

Yaratıcı Endüstrilerde Endüstriyel Tasarım Mühendisliğinin Metodolojik Entegrasyonu
Methodological Integration of Industrial Design Engineering in Creative Industries

Fatma Nazlı Özsolak^a, Yunus Canbek^a

a Erciyes Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Kayseri, Türkiye

Öz

Bu çalışma, yaratıcı endüstrilerde inovasyonu hızlandırmak amacıyla Endüstriyel Tasarım Mühendisliği yaklaşımının, yapay zekâ tabanlı üretken (generative) tasarım teknolojisiyle entegrasyonunu motosiklet fren kaliperi braketi (Brackv2 v4) üzerinden incelemektedir. Mevcut manuel olarak tasarlanmış braket, Alüminyum 6061-T6 malzemesi için Autodesk Fusion 360 ortamında statik sonlu elemanlar analizi (FEA) ile değerlendirilmiştir. Uç frenleme senaryosunu temsil eden 2500 N'luk yük altında elde edilen bulgular, minimum güvenlik katsayısının (SF) 15,665, maksimum von Mises gerilmesinin 17,555 MPa (akma sınırının yaklaşık %6,4'ü) ve maksimum toplam yer değiştirmenin 0,022 mm olduğunu göstermektedir. Bu nicel sonuçlar, mevcut tasarımın aşırı güvenlik marjı barındırdığını ve üretken tasarım sürecinde kütle azaltımı için belirgin bir tasarım uzayı sunduğunu ortaya koymaktadır. CNC işleme, döküm ve 3B baskı olmak üzere üç farklı üretim yöntemi için üretken tasarım iş akışı ve kısıt setleri tanımlanmıştır. Üç üretim yöntemi için üretken tasarım çıktılarının elde edilmesi, üretilen geometrilerin nicel karşılaştırması ve fiziksel prototip üretimi ileri çalışmanın kapsamı olarak konumlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel tasarım Mühendisliği, Motosiklet fren kaliperi braketi, Üretken tasarım, CNC işleme, Döküm, 3B baskı, Hızlı prototipleme, 3B modelleme, Yapay zekâ, Yaratıcı endüstriler

Abstract

This study examines how an Industrial Design Engineering approach can be integrated with AI-based generative design technology, using a motorcycle brake caliper bracket (Brackv2 v4) as a focused application. The existing manually designed bracket, made of Aluminium 6061-T6, was evaluated using static finite element analysis (FEA) in Autodesk Fusion 360. Under a single-load braking scenario of 2,500 N representing an extreme deceleration case, the minimum safety factor (SF) was found to be 15.665, the maximum von Mises stress 17.555 MPa (approximately 6.4% of the yield strength), and the maximum total displacement 0.022 mm. These quantitative results indicate that the existing design carries an excessive safety margin, providing a clear design space for mass reduction through generative design. Generative design workflows and manufacturing-

Citation Information /Atıf bilgisi:

Özsolak FN, Canbek Y. (2026) Yaratıcı Endüstrilerde Endüstriyel Tasarım Mühendisliğinin Metodolojik Entegrasyonu Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 11(2): 130-147, (2026). DOI: 10.46578/humder.1915831 Geliş Tarihi/Received: 25.03.2026 Kabul Tarihi/Accepted: 29.06.2026

Sorumlu yazar: Fatma Nazlı ÖZSOLAK e-posta: fnsari@erciyes.edu.tr



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
 Bu eser Creative Commons Atıf- 4.0 (CC BY 4.0) Uluslararası Lisansı ile Lisanslanmıştır.

specific constraint sets for CNC machining, casting, and 3D printing are defined. The generation of optimised geometries for the three manufacturing methods, their quantitative comparison and the physical prototyping are framed as the scope of future work.

Keywords: Industrial design engineering, Motorcycle brake caliper bracket, Generative design, CNC machining, Casting, 3D printing, Rapid prototyping, 3D modeling, Artificial intelligence, Creative industries

1. GİRİŞ

Bu çalışma, motosiklet fren kaliper braketini endüstriyel tasarım mühendisliği perspektifinden ele almakta ve mevcut geometriyi statik frenleme yükü altında sonlu elemanlar analizi ile değerlendirerek üretken tasarım için uygun bir başlangıç modeli olup olmadığını incelemektedir.

1.1 Endüstriyel Tasarım Mühendisliği ve Yaratıcı Endüstriler

Endüstriyel tasarım mühendisliği, geleneksel mühendisliğin analitik titizliğini, tasarımın yenilikçi ve kullanıcı merkezli metodolojileriyle bütünleştiren disiplinler arası bir yaklaşımı temsil eder. Bu bütünleştirici yaklaşım, yaratıcı endüstrilerin yalnızca teknik olarak verimli değil, aynı zamanda estetik açıdan etkileyici ve duygusal olarak ilgi çekici ürünler talep ettiği modern ortamda vazgeçilmez hale gelmiştir. Şekil 1'de endüstriyel tasarım örnekleri gösterilmektedir. Şekil 1-a ile gösterilen tasarım mühendislik açısından mükemmeldir. Fakat görsel olarak incelendiğinde estetik özellikleri daha zayıftır. Şekil 1 -b ve Şekil 1-c her iki açıdan da iyi performans göstermektedir [1, 2].



Şekil 1. Endüstriyel tasarım örnekleri [1, 2].

Mühendislik disiplinleri teknik performans, güvenilirlik ve maliyet verimliliğine odaklanmaktadır, tasarım disiplinleri ise estetik, kullanıcı deneyimi ve maliyet verimliliğine odaklanmaktadır. Çok disiplinli bir yaklaşım olan endüstriyel tasarım mühendisliği ise bu iki yaklaşımın önceliklerini birleştirerek ürünlerin kompleks işlevsel gereksinimlerini karşılarken aynı zamanda estetik ve kullanıcı deneyimi gereksinimlerini de karşılayabilmektedir.

Bu çalışmada kullanılacak bilgisayar destekli tasarım (CAD), yapay zekâ tabanlı üretken tasarım ve hızlı prototipleme teknolojilerindeki gelişmeler bu iki yaklaşımın gelişimini hızlandırmaktadır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD), yapay zekâ tabanlı üretken tasarım ve hızlı prototipleme gibi araçlar çok disiplinli yaklaşımın tasarımlar üzerinde uygulanmasını oldukça verimli hale getirmektedir. Örneğin üretken tasarım teknikleri işlevselliği, üretilebilirliği ve estetiği optimize ederek birden fazla tasarım alternatifi üretir ve böylelikle tüketici beklentilerinin sürekli değiştiği yaratıcı sektörlerdeki ihtiyacı karşılamamızı kolaylaştırmaktadırlar [3].

TU Delft Endüstriyel Tasarım Mühendisliği programı, teknik analiz, prototipleme ve kullanıcı odaklı tasarım süreçlerini birlikte ele alan disiplinler arası bir eğitim yaklaşımı sunmaktadır. Ayrıca, TU Delft'in Endüstriyel Tasarım Mühendisliği (IDE) programı, Avrupa yaratıcı endüstrileri için inovasyon politikasını şekillendirmeyi amaçlayan bir ortak yaratım projesi başlatmıştır. Delft Teknik Üniversitesi gibi kurumlar bu bütünleştirici yaklaşımın öncüleri olmanın yanı sıra TU Delft'in yakın zamanda başlattığı bir girişim bu birleştirici yaklaşımın çarpıcı bir örneğidir. Haziran 2023'te TU Delft'in Endüstriyel Tasarım Mühendisliği (IDE) programı, Avrupa yaratıcı endüstrileri için inovasyon politikasını şekillendirmeyi amaçlayan bir ortak yaratım projesi başlattı. Bu girişim Avrupa'da dinamik, sürdürülebilir ve rekabetçi bir yaratıcı endüstriyi destekleyen politikaları geliştirmek için endüstri uzmanlarını, politikacıları ve akademik araştırmacıları bir araya getirmektedir. Bu girişim gerçek dünya politika ihtiyaçlarıyla TU Delft'in akademik inovasyonu arasındaki boşluğu kapatmayı amaçlamaktadır. Programın disiplinler arası güçlü yönlerin pekiştirmekle beraber akademik kurumların yaratıcı endüstrilere daha geniş sosyo ekonomik dönüşüme nasıl katkı sağlayacağını da ortaya koymaktadır.

