

Topoloji Optimizasyonu ile Gemi Çift Dip Konstrüksiyonu Dolu Döşek Tasarım İyileştirilmesi

Ahmet Fatih YILMAZ^{1*} 

¹Karabük University, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/03/2025
Düzeltilme: 10/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Gemi Yapıları
Çift Dip Dolu Döşekler
Yapısal Ağırlık Azaltımı
Sonlu Elemanlar Analizi

Article Info

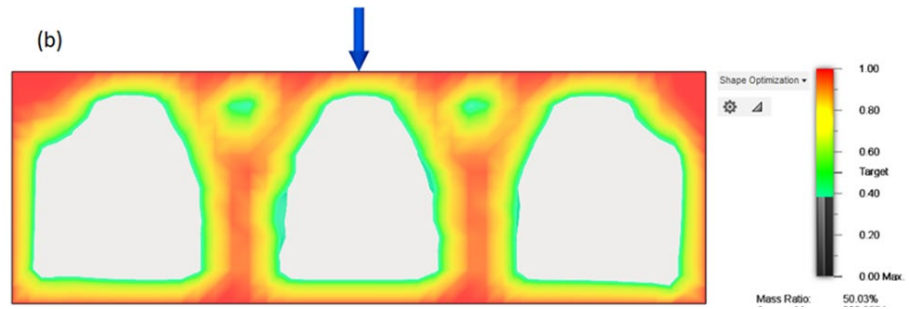
Research article
Received: 23/03/2025
Revision: 10/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Topology Optimization
Ship Structures
Double-Bottom Floors
Structural Weight
Reduction
Finite Element Analysis

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Gemi çift dip dolu döşeklerinin topoloji optimizasyonu, ağırlığı %50 azaltırken gerilmeleri 150 MPa sınırı altında tutar; farklı genişlik ve kalınlıklarda en uygun açıklıkları belirler. / Topology optimization of ship double-bottom full floors reduces weight by 50 %, keeps stress under 150 MPa, and locates optimal openings for diverse widths, thicknesses.



Şekil: 3,6 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. / **Figure:** Optimization results for 3.6-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.

Önemli noktalar (Highlights)

- %50 malzeme azaltımıyla optimize edilen dolu döşekler yapısal bütünlüğü korur / Topology-optimized full floors cut weight by 50 % while maintaining structural integrity.
- Tüm tasarımlarda Von Mises gerilmesi 150 MPa sınırının altındadır / All configurations keep Von Mises stress below the 150 MPa limit.
- Genişlik artışı açıklık sayısını, kalınlık artışı köşe yarıçaplarını büyütür / Wider floors require more openings, thicker plates demand larger corner radii.
- 3,6 m genişlik-20 mm kalınlık-%50 korunum kombinasyonu en düşük gerilme ile en dengeli çözümdür / A 3.6 m width, 20 mm thickness, 50 % conservation model offers the most balanced performance.

Amaç (Aim): Gemi çift dip konstrüksiyonunda kullanılan dolu döşeklerin topoloji optimizasyonu ile %50'ye varan ağırlık azaltımı sağlarken 150 MPa gerilme sınırını aşmayan, genişlik ve kalınlığa uyarlanabilir tasarım çözümleri geliştirmek. / To develop adaptable design solutions for ship double bottom full floors through topology optimization, enabling up to 50% weight reduction without exceeding the 150 MPa stress limit.

Özgünlük (Originality): Literatürde ilk kez, genişlik (1,8–4,2 m) ve kalınlık (10–40 mm) değişimleri dikkate alınarak topoloji optimizasyonu yoluyla sistematik döşek hafifletmesi önerilmiş ve gerilme sınırları doğrulanmıştır. / For the first time, a systematic topology optimization-based lightening strategy for full floors is proposed across varying widths (1.8–4.2 m) and thicknesses (10–40 mm), with verified stress constraints.

Bulgular (Results): Açıklık sayısı genişlikle artarken, kalınlık arttıkça köşe yarıçapları büyümektedir. Tüm optimize tasarımlar 150 MPa altında kalmıştır. En iyi sonuç, 3,6 m genişlik ve 20 mm kalınlıkta %50 korunum oranıyla elde edilmiştir. / As width increases, more openings emerge; thicker plates yield larger corner radii. All optimized designs remained below 150 MPa. The best configuration was found at 3.6 m width, 20 mm thickness, and 50% material retention.

Sonuç (Conclusion): Topoloji optimizasyonu ile %50 hafifletilmiş döşek tasarımları, izin verilen gerilme seviyelerini aşmadan uygulanabilir. Çalışma, mühendislik ilkelerine dayalı hafiflik ve dayanım dengesini başarıyla sunmaktadır. / Topology-optimized 50% lighter full floor designs are feasible without exceeding allowable stress levels. The study successfully delivers a balance between lightness and strength based on engineering principles.



Topoloji Optimizasyonu ile Gemi Çift Dip Konstrüksiyonu Dolu Döşek Tasarım İyileştirilmesi

Ahmet Fatih YILMAZ^{1*}

¹Karabük University, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/03/2025
Düzeltilme: 10/05/2025
Kabul: 20/06/2025

Anahtar Kelimeler

Topoloji Optimizasyonu
Gemi Yapıları
Çift Dip Dolu Döşekler
Yapısal Ağırlık Azaltımı
Sonlu Elemanlar Analizi

Öz

Bu çalışma, ticari gemi inşasında kullanılan dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu yoluyla yapısal ağırlıklarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Gemilerde yaygın olarak kullanılan çelik levhalar, çeşitli açıklıklar eklenerek hafifletilmektedir. Ancak mevcut açıklık tasarımlarının çoğu deneyime dayalı olup, yapısal verimlilik açısından optimizasyona açıktır. Bu çalışmada, enine sistemli bir geminin çift dip yapısındaki dolu döşek elemanları için farklı genişlik (1,8–4,2 m) ve kalınlıklarda (10–40 mm) standart dışı açıklık tasarımları önerilmiştir. Autodesk Fusion 360 yazılımının şekil optimizasyonu modülü kullanılarak, yüksekliği 1200 mm olan levha modellerine bölgesel dip yükleri uygulanmıştır. Tüm analizlerde yapısal ağırlığın %50 azaltılması hedeflenmiştir. Optimizasyon sonuçları, her genişlik ve kalınlık için optimum açıklık sayısını ve geometrik düzenleri belirlemiştir. Ayrıca, optimize edilen tasarımlar statik gerilim analizleri ile değerlendirilmiş, maksimum gerilme bölgeleri ve büyüklükleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, döşek genişliğinin artışıyla açıklık sayısının arttığını, kalınlığın artışıyla ise açıklık kenarlarında daha geniş köşe yarıçaplarının oluştuğunu göstermiştir. Tüm optimize edilmiş modellerde, maksimum gerilme değerleri izin verilen 150 MPa sınırının altında kalmıştır. Özellikle 3,6 m genişlik, 20 mm kalınlık ve %50 malzeme korunumuna sahip modelin en uygun çözümü sunduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, gemi çift dip yapılarında dolu döşeklerin topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesine yönelik önemli bulgular sunulmaktadır.

Design Improvement of Solid Floor Structures in Ship Double Bottom Construction through Topology Optimization

Article Info

Research article
Received: 23/03/2025
Revision: 10/05/2025
Accepted: 20/06/2025

Keywords

Topology Optimization
Ship Structures
Double-Bottom Floors
Structural Weight
Reduction
Finite Element Analysis

Abstract

This study aims to reduce the structural weight of full floor elements used in commercial ship construction through topology optimization. In shipbuilding, steel plates are commonly used, and weight reduction is achieved by incorporating various openings. However, most of the existing opening designs are based on empirical standards, which are open to further optimization in terms of structural efficiency. This research proposes non-standard opening designs for full floor elements within the double bottom structures of ships with transverse framing systems, considering different widths (1.8–4.2 m) and thicknesses (10–40 mm). Using the shape optimization module of Autodesk Fusion 360 software, plate models with a height of 1200 mm were subjected to localized bottom loads. All analyses targeted a 50% reduction in structural weight. The optimization results determined the optimal number of openings and their geometric configurations for each width and thickness. Additionally, the optimized designs were evaluated through static stress analysis, identifying the maximum stress regions and their magnitudes. The findings indicate that increasing the width of the floor element results in a higher number of openings, while increasing thickness leads to larger corner radii around the openings. In all optimized models, the maximum stress value remained below the allowable limit of 150 MPa. Notably, the model with a width of 3.6 m, a thickness of 20 mm, and 50% material conservation demonstrated the most favorable structural performance. This study presents valuable insights into the structural weight reduction of full floors within ship double bottom structures through topology optimization.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gemi inşa sanayi, küresel ticaretin ve endüstriyel üretimin kritik bileşenlerinden biri olarak yüksek

katma değer yaratan bir sektördür. Gemi yapım süreçleri, birçok mühendislik disiplini ve farklı üretim teknolojilerini bir araya getirerek kompleks bir üretim yapısı oluşturur. Gemiler, taşıdıkları yük

