



Raylı Sistem Araçlarının Koşum Takımı Üzengisi için Topoloji Optimizasyonu Uygulaması

Emre ULUSOY¹, Mert İSTEK¹, Mustafa GÜNAY^{*2}

¹ Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

*mgunay@karabuk.edu.tr

(Alınış/Received: 31.05.2022, Kabul/Accepted: 30.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Yük ve yolcu taşımacılığında kullanılan raylı sistem araçlarının (vagon, lokomotif, tren vb.) birlikte hareket edebilmesini sağlayan bağlantı ekipmanlarının genel adı koşum takımıdır. Koşum takımları, araçlara gelen statik yüklerin iletimini sağlamanın yanı sıra elektriksel ve hava bağlantılarının aktarılmasında görevli olup, sistemi oluşturan elemanların tasarımı ve imalatı çeşitli standartlara göre yapılmaktadır. Diğer yandan, lojistik sektöründe daha hızlı ve aynı zamanda güvenli taşımacılık açısından araçları oluşturan tüm parçaların hafifletilmesi önemlidir. Bu çalışmada, minimum ağırlıkta ve yüksek performanslı parçaların tasarımında etkili bir araç olan topoloji optimizasyonu ile koşum takımı elemanlarından üzenginin tasarımı iyileştirilerek ağırlığının azaltılması hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonunda yoğunluk yöntemi olarak da bilinen cezalandırılmalı katı izotropik malzeme (SIMP) yönteminden faydalanılmıştır. Öncelikle, standarda uygun olarak modellenen koşum takımı üzengisine 120 kN ve 150 kN yükleme durumları için sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Daha sonra, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen model için aynı şartlarda FEA uygulanarak gerilme dağılımları ve yer değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır. Her iki yükleme durumu için en yüksek Von Mises gerilmesi sırasıyla 176,30 MPa ve 220,40 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yeni tasarım üzengiler için en yüksek yer değiştirme miktarları 0,23 mm ve 0,28 mm olarak hesaplanmış olup, bu değerler ilgili standartta belirtilen sınırlar içindedir. Sonuç olarak, topoloji optimizasyonu başarıyla uygulanarak üzenginin kütlesi %9,04 azaltılmıştır. Ayrıca, topoloji optimizasyonu ile geliştirilen model geometrisindeki karmaşıklıklardan dolayı üzenginin eklemeli imalat teknolojisiyle üretiminin daha elverişli olduğu kanaatine varılmıştır. Tüm sonuçlar, topoloji optimizasyon metodolojisinin raylı sistem araçlarının ağırlığının azaltılmasında güvenle uygulanabileceğini ve böylece sürdürülebilirliğe önemli katkılar verilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Koşum takımı, Topoloji optimizasyonu, SIMP yöntemi, FEA, Eklemeli imalat

Topology Optimization Application for Coupling Link of Rail System Vehicles

Abstract: Coupling link is the general name of the connection equipment that enables the rail system vehicles (wagon, locomotive, train, etc.) used in freight and passenger transportation to move together. Coupling links are responsible for the transmission of static loads coming to the vehicles, as well as the transfer of electrical and air connections, and the design and manufacture of the elements that make up the system are made according to various standards. On the other hand, it is important to lighten all the parts that make up the vehicles in terms of faster and at the same time safe transportation in the logistics sector. In this study, it is aimed to reduce the weight by improving the design of the coupling link, which is one of the hook coupling elements, with topology optimization. Penalized solid isotropic material (SIMP) method, also known as density method, was used in topology optimization. Firstly, finite element analysis was applied to the coupling link modeled in accordance with the standard for 120 kN and 150 kN loading conditions. Then, stress distributions and displacements were compared by applying FEA under the same conditions for the model developed with topology optimization. The highest Von Mises stresses for both loading conditions were obtained as 176,30 MPa and 220,40 MPa, respectively. In addition, the highest displacement amounts for the new design coupling links are calculated as 0,23 mm and 0,28 mm, and these values are within the limits specified in the relevant standard. As a result, the mass of coupling link was reduced by 9,04% by successfully applying the topology optimization. In addition, it has been concluded that the coupling link is more convenient to manufacture with additive manufacturing technology due to

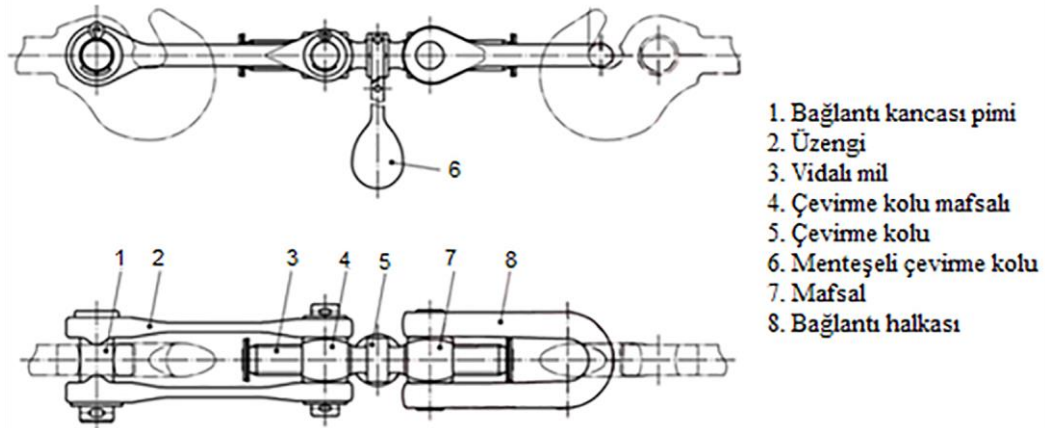
Atıf için/Cite as: E. Ulusoy, M. İstek, M. Günay, "Raylı sistem araçlarının koşum takımı üzengisi için topoloji optimizasyonu uygulaması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 139-152, July. 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1123977

the complexity in the geometry of the model developed with topology optimization. All results show that the topology optimization methodology can be safely applied in reducing the weight of rail system vehicles, thus making significant contributions to sustainability.

Keywords: Coupling link, Topology optimization, SIMP method, FEA, Additive manufacturing