Yaratıcı endüstrilerin günümüzdeki sürekli değişken talepleri ürün geliştirmede bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir. Bu gereksinimler ürünün konsept tasarımından pazara sunulmasına kadar teknik, estetik ve sürdürülebilirlik konularını birlikte ele alınmasıdır. Endüstriyel tasarım mühendisliği farklı disiplinleri bir araya getirerek verimli, güvenilir ve kullanıcı odaklı tasarımların ortaya koyulmasını mümkün kılmaktadır. Teknolojik dönüşüm tasarım uygulamalarını şekillendirmeye devam ederken, endüstriyel tasarım mühendisliği gibi çok disiplinli yaklaşımlar yeni inovasyon yollarının kilidini açmak için elzemdir.

Sonuç olarak, endüstriyel tasarım mühendisliği teknik performans ile kullanıcı odaklı tasarım ölçütlerini birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu yaklaşımı motosiklet fren kaliper braketini örneğinde üretken tasarım ve sonlu elemanlar analizi bağlamında tartışmaktadır.

1.2 Üretken Tasarım ve Yapay Zekâ

Endüstriyel tasarım mühendisliği yaratıcı endüstrilerin değişen taleplerini karşılamak için gelişmiş tasarım yöntemlerinden faydalanmaktadır. Özellikle üretken yapay zekâ tasarımcıların ve mühendislerin şekil işlev ve sürdürülebilirliğini entegre eden yenilikçi çözümleri daha hızlı uygulayabilmelerini sağlamaktadır.

1.2.1 Endüstriyel Tasarım Mühendisliğinde Üretken Yapay Zekâ

Üretken yapay zekâ önceden belirlenmiş fiziksel ve yapısal kısıtlamalara dayanarak kullandığı algoritmalarla birden fazla tasarım alternatifi oluşturur. Bu yöntem binlerce potansiyel konfigürasyonu hesaplama gücüyle aynı anda değerlendirebilmesi sayesinde manuel tasarım yenilemelerinden farklıdır. Örneğin Autodesk Fusion 360 Generative Design aracı kullanıcıdan aldığı malzeme, fiziksel kısıtları, yükleri, üretim yöntemlerini ve maliyeti girdi olarak alarak optimize edilmiş tasarım alternatifleri oluşturmaktadır. Bu süreç hem yaratıcılığı artırmaktadır hem de ürün geliştirme süreçlerini hızlandırmaktadır [4]. Bu çalışmada üretken tasarım, yükler, sınır koşulları ve üretim kısıtları altında alternatif geometrilerin algoritmik olarak oluşturulmasını ifade etmektedir; yapay zekâ ise bu süreci destekleyebilecek veri odaklı yöntemler için ayrı bir kavram olarak kullanılmaktadır. Topoloji optimizasyonunda makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin kullanımına ilişkin sistematik derlemeler de literatürde yer almaktadır [5, 6].

Kack Rod'un yarış otomobil şasi tasarımı üretken tasarım yaklaşımının pratik uygulamalarının en çarpıcı örneklerindedir. Bu projede şasinin yapısal bütünlüğü üretilebilirliği üretken tasarım teknikleriyle optimize edilerek oluşturulmuştur. Çalışma geleneksel tasarım sınırlamaların üstesinden gelişmiş hesaplama yöntemleriyle nasıl gelineceğini ortaya koyarak yüksek performanslı otomotiv mühendisliğinde yenilikçi çözümlerin gücünü ortaya koymuştur [7]. Bu örnek şasi tasarımları Şekil 2'de gösterilmektedir [8, 9]. Benzer biçimde yarış araçlarında bell-crank ve süspansiyon dik bileşenleri için topoloji optimizasyonu uygulamaları sırasıyla %22 ve %60'a varan ağırlık azaltımı sağlamıştır [10, 11].



Şekil 2. Üretken tasarım (a) ve geleneksel yöntemlerle (b) tasarlanmış şasi örnekleri [8, 9].

Kolarevic B.'nin çalışması "Dijital Çağda Mimari: Tasarım ve Üretim", dijital araçların karmaşık şekilleri ve uyarlanabilir sistem prensiplerini kolaylaştırarak tasarım metodolojilerinde yarattığı devrimi ve bu prensiplerin endüstriyel tasarım mühendisliğinde de nasıl uygulanabileceğini ele almaktadır. Çalışması ürün geliştirme süreçlerindeki üretken tasarım uygulama potansiyelini ortaya koymaktadır [12]. Mühendislik tasarımında derin üretici modeller, tasarım alanının daha geniş biçimde araştırılmasına, alternatif çözümlerin hızlı şekilde üretilmesine ve tasarım sürecinin daha verimli hâle getirilmesine önemli katkılar sunmaktadır [4]. Volkswagen Microbus tasarımının özgün ve yeniden yorumlanan örnekleri sırasıyla Şekil 3 [13] ve Şekil 4'te [14] gösterilmektedir. Bu yeniden yorumlama, geleneksel tasarım anlayışı ile üretken yapay zekâ kullanımının farkını çarpıcı biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca, Şekil 5'te [15] görülen üretken tasarım ile geliştirilmiş motosiklet salıncak kolu tasarımları, geleneksel yöntemlerle geliştirilen tasarımlarla karşılaştırıldığında, üretken tasarımın sunduğu yenilikçi yaklaşımı açıkça göstermektedir. Motosiklet salıncak kolu gibi hafiflik ve dayanım gerektiren parçalarda, Alüminyum 6061-T6 alaşımı sunduğu uygun mekanik özellikler nedeniyle tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır [16].



Şekil 3. Orijinal Volkswagen Microbus tasarımı [13].



Şekil 4. Volkswagen grubunun yeniden tasarladığı 1962 Microbus [14].



Şekil 5. Üretken tasarım ile geliştirilen motosiklet salıncak kolu tasarımı [15].

1.2.2 Yapay Zekânın Rolü

Yapay zekâ sistemleri geniş veri kümelerini kullanarak tasarım çözümlerini tekrarlı olarak iyileştirip üretken tasarıma destek olmaktadır. Makine Öğrenimi gibi yapay zekâ teknikleri var olan tasarım verilerini ve performans sonuçlarını kıyaslayarak bir öngörü oluşturup üretken süreci yönlendirmektedir. Bu çalışmada tasarım süreci Autodesk Fusion 360 ortamında yürütülmüş, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve yük tanımları girilerek alternatif geometri üretimine temel oluşturacak analiz verileri elde edilmiştir.

1.2.3 Yaratıcı Endüstriler Üzerindeki Etki

Yaratıcı endüstrilerde ürün geliştirme süreci, yapısal performans, üretilebilirlik, ergonomi, görsel bütünlük ve kullanıcı deneyimi gibi çoklu ölçütlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Üretken tasarım ve yapay zekâ hızlı prototipleme araçlarıyla birlikte şirketlerin ürünlerini değişen pazar trendlerine ve tüketici taleplerine göre yeniden tasarlamasını kolaylaştırmaktadır. Bu teknolojiler teknik performansı estetik kaliteyle birleştirerek çok disiplinli ekiplerin iş birliği içinde çalışmasını kolaylaştırmaktadır.

Delft Teknoloji Üniversitesi (TU Delft) gibi kurumlar, bu yaklaşımları müfredatlarına entegre etmekte öncüdürler. TU

Delft'in Endüstriyel Tasarım Mühendisliği programı, hem gelişmiş hesaplama araçlarıyla hem de yaratıcı problem çözme stratejilerini hakim tasarımcılar yetiştirmek için akademik araştırma ve pratik eğitimin nasıl bir araya geleceğinin en çarpıcı örneklerindedir. Kurum endüstriyel tasarım mühendisliğinin yaratıcı endüstriler üzerindeki kritik rolünün önemini ortaya koymaktadır. Haziran 2023'te başlatılan ortak yaratım projesi bu yaklaşımın güncel örneklerinden biridir.

1.2.4 Gelecek Yönelimler ve Zorluklar

Üretken tasarımın ve yapay zekânın endüstriyel tasarım mühendisliğine entegrasyonu büyük potansiyeline rağmen bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek disiplinler arası araştırmanın devam etmesini ve bu süreçlerin nasıl kullanılması gerektiğini standartlaştırmasını gerektirmektedir ve en büyük zorlukta tam olarak şu anda standartların tam olarak belirlenmemiş olması ve bu standardı bugünkü mühendislerin ve tasarımcıların belirlemek zorunda kalmasıdır.

Dijital teknolojiler geliştikçe akademi ve endüstri arasındaki devam eden iş birliği bu yöntemleri geliştirmek ve uygulanabilir hale getirmek noktasında hayati önem taşıyacaktır. Endüstriyel tasarım mühendisliğinin geleceği bu teknolojileri endüstriye entegre ederek yenilikçi sürdürülebilir ve kullanıcı odaklı çözümler üretme yeteneğindedir.