miktarı ve operasyonel gereklilikler nedeniyle dayanıklı, hafif ve ekonomik açıdan verimli malzemelerle inşa edilmelidir. Ancak, geleneksel üretim yöntemleri ile gemi yapılarında kullanılan çelik levhalar çoğunlukla fazla malzeme tüketimine yol açmakta ve bu da yakıt tüketimini artırarak işletme maliyetlerini yükseltmektedir [1]. Bu durum, yapısal optimizasyon yöntemlerinin gemi mühendisliği alanında daha fazla önem kazanmasına neden olmuştur. Son yıllarda bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarının gelişmesiyle birlikte gemi tasarım süreçlerinde sayısal analiz ve optimizasyon yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle topoloji optimizasyonu, belirlenen yükleme koşulları altında malzeme kullanımını en verimli hale getirmeyi amaçlayan bir mühendislik yaklaşımıdır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı olarak yürütülen bu analizler, gereksiz malzeme kullanımını ortadan kaldırarak yapısal hafiflemeyi sağlarken, mukavemetin korunmasına da olanak tanır [2]. Gemi konstrüksiyonlarında, özellikle çift dip yapılarındaki dolu döşek elemanlarının tasarımında hafifletme açıklıkları kullanılarak hem üretim maliyetlerinin düşürülmesi hem de yakıt tüketiminin azaltılması hedeflenmektedir [3]. Gemi çift dip yapıları, mukavemet ve stabilite açısından kritik öneme sahip olup, balast tankları ve yakıt depolarını içeren ana taşıyıcı sistemlerden biridir. Çift dip konstrüksiyonunda bulunan dolu döşekler, geminin hem uzunlamasına hem de enine mukavemetini sağlayan temel elemanlar arasında yer alır [4]. Ancak, geleneksel tasarım yöntemleri genellikle yüksek malzeme tüketimine yol açarak geminin toplam ağırlığını artırmakta ve enerji verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenle, çift dip konstrüksiyonlarında dolu döşeklerin optimizasyonu hem mühendislik hem de ekonomik açıdan önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır [5]. Literatürde, gemi yapılarında ağırlık azaltımı ve optimizasyon konularında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Liu ve arkadaşları (2019), gemi gövdesinde bulunan mukavemet elemanlarının optimizasyonuna yönelik bir çalışma yaparak stiffner yerleşimlerini belirlemiştir [6]. Putra ve Kitamura (2021), üç aşamalı bir genetik algoritma kullanarak ambar kapağı ve stiffner düzenlemeleri üzerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir [7]. Um ve Roh (2015), dökme yük gemilerinin ambar kapaklarında ağırlık azaltımına yönelik bir optimizasyon yöntemi önermiştir [8]. Kendibilir ve Kefal (2023), peridynamic tabanlı bir topoloji optimizasyonu yöntemi ile gemi kesit tasarımlarında yapısal iyileştirme sağlamıştır [9]. Guanxiang ve arkadaşları (2024), aerodinamik optimizasyon

uygulayarak konteyner gemilerinde sürtünme direncini %20,67 oranında azaltmıştır [10]. Ayrıca, Sekulski (2020), yüksek hızlı alüminyum feribotların gövde tasarımında topoloji optimizasyonunun etkinliğini ortaya koymuştur [11]. Mevcut literatürde gemi konstrüksiyonlarının optimizasyonu ile ilgili birçok çalışma bulunmasına rağmen, çift dip yapılarında dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesine yönelik kapsamlı bir araştırma yapılmadığı görülmektedir. Daha önceki çalışmaların büyük bir bölümü ambar kapakları, stiffner yerleşimleri veya genel gemi mukavemeti üzerine yoğunlaşmıştır [12]. Ancak, çift dip konstrüksiyonlarının doğrudan optimizasyonuna dair kısıtlı veri mevcuttur. Ayrıca, mevcut araştırmaların çoğu sadece sonlu elemanlar analizi tabanlı olup, üretim süreçlerinin fizibilitesi ve maliyet-etkinliği üzerinde detaylı çalışmalar içermemektedir [13]. Bu çalışmanın amacı, gemi çift dip konstrüksiyonunda dolu döşek elemanlarının topoloji optimizasyonu ile hafifletilmesi ve mukavemetin korunmasını sağlayacak alternatif tasarımların geliştirilmesidir. Çalışma kapsamında, farklı açıklık geometrileri ve boyutlarının dolu döşek üzerindeki etkileri analiz edilerek, optimum malzeme kullanımı sağlanacaktır. Fusion 360 yazılımı kullanılarak farklı boyut ve kalınlıklarda döşek modelleri oluşturulacak ve optimizasyon analizleri gerçekleştirilecektir. Elde edilen veriler, geleneksel tasarım yöntemleriyle karşılaştırılarak mühendislik açısından en uygun çözümler belirlenecektir.

Çalışmanın temel katkıları arasında, gemi çift dip konstrüksiyonlarında topoloji optimizasyonunun uygulanarak yapılan ilk kapsamlı araştırmalardan biri olması yer almaktadır. Yapısal hafifletme, mukavemetin korunması ve üretim maliyetlerinin azaltılması gibi faktörler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen optimizasyon analizleri, gelecekteki tasarım süreçlerine rehberlik edecek önemli bulgular sunacaktır. Bununla birlikte, çalışma kapsamında değerlendirilen optimizasyon teknikleri, yalnızca akademik bir araştırma olarak kalmayıp, endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir yöntem olarak da değerlendirilecektir. Bu çalışmanın temel hipotezi, farklı genişlik ve kalınlık kombinasyonlarına sahip dolu döşek elemanlarında, topoloji optimizasyonu yöntemiyle %50'ye kadar malzeme azaltımı gerçekleştirilse dahi, elde edilen yapısal konfigürasyonların maksimum gerilme seviyelerinin gemi inşa mühendisliğinde kabul edilen 150 MPa sınır değerinin altında kalacağı yönündedir. Bu hipotez doğrultusunda yapılan optimizasyon ve gerilme analizleri, ağırlık

hafifletme ile yapısal bütünlük arasındaki dengeyi mühendislik temelli verilerle değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Takip eden bölümlerde, ilk olarak topoloji optimizasyonunun kuramsal temelleri ve gemi çift dip yapılarında dolu döşeklere uygulanma yöntemi açıklanacaktır. Ardından, farklı boyutlardaki dolu döşek elemanları üzerinde gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmalarının sonuçları ve gerilme analizlerinin bulguları sunulacaktır. Son olarak, elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması yapılarak çalışmanın genel sonuçlarına yer verilecektir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Yapısal Optimizasyon (Structural Optimization)

Mühendislik uygulamalarında sistem verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli optimizasyon yaklaşımları sıklıkla kullanılmaktadır. Ağırlığın azaltılması, yakıt tüketiminin düşürülmesi, mekanik dayanımın artırılması, yapısal ömrün uzatılması ve operasyonel hızın yükseltilmesi gibi hedefler, mühendislik tasarımlarında belirleyici rol oynamaktadır. Bu tür hedefler, matematiksel olarak birer amaç fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve söz konusu fonksiyonlara etki eden tasarım değişkenlerinin uygun biçimde düzenlenmesiyle optimum çözümler elde edilmektedir [14].

Yapısal optimizasyon problemleri, matematiksel olarak amaç fonksiyonu, kısıt fonksiyonları ve tasarım değişkenlerinin tanımlandığı aşağıdaki genel denklemlerle 2.1, 2.2, ve 2.3'te gösterildiği gibidir [15].

$$\text{Amaç fonksiyonu: } \phi_0(p) = \min, \text{maks (hedef)} \quad (2.1)$$

$$\text{Kısıt fonksiyonu: } \phi_i(p) \leq 0 \quad (2.2)$$

$$\text{Tasarım alanı: } p^l \leq p_j \leq p^u \quad (2.2)$$

Burada, $\phi_0(p)$ optimize edilmek istenen performans fonksiyonunu temsil ederken, $\phi_i(p)$ sistemin sınırlarını tanımlayan kısıt koşullarını ifade etmektedir. p_j ise optimize edilecek tasarım değişkenlerinden oluşan vektördür. optimizasyon

Yapısal türleri alttaki gibi sıralanabilir [16].

- Boyut optimizasyonu
- Şekil optimizasyonu
- Topoloji optimizasyonu

2.1.1. Boyut optimizasyonu (Size optimization)

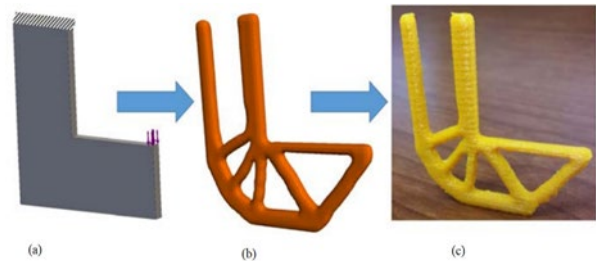
Boyut optimizasyonu, taşıyıcı yapı elemanlarının kalınlıkları, en-boy oranları ve kesit geometrileri gibi parametrelerin sistematik biçimde değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilen bir tasarım iyileştirme yöntemidir. Bu yaklaşımda, mevcut konstrüksiyon yapısı korunarak sadece belirli boyutsal değişkenler optimize edilmekte; böylece hem üretim süreçlerine müdahale edilmeden hem de mukavemet performansına doğrudan katkı sağlanmaktadır [17].

