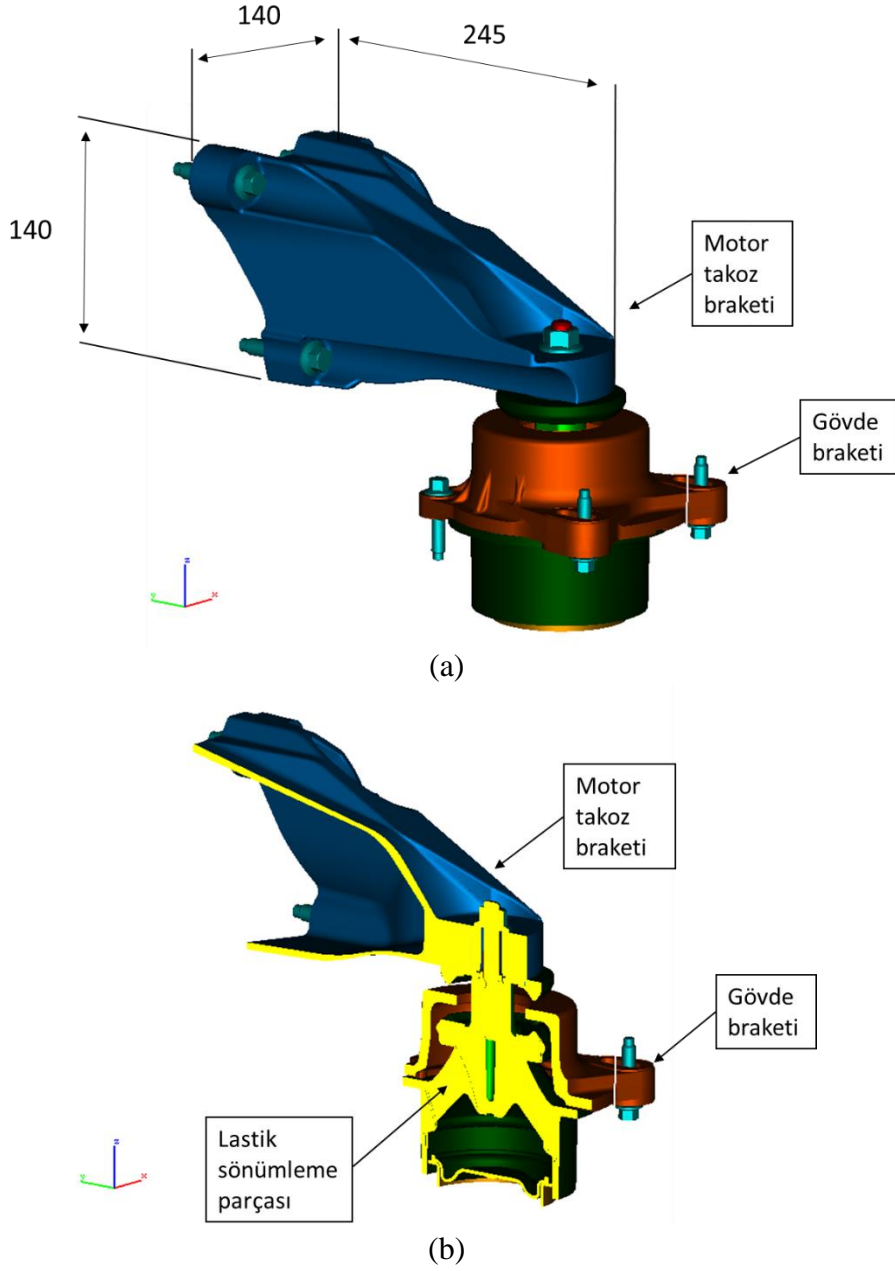
Otomotiv endüstrisindeki yoğun rekabet ortamı nedeniyle kaliteden ödün vermeden mümkün olan en az üretim maliyetine sahip parça tasarımı geliştirmek gittikçe önem kazanmaktadır. Aynı zamanda uygulanan ürün geliştirme sürecinin süresi ve maliyeti de mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır. Bu amaçlara ulaşmak için bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik araçları ile eniyileme yöntemleri etkin bir şekilde kullanılmalıdır.

İçten yanmalı motor takozu parçası motorun gövdeye bağlanmasını sağlayan önemli bir yapısal parçadır. Şekil 1’de görüldüğü üzere arkadan itişli ticari araçlarda motor üç noktadan araç gövdesine bağlanmaktadır. Motor silindir bloğunun sağ ve sol tarafından birer motor takoz braket parçası ve şanzıman muhafazasından üçüncü bir braket parçası ile araç gövdesine bağlantı sağlanmaktadır. Bu üç braketin gövde sacına bağlantısında genellikle titreşim sönümlenmesi ve izolasyonu işlevi gören lastik sönümlenme elemanları kullanılmaktadır. Şekil 2’de motor braketi, lastik sönümlenme parçası, gövde braketi parça grubu ve kesit görüntüsü görülebilir. Braketin dış boyutları 140mm x 140mm x 245mm, genel et kalınlığı 4mm ve ağırlığı yaklaşık 1260 gram kadardır.