1. Giriş

Raylı sistemlerde yolcu ve yük taşımacılığı her geçen gün gelişen bir lojistik sektörü olup, teknolojik gelişmeler ile birlikte taşımacılığın daha hızlı ve güvenli yapılması hedeflenmektedir. Bu sektörde araçlar (vagon, lokomotif, tren vb.), çeken-çekilen ve birleşik setler halinde hizmet vermektedir. Bu araçların birbirine bağlanması ve araçlar arasında hareket-fren kuvvetlerinin aktarılması için çeşitli bağlantı ekipmanları veya koşum takımları kullanılır [1]. Bu ekipmanlar, özellikle çeken-çekilen araçlar arasında hareketin doğrudan aktarılmasını sağlamakta olup, genellikle statik yüklere maruz kalmaktadır [2]. Koşum takımları, diğer adıyla cer tertibatları bu görevlerine ek olarak araçlarda çarpışmayı önleyebilmek amacıyla tampon görevi, elektriksel ve hava bağlantılarının aktarılması gibi işlemlerde görev almaktadır. Bu tertibatlar genel olarak kanca kavramalı, yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere üç farklı sistematığe sahiptir. Kanca kavramalı koşum takımı manuel olarak çalıştırılan mekanik bir yapıda olup, araçlar arası bağlantı ve ayrılma işlemlerinin bir görevli tarafından gerçekleştirildiği tertibatlardır. Yarı otomatik sistemde, iki araç birbirine yaklaştığında otomatik olarak bağlantı işlemi gerçekleşirken, ayrılma işlemi ise bir görevli tarafından yapılır. Tam otomatik sistemlerde, bağlantı işlemi iki araç belirli bir mesafede birbirine yaklaştığında, ayrılma işlemi ise araç içindeki butonlar yardımıyla otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Yani, vagon, lokomotif, tren vb. demiryolu araçları/birimleri tamamen durdurulmadan birbirlerine bağlanabildiği için bu sistemler dinamik koşum takımları olarak da isimlendirilmektedir [3]-[5]. Raylı sistem araçlarının birleştirilmesini sağlayan kanca kavramalı koşum takımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların bağlantı ve/veya ayrıştırılması için ilave demiryolu personeline ihtiyaç vardır [6]. Kanca kavramalı koşum takımı, temel olarak; kanca, bağlantı üzengisi, vidalı mil, çevirme kolu ve bağlantı halkası elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 1'de kanca kavramalı koşum takımının ana kısımları gösterilmiştir.



Şekil 1. Kanca kavramalı koşum takımı [7]

Demiryolu araçlarını birbirine bağlayan sistem çekme dişlisi, çekme kancası ve koşum takımından oluşur. Demiryolu aracının çekme kancasıyla bağlanmasında kullanılan mekanik sistem ise koşum takımınıdır. Raylı sistem araçlarının işletimleri sırasında oluşan frenleme, hızlanma, çarpışma vb. durumlarda, koşum takımı elemanları çeşitli statik ve/veya dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükler, aynı zamanda tampon görevi üstlenen koşum takımı elemanları üzerinde sönmölemeye maruz kalır [7]. Bu bağlamda, koşum takımı elemanları en

kritik yapı parçaları olarak düşünülmekte olup, elemanların güvenilirliği ön plana çıkmaktadır [8]. Bununla birlikte, demiryolu taşımacılığının artmasıyla trenler daha hızlı seyahat etmekte ve daha fazla insan ve/veya eşya taşımakta ve bu nedenle güvenilirlik daha da önemli hale gelmiştir. Trende meydana gelen herhangi bir arıza, önemli maddi kayıplara ve en kötü durumda can kaybına bile neden olabilir [9]-[11]. Koşum takımı elemanları EN15566 standardında belirtilen mukavemet ve ölçü toleranslarında çeşitli çelik malzemelerden dövme ve talaşlı imalat yöntemleri uygulanarak üretilmektedir. Ancak, endüstriyel ürünlerin hammaddeden kullanılabilir duruma gelmesinde uygulanan tüm süreçler sürdürülebilirlik açısından gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu noktada, malzeme, tasarım ve imalat yöntemi gibi parça maliyetine doğrudan etki eden faktörlerin iyileştirilmesi günümüz araştırma-geliştirme faaliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve maliyetlerin düşürülmesi açısından, parça tasarımı sırasında öncelikle kullanılan hammaddenin azaltılması hedeflenmektedir. Aynı zamanda, genellikle tasarlanan parçaların ve/veya sistemlerin en düşük hacimle en iyi mukavemeti göstermesi beklenmektedir [12]. Bu performans kriterleri kapsamında parçaya uygulanacak olan optimizasyonlar ile oluşturulan yeni parçanın en az malzeme kullanılarak sürdürülebilirliğe katkıda bulunması amaçlanır. Bu hedeflere ulaşmak için yapılabilecek uygulamalardan birisi topoloji optimizasyonudur [13]. Topoloji optimizasyonu (TO), aynı zamanda boyut ve şekil optimizasyonunu da içerdiğinden, yapısal tasarımda kullanılacak en kapsamlı yöntemdir [14]. TO, çeşitli tasarım parametrelerinin ele alınmasıyla optimize edilmiş bileşenler üretme sürecidir. Tasarım sırasında, optimal geometriler oluşturmak, maliyeti düşürmek ve tasarım hatalarının ortadan kaldırılması hedeflenir. Diğer yandan, geleneksel işleme süreçlerine kıyasla daha karmaşık CAD modelleri kullanılarak ürünün katman-katman oluşturulduğu eklemeli imalat (AM) teknolojisi TO sürecinin tamamlayıcı bir parçası haline gelmiştir. TO'nun eklemeli imalat teknolojileri ile entegrasyonu, montajdaki parça sayısını azaltarak hafif parçalar geliştirilmesi, bunun karşılığında maliyetin düşürülmesi ve malzemeden tasarruf edilmesini sağlamaktadır [15]. Öte yandan eklemeli imalat, yedek parça üretimi için gelecek vaat eden bir teknolojidir. Bunun nedeni, AM'nin takımlama gerektirmeden kısa sürede doğrudan üç boyutlu dijital modellerden parçaların üretilmesine izin vermesidir [16]. Bu teknoloji, geleneksel yöntemler kullanılarak parçaların üretilmesi için takımlama maliyetlerini ve süresini veya parçanın dış kaynak kullanımıyla ilişkili lojistik maliyetleri ve aksama süresini ortadan kaldırır. Yedek parçaları AM ile üretime uygun hale getiren farklı özellikler arasında değişken talep, teslimat süresinin kısaltılması ihtiyacı ve düşük hacimli üretim yer almaktadır [17].

Demiryolu araçları ve demiryolu altyapısı, yedek parçalar, hafif yapılar, bağlantı elemanları, fiktürler ve parça montajlarının yeni tasarımlarını oluşturmada ileri teknolojiden yararlanabilecek çok sayıda sistem ve bileşeni içerir. Bu bağlamda, eklemeli imalat teknolojileri malzeme değişimi, topoloji optimizasyonu ve montaj-parça konsolidasyonu yoluyla hafif yapıların yanı sıra eski tasarım sistemlerde yedek parça üretimi veya hasarlı parçaların tamirata için imalat maliyetlerini ve teslim süresini azaltmaya yardımcı olmak için demiryolu endüstrisinde kullanılabilir. Özellikle, hafiflik oluşturmak için montaj parçası konsolidasyon yöntemleri ve topoloji optimizasyon teknikleri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [18], [19]. Bu kapsamda, raylı sistemlerde topoloji optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Bahadır [20], hafif raylı sistem aracı olan tramvayın çarpışma sönümleyici elemanın EN 12663 standardı kapsamında yapısal analizlerini gerçekleştirmiştir. Hyperworks programı ile konstrüksiyon yapının statik analiz, topoloji ve şekil optimizasyonları neticesinde gerilme ve yer değiştirme miktarları değişmeden %24,1 daha hafif bir tasarımı ortaya çıkarmıştır. Emre [21], formula yarışlarında kullanılan araçların ağırlıklarını azaltmak için fren pedallarında topoloji optimizasyonu uygulamıştır. 7075-T6 alüminyum alaşımından tasarlanan fren pedalı ilk tasarıma göre %11,65 oranında hafifletilmiştir. Wahid vd. [22], statik yüklem koşullarında dar hatlı bir demiryolu için optimum malzeme kullanımına sahip yenilikçi bir kompozit travers tasarım çalışması yapmış ve burada topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır.