2.1.2. Şekil optimizasyonu (Shape optimization)

Şekil optimizasyonu, yapı elemanları üzerinde yer alan açıklıkların, eğimlerin veya kenar profillerinin biçimsel özelliklerinin yeniden düzenlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu süreçte, tasarım geometrisi ardışık adımlarla evrimsel olarak değiştirilir ve böylece mekanik performansı maksimize edecek en uygun form elde edilmeye çalışılır [18].

2.1.3. Topoloji optimizasyonu (Topology optimization)

Topoloji optimizasyonu, bir yapının taşıyıcı elemanlarının yerleşim ve dağılım biçimini yeniden düzenleyerek, mukavemeti koruyacak şekilde malzeme kullanımını minimize etmeyi amaçlayan ileri düzey bir mühendislik yöntemidir. Bu analiz sürecinde, yapı için belirlenen yükleme ve sınır koşulları doğrultusunda tanımlı bir tasarım alanı oluşturulur. Optimizasyon yazılımı, matematiksel algoritmalar yardımıyla bu alandaki malzeme dağılımını iteratif olarak düzenleyerek en verimli taşıyıcı yapı konfigürasyonunu ortaya çıkarır. Tasarım bölgesi içinde gerçekleştirilen bu evrimsel süreç, yapının geometrisinin optimizasyon hedefi doğrultusunda sürekli olarak yeniden şekillenmesini sağlar. Söz konusu dönüşüm sürecine ait temsili bir örnek Şekil 1'de sunulmuştur [19].



Şekil 1. (a) Tasarımın ham modeli, (b) Topoloji optimizasyonu tasarımı, (c) Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ürün [19]. ((a) Raw design model, (b) Topology optimized design, (c) Manufactured part using additive manufacturing method [19].)

Topoloji optimizasyonu süreci sonucunda elde edilen nihai yapı, başlangıçtaki hacimsel formdan büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu süreçte, Von Mises akma kriteri esas alınarak yapının dayanım sınırları gözetilmiş ve optimizasyon işlemleri bu sınırlar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlem basamakları aşağıdaki gibi özetlenebilir [20].

1. Model, uygun çözünürlükte bir sonlu elemanlar ağı (mesh) ile bölgelere ayrılır.
2. Tanımlanan yükleme ve sınır koşulları altında statik gerilme analizi gerçekleştirilir.
3. Her elemanın Von Mises kriterine göre taşıdığı maksimum gerilme değeri hesaplanır.
4. Gerilme seviyesinin düşük olduğu belirli oranlardaki elemanlar, taşıma katkısının sınırlı olması nedeniyle tasarım bölgesinden çıkarılır.
5. Belirlenen hedef (örneğin %50 malzeme azaltımı) sağlanıncaya kadar, analiz ve elime adımları döngüsel olarak tekrarlanır.

Bu süreç sonucunda ortaya çıkan tasarım, taşıyıcı özelliklerini koruyarak minimum malzeme ile optimum mekanik performans sergileyen bir yapı formuna dönüşmektedir.

Gerilme analizleri ve topoloji optimizasyonları, Autodesk Fusion 360 yazılımının "Shape Optimization" ve "Static Stress Analysis" modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller, üç

boyutlu analiz için uygun olacak şekilde quadratic (ikinci dereceden) tetrahedral elemanlar ile sonlu eleman ağına bölünmüştür.

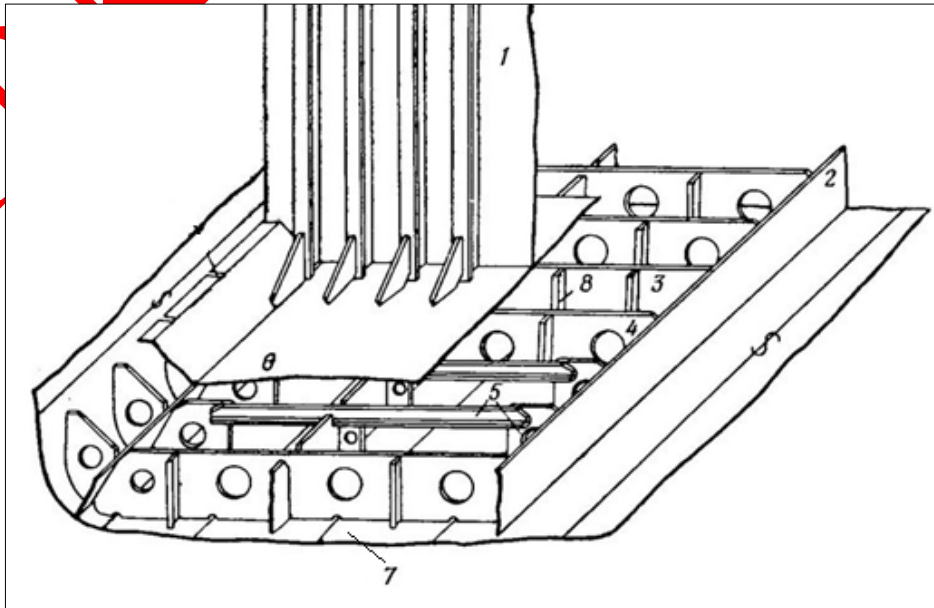
Ortalama ağ yoğunluğu 1 mm civarında tutulmuş olup, her modelin eleman sayısı yaklaşık 85.000 ile 130.000 arasında değişmektedir. Kritik bölgelerde daha yüksek çözünürlük elde etmek amacıyla yazılımın otomatik adaptif mesh rafinasyon algoritması etkinleştirilmiştir.

Gerilme analizi sırasında kullanılan çözüm algoritması, Fusion 360 yazılımına entegre edilmiş doğrusal statik analiz çözücüsüdür. Bu çözücü, Newton-Raphson tabanlı iteratif yöntem kullanarak, Von Mises gerilme dağılımını çözümlemekte ve her bir eleman üzerindeki maksimum gerilme seviyelerini belirlemektedir.

Sonuçların sayısal doğruluğu, ağ yoğunluğu artışıyla test edilmiş ve tüm modellerde gerilme değişiminin %5'in altında olduğu doğrulanarak mesh konverjansı sağlanmıştır. Bu yaklaşım, analiz sonuçlarının sayısal kararlılığını ve tekrarlanabilirliğini garanti altına almaktadır.

2.2. Dolu Döşek (Solid Floor)

Dolu döşekler, gemi dip konstrüksiyonunda enine doğrultuda konumlandırılmış, genellikle düz levha formundaki mukavemet elemanlarıdır. Bu yapılar, geminin taşıyıcı iskeleti içerisinde hem enine hem de uzunlamasına yönde yük aktarımını sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunurlar. Dolu döşek elemanları çoğunlukla sac malzemeden kesilerek üretilmekte ve kaynaklı birleşim teknikleriyle dip yapısına entegre edilmektedir [21].



Şekil 2. Enine sistem gemi dip konstrüksiyonu 1: Enine perde, 2: Merkez omurga, 3: Su geçmez döşek, 4: Dolu döşek, 5: Boş döşek 6: İç dip kaplama, 7: Dış kaplama, 8: Stifner. (Transverse system of ship bottom structure: 1. Transverse bulkhead, 2. Center girder, 3. Watertight floor, 4. Solid floor, 5. Open floor, 6. Inner bottom plating, 7. Outer bottom plating, 8. Stiffener.)

Şekil 2'de gösterildiği üzere, 4 numarayla belirtilen dolu döşekler, boyuna doğrultudaki omurga elemanları arasında yer almakta ve dip konstrüksiyonun rijitliğini artırmaktadır. Gemi dip yapısı genellikle yakıt ve balast tankları gibi sıvı taşıyan bölümleri içermektedir. Bu tankların hacimsel etkinliğini artırmak ve içerisindeki sıvıların serbest dolaşımını sağlamak amacıyla dolu döşek elemanlarında stratejik açıklıklar tasarlanmaktadır. Söz konusu açıklıklar, aynı zamanda balast sistemleri ve bakım erişimi için boru geçişlerine ve insan dolaşımına olanak tanıyacak şekilde belirli bir minimum boyutta planlanmak zorundadır.

Yapılan bu açıklıklar sadece işlevsellik açısından değil, aynı zamanda yapısal hafifletme ve üretim verimliliği gibi mühendislik hedefleri doğrultusunda da önem arz etmektedir. Bu bağlamda, açıklık geometrilerinin ve yerleşim düzenlerinin optimizasyonu, dolu döşeklerin hem mekanik performansını hem de üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen temel bir tasarım parametresi haline gelmektedir.