Araç tipi, çekiş tipi, motor hacimi, hedeflenen titreşim ve sürüş özelliklerine göre motor takozlarının yeri ve sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Olsson ve arkadaşları [1] değişik motor ve araç konfigürasyonları için titreşim, gürültü, sürüş konforu ve sürülebilirlik özelliklerini göz önüne alan bir çoklu disiplinlerarası eniyileme yöntemi önermişlerdir. Eniyileme sırasında üretim yöntemlerinin kısıtlarını da gözönüne almışlardır. Eniyilenecek özellikler için ilk olarak girdi ve çıktılar arasında cevap yüzeyleri oluşturulmuş, sonrasında cevap yüzeyleri kullanılarak bütün özellikleri en iyi sağlayan tasarım belirlenmiştir. Su ve Hua [2] yaptıkları çalışmada titreşim ve gürültüye ilaveten motor takozlarının dayanımı ile ilgili bir tasarım doğrulama yöntemi geliştirmişlerdir. Bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılarak motor takozunun lastik katılık ve sönümlenme değerleri değiştirilerek motor takozunun titreşim, gürültü ve dayanım özelliklerinin hesaplanmasına çalışmışlardır.



**Şekil 1.** Arkadan itişli ticari araçta içten yanmalı motorun gövdeye motor takozları ile bağlantısı.



Şekil 2. (a) Sol motor takoz grubu ve (b) kesit görüntüsü.

Motor takoz sisteminin titreşim iletimi ve sönümlenme özellikleri hem lastik sönümlenme parçası hem de motor takoz braketinin özelliklerinden etkilenmektedir. Otomotiv tasarımı yapan ana sanayi şirketleri motor takozu geliştirilmesi sırasında çoğunlukla bu konuda uzmanlaşmış yan sanayi şirketleri ile birlikte çalışmaktadırlar. Lastik sönümlenme parçasının sahip olması gereken statik ve dinamik katılık ve sönümlenme özellikleri tanımlandıktan sonra bu özellikleri sağlayacak lastik parça tasarımı ve geliştirilmesi için bu konuda uzmanlaşmış yan sanayiler ile birlikte çalışılmaktadır. Motor takoz braket parçasının geliştirilmesinin ise genellikle alüminyum döküm metal parça tasarımında uzmanlaşmış ana sanayi tarafından tasarımın yapılması tercih edilmektedir. Bu sayede yukarıda bahsedilen kaliteden ödün vermeden en az maliyetli parçanın en kısa sürede geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi, parça titreşimi ve dayanımı değerlendirmesinde en sık kullanılan bilgisayar destekli mühendislik aracı olmuştur. Bu yöntemi destekleyen birçok ticari paket programlarının kullanılması parça tasarımı ve doğrulama süreçlerinin vazgeçilmez bir adımıdır. Bu programlardan bazıları eniyileme yöntemleri ile sonlu elemanlar yöntemini birlikte kullanımına imkan vermektedir. Bendsoe [3] ile Bendsoe ve Sigmund [4], yapısal tasarım konusunda sonlu elemanlar yöntemi ile değişik eniyileme yöntemlerinin nasıl kullanılabileceğini anlatmışlardır. Bu yöntemler arasında topoloji eniyilemesi yöntemi kavramsal tasarım için en etkili yöntemdir. Bu yöntem uygulanırken tasarım uzayının hangi bölgelerinin tutulması gerektiği ve hangi bölgelerden feragat edilebileceği sonucu elde edilebilmektedir. Topoloji eniyilemesi sonrasında elde edilen tasarımı daha iyi bir noktaya getirmek için ölçü eniyilemesi ve şekil eniyilemesi yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerde de parçanın belli bir kesidinin ölçüleri veya o kesinin şekili değiştirilerek tasarım hedefine ulaşmaya çalışılmaktadır. Christensen ve Klarbing [5], değişik yapısal eniyileme yöntemlerinin sayısal kodlaması ve hesaplamasının nasıl etkin şekilde yapılacağını örneklerle açıklamışlardır.

Harzheim ve Graf [6-7] çalışmalarında metal döküm parçalarının topoloji eniyileme yöntemleri kullanılarak ve aynı zamanda üretim yöntemi kısıtları da göz önüne alınarak nasıl etkin bir şekilde parça tasarım eniyilemesi yapılabileceğini anlatmışlardır. Bu çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte kullanılan topoloji eniyileme yönteminin özellikle parçanın yük taşıyan kesitlerinin yerleri ve ölçülerinin belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Eniyilemede kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlarının detaylı bir tanımlaması verilmemiştir. Örnek olarak radyatör braketini çalışmışlar ve yüzde 31 ağırlık azaltılması sağlarken aynı zamanda gerilme ve direngenlik değerlerinde sırasıyla yüzde 64 ve 52 iyileşme sağladıklarını belirtmişlerdir. Üretim kısıtlarını eniyileme problemi tanımlamasında kullanarak değişik otomobil parçaları üzerinde yaptıkları çalışmada da birbirine yakın eniyi çözüm noktaları ulaşmışlardır. Bunun sebebinin ise değişik başlangıç şartlarının kullanılması olduğunu belirtmişlerdir. Bu birbirine benzer ama farklı tasarım eniyileme sonuçlarının tasarımcılara değişik seçenekler sunması açısından faydalı olduğunu belirtmişlerdir.

Topoloji, ölçü ve şekil eniyileme yöntemleri yaygın olarak otomotiv araç ve motor parçalarının ağırlık azaltılması ve fonksiyon iyileştirmesi için kullanılmaktadır. Li ve arkadaşları [8] otomobil motoru yatağı parçası üzerinde ağırlık azaltılması sağlarken aynı zamanda hedeflenen katılık ve dayanım hedeflerini de tutturmuşlardır. Topoloji eniyileme problemi tanımlama için 10 ayrı noktada üçer kuvvet bileşeni altındaki deplasman değerleri eniyileme kısıtları olarak kullanmışlardır. Amaç fonksiyonu olarak da ağırlık enazlaması kullanmışlardır. Topoloji eniyilemesi çalışmasından sonraki aşamada ise ölçü ve şekil eniyilemesi yöntemlerini kullanarak son detay tasarımlarını elde etmişlerdir.

