**T.C.**
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KOMPOZİT YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK ANALİZ YARDIMIYLA TASARIMI

**ERKİN ALTUNSARAY**

**DOKTORA TEZİ**
**GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN**
**YRD. DOÇ. DR. İSMAİL BAYER**

**İSTANBUL, 2011**

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KOMPOZİT YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK ANALİZ YARDIMIYLA TASARIMI

Erkin ALTUNSARAY tarafından hazırlanan tez çalışması 01.11.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Uğur GÜVEN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ahmet ERGİN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Ertekin BAYRAKTARKATAL

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

# ÖNSÖZ

Tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük emeği olan, zamanını ayırıp yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER'e, çalışmayı yönlendiren her zaman değerli görüşlerini aldığım tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Uğur GÜVEN'e (YTÜ) ve Prof. Dr. Ahmet ERGİN'e (İTÜ), desteklerinden ötürü YTÜ Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi akademik ve idari personeline, Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN'a, Doç. Dr. Nurten VARDAR'a, üzerimde emeği bulunan herkese ve hayatımın her döneminde destekleriyle yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Ağustos, 2011

Erkin ALTUNSARAY

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ ..... vii

KISALTMA LİSTESİ ..... ix

ŞEKİL LİSTESİ ..... x

ÇİZELGE LİSTESİ ..... xii

ÖZET ..... xv

ABSTRACT ..... xvii

BÖLÜM 1 ..... 1

GİRİŞ ..... 1

1.1 Literatür Özeti ..... 2
1.2 Tezin Amacı ..... 8
1.3 Bulgular ..... 10

BÖLÜM 2 ..... 12

MATERYAL VE YÖNTEM ..... 12

2.1 Anizotropik Malzemelerin Makromekaniği ..... 12
2.1.1 Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkisi ..... 12
2.1.2 Ortotropik Malzemelerin Mühendislik Sabitleri İle İfadesi ..... 18
2.1.3 Ortotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu ..... 19
2.1.4 Ortotropik Tabakalarda Asal Eksenler Dışındaki Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkisi ..... 20
2.1.5 Klasik Laminasyon Teorisi (KLT) ..... 23
2.1.5.1 Yer değiştirme ve Şekil Değiştirme İlişkisi ..... 23
2.1.5.2 Denge Denklemlerinin Belirlenmesi ..... 26
2.1.5.3 Bileşik Tabakanın Katılık Matrisleri ve Yönetici Diferansiyel Denklemlerinin Belirlenmesi ..... 30
2.1.5.4 Simetrik Katmanlı Kompozit Plaklar ..... 32
2.2 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Statik ve Dinamik Analizi ..... 33

2.2.1 Ağırlıklı Artıklar (Kalanlar) Yöntemleri ..... 33
2.2.1.1 Moment Yöntemi ..... 34
2.2.1.2 Kolokasyon Yöntemi ..... 34
2.2.1.3 Galerkin Yöntemi ..... 34
2.2.1.4 En Küçük Kareler Yöntemi ..... 35
2.2.2 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Eğilmesi ..... 35
2.2.2.1 Galerkin Yöntemi'nin Uygulanması ..... 36
2.2.2.2 En Küçük Kareler Yöntemi'nin Uygulanması ..... 38
2.2.3 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Serbest Titreşimi ..... 39
2.2.3.1 Galerkin Yöntemi'nin Uygulanması ..... 39
2.2.3.2 En Küçük Kareler Yöntemi'nin Uygulanması ..... 41

BÖLÜM 3 ..... 43

STATİK VE DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI ..... 43

3.1 Parametrik Analizlerde İncelenen Plak Geometrisi, Malzeme Özellikleri ve Tabakaların İstiflenme Sıralaması ..... 43
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) Çözümleme Yapan ANSYS Paket Yazılımının Kullanımı ..... 47
3.3 Statik Analiz Sonuçları ..... 50
3.4 Dinamik Analiz Sonuçları ..... 71

BÖLÜM 4 ..... 92

SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 92

4.1 Sonuçlar ..... 92
4.2 Öneriler ..... 97

KAYNAKLAR ..... 99

EK-A ..... 103

DETAYLI BOYUTSUZ SONUÇLAR ..... 103

ÖZGEÇMİŞ ..... 128

## SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $\sigma_{ij}$ | Gerilme tansörü bileşenleri |
| $\varepsilon_{ij}$ | Şekil değiştirme tansörü bileşenleri |
| $C_{ijkl}$ | Elastik katılık (rijitlik) tansörü |
| $S_{ijkl}$ | Elastik esneklik tansörü |
| $\sigma_1$ ($\sigma_{xx}$) | 1 (x) yönündeki normal gerilme |
| $\sigma_2$ ($\sigma_{yy}$) | 2 (y) yönündeki normal gerilme |
| $\sigma_3$ ($\sigma_{zz}$) | 3 (z) yönündeki normal gerilme |
| $\tau_{12}$ ($\tau_{xy}$) | Plağın 1–2 (x – y) düzleminde oluşan kayma gerilmesi |
| $\tau_{23}$ ($\tau_{yz}$) | Plağın 2–3 (y – z) düzleminde oluşan kayma gerilmesi |
| $\tau_{13}$ ($\tau_{xz}$) | Plağın 1–3 ( x – z) düzleminde oluşan kayma gerilmesi |
| $\varepsilon_1$ | x ekseni yönündeki birim uzama şekil değişimi |
| $\varepsilon_2$ | y ekseni yönündeki birim uzama şekil değişimi |
| $\varepsilon_3$ | z ekseni yönündeki birim uzama şekil değişimi |
| $\gamma_{12}$ | 1–2 (x – y) düzleminde oluşan birim kayma şekil değişimi |
| $\gamma_{23}$ | 2–3 (y – z) düzleminde oluşan birim kayma şekil değişimi |
| $\gamma_{31}$ | 1–3( x – z) düzleminde oluşan birim kayma şekil değişimi |
| $E$ | Young (Elastisite) modülü |
| $E_{11}$ | Boyuna Young (Elastisite) modülü |
| $E_{22}$ | Enine Young (Elastisite) modülü |
| $G$ | Kayma modülü |
| $G_{22}$ | Boyuna Kayma modülü |
| $\nu$ | Poisson oranı |
| $\nu_{12}$ | Boyuna Poisson oranı |
| $\rho_0$ | Birim hacim başına kütlesel yoğunluk |
| $a$ | Plağın x eksenindeki uzunluğu |
| $b$ | Plağın y eksenindeki uzunluğu |
| $h$ | Plak kalınlığı |
| $N_{xx}$ | Levha düzlemine x kenarı boyunca etki eden normal kuvet |
| $N_{yy}$ | Levha düzlemine x kenarı boyunca etki eden normal kuvet |

$N_{xy}$ Levha x-y düzleminde etki eden kayma kuvveti

$M_{xx}$ Plağın x ekseni yönünde oluşan moment

$M_{yy}$ Plağın y ekseni yönünde oluşan moment

$M_{xy}$ Plağın x – y düzleminde oluşan moment

$Q_n$ Düşey kuvvet

$q(x,y), P(x,y)$ Yanal basınç yükü

$I_0, I_1, I_0$ Kütlesel atalet momentleri

$A_{ij}$ Uzama katılık (rijitlik) matrisi

$B_{ij}$ Eğilme-uzama birleşme katılık (rijitlik) matrisi

$D_{ij}$ Eğilme katılık (rijitlik) matrisi

$Q_{ij}$ İndirgenmiş katılık (rijitlik) matrisi

$\overline{Q_{ij}}$ Dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık (rijitlik) matrisi

$\varepsilon_R$ Kalan (artık) değer

$\varphi$ Ağırlık fonksiyonu

$\phi_i, \phi_j$ Deneme fonksiyonları (yaklaşım veya koordinat fonksiyonları)

$c_i$ Sabit katsayılar

$u$ Problemin gerçek çözümü

$u_{(n)}$ Problemin yaklaşık çözümü

$w$ Çökme fonksiyonu

$w_0^*$ Boyutsuz maksimum çökme

$\omega$, $f$ Doğal frekans

$\omega_0$, $f_0$ Asal doğal frekans

$\omega_0^*$, $f_0^*$ Boyutsuz asal doğal frekans

## KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| KLT | Klasik Laminasyon Teorisi |
| BMKDT | Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi |
| SEY | Sonlu Elemanlar Yöntemi |

# ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa


Şekil 1. 1 Karışık yapı sisteminde üretilmiş Sandown sınıfı tek cidarlı kompozit mayın tarama gemisi yapı elemanlarının perspektif ve orta kesit görünüşleri [4]. .. 2
Şekil 2. 1 Sonsuz küçük kübik elemandaki gerilmeler ..... 15
Şekil 2. 2 Ortotropik tek yönlü bir tabaka [39] ..... 21
Şekil 2. 3 Bileşik tabakalı kompozit plak [39] ..... 24
Şekil 2. 4 Bileşik tabakanın x-z düzlemindeki yer değişimleri [39] ..... 25
Şekil 2. 5 Bileşik tabakalarda plak kalınlığı boyunca gerilme ve şekil değişimi [39] ..... 26
Şekil 2. 6 Plak üzerindeki eksenel ve düşey kuvvetlerle momentlerin gösterimi [39]. 29
Şekil 2. 7 Düzgün yayılı yanal yük (q) etkisindeki plak ..... 35
Şekil 3. 1 Plak Geometrisi ..... 43
Şekil 3. 2 LT1 kodlu $[-45_2/0_2/45_2/90_2]_s$ plağı içindeki tabakaların istiflenmesi ..... 46
Şekil 3. 3 SHELL181 kabuk elemanı [51] ..... 49
Şekil 3. 4 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 51
Şekil 3. 5 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 52
Şekil 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 53
Şekil 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 54
Şekil 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b)SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 61
Şekil 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 62
Şekil 3. 10 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 63

Şekil 3. 11 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 64
Şekil 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 72
Şekil 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 73
Şekil 3. 14 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1,LT11, LT6, LT20 ..... 74
Şekil 3. 15 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1,LT11, LT6, LT20 ..... 75
Şekil 3. 16 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 82
Şekil 3. 17 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi ..... 83
Şekil 3. 18 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 84
Şekil 3. 19 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20 ..... 85
Şekil 4. 1 Galerkin Yöntemi kullanılarak hazırlanan bilgisayar programı (MATLAB) ve SEY (ANSYS) ile yapılan parametrik analizlerde, parametre sayısının çözüm süresine etkisi ..... 96

# ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Kısaltılmış biçimde gerilme-şekil değiştirme notasyonları……..14
Çizelge 2. 2 Sınır koşulları için seçilen şekil fonksiyonları (i = 1,...,m ; j = 1,..,n)……38
Çizelge 3. 1 Parametrik analizlerde incelenen kenar oranları……44
Çizelge 3. 2 Malzeme özellikleri [52, 53]…….. 45
Çizelge 3. 3 Tabakaları farklı açılarda istiflenmiş simetrik katmanlı kompozit plak tipleri ……..46
Çizelge 3. 4 ANSYS yazılımında farklı kabuk eleman kullanımının sonuçlara etkisi…….. 48
Çizelge 3. 5 ANSYS yazılımında sonlu elemanlar ağı için farklı boyutlarda eleman seçiminin, hesap sonuçlarına ve çözümleme sürelerine etkisi…… 49
Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b……..55
Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)…… 56
Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)…… 57
Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a……..58
Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……59
Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……60
Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b……..65
Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)…… 66
Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)…… 67
Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a……..68
Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……69
Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……70

Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b……..76
Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)……77
Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı) …….. 78
Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a……..79
Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……80
Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)……81
Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b 86
Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı) …….. 87
Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı) …….. 88
Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a89
Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı) …….. 90
Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı) …….. 91
Çizelge EK-A. 1 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=1…… ……104
Çizelge EK-A. 2 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=1……..105
Çizelge EK-A. 3 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=1……106
Çizelge EK-A. 4 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=1……107
Çizelge EK-A. 5 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=2……..108
Çizelge EK-A. 6 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli,n=2……109
Çizelge EK-A. 7 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=2……..110
Çizelge EK-A. 8 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=2 ……111
Çizelge EK-A. 9 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=3……..112

Çizelge EK-A. 10 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=3……113
Çizelge EK-A. 11 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=3……114
Çizelge EK-A. 12 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=3……115
Çizelge EK-A. 13 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=1……116
Çizelge EK-A. 14 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=1……117
Çizelge EK-A. 15 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=1……118
Çizelge EK-A. 16 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=1……119
Çizelge EK-A. 17 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=2……120
Çizelge EK-A. 18 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=2……121
Çizelge EK-A. 19 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=2……122
Çizelge EK-A. 20 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=2……123
Çizelge EK-A. 21 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=3……124
Çizelge EK-A. 22 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=3……125
Çizelge EK-A. 23 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=3……126
Çizelge EK-A. 24 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^*$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=3……127

# ÖZET

## KOMPOZİT YAPILARIN STATİK VE DİNAMİK ANALİZ YARDIMIYLA TASARIMI

Erkin ALTUNSARAY

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd.Doç. Dr. İsmail BAYER

Malzeme ve üretim teknolojisindeki hızlı gelişmelerle birlikte, yüksek özgül dayanım, yüksek özgül katılık, çevresel etkilere direnç, bileşenlerinin ayarlanarak üretimde istenilen geometrik ve yapısal özelliklerde tasarım seçeneği sunması gibi üstün özellikleri nedeniyle, kompozitler artan bir ivmeyle gemi yapım malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Kompozitlerin gemi yapım malzemesi olarak kullanımının diğer önemli nedeni, geminin farklı bölgeleri için istenilen mekanik özelliklerin, tabakaların (laminant) geometrisinin önceden belirlenerek elde edilebilmesidir. Destek elemanların farklı kullanımı, oluşacak sınır koşulları gibi çok sayıda parametreye bağlı yapısal tasarımda tabakaların dizilim geometrisi için sonsuz sayıda seçenek bulunmaktadır. Seçilen farklı yapıda plak tipi için testler yapılıp en uygun yapının araştırılması, üretim aşamasında zaman, emek ve maliyet kayıplarını getirmektedir.

Bu çalışmada düzgün yayılı yanal yük etkisindeki simetrik katmanlı dikdörtgen ince kompozit plakların statik eğilme ve serbest titreşim problemleri ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşulları için incelenmiştir. Farklı tabaka açısı dizilimi ve kenar oranına sahip simetrik katmanlı kompozit plakların maksimum çökme değeri ve doğal frekans değeri, Klasik Laminasyon Teorisi'nin (KLT) yönetici diferansiyel denklemlerine göre, Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nden; Galerkin ve En Küçük Kareler Yöntemleri'yle MATLAB yazılımında hazırlanan programla parametrik olarak hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımı

sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Güçlü bir Ağırlıklı Artıklar Yöntemi olarak bilinen Galerkin Yöntemi'nin SEY (ANSYS) ile yakın sonuçları çok daha hızlı biçimde verdiği belirlenmiştir. Tabaka açısının değişimiyle maksimum çökme ve doğal frekans değerlerinin kenar oranlarına da bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Plak kısa kenarının farklı eksende seçilmesi durumunda aynı tabaka açısı dizilimindeki plağın farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmadaki gibi Galerkin Yöntemi kullanımıyla gerçekleştirilecek parametrik analizlerin kompozit gemilerin tasarımına uygulanabileceği öngörülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Simetrik katmanlı kompozit plaklar, statik analiz, serbest titreşim, Klasik Laminasyon Teorisi (KLT), Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri, Galerkin Yöntemi, En Küçük Kareler Yöntemi, parametrik analiz, gemi ön tasarımı

## ABSTRACT

# DESIGN OF COMPOSITE STRUCTURES USING STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS

Erkin ALTUNSARAY

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. İsmail BAYER

With the rapid developments in material and production technology, composites are increasingly used in shipbuilding industry due to their outstanding features such as high specific strength, high specific rigidity, resistance to environmental effects and offering design alternatives for the desired geometrical and structural properties during manufacturing by adjusting the components.

Another important reason for the use of composites as a shipbuilding material is that the desired mechanical properties for different regions of a ship may be obtained by predetermining the geometry of laminates. There are nearly infinite number of possibilities for the geometrical arrangement of laminates depending on a number of parametres like the diffferent configuration of supporting members and the resulting boundary conditions. Investigation of the best design among different type of plates by testing some selected alternatives will result in losses of time and labour, but in an increase in cost at the production stage.

The problems of statical bending and free vibrations of symmetrically laminated thin rectangular composite plates, which are uniformly lateral loaded, for the boundary conditions of clamped edge and simply supported edge are examined in this study. Maximum deflection and natural frequency of symmetrically laminated composite plates consisting of different type of orientation angle and aspect ratio are investigated

parametrically by the methods of Galerkin and the Least Squares, which are two well-known weighted residual methods, with the aid of MATLAB software used for developing a computer code. The results are compared with those obtained by Finite Element Method (FEM) software package ANSYS. It is observed that the Galerkin Method yields reasonable results much more rapidly than FEM. It is also observed that the values of maximum deflection and natural frequency vary with the change of laminate orieantation angle, depending on the aspect ratio, too. In the case of choosing the short edge of the plate at the different axis, the results are different from each other even for the same lamination angle. It is proposed that parametrical analyses carried out by the use of Galerkin Method as in this study may be applied to the preliminary design of composite ships.

**Key words:** Symmetrically laminated composite plates, static analysis, free vibration, Classical Lamination Plate Theory (CLPT), Weighted Residual Methods, the Galerkin Method, the Least Square Method, parametrical analysis, preliminary design of ships

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

Kompozitler, birbirinden biçimleri ve kimyasal bileşimleriyle ayrılmış ve esas olarak birbiri içinde çözünmeyen, iki veya daha çok mikro veya makro bileşenin karışımı ve birleşimiyle oluşan malzemelerdir [1]. Böylece bileşenlerinin özelliklerinden yararlanarak, bileşenlerinde bulunmayan daha üstün özellikte yapı elde edilmiş olur [2].

Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanılma amacı, uygun bileşen malzemelerinin seçimiyle, yüksek "dayanım/ağırlık" oranı, yüksek "katılık/ağırlık" oranı, çevresel etkilere karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklık performansı gibi elde edilecek özellikleri yapısal tasarımda kullanmaktır.

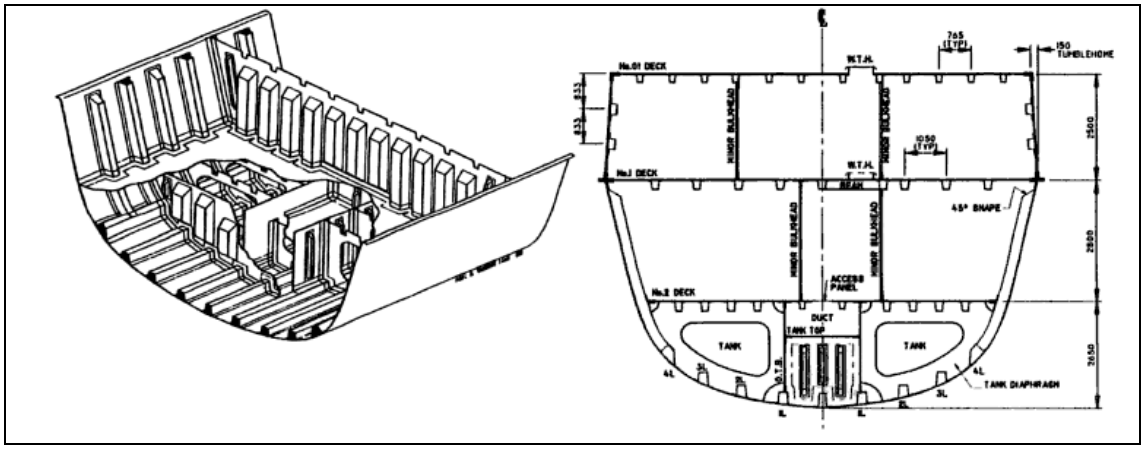
Kompozit malzemeler denizcilik alanında, yukarıda belirtilen özelliklerinin yanında, kullanılan geleneksel malzemelere (çelik, alüminyum, ahşap) göre tasarımda istenilen formda üretim serbestliğini daha fazla sunması, seri üretime uygun olması, bileşenlerinin uygun biçimde ayarlanıp yapının farklı bölgelerindeki farklı zorlanma durumlarına cevap verebilecek uygun özellikteki tasarımı mümkün kılması gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Denizcilik alanında kullanımının tarihsel gelişimi içinde, 1940'lı yılların başlarında cam takviyeli plastik malzemeden üretilen balıkçı tekneleriyle başlandığı belirtilmektedir. Malzeme ve üretim teknolojilerinin gelişimiyle yatlarda, yüksek hızlı teknelerde, gezinti teknelerinde, yolcu teknelerinde, askeri gemilerde ve denizaltılarda kullanımı günümüze kadar belirgin biçimde artmıştır. Belirtilen özelliklerle birlikte manyetik iz bırakmama yeteneği nedeniyle 1970'lerden sonra mayın tarama gemilerinde ahşap malzemenin yerini aldığı görülmektedir [3-6].

Günümüz denizcilik endüstrisinde yaygın olarak, çok eksenli kıvrımsız elyaflarla termoset reçinelerin birleştirilmesiyle elde edilen bileşik tabakalı kompozit uygulaması yapılmaktadır. Kompozit teknelerin üretiminde, çok sayıda parametreye bağlı olarak değişecek durumlar için uygun tabaka (laminant) diziliminin belirlenmesi önemlidir.