Tüm analizlerde, 1200 mm yüksekliğe ve değişken genişlik/kalınlık kombinasyonlarına sahip sac modeller üzerinde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Modellerin üst kenarının iç yüzeyine, dikey yönde etki eden 0,3 MPa büyüklüğünde yayılı yüzey yükü uygulanmıştır. Bu yükleme, gemi dip yapısında yer alan sıvı tanklarının operasyonel durumlarda oluşturduğu hidrostatik etkiyi temsil etmektedir.

Sınır koşulları bakımından, alt kenar boyunca tüm yer değiştirmeler sabitlenmiş, yan kenarlarda ise sadece dikey hareket engellenmiştir; böylece enine rijitlik korunurken yatay yönde doğal deformasyon iznine olanak tanınmıştır. Bu tanımlamalar, gemi dip konstrüksiyonundaki gerçek bağlama koşullarını sayısal model üzerinde doğru şekilde temsil etmeyi amaçlamaktadır.

Gerilme analizlerinde, optimizasyon sonucunda elde edilen tasarımların yapısal yeterliliği, Von Mises kriterine göre 150 MPa'lık sınır değer aşılması esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu sınır değeri, karbon çeliği esaslı denizcilik

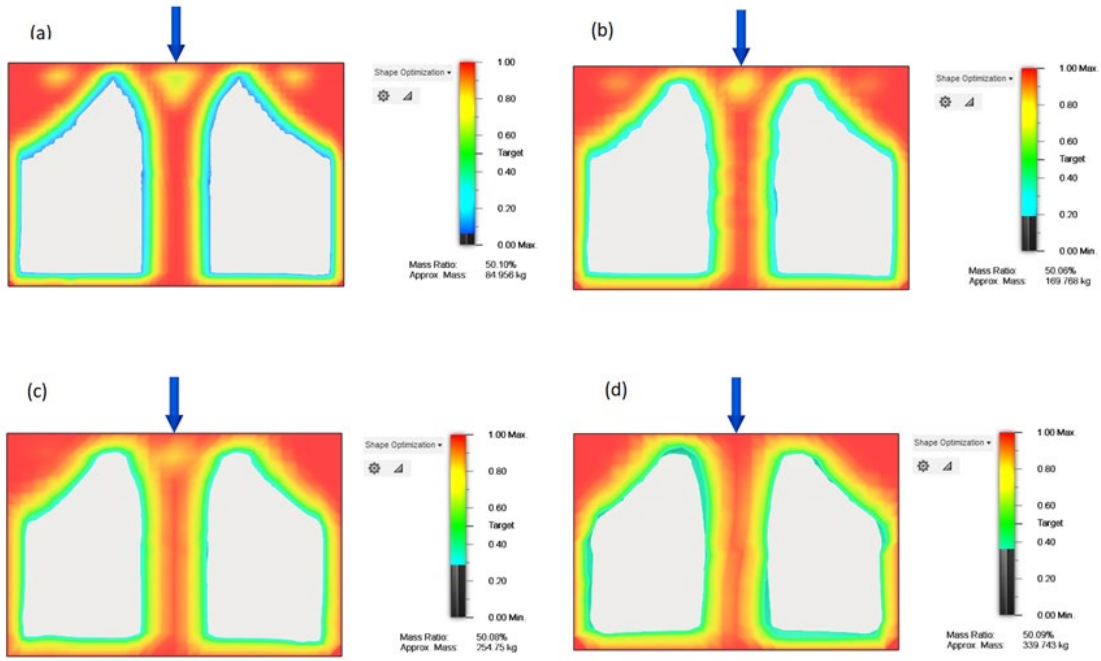
yapılarında kullanılan tipik akma mukavemeti (~250 MPa) baz alınarak, güvenlik katsayısı $\geq 1,6$ olacak şekilde belirlenmiş ve DNV-GL ve ABS gibi klas kuruluşlarının mühendislik tasarım kriterlerine dayandırılmıştır (bkz. DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures, ABS Steel Vessel Rules, Part 4, Chapter 3: Hull Structures).

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, yüksekliği 1,2 metre olan bir çift dip konstrüksiyonunda kullanılmak üzere tasarlanan dolu döşek elemanı üzerinde topoloji optimizasyonu analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler kapsamında, levha kalınlığı 10 mm, 20 mm ve 30 mm olmak üzere üç farklı değer olarak seçilmiştir. Her bir kalınlık değeri için döşek genişlikleri 1,8 metre, 2,4 metre, 3,0 metre ve 3,6 metre olacak şekilde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tüm optimizasyon analizleri, Autodesk Fusion 360 yazılımının şekil optimizasyonu modülü kullanılarak yürütülmüştür. Bu analizlerde, başlangıç koşulu olarak yapısal ağırlıkta %50 oranında bir azaltım hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonuçları doğrultusunda, yazılım tarafından her bir döşek genişliği için önerilen optimum açıklık sayısı ile bu açıklıkların geometrik konfigürasyonları belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı kalınlık ve genişlik değerleri için optimum tasarım önerilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

3.1.1. Konfigürasyon I: 1,8 metre genişlik (Configuration I: 1.8 m width)

Şekil 3'te görüldüğü üzere, 1,8 metre genişliğindeki döşekler için sırasıyla 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm kalınlıklarda gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, malzeme üzerinde iki adet açıklığın oluştuğu tespit edilmiştir. Yayılı kuvvetin uygulandığı üst kenarın alt bölgesinde, köprü taşıyıcı konstrüksiyonuna benzer bir yapı oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzeme kalınlığı arttıkça köşe bölgelerinde yer alan yarıçapların büyüdüğü; buna karşın, kalınlığın azalması durumunda ise daha keskin hatların elde edildiği dikkat çekmektedir.

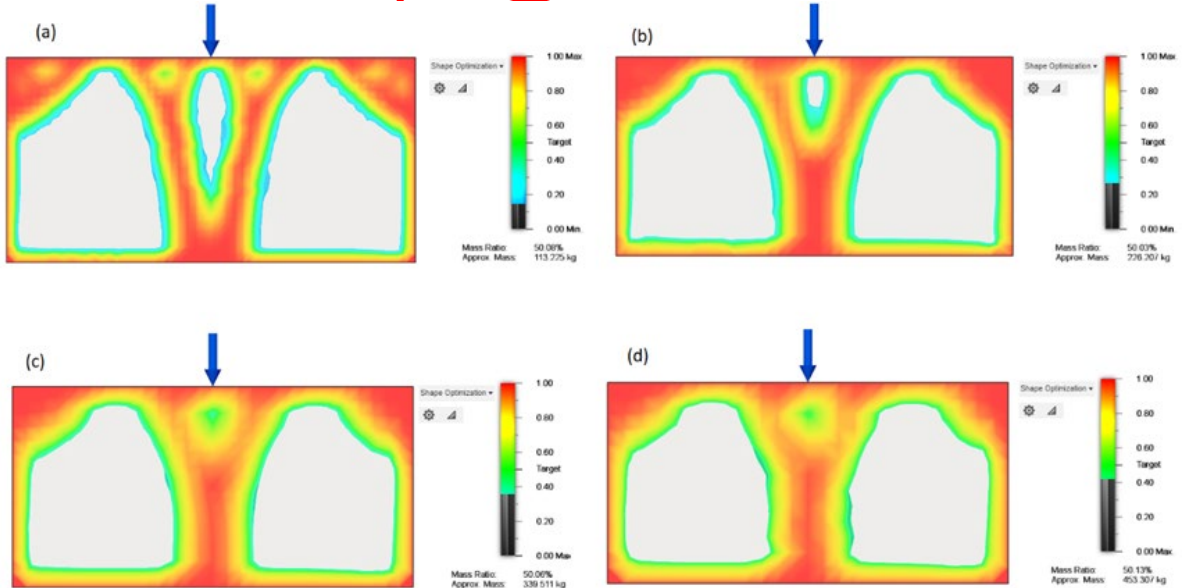


Şekil 3. 1,8 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 1.8-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.2. Konfigürasyon II: 2,4 metre genişlik (Configuration II: 2.4 m width)

Şekil 4’te görüldüğü üzere, 2,4 metre genişliğindeki döşek için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak, 10 mm ve 20 mm kalınlığa sahip döşeklerde, en alt kenara kadar uzanmayan küçük açıklıkların

oluşturulduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca, 1,8 metre genişliğindeki döşekte olduğu gibi, kalınlık arttıkça köşe yarıçaplarının da büyüdüğü gözlemlenmiştir. Mesnet kenarları olarak kullanılan alt ve yan kenarlarda ise döşek kalınlığının artışıyla birlikte daha fazla hacmin korunduğu tespit edilmiştir.