Topoloji eniyilemesi yöntemi titreşim özelliklerinin eniyilenmesi için de etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Tsai ve Cheng [9] yaptıkları çalışmada eniyileme hedefi olarak doğal frekans ve serbest salınım şekili kullanılması için bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemin başarı ile çalıştığını değişik giriş örnekleri ve değişik sınır şartları kullanarak göstermişlerdir. Ayrıca bir makina kadesinin değişik doğal frekans ve serbest salınım şekillerini birbirinden ayırıştırılmasında ve birinci burulma doğal frekansının artırılmasını da çalışmışlardır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan eniyileme çalışmalarında büyük boyutlu ve çok sayıda düğüm noktası içeren modellerde eniyileme adımlarının çokluğu nedeniyle toplam çözüm süresi çok fazla olmakta ve bu yüzden sıklıkla kullanılmasında problem yaşanmaktadır. Uygulamadaki bu problemin aşılması için Ozturk [10] alt-modelleme tekniğinin kullanılmasını önermiş ve bir içten yanmalı motor diferansiyel kutusu şekil eniyilemesi için önerdiği yöntemin uygulamasını göstermiştir.

Motor takoz braketlerinde de topoloji eniyileme uygulamaları yapılmıştır. Leal ve arkadaşları [11] önden çekişli bir ticari aracın üç noktasından gövde bağlantısını sağlayan motor takoz sisteminin diferansiyel kutusu tarafındaki braketi için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak braket ağırlığı enazlaması tanımlanmıştır. Eniyileme kısıtları olarak birinci doğal frekans alt sınırı ve 26 değişik yükleme durumu için sadece bir adet şekil değiştirme enerjisi değerini üst sınırı olarak kullanmışlardır. Eniyileme çalışması sonucunda verilen kısıtlar sağlandığı durumda yüzde 30 kadar ağırlık avantajı sağlayan bir tasarım elde etmişler ve geleneksel deneme-yanılma yaklaşımına göre 6 kat daha kısa sürede tasarım sürecini tamamladıklarını belirtmişlerdir.

Pan ve arkadaşları [12] da motor takoz braketinin yapısal tasarımının eniyilenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında braketin titreşim ve dayanım özelliklerini iyileştirirken ağırlık ve maliyet avantajı sağlamak için topoloji ve şekil eniyileme yöntemleri kullanmışlardır. Çalışmalarının sonunda yüzde 12 ağırlık avantajı sağlarken yüzde 50 oranında katılık ve dayanım değerinde iyileşme sağlamışlardır. Eniyileme amaç fonksiyonu olarak esneklik enazlaması tanımlandığı ve kütle üst sınırının eniyileme kısıtı olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Ancak birden fazla yükleme durumunda nasıl eniyileme yapılacağı konusunda bir açıklama yapmamışlardır.

Bu makalede arkadan itişli ticari bir aracın motor takoz braketlerinden birinde uygulaması gösterilecek yeni bir tasarım eniyileme yaklaşımı önerilmiştir. Eniyileme çalışmasının etkinliğinin artırılması için önceki çalışmalardan farklı olarak değişik yönlerdeki yüklemeler sonucu elde edilen toplam şekil değiştirme enerjisinin enazlanması olarak amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Hacim oranı, birinci doğal frekans ve üretim yöntemlerinin gereklilikleri de eniyileme kısıtları olarak kullanılmıştır. Makalenin ilk kısmında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan dayanım ve titreşim hesabı sonuçları paylaşılacak, daha sonra eniyileme çalışmasının detayları sunulacaktır. Son olarak eniyileme çalışması sonrasında elde edilen tasarım ile ilk tasarımın karşılaştırılması yapılacak ve sonuçlar yorumlanacaktır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dayanım ve Titreşim Analizi