Hyun-Ah vd. [23], haddelenmiş alüminyum panellerden yapılacak bir demiryolu araç gövdesinin tasarımını ele almış ve alüminyum esaslı gövdenin kalınlık dağılımını ve kaburga şeklini tasarlamak için yapısal optimizasyona dayalı bir tasarım süreci önermiştir. Kuczek [24], gerilme ve üretim gereksinimlerini karşılayan standartlaştırılmış, ince duvarlı, kapalı çelik profillerden yapılmış modern raylı araç yapıları için yeni bir tasarım kavramı sunmuştur. Bu amaçla, Altair-Optistruct yazılımı ile bir yük vagonunun topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Metodolojinin, varsayılan imalat kısıtlamalarını karşılayan optimal yapı tasarımını elde etmek için yararlı bir araç olduğu ve diğer ince duvarlı araç yapısı türlerine kolayca genişletilebileceği belirtilmiştir. Muvunzi vd. [25], kuvvet aktarımı, akustik ve titreşim yalıtımının sağlanmasına yardımcı olan bir boji sistemi bileşeninin (çekme parçası) tel ark eklemeli imalat (WAAM) ile farklı malzemeler (AA7075, paslanmaz çelik, Ti6Al4V) için üretilebilirliğini araştırmıştır. WAAM süreci öncesinde, parçanın ağırlığını azaltmak, fonksiyonel performansı ve hizmet ömrünü iyileştirmek için FEM tabanlı tasarım ve analiz metodolojisi uygulanmıştır. WAAM ile parça üretimine AA7075 ve Ti6Al4V alaşımlarının daha elverişli olduğu ve demiryolu endüstrisi için sürdürülebilir yedek parça üretimini sağlamak için bu teknolojinin uygulanabileceği vurgulanmıştır.

Literatür değerlendirildiğinde, topoloji optimizasyon metodolojisi kullanılarak raylı sistem araçları veya sistem elemanları üzerine sınırlı sayıda araştırmanın yapıldığı görülmekte olup, eklemeli imalat teknolojilerinin demiryolu endüstrisinde kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, hem ilgili sektör firmaları ve akademik çalışmalara katkı vermek hem de sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla topoloji optimizasyonu ile koşum takımı üzengisi modellenmiş ve eklemeli imalat için uygunluğu araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Birçok endüstriyel alanda mühendislik tasarımları için üç boyutlu (3B) parça modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı ürün tasarımı ve optimizasyon süreci yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, raylı sistem araçlarının birlikte hareketini sağlayan cer tertibatlarından, kanca kavramalı koşum takımının bir parçası olan üzenginin (coupling link), SolidWorks ortamında 3B tasarımı oluşturulmuş, yoğunluk tabanlı yöntemden türetilen SIMP yöntemi ile topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, tasarlanan parçanın sonlu elemanlar yöntemi esaslı mukavemet analizleri için SolidWorks programı statik analiz modülü kullanılmış ve eklemeli imalatla teknolojisıyla üretilebilecek yeni bir tasarım elde edilmiştir. Koşum takımı üzengisinin boyutları UIC 520 standardı esaslı olup, bu standartta tasarım için gerekli tüm ölçüler mevcut değildir. Bu nedenle, tasarım için eksik olan ölçüler Şekil 2’de gösterilen gerçek parça üzerinden alınarak üzengi modeli tamamlanmıştır.



Şekil 2. Koşum takımı üzengisi

2.1. Topoloji optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, yapısal tasarım problemlerine en iyi kavramsal çözümleri üretmek için kullanılan bir yöntemdir. Ana fikir, verilen sınır koşulları, yük durumları ve gereksinimler için tanımlanmış bir tasarım alanında malzeme yerleşimini optimize etmektir [26]. Yapıların mukavemetini ve doğal frekansını en az etkileyen kısımlar belirlenerek modelden çıkarılması gereken kısımlar tanımlanır. TO metodolojisinde, modelin düzenlenmesi sürecinde, parça üzerinde delik, çıkıntı, kanal vb. oluşturulması, yeni unsurların eklenmesi veya silinmesi gerçekleştirilir. Başka bir ifadeyle, matematiksel hesaplamalar kullanarak bir nesnenin geometrisini optimize eden bir tekniktir. Tasarımcılar, topoloji optimizasyon yazılımlarını kullanarak şekil üzerindeki baskıları analiz eder ve tasarımdaki gereksiz malzemeleri ortadan kaldırarak belirli yerlerde malzeme dağılımını optimize edebilir. Parçanın hangi alanlarının optimize edileceği, yük, deformasyon, rijitlik kısıtlamaları ve sınır koşulları gibi çeşitli gereksinimler ile belirlenir. Bu metodoloji ile parçanın işlevi değiştirilmeden kütlesi azaltılarak ideal geometride bir yapı sağlanır [15]. Bu nedenle, TO minimum ağırlıkta ve yüksek performanslı parçaların modellenmesi için uzay, havacılık, otomotiv, tıp gibi birçok sektörde etkili bir tasarım teknolojisi olarak kullanılmaktadır [27]. Böylece, topoloji optimizasyonu çeşitli mühendislik alanlarında güçlü bir kavramsal tasarım yöntemi olarak yerini almıştır. Diğer yandan, optimizasyon sürecinde elde edilen ideal geometrideki yapının bilgisayar destekli tasarım verisine dönüştürülmesi ve üretim yöntemi işlem parametrelerinin karmaşıklığı sebebiyle uygulamada zorluklarla karşılaşmaktadır [28]. TO sonucunda elde edilen modelin kullanıma hazır forma dönüştürülmesinin en kolay yolu, karmaşık geometriye sahip parçaların bile genellikle tek işlemde üretimini sağlayan eklemeli imalat teknolojilerinin uygulanmasıdır [12]. Ayrıca, topoloji optimizasyon tekniğinin eklemeli imalat sürecinde kullanılmasıyla optimize edilen parçanın prototip üretimleri yapılarak yapısal performansının analizi kolaylaşır [29] ve böylece mühendislik tasarımı süreci daha verimli olarak gerçekleştirilir [30].

