

Sandviç Uzun Dikdörtgen Plakların Statik Çökmelerinin Analizi*

Erkin ALTUN SARAY**, a

*Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı, İZMİR 35340, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 19.01.2018
Kabul: 29.03.2018

Anahtar Kelimeler:

Maksimum çökme,
Parametrik çalışma,
Sandviç plaklar

****Sorumlu Yazar:**

e-posta:
[erkin.altunsaray@
deu.edu.tr](mailto:erkin.altunsaray@deu.edu.tr)

*IAREC 2017
sempozyumunda
sunulmuş ve
genişletilmiş bildiridir

ÖZET

Bu çalışmada düzgün yayılı yanal yük etkisindeki sandviç uzun dikdörtgen plakların statik çökmeleri incelenmiştir. Yüze malzemesi olarak farklı sıralanmış simetrik katmanlı kuazi-izotropik (yarı izotropik) karbon/epoksi malzeme ve öz (çekirdek) malzemesi için ise balsa ağacı seçilmiştir. Plak kenarlarının ankastre ve basit mesnetlenmiş halleri incelenmiştir. Öz malzemesinin ve dış cidarların kalınlığına, dış cidarların farklı katman dizilimine ve sınır koşullarına sahip sandviç plakların maksimum çökmeleri, uzun plak yaklaşımıyla incelenmiştir. Sonuçlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) temelli nümerik çalışmayla karşılaştırılmış ve birbirini sağlamıştır. Aynı ağırlığa sahip sandviç plakların maksimum çökmeleri araştırılmış, öz malzemesinin ince dış cidarların kalın olduğu durumda maksimum çökmeler daha fazla bulunmuştur.

DOI: <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2018.04.01.008>

Static Deflections Analysis of Long Rectangular Sandwich Plates

ARTICLE INFO

Received: 19.01.2018
Accepted: 29.03.2018

Keywords:

Maximum deflection,
Parametric study,
Sandwich plates.

****Corresponding**

Authors
e-mail:
[erkin.altunsaray@
deu.edu.tr](mailto:erkin.altunsaray@deu.edu.tr)

ABSTRACT

In this study, static deflections of laterally loaded long rectangular sandwich plates were investigated. Symmetrically laminated quasi-isotropic carbon/epoxy plates were used for the face sheets (skins) and balsa wood for the core. Boundary conditions were considered as simply supported and clamped. Maximum deflections were obtained for the parameters such as thicknesses of core material and face sheets, lamination sequences of face sheets and boundary conditions in long plate approximation. Results were compared with those of numerical study based on Finite Element Method and found in good agreement. Maximum deflections of sandwich plates in same weight were investigated too and found larger at the thin core and thick face sheets condition.

DOI: <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2018.04.01.008>

1. Giriş

Sandviç plaklar, havacılık ve denizcilik sektörlerinde; ağırlıklarına oranla yüksek eğme ve kayma dayanımına sahip olmaları ve yakıt tasarrufu sağlamaları nedeniyle yapı elemanı olarak on yıllardır tercih edilmektedir. İnce dış cidarlar (yüzey malzemeleri) ve düşük yoğunluktaki kalın öz malzemesinden oluşan sandviç plaklarda; dış cidarlar eğilme gerilmelerini karşılarken, öz malzeme ise kayma yüklerini taşır ve yapının rijitliğini artırır [1].

Ayrıca sandviç yapıların avantajları arasında darbe, hasar ve yorulma direnciyle, dayanıklılık, sayılabilir . Balsa ağacı; rüzgar türbini kanatlarından, tekne ve uçaklara kadar sandviç yapılarda tercih edilen öz malzemeleri arasında yer alır [2]. Balsa ağacı, balpeteği ve köpük gibi diğer öz malzemeleri ile karşılaştırıldığında; dayanım ve rijitlik bakımından bal peteği ile aynı, köpükten daha iyidir. Darbe ve yorulma direnci bakımından köpükten daha iyidir. Teknelerin baş tarafındaki dövünme kısmında yüksek yoğunluklu Balsa tercih edilir [3].

Sandviç yapıyı oluşturan farklı malzemedan dış cidarlarla öz malzemesinin ve kalınlıklarının seçilerek en uygun tasarımın elde edilebilmesi yapının en önemli avantajları arasındadır. Ancak en uygun yapının elde edilmesinde neredeyse sonsuz seçenek vardır. Bu nedenle uygun yapı tasarımına yardımcı olabilecek bilgisayar destekli parametrik çalışmalardan ön tasarım aşamasında yararlanılması; üretimde zaman, maliyet ve iş gücünden tasarruf sağlar.

Noor vd. [4] derleme çalışmalarında; sandviç panel ve kabukların mekanik analizlerinin analitik, nümerik ve deneysel hesaplamalarının yer aldığı literatürdeki 800'un üzerindeki kaynağı karşılaştırmalı olarak göstermişlerdir. Kreja [5] daha güncel derleme eserinde 250 kadar tabakalı kompozit ve sandviç panellerin mekanik analizlerinin analitik ve nümerik analizlerinin yer aldığı çalışmasını sunmuştur. Kant ve Swaminathan [6], tabakalı kompozit ve sandviç plakların statik analizini yüksek merteben kayma deformasyon teorisiyle ve nümerik olarak incelemiştir. Çalışmalarında basit mesnetlenmiş sandviç plakların dış cidarları 0° ve 90° açılarından oluşan özel orthotropik (cross-ply) yapısındadır.