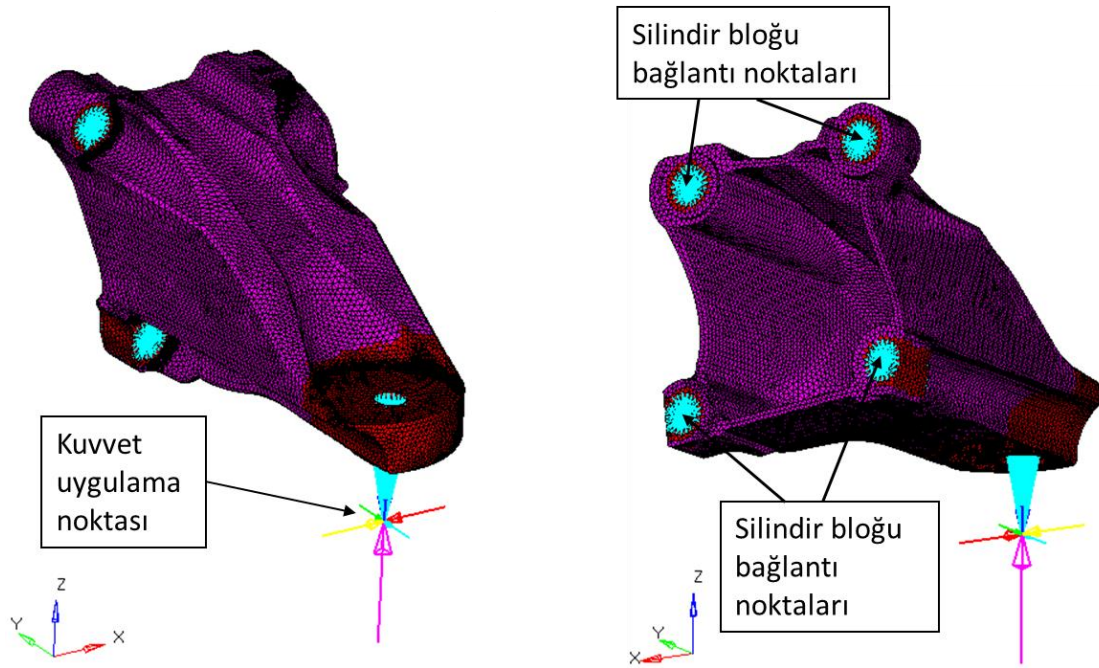
Tasarım eniyileme çalışması için öncelikle sonlu elemanlar yöntemi çözümünde kullanılacak model hazırlanmıştır. Şekil 3'de görülen modelde ikinci derece dörtüzlü elemanlar ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu tip elemanlar hem kompleks şekile sahip braketin çözüm ağının kolayca oluşturulması hem de doğru hesaplama sonuçları elde edilmesi için seçilmiştir. Modelin oluşturulmasında Altair Hypermesh sürüm 12 paket programı kullanılmıştır. Eflatun renkli çözüm ağı eniyileme sırasında kullanılacak tasarım bölgesini göstermektedir. Kırmızı renkli çözüm ağı bölgesi, braketin diğer parçalara bağlantısı için kullanılan kısımlar olduğundan ve tasarımının değiştirilmesi mümkün olmadığından eniyileme çözümü dışında bırakılmıştır. Civata bağlantılarının modellenmesinde giriş ve katı

elemanlar kullanılmıştır. Motor takozu braket malzemesi olan LM25-TF alüminyum alaşımı için kullanılan mekanik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir [13]. Silindir blok bağlantısı için kullanılan 4 civata noktasından uzaya ankastre bağlantı yapılmıştır. Lastik sönümleme elemanı geometrik merkezinden üç doğrultuda ve hem pozitif hem de negatif yönlerde toplam 6 kuvvetin herbiri ayrı çözüm adımında olacak şekilde uygulanmıştır. Bu yüklemelerde Von Mises gerilme değerleri ile alüminyum alaşımı için izin verilen kopma mukavemeti değeri karşılaştırılarak dayanım değerlendirmesi yapılmıştır.

## 2.2. ENİYİLEME ÇALIŞMASI

Sonlu elemanlar yöntemi ile topoloji eniyileme çalışması için Altair Optistruct sürüm 12 paket programı [13] kullanılmıştır. Eniyileme çalışmasının hedefleri aşağıda şekildedir:

- Üç doğrultudaki pozitif ve negatif yönlerdeki toplam 6 yükleme altında dayanım sorunu olmaması,
- Titreşim iletimi sorunu olmaması için serbest salınım frekansının izin verilen değerden yüksek olması,
- Alüminyum alaşımından döküm tekniği ile üretilebilmesi,
- Mümkün olan en az miktarda malzeme kullanılan braket tasarımına ulaşmaktır.



Şekil 3. Sonlu elemanlar yöntemi için kurulan çözüm modeli.

Çizelge 1. Motor takoz braket malzemesi mekanik özellikleri [13].

Elastiklik Modülü (GPa)	Poisson oranı	Özkütle ( $g/cm^3$ )	Kopma Mukavemeti (GPa)
71	0.3	2.7	230 - 280



Bu hedeflere ulaşmak için önceki çalışmalardan farklı olarak ağırlık veya hacim enazlama amaç fonksiyonları kullanmak yerine herbir yüklemde oluşacak şekil değiştirme enerji toplamının enazlanması olarak amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Doğrusal elastik malzeme davranışı gösteren bir parçanın yüklem altındaki şekil değiştirme enerjisi  $E$  aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$E = \frac{1}{2} u^T K u = \frac{1}{2} \int \varepsilon^T \sigma dv \quad (1)$$

Bu denklemde  $u$ , düğüm noktasının yer değiştirme vektörü,  $K$ , katılık matrisi,  $\varepsilon$ , birim uzama vektörü,  $v$ , hacim için kullanılmıştır. Şekil değiştirme enerjisi parçaya dışarıdan uygulanan kuvvet ile uygulama noktasının yer değiştirmesi çarpımına eşittir. Aynı zamanda parça hacimindeki gerilme ve birim uzama çarpımının fonksiyonu da olduğu için şekil değiştirme enerjisinin enazlamasını sağlayacak tasarım aynı zamanda gerilmenin de enazlanacağı tasarım olacaktır. Motor takoz braketinin üç doğrultudaki pozitif ve negatif yönlerdeki toplam 6 yüklem için de yeterli dayanımı sağlaması beklendiğinden amaç fonksiyonu olarak 6 ayrı sonlu eleman analizi çözüm adımıdaki 6 ayrı şekil değiştirme enerjisinin enazlanması gerekmektedir. 6 ayrı çözüm adımı için şekil değiştirme enerji değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Her bir çözüm adımında uygulanan yüklem ve ortaya çıkan şekil değiştirme enerjisi farklı olduğundan ağırlıklı toplam şekil değiştirme enerjisi  $E_T$  denklem (2) ile tanımlanmıştır. Topoloji eniyileme yönteminin, her yüklem durumuna eşit derecede etki edebilmesi için uygun ağırlık katsayısı  $c_i$  ile herbir adımdaki şekil değiştirme enerjisi  $E_i$ ’nin çarpımları toplanmış ve toplam şekilde değiştirme enerjisi elde edilmiştir. Kullanılan ağırlık katsayıları da Çizelge 2’de verilmiştir.

