

316L PASLANMAZ ÇELİĞİNDEN ÜRETİLEN SÜSPANSİYON KONTROL KOLUNUN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE İNCELENMESİ

Ali Yağız ÖZYILMAZ ***^{id}

Murat IŞIK †^{id}

Alınma: 28.11.2025 ; düzeltme: 12.04.2026 ; kabul: 19.05.2026

Öz: Bu çalışma, geleneksel SAE 1045 çeliği ile seçici lazer ergitme yöntemi için 316L paslanmaz çeliği kullanılarak tasarlanan süspansiyon kontrol kolunun sayısal analiz temelli karşılaştırmasını sunmaktadır. Yapısal bütünlüğü korurken kütle azaltımı sağlamak amacıyla yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu, SIMP, uygulanmış ve her iki malzeme için de yaklaşık %30 oranında kütle tasarrufu elde edilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, SAE 1045 çeliğinin rijitlik açısından hafif bir performans avantajını koruduğunu gösterse de her iki tasarımın da 1×10^7 çevrimlik sonsuz ömüre ulaştığı saptanmıştır. Optimize edilen 316L bileşeni, 1,56 yorulma emniyet katsayısı ile güvenli mühendislik sınırları içerisinde kalarak dinamik yükler altında yapısal güvenilirliğini kanıtlamıştır. Elde edilen bulgular, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü ile birleşen 316L paslanmaz çeliğinin, otomotiv süspansiyon sistemlerinde geleneksel malzemelere karşı oldukça rekabetçi ve güvenilir bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: 316L paslanmaz çeliği, SAE 1045 çeliği, eklemeli imalat, topoloji optimizasyonu, süspansiyon kontrol kolu, kütle azaltımı.

Analysis of a 316L Stainless Steel Control Arm Through Topology Optimization

Abstract: This study presents a numerical comparison between a suspension control arm fabricated from traditional SAE 1045 steel and a variant designed for additive manufacturing using 316L stainless steel. Utilizing selective laser melting parameters as a baseline, density based topology optimization SIMP was applied to achieve mass reduction while maintaining good mechanical property, resulting in a 30% reduction in mass. Numerical results indicate that while SAE 1045 maintains a slight performance advantage in terms of stiffness, both designs successfully reach the infinite fatigue life of 1×10^7 cycles. The optimized 316L component, with a fatigue safety factor of 1.56, maintained within safe engineering limits, demonstrating its strength under dynamic loading conditions. The findings highlight that 316L stainless steel, coupled with the design freedom of additive manufacturing, serves as a highly competitive and dependable alternative to conventional materials in automotive suspension systems.

Keywords: 316L stainless steel, SAE 1045 steel, additive manufacturing, topology optimization, suspension control arm, mass reduction.

* Ali Yağız ÖZYILMAZ - Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Nilüfer

İletişim Yazarı: Murat IŞIK (muratisik@uludag.edu.tr)

† Murat IŞIK - Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Nilüfer, Bursa

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi son zamanlarda sürdürülebilirliği sağlamak amacı ile bazı hedeflere ağırlık vermektedir. Bu hedefler yakıt verimliliğini artırmak, karbon emisyonlarını azaltmak ve araç performansını iyileştirmek amacıyla hafif ve yüksek dayanımlı bileşenlerin kullanımını kapsamaktadır. Süspansiyon kontrol kolu, aracın şasi ve tekerlekleri arasındaki bağlantıyı sağlayarak yük aktarımını optimize eden kritik bileşenlerden biridir (Lukoševičius ve diğ., 2021). Döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi tekniklerin yaygın olarak üretiminde kullanıldığı kontrol kolları genellikle SAE 1045 çeliği malzeme, dökme demir veya alüminyum alaşımlarından imal edilmekte olup, bu yöntemler tasarım ve üretim perspektifleri açısından bazı dezavantajlara ve kısıtlamalara tabidir (Jiang ve diğ., 2018). Bunlara ek olarak bahsi geçen yöntemler karmaşık ve hafifletilmiş tasarımların üretiminde yetersiz kalırken diğer taraftan da malzeme israfına neden olmaktadır. Yenilikçi imalat yöntemlerinin zıttı olacak şekilde, konvansiyonel üretim yöntemleri beraberinde çok da tercih edilmeyecek sınırlamalara getirmektedir. Bu kısıtlamalar karmaşık ve optimize edilmiş iç geometrilerin üretimin zorluklarını ve uzun üretim süreçlerini kapsamaktadır (Smarzewski ve Stolarski, 2022). Üretim aşamalarının bu denli zaman alıcı olması ve yüksek takım maliyetleri gibi ekonomik kaygılar, mühendislik bileşenlerinin tasarımında yeni üretim yöntemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır (D'Andrea, 2023). Bu bağlamda, eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırarak kompleks geometrilerin, optimize edilmiş tasarımların ve hafif yapıların üretilmesine fırsat sağlayan bir çözüm aracı olarak göze çarpmaktadır (Pereira ve diğ., 2019). Seçimli lazer ergitmesi tekniği, yani kısaltılmış ismi ile SLM, metal tozlarının lazer enerjisi ile eritilerek katman üzerine katmanların inşa edilmiş yapıların ortaya çıkmasını sağlamakta ve bu sayede yüksek hassasiyet, düşük malzeme israfı ve beklentileri karşılayabilen mekanik özellikler sağlamaktadır (Yap ve d., 2015).

Son zamanlarda birçok parçada olduğu gibi süspansiyon sistemlerinde de topoloji optimizasyondan faydalanım giderek artmaktadır (Hope ve diğ., 2003; Lee ve Lee, 2003; Demirdogen ve diğ., 2004). Eklemeli imalatın topoloji optimizasyonu ile olan uyumluluğundan dolayı sıklıkla üretimlerde tercih edilmektedir. Literatürde en yaygın olarak iki topoloji optimizasyonu yöntemine tercih edilmektedir (Tang ve diğ., 2014). Bunlardan ilki Kikuchi ve Bendsoe tarafından ortaya atılan ve sonlu eleman analizi modelinde her bir elemanın boşluklarının boyutu ve oryantasyonunu belirlemeye yönelik bir strateji üzerinden gerçekleşen mikroyapı yaklaşımıdır. Mikro yapı yaklaşımı, özellikleri titiz bir matematiksel yöntemle homojenleştirilmiş bir mikro yapıya sahip kompozit malzeme varsayımına dayanmaktadır. Son dönemlerde oldukça yaygın hale gelen ikinci yaklaşım ise yoğunluk yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır ve yoğunluk formülasyonuna dayanmaktadır (Bendsøe ve Kikuchi, 1988; Yang ve diğ., 2000; Rozvany ve diğ., 1992). Yoğunluk yaklaşımında, yapının her bir sonlu elemanındaki malzeme yoğunluğu tasarım değişkeni olarak seçilmekte ve optimizasyon iterasyonları boyunca ara yoğunluk değerleri cezalandırılmaktadır. Her bir elemanın izotropik malzeme olarak kabul edildiği mikro yapı yaklaşımının aksine, yoğunluk yaklaşımında her sonlu eleman için yalnızca tek bir tasarım değişkeni gerekmektedir (Tang ve diğ., 2014; Yang ve diğ., 2000). Çalışmada kullanılan 316L paslanmaz çeliği malzemesi de yine yüksek korozyon direnci, iyi mekanik dayanım, süneklik ve biyouyumluluk gibi özellikleri nedeni ve eklemeli imalat ile üretime uygunluğu özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir (Hassan ve Saeed, 2024).

316L paslanmaz çeliği, düşük karbon içeriği ve yüksek nikel oranı sayesinde tamamen östenitik bir mikroyapıya sahip olup, üstün korozyon direnci ve mekanik özelliklere sahiptir. Yukarı bahsi geçen bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve biyomedikal gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroyapısal analizlerde, üretim yöntemi ve ısıl işlemler sonucu elde edilen tane boyları genellikle 15 ve 35 µm aralığında değişmekte olup, ince taneli yapıların mekanik dayanım ve tokluk özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Reitz, 2006).

Düşük karbon içeriği, özellikle tane sınırlarında krom karbür çökmesinin engellenmesiyle korozyon direncinin optimize edilmesinde kritik bir rol oynar. Soğuk deformasyon ve ısıtma işlemlerin mikroyapısal homojenliği artırarak mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattığı çalışmalarla ortaya konmuştur. Alaşımın uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalması durumlarında, az miktarda sigma (σ) fazı gibi intermetalik bileşiklerin oluşması, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebileceği rapor edilmiştir (Puchi, 2001). Eklenebilirlik imalat ve toz metalurjisi gibi üretim tekniklerinin uygulanması, mikroyapı kontrolünü mümkün kılarak porozite ve ikincil faz dağılımında iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir (Gardan, 2017). Sonuç olarak, 316L paslanmaz çeliğinin mikroyapısı, üretim yöntemi, ısıtma işlemleri ve çalışma koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermekte olup, bu faktörler malzemenin performansı ve uzun ömürlülüğü üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Debroy ve diğ., 2018). Diğer taraftan SAE 1045 çeliği yine kıyaslama koşulu olarak mevcut çalışmada araştırılmıştır. SAE 1045 orta karbonlu, yani yaklaşık %0,45 karbon içeren, bir çelik alaşımdır ve yüksek dayanım, sertlik ve süneklik gibi mekanik özellikleri yanı sıra işlenebilirlik özelliği sayesinde birçok sektörde uygulamaları bulunmaktadır (Gündüz ve Acarer, 2006; Thompson ve diğ., 2021). Kullanım alanları otomotiv sektöründe motorlu araç aktarma organları bileşenleri, piston kolu, krank mili, bağlantı elemanları ve dişliler şeklinde sıralanabilir (Thompson ve diğ., 2021).

