

## Kompozit Bir Teknenin Dip Levhasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ve Yapısal Optimizasyonu

Recep Tayyip KILIÇ<sup>1</sup>, Mustafa Erden YILDIZDAĞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>(sorumlu yazar), [rtkilic@yildiz.edu.tr](mailto:rtkilic@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0003-0819-2177

<sup>2</sup> [yildizdag@itu.edu.tr](mailto:yildizdag@itu.edu.tr), 0000-0003-3041-133X

### ÖZET

Gemi sanayinde üretim malzemeleri, teknolojinin gelişmesine paralel yönde değişim göstermektedir. Eski çağlarda ağaç kütüklerinin birbirine bağlanması ile elde edilen sandallar zamanla yerlerini işlenmiş ahşaptan üretilmiş teknelere bırakmıştır. İnsanoğlu metalleri eritip şekil verebildiğinde ise demirden yapıma büyük ve dayanıklı gemiler üretilmeye başlanmıştır. Günümüz teknolojisinde ise demirden yapılan hantal gemilere alternatif olarak çok daha hafif ve benzer dayanımları gösteren kompozit tekneler üretilmektedir. Kompozit iki veya daha fazla materyalin niteliklerinde değişim olmadan makro düzeyde bir araya gelmesi ile oluşan yapısal malzemedir. Gemi inşaatı sanayisinde polimer matrisli kompozitler kullanılır. Bu kompozitlerde reçine olarak en çok polyester, epoksi ve vinilester; lif olarak da en çok cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf kullanılır. Diğer tekne türleri gibi kompozit tekneler de üretilirken belli standartlar ve kurallara tabi tutulur. 24 metre ve altı tekneler daha çok Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın (ISO) koyduğu kurallar çerçevesinde boyutlandırılır. Standartlar teknenin dip, borda, güverte gibi kısımlarındaki levhaların ve destek elemanlarının dayanması gereken yüklemeleri ampirik formüller yardımı ile hesaplanmasını sağlar. Yapısal elemanlar boyutlandırılırken müşterinin isterileri, malzemelerin standart ölçülerde üretilebilirliği ve en önemlisi üretim maliyetleri göz önüne alınır. Üretim maliyetinin düşürülmesi ve üretimin daha az malzeme ile yapılabilmesi için farklı optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada kompozit bir teknenin dip levhasının daha az malzeme ile üretilmesini sağlamak amacıyla optimizasyon çalışması yapılmıştır. Literatürde daha önce kullanılan ölçülerde bir levha ve levhayı destekleyen iki adet şapka tipi destek elemanı ele alınmıştır. Dip levhasına etki eden kuvvetler Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın belirlediği kurallar doğrultusunda tekne ve levha ölçüleri kullanılarak bulunmuştur. Levha sonlu eleman yöntemi ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında ilk olarak en uygun oryantasyon dizilimi aranmıştır. En uygun dizilim kullanılarak daha sonra levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu, katman kalınlığı optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde ilave bir güçlendirmeye gerek kalmadan sadece levhada açığı ve katman optimizasyonu yapılarak çok daha az malzeme ile yeterli dayanımın sağlanabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** kompozit tekne, destekli levha, oryantasyon optimizasyonu, katman kalınlığı optimizasyonu

**Makale geçmişi:** Geliş 12/04/2023 – Kabul 30/07/2023

<https://doi.org/10.54926/gdt.1282017>

## Analysis and Structural Optimization of the Bottom Plate of a Composite Boat with Finite Element Method

Recep Tayyip KILIÇ<sup>1</sup>, Mustafa Erden YILDIZDAĞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup> (sorumlu yazar), [rtkilic@yildiz.edu.tr](mailto:rtkilic@yildiz.edu.tr), ORCID: 0000-0003-0819-2177

<sup>2</sup> [yildizdag@itu.edu.tr](mailto:yildizdag@itu.edu.tr), 0000-0003-3041-133X

### ABSTRACT

Materials used in ship industry usually change in parallel with technological advancements. Boats formed by connecting tree logs in ancient times were replaced by boats made of processed wood over time. Then, large and durable ships made of iron began to be produced when metals could be melt and formed. Composite is a structural material formed by the combination of two or more constituent materials. Polymer matrix composites are commonly used in shipbuilding industry. In these composites, polyester, epoxy or vinyl ester are used as resin whereas glass fiber, carbon fiber or aramid fiber are used as fiber. Composite boats are subjected to certain standards and rules while being produced. Scantling of a boat under 24 meters is determined within the framework of the rules set by the International Organization for Standardization (ISO). The standards allow for the calculation of the design loads that the plates and support elements must withstand. In this study, the bottom plate of a composite boat is optimized to reduce production costs. A top-hat stiffened composite plate which was studied in the literature is examined. The design loads are determined according to the International Organization for Standardization. The plate is modeled and analyzed by a commercial finite element analysis software. For the structural optimization, the most suitable orientation sequence is first identified. Then, by using the determined orientation sequence, plate width, stiffener height, and layer thickness parameters are optimized. As a result, it is shown that sufficient strength can be achieved with much less material by optimizing the angle and layer only on the plate without the need for additional reinforcement.

**Keywords:** composite boat, supported plate, orientation optimization, layer thickness optimization

**Article history:** Received 12/04/2023 – Accepted 30/07/2023

## 1. Giriş

Kompozit, iki veya daha fazla malzemenin niteliklerinde değişim olmadan, makro düzeyde bir araya gelmesi ile oluşan yapısal malzemedir. Kompozit içerisinde takviye (reinforcement) ve matris fazı olmak üzere iki faz bulunur. Takviye fazı, lif, tanecik (particle) ve pul (flake) halinde olabilir. Matris fazı ise takviye fazını çevreleyen devamlı bir yapıya sahiptir. Kompozit malzemeler takviye malzemesinin şekline göre ve matris malzemesinin türüne göre iki farklı sınıflandırmaya tabi tutulur. Takviye malzemesine göre lif takviyeli, tanecik takviyeli ve pul takviyeli olarak üç sınıfta incelenir. Matris türüne göre ise metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç sınıftır.