$$E_T = \sum_{i=1}^6 c_i E_i \quad (2)$$

Motor takoz braketinin topoloji eniyileme amaç fonksiyonu denklem (3) ile, eniyileme kısıtları da denklem (4) ile tanımlanmıştır. Eniyileme kısıtlarından hacim oranı,  $H$ , denklem (5) ile tanımlanmıştır. Birinci doğal frekans,  $f_1$ , izin verilen en az kesit genişliği,  $b$ , ve kalıp çekme yönü,  $n$ , diğer eniyileme kısıtları olarak kullanılmıştır.

**Çizelge 2.** Çözüm adımlarında oluşan şekil değiştirme enerjisi ve ağırlık katsayıları

Adım	Yüklem	Şekilde değiştirme enerjisi (Joule)	Katsayı
1	+F <sub>x</sub>	1.483	2.583
2	-F <sub>x</sub>	1.483	2.583
3	+F <sub>y</sub>	3.831	1.000
4	-F <sub>y</sub>	3.831	1.000
5	+F <sub>z</sub>	3.482	1.100
6	-F <sub>z</sub>	3.482	1.100

Elde edilecek geometrinin döküm tekniği ile üretilebilmesi için izin verilen kesit genişliğinin en az 15 mm olması istenmektedir. Kalıp çekme yönü kısıtı olarak da  $n$  vektörünün silindirik bloğu dört civate bağlantısının oluşturduğu yüzeye dik olması tanımlanmıştır. Kalıp çekme yönü kısıtı sayesinde kalıptan çıkabilecek şekilde topoloji hesaplanacaktır.

$$\min E_T \quad (3)$$

$$\text{k.s.} \quad \begin{cases} H < 0.7 \\ f_1 > f_{min} \\ b > 15mm \\ n = 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$H = (\text{anlık hacim} - \text{ilk hacim}) / \text{ilk hacim} \quad (5)$$

Serbest salınım şekili ve frekansının hesaplanması için Altair Optistruct sürüm 12 paket programındaki özdeğer hesaplama yöntemi olan Lanczos yöntemi [14] kullanılmıştır.

### 3. SONUÇLAR

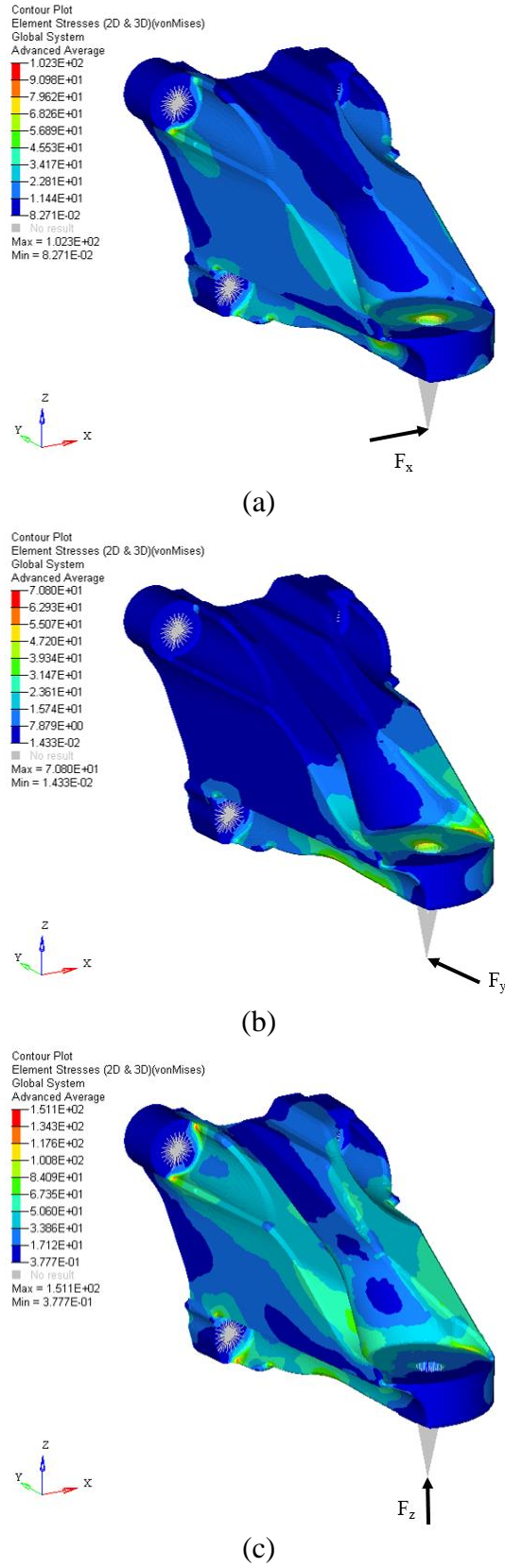
İlk tasarım için üç doğrultuda pozitif ve negatif yönlerdeki toplam 6 kuvvet değeri için yapılan sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen Von Mises dağılımı Şekil 4’de verilmiştir. Von Mises gerilimi pozitif bir büyüklük olduğundan dolayı pozitif ve negatif yönlerde kuvvet uygulandığında da aynı dağılım elde edilmektedir. Bu yüzden sadece pozitif yükleme yönleri için dağılım sonuçları verilmiştir. Koyu mavi renkli yerler Von Mises gerilim değerinin sıfıra yakın olduğu yerleri, sarı-yeşil-kırmızı renkler ise giderek artan gerilim miktarını göstermektedir. Şekil 5’te ise birinci serbest salınım şekili verilmiştir. Serbest salınım şekili hesaplanmasında normalleştirme işlemi uygulandığından renkli skalada belirtilen deplasman değerleri sadece deformasyon şekili için fikir vermesi açısından değerlendirilmelidir.