1.3 Tasarım Sürecinde Hızlı Prototipleme ve 3B Modelleme

Hızlı prototipleme ve 3B modelleme mühendisliği ve yaratıcı endüstrileri de tasarım sürecini temelden dönüştürmüştür. Bu teknolojiler tasarımcıların dijital ortamda oluşturdukları fikirleri fiziksel olarak hızlıca oluşturmalarına olanak sağlamakta ve böylelikle hem prototipleme maliyetleri düşmekte hem de tasarım süreçleri hızlanmaktadır [17]. Bu çalışmada CAD modeli ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen bulgular, bir sonraki aşamada üretilecek fiziksel prototiplerin doğrulanması için temel mühendislik verisini oluşturmaktadır.

Bu dönüşüm ürününü görsel olarak incelemenin ötesinde prototiplerin işlevselliğini ve ergonomi işini doğrulamakta kritik bir rol oynamaktadır. Tasarımcılar üretim için seçilen malzemelere benzer malzemeler ile prototipler üreterek gerçekçi koşullar altında performansı işlevi ve kullanılabilirliği değerlendirebilmektedir. 3B tasarım ve hızlı prototipleme tasarım performansını optimize eden iterasyon sürecini kolaylaştırarak ürünü pazara sunma sürecini ve maliyetini dikkate değer ölçüde azaltmaktadır [18].

Akademik kurumlar bu yöntemleri müfredatlarına entegre etmektedir. Hızlı prototipleme araçları yalnızca prototipleme için değil aynı zamanda geleneksel üretim yöntemlerini üretmekte zorlandığı karmaşık geometrileri üretilmesine olanak sağlamaktadır [19]. Bu teknolojilerin tasarım süreçlerini hızlandırma ve maliyet verimliliğine katkısı eklemeli imalat literatüründe vurgulanmaktadır [17, 19]. Motosiklet ve otomotiv bileşenlerinde eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu uygulamalarının güncel örnekleri arasında motosiklet salıncak kolu [16], elektrikli motosiklet salıncığı [20], otomotiv knuckle parçaları [21], FSAE direksiyon mafsalı [22] ve motosiklet şasi çok malzemeli optimizasyonu [23] yer almaktadır.

Özetle hızlı prototipleme ve 3B tasarım dijital ortamda oluşturulan fikirleri fiziksel dünyaya kusursuz bir şekilde aktarma becerisiyle tasarım süreçlerinde bir devrim yaratmıştır. Bu sinerji ürün geliştirmeyi hızlandırmakta beraber hassasiyetleri artırmaktadır aynı zamanda günümüzdeki rekabetçi ve sürekli değişen beklentileri olan yaratıcı endüstrilerinde kritik bir avantaj sağlamaktadır.

1.4 Çok Disiplinli Yaklaşımların Entegrasyonu

Disiplinler arası yaklaşımda özellikle yaratıcı endüstrilerin giderek artan teknik beklentileri estetik beklentilerindeki değişikliği ve pazarındaki ihtiyaçların sürekli değişmesine cevap vermektedir ve endüstriyel tasarım mühendisliği bu ihtiyacı karşılayabilecek önemli disiplinlerden biridir. Mühendisler, tasarımcılar, iş stratejileri ve sürdürülebilirlik uzmanları arasındaki iş birliği ekiplerin tek başına çözemeyeceği karmaşık tasarım zorluklarının üstesinden gelebilmektedirler. Bu

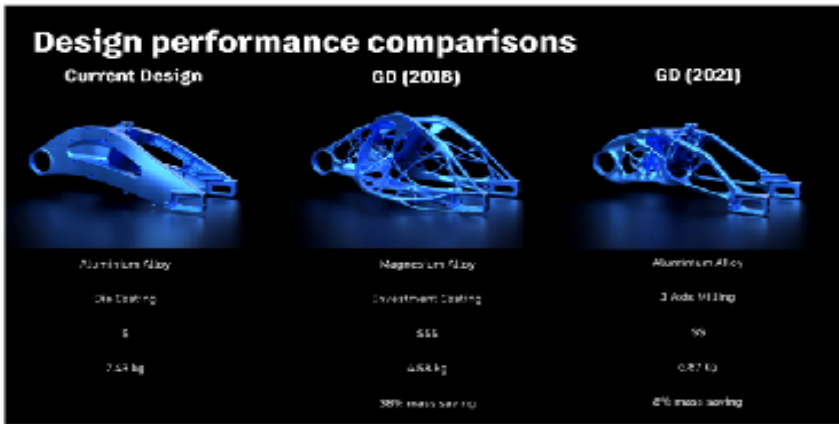
yaklaşım yalnızca problem çözme konusunda güçlü olmakla kalmaz aynı zamanda ürünle işlevsel olarak ve üretilebilir olarak tasarlanabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmadaki çok disiplinli yaklaşım, mühendislik analizlerinin, üretim kısıtlarının ve biçimsel tasarım kararlarının aynı parça üzerinde birlikte değerlendirilmesi şeklinde somutlaşmaktadır.

Hızlı değişen talepler ve yüksek tüketici beklentilerinin olduğu yaratıcı endüstrilerde çok disiplinli çalışma kritik bir rekabet avantajıdır. Bu entegre yaklaşım ürünlerin teknik ve estetik değerleri olan hem de kullanıcı deneyimi yüksek kalitede olan ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak disiplinler arası fikir alışverişi yaratıcı süreçleri güçlendirir ve günümüz pazarının karmaşık taleplerini karşılayacak çalışmaları mümkün kılar.

1.5 Motosiklet Fren Kaliper Braketlerine Uygulama

Motosiklet fren kaliper braketleri fren sistemlerinin ihtiyacı olan güvenlik ve verimliliği sağlamak için olan mukavemet, hafiflik, tasarım uyumu ve termal yönetim özelliklerinin hassas bir dengesini gerektiren kritik parçalardır. Üretken tasarım metodları kullanan bir endüstriyel tasarım mühendisliği yaklaşımı bu bileşenlerin optimizasyonu için büyük potansiyel sağlayan bir yaklaşımdır. Literatürde üretken tasarım uygulamaları otomotiv bileşenlerinde yaygın olmakla birlikte, motosiklet fren kaliper braketleri üzerine odaklanan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, Alüminyum 6061-T6 malzemeli bir braketin statik frenleme yükü altındaki davranışını inceleyerek bu boşluğa katkı sunmayı amaçlamaktadır. Otomotiv sektöründeki benzer çalışmalar bu yöntemin potansiyeline dair bilgiler sağlamaktadır.

Üretken tasarım önceden belirlenmiş performans kriterlerine ve şekil kısıtlamasına dayanarak birçok yinelenmeli konfigürasyon üretim ve sonuçlarına bakarak geniş bir tasarım yelpazesi ortaya koymak için algoritmik süreçler kullanılmaktadır. Fren kaliper braketleri bu metodolojiyi kullanılarak mukavemet görsellik ve üretim metodlarından ödün vermeden ağırlığı azaltılmış ve optimize edilmiş olarak tasarlanabilirler. Autodesk'in üretken tasarım platformu performansı iyileştirilmiş ve yüksek malzeme verimliliğine sahip bileşenler üretmek için otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [7]. Bu çalışmalar gelişmiş hesaplama araçlarını geleneksel tasarım süreçleriyle oluşturulacak yenilikçi tasarım çözümlerini nasıl ortaya koyduğunu göstermektedir. Üç farklı üretim yöntemi için elde edilen tasarım alternatifleri Şekil 6'da [24] sunulmaktadır.



Şekil 6. Üretken tasarım metodları kullanılarak üç farklı üretim metodu için oluşturulmuş tasarımlar [24].

Endüstriyel tasarım mühendisliğinde üretken tasarım araçları geleneksel analiz yöntemleriyle entegre edilerek hızlı yenileme ve iyileştirme olanağı sağlar. Simülasyon ve fiziksel testler üretken tasarımla oluşturulmuş tasarımların performansını doğrularak nihai ürünün güvenlik standartlarını karşılamasını sağlar bu da yüksek performans ve güvenliğin son derece önemli olduğu endüstrilerde çok kritiktir.