Polimer matrisli malzemeler yüksek spesifik mukavemet ve yüksek spesifik gerilme katsayılarına sahiptir. Spesifik mukavemet ve spesifik gerilme kavramları malzemenin gerilme ve mukavemet değerlerinin, malzeme yoğunluğuna oranını ifade etmektedir. Polimer matrisli kompozitleri kullanarak aynı dayanım çok daha hafif bir malzeme ile elde edilebilir. Polimer matrisli kompozitlerden elde edilen ürünler farklı metotlarla üretilebilir. Birçok üretim yönteminde kalıplar kullanılır. Kalıplar dişi ve erkek olmak üzere ikiye ayrılır. Dişi kalıp ürünün tersi görünümde olup iç kısmına üretim uygulaması yapılır. Erkek kalıp ise ürün ile aynı görüntüye sahiptir ve dış kısmına üretim uygulaması yapılır. Üretimde en çok kullanılan metotlar ise şunlardır:

- El Yatırması
- Vakum İnfüzyon
- Filament Sarma
- Reçine Transfer Kalıplama (RTM)
- Otoklav (Autoclave)

Gemi inşaatı sanayisinde kompozit malzemeler dendiğinde akla polimer matrisli kompozitler gelir. Diğer matris türlerinin kullanımı yok denecek kadar azdır. Kompozitten mamul tekneler incelendiğinde büyük çoğunluğun 25 metre altında olduğu görülür. Hücumbotlar, yelkenli tekneler, motor yatlar, yarış tekneleri insansız deniz araçları, balıkçı tekneleri gibi birçok yüzer platform kompozitten üretilmektedir. Sektörde kullanılan en yaygın üç reçine: polyester, epoksi ve vinilesterdir. Polyester düşük mekanik özellikleri nedeniyle yüksek performanslı teknelerde kullanılmaz. Vinilester reçineler mekanik özellikleri ve maliyetleri açısından polyester ve epoksinin arasında yer almaktadır. Reçine sertleştirici karışım oranları epoksiye göre daha toleranslıdır. Epoksinin mekanik özellikleri ve maliyeti diğer reçinelere nazaran daha yüksektir. Bu nedenle çoğunlukla yüksek performans istenen yerlerde kullanılır. Sektörde kullanılan en yaygın elyaflar ise cam elyaf ve karbon elyaftır. Yüksek performans ve düşük kütle istenen üretimlerde yüksek mekanik özellikleri nedeniyle karbon elyaflar kullanılır. Cam elyaflar, düşük maliyetleri nedeniyle sektörde en çok tercih edilen elyaftır. Cam elyaflar içerisinde ise en çok E-cam kullanılır. Gemi inşaatı sanayinde en çok kullanılan üretim yöntemleri el yatırması ve vakum infüzyondur. El yatırması düşük maliyeti sebebiyle tercih edilirken vakum infüzyon kaliteli ve homojen sonuç vermesi nedeniyle tercih edilir.

Kompozit malzemeler ikinci dünya savaşından sonra denizcilik uygulamalarında kullanılmaya başlandı. Düşük yoğunlukları, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımları sayesinde oldukça ilgi çeken kompozit malzemelerin denizcilik alanında kullanımıyla ilgili çok sayıda akademik araştırma yapılmıştır. Mouring (1997) tarafından yapılan çalışmada denizcilik sektöründe kullanılmak üzere destekli bir cam takviyeli kompozit levhanın farklı fiber yönlerindeki konfigürasyonları tek yönlü sıkıştırma yükü altında test edilmiştir.

Mantari ve Guedes (2013) gelişmiş kompozit levhaların eğilme analizi için genelleştirilmiş bir teori ve onun sonlu eleman formülasyonunu sunmuşlardır. Sundukları teoriden elde ettikleri verileri daha önce kullanılan teorilerin elde ettiği veriler ile karşılaştırmışlardır. Raju (2013) bir tekne de salmanın bağlanacağı kompozit dip levhasını şapka formulu destek elemanları ile birlikte ele almıştır. Yapının statik bir yük altında katman ayrılmasını incelemek için hem deneyler yapmış hem de yapıyı sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek elde ettiği verileri kıyaslamıştır. 2014 yılına gelindiğinde Colombo ve Vergani (2014) cam elyaf kompozitlerde katman ayrılmasının yorulma üzerindeki etkisini araştırmak için deneyler yapmıştır. 2015 yılında yapılan çalışmada SudhirSastry (2015) kompozit bir levhayı farklı tip destek elemanları ile güçlendirip tek eksenli basma yükü altında deneysel olarak incelemiş ve levhayı optimize etmiştir. Ma ve Liu (2016) katmanlar arası hasar başlaması ve ilerlemesinin tahmini için üç boyutlu bir hasar modeli geliştirmiştir. Bu modeli sonlu elemanlar yöntemi temelli bir bilgisayar programında enine yüklemeye maruz kalan açılı dizilmiş bir kompozit levhaya uygulamış ve elde ettiği verileri literatürde bulunan deneysel veriler ile kıyaslamıştır. Mo vd. (2016) şapka destek elemanlı kompozit bir paneli basma yükü altında burkulma davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve şapka destek elemanını optimize etmiştir. Khosravani, ve Weinberg (2017, 2018) yaptıkları çalışmalarda yaşlanmanın sandviç yapıdaki kompozit malzemeler üzerindeki etkisini incelemek için deneyler yapmıştır. Bal peteği yapısına sahip T bağlantıları termal etkiler ile yapay olarak yaşlandırarak malzemenin yaşlanma öncesi ve sonrası mekanik değerlerini ölçüp karşılaştırmıştır. 2018 yılına gelindiğinde Kharghani ve Guedes Soares (2018), polinom şekil fonksiyonlarına dayanan farklı teorileri, iki farklı lif açısı kombinasyonu ve iki farklı sınır koşulu için kompozit levhadaki sapsmayı ve boyuna gerinimi tahmin etmek için kullanmışlardır. Elde ettikleri verileri deneylerden ve sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan programdan elde ettikleri veriler ile karşılaştırmışlardır. Li (2018), gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, farklı katman ayrılmalarına sahip takviyeli kompozit levhalarının basmaya dayanım özelliklerini incelemiştir. 2018 yılında yapılan bir diğer çalışmada Kolanu (2018) basma kuvveti altında karbon fiber takviyeli kompozit panelin burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Imran vd. (2019) suyun 300 metre altında çalışacak bir denizaltı aracının kompozit yapıdaki kabuğu için optimizasyon yapmıştır. Kompozit yapının fiber yönleri, katman sayısı ve kullanılan lif malzemeleri optimize edilmiş, başarısızlık kriteri olarak Tsai-Wu ve Tsai-hill kriterleri kullanılmıştır. Kharghani'nin (2019) yaptığı çalışmada kompozit çelik bağlantısı bükme ve burulma yükleri altında hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Zhao (2019), tek eksenli sıkıştırılmaya maruz kalan destekli kompozit levhalarda kabuk konfigürasyonunun burkulma davranışına olan etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Kai vd. (2020) sandviç yapıli kompozit L bağlantı elemanının çekme yükü altında davranışını hem deneysel olarak hem de simülasyon ortamında incelemişlerdir. Li (2020), gemi güvertesinde kullanılmak üzere destekli kompozit bir levhanın optimizasyonunu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir program üzerinden gerçekleştirmiştir. 2022 yılında yapılan çalışmada havacılık alanında kullanılmak için tasarlanan bir adet şapka tipi destek elemanı ile desteklenen bir levha 4 noktalı eğilme testine tabi tutulmuş ve elde edilen veriler yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır (B. Li vd., 2022). 2021 yılında yapılan çalışmada Morshedsolouk ve Karimirad (2021) denizcilikte kullanılmak üzere tasarlanan iki şapka tipi destek elemanlı bir levhayı ele almışlardır. Levhanın başlangıç koşulunda hasarlı olduğu kabulünü yaparak ilk hasarın burkulma sonrası davranışa nasıl etki ettiğini incelemişlerdir. Schilling ve Mittelstedt (2022) yaptıkları çalışmada şapka tipi destek elemanı ile desteklenmiş kompozit levhanın burkulma davranışını incelemiş ve burkulma sonrasının incelenmesi için yeni tip kapalı form analitik bir çözüm tanımlamışlardır. Yine 2022 yılında yapılan bir başka çalışmada Zhang (2022) farklı tipteki destek elemanları ile desteklenen kompozit bir levhanın taşıma kapasitesini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir.