Bir önceki bölümde detayları verilen topoloji eniyilemesi çalışması sonucu elde edilen geometri Şekil 6’da verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan topoloji eniyileme çalışması sonucunda eleman yoğunluk dağılımı elde edilmektedir. Şekil 6’da kırmızı renkli yoğunluğu 1 (tam) olan kısımlar yük taşımada etkili olan elemanları göstermekte, sarı-yeşil-mavi renkler ise giderek yoğunluğu sıfıra yakın olan, etkisi gittikçe azalan elemanları göstermektedir.

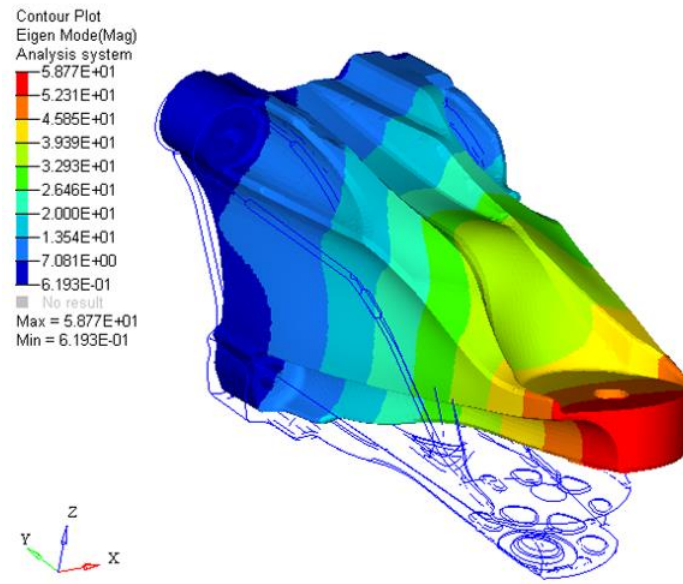
Eniyi topolojinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6’da yoğunluğu 0.3’den az olan elemanlar gizlenmiştir. Şekil 4 ve 6 birlikte incelendiğinde, silinmesi önerilen yoğunluğu düşük olan elemanların, çoğunlukla Şekil 4’de mavi renkli olan Von Mises gerilimi düşük olan bölgelerde olduğu görülmektedir. Gerilimin az olduğu yerlerin silinmesinin önerilmesi mantıklıdır.

Şekil 6’daki eniyi topoloji geometrisi baz alınarak motor takozu braketi baştan tasarlanmıştır. Yeni tasarımın üç doğrultuda yükleme için elde edilen Von Mises gerilim değerleri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 8’de ise yeni tasarımın birinci serbest salınım şekili görülmektedir.