Çeşitli yapıların topoloji optimizasyonunda önerilen yaklaşımlar bulgusal ve matematik esaslı yöntemler olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Genellikle daha sezgisel olan ve daha az matematiksel işlem içeren evrimsel yapı optimizasyonu (Evolutionary Structural Optimization (ESO)) ve çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)) bulgusal yöntemlere, homojenizasyon yöntemi, seviye seti yöntemi ve cezalandırılmalı katı izotropik malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)) yöntemi ise matematik temelli yöntemlere örnek olarak verilebilir [31]. Topoloji optimizasyonunda en yaygın kullanılan SIMP yönteminin temel hedefi, bir sonlu eleman ağı ile ayrıklaştırılmış, önceden belirlenmiş bir tasarım alanı içindeki malzemenin yoğunluğunu belirlemektir [29]. SIMP yönteminde ara yoğunluklar için cezalandırılmalı katı izotropik mikro elemanlar kullanılır. Bu yöntemde, eleman başına yalnızca bir serbest değişken kullanıldığında, depolama kapasitesi ve gereken bilgisayar işlemcisinin çalışma süresi açısından hesaplama verimliliği sağlanır. Ek olarak cezalandırma serbestçe ayarlanabilir. Bunun neticesinde hesaplama açısından en uygun cezalandırma kullanılabilir. Son olarak SIMP yöntemi, model üzerindeki mikro yapının homojenizasyonunu gerektirmez [32]. Burada, her sonlu eleman daha sonra değerleri 0 ile 1 arasında olan bir yoğunluk fonksiyonu $\rho(x)$ ile ilişkilendirilir. "0" bir boşluğu ve "1" bir katıyı belirtir. 0 ile 1 arasındaki değerler, delikli bir malzeme ara yapısı olarak yorumlanabilen ara yoğunluklar olarak adlandırılır. Belirli bir elemanın malzeme özellikleri yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ele alındığında, eleman yoğunluğu tasarım değişkeni olarak yorumlanabilir. Böylece belirli bir tasarımın performansını ayarlamak için kullanılır ve bir katı ($\rho(x)=1$) malzeme özelliği ile elde ettiğimizi varsayalım. Young modülü E_s ile gösterilir ve ara yoğunluklara sahip elementlerin Young modülü $E_i=E_s \rho_i(x)$ ile verilir, burada 'i' alt indisi belirli bir elementi gösterir. Ara yoğunluklar pratikte gerçekleştirilemeyecek "yapay malzeme" olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, ara yoğunlukları her element için 0 veya 1 olarak temsil edilecek şekilde cezalandırarak bir tekniğin tanıtılması gerekmektedir. Bu, nihai tasarım alanının yalnızca

katıları ve boşlukları içereceği anlamına gelir. Bu nedenle, ceza faktörü ilave edilmiş bir SIMP yöntemini karakterize eden temel formül Denklem 1 ve Denklem 2’de verilmiştir [33]:

$$E_i = \rho_i(x)^p E_s \quad (1)$$

$$Vol = \int_{R^3} \rho(x)^x dx \quad (2)$$

Burada;

E_i : Young modülünün tasarım alanındaki i 'inci ögesi,

ρ_i : i 'inci ögesi için tasarım parametresi,

p : Ara yoğunluklar için cezalandırma parametresi (genellikle, $p \geq 3$),

E_s : Katı cismin Young modülü,

Vol : Tasarım alanındaki dağıtılmış malzemenin toplam hacmi,

R^3 : Üç boyutlu tasarım bölgesi,

x : Bir malzeme elemanının merkezi için uzayda koordinat noktaları.

2.2. Tasarım ve analiz detayları

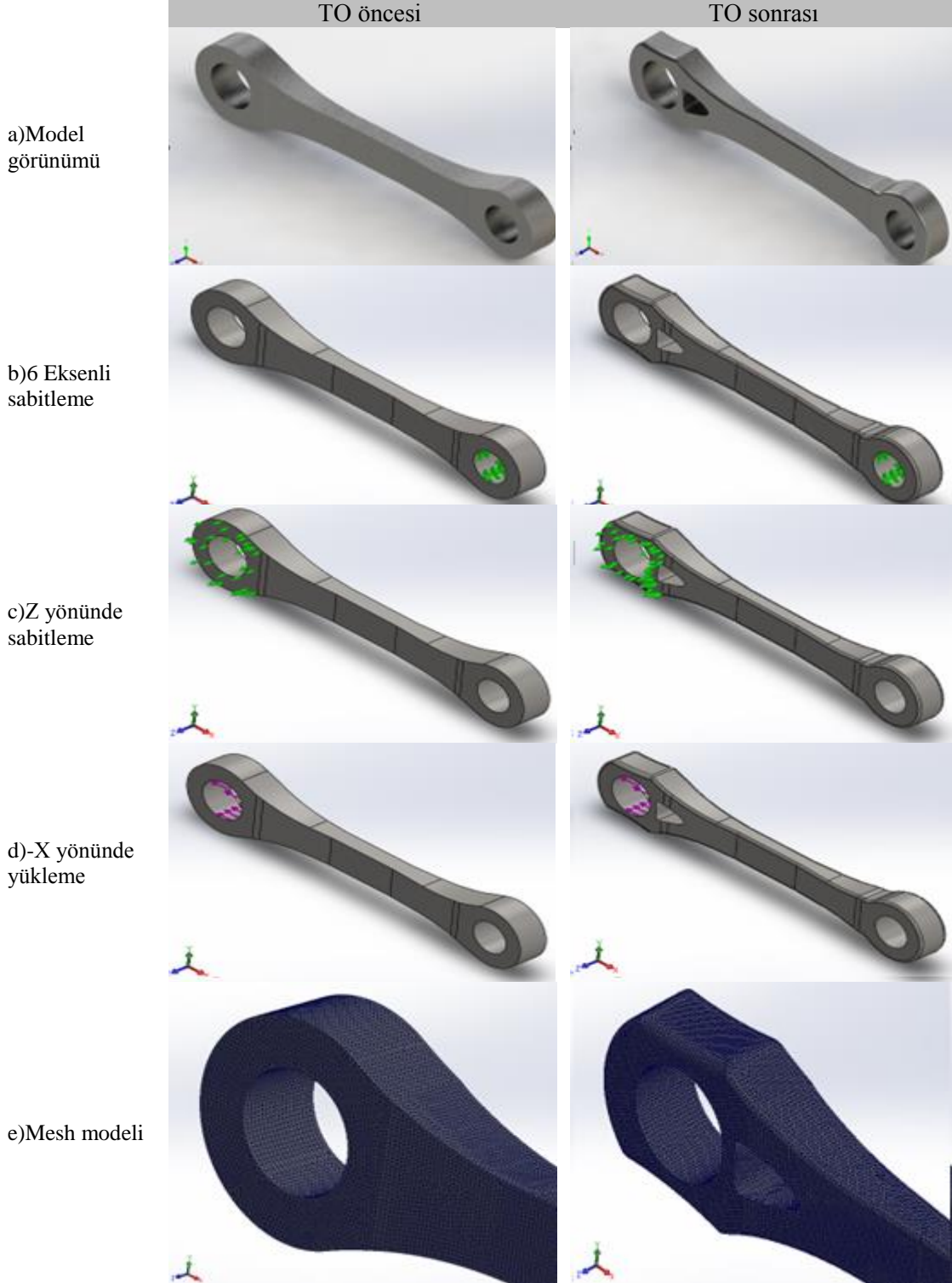
Bu çalışmada, raylı sistem araçlarının birlikte hareketini sağlayan bağlantı sistemlerinden birisi olan kanca kavramalı koşum takımı elemanı üzenginin (coupling link) ağırlığının azaltılması ve eklemeli imalat teknolojisiyle üretimine uygun tasarımına odaklanılmıştır. Bu bağlamda, parça tasarımı, kullanım şartları ve kriterlerine göre sonlu eleman analizleri (FEA) uygulaması, SIMP yöntemi esaslı topoloji optimizasyonu, yeni tasarımın FEA analizi ve kontrolü şeklinde bir çalışma planı uygulanmıştır. İlk olarak, Şekil 1’de gösterilen üzenginin 3B tasarımı SolidWorks programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, mevcut modelin EN 15566 standardında [7] belirtilen yükleme şartlarına göre sonlu elemanlar yöntemi esaslı statik mukavemet analizi yapılmıştır. Bu süreçte, sonlu elemanlar analizinde gerekli malzeme verisi EN 10083 standardında belirtildiği gibi dökme karbon çeliğinin mekanik özellikleri kullanılmış ve Tablo 1’de verilmiştir [34]. Ayrıca, aynı standartta malzemenin kimyasal bileşimi verilmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri

Mekanik özellik	Değer
Akma mukavemeti	248,17 MPa
Çekme mukavemeti	482,5 MPa
Elastikiyet modülü	2×10^5 MPa
Poisson oranı	0,32
Kütle yoğunluğu	7800 kg/m ³
Kayma modülü	$7,6 \times 10^4$ MPa
Termal genleşme katsayısı	$1,2 \times 10^{-5}$ /K

Topoloji optimizasyonu sürecinde FEA çalışmalarında, topoloji optimizasyon (TO) öncesi ve sonrası analiz sonuçlarının doğru karşılaştırılması için parçanın yükleme şartları aynı girilmiştir. Üzenginin yükleme şartları EN 15566 standardına göre belirlenmiş olup, statik analizlerde parçanın akmaya karşı dayanım değerini gösteren emniyet katsayısı 2 olarak kabul edilmiştir. İlgili standartta kanca kavramalı koşum takımının yük taşıma kapasitesi 120 kN - 150 kN olarak gösterilmiştir. Yani, demiryolu aracının türüne veya yük taşıma kapasitesine göre koşum takımı elemanlarının boyutları da değiştirilebilir. Bu bağlamda, 120 kN ve 150 kN yük taşıma kapasitesine sahip minimum ağırlıkta koşum takımı üzengisinin üretilmesi sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Diğer taraftan, TO metodolojisinde esas amaçlardan birisi malzeme kütlelerinin azaltılması olup, ortaya çıkarılan yeni tasarımda parçanın geleneksel imalat

yöntemleriyle üretimi zor veya mümkün olmayabilir. Bu durumda, genellikle eklemeli imalat teknolojileri uygulanarak parçalar üretilmektedir. Bu bağlamda, iki farklı yükleme şartı için koşum takımı üzengisinin TO metodolojisine göre tasarımı yapılmış ve üretilebilirliği incelenmiştir.



Şekil 3. FEA aşamaları

Tasarlanan üzenginin 3B modeli (Şekil 3a), koşum takımı kancasına bağlanan taraftan 6 eksende (Şekil 3b) ve Z ekseninde sabit (Şekil 3c) kabul edilmiş olup, -X ekseninde belirlenen yük değerinde çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır (Şekil 3d). FEA metodolojisinin son aşamasında model sonlu elemanlara ayrılarak çözümlenmiştir. TO öncesi ve TO sonrası tasarımlar için statik analizde uygulanan mesh modeli Şekil 3e’de gösterilmiş olup, FEA için kullanılan sonlu eleman mesh detayları Tablo 2’de verilmiştir. Topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası uygulanan FEA çalışmalarında daha güvenilir bir karşılaştırma ortamı sağlamak amacıyla mesh boyutları, TO öncesi ve sonrasında eşit büyüklükte uygulanmıştır.

Tablo 2. Sonlu eleman detayları

	TO öncesi	TO sonrası
Mesh tipi*	Katı mesh	Katı mesh
Mesh kalitesi	Yüksek	Yüksek
Mesh boyutu	2 mm	2 mm
Tolerans	0,1 mm	0,1 mm
Toplam düğüm sayısı	724159	681912
Toplam eleman sayısı	510038	479454

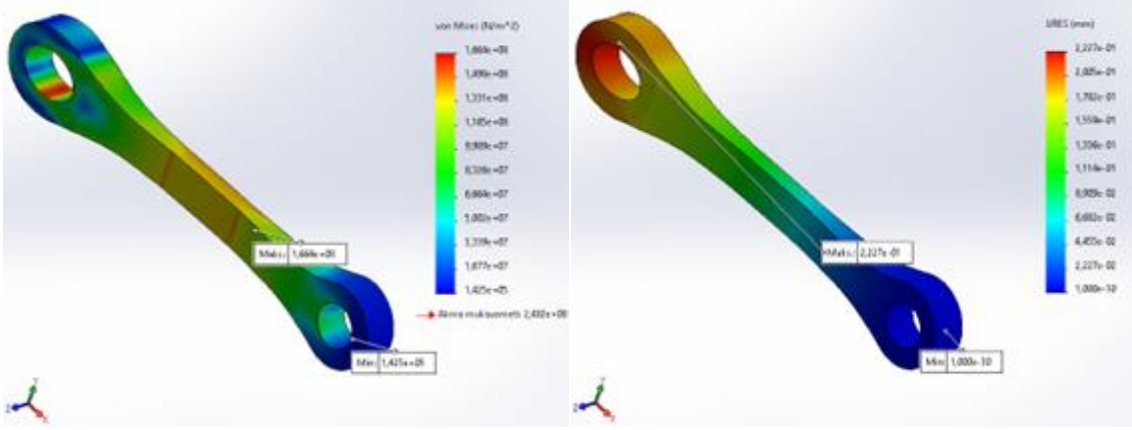
* Parabolik dört yüzlü katı eleman [35]

3. Bulgular ve Değerlendirme

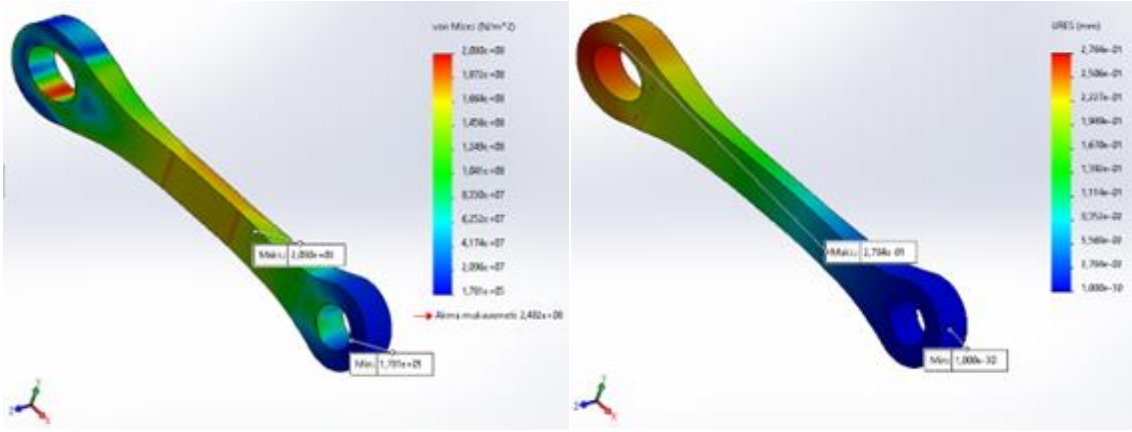
SolidWorks ortamında yapılan sonlu eleman analizlerinin ardından, koşum takımı üzengisinin belirlenen şartlar altında davranışı Von Mises gerilmeleri ve yer değiştirme miktarına göre incelenmiştir. Bu süreçte, topoloji optimizasyonu öncesi ve sonrası FEA sonuçları değerlendirilerek ağırlığı azaltılmış yeni bir üzengi tasarımı elde edilmiş olup, eklemeli imalat için uygunluğu tartışılmıştır.