Birçok çelik alaşımda olduğu gibi en çok rastlanan mikroyapısal karakteristikleri iri ferrit taneleri ve perlit kolonilerinin homojenize dağılmış durumu iken, sementit ve iğnemi yapıda mikroyapısal özellikte olan martensit fazları da yapılarında gözlemlenebilmektedir (Euser ve diğ., 2023; Thompson ve diğ., 2021). Ferrit fazı hacim merkezli kübik (bcc) yapıda iken, perlit yapısı ise ferrit ve sementit (Fe_3C) tabakalarının sıra sıra dizilmesi ile oluşmaktadır. İğnemi martensit fazı ise hacim merkezli tetragonal (bct) kristal yapıya sahiptir. Normalizasyon ve tavlama gibi ısıtma işlemlerle tane boyutu 20 ve 50 μm aralığında optimize edilebilmektedir (Singh ve diğ., 2021). SAE 1045 çeliği yüksek mukavemeti ve iyi işlenebilirliği nedeniyle aracın konfor, yol tutuş ve yük dengesi açısından kritik bir bileşenler bütünü olan süspansiyon bileşenlerinde yaygın olarak tercih edilse de yoğunluğu nedeniyle hafiflik gerektiren uygulamalarda dezavantajlar taşımaktadır. Alternatif olarak kullanılan alüminyum alaşımları üzerine optimizasyon konuları üzerine birçok çalışma mevcuttur, düşük yoğunluğu sayesinde daha hafif olmalarına rağmen, bu alaşımların da mukavemet açısından bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Kontrol kolları, aracın dinamik yüklerini taşıyan ve süspansiyon hareketlerini yönlendiren temel elemanlardan biridir, bu sebepten dolayı malzeme seçimi ve üretim yöntemi bu komponentlerde büyük önem taşımaktadır.

Literatürde süspansiyon bileşenleri üzerinde halihazırda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Lee, bir otomotiv süspansiyonunda alüminyum kontrol kolunun tasarımı aşamasında topoloji ve şekil optimizasyonu yöntemlerini kullanmıştır. Çelik kontrol kolu ile karşılaştırıldığında, kütlede %50 oranında azalma sağlanırken, yapısal rijitlik ve dayanım %40'a kadar artırılmıştır (Lee ve Lee, 2003). Daha önce Tang ve diğerleri tarafından da 6061 alüminyum alaşım süspansiyon kontrol kolunun topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk temelli yöntem üzerinden ve SIMP yoğunluk fonksiyonu için $p=3$ ceza faktörü kullanılarak minimum uyum ve %65 hacim azaltma hedeflenmiştir. İki ayrı optimize model çalışma sonucu elde edilmiş modellerden birisinin sonucu 6061 alaşımın akma dayanımından (275 MPa) yüksek von Mises değeri verirken diğeri bu değerden daha düşük sonuç ortaya çıkarmıştır (Tang ve diğ., 2014). Yang ve diğerleri, bazı üç boyutlu otomotiv bileşenleri için ağırlık azaltımı, imalat süreci seçimi, kaynak ve boncuk deseni tasarımları da dahil olmak üzere topoloji optimizasyonunun yeni uygulamaları konularına değinmiştir (Yang ve diğ., 2000). Demirdöğen ve diğerleri, üst kontrol kolunun ağırlığını en aza indirmek amacıyla topoloji optimizasyonu yaklaşımı kullanıldığında süreç boyunca gerçekleştirilen adımları ayrıntılı şekilde açıklamıştır (Demirdöğen ve diğ., 2004). Nelson, topoloji optimizasyonunda kalıp çekme yönü kısıtlarının pratik bir uygulamasını

tanımlanmış ve bunların otomotiv üst kontrol kolu tasarımını geliştirmede nasıl etkin biçimde kullanıldığını konusu üzerine yoğunlaşmıştır (Nelson, 2003). Süspansiyon sistemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların daha çok alüminyum alaşım, farklı çelik alaşım türleri ve konvansiyonel üretim uygulamaları üzerine olduğu görülmüş, yenilikçi üretim yöntemlerinin ve bu yöntemlerde en yaygın olarak kullanılan tozlardan biri sayılan 316L malzemenin de dolaylı olarak son dönemlerde kullanımı daha da yaygınlaşmakta ve bu yönde bir çalışmanın literatüre katkıda bulunabileceği düşünülmüştür.

Bu çalışmadaki topoloji optimizasyonu, minimum uyum hedefine göre yapılandırıldı. Amaç fonksiyonu olarak yapısal rijitliğin maksimizasyonu seçilirken, toplam malzeme hacminin belirli bir oranda tutulması kısıt olarak belirlendi. Böylelikle parçanın taşıma kapasitesinden ödün vermeden ağırlık azaltımı sağlandı. Tercih edilen bu yöntem, literatürdeki standart hafiflik vs. rijitlik dengesi prensibini temel alır.

Araştırmanın ana hedefleri arasında yenilikçi ve geleneksel üretim yöntemlerinin süreç ve performans açısından karşılaştırılması, SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çeliği süspansiyon kontrol kolunun mekanik özelliklerinin incelenmesi ve tasarım esnekliği, üretim süresi ile malzeme verimliliğinin ölçülmesi yer alır. Mevcut çalışmanın özgün katkısı, otomotiv süspansiyon sistemlerinde kullanılan kontrol kolu özelinde SAE 1045 çeliği ve SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çeliğinin topoloji optimizasyonu sonrası kıyaslanmasıdır. İki malzemenin aynı koşullar altında değerlendirilmesi literatürde nadiren karşılaşılan bir durumdur ve bu çalışmada elde edilen bulgular performanslarının büyük ölçüde benzer olduğuna işaret eder. Bununla birlikte, eklemeli imalatın üretim süresi, tasarım esnekliği ve malzeme verimliliği açısından rekabetçi bir alternatif sunduğu anlaşılmaktadır. Literatürde çoğunlukla alüminyum alaşımları veya tek bir malzeme üzerinde optimizasyon çalışmaları bulunurken, araç süspansiyon kontrol kolu özelinde bu iki malzemenin karşılaştırılması sınırlı sayıdadır. Çalışmanın bir kısıtı, yükleme koşullarının tek senaryo üzerinden tanımlanmasıdır. İlerleyen süreçte çoklu yükleme senaryoları ve deneysel prototip doğrulamaları hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. SLM Teknolojisi ve Üretim Karakteristikleri

SLM, metal tozlarının yüksek enerjili bir lazer yardımıyla CAD verisine göre katman katman ergitilmesi prensibine dayanan bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu süreçte metal tozları, kontrollü bir atmosfer altında tamamen eritilerek yüksek yoğunluklu ve karmaşık geometrili parçaların üretimine olanak tanımaktadır. Teknolojinin geleneksel yöntemlere kıyasla sunduğu avantajlar şu şekilde özetlenebilir. SLM teknolojisi, geleneksel döküm veya talaşlı imalat yöntemlerinde gerekli olan karmaşık kalıp ve aparat tasarım süreçlerini ortadan kaldırarak doğrudan üretim aşamasına geçilmesini sağlar. Bu durum, otomotiv bileşenlerinin prototipleme sürelerini haftalardan günlere indirerek hızlı prototipleme avantajı sunmaktadır. Yüksek cihaz ve malzeme maliyetlerine rağmen SLM, parçanın son formuna çok yakın üretim kabiliyeti sayesinde malzeme israfını minimize eder. Takım ve kalıp maliyetlerinin olmaması, özellikle düşük hacimli veya kişiselleştirilmiş üretimlerde ekonomik bir verimlilik sağlar. Ayrıca SLM sürecindeki aşırı yüksek soğuma hızları, mikroyapıda 15 ve 35 µm aralığında değişen çok ince tanelerin oluşmasına yol açar. Bu ince taneli ve homojen mikroyapı, malzemenin mekanik dayanım ve tokluk özelliklerini iyileştirerek döngüsel yükler altında yüksek yorulma direnci sergilemesini sağlamaktadır.

2.2. Malzeme Seçimi Ve Özellikleri

Süspansiyon kontrol kolunun üretimi için ana malzeme olarak 316L paslanmaz çeliği tercih edilmiştir. Yaklaşık %0,02 oranındaki düşük karbon içeriği sayesinde yüksek korozyon direnci, üstün süneklik ve mekanik dayanım sergileyen bu alaşım, eklemeli imalata (SLM) olan yüksek uyumluluğu nedeniyle seçilmiştir (Liu ve diğ., 2022; Chen ve diğ., 2021). Kıyaslama malzemesi olarak ise otomotiv endüstrisinde yaygın kullanılan, yüksek mukavemet ve darbe dayanımına sahip ancak yoğunluğu nedeniyle hafifletme çalışmalarında dezavantaj oluşturan SAE 1045 çeliği belirlenmiştir (Pereira ve diğ., 2019). Analizlerde kullanılan SAE 1045 mekanik özellikleri, literatürdeki standart kabul değerleriyle uyumlu olan ANSYS malzeme kütüphanesinden doğrudan tanımlanmıştır.

Sayısal analizler, SLM yöntemiyle üretilmesi öngörülen 316L bileşenin teorik performansını değerlendirmek üzere kurgulanmıştır. Simülasyon parametreleri, literatürde bu alaşım için optimize edilmiş standart üretim değerleri lazer gücü olarak 200 W, tarama hızı 1000 mm/s, ve katman kalınlığı 30 μ m esas alınarak belirlenmiştir. Analizlerin tutarlılığını sağlamak amacıyla, malzemenin gözeneksiz ve tam yoğunlukta olduğu varsayılmış, toz boyutu 15 ve 45 μ m ebatları arasında ve standart gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanmış değerler referans alınmıştır.