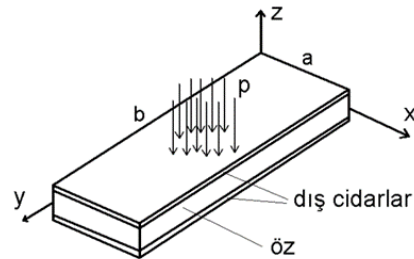
Kumar makalesinde tabakalı kompozit ve sandviç plakların nihai dayanım analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında incelediği sandviç plakların dış cidarları $0/90$ veya $-45/45$ açılarından oluşmuştur [7]. Lin vd. çalışmalarında tabakalı kompozit ve sandviç plakların analizlerini inceledikleri çalışmalarında sandviç plakların dış cidarları 0 ve 90 dereceden oluşan özel ortotropik (cross-ply) yapısındadır [8].

Literatürdeki sandviç plakların mekanik analizleri üzerine yapılan çalışmalarda, dış cidarların genellikle 0° ve 90° açılarından farklı kombinasyonlarından oluşan özel ortotropik (cross-ply) laminasyon tiplerinde olduğu görülmektedir. Dış cidarların 0° , 90° , -45° ve $+45^\circ$ açılarından farklı kombinasyonlarından oluşan yarı-izotropik (quasi-isotropic) yapıda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, literatürde uzun sandviç plakların statik çökmeleri için önerilen Uzun plak yaklaşımı [9] incelenmiştir. Dış cidarların 0° , 90° , -45° ve $+45^\circ$ açılarından farklı kombinasyonlarından oluşan yarı-izotropik (quasi-isotropic) yapıda, farklı kalınlıkta öz ve cidar malzemesinden oluşan yapının statik çökmeleri MATLAB [10] programlama dilinde yazılan kod ile hesaplanmıştır. Ayrıca Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) temelli hesaplama yapan yazılım [11] kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelenen iki yöntemle yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Sandviç Plakın Geometrisi, Dış Cidarlardaki Katmanların İstiflenmesi ve Malzemelerin Özellikleri

Bu çalışmada incelenen sandviç plakların dış cidarları simetrik katmanlı karbon/epoksiden, öz malzemesi ise Balsa ağacından oluşmuştur (Şekil 1.)



Şekil 1. Sandviç plak (*Sandwich plate*)

Sandviç plağın kısa kenarı $a=0.20$ m, uzun kenarı $b=0.62$ m. seçilmiştir. Üzerinden düzgün yayılı yanal (p) yükü etkimektedir.

Dış cidarlar, orta simetri eksenine göre simetrik sıralanmış, aynı açıdan, kalınlıktan ve malzemeden oluşmuş kuazi-izotropik (yarı-izotropik) yapıdadır. Çalışmada incelenen dış cidarların katman sıralamaları Tablo 1.'de gösterilmiştir. Alt indis "n" o tabakadan kaç adet kullanıldığını ifade etmektedir. Bu çalışmada $n=1, 2$ ve 3 için hesaplamalar yapılmıştır, her bir katmanın kalınlığı 0.0002 m. seçilmiştir (Tablo 2.).

Tablo 1. Dış Cidarların Laminasyon Tipleri

Dış cidarların Laminasyon Tipi	Gösterim
LT1	$[90_n/-45_n/45_n/0_n]_2$
LT2	$[-45_n/45_n/90_n/0_n]_2$
LT3	$[45_n/0_n/-45_n/90_n]_2$
LT4	$[0_n/-45_n/45_n/90_n]_2$

Dış cidarların malzemesi Tablo.2.'de mekanik özellikleri verilmiş T300-934 kodlu karbon/epoksi malzemeden oluşmuştur.

Tablo 2. Dış Cidarlardaki T300-934 Kodlu Karbon/epoksi Malzemenin Mekanik Özellikleri [12]

Elastisite Modülü (E_{xx})	148×10^9 (N/m ²)
Elastisite Modülü (E_{yy})	9.65×10^9 (N/m ²)
Kayma Modülü (G_{xy})	4.55×10^9 (N/m ²)
Poisson oranı (ν_{xy})	0.30
Katman kalınlığı (t)	$0.185 \times 10^{-3} - 0.213 \times 10^{-3}$ (m)
Yoğunluk (ρ_0)	1.5×10^3 (kg/m ³)

Sandviç yapıda öz malzemesi olarak kullanılan Balsa ağacının mekanik özellikleri Tablo 3.'te verilmiştir.

Tablo 3. Öz Malzemesi Balsa Ağacının Mekanik Özellikleri [13]

Elastisite Modülü (E_{xx})	688.03×10^6 (N/m ²)
Elastisite Modülü (E_{yy}), (E_{zz})	32.60×10^6 (N/m ²)
Kayma Modülü (G_{xy}), (G_{zx})	72.85×10^6 (N/m ²)
Kayma Modülü (G_{yz})	12.50×10^6 (N/m ²)
Poisson oranı (ν_{xy}), (ν_{zx})	0.007
Poisson oranı (ν_{zy})	0.4797
Yoğunluk (ρ_0)	90.987 (kg/m ³)

2.2. Temel Denklemler

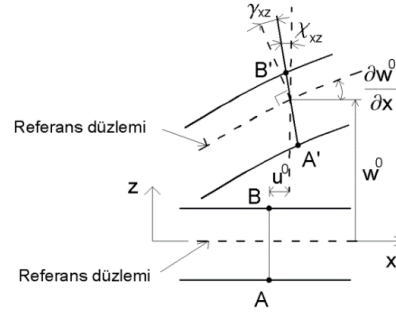
2.2.1. Sandviç plakların yönetici denklemleri

Küçük deformasyonlara uğrayan ince plakların incelenmesinde Kirchhoff hipotezi geçerlidir. Buna göre deformasyondan sonra normaller düz ve referans düzlemine dik kalır. Sandviç plaklarda ise deformasyondan sonra normaller düz kalır, ikinci varsayım burada geçerli değildir (Şekil 2.)

