

FİBER TAKVİYELİ KATMANLI HİBRİT KOMPOZİT PLAKALARIN PARÇACIK SÜRÜ ALGORİTMASI İLE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Orhan Nuri Yegit* ve Kaan Yıldız†
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, katmanlı hibrit kompozit yapıların aksenel basma yükleri altında parçacık sürü optimizasyonu yaklaşımı kullanılarak çok amaçlı optimizasyonu ele alınmıştır. Yapılan çalışmada, 64 katmandan oluşan basit mesnetli bir kompozit plaka, iki doğrultuda sabit aksenel basma yüklerine maruz bırakılmıştır. Hibrit kompozitler üzerine yapılan çalışmalar, hibrit kompozitlerin hibrit olmayan kompozitlere göre daha esnek bir tasarıma ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu amaçla plaka karbon/epoksi ve cam/epoksi malzemelerinin hibritlenmesi ile oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonları burkulma yükünün maksimizasyonu, maliyet fonksiyonunun minimizasyonu ve ilk iki doğal frekans değeri arasındaki farkın maksimizasyonu şeklinde belirlenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümünde ağırlıklı toplam (weighted sum) yöntemi ve ϵ kısıtlama yönteminden faydalanılmıştır. Amaç fonksiyonları birbirleriyle çelişkili olduğundan Pareto optimal çözümler elde edilmiştir.

GİRİŞ

Havacılık ve uzay endüstrisinde, polimer matrisli katmanlı kompozitler, geleneksel malzemelere kıyasla yüksek rijitlik, dayanıklılık, hafiflik, üstün korozyon ve yorulma özellikleri, yüksek darbe dayanımı ve bununla birlikte 5. nesil savaş uçaklarında radar soğurucu olması sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri hibritleme yapılarak iyileştirilebilir ve ağırlıklarına göre mukavemeti çok yüksek yapılar tasarlanabilir. Ayrıca hibrit kompozitler, rijitlik ve dayanıklılık isterini sağlayan en düşük maliyetli kompozitin üretilebilmesine olanak sağlar [Karakaya ve Soykasap, 2011].

Bu çalışmada karbon/epoksi ve cam/epoksi malzemeleri kullanılarak burkulma dayanımının maksimizasyonu ve maliyetin minimizasyonu hedeflenmiştir. Bu sayede görece maliyetli karbon/epoksi katmanları kullanılarak burkulma dayanımı artırılabilirken, cam/epoksi kullanımı ile kompozit maliyeti dengelenebilmektedir. Ağırlık kısıtı göz önüne alındığında havacılıkta sıklıkla ince cidarlı yapılar kullanılmaktadır. Yapılar inceldikçe hasar durumları yapının mukavemetinden daha

*Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh., E-posta: yegit15@itu.edu.tr

†Dr. Öğr. Üyesi, Havacılık Enstitüsü, E-posta: yildizkaa@itu.edu.tr

çok stabilite kaynaklı olmaktadır. Bu stabilite hasar durumlarından en çok karşılaşılanı burkulma durumudur. Bu sebeple bu çalışmada hibrit kompozit yapıların aksel basma yükleri altında burkulma yükleri incelenmiştir. Titreşim sağlık izlemelerinde, ilk doğal frekans daha yüksek rijitliği ifade eder. Ancak, örtüşen doğal frekanslar, doğru rezonansı ölçmeyi ve analiz etmeyi zorlaştırabilir. Dolayısıyla bir diğer amaç fonksiyonu olarak ilk iki doğal frekans arasındaki farkın maksimizasyonu ele alınmıştır [Ashwear, Tamadapu ve Eriksson, 2016].

Literatür Taraması

Klasik Laminasyon Teorisi (CLT), kompozit laminasyonu sırasında meydana gelen karmaşık etkileri analiz etmekte kullanılan en yaygın kabul gören yaklaşımdır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren, literatürde CLT hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Nettles çalışmasında kompozit plakaların mekanik analizi için gerekli olan formülleri detaylıca sunmaktadır [Nettles, 1994].

Hibrit kompozit ile ilgili araştırmalar ise yaklaşık 35 yıl önce başlamıştır. Hibrit kompozit araştırmalarının öncüleri olan Duffy ve Adali, bor, kevlar ve cam fiberlerinin hem hibrit hem de hibrit olmayan konfigürasyonlardaki maksimum burkulma yükünü hesapladıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [Duffy ve Adali, 1990].

Le Riche and Haftka yaptıkları çalışmada genetik algoritma (GA) yardımıyla lamina dizilimini değiştirerek maksimum burkulma yükünü elde etmeyi hedeflemişlerdir. Ayrıca, bu çalışmada ortotropik bir kompozit plakanın burkulma yük faktörünün elde edilebileceği denklemi analitik olarak türetmişlerdir [Le Riche ve Haftka, 1994]. Jones ise basit mesnetli kompozit plakaların zorlanmamış titreşim formüllerine yayınında yer vermiştir [Jones, 2018].

Karakaya ve Soykasap genetik algoritma ve benzetimli tavlama algoritması (SA) ile hibrit kompozit plakaların dizilimini değiştirerek burkulma yükü ve doğal frekans değerlerini maksimize etmeyi hedeflemişlerdir [Karakaya ve Soykasap, 2011]. Abachizadeh ve Tahani, karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasını (ACO) kullanarak değişik açıklık oranı ve kalınlık değerlerine sahip hibrit plakalar üzerinde doğal frekansların maksimize edilmesi ve maliyetlerin minimize edilmesini hedefleyen çok amaçlı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [Abachizadeh ve Tahani, 2009].

Eberhart ve Kennedy, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) adı verilen yeni bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Algoritmanın temel matematiksel işlemlere dayanması ve bu sebeple hesaplama verimliliğinin bellek tüketimi ve çalışma hızı gibi parametreler göz önüne alındığında yüksek olması sebebiyle algoritma oldukça yaygınlaşmıştır [Eberhart ve Kennedy, 1995].

Yıldız ve Lesieutre, PSO algoritmasını kullanarak çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında Pareto optimal sonuçlar elde etmişlerdir ve hem ağırlıklı toplam hem de ϵ kısıtlama yöntemlerini kullanmışlardır [Yıldız ve Lesieutre, 2020]. Konak ve arkadaşları, ağırlıklı toplam yaklaşımını iki amaç fonksiyonundan fazla olan durumlar için genişletmişlerdir [Konak, Coit ve Smith, 2006]. Serhat ve Başdoğan, tabakalı kompozit bir plaka için Pareto optimal sonuçlar elde etmek amacıyla üç farklı amaç fonksiyonuna sahip çok amaçlı bir optimizasyon çalışması yürütmüşlerdir [Serhat ve Başdoğan, 2019].

ANALİTİK DENKLEMLER

Ortotropik Plakanın Burkulma Yükünün Hesabı

Basit mesnetli a uzunluğunda, b genişliğinde, N_x ve N_y düzlem içi basma yükleri altında olan ortotropik bir kompozit plakanın burkulma yük faktörü aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [Le Riche ve Haftka, 1994]:

$$\lambda_b(m, n) = \pi^2 \frac{[m^4 D_{11} + 2(D_{12} + 2D_{66})(rmm)^2 + (rn)^4 D_{22}]}{(am)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \quad (1)$$

λ_b burkulma katsayısını, m ve n sırasıyla, x ve y yönündeki yarıdalga sayılarını, D_{ij} plakanın eğilme rijitlik matrisinin elemanlarını, r ise (a/b) plakanın açıklık oranını temsil etmektedir. Kritik burkulma yüklerinin tespiti için burada bulunan yük faktörü, uygulanan basma yükleriyle çarpılmalıdır. Burkulma katsayısı Denklem 1'de görüldüğü üzere m ve n değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple yeni bir tanımlama yapılmalı ve m ve n 'nin 1 ve 2 değerlerini aldığı 4 durum incelenmeli, $\lambda_b(1, 1)$, $\lambda_b(1, 2)$, $\lambda_b(2, 1)$, $\lambda_b(2, 2)$ arasından en küçük değer kritik burkulma faktörü ($\lambda_{c,b}$) olarak tanımlanmalıdır.