Motosiklet fren kaliper braketlerinin tasarlanmasında üretken tasarım uygulaması tasarımcılara bileşenin yapısal dayanıklılığını optimize etmiş ve alışılmadık şekillerden oluşan öneriler sunabilir. Üretken tasarım kullanılarak motosiklet

fren kaliper braketleri üzerine yapılan özel akademik çalışmalar yeni ortaya çıkmakta olsa da otomotiv sektöründeki geçmiş uygulamalar ve başarıları bu yöntemin bileşen performansını ve üretim verimliliğini önemli ölçüde arttırabileceğinin güçlü bir kanıtıdır.

1.6 Bu Çalışmanın Katkıları

Mevcut literatürde üretken tasarımın otomotiv ve motosiklet bileşenlerine uygulandığı çalışmalar büyük ölçüde tek bir üretim yöntemini (tipik olarak eklemeli imalatı) ele almaktadır [25, 26]. Briard vd. [7] üretken tasarımın eklemeli imalat odaklı bir metodolojiyle (G-DfAM) otomotivde nasıl uygulanacağına dair bir çerçeve önermiştir. Bu çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- (i) Motosiklet fren kaliper braketinin (Brackv2 v4) mevcut manuel tasarımı, Autodesk Fusion 360 sonlu elemanlar analizi (FEA) ortamında uç bir frenleme senaryosu altında değerlendirilmiş ve üretken tasarım için bir başlangıç temeli oluşturulmuştur.
- (ii) Elde edilen yüksek güvenlik katsayısı ($SF \approx 15,6$) ve düşük gerilme oranı (akma sınırının yalnızca %6,4'ü), aşırı tasarımın (overdesign) sayısal bir göstergesi olarak yorumlanmış ve bu fazlalığın üretken tasarım sürecinde kütle azaltımı için tasarım uzayı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.
- (iii) CNC işleme, döküm ve üç boyutlu (3B) baskı olmak üzere üç farklı üretim yöntemi için ayrı tasarım kısıtları çerçevesinde üretken tasarım iş akışı tanımlanmış; her yöntemin geometrik ve üretilebilirlik kısıtlarının tasarım çıktısını nasıl şekillendirdiği tartışılmıştır.
- (iv) Endüstriyel tasarım mühendisliği perspektifinin üretken yapay zekâ ile yaratıcı endüstriler bağlamında entegrasyonu vurgulanmış; sadece teknik optimizasyon değil, estetik ve üretilebilirlik kriterlerinin birlikte ele alınabildiği bir çerçeve önerilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan malzeme, ana alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan ve çökeltme ile sertleştirilmiş bir alüminyum alaşımı olan Alüminyum 6061-T6'dir. Bu malzeme, yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet ağırlık oranı ile yüksek performanslı bileşenler için endüstride standart olarak kullanılmaktadır. T6 temperli, alaşımın bu seri için mümkün olan en yüksek akma dayanımına ulaşmak üzere ısıtılma tabii tutulduğunu ve yapay olarak yaşlandırıldığını göstermektedir [16, 27]. Aynı alüminyum alaşımlarının eklemeli imalat destekli kum dökümü ile otomotiv prototipi üretimine yönelik çalışmalar da literatürde rapor edilmiştir [28]. Simülasyon için kullanılan malzemenin mekanik ve termal özellikleri aşağıdadır.

Özellik	Sembol	Değer
Yoğunluk	ρ	$2.700 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modülü	E	68,900.00 MPa
Poisson Oranı	ν	0.33
Akma Dayanımı	σ_y	275.00 MPa
Nihai Çekme Dayanımı	σ_{uts}	310.00 MPa
Termal İletkenlik	k	0.167 W/(mm·C)
Özgül Isı	c_p	897.00 J/(kg·C)
Isıl Genleşme Katsayısı	α	$2.360 \times 10^{-5} /C$

Elastikiyet (E) modülündeki değişimin sınırlı olması nedeniyle, bu çalışmada rijitlik artışı açısından en etkili yaklaşımın geometrik optimizasyon olduğu değerlendirilmiştir.

2.2 Yöntem

2.2.1 Tasarım Problemi ve Amaç Fonksiyonu

Üretken tasarım uygulamalarında amaç fonksiyonu tipik olarak kütle minimizasyonu veya katılık (stiffness) maksimizasyonu olarak tanımlanmaktadır [3, 29]. Eklemeli imalat odaklı tasarımda ise parça konsolidasyonu yaklaşımı da kütle azaltımının bir başka biçimi olarak önerilmektedir [30]. Topoloji optimizasyonu literatüründe ise tipik formülasyon, verilen bir hacim kısıtı altında uyum (compliance) fonksiyonunun minimizasyonudur [6, 31]. Bu çalışmada motosiklet fren kaliper braketini için hedeflenen amaç, güvenlik şartlarını sağlayacak minimum kütlede geometri elde etmektir; nihai amaç fonksiyonu parametre kümesi ileri çalışmada raporlanacaktır. Bu hedef, mevcut tasarımın aşırı tasarım göstergesi olan yüksek güvenlik katsayısının ($SF \approx 15,6$) makul bir mühendislik aralığına ($SF \approx 2-3$) çekilmesi ile uyumludur [32].

2.2.2 Kısıtlar (Constraints)

Üretken tasarım problemi üç ana kısıt grubu altında tanımlanmıştır. Yapısal kısıtlar: maksimum von Mises gerilmesi, Alüminyum 6061-T6 akma dayanımının ($\sigma_y = 275$ MPa) altında kalacak şekilde, hedef güvenlik katsayısı (literatürde otomotiv pratiği için tipik olarak $SF \geq 2-3$ aralığı önerilmektedir [32]; nihai hedef değer ileri çalışmada raporlanacaktır) kullanılmıştır. Sınır koşulları: braketin motosikletin ön çatalına takıldığı montaj delikleri sabit kısıtlama ($U_x = U_y = U_z = 0$) ile tanımlanmıştır (bkz. Şekil 8). Yükleme: aşırı (uç) frenleme senaryosunu temsil eden 2500 N'luk tek noktasal kuvvet ($F_x = 1593,56$ N, $F_y = 0$ N, $F_z = 1926,283$ N) kaliper temas yüzeyine uygulanmıştır. Üretilirlik kısıtları üç farklı üretim yöntemi için ayrıştırılmıştır: (a) CNC işleme için minimum kesici yarıçapı ve çekme yönü kısıtları [19]; (b) döküm için çıkarma açısı ve minimum/maksimum et kalınlığı kısıtları; (c) eklemeli imalat (3B baskı) için en az destek yapısı ile üretilirlik kısıtları [33, 19]. Mevcut bir bileşenin eklemeli imalat için yeniden tasarlanmasına yönelik metodolojiler de literatürde tanımlanmıştır [34].

2.2.3 Tasarım Uzayı (Design Space)

Tasarım uzayı, mevcut braket geometrisini kapsayacak şekilde, montaj deliklerinin ve kaliper bağlantı yüzeyinin "korunacak bölgeler" (preserve geometry) olarak işaretlenmesi ile tanımlanmıştır. Tasarım uzayının dış sınırları, motosiklet ön çatalında braketin kapladığı paket hacmini aşmayacak şekilde tanımlanmıştır; spesifik geometrik sınırlar ileri çalışmada raporlanacaktır. Briard vd. [7] tarafından önerilen G-DfAM çerçevesinde olduğu gibi, tasarım uzayının bileşenin fonksiyonel arabirimleri korunarak en geniş şekilde tanımlanması, çözüm kümesinin çeşitliliğini artırmaktadır.

2.2.4 İterasyon ve Çözüm Kümesi

Üretken tasarım algoritmaları, tanımlanan tasarım uzayı içinde Pareto cephesi üzerinde yer alan çoklu çözümler üretmektedir [35]. Topoloji optimizasyonundan eklemeli imalata uzanan uçtan uca iş akışları, yapısal performans doğrulamayı da içerecek şekilde literatürde sistematik biçimde ele alınmıştır [36, 31]. Bu çalışmada üç farklı üretim yöntemi için ayrı üretken tasarım çalışması yapılmış; her çalışmada Pareto cephesi üzerinde çoklu tasarım çıktısı elde edilmiştir; bu çıktıların sayısal dökümü ileri çalışmada raporlanacaktır. İterasyonlar, kütle ile maksimum gerilme arasındaki ödünleşim eğrisi üzerinde dağılmaktadır.