Bu çalışmada 24 metre uzunluğundaki bir motor yatın dip levhasına gelen yük ISO standartları çerçevesinde bulunmuştur. Levhaya etki eden yüke göre levha ve destek elemanları boyutlandırılmıştır. Levha ve destek elemanlarının her biri 4 mm olan 5 katmandan oluştuğu kabul edilmiştir. Her bir katman birbirinden bağımsız elyaf yönüne sahiptir. Başlangıçta her bir katman için bir elyaf yönü kabulü yapılmış ardından katman yönleri optimize edilmiştir. Optimum yön dizilimin bulunmasının ardından tüm levhada levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu ve katman kalınlığı optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyonlarda denizden gelen yüklere dayanabilecek bir dip levhasının daha az malzeme ile üretilebilirliği araştırılmıştır.

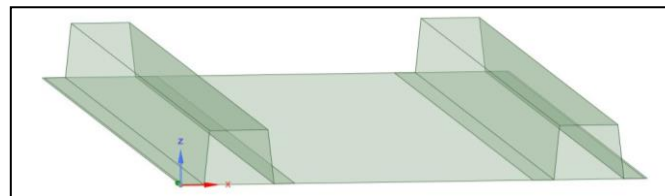
## 2. Boyutlandırma kuralları ve ilgili standartlar

Bu çalışma kapsamında Marmara denizinde kullanılacak 24 metre uzunluğunda cam elyaf takviyeli kompozitten mamul bir tekne ele alınmaktadır. Tekne boyutları Tablo 1’de verilmiştir. Tekne boyutları belirlenirken benzer özelliklere sahip 24 metre tekneler incelenmiş ve onlara göre ortalama değerler kabul edilmiştir.

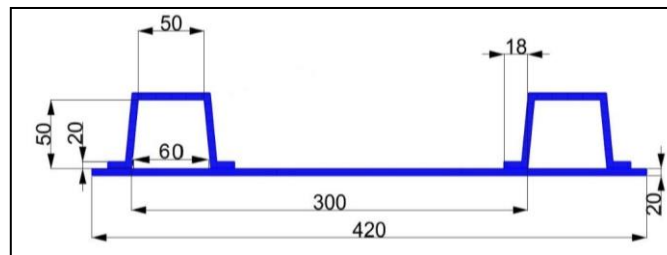
**Tablo 1.** Çalışma kapsamında incelenen teknenin değerleri

Gemi Tipi	Motor Yat	
Su Hattı Boyu ( $L_{wl}$ )	24	m
Genişlik (B)	7	m
Su çekimi (T)	1.34	m
Fribord (F)	2	m
Seyir Hızı	23	Knots
Blok Katsayısı ( $C_b$ )	0.39	
Hacim	87.797	$m^3$
Kütle	90	ton

Bu çalışmada kullanılan levhanın boyutları mm cinsinden Şekil 1’de gösterilmektedir. Geminin orta bölümde dipte yer alan 1000 mm uzunluğundaki levhanın enine iki perde arasında olduğu kabul edilmiştir. Levhanın gemideki temsili konumu Şekil 2’de gösterilmektedir. Levha boyuna yönde uzanan iki adet şapka tipi destek elemanı ile desteklenmektedir.

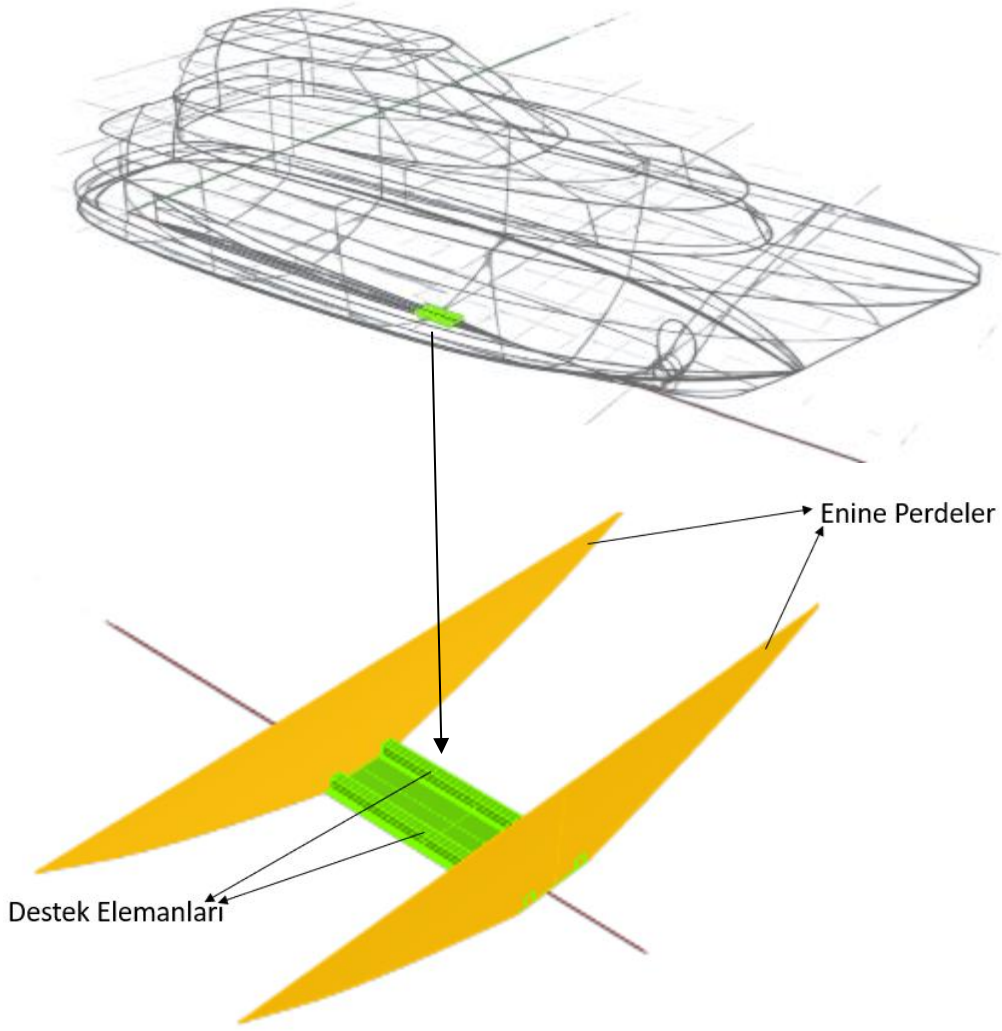


(a)



(b)

**Şekil 1.** Levha perspektif görüntüsü (a) ve ölçüleri (b, mm)



**Şekil 2.** Levha konumunun temsili gösterimi

Levhanın uzunluğu, destek elemanlarının genişliği ve destekler arası mesafe hali hazırda literatürde kullanılan üzerine birden fazla makale yazılan (Chen & Soares, 2007; Chen & Soares, 2008; Morshedsolouk & Karimirad, 2021) bir levhaya uygun olarak seçilmiştir. Levhanın kalınlığı ise kendi gemi boyutlarımıza uygun olacak şekilde revize edilmiştir.