Ortotropik Plakanın Doğal Frekans Hesabı

Basit mesnetli a uzunluğunda, b genişliğinde, ortotropik bir kompozit plakanın doğal frekans değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [Jones, 2018]:

$$\Omega^2(m, n) = (\pi^4/\rho)[D_{11}(\frac{m}{a})^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})(\frac{m}{a})^2(\frac{n}{b})^2 + D_{22}(\frac{n}{b})^4] \quad (2)$$

Burkulma denkleminde benzer olarak bu denklemde de farklı m ve n değerleri için farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu sebeple m ve n 'nin 1 ve 2 değerlerini aldığı durumlar incelenmiş ve en küçük iki değer arasındaki farkın maksimizasyonu hedeflenmiştir. Denklem 2'de doğal frekans değeri Ω , hibrit plakanın yoğunluğu ρ ile gösterilmiştir. Hibrit kompozit plakalar birden fazla farklı malzemeden üretildikleri için yoğunluk hesabı aşağıdaki gibi yapılmıştır:

$$\rho = \frac{K_k \rho_k + K_c \rho_c}{K_k + K_c} \quad (3)$$

K_k karbon tabaka sayısını, K_c cam tabaka sayısını, ρ_k karbon tabakanın yoğunluğunu, ρ_c cam tabakanın yoğunluğunu göstermektedir.

YÖNTEM

Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

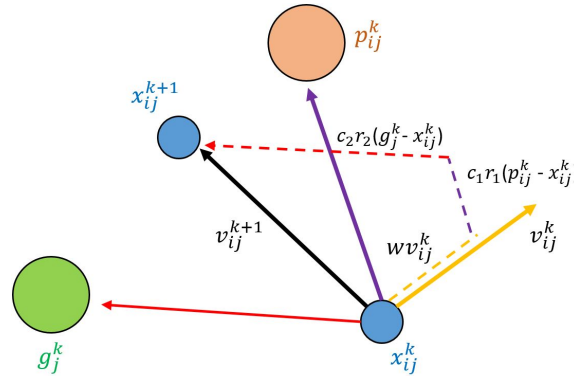
Bu çalışmada sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biri olan parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. İlgili algoritma 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından sürü halinde gezen hayvanların sürü davranışından esinlenilerek geliştirilmiştir. Genetik algoritmaya benzer şekilde rastgele çözümlerden oluşan bir popülasyon (sürü) ile optimizasyon süreci başlatılır. Sürüyü oluşturan her bir birey (parçacık) tekrarlayıcı bir yaklaşımla belirlenmiş olan uygunluk değerine (amaç fonksiyonuna) yakınsamaya çalışır. Potansiyel çözümler sürü içindeki mevcut en iyi çözümlere dayanarak güncellenir [Eberhart ve Kennedy, 1995].

PSO algoritması çözüm uzayında rastgele bir sürü oluşturur ve bu sürüyü oluşturan her bir parçacığa bir konum ve hız bilgisi atanır. Bazı matematiksel ifadeler kullanılarak parçacığın konum bilgisi tekrarlamalı olarak güncellenir. Sürü içindeki kişisel en iyi ve küresel en iyi değerlerin belirlenmesi için her bir parçacığın uygunluk değeri hesaplanır. Parçacıkların hız ve konum bilgisi aşağıdaki matematiksel ifadelerle güncellenir:

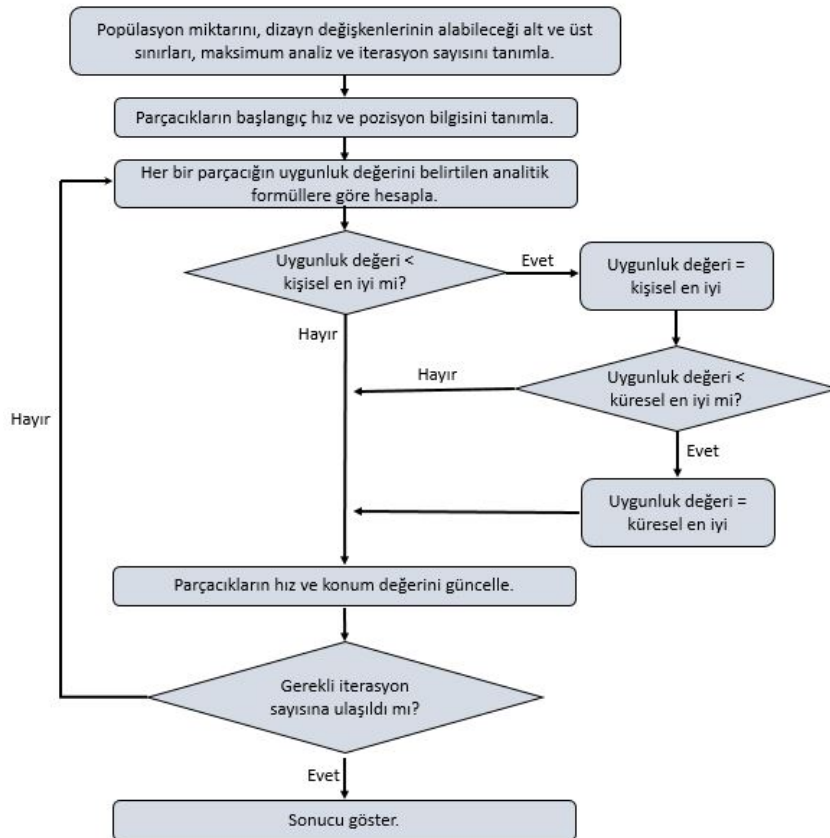
$$v_{ij}^{k+1} = w \times v_{ij}^k + c_1 \times r_1 \times (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 \times r_2 \times (g_j^k - x_{ij}^k) \quad (4)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (5)$$

Denklemlerdeki x_{ij}^k ve v_{ij}^k ifadeleri sırasıyla, i parçacığının j yönündeki konum ve hız bilgisini göstermektedir. Üstsimge k tekrarlama (iterasyon) sayısını, r_1 ve r_2 ise $(0, 1)$ arasında üretilen rastgele sayıları ifade etmektedir. p_{ij} , i parçacığının en iyi konumunun j bileşenini, g_j ise tüm sürüdeki k . tekrarına kadar elde edilmiş en iyi konumun j bileşenini göstermektedir. Algoritmanın işleyiş şekli bir parçacığın hareketi üzerinden Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 2'de ise PSO algoritmasının akış diyagramına yer verilmiştir.



Şekil 1: Parçacık hareketi üzerinden PSO algoritmasının gösterimi



Şekil 2: PSO algoritması akış diyagramı

Denklemlerde yer alan w , atalet ağırlığı olarak isimlendirilir ve parçacığın önceki adımdaki hız vektörünün sonraki adımdaki hız vektörüne etkisinin ayarlanmasında kullanılır. Eberhart and Shi'nin

yaptıkları çalışmada atalet ağırlığının 0,9'dan başlayıp 0,4'e kadar ilerleyen her bir tekrarda lineer olarak düşüş göstermesinin algoritmanın çalışma hızını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir [Eberhart ve Shi, 2000].