SLM yöntemiyle üretilen metal bileşenlerin katmanlar arası termal gradyanlara ve üretim yönüne bağlı olarak anizotropik mekanik davranış sergilediği bilinmektedir. Ancak bu çalışmada, iki farklı malzemenin topoloji optimizasyonu sonrasındaki performanslarını doğrudan ve standart bir zemin üzerinde karşılaştırmak adına izotropik malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, tasarımın ana iskeletini ve yük aktarım karakteristiğini belirlemek adına bir temel analiz olarak kurgulanmıştır. Analizlerde lineer elastik malzeme davranışı esas alınmış ve akma kriteri olarak otomotiv bileşenlerinde yaygın kullanılan von Mises gerilme teorisi tercih edilmiştir. Gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü ve üretim yönüne bağlı mekanik değişimlerin etkileri, bu aşamada ideal simülasyon koşulları çerçevesinde sınırlandırılmış olup, bu faktörlerin tasarımın nihai doğrulaması aşamasında ele alınması bir araştırma kısıtı olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 1. 316L çeliği ve SAE 1045 malzemenin mekanik özellikleri

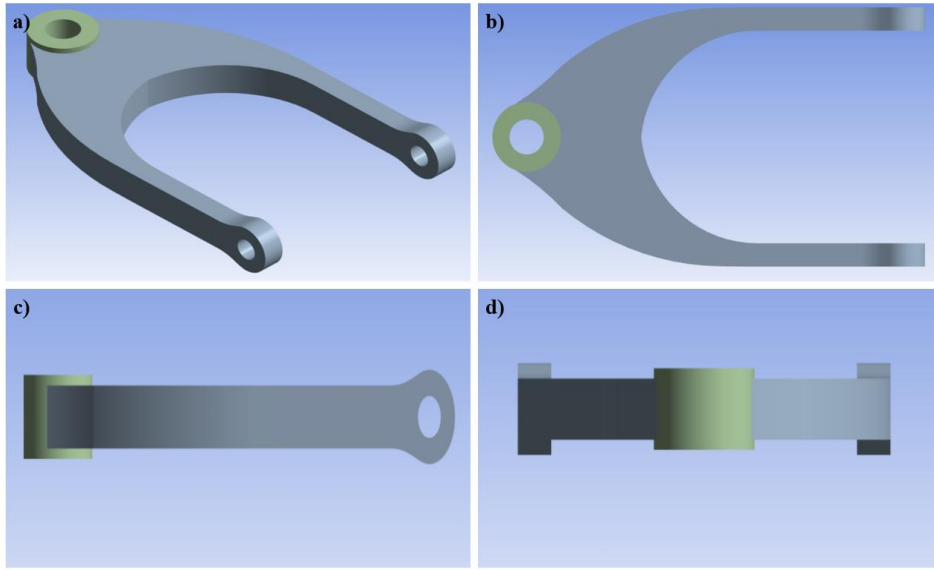
Özellik	316L Çeliği	SAE 1045 Çeliği
Yoğunluk (kg/m ³)	8000	7850
Young Modülü (GPa)	193	210
Poison Oranı	0,29	0,29
Akma Dayanımı (MPa)	300	400
Çekme Dayanımı – UTS (MPa)	560	585
Yorulma Sınırı – S _e (MPa)	210	300

2.3. 3D Modelleme ve Geometrik Ön İşlemler

Optimizasyon sürecinin ilk aşamasında kontrol kolu, FEA yazılımı modülü kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme stratejisi, SLM yönteminin üretim kabiliyetlerini ve kısıtlarını merkeze alacak şekilde kurgulanmıştır. Sayısal analiz öncesinde, CAD modeli üzerinde gerilme yığılmasına neden olabilecek keskin kenarlar ve gereksiz geometrik detaylar düzeltilerek yapı simülasyon için uygun hale getirilmiştir. Tasarımın SLM yöntemiyle üretilebilirliğini garanti

altına almak ve destek yapısı ihtiyacını minimize etmek amacıyla belirli eklemeli imalat dizayn kriterleri uygulanmıştır. Kritik sarkma açısı 45° olarak belirlenerek destek yapısı ihtiyacı en aza indirilmiştir. Parçanın yapısal bütünlüğünü korumak adına minimum duvar kalınlığı 1 mm değerinin üzerinde tutulmuştur. İç boşluklarda ve kanallarda hapsolmuş tozların kolayca tahliye edilebilmesi için kapalı hücre yapılarından kaçınılmıştır.

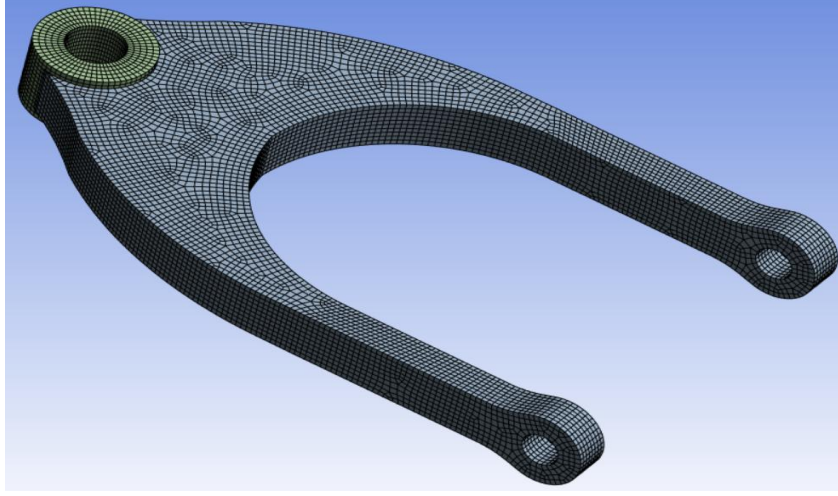
Bu tasarım kuralları, optimizasyon sonrası elde edilecek karmaşık geometrinin fiziksel üretim aşamasında yapısal hatalara yol açmamasını sağlamak amacıyla hem ön modellemede hem de optimizasyon sonrası düzenlemelerde temel referans olarak kullanılmıştır (Jiang ve diğ., 2018; D'Andrea, 2023).



Şekil 1:
*Süspansiyon üst kontrol kollarının perspektif görüntüleri;
a. İzometrik b. Üst c. Yan d. Arka*

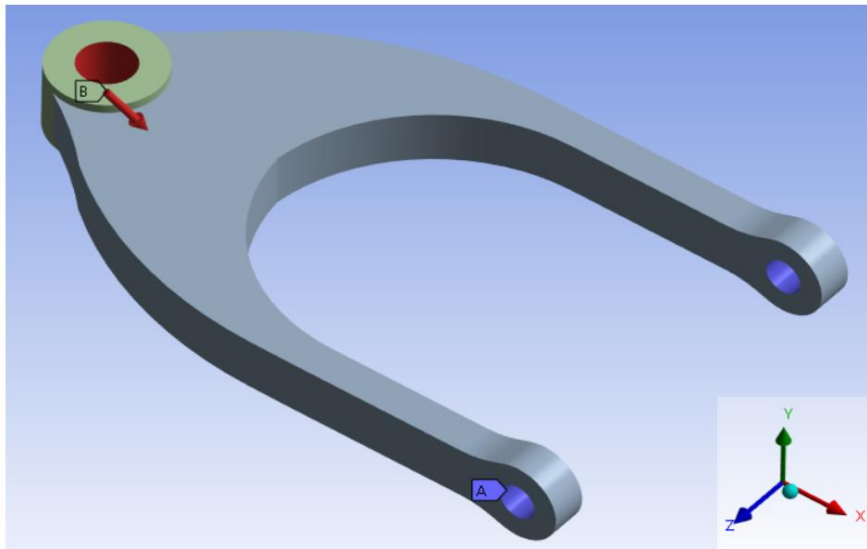
2.4. Sonlu Elemanlar Analizi ve Yükleme Koşulları

Mevcut çalışmada süspansiyon üst kontrol kolunun yapısal dayanımını incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Modelleme sürecinde gerilme dağılımını doğru yapmak ve çözüm kararlılığını artırmak için yüksek kaliteli bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Analizde altı yüzlü eleman üretimi ve düzenli eleman dağılımı sağlayan çok bölgeli ağ yapısı tercih kullanılmıştır. Bu yaklaşım, karmaşık fakat genel olarak prizmatik karakterdeki geometriler üzerinde altı yüzlü ağırlıklı eleman yapısı üretebilmekte böylece çözüm doğruluğunu ve hesaplama verimliliği yükseltilmektedir. Yine yukarıda bahsi geçen yöntem, modelin iç hacmini çeşitli bölgelere ayırıp, her bölgeyi düzenli bir şekilde tarayarak yüksek kalitede ve düşük bozulma oranına sahip elemanlar üretmektedir. Bunlar sayesinde çözüm doğruluğunun yanı sıra hesaplama verimliliği de optimize edilmiştir.



Şekil 2:
Parçanın ağ elemanları yapısı

Modelin sayısal doğruluğunu artırmak amacıyla, kontrol kolunun tamamı sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu olarak çözümlenmiştir. Ağ oluşturma sürecinde ortalama eleman boyutu 3 mm olarak belirlenmiş ve bununla birlikte multizone yöntemi, parçanın kritik bölgelerinde düzgün bir eleman dağılımı sağlamış, bu da deformasyon, gerilme yoğunlaşmaları ve yük aktarımı davranışlarının daha hassas şekilde yakalanmasına imkan vermiştir. Elde edilen elemanların kalite metrikleri ise analiz gerekliliklerini karşılamaktadır. Eleman kalite değeri ortalama 0,95 olup yüksek davranış doğruluğunu işaret etmektedir. Çarpıklık değeri 0,11 ile son derece düşük seviyede gerçekleşmiş, bu durum eleman deformasyonunun minimum olduğunu ve hesaplamanın kararlılığını artırdığını göstermektedir. Ayrıca en boy oranı ortalama 1,25 olarak elde edilmiş ve elemanların neredeyse kübik yapıda olduğunu, dolayısıyla yönsel sapmaların sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Bu ağ kalitesi, gerilme yoğunlaşmalarının doğru yakalanması, çözümün sayısal kararlılığı ve hesaplama verimliliği açısından yeterli görülmüş ve analizin temel girdilerinden biri olarak kullanılmıştır. Ayrıca düğüm ve eleman sayıları ise sırasıyla 160,000 ve 35,000 civarındır.