Bu durumda x ve y deplasmanları aşağıdaki (1) ve (2) ifadelerinde gösterilmiştir.

$$u = u^0 - z\chi_{xz}, v = v^0 - z\chi_{yz} \quad (1)$$

u^0 ve v^0 , referans düzleminde ($z=0$) x ve y deplasmanlarıdır. χ_{xz} ve χ_{yz} ise x - z ve y - z düzlemlerindeki normallerin dönmeleridir.



Şekil 2. Sandviç plakta deformasyonlar

Şekil 2.'den referans düzleminin x 'e karşılık gelen çökmesi w^0

$$\frac{\partial w^0}{\partial x} = \chi_{xz} + \gamma_{xz} \quad (2)$$

ve benzer biçimde y 'e karşılık gelen çökmesi w^0 ise

$$\frac{\partial w^0}{\partial y} = \chi_{yz} + \gamma_{yz} \quad (3)$$

şeklinde dir. Referans düzlemdaki gerinimler

$$\epsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x}, \quad \epsilon_y^0 = \frac{\partial v^0}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} \quad (4)$$

Enine kayma gerinimleri (2) ve (3)'ten;

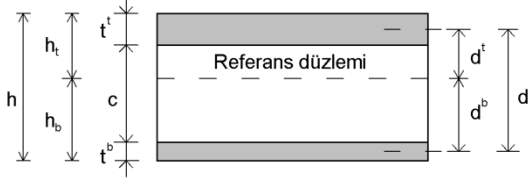
$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &= \frac{\partial w^0}{\partial x} - \chi_{xz}, \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial w^0}{\partial y} - \chi_{yz} \end{aligned} \quad (5)$$

Referans düzlemin eğrilikleri (kayma deformasyonu yokken)

$$\kappa_x = -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x}, \quad \kappa_y = -\frac{\partial \chi_{yz}}{\partial y},$$

$$\kappa_{xy} = -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial x} \quad (6)$$

Yukarıdaki (4), (5) ve (6) nolu eşitlikler sandviç plakların gerinim-deplasman ilişkileridir.



Şekil 3. Sandviç plak kesiti (Section of a sandwich plate)

Sandviç plağın kesit resmi Şekil 3.'te gösterilmiştir. Burada t^t ve t^b ifadeleri sırasıyla, üst cidarın ve alt cidarın kalınlıklarıdır. Bu çalışmada, üst ve alt cidarlar aynı kalınlıkta simetrik katmanlı olduğu için t^t ve t^b birbirine eşittir. Aynı şekilde referans düzlemi sandviç plağın ortasından geçmektedir ve d^t ile d^b birbirine eşittir. Bu durumda $d=c+t$ olarak Şekil 3.'te gösterilmiştir.

Kuvvet-gerinim ilişkisini tanımlamak için öncelikle kuvvetler ve momentler aşağıda (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$N_x = \int_{-h_b}^{h_t} \sigma_x dz, \quad N_y = \int_{-h_b}^{h_t} \sigma_y dz, \\ N_{xy} = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{xy} dz, \quad M_x = \int_{-h_b}^{h_t} z \sigma_x dz, \quad (7)$$

$$M_y = \int_{-h_b}^{h_t} z \sigma_y dz, \quad M_{xy} = \int_{-h_b}^{h_t} z \tau_{xy} dz \\ V_x = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{xz} dz, \\ V_y = \int_{-h_b}^{h_t} \tau_{yz} dz \quad (8)$$

N_i , M_i ve V_i sırasıyla düzlem içi kuvvetler, momentler ve enine kayma kuvvetleridir. h_t ve h_b referans düzlemden plak yüzeyine olan mesafedir.

Düzlem-gerinim durumdaki gerilmeler ise

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Referans düzlemden z kadar mesafedeki gerinimler

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x}$$

$$\epsilon_y^0 = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} - z \left(\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Yukarıdaki (4), (7), (9) ve (10) nolu eşitliklerden ve [A], [B] ve [D] rijitlik matrislerinin tanımlarından faydalanarak aşağıdaki (11) ve (12) nolu ifadeler elde edilir,

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [B] \begin{Bmatrix} -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x} \\ -\frac{\partial \chi_{yz}}{\partial y} \\ -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [D] \begin{Bmatrix} -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x} \\ -\frac{\partial \chi_{yz}}{\partial y} \\ -\frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \chi_{yz}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Eşitlik (6)'dan, yukarıdaki (11) ve (12) nolu ifadeler aşağıdaki biçimde yazılır.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [B] \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + [D] \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Enine kayma kuvvetleri ile enine kayma gerinimleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{S}_{11} & \check{S}_{12} \\ \check{S}_{12} & \check{S}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Yukarıdaki ifadede $[\check{S}]$ sandviç plağın kayma rijitlik matrisidir.