## 1.1 Literatür Özeti

Gemilerin yapısal tasarımında, geleneksel kural tabanlı yaklaşımlarla, 1970'li yıllardan sonra geliştirilen yapısal teorilere dayalı bilgisayar destekli yöntemlerle analizlerin yapıldığı yaklaşımlar bulunmaktadır. Kural tabanlı yaklaşımlar, çeşitli gemi klaslama kuruluşlarının uzun süren gözlemler ve deneyler sonucunda oluşturarak yayınladığı tasarım kurallarıdır. Kural tabanlı yaklaşımlarla birlikte bilgisayar destekli analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) yapısal tasarımda kullanılması, tasarımcılara optimum yapıyı hızlı biçimde elde etme olanağı vermiştir [7].

Gemi yapısı, kalınlığı diğer boyutlarına göre küçük ince levhalar ve onları destekleyen elemanlardan oluşmaktadır [8]. Destek elemanlarının gemi eni veya boyu doğrultusunda yerleştirilmelerine bağlı olarak, yapı sistemi de enine veya boyuna olarak adlandırılmaktadır [9]. Kompozit malzemeden karışık yapı sisteminde tek cidarlı üretilmiş mayın tarama gemisinin kesit görünüşü Şekil 1. 1'de gösterilmiştir (bordada enine sistem, güverte ve dipte boyuna sistem) [4].




Şekil 1. 1 Karışık yapı sisteminde üretilmiş Sandown sınıfı tek cidarlı kompozit mayın tarama gemisi yapı elemanlarının perspektif ve orta kesit görünüşleri [4].

Bu yapı sistemi, aralarındaki bazı farklılıklarla birlikte gemi klaslama kuruluşlarının boyutlandırma kurallarıyla tasarlanırken, önce temel tasarım verileri (geminin kullanım amacı, ana boyutlar, hız, malzeme, tasarım yükleri) belirlenir. Ardından bu verilere bağlı olarak geminin farklı yerleri için panel kalınlıkları, levha paneli kenar oranı, efektif genişlik, yapıdaki destek elemanlarının yapıdaki yerleri ve büyüklükleri belirlenmiş güvenlik katsayıları kullanılarak tasarlanmaktadır. Kompozit tekneler, tabakaların birleştirilmesiyle tek cidarlı veya tabakaların arasına dolgu malzemesi eklenmesiyle sandviç tipte üretilebilmektedir. Tekne dip, dış kaplama, güverte, üst yapılar, perdeler, diğer yapısal elemanlarda bulunan takviye malzemesi (cam, aramid, karbon) oranları verilmektedir. Paneller için izin verilen sehim limitleri basit mesnet ve ankastre mesnet sınır koşulları için çeşitli formüllerle ifade edilmektedir. Makinalar, cihazlar ve geminin tekne yapısı titreşim zorlanmalarının etkisinde bulunduğu için; tasarım, yapım ve yerleştirme bu gerilmeler göz önünde bulundurularak rezonanstan kaçınılarak yapılmaktadır. Ana makine, yardımcı makinalar ve pervanelerin işletme koşulları için izin verilen titreşim limitleri verilmektedir. Kompozit tekne üretiminin kendine özgü doğasından kaynaklanan farklı malzeme seçimleriyle, farklı uygulamalarda yapının emniyetli değerleri sağlaması için, malzeme dayanım testleriyle tasarımın desteklenmesi beklenir [10-14].

Todd, gemi yapısındaki büyük yapısal elemanların (tekne kirişi, üst yapılar, makine temeller, direk vb.) ön titreşim analizinde, şaft ve pervanenin işletme koşullarındaki doğal frekans değerlerine yakın olmasından kaçınıldığını belirttiği çalışmasında, titreşim ölçümleri için hesaplama yöntemleri ve deneysel yaklaşımlar sunmuştur [15].

Bazı araştırmacılar da kompozit tekne üretimindeki deneylerle edindikleri tecrübelerini, cidar kalınlığı ve teknenin farklı yapı elemanlarının tasarımı için pratik hesaplama yöntemleriyle sunmuşlardır. Plessis, deplasman tipinde ve hızlı tekneler için, tekne hızıyla ana boyutlarına bağlı olarak borda kaplaması, dip kaplaması ve destek elemanlarının boyutlarının belirlendiği tablolar sunmuştur [16]. Scott, kompozit tekne tasarımındaki ilkeleri anlattığı çalışmasında $0^0$ ve $90^0$ açılarındaki kıvrımsız elyaflar ve dokuma elyaflarla oluşturulmuş, cam takviyeli plastik kompozit yapılardaki cam oranına bağlı, çeki, bası ve eğilme dayanımlarıyla, elastisite modüllerini tablolar halinde sunmuştur. Cam takviyeli plastik kompozitlerin düşük elastisite modüllerinin, bazı

durumlarda eş mukavemetteki çeliklerden daha fazla istenmeyen sehimlere neden olduğunu, haddinden fazla panel ve destek elemanı sehimlerinin, panel kenarları ile destek elemanları arasındaki bağlantılarda çeşitli sorunlara neden olduğuna değinmiştir. Güverteye gelen yayılı yükler, bordaya gelen hidrostatik yükler, bordaya gelen darbe yükleri, bölmelere gelen sıvı yükleri, makine temellerindeki ve üst yapıdaki tüm yükler için kompozit tekne üreticilerine sehim limitlerini göstermiştir. Teknenin yapı elemanlarının doğal frekansının, teknenin işletme koşullarında ana makine ve pervane kaynaklı frekanslarla rezonansa girmemesi için belirlenmesinin önemli olduğunu belirtmiştir [17]. Gerr, çalışmasında deplasman tipi kompozit teknenin ana boyutlarının seçilmesinden sonra bunlara bağlı olarak teknenin tüm yapı elemanlarının boyutlandırılmasını göstermiştir [18]. Green, çalışmasında kompozit tek cidarlı ve sandviç gemi panelleri için kritik burkulma yükünün belirlendiği formüller ve tablolar sunmuştur [19].

Chalmers, kompozit gemilerin üretimindeki yapısal tasarım ilkelerini sunduğu çalışmasında Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hesaplama yapan paket yazılımlarının uygulanabileceğini belirtmiştir [20].

Ojeda vd. kompozit bir katamaran teknenin yapısal analizini Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözüm yapan ANSYS paket yazılımıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında geminin dip kısmına gelen yükleri gemi klaslama kuruluşlarından Norveç Loydu (DNV) kurallarına göre belirleyip, geminin farklı bölgeleri için $0^0$ ve $90^0$ açılarında oluşan desteklenmiş üç farklı plak ile $0^0$, $45^0$, $-45^0$, $90^0$ açılarından oluşan bir kabuğun çökme değerlerini hesaplamışlardır [21].

Santos vd. kompozit malzemeden yapılmış hızlı devriye botunun, modal analizini sonlu elemanlar yöntemiyle çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla gerçekleştirmişlerdir. İki boyutlu kiriş, üç boyutlu kiriş ve üç boyutlu modelleme durumlarında teknenin ilk dört mod şeklini belirlemişlerdir [22].

Gemi bünyesi ince levhaların birleştirilmesinden meydana gelen çok sayıda destek elemanlarla takviye edilmiş bir kabuk sistemdir. Bu kabuğun stifnerler arasında kalan kısmının eğriliği gayet az olduğundan ince dikdörtgen levha gibi inceleyen Savcı, izotropik dikdörtgen plakların eğilme ve burkulma problemlerinin, kenar oranlarına

bağlı olarak basit mesnet ve ankastre mesnet sınır koşulları için çift Fourier serileriyle ve enerji yöntemleriyle çözümünü vermiştir [8]. Bayer, kalınlığı değişen izotropik eliptik levhaların burkulma ve serbest titreşimlerini, farklı kenar oranları için basit mesnet ve ankastre mesnet sınır koşullarında Rayleigh-Ritz ve Galerkin Yöntemleri'yle parametrik olarak incelemiş, çalışmanın gemi güvertelerine uygulanabileceğini belirtmiştir [23].

Plak kısa kenarının plak kalınlığına oranı (a/h) bakımından plaklar üç grupta incelenmektedir. Kalınlıkları diğer ölçüleri yanında ihmal edilemeyecek kadar büyük kalın plaklarda, iç gerilme üç boyutlu davranışta olmaktadır. Kalın plaklarda bu oran a/h ≤ 8…10 olarak değerlendirilmektedir. İkinci gruptaki ince plaklar dış yüklemeleri; eğilme, burulma momentleri, eksenel ve kayma kuvvetleri ile taşımaktadır. Bu oran ince plaklarda 8…10 ≤ a/h ≤ 80…100 aralığındadır. Üçüncü gruptaki membran plaklar ise eğilme rijitliğine sahip değildir, yanal yükleri eksenel ve kayma yükleri ile taşırlar. Membran plaklarda oran 80…100 ≤ a/h olarak değerlendirilmektedir [24, 25].

Kompozit gemi yapımında, bileşik tabakaların birlikte kullanıldığı tek cidarlı yapı sistemi ince plak uygulaması olarak değerlendirilebilir. Bu durumda kompozit ince plaklar için geliştirilmiş Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre inceleme yapmak yeterlidir. Bileşik tabakaların arasında dolgu malzemesi kullanımıyla sandviç sistemde yapılması durumunda veya plak kalınlığının fazla olduğu özel uygulamalarda, yapıların bunlara uygun olarak geliştirilmiş Sandviç Plak Teorisi (SPT) veya Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Teorileri'ne (YMKDT) göre incelenmesi doğru olur.

Kompozit ince plaklar için geliştirilmiş teoriler arasında ince plaklardaki kayma gerilmeleri etkilerini ihmal eden Klasik İnce Plak Teorisi'nin (KPT) bileşik tabakalı kompozitlere uyarlanmış Klasik Laminasyon Teorisi (KLT) Lekhnitskii'nin çalışmalarında verilmiştir [26, 27]. Ambartsumyan, özel ortotropik plakların eğilme, serbest titreşim ve burkulma problemlerini kayma deformasyon etkilerini dahil ederek incelemiştir [28]. Whitney ve Leissa basit mesnet sınır koşullarındaki özel ortotropik plakların eğilme problemlerini Fourier serileriyle incelemiştir [29]. Whitney, ankastre mesnetli anizotropik plakların eğilme, burkulma ve titreşim problemlerini Fourier serileri kullanarak incelemiştir [30]. Tsay ve Reddy, izotropik ve ortotropik plakların eğilme, serbest titreşim ve burkulması için, Reissner'in varyasyonal prensibine dayanan karma

sonlu eleman formülasyonunu sunmuşlardır [31]. Leissa ve Narita simetrik katmanlı dikdörtgen kompozit plakların serbest titreşimini Rayleigh-Ritz yöntemiyle incelemişlerdir [32].

Mohan ve Kingsburyy, kare geometrideki basit mesnetli ve konsol kiriş durumundaki, eş eksenli ($0^0$, $22.5^0$, $45^0$, $67.5^0$) boron/epoksi malzemedeki ortotropik plakların doğal frekans değerlerini Galerkin Yöntemi'yle hesaplamışlar, doğal frekans değerlerinin tabaka açısı değişiminden belirgin biçimde etkilendiğini belirlemişlerdir [33].