3.1. TO öncesi FEA sonuçları

Koşum takımı üzengisi üzerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımı Şekil 4a’da, yer değiştirme sonuçları ise Şekil 4b’de verilmiştir. 120 kN yükleme durumu için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 166,40 MPa, en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,22 mm olarak bulunmuştur. 150 kN için yapılan FEA analizleri sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 208,00 MPa bulunurken (Şekil 5a), en büyük yer değiştirme miktarı ise 0,28 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 5b). Maksimum gerilmenin olduğu bölgeler üzengi modeli üzerinde gösterilmiş olup, yükleme durumu 150 kN olduğunda üzengide oluşan gerilmede %25 artış olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, yer değiştirme miktarında %27’lik bir artış meydana gelmiştir.



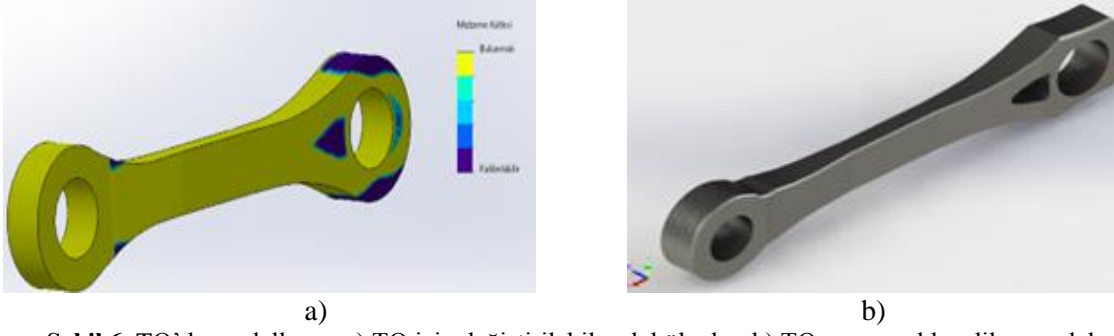
Şekil 4. 120 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı



Şekil 5. 150 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

3.2. Topoloji optimizasyon sonuçları

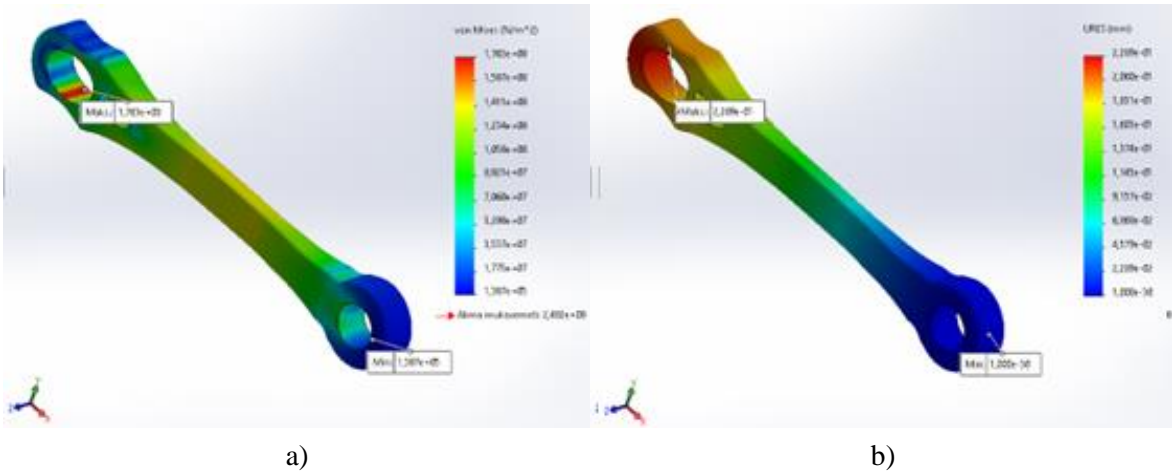
Sonlu elemanlar analizi yapılan 3B katı model için SolidWorks programının topoloji optimizasyon modülü kullanılarak tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, .stl formatında oluşan üzengi modeli üzerinde çıkarılacak/kesilecek kısımlar belirli bir renk skalasına dönüşür. Burada, sarı renkli kısımlar değiştirilemeyecek olan yerleri gösterirken (Şekil 6a), mavi renkli bölgeler ise üzengi modeli üzerinde değişiklik yapılabileceğine işaret eder. Aynı zamanda, katı model üzerinden tersine mühendislik işlemi olarak nitelendirilen bu işlem sonucunda modelin yeni görüntüsü Şekil 6b’de gösterilmiştir. Sonuçta, başlangıçta 5,31 kg olan katı modelin kütlesi 4,83 kg’a azaltılmıştır. Yeni model üzerindeki unsurlar (üçgensel boşluk vb.) hassas ölçü ve yüzey kalitesinde geleneksel imalat yöntemleri ile oluşturulamayacağından, parçanın imalatında geleneksel olmayan imalat yöntemleri (elektro-erozyon ile işleme, elektrokimyasal işleme vb.) kullanılabilir. Ancak, bu yöntemler özellikle işleme zamanı açısından dezavantajlıdır. Bu durumda, yeni modellenen parçanın üretiminde eklemeli imalat teknolojisinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Bu imalat teknolojisi sayesinde parça hem hızlı hem de boyut ve yüzey kalitesi açısından istenilen kalitede elde edilebildiği gibi, parçanın işletme şartlarında kullanım ömründe artışlar sağlanabilmektedir [19], [36].