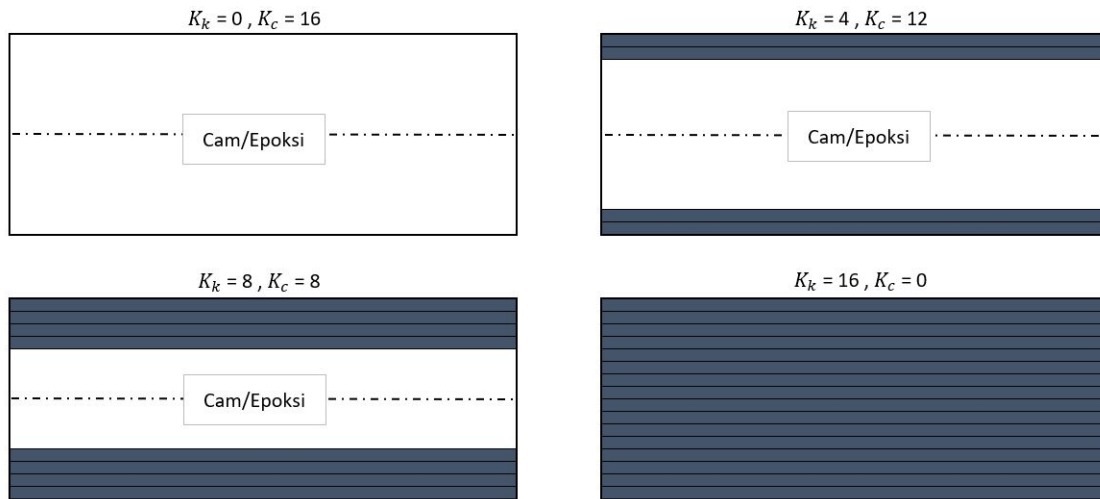
c_1 ve c_2 katsayıları sırasıyla, kişisel öğrenme katsayısı ve küresel öğrenme katsayısını göstermekte olup, bu değerler 2 olarak alınmıştır. Bu değerlerin artması parçacıkların kişisel en iyi ve küresel en iyi değerlerine daha hızlı yakınsamasını sağlar [Eberhart ve Kennedy, 1995].

Bu çalışmada optimizasyon sürecinin başında belirlenmiş olan sınırlamalardan herhangi birinin ihlal edilmesi durumunda uygunluk değerine, görece büyük bir sayının eklenmesi prensibine dayalı ceza yaklaşımı kullanılmıştır. Hızı sebebiyle çözüm uzayının sınırları dışına çıkan parçacıklar sınır içine taşınmıştır. PSO algoritmasındaki eksikliklerden biri olarak parçacıklar asıl küresel minimum değerine ulaşmadan yerel bir minimuma yakınsayabilirler. Bunun önüne geçmek için sürü boyutu yeterince geniş seçilmeli ve analiz birkaç kez tekrarlanmalıdır [Yıldız ve Lesieutre, 2020].

Parçacıkların alabileceği sınır değerlerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle katman diziliminin tanımlanması için kaç farklı değişkene ihtiyaç olduğu saptanmalıdır. N toplam katman sayısı ve θ katman yönelim açısı olmak üzere $\pm\theta$ katmanlarının beraber kullanılması ve simetrik bir dizilimin yapılmasına karar verilmiştir. Bu sayede değişken sayısı N 'den $N/4$ 'e düşürülmüştür. Tasarımda sadece $0_2^\circ, \pm 45^\circ, 90_2^\circ$ katman açıları kullanılmış ve bu açılar sırasıyla 1, 2, 3 ile gösterilmiştir. Örneğin $[0_2^\circ / \pm 45^\circ / 90_2^\circ / \pm 45^\circ / 90_2^\circ]_s$ dizilimi $[12323]_s$ olarak kodlanmıştır.

Hibrit Plakanın Oluşturulması

Şekil 3'te bu çalışma kapsamında ele alınan hibritleme yaklaşımı gösterilmektedir. Bu yaklaşıma göre eğilme rijitliği yüksek olan karbon/epoksi tabakalar her zaman en dış katmanlarda yer alacak şekilde konumlanmaktadır. K_k ve K_c sırasıyla, karbon/epoksi ve cam/epoksi malzemelerin kaç katmanda kullanıldığını ifade etmektedir.



Şekil 3: Hibritleme sırasında karbon/epoksi ve cam/epoksi katmanların örnek yerleşimleri

Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi

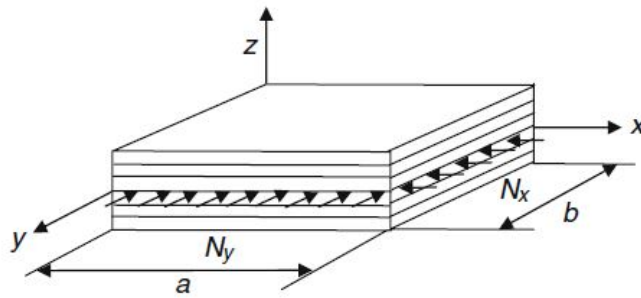
Birimsiz, bağıl maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir [Abachizadeh ve Tahani, 2009]:

$$M = (1000)ab \frac{h}{N} g(\rho_c K_c + \alpha_0 \rho_k K_k) \quad (6)$$

Denklem 6'da a ve b sırasıyla, plakanın uzunluk ve genişliğini, h toplam kalınlık değerini, N toplam katman sayısını, g yer çekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/sn.}^2$), ρ_c ve ρ_k sırasıyla, cam ve karbon katmanların yoğunluklarını, K_c cam katman sayısını, K_k karbon katman sayını ve son olarak α_0 iki malzemenin birim ağırlıktaki maliyet oranını göstermektedir. Bu çalışmada gerçek malzeme fiyatlarının kullanılması yerine maliyet oranı hesabı yapılmış ve karbon/epoksi, cam/epoksiye göre yaklaşık 8 kat daha pahalı olduğundan bu oran 8 olarak alınmıştır [Abachizadeh ve Tahani, 2009].

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

PSO algoritmasının doğrulanması için daha önce literatürde ele alınan Şekil 4'teki gibi bir plaka seçilmiştir. Plakanın boyutları $a = 0,508 \text{ m}$, $b = 0,254 \text{ m}$, katman kalınlığı $t = 0,127 \text{ mm}$, toplam katman sayısı $N = 64$ ve uygulanan basma yükleri $N_x = N_y = 1 \text{ N/m}$ olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4: İki yönlü yük altındaki ortotropik plaka

Tablo 1: Malzeme özellikleri [Karakaya ve Soykasap, 2011]

Özellik	Cam/epoksi	Karbon/epoksi
Elastisite modülü, E_1 (GPa)	38,60	181
Elastisite modülü, E_2 (GPa)	8,27	10,30
Kayma modülü, G_{12} (GPa)	4,14	7,17
Poisson oranı, ν_{12}	0,26	0,28
Yoğunluk, ρ (kg/m^3)	1800	1600

İki Amaç Fonksiyonu

Tablo 2 ve Tablo 3'te sırasıyla, ağırlıklı toplam yöntemi ve ϵ -kısıtlama yöntemi ile elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Ağırlıklı toplam yönteminde her iki amaç fonksiyonunun önemi w_1 ve w_2 katsayılarıyla belirlenmiş ve bu katsayılar değiştirilerek dizilim ve toplam karbon/epoksi katman sayısı tablolaştırılmıştır. Maliyet fonksiyonunun önemi azaldıkça maliyet oranı daha yüksek olan karbon/epoksinin kullanım miktarının arttığı gözlenmiştir. Dizilim incelendiğinde algoritma tarafından 0_2^0 derece katmanlar yerine daha çok $\pm 45^\circ$ ve 90_2^0 açı yönelimine sahip katmanlar tercih edilmiştir. Diğer bir yöntem olan ϵ kısıtlama yönteminde ise belirli maliyet kısıtları analize sınırlandırma olarak eklenmiş ve böylece maliyetin belirlenen sınırın altında kalması sağlanmıştır. Her bir adımda maliyet sınırı arttırılarak dizilim ve karbon/epoksi katman sayısı elde edilmiştir. Sınır arttıkça optimum sonuçta daha fazla karbon/epoksi kullanılmıştır.