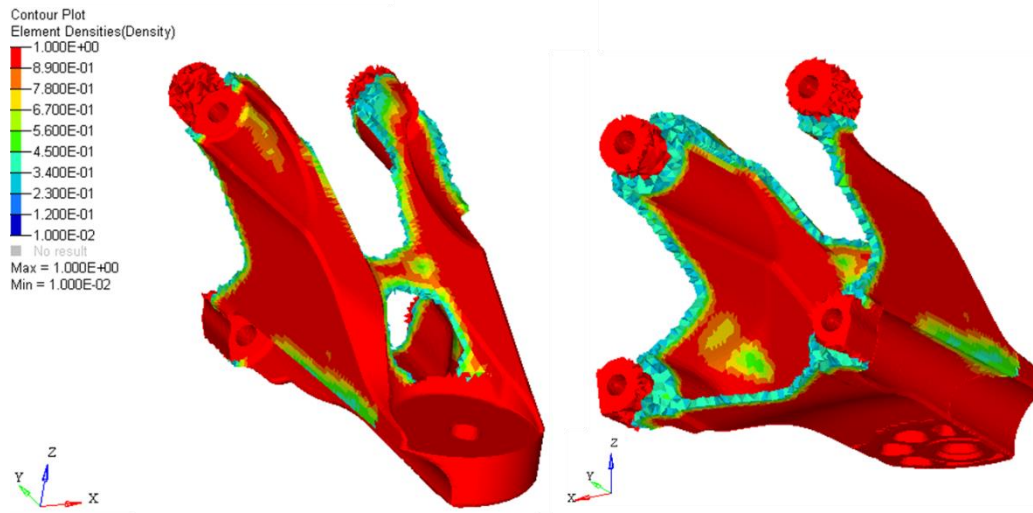




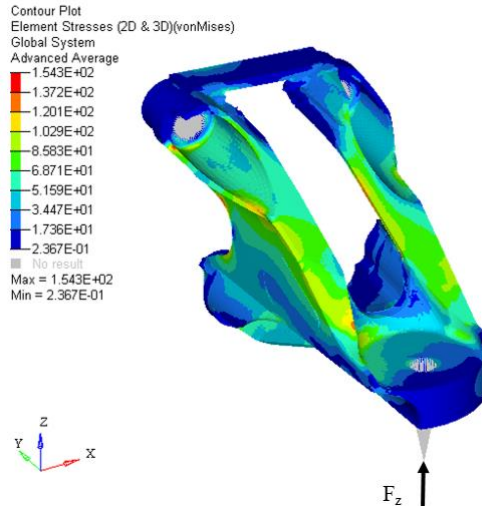
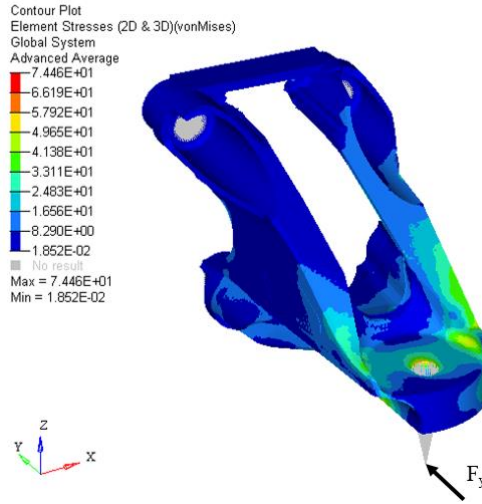
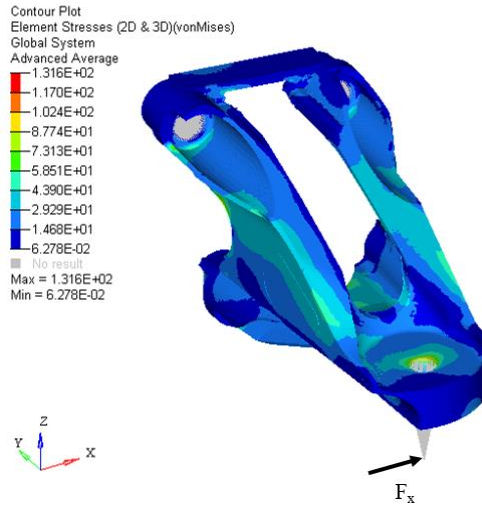
Şekil 4. İlk tasarım için a)  $F_x$ , b)  $F_y$  ve c)  $F_z$  yüklemeleri altında Von Mises gerilim dağılımı [MPa].



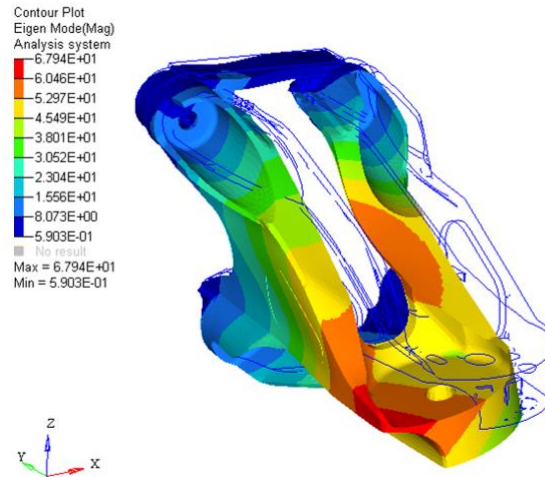
Şekil 5. İlk tasarım için birinci serbest salınım şekili.



Şekil 6. Topoloji eniyileme çalışması sonucu elde edilen yük taşıyan sonlu elemanların yoğunluk dağılımı.



Şekil 7. Topoloji eniyilemesi sonucuna göre yapılan tasarım için a)  $F_x$ , b)  $F_y$  ve c)  $F_z$  yüklemeleri altında Von Mises gerilim dağılımı [MPa].



**Şekil 8.** Topoloji eniyilemesi sonucuna göre yapılan tasarım için birinci serbest salınım şekili.

Çizelge 3'te ilk tasarım ve eniyileme çalışması sonucu elde edilen tasarım için 3 yöndeki yükleme sonucu oluşan en fazla Von Mises gerilmesi, birinci serbest salınım frekansı ve parça ağırlıkları karşılaştırması gösterilmiştir. İlk tasarımda en yüksek Von Mises gerilme değeri 151 MPa ile  $F_z$  yüklemesinde gerçekleşirken eniyilenmiş tasarımda bu değer yüzde 2.0 artışla 154 MPa olmuştur. Çizelge 2'de verildiği üzere motor takoz braket malzemesi LM25-TF alaşımı için toleranslar dahilindeki enaz kopma mukavemeti 230 MPa olarak verilmiştir. Eniyilenmiş tasarım için, malzeme kopma mukavemetine göre  $F_z$  yüklemesinin güvenlik katsayısı 1.49 olması kabul edilebilir bir değerdir. Gerektiğinde kiritik bölgede yapılacak az miktarda ağırlık artışı ile sağlanabilecek iyileştirmeler sayesinde ilk tasarımdaki gerilme seviyesine de kolaylıkla erişilebilir.  $F_x$  yüklemesi için eniyilenmiş tasarımdaki en yüksek Von Mises gerilme değeri yüzde 29.4 yükselerek 132 MPa seviyesine ulaşmıştır. Ancak  $F_z$  yüklemesine göre daha düşük bir gerilme değeri olduğundan dolayı  $F_x$  yüklemesi için de motor takozu braket parçasının güvenli olduğu kabul edilebilir. Üç yöndeki yüklemeler arasında  $F_y$  yüklemesi en düşük gerilme seviyesine yol açan yükleme olmuştur. Eniyilenmiş tasarımda sonuçlar daha da iyileşerek en yüksek Von Mises gerilme seviyesi 74 MPa olarak hesaplanmıştır.