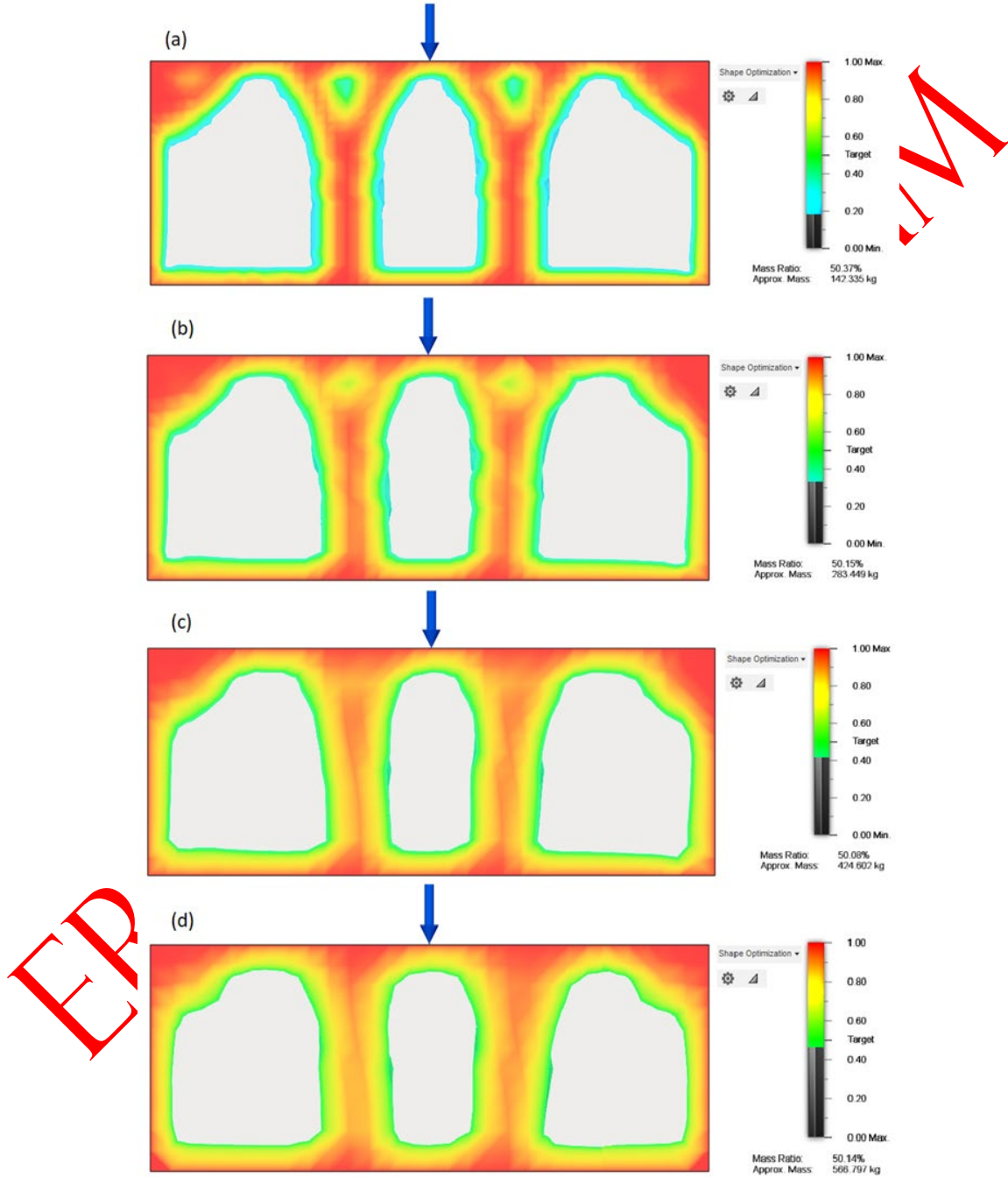
Şekil 4. 2,4 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 2.4-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.3. Konfigürasyon III: 3 metre genişlik (Configuration III: 3.0 m width)

3 metre genişlikteki döşek için yapılan optimizasyonda her kalınlık için 3 adet açıklık oluşturulduğu ve yanlarda yer alan açıklıkların daha büyük olduğu Şekil 5’te görülmektedir. Diğer

genişliklerdeki analizlerde de olduğu gibi 3 metrelik döşekte yayılı kuvvetin uygulandığı kenarın altına köprü taşıyıcı yapı benzeri şekil oluşturmuştur. Sağ ve sol üst köşelerde de yükleme ve mesnet belirtilen kenarlar sebebiyle üst yapı, ankastre mesnet benzeri bir zorlanmaya maruz kalmış gibi görselleştirmiştir. Malzeme korunurluğu %50 nin altına düşürülürse, 10 mm

kalınlığındaki sacda ortada korunan kolon benzeri yapıların üst bölgelerinde açıklık açılabilceği renk skalasından anlaşılmaktadır. Diğer genişliklerdeki optimizasyonlarda olduğu gibi 3 metrelik döşek optimizasyonunda da kalınlık arttıkça köşe yarıçapları artmaktadır ve yan ve alt mesnet kenarlarında korunan hacim miktarı artmaktadır.



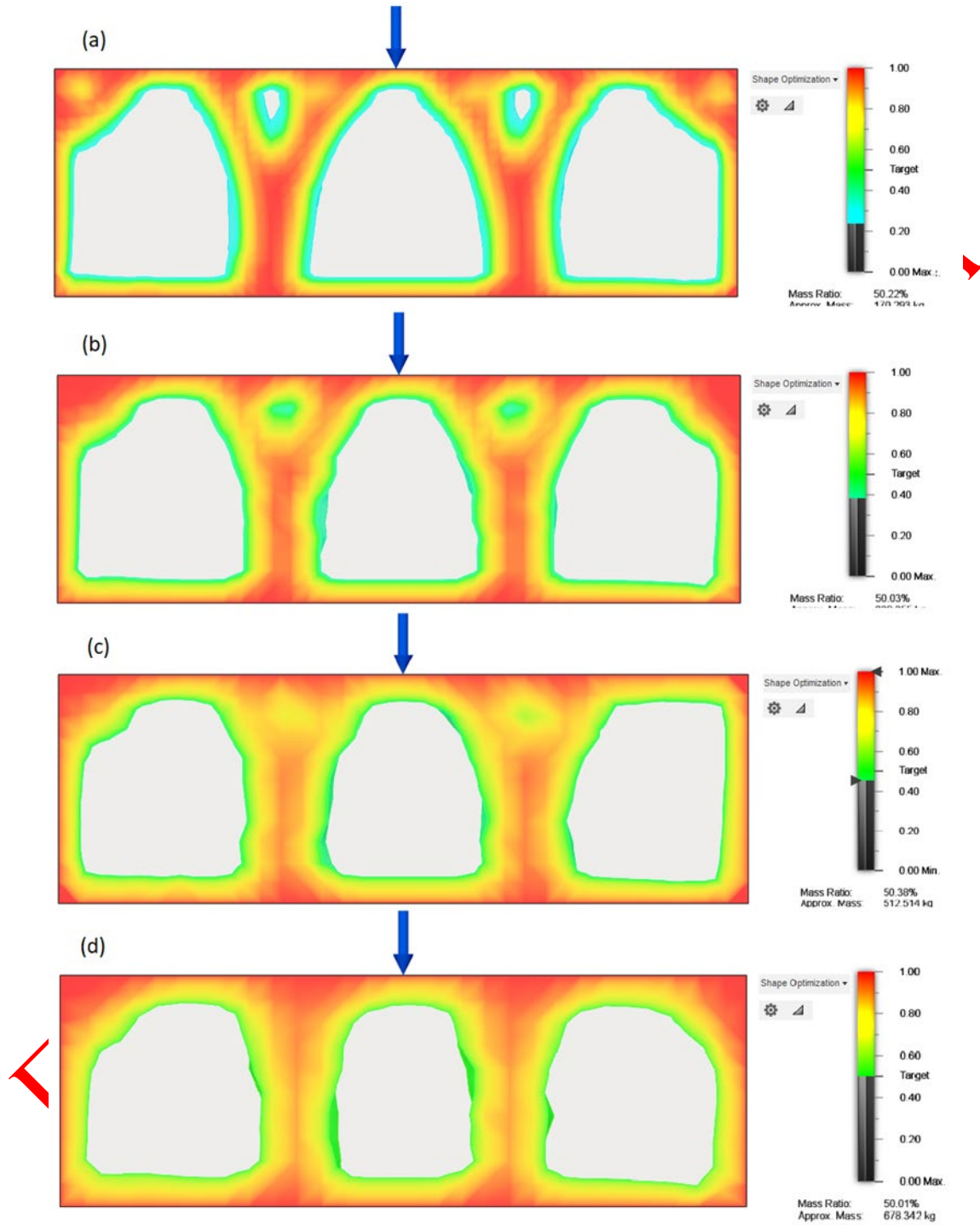
Şekil 5. 3 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 3.0-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.1.4 Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik (Configuration IV: 3.6 m width)

3,6 metre genişliğindeki döşek üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, boyutları birbirine yakın 3 adet açıklık içeren bir yapı düzeninin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Diğer

genişliklerdeki döşek analizlerinde olduğu gibi, ince saclarda köprü kolonlarına benzer yapıların oluşturulduğu Şekil 6'da görülmektedir. Ancak, döşek kalınlığı arttıkça boşluklar ile kolonların alt