2.2.2. Sınır koşulları

Plak kenarlarındaki ankastre mesnet sınır koşulunda, çökme w^0 , düzlem-içi deplasmanlar u^0 ve v^0 , ve normallerin dönmeleri χ_{xz} ve χ_{yz} sıfırdır:

$$w^0 = 0, \quad u^0 = v^0 = 0, \quad \chi_{xz} = \chi_{yz} = 0 \quad (16)$$

Basit mesnet sınır koşulunda, çökme w^0 , eğilme momenti M_x , burulma momenti M_{xy} , düzlem-içi kuvvetler N_x ve N_{xy} sıfırdır.

$$\begin{aligned} w^0 &= 0 \\ M_x &= M_{xy} = 0 \\ N_x &= N_{xy} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

2.2.3. Sandviç plakların rijitlik matrisleri

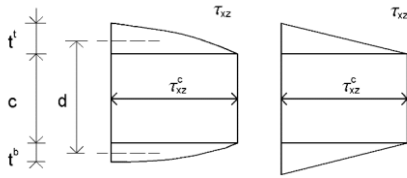
Özün kalınlığının yükleme durumunda sabit kaldığı ve özün düzlem-içi rijitliklerinin ihmal edildiği varsayılır. Bu varsayımlarla [A], [B] ve [D] sandviç plağın rijitlik matrisleri, cidarların rijitlikleri ve paralel eksenler teoremiyle elde edilir.

Alt ve üst cidar aynı, her bir cidarın orta düzlemine göre katmanları simetrik olduğunda, [B] uzama-eğilme birleşme rijitlik matrisi sıfırdır. [A] uzama rijitlik matrisi ise alt ve üst cidarların [A] uzama matrislerinin toplamına eşittir.

$$[A] = 2 [A]^t \quad (18)$$

[D] eğilme rijitlik matrisi ise,

$$[D] = \frac{1}{2} d^2 [A]^t + 2 [D]^t \quad (19)$$



Şekil 4. Sandviç plaktaki kayma gerilmesi τxz dağılımı (a), yaklaşık dağılım

Kayma rijitlik matrisi [S̃] şöyle belirlenir; özde düzlem-içi rijitliklerinin ihmal edildiği varsayımının sonucu olarak, enine kayma gerilmeleri τxz düzgün olarak dağılmıştır. Genel olarak dış cidarların kayma gerilmeleri dağılımı Şekil 4. a'daki gibi dağılmaktadır. Burada bu dağılımın lineer kayma gerilmesi dağılımı olduğu (Şekil 4. b) kabul edilmektedir. Buna göre enine kayma kuvveti Vx ise

$$V_x = \int_{-h_b}^{h_b} \tau_{xz} dz = \tau_{xz}^c + \tau_{xz}^c \frac{t^t}{2} + \tau_{xz}^c \frac{t^b}{2} = \tau_{xz}^c d \quad (20)$$

$$d = c + \frac{t^t}{2} + \frac{t^b}{2} \quad (21)$$

yukarıdaki (21) eşitliğinde c, t ve b sırayla öz, üst ve alt cidarı ifade etmektedir. d uzunluğu Şekil 4'te görülmektedir.

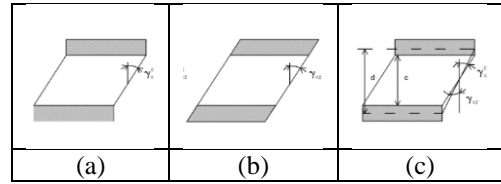
Vy 'de benzer biçimde aşağıda (22) gösterilmiştir

$$V_y = \tau_{yz}^c d \quad (22)$$

Öz malzemenin gerilme-gerinim ilişkisi aşağıda verilmiştir:

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xz}^c \\ \tau_{yz}^c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{C}_{55}^c & \overline{C}_{45}^c \\ \overline{C}_{45}^c & \overline{C}_{44}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz}^c \\ \gamma_{yz}^c \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Yukarıdaki ifadede \overline{C}_{ij}^c özün rijitlik matrisinin elemanlarıdır. İnce dış cidarların kayma deformasyonları ihmal edilir. Bu yaklaşımla γxz kayma deformasyonunun enine kesiti Şekil 5.a'da görülmektedir. Ortalama kayma deformasyonu γxz Şekil 5.b'de görülmektedir. Ortalama kayma deformasyonu ile öz deformasyonu arasındaki ilişki Şekil 5.c'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Sandviç plaktaki kayma deformasyonları

Şekil 5.'ten;

$$\gamma_{xz}^c = \frac{d}{c} \gamma_{xz}$$

$$\gamma_{yz}^c = \frac{d}{c} \gamma_{yz} \quad (24)$$

elde edilir. Eşitlik (20)-(24)'ten enine kayma kuvvetleri ile ortalama kayma deformasyonu ilişkisi:

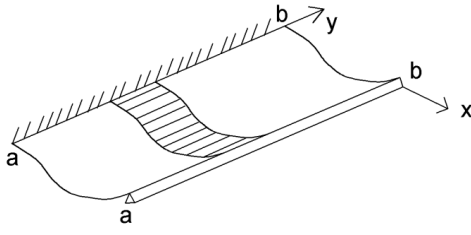
$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \frac{d^2}{c} \begin{bmatrix} \overline{C}_{55}^c & \overline{C}_{45}^c \\ \overline{C}_{45}^c & \overline{C}_{44}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Eşitlik (15) ile karşılaştırarak;

$$\begin{bmatrix} \tilde{S}_{11} & \tilde{S}_{12} \\ \tilde{S}_{12} & \tilde{S}_{22} \end{bmatrix} = \frac{d^2}{c} \begin{bmatrix} \overline{C}_{55}^c & \overline{C}_{45}^c \\ \overline{C}_{45}^c & \overline{C}_{44}^c \end{bmatrix} \quad (26)$$

elde edilir.

2.2.4. Uzun dikdörtgen ince plaklar



Şekil 6. Uzun plaktaki silindirik deformasyon

İzotropik plaklarda uzunluğun (b) genişliğe (a) oranı;

$$b/a > 3 \quad (27)$$

ise uzun plak yaklaşımı kabul edilir [2].