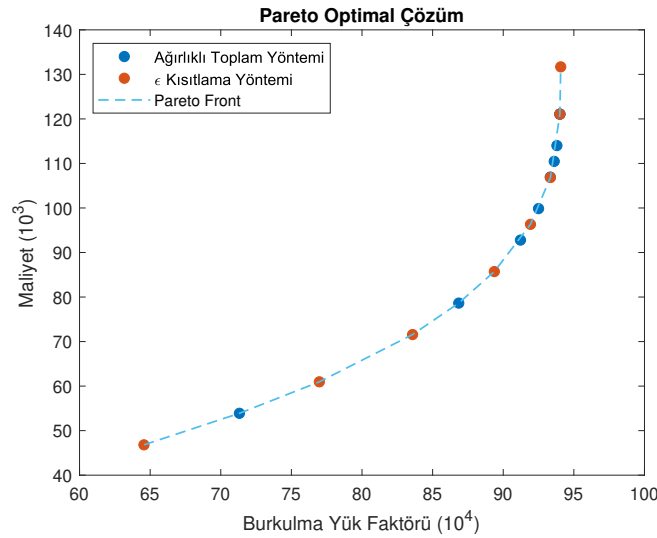
Şekil 5 Pareto front eğrisini ve bu iki yöntemle elde edilen Pareto optimal sonuçları göstermektedir. Burkulma yük faktörü maksimize edilmeye çalışılırsa maliyet de Pareto front eğrisi üzerinde olacak şekilde artmaktadır. Her iki yöntemle benzer eğilimdeki sonuçların elde edilmesi sonuçların güvenilirliğini arttırmaktadır.

Tablo 2: Burkulma yük faktörü ve maliyet değerleri, ağırlıklı toplam yöntemi

Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Dizilim	K_k
0,1	0,9	713223,05	53885,78	[3 ₃ 2 ₂ 3 ₁₁]	20
0,2	0,8	868530,02	78642,37	[3 ₂ 2 ₂ 3 ₄ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₂]	34
0,3	0,7	912187,24	92789,00	[3 ₂ 2 ₂ 3 ₄ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₂ 3 ₂]	42
0,4	0,6	925017,83	99862,31	[3 ₂ 2 ₂ 3 ₄ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₂ 2 ₃]	46
0,5	0,5	933336,31	106935,62	[3 ₃ 2 ₃ 2 ₂ 2 ₃ 2 ₃ 3 ₂ 3 ₂]	50
0,6	0,4	936089,51	110472,28	[3 ₄ 2 ₃ 2 ₃ 3 ₂ 3 ₂]	52
0,7	0,3	937997,22	114008,93	[3 ₃ 2 ₂ 3 ₂ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₂ 3 ₂ 3 ₁]	54
0,8	0,2	940091,14	121082,25	[2 ₃ 2 ₃ 8 ₂ 3 ₁]	58
0,9	0,1	940091,14	121082,25	[2 ₃ 2 ₃ 8 ₂ 3 ₁]	58

Tablo 3: Burkulma yük faktörü ve maliyet değerleri, ε kısıtlama yöntemi

Maliyet kısıtı (ε)	Maliyet	Burkulma yük faktörü	Dizilim	K_k
≤ 50000	46812,47	645609,46	[2 ₃ 9 ₂ 3 ₂ 2 ₃ 2 ₂]	16
≤ 62000	60959,09	769800,44	[3 ₂ 3 ₃ 2 ₃ 1 ₀]	24
≤ 74000	71569,06	835835,52	[3 ₃ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₇ 2 ₂]	30
≤ 86000	85715,68	893739,99	[2 ₃ 5 ₂ 3 ₂ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₃ 1 ₁]	38
≤ 98000	96325,65	919318,21	[3 ₄ 2 ₂ 3 ₂ 2 ₃ 2 ₂ 3 ₃ 2 ₂]	44
≤ 110000	106935,62	933366,36	[3 ₂ 2 ₃ 2 ₂ 2 ₃ 3 ₂ 3 ₅]	50
≤ 122000	121082,25	940113,39	[3 ₂ 3 ₂ 2 ₃ 4 ₂ 2 ₃ 3 ₂ 2 ₂]	58
≤ 136000	131692,21	940665,47	[3 ₂ 2 ₂ 3 ₃ 2 ₃ 5 ₂ 3 ₂]	64



Üç Amaç Fonksiyonu

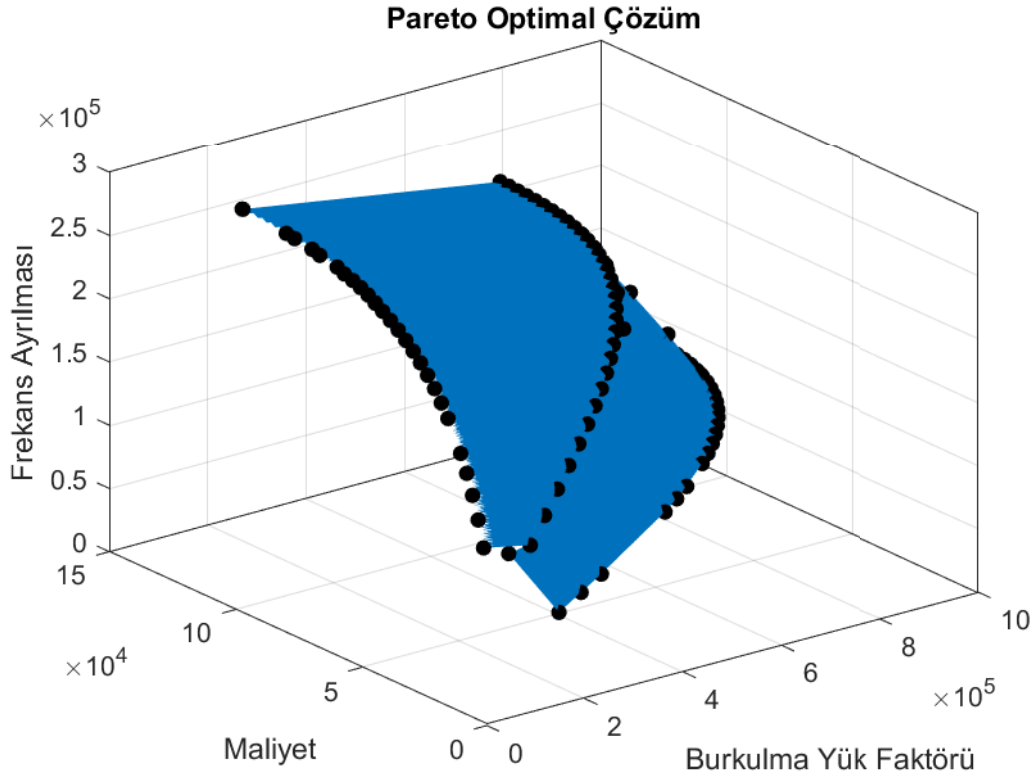
Bu aşamada, ilk iki doğal frekans arasındaki farkı maksimize etmeyi amaçlayan üçüncü amaç fonksiyonu, diğer bir deyişle frekans ayrılması, hesaplama dahil edilmiştir. Üç fonksiyonun her biri için üç ağırlık faktörü tanımlanmıştır. Her adımda ağırlık faktörünün 0.025 değiştirilmesiyle çözümün çözünürlüğü artırılmış ve daha fazla sonuç elde edilmiştir. Çözüm uzayında 856 farklı senaryo incelenmiştir ve sadece 21 durum seçilerek Tablo 4'te tablolaştırılmıştır. İlk çalışmalarda, ilk iki doğal frekans arasındaki farkın burkulma yük faktörü ve maliyet değerlerinden merteye olarak daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ağırlıklı toplam yönteminde bu fonksiyonun etkisini gözlemlemek için ilgili fonksiyon 100 ile çarpılmış ve tabloda o şekilde yer verilmiştir.