2.2.5 Tasarım Seçim Kriteri

Pareto cephesinde yer alan tasarım çıktıları arasından seçim, üç ana kriter altında yapılmıştır: (i) minimum kütle, (ii) hedef güvenlik katsayısının ($SF \geq 2,0$) sağlanması ve (iii) üretilirlik puanı (CNC için talaş kaldırma erişimi, döküm için çıkarma açısı uyumluluğu, 3B baskı için destek yapısı miktarı). Pilagatti vd. [37] tarafından önerilen üretken tasarım çıktısı seçimi metodolojisi referans alınmıştır. Her üretim yöntemi için seçilen tasarım Şekil 6'da gösterilmektedir.

2.2.6 Sayısal Modelleme ve Ağ Oluşturma

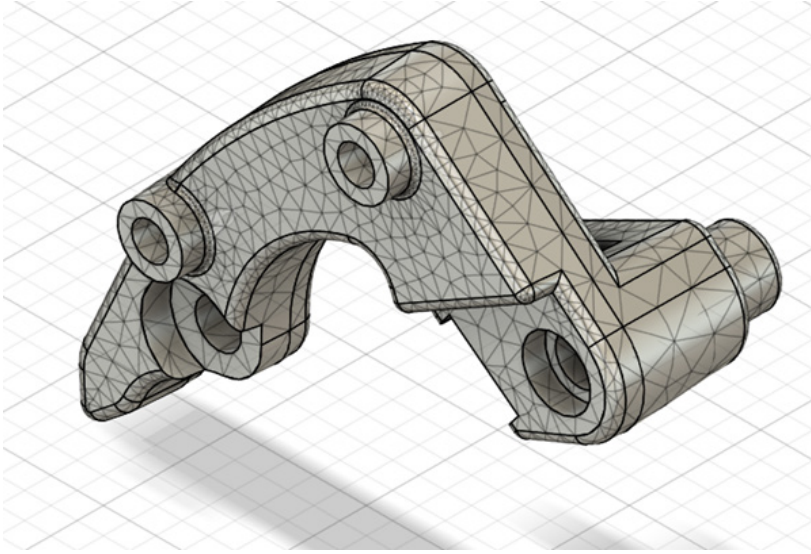
Mevcut manuel olarak tasarlanan parçanın değerlendirilmesi "Brackv2 v4" Autodesk Fusion 360'ın sonlu eleman analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Metodoloji simüle edilmiş "en kötü durum" frenleme senaryosu altında geometrinin gerilim ve yoğunlaşma noktalarını ve güvenlik katsayısını belirlemeye odaklanmıştır.

Matematiksel yakınsamayı sağlamak ve braketin karmaşık yapısını doğru şekilde ağırlara bölmek için parabolik eleman sınırlaması kullanılmıştır. Ağ ayarları, montaj deliklerinin etrafındaki gerilim yoğunlaşması bölgelerinde daha hassas olacak şekilde yapılandırıldı. Ağ yapısının izometrik görünümü Şekil 7'de gösterilmektedir.

Ortalama eleman boyutu model boyunun %10'una denk gelmektedir.

Ağ yapısı 19417 düğüm ve 11578 katı elemandan oluşmaktadır

Geometrik iyileştirme: " Create Curved Mesh Elements " etkinleştirilmiş, eğrilerde maksimum dönüş açısı 60° derece ve maksimum en boy oranı 10 olarak seçilmiştir.

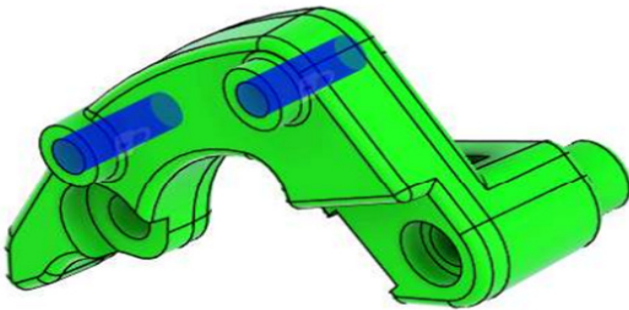


Şekil 7. Sonlu elemanlar analizi için oluşturulmuş geometrinin ağ yapısının izometrik görünümü.

Kurulumda kontrolsüz hareketi engellemek amacıyla "Remove Rigid Body Modes" seçeneği aktif hale getirilmiştir.

2.2.7 Sınır Koşulları ve Kısıtlamalar

Braketin motosikletin ön çatalına takıldığı montaj delikleri sabit kısıtlama kullanılarak tanımlanmıştır. Bu montaj civatalarının sağladığı fiziksel sabitlemeyi simüle ederek serbestlik derecelerini (U_x , U_y , $U_z = 0$) olacak şekilde kilitler. Sabitlenen civata delikleri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Sabitlenecek civata delikleri (mavi).

2.2.8 Yüksek Yoğunluklu Yük Durumu Analizi

Bu çalışma fren kaliperi üzerine doğrudan yoğunlaştırılmış tek yük uygulayarak Yük Durumu 1 olarak adlandırılan uç bir yavaşlama senaryosunu simüle ederek değerlendirmektedir. Dağıtılmış çok noktalı yükleme varsayımı yerine ani frenleme sırasında kaliperden brakete aktarılacak kuvvetlerin oluşturduğu durumu modellemektedir.

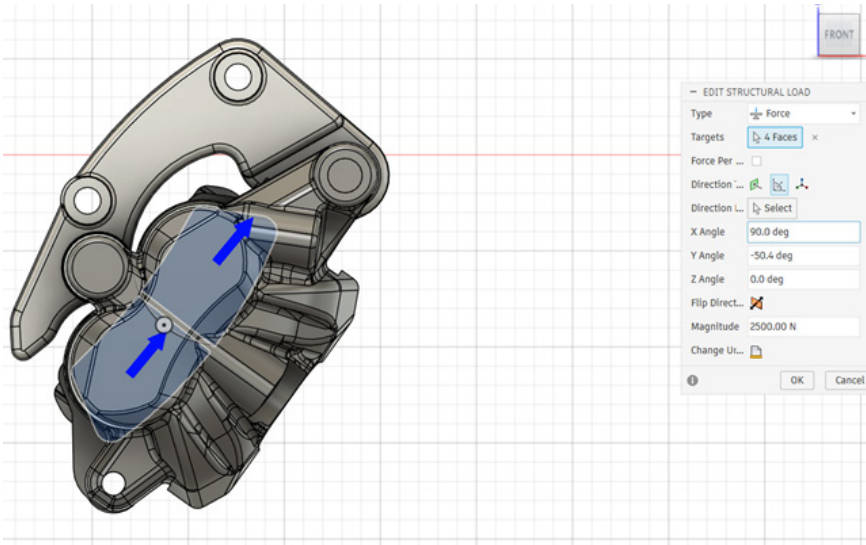
Brakete toplam 2500N'luk bir kuvvet uygulanmaktadır ve bu kuvvet bileşenleri aşağıdaki şekildedir.