Şekil 3:
Parça yükleme koşulları

Süspansiyon üst kontrol kolunun yapısal davranışını temsil etmek amacıyla, bileşen üzerindeki yükler literatürde kabul gören statik tekerlek reaksiyon bileşenleri kullanılarak uygulanmıştır. Uygulanan sınır şartlarının konumları literatür çalışmalarının çoğunluğu ile örtüşüp yükleme büyüklükleri konusunda çalışmalar farklılık gösterse de bu büyüklüklere yakın değerler atanıp, aykırılık oluşturacak değerler tanımlanmamıştır. Bu doğrultuda, tekerleğe bağlanan küresel mafsallarda bir uzak nokta tanımlanmış ve tüm kuvvet bileşenleri bu noktaya aktarılmıştır. Modellemede koordinat sistemi Şekil 3' te de görüldüğü gibi, X ekseninin aracın sağına doğru, Y ekseninin yukarı doğru ve Z ekseninin modelden dışarı doğru pozitif olacak şekilde belirlenmiştir. Toplam yük, bu eksenlerdeki bileşenlerine ayrılarak uygulanmıştır yani Y doğrultusundaki yük -1000 N, tekerlek aracılığıyla kontrol koluna aktarılan düşey yöndeki araç ağırlığını ve yol tepki kuvvetlerini temsil etmektedir. Z doğrultusundaki kuvvet +500 N, aracın hızlanma veya frenleme anlarında kontrol koluna iletilen boyuna kuvvet bileşenini ifade etmektedir. X doğrultusundaki kuvvet yani +500 N ise, viraj alma sırasında lastik ve yol etkileşiminden kaynaklanan lateral kuvvetleri simüle etmektedir. Böylece, gerçek çalışma koşullarında yol yüzeyi, lastik teması ve süspansiyon hareketi sırasında oluşan kuvvet bileşenlerinin statik eşdeğer temsil edilmesi hedeflenmiştir (Peng, 2022; Vossou ve diğ., 2022; Lin ve diğ., 2025).

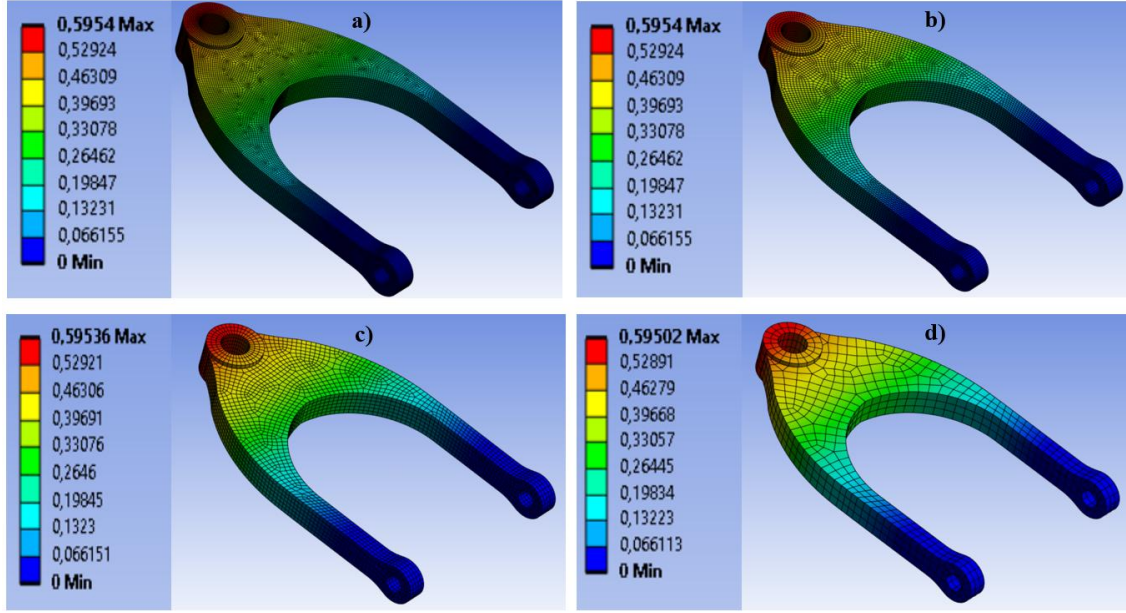
Şasi bağlantı noktalarını temsil eden iki silindirik bağlantı yüzeyi, parçanın araç gövdesine rijit olarak bağlı olduğu varsayımıyla sabit sınır şartı, sabit destek olarak modellenmiştir. Bu tanımlama, analiz modelinde parçanın yapısal rijitliğini ve optimizasyon eğilimlerini belirlemek amacıyla yapılmış bir basitleştirme değildir. Gerçekte bu noktalar kauçuk burçlar veya mafsallar aracılığıyla şasiye bağlandığından belirli derecelerde esneklik sergilemektedir. Ancak tamamen sabitlenmiş varsayımı, gerilme yığılmalarının bu bölgelerde olduğundan daha yüksek çıkmasına neden olabileceği de iki farklı malzemenin yani SAE 1045 ve 316L çeliklerinin aynı geometrik kısıtlar altında performansını kıyaslamak için muhafazakar ve tutarlı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım aynı zamanda kontrol kolunun yük aktarımı sırasındaki gerilme dağılımını ve kritik kesitlerdeki maksimum gerilme bölgelerini belirlemek amacıyla tercih edilmiştir.

Gerçek çalışma koşullarında süspansiyon kontrol kolları, frenleme, viraj alma ve dikey darbe gibi durumlar nedeniyle çok eksenli ve dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır. Ancak bu çalışmada, topoloji optimizasyonu sürecinde malzemenin en kritik zorlanma durumundaki davranışını ve kütle azaltma potansiyelini belirlemek amacıyla, literatürde kabul gören bir yöntem olan kombine statik yükleme senaryosu tercih edilmiştir. Bu senaryo, tekerlek merkezinden gelen boyuna, yanal ve düşey kuvvet bileşenlerinin eş zamanlı etki ettiği en zorlu statik durumu temsil etmektedir. Tek bir kombine senaryo üzerinden ilerlenmesi, tasarımın ana iskeletini belirlemek adına hesaplama verimliliği sağlasa da parçanın dinamik yükler altındaki tam performansı için gelecekteki çalışmalarda çoklu yükleme durumlarının incelenmesi bir gerekliliktir.

2.5. Ağ Bağımsızlık Analizi

Çalışmada, sonlu elemanlar analizlerinin ağ yoğunluğundan bağımsız olduğunu doğrulamak amacıyla bir ağ bağımsızlık testi yapılmıştır. Aynı model üzerinde 10 mm, 5 mm, 3 mm ve 2 mm eleman boyutları deneyerek maksimum gerilme ve yer değiştirme sonuçları karşılaştırıldı.

3 mm'lik ağ yapısından 2 mm'ye geçildiğinde, sonuçların ancak virgülden sonraki dördüncü basamakta değiştiği görüldü. Bu ufak fark, ağı daha fazla inceltmenin sonuçlarda anlamlı bir iyileşme sağlamadığını gösteriyor. Yapılan değerlendirmeler ışığında, çözüm hassasiyetine karşı hesaplama maliyeti arasında kurulan en uygun dengeyi veren 3 mm eleman boyutuna sahip modelin, tüm yapısal ve optimizasyon analizlerinde temel ağ yapısı olarak kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 4:
Farklı eleman boyutlarına sahip aynı parçanın yer değiştirme verileri
a. 2 mm b. 3 mm c. 5 mm d. 10 mm

Şekil 4’ te farklı ağ yoğunluklarına sahip aynı modelin yer değiştirme sonuçları gösterilmekte olup tüm meshlerde maksimum yer değiştirme değerinin aynı kalması, çalışmanın ağ bağımsızlığını sağladığını ve analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırdığını doğrulamaktadır.

2.6. Topoloji Optimizasyonu

Süspansiyon kontrol kolunun ağırlığını azaltmak amacıyla, FEA yazılımı bünyesinde yoğunluk tabanlı SIMP yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonun temel hedefi, belirlenen yükleme ve sınır koşulları altında yapısal rijitliği korurken toplam kütleyi minimize etmektir. Bu süreçte, model üzerindeki düşük gerilme yoğunluğuna sahip ve yapısal katkısı sınırlı olan bölgeler sistematik olarak çıkarılmıştır.

Analiz sürecinde malzeme yoğunluğu geçişlerini netleştirmek ve dama tahtası etkisini önlemek amacıyla ceza katsayısı, $p=3$, filtreleme yarıçapı ise ağ boyutunun 1,5 katı yani 4,5 mm olarak tanımlanmıştır. Yakınsama kriteri olarak iterasyonlar arası kütle ve enerji değişiminin %0,1’ in altına düşmesi hedeflenmiş, analiz süreci, kararlı geometrinin elde edildiği 50. iterasyon civarında sonlandırılmıştır. Sonuç olarak, geleneksel tasarıma kıyasla yapısal performans kriterlerini karşılayan ancak kütlesi önemli oranda azaltılmış optimize bir geometri elde edilmiştir.

2.7. Yorulma Analizi Metodu

Süspansiyon kontrol kolunun operasyonel ömrü boyunca maruz kalacağı döngüsel yükler altındaki dayanımını belirlemek amacıyla FEA yazılımı kullanılarak yorulma analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde stres vs ömür bir başka deyişle S-N yaklaşımı esas alınmış ve her iki malzeme için literatürde rapor edilen S-N eğrileri sisteme tanımlanmıştır. Ortalama gerilme düzeltilmesi için sünek metallerde yaygın olarak kullanılan Goodman teorisi tercih edilmiştir.

Yükleme tipi olarak tam tersinir senaryo uygulanmış ve SLM üretimi 316L parçası için yüzey pürüzlülüğü etkisi K_f 0,85 faktörü ile analize dahil edilmiştir. Elde edilen sayısal yorulma sonuçlarının güvenilirliğini teyit etmek amacıyla, kritik kesitlerdeki gerilme değerleri üzerinden Goodman denklemleri kullanılarak el hesaplamaları yapılmış ve yazılım çıktıları ile %2'den daha az bir sapma ile örtüştüğü doğrulanmıştır.