Dört silindri, dört zamanlı ve maksimum 6000 devir/dakika dönme hızına sahip bir dizel motor için silindir içi patlamaların saniyede 200 defa (200 Hz) olacağı hesaplanabilir. İçten yanmalı motorlardaki krank biyel mekanizması ve pistonun aşağı-yukarı doğrultudaki hareketinden dolayı atalet kuvvetleri oluşmaktadır. Dört silindri tek sıra dizimli bir motorda motor dönme hızının ikili katlarındaki frekanslarda harmonik büyüklüğü en yüksek olacak şekilde ve frekans yükseldikçe şiddeti gittikçe azalan atalet kuvvetleri etki edecektir [15]. En yüksek 6000 devir/dakika krank mili dönüş hızına sahip bir motorda saniyede 100 defa (100 Hz) piston aşağı-yukarı hareket edecektir. Motor takozu braketinin eniyilenmiş tasarımı için hesaplanan birinci serbest salınım frekansının patlama yükleri frekansından dört kattan daha fazla, atalet yükleri frekansından da 9 kattan daha fazla olması motor takoz braketinin rezonansa girmesinden kaçınılması ve iletildiği titreşimin düşük olması açısından yeterlidir. Çizelge 3'ün en son satırında motor takozu braket tasarımı için ağırlık karşılaştırması yapılmıştır. Topoloji en iyilemesi ile elde edilen tasarımın ağırlığı ilk tasarıma göre yüzde 22.6 azalmıştır.

**Çizelge 3.** İlk tasarım ve eniyilenmiş tasarım sonuçlarının karşılaştırması.

	İlk tasarım	Eniyilenmiş tasarım	Yüzde fark
En yüksek Von Mises gerilmesi (MPa)	$F_x$ 102	132	29.4
	$F_y$ 78	74	-5.1
	$F_z$ 151	154	2.0
Birinci serbest salınım frekansı (Hz)	1320	1130	-14.4
Ağırlık (gram)	1260	975	-22.6

#### 4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile topoloji eniyilemesi için yeni bir yaklaşım denenmiş ve içten yanmalı motor takozu braketini için başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak çoklu yöndeki yüklemeler için gerilme seviyesini enazlayacak amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Eniyileme sırasında titreşim cevabını sınırlayacak ve üretime uygun tasarım elde edilmesini sağlayacak kısıtlar kullanılması sonucunda yüzde 22.6 oranında malzeme tasarrufu sağlanmıştır. Motor takoz braketini tasarımının daha önceden de seri üretim araçlarda kullanılan olgun bir tasarım olduğu düşünülürse ilk tasarım iyileştirme denemesinde tasarım kriterlerini sağlayacak şekilde yüzde 22.6 ağırlık azaltılmasına ulaşılmış oldukça iyi bir sonuçtur. Eniyileme sırasında döküm tekniğine uygun geometri elde edebilmek için kullanılan kısıtların da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada sunulan yöntem ile benzer yükleme ve kısıtlara maruz kalan birçok döküm braket için tasarım eniyileme çalışması etkin bir şekilde yapılabilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Olsson M., Törmänen M., Sauvage S., Hansen C., Systematic Multi-Disciplinary Optimization of Engine Mounts, *SAE Technical Paper* 2011-01-1674.
- [2] Su H., Young Hua Y., CAE Virtual Design Validation Tests of Automotive Engine Mount Systems, *SAE Technical Paper* 2009-01-0404.
- [3] Bendsoe M., *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*, Berlin: Springer-Verlag, ISBN 978-3-662-03117-9, 1995.
- [4] Bendsoe M. ve Sigmund O., *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*, Berlin: Springer-Verlag, ISBN 3-540-42992-1, 2003.
- [5] Christensen P.W., Klarbring A., *An Introduction to Structural Optimization*, Springer Science + Business Media B.V., Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8665-6, 2009.
- [6] Harzheim L., Graf G., A review of optimization of cast parts using topology optimization Part I - Topology optimization without manufacturing constraints, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cit 30, 2005, s. 491–497.
- [7] Harzheim L., Graf G., A review of optimization of cast parts using topology optimization Part II - Topology optimization with manufacturing constraints, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cit 31, 2006, s. 388–399.

- 
- [8] Li C., Kim I.Y., Jeswiet J., Conceptual and detailed design of an automotive engine cradle by using topology, shape, and size optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cit 51, 2015, s. 547–564.
- [9] Tsai T.D., Cheng C.C., Structural design for desired eigenfrequencies and mode shapes using topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cit 47, 2013, s. 673–686.
- [10] Ozturk U.E., Efficient method for fatigue based shape optimization of the oil sump carrying a differential case in four wheel drive vehicles, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Cit 44, 2011, s. 823–830.
- [11] Leal V., Cardoso V.M., Vieira L.Z., Carneiro G.C., Bitencourt R., Shape and Topologic Optimization Of Engine Mounts, *SAE Technical Paper Series 2006-01-2665*.
- [12] Pan X.Y., Zonni D., Chai G.Z., Zhao Y.Q., Jiang C.C., Structural Optimization for Engine Mount Bracket, *SAE Technical Paper Series 2007-01-2419*.
- [13] Hadleigh Castings, *LM25 Aluminium Casting Alloy Mechanical Properties*, Erişim tarihi: 5 Ekim 2016, <http://www.hadleighcastings.com/>.
- [14] *Altair Optistruct sürüm 12 teori kılavuzu*, 2014.
- [15] Hoag K.L., *Vehicular Engine Design*, Wien: Springer-Verlag, ISBN 978-3211211304, 2006.