Gemi inşaatı sanayinde üretilecek olan tekneler klas kuruluşları tarafından belirlenen kurallar ve standartlar ölçüsünde imal edilir. Klaslama kurallarına ek olarak 24 metre ve altı tekneler için Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı ISO (International Standardization Organization) kuralları da kullanılabilir. Özellikle iç sularda seyir edecek ve Uluslararası Denizcilik Örgütü IMO (International Maritime Organization) numarası almayacak tekneler için ISO kurallarını kullanmak önceliklidir. Oluşturulan kurallardaki ana mantık eldeki veriler ve daha önce edinilmiş tecrübeler ışığında boyutlandırılacak bölüme gelen yükü bulmak ve bu yüke dayanım gösterecek saç kalınlığı, destek eleman sayısı ve destek eleman boyutlarını hesap etmektir. Boyutlandırma yaparken Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın 'ISO 12215-5:2019 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination' (ISO, 2018) bölümü kullanılmıştır.

Levha üzerine gelen yükü bulurken Tablo 1 ve Şekil 1(b)'deki değerler kullanılmıştır. Bu değerlerden yola çıkılarak basınç faktörleri (Tasarım Kategori Faktörü ( $k_{DC}$ ), Dinamik Yük Faktörü ( $k_{DYN}$ ), Boyuna Basınç Dağıtım Faktörü ( $k_L$ ), Alan Basıncı Azaltma Faktörü ( $k_{AR}$ )) bulunmuştur.

Tekneler kullanılacakları deniz durumlarına göre farklı tasarım kategorilerine göre üretilirler. Tablo 2'de gösterilen tasarım kategorileri belirgin dalga yüksekliği ve rüzgar kuvvetine göre sınıflandırılır. Belirgin dalga yüksekliği denizde oluşan dalgaların en yüksek üçte birinin ortalamasını ifade eder. Rüzgar kuvveti ise Beaufort Skalasına göre belirtilir. Marmara denizi belirgin dalga yüksekliği değeri 2,5 metredir (Kutupoğlu vd., 2018; Saraçoğlu vd., 2014). Bu nedenle teknenin tasarım kategorisi B'dir ve  $k_{DC}$  değeri 0,8'dir.

**Tablo 2.** Tasarım kategorileri

Tasarım Kategorisi	Belirgin Dalga Yüksekliği	Rüzgar Kuvveti (Beaufort Skalasına göre)	$k_{DC}$
A	4 metreyi aşan	8'i aşan	1
B	4 metreye kadar	8'e kadar	0.8
C	2 metreye kadar	6'ya kadar	0.6
D	0,3 metreye kadar	4'e kadar	0.4

Dinamik yük faktörü için  $k_{DYN1}$  ve  $k_{DYN2}$ 'den küçük olanı seçilir.  $k_{DYN1}$  değeri Tablo 3'deki hesap sonucunda 1.147 bulunur.  $k_{DYN2}$ 'nin alabileceği en alt değer 3 olduğu için  $k_{DYN}$  değeri 1.147 olarak seçilir. Boyuna basınç dağıtım faktörü  $k_L$ , gemideki boyuna konumuna göre basınç yüklerinin değişimini dikkate alır. Geminin mastorisindeki konumda olduğumuz için  $x/L_{wl}$  değerimiz 0.5 olmaktadır. Verilen bilgiler ışığında  $k_L$  değeri 0.9 olarak kabul edilmiştir. Alan basıncı azaltma faktörü Tablo 4'te verilen hesaplama sonucunda 1.21 olarak bulunur fakat kural gereği 1'den büyük olamayacağı için değer 1 olarak kabul edilir.

**Tablo 3.** Dinamik yük faktörü hesap tablosu

Sembol	Formül	Değer	Tanım
$k_{DYN1}$	$0.32 * (L_{wl} / (10 * B_c) + 0.084) * (50 - \beta_{0.4}) * (V^2 B_c^2 / m_{LDC})$	1.147	Dinamik yük faktörü
$L_{wl}$		24	Su hattı boyu (m)
$B_c$		6	0.4 x $L_{wl}$ 'deki çene genişliği
$\beta_{0.4}$		15	Ölü açı (deadrise angle)
V		23	Seyir hızı (knots)
$m_{LDC}$		90000	Maksimum kütle (kg)

**Tablo 4.** Alan basıncı azaltma faktörü hesabı

Sembol	Formül	Değer	Tanım
$k_{AR}$	$k_R * 0.1 * m_{LDC}^{0.15} / A_D^{0.3}$	1.210	Alan basıncı azaltma faktörü $0 < k_{AR} < 1$
$k_R$	$1.5 - 3 \times 10^{-4} \times b$	1.428	Yapısal bileşen ve tekne tipi faktörü
$A_D$	$(l \times b) \times 10^{-6}$	0.240	Levha için tasarım alanı



Motor yatlar ve yelkenli tekneler için iki ayrı basınç hesabı yapılır. Bu çalışmada motor yat hesabı kullanılmıştır. Motor yatlar için de iki ayrı hesap söz konusudur. İlk olarak deplasman kuvvetleri etkisinde olanlar için deplasman modu (displacement mode), ikinci olarak da hidrodinamik kuvvetler etkisinde olanlar için kayar mod (planing mode). Fakat hangi kuvvetlerin etkisinde olursa olsun iki ayrı hesaptan hangisi büyükse basınç değeri o kabul edilir.

Levhanın teknedeki konumuna (dip, borda, güverte, üst yapı) göre farklı hesaplar kullanılmaktadır. Bu çalışmada dip levhaları için olan hesaplamalar kullanılmaktadır. Tablo 5’de motor yat deplasman modu için dip basıncı hesabı yapılmaktadır. Tablo 6’da ise motor yat kayar mod için dip basıncı hesabı yapılmaktadır. Kayar moddaki değer daha büyük çıktığı için dip basıncımız 114 kPa olarak bulunmuştur.