Tablo 4: Üç amaç fonksiyonu, ağırlıklı toplam yöntemi

Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Frekans ayrılması ağırlığı (w_3)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Frekans ayrılması	Dizilim	K_k
0	0	1	176527,64	131692,21	268975,70	$[1_{11}2121_2]_s$	64
0	0,2	0,8	174428,31	110472,28	265225,35	$[1_{11}21321]_s$	52
0	0,4	0,6	163712,87	82179,03	253650,52	$[1_{10}2_212_23]_s$	36
0	0,6	0,4	144019,21	57422,44	228064,78	$[1_{16}]_s$	22
0	0,8	0,2	101751,13	25592,53	147764,01	$[1_{16}]_s$	4
0	1	0	139146,97	18519,22	104278,74	$[1_22_3131_22_61]_s$	0
0,2	0	0,8	700693,13	131692,21	235315,81	$[2_{16}]_s$	64
0,2	0,2	0,6	697280,36	110472,28	232013,85	$[2_{16}]_s$	52
0,2	0,4	0,4	684893,28	96325,65	228117,93	$[2_{16}]_s$	44
0,2	0,6	0,2	903766,65	89252,34	94373,20	$[3_423_24_3223_2]_s$	40
0,2	0,8	0	868528,11	78642,37	92027,79	$[3_22_3223_22_3323]_s$	34
0,4	0	0,6	940647,25	131692,21	98559,41	$[23_62_33_323_2]_s$	64
0,4	0,2	0,4	938029,11	114008,93	97436,45	$[3_32_23_223_22_323_2]_s$	54
0,4	0,4	0,2	933366,36	106935,62	96837,87	$[23_423_32323_4]_s$	50
0,4	0,6	0	925092,95	99862,31	96016,43	$[3_22_322323_323_2]_s$	46
0,6	0	0,4	940647,25	131692,21	98559,41	$[3_223_32_323_23_5]_s$	64
0,6	0,2	0,2	939083,98	117545,59	97842,72	$[3_22_323_52_3223_2]_s$	56
0,6	0,4	0	936046,45	110472,28	97180,65	$[323_223_223_8]_s$	52
0,8	0	0,2	940665,47	131692,21	98509,78	$[3_2232323_523_3]_s$	64
0,8	0,2	0	940091,14	121082,25	97908,80	$[23_432_23_42323]_s$	58
1	0	0	940647,25	131692,21	98559,41	$[323_223_323_223_2]_s$	64

Tablo 4'e göre, burkulma yük faktörü ağırlığı arttıkça, 0_2^0 açılış yönüne sahip katmanlar yerine 90_2^0 katmanlar tercih edilmektedir. Buna karşılık, maksimum frekans ayrımı için, tam tersi bir eğilim gözlemlenmiştir. Ayrıca, artan maliyet fonksiyonu ağırlık faktörü, cam fiberlerin daha fazla kullanılmasına neden olmuştur.

Şekil 6'da, Pareto optimal sonuçların çözüm uzayında bir çeyrek kürenin yüzeyine karşılık geldiği gözlemlenmektedir. Bu yüzeyde seçilen herhangi bir nokta, problem için optimal bir çözümü temsil eder. Şekilde 856'dan daha az nokta gözlemlenmesinin nedeni, birbirleriyle çakışan sonuçlardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 6: Üç amaç fonksiyonu için Pareto optimal sonuçlar

Açıklık Oranının Etkisi

Plakanın açıklık oranının sonuçlar üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla, Tablo 5'te görülen tasarım durumları oluşturulmuş ve incelenmiştir. Plakanın kenar uzunluklarını belirlerken, plaka alanını temsil eden a ve b çarpımını sabit tutmak hedeflenmiştir. Maliyet fonksiyonu doğrudan plaka alanına bağlı olduğundan, karşılaştırmalar sırasında maliyet fonksiyonunun sonuca benzer bir etki yapması amaçlanmıştır. Yük oranı sabit tutulmuştur.

Tablo 5: Tasarım durumu TD1

Tasarım Durumu	Yük Oranı	a [m]	b [m]	Açıklık Oranı
TD1a	1	0,254	0,508	0,5
TD1b	1	0,359	0,359	1
TD1c	1	0,508	0,254	2

Tablo 6 ve Şekil 7'de TD1a, Tablo 7 ve Şekil 8'de TD1b için elde edilen sonuçlar görülmektedir. TD1c için hesaplanan sonuçlar daha önce Tablo 4 ve Şekil 6'da sunulmuştur.

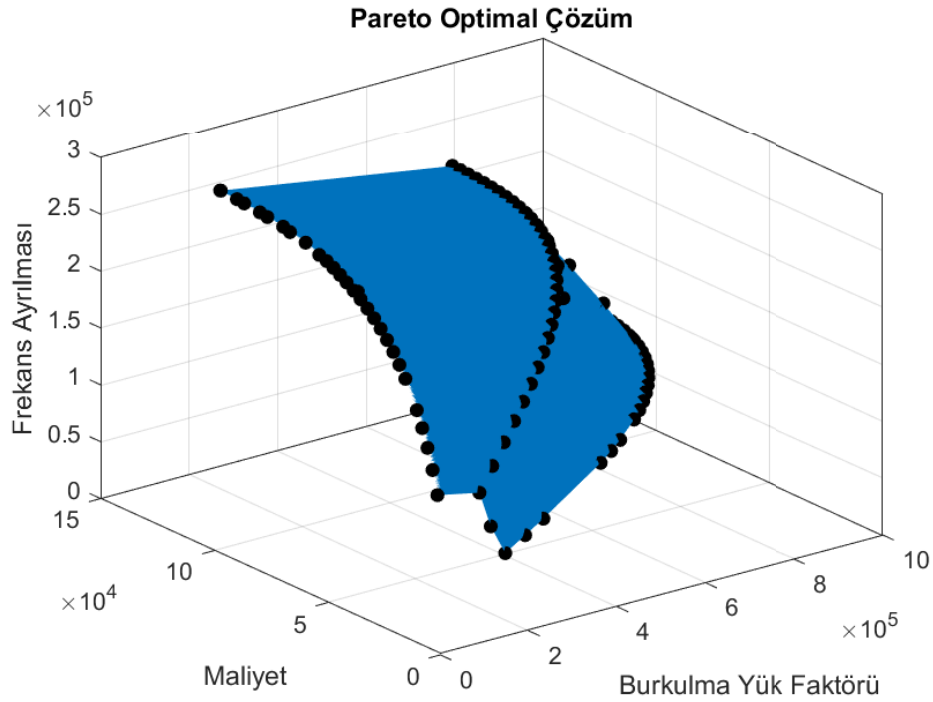
TD1a ve TD1c tasarım durumları, kenar uzunlukları tamamen zıt ve aynı yükleme koşullarına maruz kalan plakaları ele almaktadır. İlgili sonuçlar incelendiğinde w_1 değeri arttıkça, dizilim açılarının algoritma tarafından ters yönde seçildiği gözlemlenmektedir. Örneğin, $w_1 = 1, w_2 = w_3 = 0$ durumunda, TD1c için $\pm 45^\circ$ ve 90°_2 katmanları tercih edilirken, TD1a için 0°_2 ve $\pm 45^\circ$ katmanları kullanılmaktadır. Ayrıca, sayısal değerler birbirine oldukça yakındır. Maliyet fonksiyonunun önemi arttıkça, kullanılan karbon katmanlarının sayısı azalır ve bu da kritik burkulma faktörünü düşürür.