Kompozit plakların statik eğilme problemini, çözüm denklemini diferansiyel denklem formunda kullanarak Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'yle inceleyen Soni ve Iyengar, ankastre mesnet sınır koşulları için araştırdıkları problemde, tabakalı antisimetrik ve simetrik çapraz katmanlı ($\pm 45^0$), $0^0$ ve $90^0$ açılarından oluşan özel ortotropik dikdörtgen plaklarda, tabaka açısı değişimi ve kenar oranı değişiminin (a/b=1, 1.5 ve 2) maksimum çökme ve doğal frekans değerlerine etkisini Galerkin Yöntemi'yle inceleyerek, hızlı bir çözümleme yöntemi olduğunu belirlemişlerdir [34]. Iyengar ve Umaretiya, karşılıklı iki kenarı ankastre diğer kenarları basit mesnetli, kevlar/epoksi, boron/epoksi ve hibrid malzemeli, dikdörtgen ve çalık plakların, tabaka açısı ($0^0$, $15^0$, $30^0$, $45^0$, $60^0$, $75^0$, $90^0$) ve kenar oranı (a/b=0.5, 1 ve 1.5) değişiminin maksimum çökme değerine etkisini, Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre, Galerkin Yöntemi'yle incelemişlerdir [35].

Hosokawa vd. simetrik katmanlı kompozitlerin serbest titreşimini inceledikleri çalışmalarında eş eksenli tek tabakalı ($30^0$) cam/epoksi ve simetrik katmanlı üç tabakalı ($30^0/-30^0/30^0$) grafit/epoksi kompozit plakların doğal frekans değerlerini Galerkin Yöntemi'yle hesaplamışlardır. Uygun yaklaşım fonksiyonu seçimiyle analizlerin kişisel (masaüstü) bilgisayarlarda hızlı biçimde elde edilebileceğine vurgu yapmışlardır [36].

Deneysel çalışmaların arasında, Mottram ve Selby'nin dokuz farklı tabaka dizilimdeki ince kompozit plakların eğilme problemlerinin deneysel olarak ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle incelemeleri sayılabilir [37].

Chen ve Lui, tabakalı kompozit plakların maksimum çökme ve doğal frekans değerlerini Levy tipi seri çözümüyle belirlemişlerdir [38].

Literatürde kompozit plakların statik ve dinamik analizleriyle ilgili önemli sayıda çalışması bulunan Reddy, bu alanda temel eserlerden sayılan çalışmasında kompozit

plakların teorilerini anlatmış, Varyasyonel Yöntemler'den Rayleigh-Ritz ve Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nden, Galerkin, En Küçük Kareler ve Kolokasyon yöntemlerini tanıtmıştır. Farklı açıdaki tabakalardan oluşan simetrik ve antisimetrik özel ortotropik ve çapraz katamanlı plakların (0/90, 0/90/0, 0/90/90/0, 0/90/0/90 ve 45/-45) eğilme, burkulma ve serbest titreşim problemlerini Klasik Laminasyon Teorisi (KLT), Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi (BMKDT) ve Üçüncü Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi'ne (ÜMKDT) göre incelemiştir. Plak kenarının plak kalınlığına oranına (a/h) ve kenarların oranına (a/b) bağlı olarak, basit mesnetli durum için Navier Yöntemi'yle (çift Fourier serileri), farklı sınır koşulları için Levy Yöntemi (tek Fourier serileri), Varyasyonel Yöntemler (Rayleigh-Ritz) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hesaplamıştır. Plak kısa kenarının plak kalınlığına oranı 50'den büyük değerler için üç plak teorisinin sonuçlarının yakın çıktığını belirlemiştir. Çözüm için aynı yönetici denklemi, varyasyonal formda kullanan Ritz Yöntemi'nin sonuçlarıyla, diferansiyel formda kullanan Galerkin Yöntemi sonuçlarının yakın çıkacağını belirtmiştir [39].

Literatürde bulunan bileşik tabakalı kompozit plaklar, kabuklar ve sandviç plaklar üzerine geliştirilen teoriler ve bilgisayarlı hesaplama uygulamaları çeşitli araştırmacıların derleme makalelerinde sunulmuştur [40, 41, 42, 43]. Kreja, güncel derleme makalesinde bileşik tabakalı kompozit plaklar, kabuklar ve sandviç paneller üzerine yapılmış teorilerle bilgisayarlı hesaplama uygulamalarını içeren çalışmaları karşılaştırmalı olarak sunmuştur [44]. Bileşik tabakalı ince kompozit plakların statik eğilme ve serbest titreşim analizleri üzerine yapılan çalışmaların ağırlığını, özel ortotropik yapıdaki tabakalı plakların, farklı teori ve yöntemlerle incelenmesinin oluşturduğu görülmektedir.

Orta simetri düzleminin her iki tarafındaki tabakaların, orta simetri düzlemine eşit uzaklıkta ve aynı dizilim açısında olması durumunda yapı simetrik katmanlı olarak adlandırılır. Simetrik katmanlı kompozit plakların sertleşme işlemini izleyen soğuma sırasında ısıl gerilmelerden dolayı bir burkulma göstermedikleri için kompozit yapı uygulamalarında yapının simetrik katmanlı olmasının tercih edildiğine çeşitli araştırmacılar dikkat çekmişlerdir [45-48]. NASA'da (National Aeronautics and Space Administration) kullanılan kompozit hava araçlarında az sayıda istisna dışında, üç veya daha fazla sayıda aynı malzemedeki tabakaların plak içinde aynı miktarlarda dağılımıyla

oluşan kuazi-izotropik yapının uygulandığı belirtilmektedir [49]. Quazi-izotropik plaklarda elyaf açıları ($\theta$) $\theta = i\Pi/I$ olarak tanımlıdır. Burada $i = 1,2,..I$ ve $I$ elyafların dizilim açılarının toplam adedidir ($I \geq 3$). Plak içindeki aynı açıdaki tabakaların adedi, malzemesi ve kalınlığı aynıdır. Günümüzde kompozit gemi yapımında deniz ortamının çevresel etkilerinde yüksek dayanım performansı sağlamak için kıvrımsız, dikilmiş, çok eksenli elyafların (lamina) termoset matrislerle birleştirilmesiyle oluşan yapı sistemi kullanılmaktadır. Malzeme üretimindeki kısıtlamalara bağlı olarak yapıda yaygın olarak kulanılan elyaflar $0^0$, $-45^0$, $90^0$ ve $45^0$ açılarındadır.

## 1.2 Tezin Amacı

Kompozitlerin gemi yapısında uygulamalarında, uygun tabaka dizilim açısının araştırılmasının yanında, destek elemanlarının yerleştirilmesine bağlı olarak oluşacak farklı kenar oranlarının (a/b ve b/a) ve sınır koşullarının etkilerini incelemek, bilgisayar destekli parametrik çalışma yapılmasını gerektirmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında kompozit gemilerin yapısal tasarımında Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle çözümleme yapılan programların kullanıldığı görülmektedir [19]. Katamaran kompozit tekneyle ve hızlı devriye botunun statik ve dinamik analizlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) inceleyen çalışmaların, aynı ana boyutlara, plak kalınlığına ve elyaf dizilimine sahip gemilerin yapısal davranışı için önemli bilgiler verdiği görülmektedir [21, 22]. Geminin farklı boyutlarda üretilmesi ve farklı açıda tabaka kullanılmasıyla, yapının plak boyutlarıyla, kalınlıklarının ve yükleme durumlarının değişip yapının yükleme durumuna daha uygun cevap verecek üretimin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Günümüz denizcilik endüstrisinde yaygın olarak kıvrımsız çok eksenli $0^0$, $-45^0$, $90^0$, $45^0$ açılarındaki elyafların kullanıldığı belirtilmektedir. Araştırmacıların üçten fazla tabakanın yapıda eş dağılımda kullanıldığı ve simetrik katmanlı yapıların önemine vurgu yaptıkları görülmektedir [45-49]. Plak ve kabukların kiriş vb. elemanlarla desteklendiği yapı sistemi olarak ele alınarak karmaşık gemi yapısının statik ve dinamik analizi basite indirgenerek yapılan çalışmalar bulunmaktadır [8].

Eğilme ve serbest titreşim analizlerini inceleyen çalışmaların içinde, günümüz denizcilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kıvrımsız çok eksenli $0^0$, $-45^0$, $90^0$ ve $45^0$ açılarındaki elyafların, simetrik katmanlı kompozit plak içinde aynı ağırlık oranında ve farklı açılarda sıralandığı kombinasyonları için; gemilerde destek elemanlarının enine veya boyuna yerleştirilmesine bağlı oluşacak farklı kenar oranlarıyla (a/ b ve b/a) farklı sınır koşullarında, Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak parametrik olarak inceleyen bir çalışma görülmemiştir.

Bu çalışmada düzgün yayılı yanal yük etkisi altında $0^0$, $-45^0$, $90^0$ ve $45^0$ açılarındaki tabakaların farklı açılarda dizilimiyle oluşturulmuş 24 farklı simetrik katmanlı dikdörtgen kompozit plağın eğilmesi ve serbest titreşimi incelenmiştir. Plakların orta noktasındaki maksimum çökme değeri ve asal doğal frekans değeri, yapıdaki tabakaların farklı açılarda ($0^0$, $-45^0$, $90^0$ ve $45^0$) sıralanmasına, enine ve boyuna yapı sistemleri için farklı plak kenar oranlarına (a/b ve b/a'nin 11 farklı değeri) ve farklı sınır koşullarına (ankastre mesnet ve basit mesnet) bağlı olarak incelenmiştir. Parametrik hesaplamalar Klasik Laminasyon Teori'sinin (KLT) yönetici diferansiyel denklemleri kullanılarak, Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nden Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi'yle MATLAB [50] programlama dilinde hazırlanan bilgisayar programıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS [51] paket yazılımıyla bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kompozit gemilerin üretiminde çok sayıda parametreye bağlı oluşacak farklı durumlar için sonsuz sayıda seçenek söz konusudur. Bu çalışmadaki gibi Galerkin Yöntemi kullanımıyla gerçekleştirilecek parametrik analizlerin kompozit gemilerin yapısal ön tasarımına uygulanabileceği düşünülmüştür. Yöntemin kullanımıyla, teknenin farklı bölgelerinde istenen yapısal davranışa uygun cevap verecek bileşik tabakalı kompozit plakların hızlı biçimde belirleneceği, bu sayede üretimde zaman, emek, malzeme tasarrufu sağlanabileceği ve deney maliyetlerinin azaltılacağı öngörülmüştür.