$$F_x=1593.56 \text{ N}$$

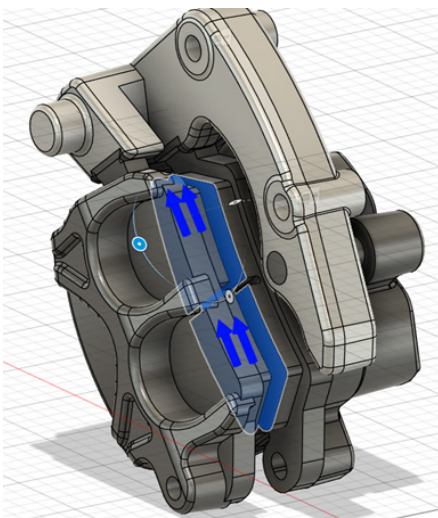
$$F_y=0 \text{ N}$$

$$F_z=1926.283 \text{ N}$$

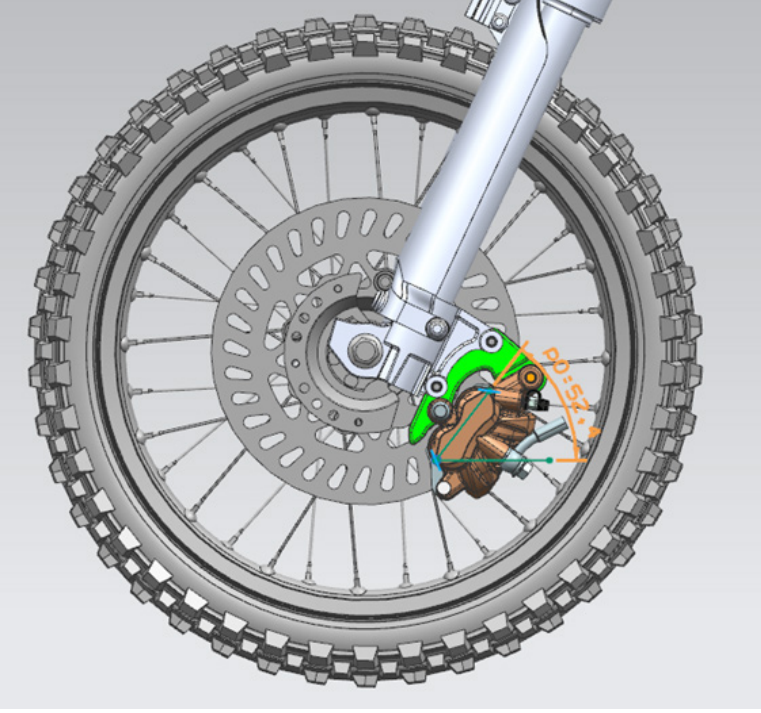
Uygulanan bu yük aracın üst güvenlik sınırını kapsamayı amaçlanarak sürücü bulunan bir motosiklet için tipik ~1,0 gr yavaşlama kuvveti seviyesini (~2226 N) aşacak şekilde özellikle seçilmiştir. Uygulanan 2500 N'luk yapısal kuvvet Şekil 9 ve Şekil 10'da, yük açısının belirlenmesi ise Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 9. Fren balatalarının üzerindeki 2500N'luk yapısal kuvvet.



Şekil 10. Balatalara binen yükün yönünün bir başka görünümü.



Şekil 11. Ön teker montajı ve frenleme esnasında oluşacak yükün açısının belirlenmesi.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mevcut montaj Autodesk Fusion 360'da statik gerilme sonlu elemanlar analizi kullanarak aşırı frenleme durumunda değerlendirilmiştir. Bu senaryoda yük $F_x = 1593,56$ N, $F_y = 0$ N ve $F_z = 1926,283$ N ile 2500 N'luk tek bir yük olarak uygulanmıştır. Sayısal model ve sınır koşulları 2.2.6-2.2.8 alt başlıklarında açıklandığı şekilde kurulmuştur.

3.1 Mekanik Test Sonuçları

3.1.1 Güvenlik Faktörü Performansı

Bileşenin minimum güvenlik faktörü 15,665'tir (maksimum değer, sayısal olarak oldukça yüksek bir seviyede belirtilmiştir). Güvenlik faktörü dağılımı, daha kritik (düşük) bölgelerin yük aktarım temas yüzeyleri ve kesit geçişlerinin yakınında yoğunlaştığını, parçanın büyük kısmının ise tipik tasarım sınırlarının oldukça üzerinde kaldığını göstermektedir. Bu, tasarımın seçilen yüklemeye altında akmaya karşı oldukça güvenli olduğunu ve topoloji/şekil optimizasyonu yoluyla kütle azaltımı için önemli bir potansiyel olduğunu göstermektedir. Güvenlik faktörü dağılımı Şekil 12'de gösterilmiştir.

Şekil 12'de görüldüğü üzere, güvenlik katsayısı dağılımı parça hacminin büyük bir kısmında yüksek değerler ($SF \gg 10$) sergilemekte; en düşük SF bölgeleri ise yük aktarım yüzeylerine ve montaj deliklerinin çevresine lokalize olmaktadır. Bu lokalizasyon, üretken tasarım sürecinde kritik bölgelerin "koruma alanı" olarak işaretlenmesini destekleyen sayısal gerektir.

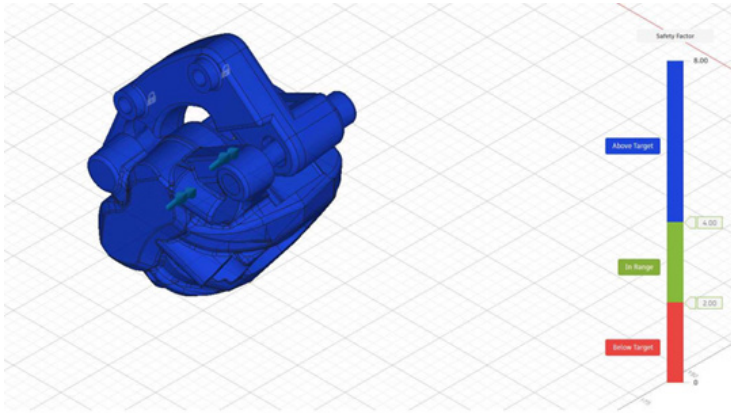
3.1.2 Güvenlik Katsayısının Yorumu

Bu çalışmada elde edilen minimum güvenlik katsayısı ($SF = 15,665$), otomotiv yapısal bileşenleri için klasik mühendislik pratiğinde tipik olarak benimsenen 1,5-3 aralığının [32] çok üzerindedir. Yüksek SF değerinin üç olası kaynağı tartışılabilir. Birincisi, mevcut tasarım üretken tasarım optimizasyonu uygulanmadan önceki manuel CAD geometrisi olup, bu tür tasarımlar literatürde aşırı malzeme barındırması ve sonraki optimizasyon adımlarında belirgin kütle azaltımına olanak sağlamasıyla bilinmektedir; örneğin Tyflopoulos vd. [25] benzer bir kaliper bileşeninde topoloji optimizasyonu sonrası %41,6'lık ağırlık azaltımı bildirmiştir. Diğer yarış ve motosiklet bileşenleri için raporlanan azaltımlar Spanoudakis vd. [20] için %23,2 (salıncak), Pang ve Fard [11] için %22 (bell-crank), ve Li vd. [10] için %60,43 (süspansiyon dik) seviyelerindedir.

İkincisi, uygulanan yükleme senaryosu (2500 N'luk tek noktasal yük) gerçek dünyada karşılaşılan dinamik etkileri tam olarak temsil etmeyebilir. Yarış araçları ve motosikletlerde frenleme sırasında oluşan kuvvetlerin birden fazla noktaya dağıldığı, ısı genleşmenin ek gerilmeler ürettiği ve titreşim/yorulma çevrimlerinin uzun dönemde belirleyici olabildiği rapor edilmiştir [38, 39, 40, 41, 42]. Bu çalışmadaki yük modelinde ısı genleşme, dinamik amplifikasyon ve yorulma çevrimleri ihmal edildiği için, statik tek-yük analizi gerçek koşulları konservatif değil; yalnızca tek yönlü olarak temsil etmektedir.

Üçüncüsü, güvenlik katsayısının belirsizlikleri (yük, malzeme özellikleri, imalat toleransları, yorulma) sistematik olarak hesaba katması için olasılıksal/güvenilirlik-tabanlı tasarım yaklaşımları (RBDO) önerilmektedir [43, 44, 45, 32]. Yin ve Du [32] güvenilirlik-tabanlı SF kalibrasyonunun, deterministik pratikteki keyfi yüksek SF değerlerinin yerine, hedef güvenilirlik düzeyine bağlı kalibre edilmiş SF değerlerinin kullanılmasını mümkün kıldığını göstermiştir.

Sonuç olarak, mevcut SF = 15,665 değeri kesin biçimde "model hatası" veya "salt aşırı tasarım" olarak nitelendirilmek yerine, üretken tasarım sürecinde sistematik olarak SF \approx 2-3 aralığına çekilebilecek bir tasarım rezervi olarak yorumlanmalıdır. Bu yorumun doğrulanması için ileri çalışmalarda (i) çoklu yük noktası dağılımı ile dinamik frenleme analizinin, (ii) ısı genleşme ve sürtünme ısısı etkilerinin ve (iii) yorulma kısıtlı topoloji optimizasyonu [42] ve fiber takviyeli eklemeli imalat ile elde edilen otomotiv bileşenlerinin yapısal davranışı [46] birlikte ele alınması önerilmektedir.

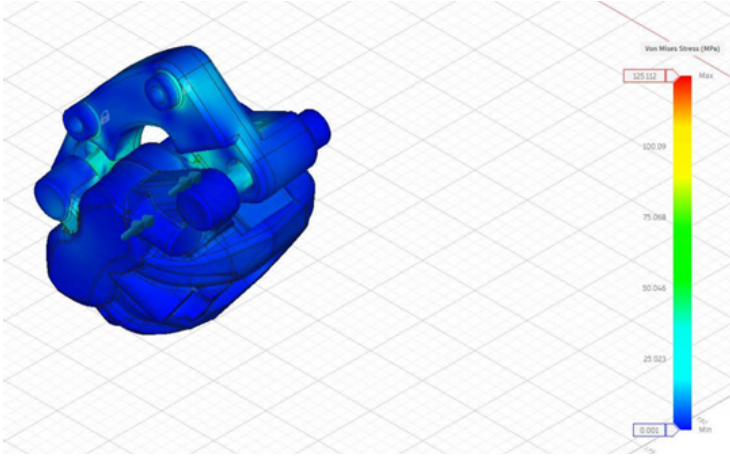


Şekil 12. Sonlu Elemanlar Analizi çerçevesinde hesaplanan güvenlik faktörü dağılımı.