Tablo 7'de ise plaka kare bir şekle dönüşmüş ve $\pm 45^\circ$ katmanları en yüksek burkulma yük faktörünü üretmiştir. $w_1 = 1, w_2 = w_3 = 0$ ve $w_3 = 1, w_1 = w_2 = 0$ durumları için katman

konfigürasyonları frekans ayrılması için yaklaşık %5'lik bir fark oluşturur. Elde edilen maliyet değerleri, Tablo 4 ve Tablo 6 ile tutarlıdır.

Tablo 6: TD1a, ağırlıklı toplam yöntemi

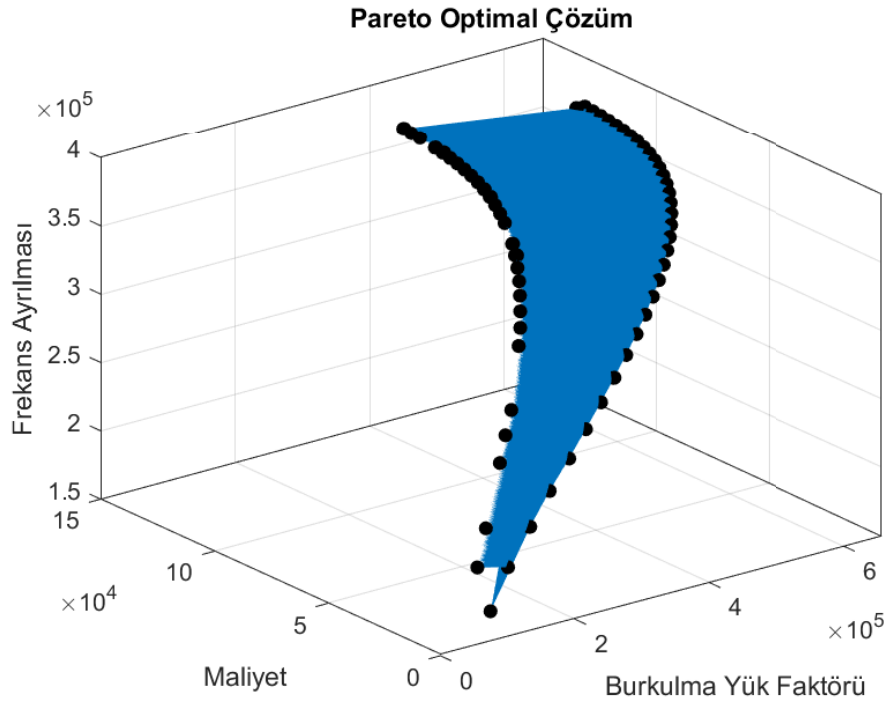
Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Frekans ayrılması ağırlığı (w_3)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Frekans ayrılması	Dizilim	K_k
0	0	1	176527,64	131692,21	268975,70	$[3_{11}2323_2]_s$	64
0	0,2	0,8	174428,31	110472,28	265225,35	$[3_{11}23123]_s$	52
0	0,4	0,6	163674,29	82179,03	253668,32	$[3_{10}2_232_23]_s$	36
0	0,6	0,4	144019,21	57422,44	228064,78	$[3_{16}]_s$	22
0	0,8	0,2	101751,13	25592,53	147764,01	$[3_{16}]_s$	4
0	1	0	208544,34	18519,22	74039,57	$[1_22_3131_22_61]_s$	0
0,2	0	0,8	700693,13	131692,21	235315,81	$[2_{16}]_s$	64
0,2	0,2	0,6	697280,36	110472,28	232013,85	$[2_{16}]_s$	52
0,2	0,4	0,4	684893,28	96325,65	228117,93	$[2_{16}]_s$	44
0,2	0,6	0,2	903778,29	89252,34	94408,07	$[1_22_21_421_42_21]_s$	40
0,2	0,8	0	868618,88	78642,37	92021,36	$[121_42_21_42_21_3]_s$	34
0,4	0	0,6	940647,25	131692,21	98559,41	$[1_221_32_21_21_5]_s$	64
0,4	0,2	0,4	938029,11	114008,93	97436,45	$[121_52_41_221_2]_s$	54
0,4	0,4	0,2	933364,66	106935,62	96831,89	$[1_42_41_421_3]_s$	50
0,4	0,6	0	925071,47	99862,31	96050,94	$[1_421_21_421_3]_s$	46
0,6	0	0,4	940647,25	131692,21	98559,41	$[1_32_31_62_21_2]_s$	64
0,6	0,2	0,2	939083,98	117545,59	97842,72	$[21_62_31_321_2]_s$	56
0,6	0,4	0	936076,20	110472,28	97154,53	$[1_221_32_31_32_21_2]_s$	52
0,8	0	0,2	940533,71	131692,21	98460,15	$[1_221_32_21_22_6]_s$	64
0,8	0,2	0	939987,74	121082,25	98005,70	$[121_221_421_22_1_3]_s$	58
1	0	0	940647,25	131692,21	98559,41	$[1_32_21_32_31_5]_s$	64



Şekil 7: TD1a için Pareto optimal sonuçlar

Tablo 7: TD1b, ağırlıklı toplam yöntemi

Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Frekans ayrılması ağırlığı (w_3)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Frekans ayrılması	Dizilim	K_k
0	0	1	387870,30	131684,70	383560,75	$[31_23_21_2313_21_23_21]_s$	64
0	0,2	0,8	387341,66	117538,89	380294,28	$[1_23_31_23_313_5]_s$	56
0	0,4	0,6	377299,08	92783,70	369847,92	$[13_31_231_3312132]_s$	42
0	0,6	0,4	331503,97	64492,07	340194,69	$[31_33_41313_22_21]_s$	26
0	0,8	0,2	206556,79	32663,98	258728,82	$[13_213_21_2313_213_22]_s$	8
0	1	0	136736,65	18518,16	150157,70	$[1_22_3131_22_61]_s$	0
0,2	0	0,8	657739,33	131684,70	363838,70	$[2_{16}]_s$	64
0,2	0,2	0,6	656772,63	117538,89	360772,17	$[2_{16}]_s$	56
0,2	0,4	0,4	646728,04	99856,61	354697,34	$[2_{16}]_s$	46
0,2	0,6	0,2	624554,41	85710,80	346161,84	$[2_{16}]_s$	38
0,2	0,8	0	569648,99	68028,52	328095,79	$[2_{16}]_s$	28
0,4	0	0,6	657739,33	131684,70	363838,70	$[2_{16}]_s$	64
0,4	0,2	0,4	656772,63	117538,89	360772,17	$[2_{16}]_s$	56
0,4	0,4	0,2	650005,75	103393,07	356238,70	$[2_{16}]_s$	48
0,4	0,6	0	637635,03	92783,70	350954,64	$[2_{16}]_s$	42
0,6	0	0,4	657739,33	131684,70	363838,70	$[2_{16}]_s$	64
0,6	0,2	0,2	656772,63	117538,89	360772,17	$[2_{16}]_s$	56
0,6	0,4	0	652558,43	106929,52	357592,87	$[2_{16}]_s$	50
0,8	0	0,2	657739,33	131684,70	363838,70	$[2_{16}]_s$	64
0,8	0,2	0	656772,63	117538,89	360772,17	$[2_{16}]_s$	56
1	0	0	657739,33	131684,70	363838,70	$[2_{16}]_s$	64