Bölüm 2'deki Materyal ve Yöntem'de; anizotropik malzemelerin makromekaniği kısmında, gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri, ortotropik tabakalarda düzlem gerilme durumu, Klasik Laminasyon Teorisi (KLT)'nin yönetici diferansiyel denklemleri verilmiştir. İkinci kısımda yaklaşık çözüm yöntemlerinden Ağırlıklı Artıklar (Kalanlar)

Yöntemleri tanıtılmış, çalışmada kullanılan Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi'nin, simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemlerine uygulanması gösterilmiştir.

Bölüm 3'teki Statik ve Dinamik Analiz Sonuçları'nda; ilk kısımda parametrik analizlerde incelenen plak geometrisi, kenar oranları, malzeme özellikleri, plak içindeki tabakaların dizilim sıralamaları verilmiştir. İkinci kısımda Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımımın kullanımındaki kabuller; seçilen eleman tipi ve oluşturulan ağ yapısındaki eleman büyüklüğü gösterilmiştir. Son kısımda, seçilen parametreler için simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemlerinin Galerkin Yöntemi, En Küçük Kareler Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla bulunan sonuçları verilmiştir.

Bölüm 4'teki, Sonuçlar ve Öneriler'de; çalışmadaki parametrik analizlerle bulunan statik ve dinamik analiz sonuçları değerlendirilmiş, öneriler sunulmuştur.

### 1.3 Bulgular

Bu çalışmada incelen simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemleri Klasik Laminasyon Teorisi'nin (KLT) yönetici diferansiyel denklemleri kullanılarak, Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nden Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle hesaplama yapan ANSYS paket programı ile karşılaştırılmıştır. Galerkin Yöntemi'nin sonuçları ANSYS ile daha uyumlu çıkmıştır. Bu çalışmada Galerkin Yöntemi'yle gerçekleştirilen parametrik analizlerde, literatürdeki araştırmacıların [34, 35, 36] Galerkin Yöntemi'yle hızlı sonuç alınmasına vurgu yapmalarına benzer biçimde parametrelerin sayısına bağlı olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımından çok daha hızlı çözüm elde edilmiştir.

Aynı malzemeden, aynı kalınlıkta üretilmiş simetrik katmanlı kompozit plakların tabaka dizilim açılarının değişmesiyle, maksimum çökme ve asal doğal frekans değerlerinin kenar oranlarıyla sınır koşullarına da bağlı olarak büyük oranda değiştiği gözlenmiştir.

Kompozit teknelerin yapımında çok sayıda parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Yapısal ön tasarımda, geminin kullanım amacına, hızına, ana boyutlarına ve uygulanacak yapı sistemlerine bağlı değişen sınır koşullarıyla yapının farklı bölgelerinde oluşacak farklı yükleme durumlarına uygun cevap verebilecek tabaka diziliminin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmadakine benzer parametrik analizlerle Galerkin Yöntemi'nin uygulanmasının, kompozit teknelerin yapısal ön tasarımında uygun verilerin elde edilmesiyle, üretimdeki zaman, malzeme, emek ve deney masraflarından tasarruf edilmesini sağlayacağı düşünülmüştür.

# BÖLÜM 2

# MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde anizotropik malzemelerin makromekaniği kısmında, gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri, ortotropik tabakalarda düzlem gerilme durumu ve Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre hesaplamalarda kullanılan simetrik katmanlı kompozit malzemelerin genel diferansiyel denklemlerinin elde edilişi gösterilmiştir. İkinci kısımda yaklaşık çözüm yöntemlerinden Ağırlıklı Artıklar (Kalanlar) Yöntemleri tanıtılmış, çalışmada kullanılan Galerkin ve En Küçük Kareler Yöntemi'nin, simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemlerine uygulanması gösterilmiştir.

## 2.1 Anizotropik Malzemelerin Makromekaniği

### 2.1.1 Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkisi

Anizotrop malzemelerin mekanik özellikleri yönlere bağlı olarak değişmektedir. Elastik özellikler, genelleştirilmiş Hooke Kanunu'nda gerilme ve şekil değiştirme tansörleri ilişkisi ile aşağıdaki biçimde tanımlanır [39]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}$$

$$S_{ijkl} = (C_{ijkl})^{-1} \tag{2.1}$$

Burada

$\sigma_{ij}$ : Gerilme tansörü bileşenleri

$\varepsilon_{ij}$ : Şekil değiştirme tansörü bileşenleri

$C_{ijkl}$ : Elastik katılık (rijitlik) tansörü

$S_{ijkl}$ : Elastik esneklik tansörü

Dördüncü dereceden tansörlerin açık olarak yazılmasından 81 bağımsız sabit ortaya çıkar. Kütle kuvvetlerinin olmaması durumunda, gerilme ve şekil değiştirme tansörleri simetriktir ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ve $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$). Bu durumda sabit sayısı 36'ya düşmektedir. Elastik özellikler, katılık ve esneklik tansörlerinin ikinci dereceden olduğu kısaltılmış notasyonla, gerilme ve şekil değiştirme büyüklükleri cinsinden aşağıdaki biçimde tanımlanır:

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j$$

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j$$

$$S_{ij} = (C_{ij})^{-1} \quad (\text{i, j = 1... 6}) \tag{2.2}$$

Burada

$\sigma_i =$ Gerilme bileşeni

$\varepsilon_j =$ Şekil değiştirme bileşeni

$C_{ij} =$ Elastik katılık tansörü

$S_{ij} =$ Elastik esneklik tansörü.

Yukarıda tansörel biçimde verilen ifade (2.2), matris biçiminde kısaltılmış notasyonla aşağıdaki gibi yazılır:

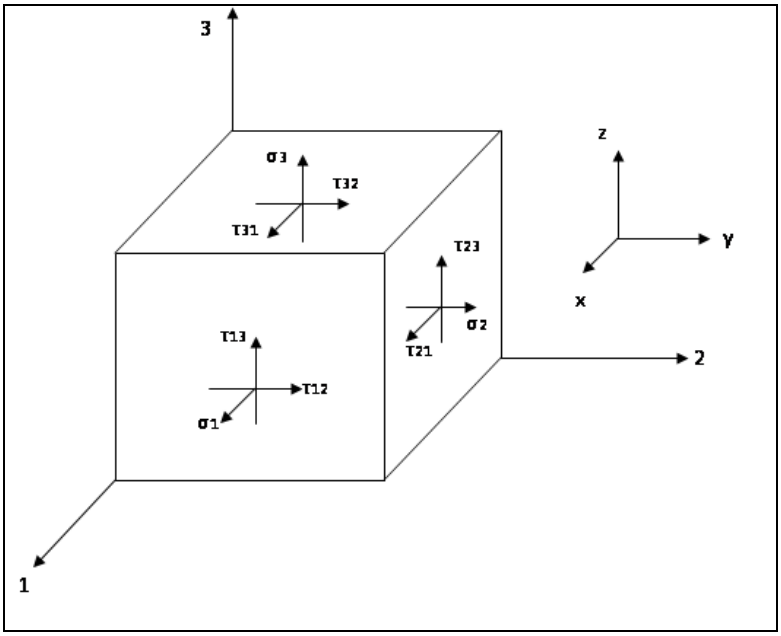
$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16}\\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26}\\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56}\\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66}\end{bmatrix} . \begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Gerilme şekil değiştirme notasyonları kısaltılmış biçimde Çizelge 2. 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. 1 Kısaltılmış biçimde gerilme-şekil değiştirme notasyonları

| Gerilme | | Şekil Değiştirme | |
|---|---|---|---|
| Tansör Notasyonu | Kısaltılmış Notasyon | Tansör Notasyonu | Kısaltılmış Notasyon |
| $\sigma_{11}(\sigma_1)$ | $\sigma_1$ | $\varepsilon_{11}$ | $\varepsilon_1$ |
| $\sigma_{22}(\sigma_2)$ | $\sigma_2$ | $\varepsilon_{22}$ | $\varepsilon_2$ |
| $\sigma_{33}(\sigma_3)$ | $\sigma_3$ | $\varepsilon_{33}$ | $\varepsilon_3$ |
| $\tau_{23}=\sigma_{23}=\sigma_{32}$ | $\sigma_4$ | $\gamma_{23}=\gamma_{32}=2\,\varepsilon_{23}$ | $\varepsilon_4$ |
| $\tau_{31}=\sigma_{31}=\sigma_{13}$ | $\sigma_5$ | $\gamma_{13}=\gamma_{31}=2\,\varepsilon_{13}$ | $\varepsilon_5$ |
| $\tau_{12}=\sigma_{12}=\sigma_{21}$ | $\sigma_6$ | $\gamma_{12}=\gamma_{21}=2\,\varepsilon_{12}$ | $\varepsilon_6$ |

Sonsuz küçük kübik elemanın üzerinde oluşacak gerilmeler Şekil 2.1'de gösterilmiştir [39].




Şekil 2. 1 Sonsuz küçük kübik elemandaki gerilmeler

Burada $\sigma_1, \sigma_2$ ve $\sigma_3$ yüzeylere dik yöndeki normal gerilme bileşenlerini , $\tau_{23}$, $\tau_{31}$ ve $\tau_{12}$ kayma gerilme bileşenlerini ifade eder. Birim hacim için üç boyutlu gerilme şekil değişimi ifadeleri aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{ve} \quad \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \tag{2.4}$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ve $\varepsilon_3$ birim uzama şekil değişimi bileşenlerini $\gamma_{23}, \gamma_{31}$ ve $\gamma_{12}$ ise birim kayma şekil değişimi bileşenlerini ifade eder. Burada u, v, w sırasıyla 1, 2, 3 veya x, y, z yönlerindeki uzamaları göstermektedir.

Şekil değişimi enerjisi yardımıyla, elastik katılık matrisindeki bağımsız değişken sayısının 36'dan az olduğu gösterilebilir. Elastik malzemeler $\sigma_i$ gerilmesi altında $d\varepsilon_i$ elastik şekil değişimine uğradığında, birim hacim başına elastik enerji artışı,

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i \tag{2.5}$$

biçiminde gösterilir. Bu eşitlik gerilme şekil değiştirme (2.2) bağıntısına bağlı olarak

$$dW = C_{ij}\varepsilon_j d\varepsilon_i \tag{2.6}$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin de integrali alınırsa, birim hacimdeki iş,

$$W = \frac{1}{2}(C_{ij}\varepsilon_j\varepsilon_i) \tag{2.7}$$

olarak bulunur. Benzer biçimde $\sigma_j$ gerilmesi altında $d\varepsilon_j$ elastik şekil değişimi için hesaplandığında,

$$W = \frac{1}{2}(C_{ji}\varepsilon_i\varepsilon_j) \tag{2.8}$$

bulunur. Bu iki denklemin $\varepsilon_i$ ve $\varepsilon_j$'ye göre ayrı ayrı iki kez türevlerini aldığımızda

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_i} = C_{ij}\varepsilon_j \ , \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} = C_{ij} , \quad \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_j} = C_{ji}\varepsilon_i , \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ji} \tag{2.9}$$

eşitlikleri bulunur. Buradan türev alma sırasının türevin değerini değiştirmediği dolayısıyla

$$C_{ij} = C_{ji} \ , \ S_{ij} = S_{ji} \tag{2.10}$$

olduğu görülür. Bu durumda elastik esneklik ve elastik katılık matrisleri simetriktir ve elastik katılık matrisindeki bağımsız sabit sayısı 21'e düşmüş olur. Elastik katılık matrisi aşağıdaki biçimde yazılır:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

Bu durumda malzeme özellikleri bakımından hiçbir simetri düzlemi olmayan **anizotropik** malzeme için, en genel haldeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tansör notasyonu ile matris biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56}\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Anizotropik (triklinik) malzemelerin bazı özel durumları; malzemede simetri düzlemi bulunması durumunda, düzlemin niteliğine göre monoklinik, ortotropik, enine izotropik ve izotropik malzeme olarak sınıflandırılabilir.