Ortotropik plaklarda ise uzun plak yaklaşımı benzer olarak (28) ifadesinde verilmiştir [2].

$$\frac{b}{a} > 3 \sqrt[4]{\frac{D_{11}}{D_{22}}} \quad (28)$$

Uzun plakların silindirik eğilmesinin incelenmesinde, silindirik yüzey plağın y eksenine paraleldir. Plağın κ_y ve κ_{xy} eğrilikleri sıfırdır.

$$\kappa_y = \kappa_{xy} = 0 \quad (29)$$

κ_x eğriliği ise

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \text{ dir} \quad (30)$$

Plağın uzunluğu (b) boyunca kuvvetler ve momentler değişmez.

$$\frac{dV_x}{dx} + p_z = 0 \quad (31)$$

$$\frac{dM_x}{dx} - V_x = 0 \quad (32)$$

Yük yüzeye diktir ve basitleştirmek için p_z, p ile değiştirilir.

V_x (32), (31)'de yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + p = 0 \quad (33)$$

Simetrik katmanlı plak durumunda $[B]=0$ 'dır ve eşitlik (29) ve (Ek A.1)'den sadece M_x momenti kalır;

$$M_x = D_{11} \kappa_x \quad (34)$$

Burada [D] eğilme rijitlik matrisi (Ek B.1) ve (Ek B.2) ifadelerinden hesaplanmaktadır.

Eşitlik (34)'ü (33)'te yerine yazarak ve (30)'dan faydalanarak simetrik katmanlı anizotropik uzun plaklar için aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{d^4 w^0}{dx^4} - \frac{p}{D_{11}} = 0 \quad (35)$$

Enine yüklü izotropik kirişteki çökme eşitliği aşağıda verilmiştir;

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{p'}{EI} = 0 \quad (36)$$

Yukarıda E elastisite modülü ve I ise atalet momentidir.

Eşitlik (35) ve (36) karşılaştırıldığında, simetrik katmanlı uzun plaktaki ve izotropik kirişteki çökmeler benzerdir. Yüklerin nümerik değerleri eşit olduğunda ($p = p'$), simetrik katmanlı uzun plakların eğilme rijitlikleri D_{11} izotropik kirişlerin eğilme rijitliği EI ile aynıdır (p birim alana, p' ise birim uzunluğa etkiyen yüküdür). Simetrik katmanlı uzun plağın çökmesi, izotropik kirişin çökmesindeki verilen eşitlikteki EI / p' , D_{11}/p ile değiştirilerek elde edilmektedir [7].

2.2.5. Uzun dikdörtgen sandviç plaklar

Uzunluğu (b), genişliğinden (a) çok büyük olan uzun dikdörtgen sandviç plak göz önüne alınmaktadır. $b \gg a$ (Şekil 6.). Sandviç plağın uzun kenarı (b)'den ankastre veya basit mesnet olarak mesnetlenmiştir. Plak enine p (birim alana etkiyen) yüküne maruzdur ve bu yük plağın uzunluğu (b) boyunca değişmemektedir.

Çökmüş yüzey plağın kısa kenarından (a) önemli derecede mesafede, silindirik kabul edilir (Şekil 6.) ve plağın y eksenine paraleldir. Dolayısıyla plağın çökmesi w^0 ve dönmesi χ_{xz} y eksenini boyunca değişmez.

$$\frac{\partial w^0}{\partial y} = 0, \frac{\partial \chi_{xz}}{\partial y} = 0 \quad (37)$$

y-z düzleminde kayma deformasyonu ihmal edilir ($\gamma_{yz} = 0$). Dolayısıyla eşitlik (3)'ten normalin dönmesi sıfırdır:

$$\chi_{yz} = 0 \quad (38)$$

(31) ve (32)'deki denge denklemleri ise

$$\frac{dV_x}{dx} + p=0 \quad (39)$$

$$\frac{dM_x}{dx} - V_x = 0 \quad (40)$$

Orta düzleme göre simetrik sandviç plakta ($[B] = 0$), eşitlik (12), (15), (37) ve (38)'den

$$M_x = -D_{11} \frac{\partial \chi_{xz}}{\partial x}, \quad V_x = \tilde{S}_{11} \chi_{xz} \quad (41)$$

Eşitlik (39), (40), (41) ve (2) bir araya getirilirse

$$-D_{11} \frac{d^3 \chi_{xz}}{dx^3} + p=0 \quad (42)$$

$$D_{11} \frac{d^2 \chi_{xz}}{dx^2} + \tilde{S}_{11} \left(\frac{dw^0}{dx} - \chi_{xz} \right) = 0 \quad (43)$$

elde edilir.

Enine yüklü izotropik sandviç kirişlerin eşitlikleri aşağıda verilmiştir [2]:

$$-\widehat{EI} \frac{d^3 \chi}{dx^3} + p' = 0 \quad (44)$$

$$-\widehat{EI} \frac{d^2 \chi}{dx^2} + \hat{S} \left(\frac{dw}{dx} - \chi \right) = 0 \quad (45)$$

\widehat{EI} ve \hat{S} izotropik kirişlerin eğilme ve kayma rijitlikleri ve p' birim boya gelen yüküdür.

Eşitlik (42), (43)'deki D_{11} , \tilde{S}_{11} ve p sırasıyla \widehat{EI} , \hat{S} ve p' 'nin yerine yazılırsa, uzun sandviç plakların çökmesi elde edilir.