Şekil 8: TD1b için Pareto optimal sonuçlar

Yük Oranının Etkisi

Yük oranının sonuçlar üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla, Tablo 8'de görülen tasarım durumları incelenmiştir. Yük oranlarını belirlerken, toplam yük büyüklüğünü sabit tutmak hedeflenmiştir. Plakanın açıklık oranı da sabit tutulmuştur.

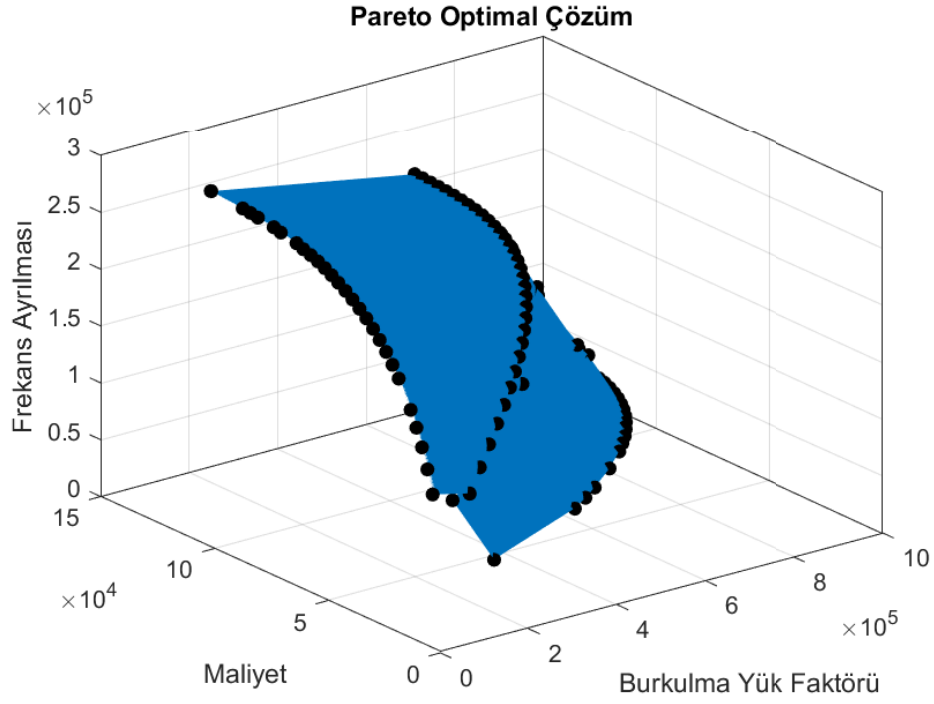
Tablo 8: Tasarım durumu TD2

Tasarım Durumu	Açıklık Oranı	N_x [N/m]	N_y [N/m]	Yük Oranı
TD2a	2	$\sqrt{2/5}$	$\sqrt{8/5}$	0,5
TD2b	2	$\sqrt{8/5}$	$\sqrt{2/5}$	2
TD2c	2	1	1	1

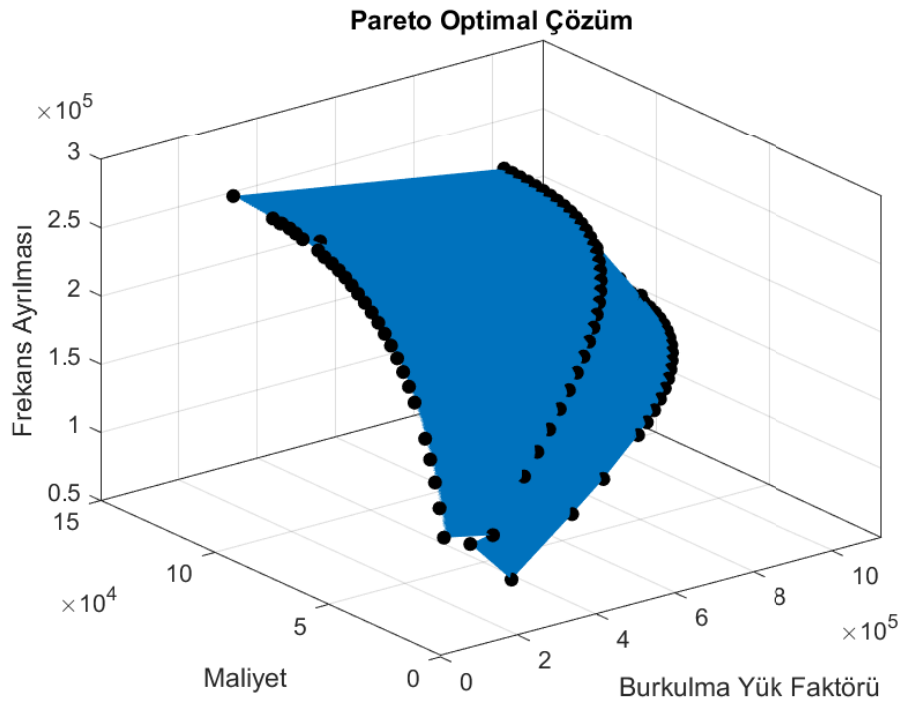
Tablo 9 ve Şekil 9'da TD2a, Tablo 10 ve Şekil 10'da TD2b için elde edilen sonuçlar görülmektedir. TD2c ile TD1c aynı tasarım durumunu göstermektedir ve ilgili sonuçlar daha önce Tablo 4 ve Şekil 6'da sunulmuştur.

Tablo 9: TD2a, ağırlıklı toplam yöntemi

Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Frekans ayrılması ağırlığı (w_3)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Frekans ayrılması	Dizilim	K_k
0	0	1	155063,73	131692,21	268975,70	$[1_{11}2_{12}1_{21}]_s$	64
0	0,2	0,8	153219,65	110472,28	265225,35	$[1_{11}2_{13}2_{11}]_s$	52
0	0,4	0,6	143807,10	82179,03	253650,52	$[1_{10}2_{21}2_{23}]_s$	36
0	0,6	0,4	126507,98	57422,44	228064,78	$[1_{16}]_s$	22
0	0,8	0,2	89379,26	25592,53	147764,01	$[1_{16}]_s$	4
0	1	0	122228,15	18519,22	104278,74	$[1_{22}3_{13}1_{22}2_{61}]_s$	0
0,2	0	0,8	615496,17	131692,21	235315,81	$[2_{16}]_s$	64
0,2	0,2	0,6	612498,36	110472,28	232013,85	$[2_{16}]_s$	52
0,2	0,4	0,4	601617,43	96325,65	228117,93	$[2_{16}]_s$	44
0,2	0,6	0,2	839410,80	85715,68	56847,95	$[3_62323_7]_s$	38
0,2	0,8	0	816093,17	78642,37	55591,19	$[3_423_523_5]_s$	34
0,4	0	0,6	816265,57	131692,21	105245,61	$[23_62_432_33]_s$	64
0,4	0,2	0,4	881124,52	114008,93	58992,13	$[3_62323_323_3]_s$	54
0,4	0,4	0,2	873547,10	103398,97	58253,83	$[3_623_223_232_32_2]_s$	48
0,4	0,6	0	863593,65	96325,65	57663,73	$[3_7232_7]_s$	44
0,6	0	0,4	883806,53	131692,21	59528,59	$[3_323_{10}2_2]_s$	64
0,6	0,2	0,2	882433,34	117545,59	59087,60	$[3_72_232_33_5]_s$	56
0,6	0,4	0	879451,60	110472,28	58653,27	$[3_723_2232_33_3]_s$	52
0,8	0	0,2	883806,53	131692,21	59528,59	$[3_423_6232_33]_s$	64
0,8	0,2	0	882433,34	117545,59	59087,60	$[3_6232_33_23_3]_s$	56
1	0	0	883806,53	131692,21	59528,59	$[3_423_6232_32]_s$	64