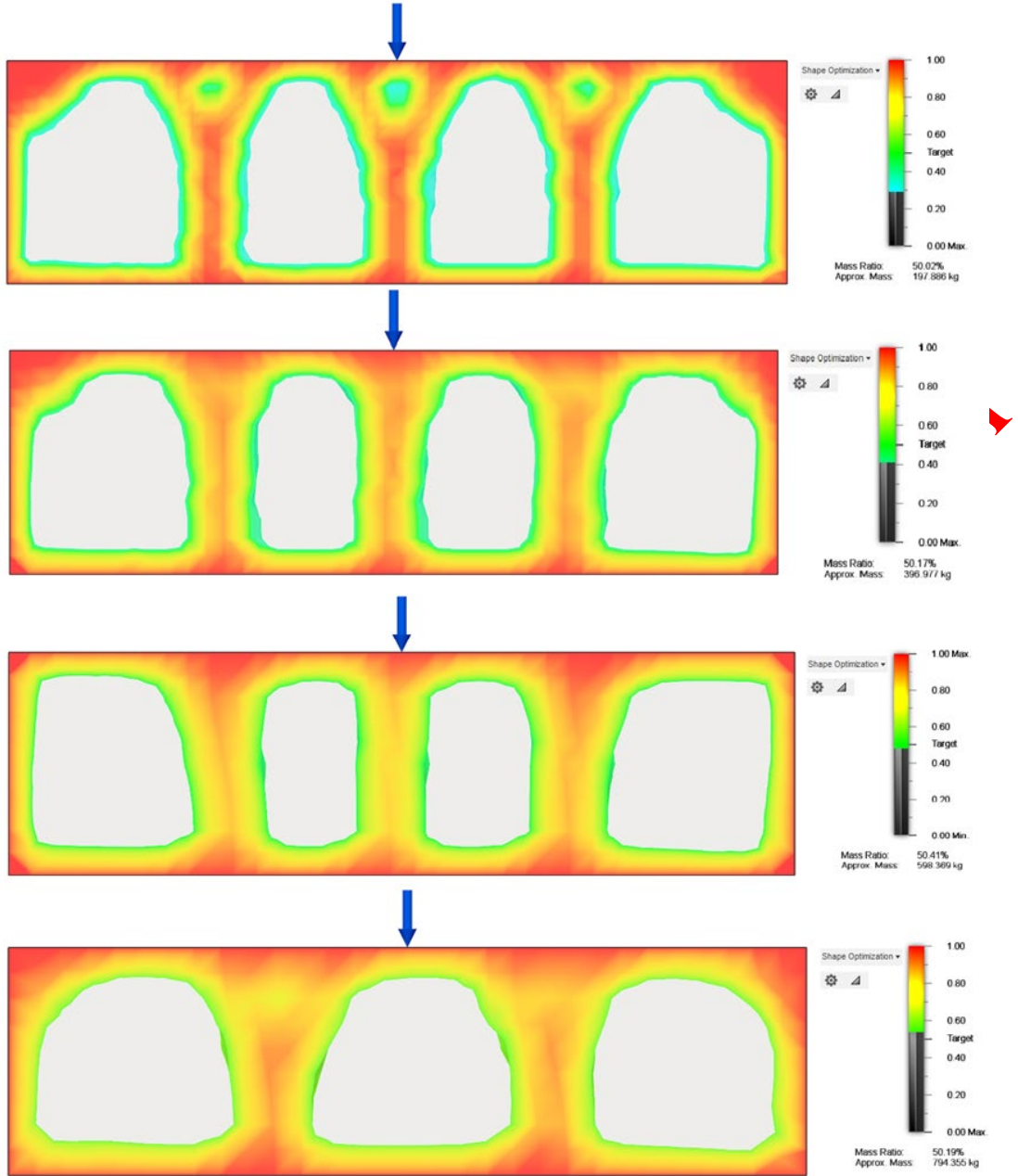
ve üst kısımlarının birbirine benzemeye başladığı tespit edilmiştir. Bu durum, döşeklerin yatay eksene göre simetrik bir yapı kazandığını göstermektedir. .



Şekil 1. 3,6 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 3.6-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

10 mm kalınlıktaki optimizasyonda orta kolon yapıların üst tarafında açıklıklar önerilmektedir. Diğer döşek analizlerindeki gibi yine kalınlık arttıkça açıklıklardaki yarıçaplar büyümektedir.

3.1.5. Konfigürasyon V: 4,2 metre genişlik (Configuration V: 4.2 m width)



Şekil 2. 4,2 metre genişlik optimizasyonları (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, (d) 40 mm. (Optimization results for 4.2-meter width: (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 30 mm, and (d) 40 mm thicknesses.)

3.2. Dolu Döşek Gerilme Analizleri (Stress Analyses of Solid Floors)

Bu çalışmada, farklı genişliklerdeki (1,8 m, 2,4 m, 3 m, 3,6 m ve 4,2 m) dolu döşek elemanları üzerinde %50 hacim korunumuna göre topoloji optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca 3,6 m genişliğindeki döşek elemanı için 20 mm ve 30 mm kalınlıklarına sahip modeller üzerinde, topoloji optimizasyonu tarafından önerilen farklı malzeme korunum oranları (%40, %50, %60 ve %70) kapsamında gerilme analizleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, farklı malzeme korunum seviyelerinin

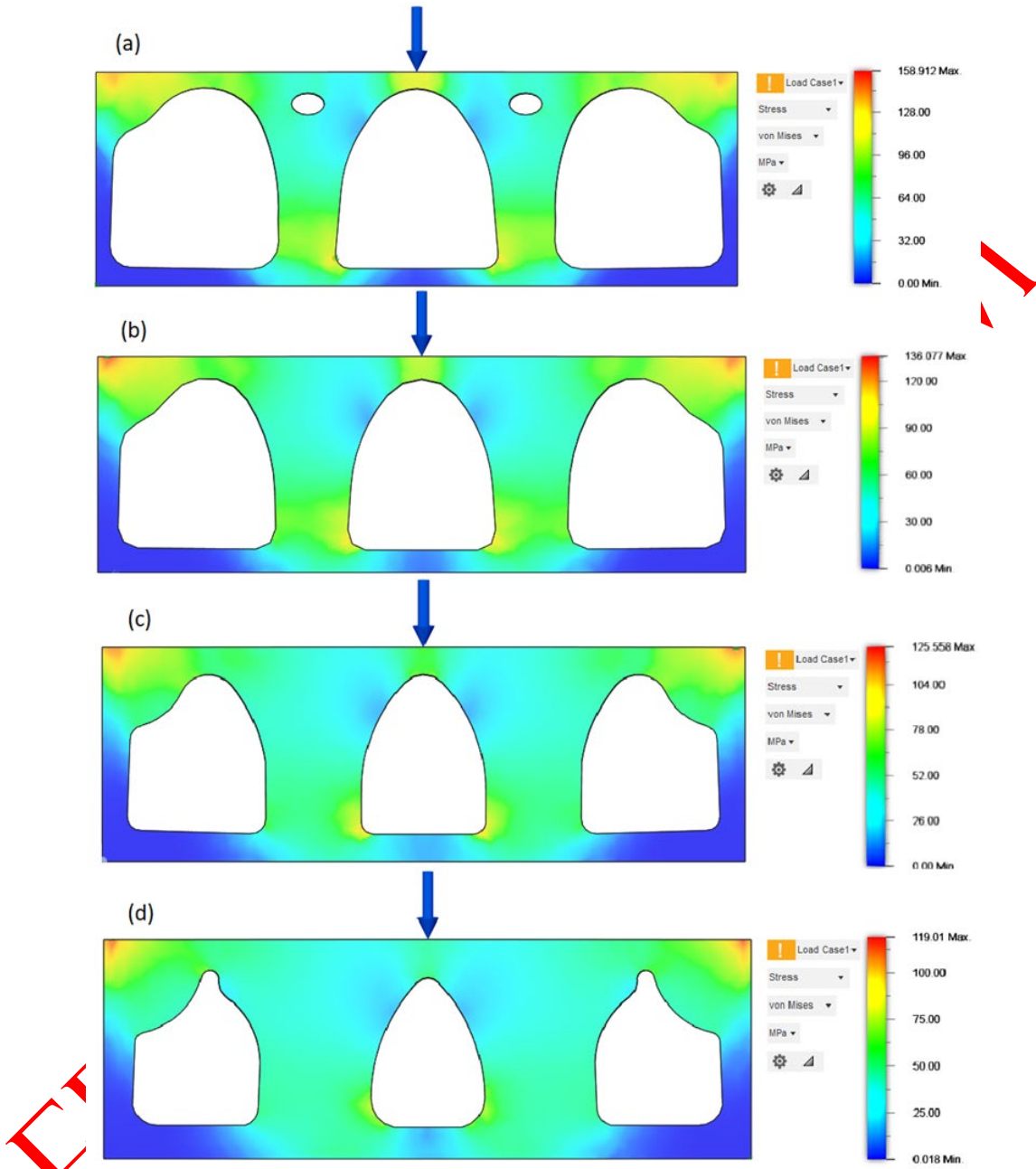
yapısal performansa etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek amacıyla değerlendirilmiştir.