Malzeme bir simetri düzlemine (z=0) sahipse **monoklinik** malzemedir. Bu malzemelerde elastik katılık matrisi 13 adet bağımsız sabit içerir. **Monokilinik** malzeme için, en genel haldeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tansör notasyonu ile matris biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ 0 & 0 & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ 0 & 0 & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56}\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Malzeme üç simetri düzlemine (ortogonal düzlemler) sahipse **ortotropik** malzemedir. Bu malzemelerde elastik katılık matrisi 9 adet bağımsız sabit içerir. **Ortotropik** malzeme için, en genel haldeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tansör notasyonu ile matris biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{2.14}$$

Malzeme üç simetri düzlemine ek olarak mekanik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu bir düzleme sahipse **enine izotropik** malzemedir. Bu malzemelerde elastik

katılık matrisi 5 adet bağımsız sabit içerir. **Enine izotropik** malzemelerin özel izotropi düzlemi 1-2 düzlemi olduğunda en genel haldeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tansör notasyonu ile matris biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Malzeme sonsuz simetri düzlemine sahipse, **izotropik** malzemedir. Bu malzemelerde elastik katılık matrisi 2 adet bağımsız sabit içerir. **İzotropik** malzeme için, en genel haldeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tansör notasyonu ile matris biçimde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \tau_{23}\\ \tau_{13}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{2.16}$$

### 2.1.2 Ortotropik Malzemelerin Mühendislik Sabitleri İle İfadesi

Ortotropik malzemelerin esneklik matrisini çeşitli deneylerle belirlemek, katılık matrisini belirlemeye göre daha kolaydır. Esneklik matrisi, (2.14) ifadesi (2.1) ifadesinde yerine yazılarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$S_{ij}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Esneklik matrisi (2.17), tek eksenli çekme ve kayma deneyleri yardımıyla belirlenen malzemelerin mühendislik sabitleri ($E$, $G$ ve $\nu$) cinsinden aşağıdaki gibi gösterilir.

$$[S]=\begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Esneklik matrisinin elemanları aşağıdaki biçimde gösterilir.

$$S_{11}=1/E_1,\ \ S_{12}=-\nu_{12}/E_1,\ \ S_{13}=-\nu_{13}/E_3,\ \ S_{22}=1/E_2,$$

$$S_{23}=-\nu_{23}/E_3,\ \ S_{33}=1/E_3,\ \ S_{44}=1/G_{23},\ \ S_{55}=1/G_{31},\ \ S_{66}=1/G_{12} \quad (2.19)$$

Burada $E_1, E_2$ ve $E_3$ elastisite modülleri $\nu_{12}, \nu_{13}$ ve $\nu_{23}$ Poisson oranları ($\nu_{ij}=-\varepsilon_j/\varepsilon_i$), ve $G_{23}$, $G_{31}$ ve $G_{12}$ kayma katılık modülleridir.

Buradan katılık matrisinin elemanları (2.2) ifadesi yardımıyla bulunarak mühendislik sabitleri cinsinden aşağıdaki gibi gösterilir.

$$C_{11}=\frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta}, C_{12}=\frac{\nu_{12}+\nu_{32}\nu_{13}}{E_1E_3\Delta}=\frac{\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta},\ C_{13}=\frac{\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23}}{E_1E_2\Delta}=\frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta},$$

$$C_{22}=\frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta}, C_{23}=\frac{\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13}}{E_1E_2\Delta}=\frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta},\ C_{33}=\frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta},$$

$$C_{44}=G_{23},\ \ C_{55}=G_{31},\ \ C_{66}=G_{12},\ \Delta=\frac{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{12}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1E_2E_3} \quad (2.20)$$

### 2.1.3 Ortotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu

Makro düzeyde tüm elyafları birbirine paralel olduğu varsayılan tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalar ortotropik malzeme sınıfına girer. Ortotropik tek yönlü bir tabaka Şekil 2. 2'de gösterilmiştir. Elyaf takviyeli tabakalar genellikle ince olduklarından düzleme dik yönde gerilmelerin ($\sigma_3=\tau_{23}=\tau_{13}=0$) olmadığı kabul edilir. Bu durumda $\varepsilon_i=S_{ij}\sigma_j$ formunda (2.2)'de verilen ifade kullanılarak şekil değiştirme ve gerilme ilişkisi azalan sabitlerle birlikte aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad . \tag{2.21}$$

Yukarıda (2.21)'de gösterilen şekil değiştirme ve gerilme ilişkisi, gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad . \tag{2.22}$$

Burada $Q_{ij}$ terimleri indirgenmiş katılık matrisi elemanlarıdır. İndirgenmiş katılık matrisi ile esneklik matrisi arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilir.

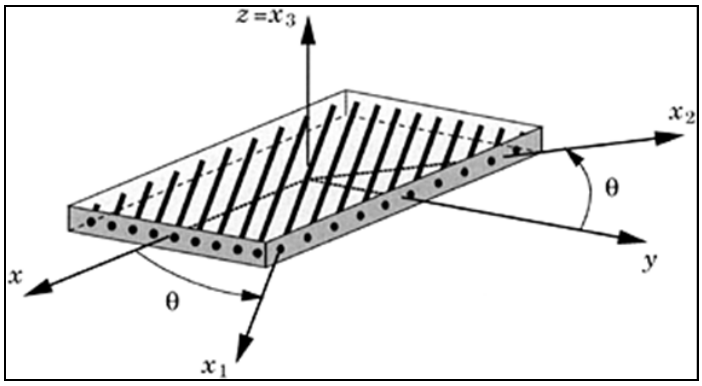
$$[Q] = [S]^{-1} \tag{2.23}$$

Bu durumda $[Q]$ indirgenmiş katılık matrisi elemanları aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Q_{11} = E_1/(1-\nu_{12}\nu_{21}),\ Q_{12} = \nu_{12}E_2/(1-\nu_{12}\nu_{21}),\ Q_{22} = E_2/(1-\nu_{12}\nu_{21}),\ Q_{66} = G_{12} \tag{2.24}$$

### 2.1.4 Ortotropik Tabakalarda Asal Eksenler Dışındaki Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkisi

Ortotropik tek yönlü bir tabakadaki elyafların doğrultusu genel eksen sistemi ile farklı yönde olabilir. Elyaflara paralel yöndeki 1 ve dik yöndeki 2 doğrultuları lokal eksen sistemini (1-2) oluşturur. Elyaflarla genel eksen sistemi (x-y) arasında $\theta$ açısı kadar fark bulunması durumunda tabakadaki birim şekil değişimleri, lokal eksen sistemi (1-2) ile genel eksen sistemi (x-y) arasında arasında bir (T) dönüşüm matrisi kullanılarak genel eksen sisteminde ifade edilmelidir. (T) dönüşüm matrisi aşağıda (2.25) ifadesinde gösterilmiştir [39].




Şekil 2. 2 Ortotropik tek yönlü bir tabaka [39]

$$[T]=\begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & 2\sin(\theta)\cos(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -2\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -\sin(\theta)\cos(\theta) & \sin(\theta)\cos(\theta) & \cos^2(\theta)-\sin^2(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

Genel ve lokal eksen sitemlerindeki gerilme ifadeleri arasındaki ilişki aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}.\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad . \tag{2.26}$$

Lokal eksendeki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi (2.22) kullanılarak, gerilme bileşenleri genel eksen sisteminde aşağıdaki biçimde gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}.[Q].\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

Benzer olarak şekil değiştirme ifadelerinin lokal ve genel eksen sistemleri arasındaki ilişkisi aşağıdaki biçimde gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T]\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

Birim şekil değişimlerindeki (1/2) çarpanlarını yok edip ifadeleri daha basit hale getirmek için Reuter( (R) ) matrisi kullanılır.

$$[R]=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 2\end{bmatrix} \tag{2.29}$$

Bu durumda genel eksenle lokal eksen arasındaki gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix}=[T]^{-1}.[Q].[R].[T].[R]^{-1}\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{bmatrix} \tag{2.30}$$

Yukarıdaki (2.30) ifadesinden faydalanarak

$$\left[\overline{Q}\right]=[T]^{-1}.[Q].[R].[T].[R]^{-1} \tag{2.31}$$

yazılır. Burada $\left[\overline{Q}\right]$ dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisidir. Gerilme şekil değiştirme ilişkisi genel eksen sisteminde matris formunda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16}\\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26}\\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{bmatrix} \tag{2.32}$$

$\left[\overline{Q}\right]$ dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisinin elemanları aşağıda gösterilmiştir.

$$\overline{Q}_{11}=Q_{11}\cos^4(\theta)+2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{22}\sin^4(\theta)$$

$$\overline{Q}_{12}=(Q_{11}+Q_{22}-4Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{12}(\sin^4(\theta)+\cos^4(\theta))$$

$$\overline{Q}_{22}=Q_{11}\sin^4(\theta)+2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{22}\cos^4(\theta)$$

$$\overline{Q}_{16}=(Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta)+(Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta)$$

$$\overline{Q}_{26}=(Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta)+(Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta)$$

$$\overline{Q}_{66}=(Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}-2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{66}(\sin^4(\theta)+\cos^4(\theta)) \tag{2.33}$$

### 2.1.5 Klasik Laminasyon Teorisi (KLT)

Ortotropik yapıdaki n adet tabakanın farklı doğrultularda birleştirilmesiyle oluşturulan bileşik tabakalı kompozit plaklar, Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre incelenmektedir. Klasik Laminasyon Teorisi, Kircchoff-Love kabuk teorisinin hipotezine göre çeşitli kabullere dayanır [39]:

- Deformasyondan önce orta yüzeye dik olan düz hatlar (örneğin; enine normaller) deformasyondan sonra da düz kalır. Enine yer değiştirmeler kalınlık koordinat sisteminden bağımsızdır.
- Tabakalar arasındaki bağlar mükemmeldir, yapıştırma tabakası çok incedir ve tabaka kayma etkisiyle şekil değiştirmez. Levha tek bir tabaka gibi bütün olarak davranır.
- Enine normal uzama sıfırdır.

$$\varepsilon_z = 0 \tag{2.34}$$

- Levhanın orta düzlemine dik düzlemlerde (enine normaller) kayma yoktur. Deformasyondan önce orta düzleme dik düzlemler deformasyondan sonra da orta düzleme dik kalacak biçimde döner.