**Tablo 5.** Motor yat deplasman modu için dip basıncı hesabı

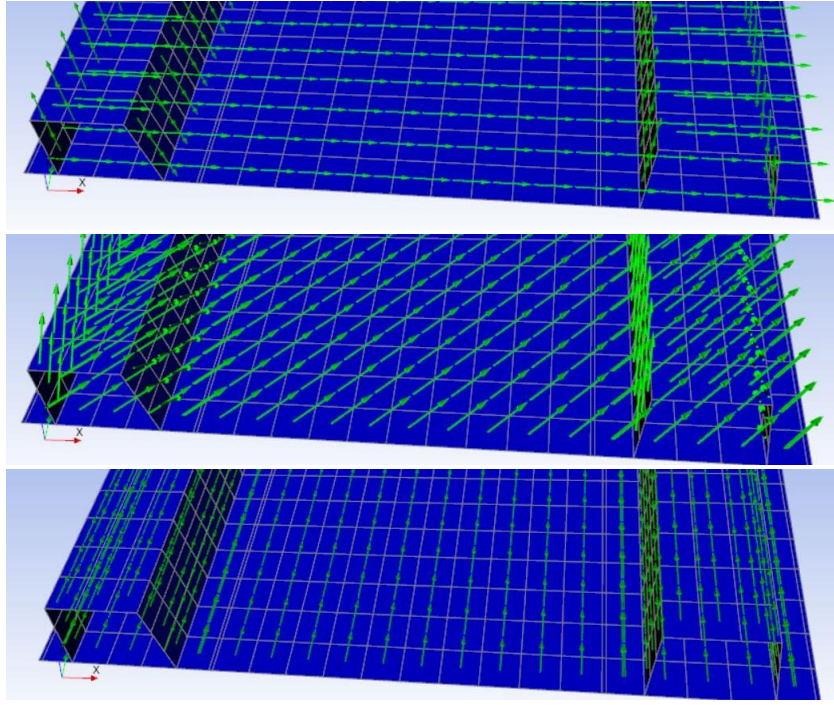
Sembol	Formül	Değer	Tanım
$P_{BMD\ PLT}$	$\max(P_{BMD\ BASE} * k_{AR} * k_{DC} * k_L; P_{BM\ MIN\ PLT})$	<b>88.949 kPa</b>	Motor yat deplasman modu için dip basıncı
	$P_{BMD\ BASE} * k_{AR} * k_{DC} * k_L$	88.949	
$P_{BMD\ BASE}$	$2.4 * m_{LDC}^{0.33} + 20$	123.540	Motor yat deplasman modu için dip basıncı
$P_{BM\ MIN\ PLT}$	$\max[(0.45 * m_{LDC}^{0.33} + 0.9 * L_{wl} * k_{DC}) * k_L; 10 * T_c; 7]$	33.025	Motor yat deplasman modu için minimum dip basıncı
	$0.45 * m_{LDC}^{0.33} + 0.9 * L_{wl} * k_{DC}) * k_L$	33.025	
	$10 * T_c$	13.4	10 * Su çekimi

**Tablo 6.** Motor yat kayar mod için dip basıncı hesabı

Sembol	Formül	Değer	Tanım
$P_{BMP\ PLT}$	$\max(P_{BMP\ BASE} * k_{AR} * k_L; P_{BM\ MIN\ PLT})$	<b>114 kPa</b>	Motor yat kayar mod için dip basıncı
	$P_{BMP\ BASE} * k_{AR} * k_L$	114	
$P_{BMP\ BASE}$	$0.1 * m_{LDC} * (1 + (k_{DC}^{0.5} * k_{DYN})) / (L_{wl} * B_c)$		Motor yat kayar mod için dip basıncı
$P_{BM\ MIN\ PLT}$	$\max[(0.45 * m_{LDC}^{0.33} + 0.9 * L_{wl} * k_{DC}) * k_L; 10 * T_c; 7]$	33.025	Motor yat deplasman modu için minimum dip basıncı
	$0.45 * m_{LDC}^{0.33} + 0.9 * L_{wl} * k_{DC}) * k_L$	33.025	
	$10 * T_c$	13.4	10 * Su çekimi

### 3. Sonlu elemanlar modeli ve optimizasyon

Levha, tek yönlü cam elyaf lifler ile epoksi reçinenin birlikte kullanılması ile elde edilen kompozit malzemeden üretilmiştir. Elde edilen malzemenin mekanik özellikleri ise Tablo 7’de verilmiştir. Levha her biri 4 mm olan 5 katman elyaf ile üretildiği kabul edilmiştir. Her katmanda bulunan elyaflar tek yöne dizilmiştir. Bu dizilim başlangıç olarak 90/45/0/-45/90 olarak kabul edilmiştir. Elyaf yönlerinin levha üzerindeki gösterimi Şekil 3’te gösterilmiştir.

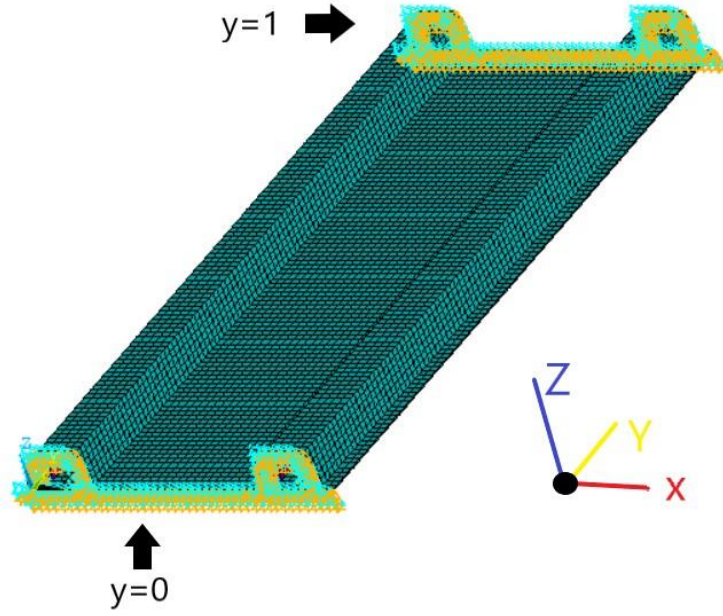


**Şekil 3.** Elyaf yönleri (üstte 0°, ortada 45° ,altta 90°)

**Tablo 7.** Levha malzemesinin mekanik özellikleri

$E_{xx}$ (X yönünde Çekme Modülü)	35 GPa
$E_{yy}$ (Y yönünde Çekme Modülü)	9 GPa
$E_{zz}$ (Z yönünde Çekme Modülü)	9 GPa
$\nu_{xy}$ (XY yönünde Poisson Oranı)	0.28
$\nu_{yz}$ (YZ yönünde Poisson Oranı)	0.4
$\nu_{xz}$ (XZ yönünde Poisson Oranı)	0.28
$S_{M_{xy}}$ (XY yönünde Kesme Modülü)	4.7 GPa
$S_{M_{yz}}$ (YZ yönünde Kesme Modülü)	3.5 GPa
$S_{M_{xz}}$ (XZ yönünde Kesme Modülü)	4.7 GPa
Yoğunluk	1850 kg/m <sup>3</sup>

Levha örgü yapısı 7700 adet elemana sahiptir. Levhanın ve destek elemanlarının perdeye bağlandığı yerler yani dikdörtgen şeklin kısa kenarlarında basit mesnet kabulü yapılmıştır. Basit mesnet kabulü neticesinde Şekil 4'te gösterildiği gibi koordinat sisteminde  $y=0$  ve  $y=1$  düzlemlerinde yer alan tüm noktalardaki X, Y, Z yönündeki öteleme hareketleri ile Y ve Z eksenleri etrafındaki dönme hareketleri sabit ve 0 olarak belirlenmiştir. Levhanın uzun kenarında, daha önce yapılmış çalışmalarla benzerlik göstermesi için bir sınır kabulü yapılmamıştır. Bir önceki bölümde bulduğumuz levhaya etki eden 114 kPa'lık basınç kuvveti levhanın deniz ile temas eden yüzeyi boyunca eşit şekilde etki ettirilmiştir.