3.2.1. Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik ve 20 mm döşek gerilme analizleri (Configuration IV: stress analyses of 3.6 m width and 20 mm floor thickness)

3,6 m genişliğindeki döşek için farklı malzeme korunum oranlarına sahip tasarımların gerilme analizleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Her bir analiz görselinin yanında verilen renk skalası, yapının farklı bölgelerinde oluşan gerilme değerlerinin yaklaşık büyüklüklerini göstermektedir. %40 malzeme korunum oranına sahip ilk tasarım dışında,

diğer üç öneri tasarımın analizlerinde maksimum gerilme değerinin 150 MPa'nın altında kaldığı görülmüştür. Ağırlık azaltımı hedefi ve yapısal uygunluk kriterleri birlikte değerlendirildiğinde ise,

%50 malzeme korunumuna sahip ikinci topoloji optimizasyonu tasarımının en uygun çözüm olduğu anlaşılmaktadır.

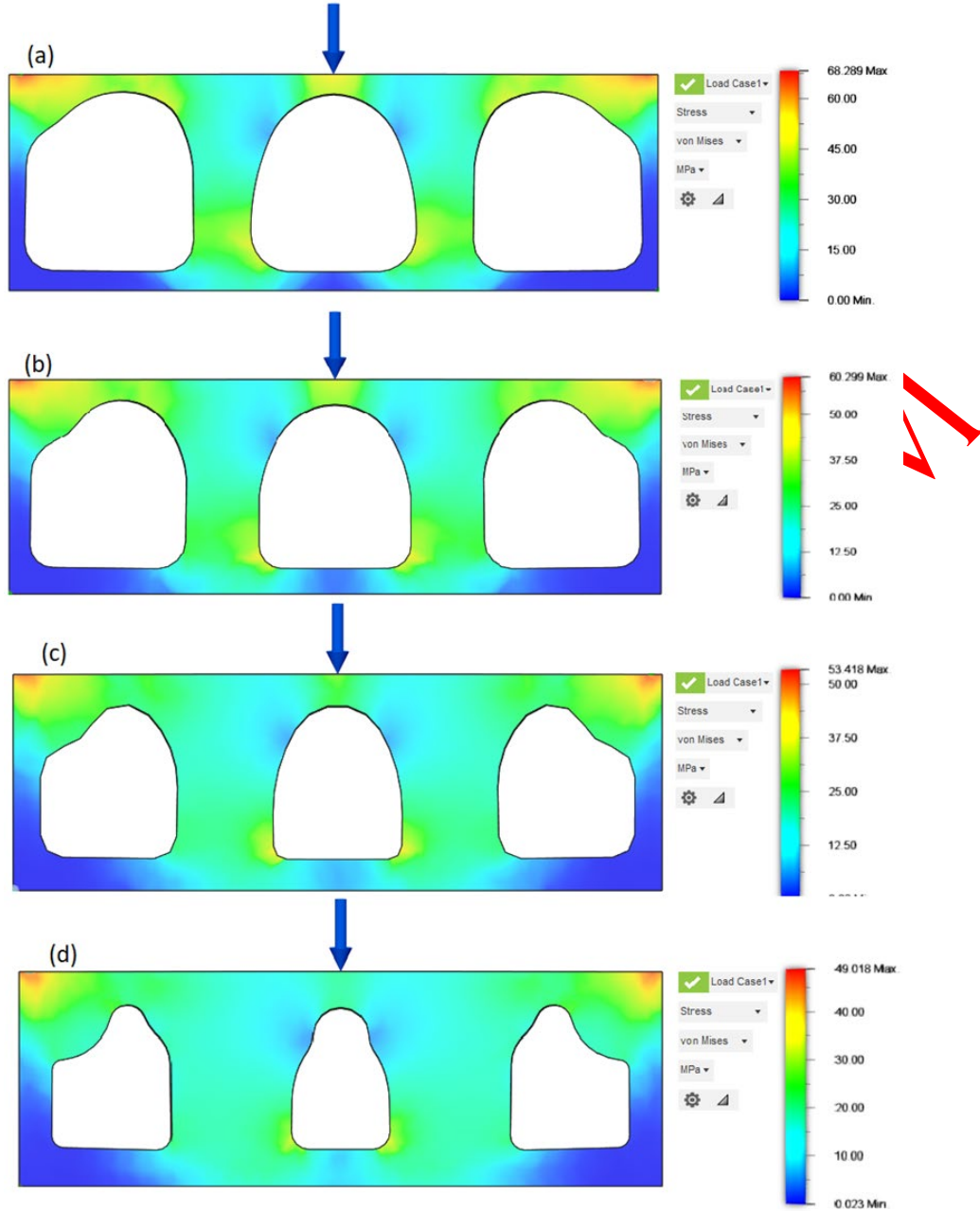


Şekil 3. 20 mm kalınlık gerilme analizleri (a) %40, (b) %50, (c) %60, (d) %70. (Stress analysis results for 20 mm thickness: (a) 40%, (b) 50%, (c) 60%, and (d) 70% load levels.)

3.2.2. Konfigürasyon IV: 3,6 metre genişlik ve 30 mm döşek gerilme analizleri (Configuration IV: stress analyses of 3.6 m width and 30 mm floor thickness)

30 mm kalınlığa ve 3,6 m genişliğe sahip dolu döşek için topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen önerilen tasarımlar ve bunlara ait gerilme analizleri Şekil 9'da gösterilmektedir. 20 mm kalınlık için farklı korunum oranlarıyla yürütülen çalışmalarda görülen eğilime benzer şekilde, 30 mm kalınlık

durumunda da kolon benzeri yapıların üst bölgelerinde daha fazla malzemenin korunduğu görülmektedir. Üst köşe noktaların ankastre sınır şartına sahip olması nedeniyle bu köşelerde daha büyük bir malzeme hacminin korunduğu anlaşılmaktadır. Dört farklı tasarım önerisine ait gerilme analizi sonuçları ise elde edilen maksimum gerilme değerlerinin, gemi inşa kurallarında izin verilen 150 MPa'lık gerilme sınırının oldukça altında kaldığını tespit etmiştir.



Şekil 4. 30 mm kalınlık gerilme analizleri (a) %40, (b) %50, (c) %60, (d) %70. (Stress analysis results for 30 mm thickness: (a) 40%, (b) 50%, (c) 60%, and (d) 70% load levels.)

3.3. Analizlerin Değerlendirmesi (Evaluation of the Analyses)

İlk aşamada, 1,8 m ile 4,2 m arasında değişen beş farklı levha genişliği (1,8 m, 2,4 m, 3,0 m, 3,6 m ve 4,2 m) için 10 mm, 20 mm, 30 mm ve 40 mm kalınlıklardaki levhalarda %50 malzeme korunum oranıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Bu optimizasyonlar sonucunda elde edilen tasarımlarda, levha genişliği 1,8 m ve 2,4 m olan her bir kalınlık için iki açıklık önerilmiş; 3,0 m ve 3,6 m genişlikler için tüm kalınlıklarda üç açıklık önerilmiştir. En geniş levha boyutu olan 4,2 m’de ise 10, 20 ve 30 mm kalınlıklar için dört açıklık, 40 mm kalınlık için üç açıklık öngörülmüştür. Bu

sonuçlar, levha boyutu ve kalınlığının açıklık sayısı üzerindeki etkisini ortaya koyarak farklı boyutlardaki levhalar için optimum hafifletme deliği sayısını belirlemiştir.

İkinci aşamada, gerilme analizleri yalnızca 3,6 m genişliğindeki döşek üzerinde, 20 mm ve 30 mm kalınlıklara sahip tasarımlar için gerçekleştirilmiştir. Bu iki kalınlıkta, ayrı ayrı yapılan topoloji optimizasyonlarından %40, %50, %60 ve %70 malzeme korunum oranlarında elde edilen tasarımlar gerilme analizine tabi tutulmuştur. Her bir tasarımın gerilme analizi sonucunda, alt köşe bölgeleri ile maksimum gerilmenin olduğu üst köşe noktaları hariç tutulduğunda, tüm

bölgelerde gerilme dağılımının homojen olduğu gözlemlenmiştir. Sekiz farklı gerilme analizi sonucunun karşılaştırmalı değerlendirmesi, gerilme seviyesi ve malzeme korunum oranına dayalı uygunluk açısından, 3,6 m genişliğindeki döşek için 20 mm kalınlığında ve %50 malzeme korunumu ile elde edilen tasarımın en uygun çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Bu tasarım, malzeme verimliliği ile yapısal dayanım arasında en dengeli sonucu sağlayarak diğer alternatiflere kıyasla daha tercih edilebilir bulunmuştur.