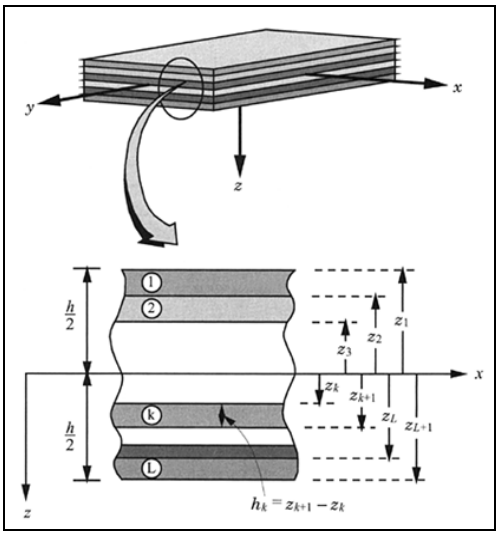
$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \tag{2.35}$$

#### 2.1.5.1 Yer değiştirme ve Şekil Değiştirme İlişkisi

N adet tabakadan oluşan h kalınlığında bileşik tabakalı kompozit plak geometrisi Şekil 2. 3'te gösterilmiştir. Orta düzlem OXY referans düzlemi olarak gösterilmiştir OZ artan tabaka numaraları yönündedir. Her tabaka z koordinatı ile gösterilir. Tabakalar alt yüzden üst yüze doğru numaralanır. Bileşik tabakalı kompozit plaklar incelenirken, belirli kısıtlar dikkate alınır [39].

- Malzemenin heterojen yapısı nedeniyle eşdeğer homojen malzemenin etkin elastisite modulü dikkate alınır.
- Levha kalınlığı diğer boyutları yanında çok küçüktür.

- Tabakalar arasında kayma gerilmeleri oluşmaz. Tabakanın alt ve üst yüzeylerindeki kayma gerilmeleri sıfırdır.
- Her bir tabaka Hooke kanuna uyar, doğrusal elastik yapıdadır, sabit kalınlıktadır ve 3 simetri eksenine sahiptir.
- Şekil değişimleri ve yer değişimleri levha kalınlığı yanında çok küçüktür.



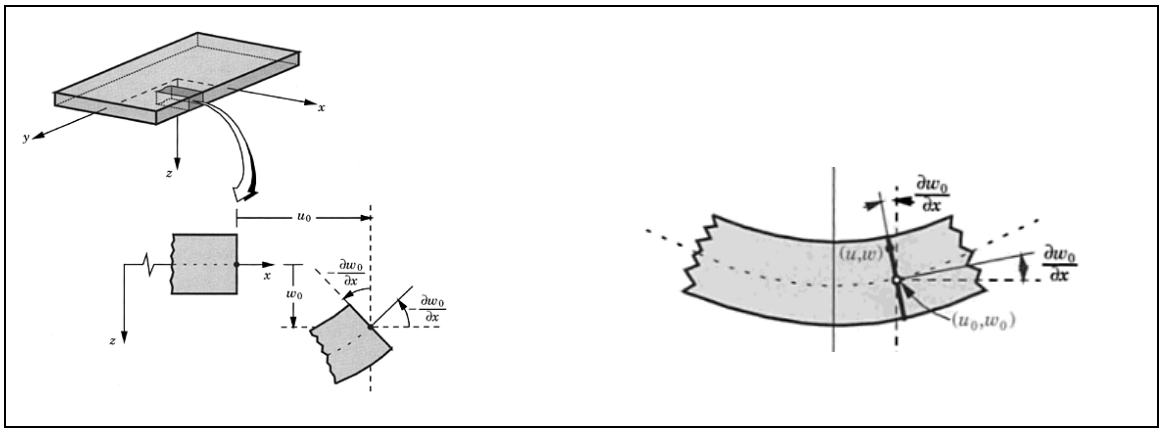

Şekil 2. 3 Bileşik tabakalı kompozit plak [39]

Kircchoff hipotezine göre levha düzlemi üzerindeki yer değiştirmeler (u,v) z'nin lineer bir fonksiyonudur. Deformasyondan önce (x,y,z) koordinatlarında olan bir nokta, deformasyondan sonra (x-u,y+v,z+w) noktasına hareket eder. Bileşik tabakanın x-z düzlemindeki yer değişimleri Şekil 2. 4'te gösterilmiştir. Referans düzlemi z=0 orta düzlem olarak adlandırılır. Kirrchoff hipotezine göre küçük yer değişimleri kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi gösterilir [39].

$$u(x,y,z,t) = u_{\circ}(x,y,t) - z\frac{\partial w_0}{\partial x}$$

$$v(x,y,z,t) = v_{\circ}(x,y,t) - z\frac{\partial w_0}{\partial y}$$

$$w(x,y,z,t) = w_{\circ}(x,y,t) \qquad (2.36)$$




Şekil 2. 4 Bileşik tabakanın x-z düzlemindeki yer değişimleri [39]

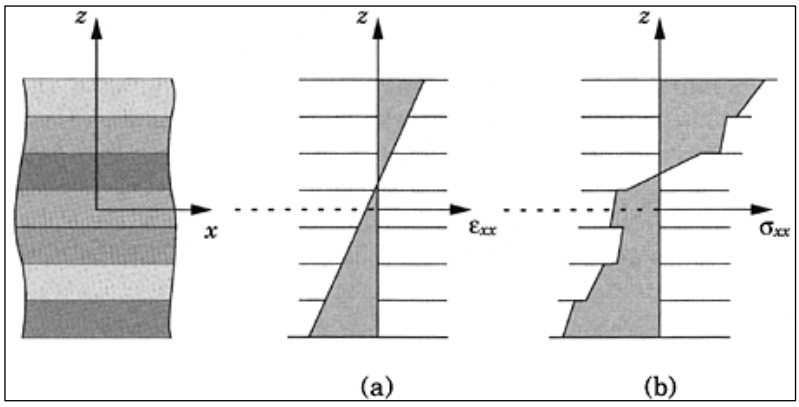
Burada von-Kármán'a göre şekil değişimleri aşağıdaki gibi gösterilir (enine uzamalar Klasik Laminasyon Teori'sinde (KLT) sıfırdır $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zz} = 0$) [39].

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \tag{2.37}$$

Burada $\varepsilon_{xx}^{(0)}, \varepsilon_{yy}^{(0)}$ ve $\gamma_{xy}^{(0)}$ membran şekil değişimlerini , $\varepsilon_{xx}^{(1)}, \varepsilon_{yy}^{(1)}$ ve $\gamma_{xy}^{(1)}$ ise eğilme şekil değişimlerini ifade etmektedir ve aşağıda gösterildiği biçimde yazılır.

$$\left\{\varepsilon^0\right\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial y} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2 \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} + \dfrac{\partial w_0}{\partial x}\dfrac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix}, \quad \left\{\varepsilon^1\right\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.38}$$

Bileşik tabakalarda plak kalınlığı yönündeki gerilme ve şekil değişimi Şekil 2. 5'te verilmiştir.




Şekil 2. 5 Bileşik tabakalarda plak kalınlığı boyunca gerilme ve şekil değişimi [39]

### 2.1.5.2 Denge Denklemlerinin Belirlenmesi

Klasik Laminasyon Teoris'inin (KLT) yönetici denklemleri virtüel yer değiştirme prensiplerinden elde edilir. Bu kısımda, malzemenin sıcaklık değişiminden ve elektrik alan etkisinden bağımsız olduğu kabul edilerek ( $\delta T = 0$ , $\delta \varepsilon = 0$ ) , Hamilton prensibine göre denge denklemlerinin çıkarılışı gösterilmiştir [39].

Hamilton'un dinamik sistemler için genelleştirdiği virtüel iş prensibi en genel halde aşağıda gösterilmiştir [39].

$$\int_0^T (\delta U + \delta V - \delta K)dt = 0 \tag{2.39}$$

Burada $\delta U$ virtüel şekil değiştirme enerjisini, $\delta V$ dış kuvvetlerin yaptığı virtüel işi ve $\delta K$ virtüel kinetik enerjiyi göstermektedir. Bunlar sırasıyla açık halde aşağıdaki gibi gösterilir.

Virtüel şekil değiştirme enerjisi ( $\delta U$ ) açık halde aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\delta U = \int_{\Omega_0} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{xx}\delta\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\delta\varepsilon_{yy} + 2\sigma_{xy}\delta\varepsilon_{xy})dzdxdy$$

$$= \int_{\Omega_0} \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\sigma_{xx}(\delta\varepsilon_{xx}^{(0)} + z\delta\varepsilon_{xx}^{(1)}) + \sigma_{yy}(\delta\varepsilon_{yy}^{(0)} + z\delta\varepsilon_{yy}^{(1)}) + \sigma_{xy}(\delta\gamma_{xy}^{(0)} + z\delta\gamma_{xy}^{(1)})\right]dz \right\} dxdy \tag{2.40}$$

Burada Ω plağın orta düzlemini ifade etmektedir.

Dış kuvvetlerin yaptığı virtüel iş ( $\delta V$ ) açık halde aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\delta V = -\int_{\Omega_0}\left[ q_b(x,y)\delta w(x,y,\frac{h}{2}) + q_t(x,y)\delta w(x,y,-\frac{h}{2}) \right] dxdy$$

$$-\int_{\Gamma_0}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\hat{\sigma}_{nn}\delta u_n + \hat{\sigma}_{ns}\delta u_s + \hat{\sigma}_{nz}\delta w\right] dzds$$

$$= -\int_{\Omega_0} \left\{ \left[ q_b(x,y) + q_t(x,y) \right] \delta w_0(x,y) \right\} dxdy$$

$$-\int_{\Gamma_0}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[ \hat{\sigma}_{nn}(\delta u_{0n} - z\frac{\partial \delta w_0}{\partial n}) + \hat{\sigma}_{ns}(\delta u_{0s} - z\frac{\partial \delta w_0}{\partial s}) + \hat{\sigma}_{nz}\delta w_0 \right] dzds \qquad (2.41)$$

Burada $q_b$ tabakanın alt yüzeyindeki yükü (z=h/2), $q_t$ tabakanın üst yüzeyindeki yükü (z=-h/2), $\hat{\sigma}_{nn}$ , $\hat{\sigma}_{ns}$ ve $\hat{\sigma}_{nz}$ sınır $\Gamma$'nin $\Gamma_0$ bölümü üzerinde belirlenmiş gerilme bileşenlerini $\delta u_n$ ve $\delta u_s$ normal ve tanjant doğrultularındaki virtüel yer değiştirmelerini ( $\Gamma$ sınırı üzerindeki) göstermektedir.