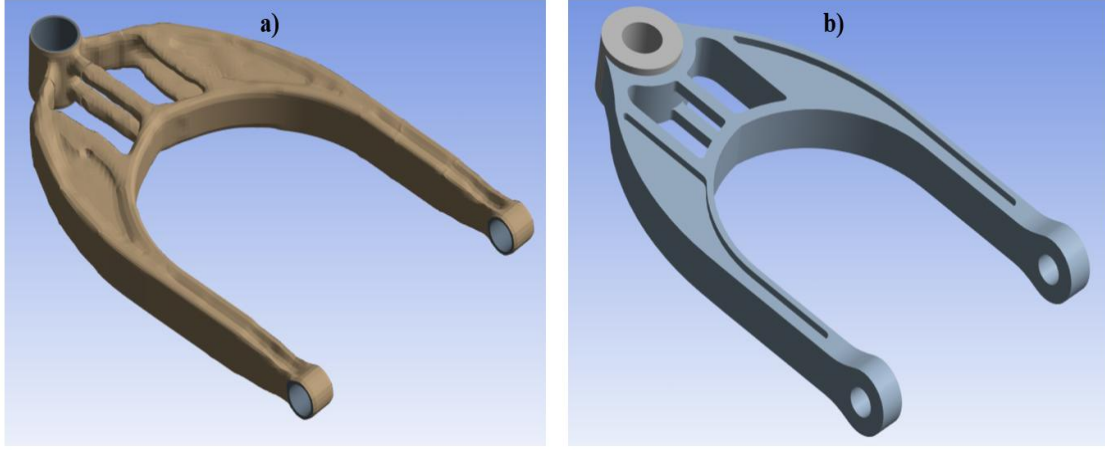
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatürde süspansiyon sistemleri ve elemanları üzerine yapılan optimizasyonlar incelenmiştir. Genel olarak ana hedeflerin en başında yakıt tüketimini azaltmak ve bu amaçla da parçaların kütlelerinde hafiflik elde etme hedeflenmiştir.

Hafif ticari bir aracın ön alt salıncağı üzerinde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çerçevesinde yapılmış bir çalışmada, çift fazlı ve kompleks fazlı çelik malzemeler tercih edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda, önceki tasarıma kıyasla %7,5 oranında bir hafifleme rapor edilmiştir. Kaya ve Ermiş tarafından yapılan çalışmada gerçekleştirilen tasarım değişikliği, malzeme maliyetlerini azaltmanın yanı sıra, aracın toplam ağırlığını düşürerek egzoz emisyonlarının da azalmasına katkıda bulunmuştur (Kaya ve Ermiş, 2023). Başka bir çalışmada, MacPherson tipi bir alt kontrol kolunun tasarımı ve topoloji optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Bu süreçte, 7075-T6 alüminyum ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımları kullanılarak optimize edilen tasarımda %38'e varan kütle azaltımı elde edilmiştir. Seçilen malzemelerin yüksek mukavemet özellikleri ve 3D metal baskı teknolojilerine uyumluluğu, üretim sürecinde önemli avantajlar sunmuştur (Maninas ve diğ., 2024). Gerçekleştirilen çalışmada Ti-6Al-4V alaşımıyla %38 oranında kütle azaltımı sağlanmış olsa da söz konusu malzeme otomotiv için yüksek maliyetlidir. Buna karşılık mevcut çalışmada kullanılan 316L paslanmaz çeliği daha düşük maliyetli ve korozyon direnci yüksek bir alternatif sunmaktadır. Başka bir araştırmada, otomotiv kontrol kolunun tasarımında çelik ve alüminyumun kombinasyonu kullanılarak çoklu malzeme topoloji optimizasyonu uygulanmıştır ve rijitlik iyileştirmeleri rapor edilmiştir (Kumar ve Jerome, 2022); mevcut çalışmada elde edilen rijitlik hafiflik dengesi de benzer şekilde deformasyon artışı ile kütle azalımı arasında bir denge kurulduğunu göstermektedir. Kumar ve Jerome tarafından uygulanan bu yöntem sayesinde, elde edilen tasarım geleneksel modellere kıyasla yapısal esneklikte %70,6' ya varan bir azalma sağlamıştır. Ayrıca, üretim kısıtlamaları göz önünde bulundurulduğunda, ekstrüzyon işlemlerinde %62,2, döküm yöntemlerinde ise %23,7 oranında uyum iyileştirmesi kaydedilmiştir. Dolayısıyla, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle tutarlı olmakla birlikte, 316L alaşımın otomotiv bileşenleri için uygulanabilirliği açısından özgün bir katkı sağlamaktadır.

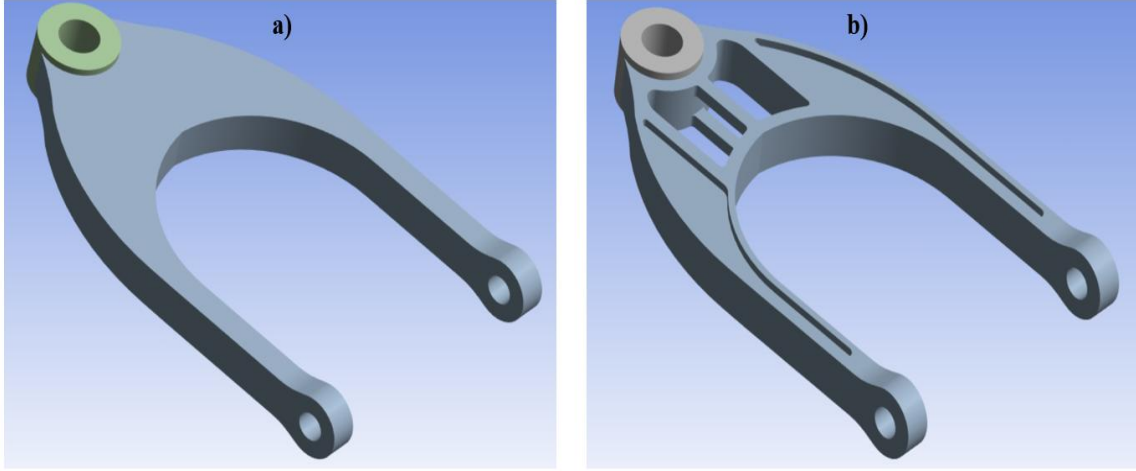
3.1. Topoloji Optimizasyonu Sonuçları

Optimizasyon sonucu incelendiğinde kontrol kolunun tekerleğe bağlandığı kısım yani büyük silindirik bölge etrafında boşaltmalar ve parça gövdesinden parçanın şasiye bağlandığı kısmı temsil eden küçük silindirlere doğru katmanlı bir azaltma görülmektedir. Çalışmanın ana amacı olan kütle azaltımı, SAE 1045 malzemesine sahip parçadan incelendiğinde ise parçanın yaklaşık 4,9 kg'a indirildiği belirlenmiştir. Optimizasyon öncesi parçanın 6,96 kg olduğu göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık olarak %30 oranında bir kütle azaltımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5:
Optimizasyon sonucu elde edilen parça
a. Düzenlenmemiş parça b. Düzenlenmiş parça

Optimizasyon sonrasında parça, temiz bir geometri elde etme açısından Şekil 4b’de görüldüğü üzere düzenlenmiş, ardından SAE 1045 ve 316 L paslanmaz çeliği her iki parça için de tanımlanıp yer değiştirme, gerilme dağılımı ve yorulma davranışlarını incelemek amacıyla karşılaştırmalı statik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6:
Parçalar
a. Optimize edilmemiş parça b. Optimize edilmiş parça

Çalışma boyunca dört farklı tasarım analiz edilmiştir. Çalışılan bu tasarımlar şu şekildedir.

- i) Optimize edilmemiş parçalar SAE 1045 çeliği ve 316L paslanmaz çeliği
- ii) Optimize edilmiş parçalar SAE 1045 çeliği 316L Paslanmaz çeliği

3.2. Karşılaştırmalı Analiz

Bu bölümde analiz sonuçları kütle, yer değiştirme ve gerilme dağılımı olarak 3 ayrı kısımda incelenmektedir.

3.2.1. Kütle

Tablo 2. Kütle tablosu

Parça Kondisyonu	Optimize değil		Optimize	
Malzeme	SAE 1045	316L	SAE 1045	316L
Kütle (kg)	6,96	7,05	4,9	4,96

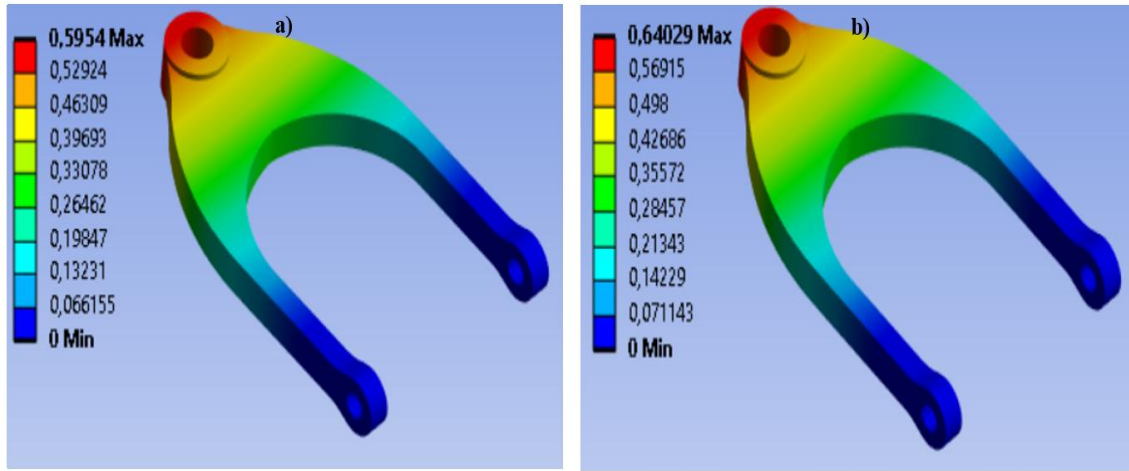
Kütle azaltımının ifade edildiği Tablo 2 incelendiğinde, optimize edilmiş parçalarda yaklaşık %30'luk bir azalma elde edilmiştir. Bu kütle azaltımının yanında optimize edilmiş her iki parça için de hafiflik sağlanmış fakat her iki kondisyonda da SAE 1045 çeliği 316L çeliğine göre %1,5 oranında daha hafif olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkılarak 316L çeliğinin de tıpkı SAE 1045 çeliğinin kullanıldığı süspansiyon kontrol kolu gibi hafiflik gerektiren alanlarda rekabetçi olabileceği düşünülmektedir. İki kondisyon için de kıyaslanabilir sonuçlar elde edilmiştir.