Kayma rijitlik matrisi yukarıda verilmiştir:

$$\begin{bmatrix} \tilde{S}_{11} & \tilde{S}_{12} \\ \tilde{S}_{12} & \tilde{S}_{22} \end{bmatrix} = \frac{a^2}{c} \begin{bmatrix} \overline{C}_{55}^c & \overline{C}_{45}^c \\ \overline{C}_{45}^c & \overline{C}_{44}^c \end{bmatrix} \quad (26)$$

Burada

$$\overline{C}_{55}^c = G_{12}, \quad \overline{C}_{44}^c = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})}, \quad \overline{C}_{45}^c = 0 \quad (46)$$

olarak verilmiştir [2].

Uzun sandviç plak yaklaşımında; kirişlerin maksimum çökmeleri;

$$w = \frac{5}{384} \frac{p' a^4}{EI} + \frac{p' a^2}{8 \hat{S}} \quad (\text{basit mesnet}) \quad (47)$$

$$w = \frac{1}{384} \frac{p' a^4}{EI} + \frac{p' a^2}{8 \hat{S}} \quad (\text{ankastre mesnet}) \quad (48)$$

plakların kirişlere karşılık gelen maksimum çökmeleri;

$$w = \frac{5}{384} \frac{p a^4}{D_{11}} + \frac{p a^2}{8 \tilde{S}_{11}} \quad (\text{basit mesnet}) \quad (49)$$

$$w = \frac{1}{384} \frac{p a^4}{D_{11}} + \frac{p a^2}{8 \tilde{S}_{11}} \quad (\text{ankastre mesnet}) \quad (50)$$

biçiminde verilmiştir [2].

2. Analizler ve Tartışma

Sandviç plağın kenar uzunlukları; Uzun plak yaklaşımındaki (28) ifadesinde verilen eşitlikle, bu çalışmada analizleri yapılan plakların rijitlik sabitleriyle hesaplanarak 0.2 m. ve 0.62 m. seçilmiştir. Dış cidarların kalınlıkları hesaplanırken, Tablo 2.'den her bir katmanın kalınlığı 0.0002 m. alınmıştır. Çalışmada incelenen 12 ayrı plağın Tablo 4.'te Uzun sandviç plak yaklaşımını sağladığı görülmektedir.

$$\frac{b}{a} > 3 \sqrt[4]{\frac{D_{11}}{D_{22}}} \quad (28)$$

Tablo 4. Uzun Sandviç Plak Yaklaşımı Kontrolü (a=0.2 m., b=0.62 m.)

Plak No	Dış cidarların Laminasyon Tipi	Öz Kalınlık (m)	$\frac{b}{a} > 3 \sqrt[4]{\frac{D_{11}}{D_{22}}}$
1	[90/-45/45/0] ₂	0.02	3.1 > 2.9983
2	[90 _z /-45 _z /45 _z /0 _z] ₂	0.02	3.1 > 2.9941
3	[90 ₃ /-45 ₃ /45 ₃ /0 ₃] ₂	0.02	3.1 > 2.9884
4	[90/-45/45/0] ₂	0.01	3.1 > 2.9941
5	[90/-45/45/0] ₂	0.03	3.1 > 2.9992
6	[-45 _z /45 _z /90 _z /0 _z] ₂	0.02	3.1 > 2.9990
7	[45 _z /0 _z /-45 _z /90 _z] ₂	0.02	3.1 > 3.0030
8	[0 _z /-45 _z /45 _z /90 _z] ₂	0.02	3.1 > 3.0059
9	[90/-45/45/0] ₂	0.07275	3.1 > 2.9999
10	[-45/45/90/0] ₂	0.07275	3.1 > 3.0000
11	[45/0/-45/90] ₂	0.07275	3.1 > 3.0001
12	[0/-45/45/90] ₂	0.07275	3.1 > 3.0001

Bu çalışmada iki durum incelenmiştir. İlkinde öz malzemesinin kalınlığı sabit tutulup (c=0.02 m), dış cidarların toplam kalınlığı 1, 2 ve 3 kat alınmıştır (t=0.0032, 0.0064 ve 0.0096 m.). Aynı biçimde dış cidarların kalınlığı sabit tutulup (t=0.0032 m.), öz malzemesinin kalınlığı 1, 2 ve 3 kat alınmıştır (c=0.02, 0.03 ve 0.04 m). Boyutsuz maksimum çökmelerin değişimi incelenmiştir.

İkinci durumda ise, öz malzemesinin ve dış

cidarların kalınlıkları değiştirilip, aynı toplam ağırlığa sahip sandviç plakların boyutsuz maksimum çökmeleri incelenmiştir.

3.1. Durum 1

Bu kısımda ilk olarak öz malzemesinin kalınlığı $c=0.02$ m. olarak sabit seçilip, dış cidarların kalınlıkları ise 0.0032, 0.0064 ve 0.0096 m. alınarak, basit mesnet ve ankastre sınır koşullarında maksimum boyutsuz çökme (w^*) değerleri, Uzun plak yaklaşımı (Upy) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hesaplanmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (öz kalınlık $c=0.02$ m)

Plak No	Dış cidarlar Kalınlık	Basit Mesnet		Ankastre Mesnet	
		Upy	SEY	Upy	SEY
1	0.0032	3.835	3.824	3.121	3.114
2	0.0064	2.937	2.930	2.628	2.618
3	0.0096	2.457	2.444	2.277	2.260

İkinci olarak ise; sandviç plağın dış cidarları 0.0032 m. olarak sabit seçilip, öz malzemesinin kalınlığı 0.01, 0.02 ve 0.03 m. alınarak, basit mesnet ve ankastre sınır koşullarında maksimum boyutsuz çökme (w^*) değerleri, Uzun plak yaklaşımı (Upy) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hesaplanmıştır (Tablo 6.).