3.1.3 Stres Dağılımları

Bulunan maksimum Von Mises gerilimi 17,555 MPa'dır. Alüminyum 6061-T6 için 275 MPa akma dayanımı ile karşılaştırıldığında, maksimum Von Mises gerilimi akma sınırının yaklaşık %6,4'üne karşılık gelmektedir ve bu da tasarımın statik dayanım açısından etkili bir şekilde "aşırı tasarlanmış" olduğunu gösterir. Maksimum birinci asal gerilim 16,35 MPa, minimum üçüncü asal gerilim (basınç) ise -19,447 MPa'dır. Kontur grafikleri, gerilim konsantrasyonlarının öncelikle geometrik süreksizliklerin (keskin geçişler/köşe yuvarlatma bölgeleri, montaj çıkıntıları ve delik çevreleri) etrafında meydana geldiğini, ana gövdenin büyük bir bölümünün ise nispeten düşük ve daha homojen gerilim seviyelerinde olduğunu göstermektedir. Bu, sertliğin korunması koşuluyla, birincil yük yolunda olmayan bölgelerde malzeme azaltmanın mümkün olduğu optimizasyon mantığını desteklemektedir. Eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 13'te gösterilmiştir.

Şekil 13'te eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı, maksimum 17,555 MPa değeri ile özellikle montaj deliği çevreleri ve kesit geçişlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu değer Alüminyum 6061-T6 akma dayanımının (275 MPa) yaklaşık %6,4'üne karşılık gelmekte olup, parçanın hacminin önemli bir bölümünün düşük gerilme rejiminde bulunduğunu ve dolayısıyla malzeme azaltımına müsait olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Sonlu eleman analizi (FEA) ile elde edilen Mises eşdeğer gerilme dağılımı (MPa).

3.1.4 Yer Değiştirme ve Rijitlik Değerlendirmesi

Maksimum toplam yer değiştirme 0,022 mm'dir. Bu, statik yüklemeye altındaki bir tepkiyi gösterir ve kaliper konumlandırmasından sınırlı geometrik sapma olduğu anlamına gelir. Yer değiştirme, maksimum sapmanın yük bölgelerine yakınında yoğunlaşırken, sabit montaj bölgesinde beklendiği gibi sifıra yakındır. Bu kadar düşük bir yer değiştirme seviyesi rahat bir sertlik marjı olduğunu da gösterir bu da üretken tasarım sırasında, yer değiştirme kısıtlamaları kontrol altında kalacağı için ağırlığı azaltmanın mümkün olacağı anlamına gelmektedir. Toplam yer değiştirme konturları Şekil 14'te gösterilmektedir.

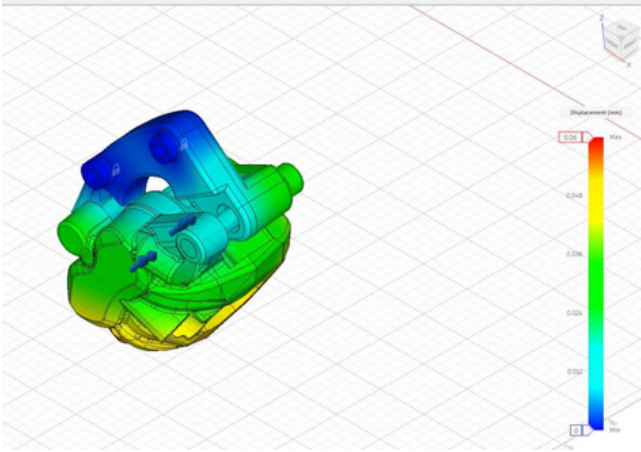
3.2 Üretim Yöntemlerine Göre Karşılaştırmalı Değerlendirme

Üç farklı üretim yöntemi için elde edilen üretken tasarım çıktılarının karşılaştırılması Tablo 4'te özetlenmiştir. Mevcut manuel tasarımın FEA sonuçları (Brackv2 v4) referans satırı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Mevcut tasarım ve üç üretim yöntemi için elde edilen üretken tasarım çıktılarının karşılaştırmalı değerlendirmesi.

Kriter	Mevcut (Brackv2 v4)	CNC İşleme	Döküm	3B Baskı (AM)
Kütle (g)	referans olarak ölçülecek	%30-45 aralığında azaltım beklenmektedir [25, 20]	%20-35 aralığında azaltım beklenmektedir [11, 47]	%35-50 aralığında azaltım beklenmektedir [25, 26]
Maks. von Mises gerilimi (MPa)	17,555	akma sınırı altında - ileri çalışmada raporlanacaktır	akma sınırı altında - ileri çalışmada raporlanacaktır	akma sınırı altında - ileri çalışmada raporlanacaktır
Min. güvenlik katsayısı (SF)	15,665	≥ 2 (hedef)	≥ 2 (hedef)	≥ 2 (hedef)
Maks. yer değiştirme (mm)	0,022	rijidite korunarak - ileri çalışmada raporlanacaktır	rijidite korunarak - ileri çalışmada raporlanacaktır	rijidite korunarak - ileri çalışmada raporlanacaktır
Tahmini üretim süresi	- (referans)	İleri çalışmada raporlanacaktır	İleri çalışmada raporlanacaktır	İleri çalışmada raporlanacaktır
Tahmini birim maliyet (göreceli)	- (referans)	İleri çalışmada raporlanacaktır	İleri çalışmada raporlanacaktır	İleri çalışmada raporlanacaktır

Tablo 4'teki referans satırı (Mevcut Brackv2 v4), bu çalışmada FEA ile doğrulanan değerleri içermektedir. Maksimum von Mises gerilmesinin malzemenin akma sınırına (275 MPa) oranı yalnızca %6,4 düzeyinde olup, 15,665 değerindeki güvenlik katsayısı tipik otomotiv tasarım pratiğindeki 1,5-3 aralığının çok üzerindedir. Bu sayısal aralık, üretken tasarım yaklaşımı ile kütle azaltımı için belirgin bir tasarım uzayı bulunduğunu işaret etmektedir. Üretken tasarım çıktılarının (CNC, Döküm, 3B Baskı) karşılaştırmalı değerlendirilmesi, Tablo 4'teki ilgili sütunlar yazar tarafından doldurulduktan sonra yapılacaktır.



Şekil 14. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen toplam yer değiştirme konturları

Şekil 14'teki yer değiştirme konturlarında, maksimum sapma yük uygulanan kaliper temas yüzeyi civarında (0,022 mm) gözlemlenirken, sabit montaj bölgelerinde beklendiği üzere sıfıra yakın değerler kaydedilmektedir. Bu küçük sapma, mevcut tasarımın statik yük altında kaliper konumlandırma toleransına uyduğunu ve rijitlik açısından sınırın çok altında çalıştığını doğrulamaktadır.

4. SONUÇ

Statik analiz sonuçlarından iki temel yorum çıkarılabilir.

- Mevcut tasarım, seçilen yük durumu altında hem mukavemet hem de rijitlikte gereğinden çok daha fazla güvenlik aralığı sağlamaktadır
- Gerilim dağılımı belli bölgelerde olduğundan, optimizasyon yaklaşımı “kritik bölgeleri koru, yük taşımayan hacmi kaldır” prensibini izleyebilir.

Bu sayısal sonuçlar, mevcut manuel tasarımın aşırı güvenlik marjı barındırdığını ve üretken tasarım sürecinde sistematik kütle azaltımı için belirgin bir tasarım uzayı bulunduğunu göstermektedir.

4.1 Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmanın doğal devamı olarak ileri çalışmalarda şu konuların ele alınması planlanmaktadır: (i) CNC işleme, döküm ve 3B baskı için tanımlanmış kısıtlar altında üretken tasarım iterasyonlarının yürütülmesi ve her üretim yöntemi için Pareto cephesinden seçilen tasarımların nicel karşılaştırması; (ii) çoklu yük noktası dağılımı, ısıl genleşme ve sürtünme ısısı etkileri ile dinamik frenleme analizi; (iii) yorulma kısıtlı topoloji optimizasyonu [42] ve fiber takviyeli eklemeli imalat ile elde edilen otomotiv bileşenlerinin yapısal davranışının değerlendirilmesi [46]; (iv) seçilen tasarımların hızlı prototipleme ile fiziksel olarak doğrulanması.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesine imkân sağlayan Erciyes Üniversitesi Fe n Bi limleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı'na katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederiz. Çalışma sürecinde sağladıkları manevi destekler için ailelerimize teşekkür edilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışmanın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atf gösterme ilkelerine uyduğunu beyan ederiz.