3.2.2. Yer Değiştirme

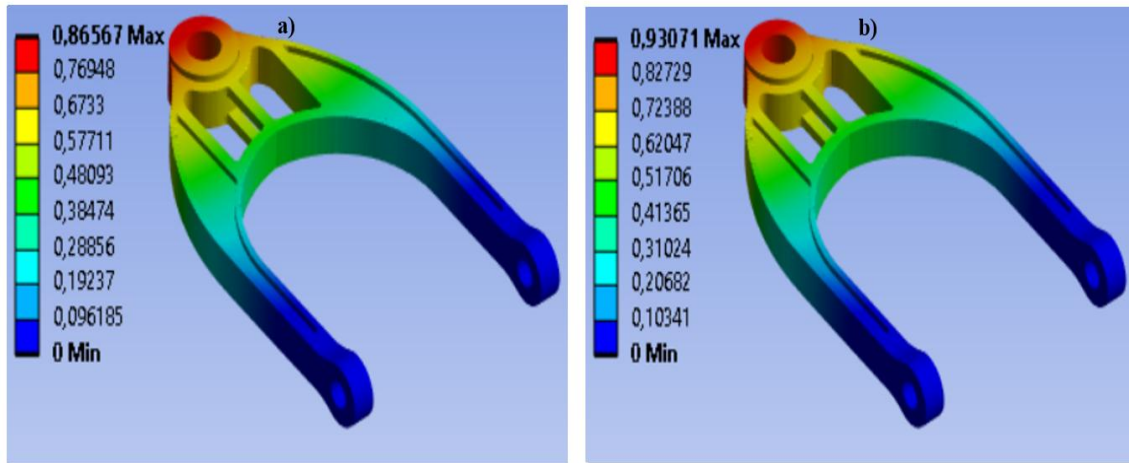
Tablo 3. Yer değiştirme tablosu

Parça Kondisyonu	Optimize değil		Optimize	
Malzeme	SAE 1045	316L	SAE 1045	316L
Maksimum Yer Değiştirme Değeri (mm)	0,59	0,64	0,86	0,93

Tablo 3 ile Şekil 7 ve 8'de sunulan yer değiştirme bulguları değerlendirildiğinde, topoloji optimizasyonu uygulanmış modellerde yaklaşık 0,3 mm civarında bir artış saptanmıştır. Bu durum, optimizasyon sürecinde yapıdan uzaklaştırılan malzemenin lokal rijitlikte yarattığı azalmanın beklenen bir sonucudur. Malzeme performansı açısından yapılan kıyaslamalarda, geleneksel yöntemlerle üretilen SAE 1045 çeliğinin, eklemeli imalat ile üretilen 316L çeliğine kıyasla her iki tasarım durumunda da (referans ve optimize) yaklaşık %9 oranında daha düşük yer değiştirme sergilediği görülmüştür. Ne var ki, 316L çeliğinin eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu zaman ve maliyet tasarrufu gibi stratejik avantajları, söz konusu mekanik farkı tolere edilebilir kılmaktadır. Sonuç olarak, 316L çeliğinin düşük deformasyon toleransı gerektiren uygulamalarda SAE 1045'e oldukça yakın bir yapısal performans sunduğu ve üretim yetenekleri göz önüne alındığında güçlü bir alternatif malzeme olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 7:
Optimize edilmemiş parçaların tanımlanan yükler altındaki yer değiştirme görüntüleri;
a. SAE 1045 b. 316L



Şekil 8:
Optimize edilmiş parçaların tanımlanan yükler altındaki yer değiştirme görüntüleri;
a. SAE 1045 b. 316L

3.2.3. Gerilme Dağılımı

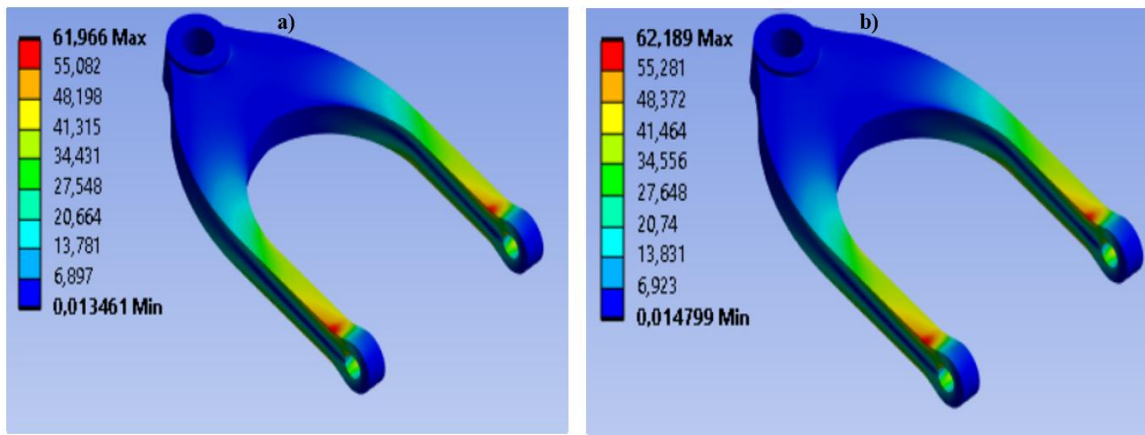
Tablo 4. Gerilme dağılım tablosu

Parça Kondisyonu	Optimize değil		Optimize	
Malzeme	SAE 1045	316L	SAE 1045	316L
Maksimum Gerilme Değeri (MPa)	61,97	62,19	113,4	114,3

Tablo 4, Şekil 9 ve Şekil 10’da sunulan von Mises gerilme verileri incelendiğinde, topoloji optimizasyonu sonucunda her iki malzeme için de maksimum gerilme değerlerinde yaklaşık %83 oranında bir artış gözlemlenmiştir. SAE 1045 çeliğinde maksimum gerilme 61,97 MPa’dan 113,4

MPa'ya yükselirken, 316L paslanmaz çelikte bu değer 62,19 MPa'dan 114,3 MPa'ya çıkmıştır. Gerilme değerlerindeki bu yükseliş, kütle azaltımı amacıyla yapıdan malzeme çıkarılmasının rijitliği düşürmesinin doğal bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

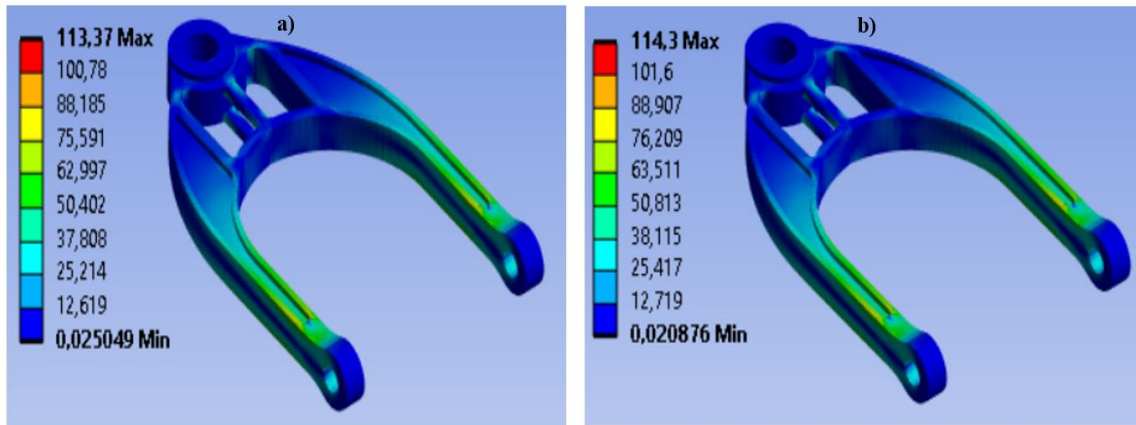
Maksimum gerilme değerlerindeki artışa rağmen, her iki malzemenin de yapısal bütünlüğünü koruduğu saptanmıştır. Malzemelerin akma dayanımları, SAE 1045 için 400 MPa, 316L için 300 MPa, dikkate alındığında, ulaşılan en yüksek gerilme seviyelerinin bile akma sınırlarının oldukça altında kaldığı görülmektedir. Statik emniyet katsayısı açısından yapılan hesaplamalarda, optimize edilmiş 316L kontrol kolu için $SF \approx 2,62$, SAE 1045 için ise $SF \approx 3,52$ değerleri elde edilmiştir. Otomotiv süspansiyon bileşenleri için literatürde kabul gören 1,5 ile 2,5 arasındaki emniyet sınırları göz önüne alındığında, tasarımın yüksek bir güvenilirlik marjına sahip olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 9:

Optimize edilmemiş parçaların tanımlanan yükler altındaki gerilme dağılımı;

a. SAE 1045 b. 316L



Şekil 10:

Optimize edilmiş parçaların tanımlanan yükler altındaki gerilme dağılımı;