Tablo 6. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (dış cidarlar toplam kalınlık = 0.0032 m)

Plak No	Öz Kalınlık	Basit Mesnet		Ankastre Mesnet	
		Upy	SEY	Upy	SEY
4	0.01	8.187	8.152	5.719	5.690
1	0.02	3.835	3.824	3.121	3.114
5	0.03	2.479	2.472	2.265	2.142

Durum 1.'de; Tablo 4.'ten, özün kalınlığı sabit tutulup, dış cidarların kalınlığı arttırılınca maksimum boyutsuz çökme azalmaktadır. Tablo 5.'ten dış cidarların kalınlığı sabit tutulup, özün kalınlığı arttırılınca maksimum boyutsuz çökme azalmaktadır. Tablo 5. ve Tablo 6.'dan Uzun plak yaklaşımı ile SEY sonuçları birbirine yakın bulunmuştur.

3.2. Durum 2

Bu kısımda sandviç plakların toplam ağırlığı eşit olacak şekilde, öz malzemesinin ve dış cidarların kalınlıkları değiştirilerek basit mesnet ve ankastre mesnet sınır koşullarında, maksimum boyutsuz çökme (w^*) değerleri, Uzun plak yaklaşımı (Upy) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hesaplanmıştır (Tablo 7, 8, 9 ve 10). Ayrıca dış cidarların laminasyonları 8

farklı tipte seçilip, maksimum boyutsuz çökmeye etkisi incelenmiştir.

İlk olarak öz malzemesinin kalınlığı $c=0.02$ m. seçilmiştir. Yoğunluğu ise 90.987 (kg/m^3) olarak Tablo 3.'ten alınmıştır. Plak alanı $0.2 \times 0.62 = 0.124$ m^2 'dir. Öz malzemesinin ağırlığı 0.225 kg olarak hesaplanmıştır.

Dış cidarlardaki laminasyonda $n=2$ seçilmiştir. Tek bir katmanın kalınlığı $t=0.0002$ m'dir (Tablo 2.). Alt ve üst cidarın toplam kalınlığı 16×0.0002 m $\times 2 = 0.0064$ m.dir. Tek bir katmanın alanı 0.2 m $\times 0.62$ m = 0.124 m^2 'dir. Cidarların toplam ağırlığı ise $0.0064 \times 0.124 \times 1.5 \times 10^3 = 1.190$ kg 'dir. Öz malzemesi, alt ve üst cidarlardan oluşan sandviç plağın toplam ağırlığı "1.416 kg" olarak hesaplanmıştır (Tablo7 ve 8).

Tablo 7. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (dörtkenar basit mesnetli, dış cidarlar $n=2$, öz kalınlık= 0.02 m)

Plak No	Dış cidarların Laminasyon Tipi	Upy	SEY
6	[-45 _z /45 _z /90 _z /0 _z] ₂	2.9359	2.9240
7	[45 _z /0 _z /-45 _z /90 _z] ₂	2.9346	2.9020
8	[0 _z /-45 _z /45 _z /90 _z] ₂	2.9335	2.8820

Tablo 8. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (dörtkenar ankastre mesnetli, dış cidarlar $n=2$, öz kalınlık= 0.02 m.)

Plak No	Dış cidarların Laminasyon Tipi	Upy	SEY
6	[-45 _z /45 _z /90 _z /0 _z] ₂	2.6274	2.6120
7	[45 _z /0 _z /-45 _z /90 _z] ₂	2.6272	2.5900
8	[0 _z /-45 _z /45 _z /90 _z] ₂	2.6270	2.5720

İkinci olarak dış cidarlardaki laminasyonda $n=1$ seçilmiştir. Tek bir katmanın kalınlığı $t=0.0002$ m'dir. Alt ve üst cidarın toplam kalınlığı 16×0.0002 m $\times 2 = 0.0032$ m.dir. Tek bir katmanın alanı 0.2 m $\times 0.62$ m = 0.124 m^2 'dir. Cidarların toplam ağırlığı ise $0.0032 \times 0.124 \times 1.5 \times 10^3 = 0.595$ kg 'dir.

İlk kısımda bulunan toplam ağırlıkla eşit olacak şekilde öz malzemesinin kalınlığı $0,07275$ m. hesaplanmıştır. Yoğunluğu 90.987 (kg/m^3)'dir. Plak alanı $0.2 \times 0.62 = 0.124$ m^2 'dir. Öz malzemesinin ağırlığı 0.820 kg olarak hesaplanmıştır.

Alt ve üst cidarlarla öz malzemesinden oluşan sandviç plağın toplam ağırlığı "1.416 kg" olarak ilk kısımla eşit olacak biçimde düzenlenmiştir (Tablo 9 ve 10).

Tablo 9. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (dörtkenar basit mesnetli, dış cidarlar $n=1$, öz kalınlık= 0.07275 m.)

Plak No	Dış cidarların Laminasyon Tipi	Upy	SEY
9	[90/-45/45/0] ₂	0.9786	0.9754
10	[-45/45/90/0] ₂	0.9786	0.9753
11	[45/0/-45/90] ₂	0.9786	0.9752
12	[0/-45/45/90] ₂	0.9786	0.9750

Tablo 10. Maksimum boyutsuz çökme ($w^*=w_{maks} \cdot 10^9/p$), (dörtkenar ankastre mesnetli, dış cidarlar $n=1$, öz kalınlık= 0.07275 m.)