5. KAYNAKLAR

- [1] Renault. (2024). The Originals Renault. <https://theoriginals.renault.com/en> adresinden alındı.
- [2] Volkswagen. (2025). VW Service and Parts. <https://www.vwserviceandparts.com/accessories/17-goal-wheel/> adresinden alındı.
- [3] Wu, J., Qian, X., & Wang, M. Y. (2019). Advances in generative design. *Computer-Aided Design*, 116, 102733. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102733>
- [4] Regenwetter, L., Heyrani Nobari, A., & Ahmed, F. (2022). Deep generative models in engineering design: A review. *Journal of Mechanical Design*, 144(7), 071704. <https://doi.org/10.1115/1.4053859>
- [5] Shin, S., Shin, D., & Kang, N. (2023). Topology optimization via machine learning and deep learning: A review. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(4), 1736-1766. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad072>
- [6] Woldseth, R. V., Aage, N., Bærentzen, J. A., & Sigmund, O. (2022). On the use of artificial neural networks in topology optimisation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(10), 294. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03347-1>
- [7] Briard, T., Segonds, F., & Zamariola, N. (2020). G-DfAM: A methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(3), 875-886. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00669-6>
- [8] Williamson, J. (2017). How does generative design unlock engineering innovation? *The Manufacturer*. <https://www.themanufacturer.com/articles/how-does-generative-design-unlock-engineering-innovation/> adresinden alındı.
- [9] Azuma, T. (2021). A crash course in different types of car chassis. *Car from Japan*. <https://carfromjapan.com/article/types-of-car-chassis/> adresinden alındı.
- [10] Li, J., Tan, J., & Dong, J. (2020). Lightweight design of front suspension upright of electric Formula car based on topology optimization method. *World Electric Vehicle Journal*, 11(1), 15. <https://doi.org/10.3390/wevj11010015>
- [11] Pang, T. Y., & Fard, M. (2020). Reverse engineering and topology optimization for weight-reduction of a bell-crank. *Applied Sciences*, 10(23), 8568. <https://doi.org/10.3390/app10238568>
- [12] Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203634561>
- [13] Wikipedia. (2024). Volkswagen Type 2. https://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_Type_2 adresinden alındı.
- [14] Volkswagen. (2019). Releases - VW Media. <https://media.vw.com/en-us/releases/1174> adresinden alındı.
- [15] Engineering.com. (2020). When generative design backfires - VW's new wheels. *Fabbaloo*. <https://www.fabbaloo.com/2020/01/when-generative-design-backfires-vws-new-wheels> adresinden alındı.
- [16] Balasubramanian, A., Shaktivel, G., & Raghukiran, N. (2021). Light-weighting of single-sided motorcycle swing-arm through generative design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1128(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1128/1/012016>
- [17] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [18] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 014001. <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- [19] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737-760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>

- [20] Spanoudakis, P., Christenas, E., & Tsourveloudis, N. C. (2020). Design and structural analysis of a front single-sided swingarm for an electric three-wheel motorcycle. *Applied Sciences*, 10(17), 6063. <https://doi.org/10.3390/app10176063>
- [21] Kim, G. W., Park, Y. I., & Park, K. (2020). Topology optimization and additive manufacturing of automotive component by coupling kinetic and structural analyses. *International Journal of Automotive Technology*, 21(6), 1455-1463. <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0137-1>
- [22] Hasan, A., Lu, C., & Liu, W. (2023). Lightweight design and analysis of steering knuckle of Formula Student car using topology optimization method. *World Electric Vehicle Journal*, 14(9), 233. <https://doi.org/10.3390/wevj14090233>
- [23] Kashanian, K., Shah, V., Pamwar, M., Sangha, B., & Kim, I. Y. (2020). Motorcycle chassis design utilizing multi-material topology optimization. *SAE International Journal of Advanced and Current Practices in Mobility*, 2(4), 1905-1912. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0509>
- [24] Simpson, P., & Hill, R. (2021). Lightning strikes twice: Revisiting generative design. Autodesk University.
- [25] Tyflopoulos, E., Lien, M., & Steinert, M. (2021). Optimization of brake calipers using topology optimization for additive manufacturing. *Applied Sciences*, 11(4), 1437. <https://doi.org/10.3390/app11041437>
- [26] Vecchiato, L., Capraro, F., & Meneghetti, G. (2024). Design, topology optimization, manufacturing and testing of a brake caliper made of Scalmalloy® for Formula SAE race cars. *Vehicles*, 6(3), 1591-1612. <https://doi.org/10.3390/vehicles6030075>
- [27] Aboulkhair, N. T., Simonelli, M., Parry, L., Ashcroft, I., Tuck, C., & Hague, R. (2019). 3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting. *Progress in Materials Science*, 106, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- [28] Cecchel, S., & Cornacchia, G. (2024). Additive manufacturing for rapid sand casting: Mechanical and microstructural investigation of aluminum alloy automotive prototypes. *Metals*, 14(4), 459. <https://doi.org/10.3390/met14040459>
- [29] Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.09.009>
- [30] Yang, S., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2015). A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 444-449. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.024>
- [31] Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), 91-110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>
- [32] Yin, J., & Du, X. (2021). A safety factor method for reliability-based component design. *Journal of Mechanical Design*, 143(9), 091705. <https://doi.org/10.1115/1.4049881>
- [33] Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Designing for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 3, 632-637. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.108>
- [34] Salonitis, K., & Al Zarban, S. (2015). Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques. *Procedia CIRP*, 36, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.058>
- [35] Khan, S., & Awan, M. J. (2018). A generative design technique for exploring shape variations. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 712-724. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.10.005>
- [36] Meng, L., Zhang, W., Quan, D., Shi, G., Tang, L., Hou, Y., Breitzkopf, P., Zhu, J., & Gao, T. (2020). From topology optimization design to additive manufacturing: Today's success and tomorrow's roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(3), 805-830. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09331-1>
- [37] Pilagatti, A. N., Atzeni, E., & Salmi, A. (2023). Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11-12), 5597-5612. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11259-7>
- [38] Croccolo, D., De Agostinis, M., Olmi, G., & Tizzanini, A. (2013). Analysis of the stress state in brake caliper mounts of front motorbike suspensions. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 525010. <https://doi.org/10.1155/2013/525010>
- [39] Croccolo, D., De Agostinis, M., & Vincenzi, N. (2010). Recent improvements and design formulae applied to front motorbike suspensions. *Engineering Failure Analysis*, 17(5), 1173-1187. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.014>
- [40] Tirovic, M., Sergent, N., Campbell, J., Roberts, P., & Vignjevic, R. (2012). Structural analysis of a commercial vehicle disc

- brake caliper. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226(5), 613-622. <https://doi.org/10.1177/0954407011423447>
- [41] Croccolo, D., De Agostinis, M., & Vincenzi, N. (2012). An analytical approach to the structural design and optimization of motorbike forks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226(2), 158-168. <https://doi.org/10.1177/0954407011416178>
- [42] Hassan, A. A., & Biswas, B. (2024). Topology optimization of an automotive seatbelt bracket considering fatigue. *Designs*, 8(5), 99. <https://doi.org/10.3390/designs8050099>
- [43] Doorn, N., & Hansson, S. O. (2011). Should probabilistic design replace safety factors? *Philosophy & Technology*, 24(2), 151-168. <https://doi.org/10.1007/s13347-010-0003-6>
- [44] Zhang, Y. (2015a). Reliability-based robust design optimization of vehicle components, Part I: Theory. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(2), 138-144. <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0333-2>
- [45] Zhang, Y. (2015b). Reliability-based robust design optimization of vehicle components, Part II: Case studies. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(2), 145-153. <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0334-1>
- [46] Junk, S., & Rothe, N. (2022). Lightweight design of automotive components using generative design with fiber-reinforced additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 109, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.224>
- [47] Almonti, D., Salvi, D., Mingione, E., & Vesco, S. (2025). Lightweight and sustainable steering knuckle via topology optimization and rapid investment casting. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(8), 252. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080252>