Şekil 6. TO'da modelleme: a) TO için değiştirilebilecek bölgeler, b) TO sonucu elde edilen model

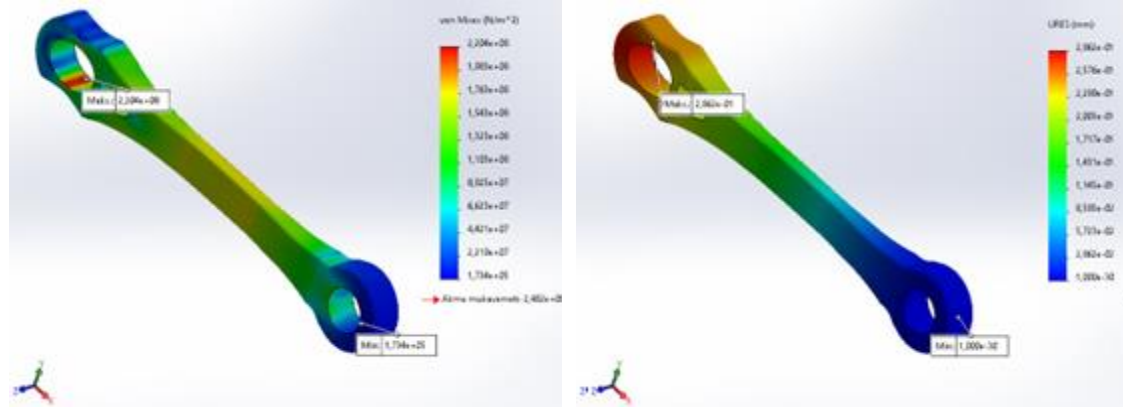
3.3. TO sonrası FEA sonuçları

Topoloji optimizasyon işlemi sonrasında oluşturulan yeni üzengi modeli üzerinde 120 kN yükleme durumu için uygulanan FEA analizi sonucunda en yüksek Von Mises gerilmesi 176,30 MPa (Şekil 7a), en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,23 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 7b). Üzengi modelinde oluşan gerilmelerin 2 kat emniyetle malzeme akma dayanımı olan 248,17 MPa değerine ulaşmadığı görülmektedir. Ayrıca, yer değiştirme miktarının EN15566 standardında belirtilen değeri (<0,5 mm) aşmadığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hem gerilme dağılımı hem de yer değiştirme miktarı açısından tasarlanan üzengi modelinin uygulanabileceğini göstermektedir.



Şekil 7. 120 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

Topoloji optimizasyon modeli üzerinde 150 kN yükleme durumu için uygulanan FEA sonucunda, en yüksek Von Mises gerilmesi 220,40 MPa olarak bulunurken (Şekil 8a), en yüksek yer değiştirme miktarı ise 0,28 mm'dir (Şekil 8b). Bu sonuçlar, TO sonucu tasarlanan yeni üzengi modelinin maksimum yükleme şartında 2 emniyette güvenle kullanılabilirliğini gösterir. Maksimum ve minimum gerilmelerin olduğu bölgeler üzengi modeli üzerinde gösterilmiş olup, 120 kN'luk yükleme durumuna göre model üzerinde oluşan gerilmede %25'lik bir artış olmuştur. Bu sonuç, TO öncesi mevcut koşum takımı üzengisine benzer olup, gerilmeler açısından önemli bir değişimin olmadığını bir göstergesidir.



Şekil 8. 150 kN için sonuçlar: a) Von Mises gerilmesi b) Yer değiştirme miktarı

Yükleme durumu maksimum olduğunda yer değiştirme miktarında %21'lik bir artış meydana gelmiştir. Yükleme durumundaki artışa rağmen, TO öncesi modele göre üzengi üzerindeki yer değiştirme miktarında belirgin bir azalma olmuştur. Bu sonuç, TO sonrasında koşum takımı üzengisinin geometrisindeki değişime atfedilebilir. Diğer yandan, koşum takımı üzengisi üzerinde oluşan gerilme dağılımları değerlendirildiğinde; topoloji optimizasyonu öncesine göre TO uygulanarak tasarlanan yeni modelde 120 kN ve 150 kN yüklemeye şartlarında maksimum gerilmelerde sırasıyla %6 ve %5,96'lık artışlar belirlenmiştir. Bu sonucun TO sonrası üzengi model geometrisindeki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle, TO sonrası hem parça kütlesi hem de model yüzey alanı azaldığından birim alana düşen yük artmış ve sonuç olarak üzengide oluşan gerilmeler artış göstermiştir. Tüm sonuçlar, TO uygulanarak tasarlanan yeni koşum takımı üzengisinin güvenle kullanılabilmesine işaret etmektedir. Ayrıca, üzengi modelindeki geometrik unsurların basit olmamasından dolayı, gerçek parça üretimi için eklemeli imalat teknolojilerinin daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, raylı sistem araçlarının birlikte çalışmasını sağlayan bağlantı sistemlerinden kanca kavramalı koşum takımı elemanı üzenginin iki farklı yüklemeye durumu için kütlelerinin azaltılması amacıyla topoloji optimizasyon metodolojisi uygulanmıştır. Koşum takımı üzengisi üzerinde yapılan topoloji optimizasyonunda tasarım ve sonlu elemanlar analizlerinde SolidWorks yazılımı kullanılmıştır. Bu süreçte, malzemenin teknik özellikleri ve yüklemeye şartları ilgili standartlar esas alınarak belirlenmiştir.

Topoloji optimizasyonu öncesi 120 kN ve 150 kN yüklemeye durumunda yapılan FEA analizleri sonucunda, üzengi modelinde oluşan gerilme dağılımı ve yer değiştirme miktarları incelenmiş ve elde edilen sonuçların referans değerleri aştığı belirlenmiştir. TO sürecinin ikinci aşamasında model üzerinde yapılan değişimler neticesinde, üzengi parçasının kütlesi 5,31 kg'dan 4,83 kg'a azaltılmıştır. Koşum takımına ait 1 adet üzengide 480 g, toplamda her koşum takımında 960 g ağırlıkta azalma sağlanmıştır. Topoloji optimizasyonunun son aşamasında, FEA analizlerine göre en yüksek Von Mises gerilmesi 120 kN ve 150 kN için sırasıyla 176,30 MPa ve 220,40 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca, koşum takımı üzengisi için en yüksek yer değiştirme miktarları sırasıyla 0,23 mm ve 0,28 mm olarak elde edilmiştir. Bu değerler, EN15566 standardında belirtilen değerin (<0,5 mm) altında olup yeni tasarım üzenginin raylı sistem araçları arasında yük iletiminde güvenli olduğuna işaret etmektedir. Topoloji optimizasyon uygulaması sonucunda, koşum takımı üzengisinin kütlesi %9,04 azaltılmış ve böylece kayda değer bir malzeme tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, TO ile geliştirilen üzengi model geometrisinin zorluğundan dolayı eklemeli imalat teknolojisiyle üretiminin daha uygun olduğu kanısına varılmıştır. Bununla birlikte, TO metodolojisinin raylı sistem araçlarının tüm parçaları için uygulanarak sürdürülebilirliğe önemli

katkılar sağlanacağı açıkça görülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda, raylı sistem araçlarının herhangi bir parçası için halihazırda uygulanan geleneksel imalat yöntemi ile eklemeli imalat teknolojisi kullanılması durumunda oluşan maliyetler kıyaslanabilir.