Literatürde gemi yapılarında yapısal ağırlığın azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında, genellikle açıklık düzenlemeleri veya destek elemanı yerleşimlerine odaklanıldığı görülmektedir. Örneğin, Liu ve arkadaşları (2019), gemi mukavemet elemanlarının iki aşamalı bir düzen-boyut optimizasyonu ile %35'e varan malzeme azaltımı sağladıklarını belirtmiş; ancak bazı bölgelerde maksimum gerilmenin 180 MPa seviyesini aştığını rapor etmişlerdir [6]. Benzer şekilde, Putra ve Kitamura (2021), hibrit genetik algoritma kullanarak ambar kapağı açıklıklarının yerleşimini optimize etmiş ve yaklaşık %30 oranında hafifletme elde etmişlerdir [7]. Öte yandan, İslam ve Paul (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hidrostatik yüklere maruz bırakılan tanker bölmesinde uygulanan topoloji optimizasyonu neticesinde elde edilen gerilme seviyelerinin 160 MPa civarında olduğu görülmektedir [13]. Bu bağlamda sunulan çalışma, %50'ye varan malzeme azaltımıyla birlikte tüm konfigürasyonlarda gerilme seviyesinin 150 MPa sınırının altında kalması açısından mevcut literatüre kıyasla daha dengeli ve mühendislik açısından güvenli çözümler sunmaktadır. Ayrıca açıklık konfigürasyonlarının geometrik gelişimi mühendislik ilkelerine dayandırılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar nicel olarak tartışılmıştır. Bu yönüyle, çalışma hem yapısal verimliliği artırmakta hem de uygulamaya dönük nitelikli bir katkı sunmaktadır.

Elde edilen tasarımlar incelendiğinde, yükleme kenarının alt bölgesinde köprü benzeri taşıyıcı yapıların belirginleştiği ve bu yapıların rijitlik gereksinimine doğrudan yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle genişliği artan döşeklerde açıklık sayısının fazlalaşması, yük transfer alanının dengeli dağılması ve kritik gerilme yığılmalarının minimize edilmesi adına algoritma tarafından yönlendirilmiştir. Bu durum, yük taşıyan alanlarda taşıyıcı kolonların merkezi bölgede yoğunlaştığını ve açıklıkların çevresel sınır koşullarına göre simetrik olarak optimize edildiğini ortaya koymaktadır.

Malzeme kalınlığının artması ile birlikte açıklık kenarlarında oluşan köşe yarıçaplarının büyümesi ise, yüksek kalınlık durumlarında gerilme konsantrasyonlarının daha yumuşak geçişlerle absorbe edilmesi ihtiyacına yanıt vermektedir. Bu tür yarıçap geçişleri, gerilme yığılmalarını azaltmakta ve çatlak başlangıçlarını geciktirerek yapısal güvenliğini artırmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandığında, Liu et al. (2019) ve Putra & Kitamura (2021) gibi araştırmalarda açıklık yerleşimlerinin genel geometrik düzene etkisi tartışılmış, ancak açıklık geometrilerinin mühendislik gerekçeleriyle detaylı yorumlanmadığı görülmektedir [6,7]. Mevcut çalışmada ise hem açıklık formasyonu hem de taşıyıcı alanların topolojik dağılımı, yükleme ve mesnet sınır koşullarına bağlı olarak mühendislik temelli bir mantıkla analiz edilmiştir.

Ayrıca, 3,6 m genişliğe sahip döşek konfigürasyonunda yapılan detaylı gerilme analizlerinde, malzeme korunum oranları değiştirildikçe rijitlik dağılımı ve yük yollarının değişimi net biçimde gözlemlenmiş; en uygun performansın %50 malzeme korunum oranında sağlandığı doğrulanmıştır. Bu tür sonuçlar, sadece görsel benzerlik değil, aynı zamanda mekanik davranışın mühendislik gereklilikleriyle uyumlu bir şekilde değerlendirildiğini göstermektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, beş farklı döşek genişliği (1,8–4,2 m) ve dört farklı levha kalınlığı (10–40 mm) için %50 malzeme korunum oranıyla topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 3,6 m genişliğindeki döşek elemanları için 20 mm ve 30 mm kalınlık değerlerinde, %40–%70 arasında değişen dört farklı korunum oranı ile gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm optimize tasarımlarda maksimum gerilmenin 150 MPa'lık sınırın altında kaldığını göstermektedir. Özellikle, 20 mm kalınlıkta ve %50 malzeme korunumuna sahip model, en uygun yapısal performansı sergileyerek en düşük gerilme seviyelerini sağlamıştır.

Genel bir eğilim olarak, döşek genişliği arttıkça optimizasyon sonucu ortaya çıkan açıklık sayısının arttığı, levha kalınlığı yükseldikçe ise açıklık kenarlarında daha geniş köşe yarıçaplarının olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, daha geniş döşeklerde aynı oranda malzeme azaltımına ulaşmak için daha fazla sayıda boşluk gerektiğine ve daha kalın levhalarda gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla boşluk kenarlarının daha

yumuşak geçişlerle şekillendiğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, incelenen parametre aralığında taşıyıcı plakaların yaklaşık %50 malzeme azaltımıyla dahi izin verilen gerilme seviyelerini aşmadan tasarlanabileceği gösterilmiştir. Çalışma, farklı genişlik ve kalınlıklardaki plakaların topoloji optimizasyonu ve gerilme performansı açısından sistematik bir değerlendirmesini sunarak literatüre optimal hafifletilmiş yapısal tasarım konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda, optimize edilen tasarımların farklı yükleme durumları altında incelenmesi, sonuçların deneysel prototiplerle doğrulanması ve rijitlik ile dinamik davranış gibi çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS CONTRIBUTIONS)

Ahmet Fatih YILMAZ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U, Hundal MS, editors. Factors that influence Manufacturing Costs and Procedures for Cost Reduction. Cost-Efficient Design, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007, p. 143–384. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34648-7_7.
- [2] Novikov A V, Barmin AA, Mudrova AA, Yasinskaya Y V. System analysis of the features of using information models in shipbuilding. J Phys Conf Ser 2019;1333:032090. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/3/032090>.
- [3] Kim H, Lee S-S, Park JH, Lee J-G. A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. Int J Comput Integr Manuf 2005;18:427–41. <https://doi.org/10.1080/09511920500064789>.
- [4] Yılmaz AF, Konal M. Enhanced Container Ship Hatch Cover using Topology Optimization Method for Lightweight Design and Optimal Costs. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2025;1–16.
- [5] Wang G, Feng Y, Dai Y, Chen Z, Wu Y. Optimization design of a windshield for a 12,000 TEU container ship based on a support vector regression surrogate model. Ocean Engineering 2024;313:119405.
- [6] Liu Z, Cho S, Takezawa A, Zhang X, Kitamura M. Two-stage layout-size optimization method for prow stiffeners. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2019;11:44–51.
- [7] Putra GL, Kitamura M, Takezawa A. Structural optimization of stiffener layout for stiffened plate using hybrid GA. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2019;11:809–18.
- [8] Um T-S, Roh M-I. Optimal dimension design of a hatch cover for lightening a bulk carrier. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2015;7:270–87.
- [9] Kendibilir A, Kefal A. Enhanced ship cross-section design methodology using peridynamics topology optimization. Ocean Engineering 2023;286:115531.
- [10] Wang G, Feng Y, Dai Y, Chen Z, Wu Y. Optimization design of a windshield for a 12,000 TEU container ship based on a support vector regression surrogate model. Ocean Engineering 2024;313. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119405>.
- [11] Sekulski Z. Multi-objective topology and size optimization of high-speed vehicle-passenger catamaran structure by genetic algorithm. Marine Structures 2010;23:405–33.
- [12] Niu L, Xiao L. Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems. Intelligent Marine Technology and Systems 2024;2. <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3>.
- [13] Islam MS, Paul SC. Topology optimization of an oil tanker bulkhead subjected to hydrostatic loads. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering 2021;18:207–15.
- [14] Bekler YB. Shape optimization application for weight reduction of a container wagon 2013.

- [15] Kilicaslan A. The conceptual design of a high container weight reduced by topology optimisation method. 2018.
- [16] Bal MK. Designing universal yoke structure of suspension and release system with topology optimization for fighter aircrafts 2020.
- [17] Yılmaz AF, Günay M. Investigation of mechanical strength and distortion in submerged arc welding of AH36 ship steel plate. Journal of Ship Production and Design 2017;33:335–41.
- [18] Guzelbulut C, Badalotti T, Suzuki K. Optimization techniques for the design of crescent-shaped hard sails for wind-assisted ship propulsion. Ocean Engineering 2024;312:119142.
- [19] Mirzendehtdel AM, Suresh K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. Computer-Aided Design 2016;81:1–13.
- [20] Mehmet ÖZKAL F. TOPOLOJİ ENİYİLEMESİ VE ÇUBUK BENZEŞİMİ YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BETONARME YAPI ELEMANLARINDA EN UYGUN DONATI DÜZENİNİN BELİRLENMESİ VE DENEYSEL GERÇEKLEMESİ. 2012.
- [21] Ertas AH, Alkan V, Yılmaz AF. Finite element simulation of a mercantile vessel shipboard under working conditions. Procedia Eng 2014;69:1001–7.