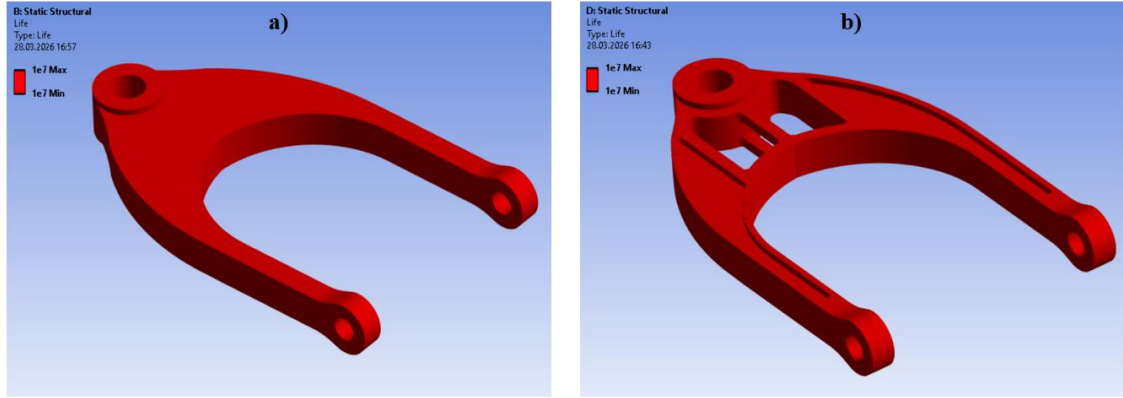
a. SAE 1045 b. 316L

Malzeme özellikleri bağlamında yapılan değerlendirmelerde, SAE 1045 çeliğinin 316L paslanmaz çeliğine kıyasla gerilme değerlerinde yaklaşık %1'lik bir düşüş gösterdiği ve bu yönüyle sınırlı bir mekanik üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, optimizasyon sonrası her iki malzemede gözlemlenen gerilme ve yer değiştirme artış ivmelerinin yüksek oranda benzerlik göstermesi, kullanılan topoloji optimizasyonu algoritmasının malzeme tipine duyarsız

ve kararlı bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır. Nihai olarak, 316L çeliğinin gerilme davranışı bakımından konvansiyonel SAE 1045 çeliğine eşdeğer bir profil sunması ve eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı operasyonel kazanımlar dikkate alındığında, söz konusu malzemenin otomotiv endüstrisi uygulamaları için oldukça rekabetçi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

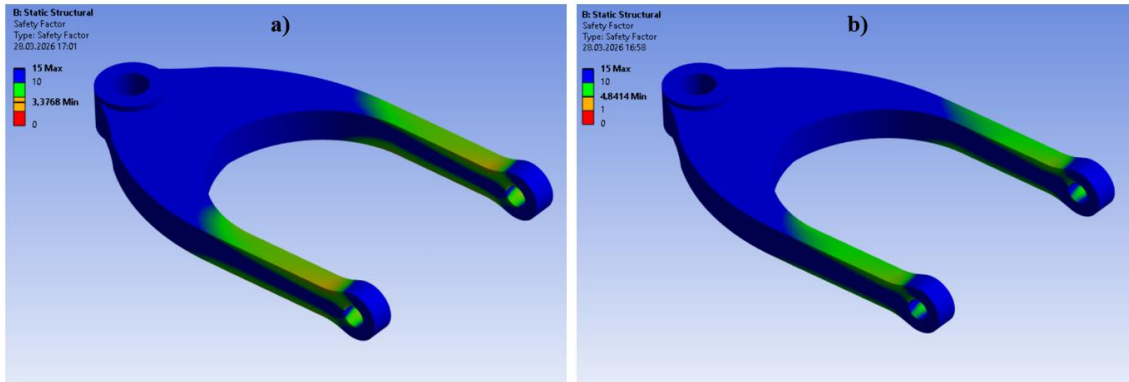
3.2.4. Yorulma Analizi Bulguları

Yapılan yorulma analizi sonucunda, her iki malzemenin de 1×10^7 çevrimlik sonsuz ömür beklentisini başarıyla karşıladığı saptanmıştır.

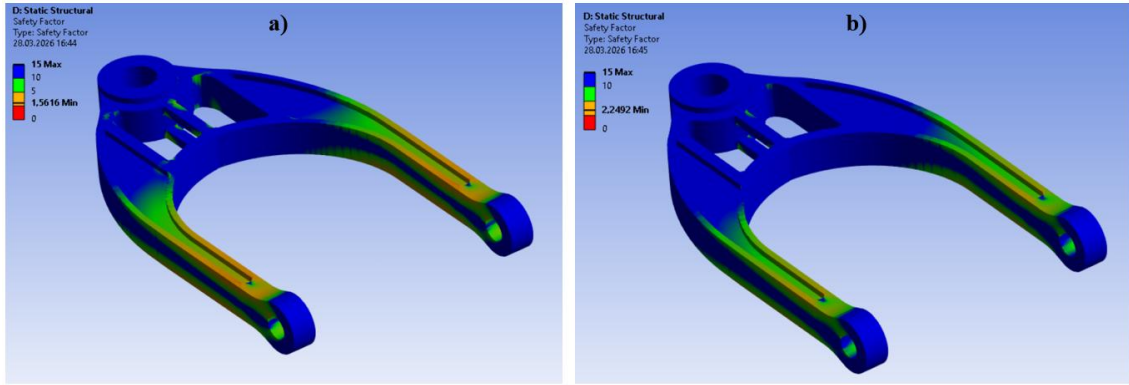


*Şekil 11. Yorulma ömrü verileri,
a) Optimize edilmemiş parça, b) Optimize edilmiş parça*

Analiz sonuçlarına göre, hem referans SAE 1045 çeliği hem de optimize edilmiş 316L paslanmaz çelik tasarımı, uygulanan kombine yük senaryosu altında 1×10^7 çevrimlik hedefi başarıyla tamamlamıştır (Şekil 11). Mühendislik literatüründe sonsuz ömür olarak kabul edilen bu değer, parçanın çalışma ömrü boyunca yorulma kaynaklı bir çatlak oluşma riskinin bulunmadığını göstermektedir. Maksimum von Mises gerilmelerinin, her iki malzemenin de yorulma dayanım sınırlarının altında kalması, bu sonucun temel gerekçesidir.



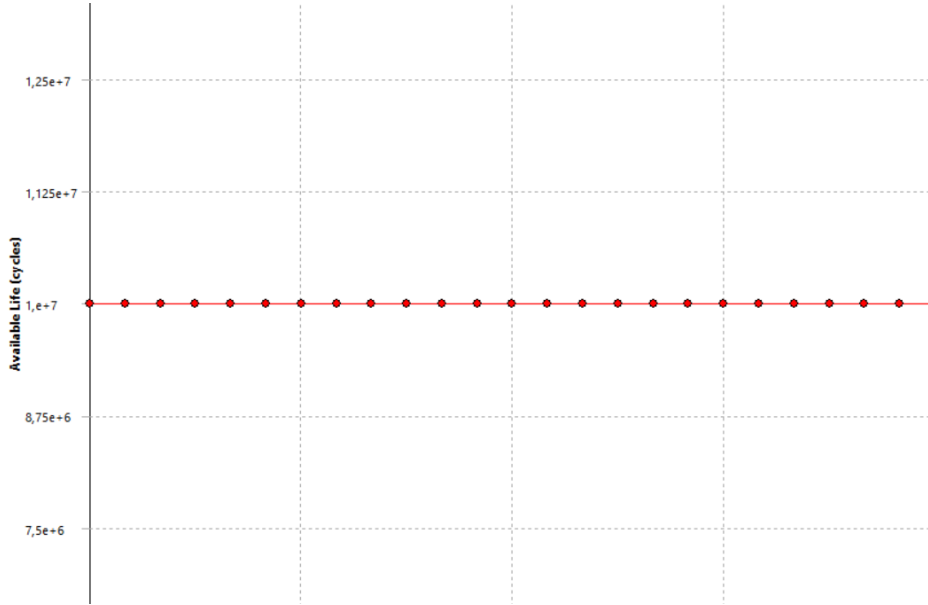
*Şekil 12. Optimize edilmemiş parçaların yorulma analizi sonucu elde edilen emniyet katsayısı verileri:
a) 316L, b) SAE 1045*



Şekil 13. Optimize edilmiş parçaların yorulma analizi sonucu elde edilen emniyet katsayısı verileri:

a) 316L, b) SAE 1045

Parçaların yorulma dayanım sınırlarının maruz kaldıkları gerilmelere oranı olan emniyet katsayısı dağılımı Şekil 12 ve 13'te sunulmuştur. SAE 1045 çeliği, daha yüksek yorulma dayanımı sayesinde 2,2492 minimum emniyet katsayısı sergilerken, optimize edilmiş 316L bileşeni için bu değer 1,5616 olarak hesaplanmıştır. Otomotiv endüstrisinde süspansiyon bileşenleri için genellikle 1,5 eşik değerinin güvenli kabul edildiği dikkate alındığında, 316L tasarımının dinamik yükler altında yüksek bir emniyet seviyesine sahip olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 14. Optimize edilmiş 316L kontrol kolunun yorulma hassasiyeti grafiği.

Tasarımın yük değişimlerine karşı dayanıklılığını ölçmek amacıyla yapılan hassasiyet analizi sonucunda, nominal yüklerin %150 oranında artırıldığı senaryolarda dahi parçanın sonsuz ömür özelliğini koruduğu saptanmıştır, Şekil 14. Grafikteki yatay seyir, tasarımın operasyonel yük dalgalanmalarına karşı duyarsız olduğunu ve beklenmedik aşırı yüklemelerde dahi yapısal kararlılığını sürdüreceğini kanıtlamaktadır.