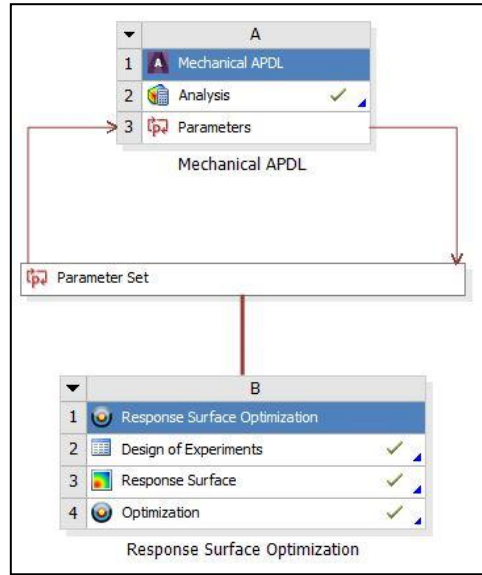
**Şekil 4.** Levha sınır şartları

Analizler, modellemenin de yapıldığı ANSYS Mechanical APDL programı üzerinden yapılmaktadır. Analizlerde kompozit malzemeler için geliştirilmiş hasar tahmin kriterlerinden biri olan Tsai-Wu kriteri göz önüne alınmıştır. Tsai-Wu kriteri, incelenen malzemenin tüm yönlerdeki çekme, basma ve tüm düzlemlerdeki kesme nihai gerilim değerleri ile malzemenin yük altındayken oluşan tüm yönlerdeki çekme, basma ve tüm düzlemlerdeki kesme gerilim değerlerinin birlikte kullanılarak oluşturulan denklem sonucunda bulunur. Denklem sonucunun 1'den büyük olması malzemenin uygulanan yüke dayanmayacağını göstermektedir.

Levhanın farklı bölgelerinde gerilim ve buna bağlı olarak kriter değeri yoğunlaşmaktadır. En tehlikeli yer, kriter değerinin en yüksek olduğu yer olduğu için optimizasyon yaparken maksimum Tsai-Wu kriter değeri göz önüne alınmaktadır. Değerin 1'den büyük olması levhanın o bölgeden kırılacağını göstermektedir. Bu nedenle maksimum değer daima 1'in altında tutulmalıdır. Maksimum değer çok küçük olması ise levhanın gereğinden sağlam olduğu ve ihtiyaçtan fazla malzeme kullanıldığı anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı yeterli dayanımı gösterecek levhayı en az malzeme ile yani en ucuz şekilde elde etmektir. Optimizasyon sonunda elde edilecek panelin maksimum Tsai-Wu kriter değerinin emniyet faktörü göz önüne alınarak 0.9'un altında ve bu değere yakın olması istenmektedir. Optimizasyonlar Şekil 5'te gösterildiği gibi ANSYS Workbench programı üzerinden yapılmaktadır. İlk olarak Mechanical APDL kodu yüklenmekte ardından optimize edilecek girdi ve çıktı parametreleri belirlenmektedir. Her bir girdi parametresinin hangi değerleri alabileceği yada hangi değerler arasında kullanılabileceği belirlenir. Girdi değerleri üzerinden deney matrisi oluşturulur ve matristeki her kombinasyon için analiz yapılır. Analiz sonuçları tepki yüzey optimizasyonu modülü içerisine alınarak girdilere bağlı olarak çıktılar için ampirik formüllere dönüştürülür. Daha sonra optimizasyon modülünde her bir çıktı parametresinin kriterleri belirlenir. Son olarak belirlenen çıktı kriterlerini en iyi sağlayan analiz sonuçları listelenir.

Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical APDL içerisinde koşturulabilen bir kod yardımı ile oluşturulmuştur (<https://github.com/yildizdag/composite> adresinden koda ulaşılabilir).



**Şekil 5.** Optimizasyon şeması

### 3.1. Optimizasyon kısım 1: 90/P/P/P/90

İlk optimizasyon adımında ilk ve son katmanın X eksenine 90 derece yapacak şekilde yayıldığı ortada kalan üç katmanın ise X eksenine -90, -60 -45, -30, 0, 30, 45 ve 60 derecelerde yayıldığı kombinasyonlar denenmiştir. Lifler tek yönlü oldukları için -90 ve 90 derece yayılmaları aynı anlama gelmektedir. Burada her katmanın kalınlığı sabit ve 4 mm'dir. 1728 farklı kombinasyon analiz edilmiştir. Tsai-Wu hasar kriter değerinin en düşük olduğu kombinasyonlar aranmıştır. Tablo 8'de gösterildiği üzere başlangıç dizilimi olan 90/45/0/-45/90, Tsai-Wu hasar kriterini sağlamaktadır fakat daha uygun kombinasyonlar bulunmaktadır.

**Tablo 8.** 1. kısım en uygun serim değerleri

Katman	1	2	3	4	5	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri
<b>En Uygun Kombinasyonlar</b>	<b>Serim Açısı</b>					
<b>1.</b>	90	0	0	0	90	0.0898
<b>2.</b>	90	0	90	0	90	0.0899
<b>3.</b>	90	90	-60	0	90	0.0900
<b>Başlangıç</b>	90	45	0	-45	90	0.1180

### 3.2. Optimizasyon kısım 2: 0/P/P/P/0

Optimizasyonun 1. Kısımında tüm elemanlardaki ilk ve son katmanı 90 derece serim açısında sabit tutup ara değerleri değiştirerek bir optimizasyon çalışması yapmıştık. 2. kısımda ise ilk ve son katmanın serim açılarını X eksenine 0 derece açı yapacak şekilde sabit tutup aradaki üç katmanı yine -90, -60 -45, -30, 0, 30, 45, 60 derecelerde yayarak yeni bir kombinasyonda optimizasyon çalışması gerçekleştirdik. 1728 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda ilk ve son katmanın serim açısının etkisini 1. Kısım ile kıyaslamış olduk. Bu kısımda en uygun olan serim açıları Tablo 9'da verilmiştir.