Kaynakça

- [1] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, *Raylı sistemler teknolojisi: Mekanik sistemler*, Ankara, 2013.
- [2] C. Özarpa, H. Botsalı ve B.F. Kınacı, "Raylı sistemlerde kullanılan cer kancasının topoloji optimizasyonuna uygunluğunun değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, c. 15, ss. 1- 12, 2022.
- [3] S. M. Noughabi, K. Dehghani and M. Pournavari, "Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages," *Eng. Fail. Anal.*, c. 14, sy. 5, ss. 903-912, 2007.
- [4] M. Günay, M.E. Korkmaz and R. Özmen, "An investigation on braking systems used in railway vehicles," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, pp. 421-430, 2020.
- [5] E. V. Rosa, L. Rios ve V. Queral, "Progress on the interface between UPP and CPRHS (Cask and Plug Remote Handling System) tractor/gripping tool for ITER," *Fusion Eng. Des.*, vol. 88, no. 9-10, pp. 2168-2172, 2013.
- [6] M. Nold, F. Corman, "Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda," *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, vol.18 no. 1-26, pp. 100-241, 2021.
- [7] "EN 15566:2017 Railway applications - Railway rolling stock - Draw gear and screw coupling," Accessed: April 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.en-standard.eu/une-en-15566-2017-railway-applications-railway-rolling-stock-draw-gear-and-screw-coupling/>
- [8] R. Ulewicz, F. Nový, P. Novák and P. Palček, "The investigation of the fatigue failure of passenger carriage draw-hook," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 104, pp. 609-616, 2019.
- [9] D. Pojani and D. Stead, "Sustainable urban transport in the developing world: beyond megacities," *Sustainability* no. 7 pp. 7784–7805, 2015, doi:10.3390/ su7067784.
- [10] M. Bayraktar, N. Tahrali and R. Guclu, "Reliability and fatigue life evaluation of railway axles," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 671–679, 2010, doi: 10.1007/ s12206-009-1219-1.
- [11] U. Zerbst, C. Klinger, D. Klingbeil, "Structural assesment of railway axles – a critical review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 54–65, 2013.
- [12] N. Top, H. Gökçe ve İ. Şahin, "Eklemeli imalat için topoloji optimizasyonu: el freni mekanizması uygulaması," *Selçuk-Teknik Dergisi*, c. 18, s. 1, ss. 1-13, 2019.
- [13] M. Donofrio, "Topology optimization and advanced manufacturing as a means for the design of sustainable building components," *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 638-645, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.054
- [14] J. Liu and Y. Ma, "A survey of manufacturing oriented topology optimization methods," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 100, pp. 161-175, 2016.
- [15] A.L.R. Prathyusha and G. Raghu Babu, "A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications," *Mater. Today: Proc.*, pp. 1-9, 2022.
- [16] Y. Li, Y. Cheng, Q. Hu, S. Zhou, L. Ma, M.K. Lim, "The influence of additive manufacturing on the configuration of make-to-order spare parts supply chain under heterogeneous demand," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57(2), pp. 1-20, 2018.
- [17] A. Killen, L. Fu, S. Coxon, R. Napper, "Exploring the use of additive manufacturing in providing an alternative approach to the design, manufacture and maintenance of interior rail components," *Australasian Transport Research Forum*, pp.1–16, 2018.
- [18] A.D. Toth *et al.*, "Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry," *Sci. Afr.*, vol. 16, 2022, doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01219.
- [19] H. Fu and S. Kaewunruen, "State-of-the-art review on additive manufacturing technology in railway infrastructure systems," *Compos. Sci.*, vol. 6, pp. 1-21, 2022.
- [20] B. Dener, "Çarpışma sönümleyici konstrüksiyonun yapasal optimizasyon yöntemleri kullanılarak hafifletilmesi," Y. Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2021.
- [21] E.İ. Albak, "Formula SAE aracında ağırlık azaltılmasına yönelik fren pedalının topoloji optimizasyonu yöntemiyle optimum tasarımı," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 11(1), ss. 328-334, 2019.
- [22] W. Ferdous *et al.*, "Evaluation of an innovative composite railway sleeper for a narrow-gauge track under static load," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 2, pp. 1-18, 2018.

- [23] H. Lee, S. Jung, H. Jang, “Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. F J. Rail and Rapid Transit*, vol. 230, no. 4, pp. 1283-1296, 2016.
- [24] T. Kuczek, “Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures,” *Eng. Optim.*, vol. 48, no. 2, pp. 351-360, 2015.
- [25] R Muvunzi *et al.*, “Analysis of potential materials for local production of a rail car component using additive manufacturing,” *Heliyon*, vol. 8, 2022, doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09405.
- [26] V. Vázquez, F. Velázquez-Villegas, G. Ascanio and F.C. Jiménez, “Design of an automotive subframe by topological optimization,” *Generia Mecánicatecnología Y Desarrollo*, vol. 7 no. 2, pp. 017- 024, 2013.
- [27] J. H. Zhu, W.H. Zhang and L. Xia, “Topology optimization in aircraft and aerospace structures design,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 23, pp. 595–622, 2016.
- [28] C. H. Chuang, S. Chen, R. J. Yang and P. Vogiatzis, “Topology optimization with additive manufacturing consideration for vehicle load path development,” *Internat. J. Numer. Methods Eng.* vol. 113, no.8, pp. 1434-1445, 2017.
- [29] Q. Li, W. Chen, S. Liu and L. Tong, “Structural topology optimization considering connectivity constraint,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 54, no. 4, pp. 971–984, 2016.
- [30] M. Abdi, R. Wildman and I. Ashcroft, “Evolutionary topology optimization using the extended finite element method and isolines,” *Eng. Opt.*, vol. 46, no. 5, pp. 628-647, 2014
- [31] M.P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology optimization: Theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, Denmark, 2003.
- [32] G.I.N. Rozvany, “A critical review of established methods of structural topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 37, pp. 217-237, 2009.
- [33] V.G. Sundararajan, “Topology optimization for additive manufacturing of customized meso-structures using homogenization and parametric smoothing functions,” M.Sc. dissertation, Mechanical Engineering, University of Texas, Austin, 2010.
- [34] “EN 10083-2:2006 - Steels for quenching and tempering - Part 2: Technical delivery conditions for non alloy steels,” [Online]. Accessed: April 13, 2022. Available: <https://regbar.com/wp-content/uploads/2019/09/EN-10083-2-2006.pdf>.
- [35] SolidWorks, “Dassault Systemes documentation”, [Online]. Accessed: June. 14, 2022. Available: https://help.solidworks.com/2021/English/SolidWorks/cworks/c_Solid_Mesh.htm
- [36] X. Wang *et al.*, “Overhang structure and accuracy in laser engineered net shaping of Fe-Cr steel,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 106, pp. 357-365, 2018.

Özgeçmiş



Emre ULUSOY

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği programından 2021 yılında mezun olmuştur. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliğinde yüksek lisans yapmaktadır.

E-Posta: emreulusoyum@hotmail.com



Mert İSTEK

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği programından 2021 yılında mezun olmuştur. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliğinde yüksek lisans yapmaktadır.

E-Posta: mertistek33@gmail.com

**Mustafa GÜNAY**

Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla Gazi Üniversitesi Makine Bölümü'nde tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2009-2013 yılları arasında Yrd. Doçent, 2013-2018 yılları arasında Doçent olarak görev yaptı. Halen Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak görev yapmaktadır. Geleneksel ve geleneksel olmayan imalat yöntemleri, kompozit malzemeler, bilgisayar destekli tasarım ve imalat, FEM analizi, eklemeli imalat, işlenebilirlik ve optimizasyon teknikleri üzerine çalışmaktadır.

E-posta: mgunay@karabuk.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Emre ULUSOY: Sonlu elemanlar analizi, Yazma ve düzenleme. Mert İSTEK: Tasarım, İnceleme, Gözden geçirme. Mustafa GÜNAY: Metodoloji, Doğrulama, Kontrol.