Plak No	Dış cidarların Laminasyon Tipi	Upy	SEY
9	[90/-45/45/0] ₂	0.9183	0.9184
10	[-45/45/90/0] ₂	0.9183	0.9184
11	[45/0/-45/90] ₂	0.9183	0.9182
12	[0/-45/45/90] ₂	0.9183	0.9181

Durum 2.'de; Tablo 6 - 9'dan dış cidarların değişen laminasyon dizilimi ve kalınlık değişimi, maksimum boyutsuz çökmeyi, özün kalınlık değişiminden daha az etkilediği görülmektedir. Ayrıca aynı ağırlığa sahip 8 ayrı plak karşılaştırılmış, özün kalınlığı fazla ve dış cidarların kalınlığının az olduğu seçenekte maksimum boyutsuz çökmenin daha az olduğu bulunmuştur. Basit mesnet ve ankastre mesnet sınır koşullarında, Uzun plak yaklaşımı ile SEY sonuçları birbirine yakın bulunmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı kalınlıklarla, laminasyon tiplerindeki dış cidar ve öz malzemelerinden oluşan düzgün yayılı yanal yüklü 12 farklı sandviç plak, kenarlarından basit ve ankastre mesnetli sınır koşullarında Uzun plak yaklaşımı [2] ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle incelenmiştir.

Önceki bölümde Durum 1'de, öz malzemesinin veya dış cidarların kalınlıkları arttırıldığında, maksimum boyutsuz çökmeler öz malzemesinin kalınlığının arttırılmasından daha çok etkilenmektedir (Tablo 5.-6.).

Durum 2'de ise, 8 farklı sandviç plağın ağırlıklarını sabit tutacak biçimde; öz malzemesi ve dış cidarların kalınlıkları değiştirilmiştir. İncelenen 8 farklı plağın boyutsuz maksimum çökmeleri laminasyon dizilimlerinden fazla etkilenmemektedir.

Özün kalınlığının fazla, dış cidarların ise ince olduğu koşulda maksimum boyutsuz çökmeler daha az bulunmuş, daha rijit yapı elde edilmiştir (Tablo 7.-10.).

Bu çalışmadaki gibi yapılacak bilgisayar destekli parametrik analizlerle, sandviç yapıların ön tasarımında en uygun parametreler belirlenip, ağırlık, zaman, işgücü ve maliyetten tasarruf edilebileceği öngörülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Sezgin FA. 2008. Mechanical behavior and modelling of honeycomb cored laminated fiber/polymer sandwich structures. MSc thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir.
- [2] Borrega M. and Gibson L.J. 2015. Mechanics of balsa (Ochroma pyramidale) wood. Mechanics of Material. 84, 75-90.
- [3] ASM Handbook Volume 21 Composites, 2001, ASM International Handbook Committee.
- [4] Noor A.K., Burton W.S. and Bert C.W. 1996. Computational models for sandwich panels and shells. Appl Mech Rev vol 49, no 3, March 1996.
- [5] Kreja I. 2011. A literature review on computational models for laminated composite and sandwich panels, Cent. Eur. J. Eng. 1(1) 59-80.
- [6] Kant T and Swaminathan K. 2002. Analytical solutions for the static analysis of laminated composite and sandwich plates based on a higher order refined theory, - Composite Structures, Volume 56, Issue 4, June 2002, Pages 329-344.
- [7] Kumar A.A. 2018. Ultimate Strength Analysis of Laminated Composite Sandwich Plates, Structures, Volume 14, June 2018, Pages 95-110.
- [8] Lin G., Zhang P., Liu J. and Li J. 2018. Analysis of laminated composite and sandwich plates based on the scaled boundary finite element method, Composite Structures, Volume 187, 1 March, Pages 579-592.
- [9] Kollar LP and Springer GS. 2007. Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, USA.

[10] Matlab.

[11] Abaqus /CAE 6.9-2 Student Edition.

[12] Tsai SW. 1988. Composites design, 4th Edition, Think Composites, Dayton, OH.

[13] Newaz G., Mayeed M. and Rasul A. 2016. Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis. J. of Materials: Design and Applications, 230(1), 206-218.

[14] Pilkey WD. 2005. Formulas for stress, strain and structural matrices, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Ekler

Ek.A. İnce plakların yönetici denklemleri

Kuvvet-gerinim ilişkisi;

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{1x}^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (\text{Ek .A1})$$

Ek.B. İnce plakların rijitlik matrisleri

A_{ij} , B_{ij} ve D_{ij} ise sırasıyla uzama, eğilme-uzama birleşme ve eğilme rijitlik matrisleri olarak tanımlanır. Dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisi cinsinden yazımları aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (\text{Ek B.1})$$

Yukarıdaki $[\bar{Q}]$ dönüşüme uğramış indirgenmiş rijitlik matrisinin elemanlarının bulunuşu aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ \bar{Q}_{22} &= s^4 Q_{11} + c^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ \bar{Q}_{12} &= c^2 s^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (c^4 + s^4) Q_{12} \\ \bar{Q}_{66} &= c^2 s^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12}) + (c^2 - s^2)^2 Q_{66} \end{aligned} \quad (\text{Ek B.2})$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{16} &= cs(c^2 Q_{11} - s^2 Q_{22} - (c^2 - s^2)(Q_{12} + 2Q_{66})) \\ \bar{Q}_{26} &= cs(s^2 Q_{11} - c^2 Q_{22} + (c^2 - s^2)(Q_{12} + 2Q_{66})) \\ (c &= \cos \theta \quad s = \sin \theta) \end{aligned}$$

Erkin ALTUN SARAY*

Erkin ALTUN SARAY 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı'nda 2005 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2011 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü'nde doktora öğrenimini tamamladı. Halen Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma konuları arasında küçük teknelerin yapısal tasarımı ve kompozit yapıların mekanik analizleri yer almaktadır.