Yorulma analizi sonuçları bütünsel olarak değerlendirildiğinde, topoloji optimizasyonu ile sağlanan %30'luk kütle tasarrufunun, parçanın yorulma ömründen büyük bir ödün verilmesine neden olmadığı görülmektedir. Her ne kadar geleneksel SAE 1045 çeliği daha yüksek bir emniyet

rezervi sunsa da SLM yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliğinin 1,56'lık emniyet katsayısı ile sonsuz ömür beklentisini sağlaması, bu malzemenin eklemeli imalatın sunduğu tasarım esnekliğiyle birleştiğinde otomotiv sektörü için son derece güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuçlara göre, optimizasyon uygulanmamış durumda SAE 1045 çeliği, kütle, yer değiştirme, gerilme ve yorulma değerleri açısından küçük bir farkla daha iyi bir performans göstermektedir. Optimize edilmiş parçalar arasında da SAE 1045 çeliğinin bu kriterler açısından avantajlı olduğu görülmüştür. Mekanik performans kriterleri baz alındığında SAE 1045 çeliği, yüksek young modülü ve akma dayanımı sayesinde rijitlik ve statik mukavemet açısından 316L paslanmaz çeliğine göre sınırlı bir üstünlük sergilemektedir. Ancak otomotiv endüstrisi için kritik olan diğer parametreler değerlendirildiğinde, 316L paslanmaz çeliğinin sünek yapısı ve yüksek enerji sönümleme kapasitesi, darbe emniyeti açısından avantaj sağlayabilir. Ayrıca, SLM yöntemiyle üretilen 316L'nin ince taneli mikroyapısal özellikleri, yorulma çatlağı ilerlemesine karşı direnci artırarak döngüsel yükler altında rekabetçi bir ömür sunma potansiyeline sahiptir. SAE 1045 çeliği geleneksel üretimde düşük maliyetli ve güvenilir bir çözüm sunsa da 316L'nin eklemeli imalat ile sağladığı tasarım esnekliği, titreşim karakteristiklerinin optimize edilmesine imkan tanıyarak araç konforuna katkıda bulunabilir. Bu durum, günümüz itibarıyla yenilikçi imalat yöntemlerinin de geleneksel üretim yöntemleriyle rekabet edebilecek seviyeye ulaştığını göstermektedir. 316L paslanmaz çelik, mekanik performans açısından değil, aynı zamanda tasarım esnekliği, karmaşık geometrilerin üretimi, hızlı prototipleme ve malzeme israfının minimize edilmesi gibi süreçleri beraberinde getirmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv süspansiyon sistemlerinde kullanılan bir üst kontrol kolu, geleneksel SAE 1045 çeliği ve eklemeli imalat SLM yöntemine uygun 316L paslanmaz çeliği temel alınarak topoloji optimizasyonu ve sayısal analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Elde edilen temel bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Yoğunluk tabanlı topoloji optimizasyonu SIMP sonucunda, kontrol kolunun yapısal bütünlüğü ve taşıma kapasitesi korunarak kütlede %30 oranında bir azalma sağlanmıştır. Bu sonuç, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü ile otomotiv hafifletme hedeflerine önemli bir katkı sunmaktadır.

SAE 1045 çeliği, yüksek young modülü ve akma dayanımı sayesinde rijitlik ve gerilme dağılımı açısından 316L paslanmaz çeliğine göre sınırlı bir performans avantajı sergilemiştir. Ancak 316L bileşeninde gözlemlenen maksimum von Mises gerilmeleri, malzemenin akma sınırının oldukça altında kalarak güvenli mühendislik limitleri dahilinde kalmıştır.

Gerçekleştirilen yorulma analizleri, her iki tasarımın da en zorlu yükleme senaryosu altında 1×10^7 çevrimlik sonsuz ömür beklentisini karşıladığını doğrulamıştır. SAE 1045 için 2,2492 olan yorulma emniyet katsayısı, optimize edilmiş 316L tasarımı için 1,5616 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 316L'nin dinamik yükler altında güvenilir bir alternatif olduğunu kanıtlamaktadır.

Çalışmanın özgünlüğü, otomotiv kontrol kolu özelinde geleneksel ve yenilikçi malzeme çözümlerinin aynı geometrik kısıtlar altında doğrudan kıyaslanmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen veriler, 316L paslanmaz çeliğinin eklemeli imalat avantajları ile birleştiğinde geleneksel çeliklere karşı güçlü bir rakip olduğunu göstermektedir.

Mevcut çalışma, kombine statik eşdeğer yükleme senaryosu ile sınırlandırılmış olsa da gelecekte çoklu yükleme durumlarının incelenmesi ve deneysel prototip doğrulamalarının yapılması tasarımın gerçek dünya performansını daha kapsamlı bir şekilde ortaya koyacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Murat Işık çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yorumlanmasında, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesinde, son onay ve sorumluluk alınmasında, Ali Yağız Özyılmaz veri toplamada, veri analizi ve yorumlamada, makale taslağının oluşturulmasında ve sorumluluk alınmasında görev almıştır.

KAYNAKLAR

1. Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71(2), 197-224, DOI: 10.1016/0045-7825(88)90086-2
2. Chen, J., Wei, H., Bao, K., Zhang, X., Cao, Y., Peng, Y., ... & Wang, K. (2021). Dynamic mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by an additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 170-179, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.097
3. D'Andrea, D. (2023). Additive manufacturing of AISI 316L stainless steel: a review. *Metals*, 13(8), 1370, DOI: 10.3390/met13081370
4. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in materials science*, 92, 112-224, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
5. Demirdogen, C., Ridge, J., Pollock, P., & Anderson, S. (2004). *Weight optimized design of a front suspension component for commercial heavy trucks* (No. 2004-01-2709). SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2004-01-2709
6. Euser, V. K., Jones, D. R., Martinez, D. T., Valdez, J. A., Trujillo, C. P., Cady, C. M., & Fensin, S. J. (2023). The effect of microstructure on the dynamic shock response of 1045 steel. *Acta Materialia*, 250, 118874, DOI: 10.1016/j.actamat.2023.118874
7. Gardan, J. (2017). Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *Additive Manufacturing Handbook*, 149-168, DOI: 10.1201/9781315119106
8. Gündüz, S., & Acarer, M. (2006). The effect of heat treatment on high temperature mechanical properties of microalloyed medium carbon steel. *Materials & design*, 27(10), 1076-1085, DOI: 10.1016/j.matdes.2005.01.020
9. Hassan, H. Z., & Saeed, N. M. (2024). Advancements and applications of lightweight structures: a comprehensive review. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 47, DOI: 10.1007/s44290-024-00049-z
10. Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support structures for additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64, DOI: 10.3390/jmmp2040064
11. Kaya, C., & Ermis, K. (2023). Topology Optimization of Leaf Spring Brackets in Truck Suspensions. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 12(1), 2285-2290.
12. Kumar, A., & Jerome Stanley, M. (2022). Design, Topology Optimization and Fabrication of a Semi-trailing Arm for an Off-Road Vehicle Using Optistruct. In *Energy and Exergy for*

- Sustainable and Clean Environment, Volume 1* (pp. 557-569). Singapore: Springer Nature Singapore, DOI: 10.1007/978-981-16-8278-0_36
13. Lee, D. C., & Lee, J. I. (2003). Structural optimization concept for the design of an aluminium control arm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(8), 647-656, DOI: 10.1243/095440703606920
 14. Lin, R., Zhan, X., & Li, X. (2025). Topology Optimization Design of Automotive Suspension Control Arm. *Engineering Reports*, 7(5), e70188, DOI: 10.1002/eng2.70188
 15. Reitz, W. (2006). A Review of: "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel" JC Lippold and DJ Kotecki, John Wiley and Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ, 07030, 2005, 360 pages, ISBN 0471473790, DOI: 10.1080/10426910500476747
 16. Liu, X., Zhang, S., Bao, Y., Zhang, Z., & Yue, Z. (2022). Strain-controlled fatigue behavior and microevolution of 316L stainless steel under cyclic shear path. *Materials*, 15(15), 5362, DOI: 10.3390/ma15155362
 17. Lukoševičius, V., Makaras, R., Rutka, A., Keršys, R., Dargužis, A., & Skvireckas, R. (2021). Investigation of vehicle stability with consideration of suspension performance. *Applied sciences*, 11(20), 9778, DOI: 10.3390/app11209778
 18. MANINAS, N., PAPANTONIOU, I., & Vaxevanidis, N. M. Design, analysis and topology optimization of a car's suspension lower control arm. *Materials Research Proceedings*, 46, DOI: 10.21741/9781644903377-50
 19. Nelson, E. A. (2003). *Draw Direction Constraints in Topology Optimization-A Practical Example* (No. 2003-01-1306). SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2003-01-1306
 20. Peng, Y. (2022, April). Topological Optimization of Automobile's Control Arm. In *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)* (pp. 1610-1615). IEEE, DOI: 10.1109/IPEC54454.2022.9777504
 21. Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia manufacturing*, 30, 11-18, DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.003
 22. Puchi Cabrera, E. S. (2001). High temperature deformation of 316L stainless steel. *Materials science and technology*, 17(2), 155-161, DOI: 10.1179/026708301101509944
 23. Rozvany, G. I., Zhou, M., & Birker, T. (1992). Generalized shape optimization without homogenization. *Structural optimization*, 4(3), 250-252, DOI: 10.1007/BF01742754
 24. Singh, S., Samir, S., Kumar, K., & Thapa, S. (2021). Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5097-5101, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.590
 25. Smarzewski, P., & Stolarski, A. (2022). Properties and performance of concrete materials and structures. *Crystals*, 12(9), 1193, DOI: 10.3390/cryst12091193
 26. Tang, L., Wu, J., Liu, J., Jiang, C., & Shangguan, W. B. (2014). Topology optimization and performance calculation for control arms of a suspension. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 734568, DOI: 10.1155/2014/73456
 27. Thompson, S. W., Parthasarathi, V., & Findley, K. O. (2021). A comparison of bending-fatigue properties of surface-induction-hardened SAE 1045 bar steels with and without vanadium and the influence of comparable low-temperature induction-tempering and furnace-tempering treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 807, 140812, DOI: 10.1016/j.msea.2021.140812
 28. Vossou, C., Nakos, A., & Koulocheris, D. (2022, December). Topology optimization of a MacPherson control arm. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1271, No. 1, p. 012013). IOP Publishing, DOI: 10.1088/1757-899X/1271/1/012013

29. Yang, R. J., Chuang, C. H., Che, X., & Soto, C. (2000). New applications of topology optimisation in automotive industry. *International Journal of Vehicle Design*, 23(1-2), 1-15, DOI: 10.1504/IJVD.2000.001878
30. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4), DOI: 10.1063/1.4935926