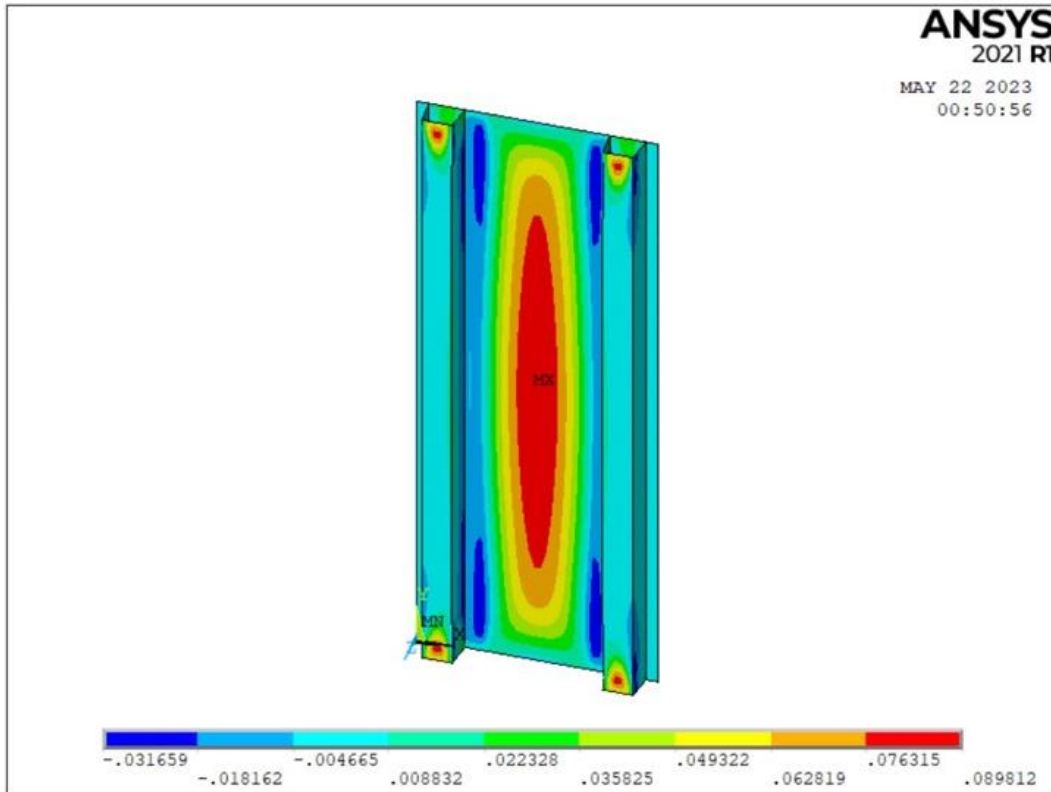
**Tablo 9.** 2. kısım en uygun serim değerleri

Katman	1	2	3	4	5	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri
En Uygun Kombinasyonlar	Serim Açısı					
1.	0	90	0	90	0	0.406
2.	0	90	90	90	0	0.409
3.	0	90	-30	90	0	0.416

Bu kısımda başlangıç kombinasyonundaki hasar kriterinin altına düşülememiştir. En uygun olan değerlerin ortak noktası, ara açı (30, 45, 60) değerlerinden çok 0, 90 derece ve bu derecelere yakın değerlerde serim açılarının olmasıdır.

### 3.3. Optimizasyon kısım 3: P/P/P/P/P

Önceki optimizasyon kısımlarında ara açılardaki serim değerlerinin Tsai-Wu hasar kriter değerlerini düşürmediği görülmüştür. Bu nedenle bu kısımda çözüm matrisini büyütmemek ve hızlı sonuç almak için bu kriter optimizasyona dahil edilmemiştir. Optimizasyonun 3. kısmında levhada ve destek elemanında aynı olmak üzere tüm katmanlardaki serim açıları 0, 90 derecelerde kombine edilmiştir. 32 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda en uygun olan serim açıları Tablo 10'da verilmiştir. Optimum açı kombinasyonu 90/0/0/0/90 olarak bulunmuştur. Bu kombinasyonun Tsai-Wu hasar kriteri grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Kombinasyonun en yüksek hasar kriter değeri 0.0898'dir.



**Şekil 6.** 90/0/0/0/90 serim açılı levhanın hasar kriteri grafiği

**Tablo 10.** 3. kısım en uygun serim değerleri

Katman	1	2	3	4	5	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri
En Uygun Kombinasyonlar	Serim Açısı					
1.	90	0	0	0	90	0.0898
2.	90	0	90	0	90	0.899
3.	0	90	90	0	90	0.911

### 3.4. Optimizasyon kısım 4: levha genişliği ve destek eleman yüksekliği

En uygun açı oryantasyonunun bulunmasının ardından bu kısımda aynı oryantasyonda ve aynı katman kalınlığında en uygun levha genişliği ve destek eleman yüksekliği bulunmuştur. Bu kısımdaki optimizasyon kriteri daha önce belirtilen 0.9'un altındaki en yüksek Tsai-Wu hasar kriter değerini elde etmektir.

Başlangıç durumunda levha genişliği 400 milimetre, destek eleman yüksekliği ise 50 milimetredir. Bu kısımda levha genişliği 400 ile 740 milimetre, destek eleman yüksekliği ise 50 ile 30 milimetre değerleri arasında aynı anda optimize edilmiştir. 250 farklı kombinasyonun analiz edildiği bu kısımda en uygun olan levha genişlikleri ve destek eleman yükseklikleri Tablo 11'de verilmiştir.

**Tablo 11.** 4. kısım en uygun değerleri

En Uygun	Levha Genişliği (mm)	Destek Eleman Yüksekliği (mm)	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri	Hacim (cm <sup>3</sup> )
1.	560	20	0.8859	16289
2.	500	20	0.7479	15089
3.	420	20	0.5491	13089
Başlangıç	420	50	0.1180	15460

### 3.5. Optimizasyon kısım 5: katman kalınlığı

Kısım 5 optimizasyonunda, kısım 4'ten bağımsız kalınmıştır. Başlangıç durumundaki levha boyutları ve kısım 4'te elde edilen en uygun açı oryantasyonu kullanılmıştır. Burada amaç 5 katmanın kalınlıklarını birbirlerine eşit olacak şekilde azaltarak Tsai-Wu hasar kriter değerinin 0.9'un altında kalması sağlanarak en ince yapıyı oluşturmaktır. Katman kalınlıkları, başlangıç değeri olan 4 mm'den 1 mm'ye kadar azaltılarak farklı kalınlıklarda analiz edilmiştir. 26 farklı analizin yapıldığı bu kısımda en uygun olan katman kalınlıkları Tablo 12'de verilmiştir. Tabloda gösterildiği gibi sadece açı oryantasyonu optimize edilerek gerekli şartları sağlayan bir levha çok daha düşük hacimde de üretilebilmektedir.