Şekil 9: TD2a için Pareto optimal sonuçlar



Şekil 10: TD2b için Pareto optimal sonuçlar

Tablo 10: TD2b, ağırlıklı toplam yöntemi

Burkulma yük faktörü ağırlığı (w_1)	Maliyet ağırlığı (w_2)	Frekans ayrılması ağırlığı (w_3)	Burkulma yük faktörü	Maliyet	Frekans ayrılması	Dizilim	K_k
0	0	1	232595,59	131692,21	268975,70	$[1_{11}2121_2]_s$	64
0	0,2	0,8	229829,48	110472,28	265225,35	$[1_{11}21321]_s$	52
0	0,4	0,6	215710,64	82179,03	253650,52	$[1_{10}2_212_23]_s$	36
0	0,6	0,4	189761,97	57422,44	228064,78	$[1_{16}]_s$	22
0	0,8	0,2	134068,88	25592,53	147764,01	$[1_{16}]_s$	4
0	1	0	183342,23	18519,22	104278,74	$[1_22_3131_22_61]_s$	0
0,2	0	0,8	923244,26	131692,21	235315,81	$[2_{16}]_s$	64
0,2	0,2	0,6	920642,00	114008,93	232707,92	$[2_{16}]_s$	54
0,2	0,4	0,4	1110209,41	99862,31	143475,96	$[2_232_32_3232_34]_s$	46
0,2	0,6	0,2	1095040,77	92789,00	141846,08	$[32_23_22_43_7]_s$	42
0,2	0,8	0	1058883,07	82179,03	138637,85	$[3_22_33_23_32_4]_s$	36
0,4	0	0,6	1129203,41	131692,21	147067,93	$[3_22_33_23_27]_s$	64
0,4	0,2	0,4	1127588,47	117545,59	145815,75	$[232_3232_432_3]_s$	56
0,4	0,4	0,2	1120465,32	106935,62	144507,00	$[3_22_33_26_3_32_3]_s$	50
0,4	0,6	0	1116061,46	103398,97	143990,79	$[232_23_32_23_23_5]_s$	48
0,6	0	0,4	1129203,41	131692,21	147067,93	$[2_232_33_2_33_23_3]_s$	64
0,6	0,2	0,2	1127477,26	117545,59	145863,77	$[3_22_33_26_3_22_3_2]_s$	56
0,6	0,4	0	1126043,54	114008,93	145420,57	$[32_23_23_323_25]_s$	54
0,8	0	0,2	1129203,41	131692,21	147067,93	$[23232_32_32_23_5]_s$	64
0,8	0,2	0	1127588,47	117545,59	145815,75	$[2_23_22_32_23_23_2]_s$	56
1	0	0	1129190,39	131692,21	147019,58	$[23_22_32_23_23_24]_s$	64

Tablo 4, Tablo 9 ve Tablo 10'daki sonuçlar değerlendirildiğinde, burkulma yük faktörünün N_x/N_y oranı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Açıklık oranının iki olduğu durumda kenar uzunluğu a kenar uzunluğu b 'nin iki katı uzunlukta olmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü üzere N_y yükü plakanın a uzunluğundaki kenarına uygulanmakta ve N_y yükünün artması plaka üzerine daha büyük bir yük uygulanmasına bu durum da kritik burkulma yükünün azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bu üç durumda tabaka dizilimlerinin benzer eğilimler sergilediği gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımı yaygınlaşan polimer matrisli katmanlı hibrit kompozit malzemelerin parçacık sürü algoritması yardımıyla çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve Pareto optimal çözümler ortaya konulmuştur. Çalışmanın ilk aşamasında iki amaç fonksiyonu ile analize başlanmıştır. İki farklı metot kullanılarak çözüm uzayında aynı anda burkulma yükünü maksimize eden ve maliyet fonksiyonunu minimize eden birçok nokta elde edilmiştir. Elde edilen bu noktaların bir eğriye karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında üç amaç fonksiyonu da hesaba dahil edilmiş ve analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen noktaların bu durumda bir eğri yerine yaklaşık olarak çeyrek kürenin yüzeyine karşılık geldiği görülmüştür. Farklı açıklık oranları ve yük oranları için tekrarlanan analizler sonucunda bu iki parametrenin dizilim üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçlar değerlendirildiğinde bu iki parametrenin birbirlerini etkilediği ve birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

Kaynaklar

- Abachizadeh, M. ve Tahani, M., 2009. *An ant colony optimization approach to multi-objective optimal design of symmetric hybrid laminates for maximum fundamental frequency and minimum cost.*, Struct Multidisc Optim 37:367–376
- Ashwear, N., Tamadapu, G. ve Eriksson, A. 2016. *Optimization of modular tensegrity structures for high stiffness and frequency separation requirements.*, International Journal of Solids and Structures, 80, 297-309.
- Duffy, K. J. ve Adali, S., 1994. *Design of antisymmetric hybrid laminates for maximum buckling load: II. Optimal layer thickness.*, Composite structures, 14(2), 113-124.
- Eberhart, R. ve Shi, Y., 2000. *Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization.*, In: Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat.No. 00TH8512), IEEE, vol 1, pp 84–88
- Eberhart, R. ve Kennedy, J., 1995. *A new optimizer using particle swarm theory.*, MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science.
- Jones, R. M., 2018. *Mechanics of composite materials.*, CRC press.
- Karakaya, Ş. ve Soyakasap, Ö., 2011. *Natural frequency and buckling optimization of laminated hybrid composite plates using genetic algorithm and simulated annealing.*, Structural and Multidisciplinary Optimization. 43. 61-72. <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0538-2>.
- Konak, A., Coit, D. W. ve Smith, A. E., 2006. *Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial.*, Reliability engineering & system safety, 91(9), 992-1007.
- Le Riche, R. ve Haftka, R., 1994. *Improved genetic algorithm for minimum thickness composite laminate design.*, Compos Eng 5(2):143–161. [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(95\)90710-S](https://doi.org/10.1016/0961-9526(95)90710-S)
- Nettles, A. T., 1994. *Basic mechanics of laminated composite plates.*, (No. NASA-RP-1351)
- Serhat, G. ve Basdogan, I., 2019. *Multi-objective optimization of composite plates using lamination parameters.*, Materials & Design, 180, 107904.
- Yıldız, K. ve Lesieutre, G. A., 2020. *Sizing and prestress optimization of Class-2 tensegrity structures for space boom applications.*, Engineering with Computers, 38(2), 1451-1464. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01111-x>