**Tablo 12.** 5. kısım en uygun katman kalınlığı değerleri

En Uygun	1 Katmanın Kalınlığı (mm)	Toplam Kalınlık (mm)	Tsai-Wu Hasar Kriter Değeri	Hacim (cm <sup>3</sup> )
1.	1.15	5.75	0.8907	4444
2.	1.2	6	0.8065	4638
3.	1.5	7.5	0.4939	5798
Başlangıç	4	20	0.1180	15460

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir motor yatın dip levhasında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Levha cam elyaf takviyeli kompozitten üretilmiştir ve iki adet şapka tipi destek elemanı ile desteklenmektedir. Levhanın kısa kenarları gemi perdelerine bağlı olduğu için bu kenarlarda basit mesnet kabulü yapılmıştır. Levhaya etki eden kuvvetler Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı'nın vermiş olduğu kurallar çerçevesinde 114 kPa olarak bulunmuştur.

Yapının belirtilen yük altındaki sonlu analizi ANSYS Mechanical APDL programı üzerinden yapılmaktadır. Analizler için program ile uyumlu kod yazılmıştır. Analiz sonuçlarında yapının maksimum Tsai-Wu değeri incelenmekte ve bu değer üzerinden optimizasyon yapılmaktadır.

Optimizasyonda ilk olarak en uygun oryantasyon açıları aranmıştır. 3 ayrı kısımda yapılan toplam 3700 farklı analiz sonucunda en uygun oryantasyonun, levhada ve destek elemanlarında aynı olmak üzere 90/0/0/0/90 olduğu bulunmuştur. Daha sonra en uygun oryantasyon kullanılarak levha genişliği ve destek eleman yüksekliği optimizasyonu ve katman kalınlığı yapılmıştır. Yapılan alışma sonucunda incelenen yapıda řu sonuçlara varılmıştır:

- Bu levhanın belirtilen yük durumu için oryantasyonda ara açı değerleri yapının mukavemetini arttırmamaktadır. En uygun olan aılar X eksenini 0 ve 90 derece yapan açılardır.
- Farklı oryantasyon açılarının hangi sırada dizildiği yapının mukavemeti açısından önemlidir.
- Oryantasyon açılarını ve katman sırasını değiştirerek daha mukavim yapılar elde edilebilmektedir. Bu sayede ayrı bir işlem yapılmaksızın sadece oryantasyon optimizasyonu ile çok daha ucuz üretimler gerçekleştirilebilir.

#### Referanslar

Chen, N.-Z., & Guedes Soares, C. (2007). Longitudinal strength analysis of ship hulls of composite materials under sagging moments. *Composite Structures*, 77(1), 36-44.

Chen, N.-Z., & Soares, C. G. (2008). Ultimate Longitudinal Strength of Ship Hulls of Composite Materials. *Journal of Ship Research*, 52(03), 184-193.

Colombo, C., & Vergani, L. (2014). Influence of delamination on fatigue properties of a fibreglass composite. *Composite Structures*, 107, 325-333.

ISO. (2018). ISO 12215-5:2018—Small craft—Hull construction and scantlings—Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination.

Imran, M., Shi, D., Tong, L., & Waqas, H. (2019). Design optimization of composite submerged cylindrical pressure hull using genetic algorithm and finite element analysis. *Ocean Engineering*, 190, 106443.

Kai, Q., Renjun, Y., Wei, S., & Yaoyu, H. (2020). Research on the tension damage behavior of sandwich composite L-joints: Experiment and simulation. *Composite Structures*, 232, 111566.

Kharghani, N., Alizadeh, F., Soares, C. G., & Tsouvalis, N. G. (2019). Experimental and numerical study of a composite-to-steel joint under bending and torsion loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(3), 722-734.

Kharghani, N., & Guedes Soares, C. (2018). Experimental, numerical and analytical study of bending of

rectangular composite laminates. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 72, 155-174.

Khosravani, M. R., & Weinberg, K. (2017). Experimental investigations of the environmental effects on stability and integrity of composite sandwich T-joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 48(8), 753-759.

Khosravani, M. R., & Weinberg, K. (2018). Characterization of sandwich composite T-joints under different ageing conditions. *Composite Structures*, 197, 80-88.

Kolanu, N. R., Raju, G., & Ramji, M. (2018). Experimental and numerical studies on the buckling and post-buckling behavior of single blade-stiffened CFRP panels. *Composite Structures*, 196, 135-154.

Kutupoğlu, V., Akpınar, A., Bingölbali, B., & Çakmak, R. E. (2018). Marmara Denizi Üzerinde Maksimum Belirgin Dalga Yüksekliklerinin Alansal Dağılımları. İmo 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Kasım 1, 2018.

Li, B., Gong, Y., Gao, Y., Hou, M., & Li, L. (2022). Failure Analysis of Hat-Stringer-Stiffened Aircraft Composite Panels under Four-Point Bending Loading. *Materials*, 15(7), Article 7.

Li, H., Yao, Y., Guo, L., Zhang, Q., & Wang, B. (2018). The effects of delamination deficiencies on compressive mechanical properties of reinforced composite skin structures. *Composites Part B: Engineering*, 155, 138-147.

Li, X., & Zhu, Z. (2020). Optimization Design of a Composite Hull Stiffened Panel Considering Structural Stability.

Mantari, J. L., & Guedes Soares, C. (2013). Finite element formulation of a generalized higher order shear deformation theory for advanced composite plates. *Composite Structures*, 96, 545-553.

Ma, L., & Liu, D. (2016). Delamination and fiber-bridging damage analysis of angle-ply laminates subjected to transverse loading. *Journal of Composite Materials*, 50(22), 3063-3075.

Mo, Y., Ge, D., & He, B. (2016). Experiment and optimization of the hat-stringer-stiffened composite panels under axial compression. *Composites Part B: Engineering*, 84, 285-293.

Morshedsolouk, F., & Karimirad, M. (2021). Postbuckling of Marine Stiffened Composite Plates with Initial Geometric Imperfections Using Progressive Failure Analysis. *Journal of Marine Science and Application*, 20(4), 694-705.

Mouring, S. E. (1999). Buckling and postbuckling of composite ship panels stiffened with preform frames. *Ocean Engineering*, 26(8), 793-803.

Raju, Prusty, B. G., & Kelly, D. W. (2013). Delamination failure of composite top-hat stiffeners using finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 227(1), 61-80.

Saraçoğlu, K. E., Yüksel, Y., Aydoğan, B., & Aydoğan, B. (2014). Marmara Denizi Dalga Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi. 8. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu Kasım 8, 2014.

Schilling, J. C., & Mittelstedt, C. (2022). Local postbuckling of omega-stringer-stiffened composite panels. *Thin-Walled Structures*, 181, 110027.

SudhirSastry, Y. B., Budarapu, P. R., Madhavi, N., & Krishna, Y. (2015). Buckling analysis of thin wall stiffened composite panels. *Computational Materials Science*, 96, 459-471.



Zhang, X., Dai, W., Cai, B., Li, C., Huang, W., & Fang, C. (2022). Numerical and Experimental Investigation of Bearing Capacity for Compressed Stiffened Composite Panel with Different Stringer Section Geometries. *Applied Composite Materials*, 29(4), 1507-1535.

Zhao, W., Xie, Z., Wang, X., Li, X., & Hao, J. (2019). Buckling behavior of stiffened composite panels with variable thickness skin under compression. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(3), 215-223.