Virtüel kinetik enerji ( $\delta K$ ) açık halde aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\delta K = \int_{\Omega_0}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho_0 \left[ \left( \dot{u}_0 - z\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial x} \right)\left( \delta\dot{u}_0 - z\frac{\partial \delta\dot{w}_0}{\partial x} \right) \right.$$

$$\left. + \left( \dot{v}_0 - z\frac{\partial \dot{w}_0}{\partial y} \right)\left( \delta\dot{v}_0 - z\frac{\partial \delta\dot{w}_0}{\partial y} \right) + \dot{w}_0\delta\dot{w}_0 \right] dzdxdy \qquad (2.42)$$

Burada $\rho_0$ plak malzemesinin yoğunluğunu, üst indis nokta ise zamana bağlı değişimi ifade etmektedir (Örneğin; $\dot{u}_0 = \frac{\partial u_0}{\partial t}$ ).

Yukarıda (2.40), (2.41) ve (2.42)'de verilen ifadeler virtüel iş denkleminde (2.39) yerine konulup kalınlık boyunca integre edilirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$0=\int_0^T\left\{\int_{\Omega_0}\left[N_{xx}\delta\varepsilon_{xx}^{(0)}+M_{xx}\delta\varepsilon_{xx}^{(1)}+N_{yy}\delta\varepsilon_{yy}^{(0)}+M_{yy}\delta\varepsilon_{yy}^{(1)}+N_{xy}\delta\gamma_{xy}^{(0)}\right.\right.$$

$$+M_{xy}\delta\gamma_{xy}^{(1)}-q\delta w_0-I_0\left(\dot{u}_0\delta\dot{u}_0+\dot{v}_0\delta\dot{v}_0+\dot{w}_0\delta\dot{w}_0\right)$$

$$+I_1\left(\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial x}\dot{u}_0+\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial x}\delta\dot{u}_0+\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial y}\dot{v}_0+\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial y}\delta\dot{v}_0\right)$$

$$\left.-I_2\left(\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial x}\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial x}+\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial y}\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial y}\right)\right]dxdy$$

$$\left.-I_2\left(\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial x}\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial x}+\frac{\partial\dot{w}_0}{\partial y}\frac{\partial\delta\dot{w}_0}{\partial y}\right)\right]dxdy$$

$$\left.-\int_{\Gamma_0}\left(\hat{N}_{nn}\delta u_{0n}+\hat{N}_{ns}\delta u_{0s}-\hat{M}_{nn}\frac{\partial\delta w_0}{\partial n}-\hat{M}_{ns}\frac{\partial\delta w_0}{\partial s}+\hat{Q}_n\delta w_0\right)ds\right\}dt \tag{2.43}$$

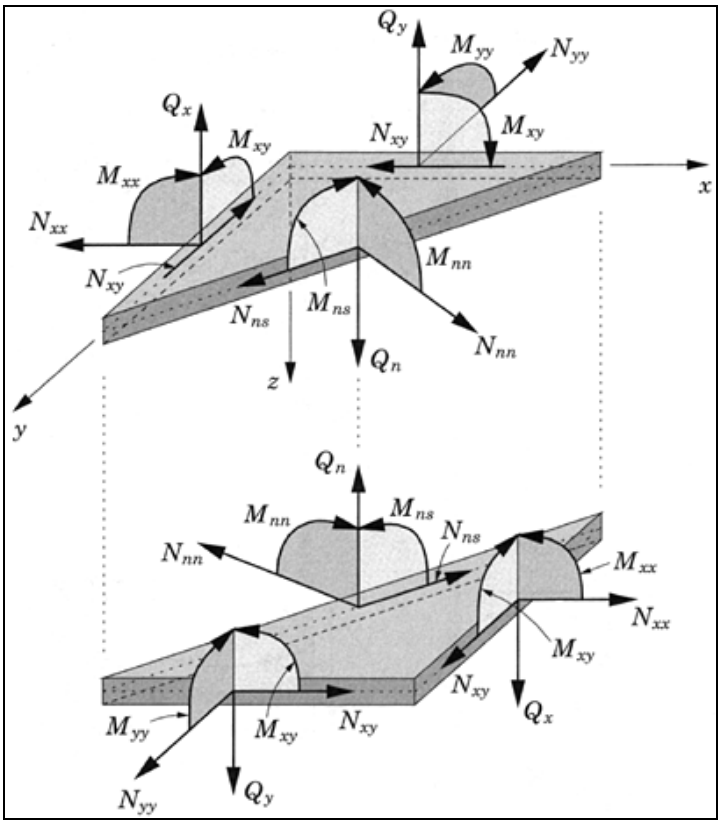
Yukarıda verilen (2.43) ifadesindeki $N_{xx}, N_{yy}$ ve $N_{xy}$ düzlemsel kuvvetler, $M_{xx}, M_{yy}$ ve $M_{xy}$ momentler, $Q_n$ düşey kuvveti ve $I_0, I_1$ ve $I_0$ kütlesel atalet momentleri aşağıdaki (2.44), (2.45) ve (2.46) ifadelerinde gösterilmiştir.

$$\begin{Bmatrix}N_{xx}\\N_{yy}\\N_{xy}\end{Bmatrix}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\begin{Bmatrix}\sigma_{xx}\\\sigma_{yy}\\\sigma_{xy}\end{Bmatrix}dz\,,\quad\begin{Bmatrix}M_{xx}\\M_{yy}\\M_{xy}\end{Bmatrix}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\begin{Bmatrix}\sigma_{xx}\\\sigma_{yy}\\\sigma_{xy}\end{Bmatrix}zdz \tag{2.44}$$

$$\begin{Bmatrix}\hat{N}_{nn}\\\hat{N}_{ns}\end{Bmatrix}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\begin{Bmatrix}\hat{\sigma}_{nn}\\\hat{\sigma}_{ns}\end{Bmatrix}dz\,,\quad\begin{Bmatrix}\hat{M}_{nn}\\\hat{M}_{ns}\end{Bmatrix}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\begin{Bmatrix}\hat{\sigma}_{nn}\\\hat{\sigma}_{ns}\end{Bmatrix}zdz \tag{2.45}$$

$$\begin{Bmatrix}I_0\\I_1\\I_2\end{Bmatrix}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\begin{Bmatrix}1\\z\\z^2\end{Bmatrix}\rho_0 dz\,,\quad\hat{Q}_n=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\hat{\sigma}_{nz}dz \tag{2.46}$$

Yukarıda (2.44)'te verilen düzlemsel kuvvetler, momentler ve düşey kuvvetler Şekil 2.6'da plak üzerinde gösterilmiştir.




Şekil 2. 6 Plak üzerindeki eksenel ve düşey kuvvetlerle momentlerin gösterimi [39]

Yukarıda verilen ifadenin (2.43) çözümüyle elde edilen Klasik Laminasyon Teorisi'nin (KLT) denge denklemleri (Euler-Lagrange eşitlikleri) aşağıdaki (2.47), (2.48), (2.49) ifadelerinde gösterilmiştir [39].

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial N_{xy}}{\partial y}=I_0\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}-I_1\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right) \tag{2.47}$$

$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial N_{yy}}{\partial y}=I_0\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}-I_1\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial y}\right) \tag{2.48}$$

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x^2}+2\frac{\partial M_{xy}}{\partial y\partial x}+\frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2}+\mathcal{N}(w_0)+q=\mathrm{I}_0\frac{\partial^2 \mathrm{w}_0}{\partial \mathrm{t}^2}+\mathrm{I}_1\left(\frac{\partial^3 \mathrm{u}_0}{\partial \mathrm{x}\partial \mathrm{t}^2}+\frac{\partial^3 \mathrm{v}_0}{\partial \mathrm{y}\partial \mathrm{t}^2}\right)-\mathrm{I}_2\left(\frac{\partial^4 \mathrm{w}_0}{\partial \mathrm{x}^2\partial \mathrm{t}^2}+\frac{\partial^4 \mathrm{w}_0}{\partial \mathrm{y}^2\partial \mathrm{t}^2}\right) \tag{2.49}$$

Burada $\mathcal{N}(w_0)$ ifadesi eksenel yükler arasındaki ilişki cinsinden aşağıda verilmiştir. Lineer analiz durumda sıfır alınır [39].

$$\mathcal{N}(w_0)=\frac{\partial}{\partial x}\left(N_{xx}\frac{\partial w_0}{\partial x}+N_{xy}\frac{\partial w_0}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(N_{xy}\frac{\partial w_0}{\partial x}+N_{yy}\frac{\partial w_0}{\partial y}\right) \tag{2.50}$$

### 2.1.5.3 Bileşik Tabakanın Katılık Matrisleri ve Yönetici Diferansiyel Denklemlerinin Belirlenmesi

(2.44) ifadesinde verilen kuvvet ve moment ifadeleriyle tek bir tabaka için gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi ifadesi (2.31) ve membran ve eğilme şekil değişimleri ilişkisi ifadesi (2.37) kullanılarak, bileşik tabakanın şekil değişimi ve yer değişimi ilişkisi belirlenir. Bu durumda bileşik tabakanın kuvvet şekil değiştirme ilişkisi (2.51)'de, moment şekil değiştirme ilişkisi (2.52)'de gösterilmiştir [39].

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} + z\varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} + z\varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} + z\gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} dz$$

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \tag{2.51}$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} + z\varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} + z\varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} + z\gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} z dz$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{yy}^{(0)} \\ \gamma_{xy}^{(0)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{yy}^{(1)} \\ \gamma_{xy}^{(1)} \end{Bmatrix} \tag{2.52}$$

Yukarıdaki (2.51) ve (2.52) ifadelerinde N toplam tabaka sayısıdır. $A_{ij}$, $B_{ij}$ ve $D_{ij}$ ise sırasıyla uzama, eğilme-uzama birleşme ve eğilme katılık matrisleri olarak tanımlanır. Dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisi cinsinden yazımları aşağıda gösterilmiştir.

$$\left(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}\right) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \overline{Q}_{ij} \left(1, z, z^2\right) dz = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \overline{Q}_{ij}^{(k)} \left(1, z, z^2\right) dz$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} \overline{Q}_{ij}^{(k)} \left(z_{k+1} - z_k\right), B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N} \overline{Q}_{ij}^{(k)} \left(z_{k+1}^2 - z_k^2\right), \; D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N} \overline{Q}_{ij}^{(k)} \left(z_{k+1}^3 - z_k^3\right)$$

$A_{ij}$ , $B_{ij}$ ve $D_{ij}$ matrisleri (x,y)'nin fonksiyonları olduğundan, yukarıdaki (2.51) ve (2.52) ifadeleri birarada daha sade halde aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\varepsilon^1\} \end{Bmatrix} \tag{2.54}$$

(2.38) ifadesi (2.51) ve (2.52)'de yerine konularak kuvvet-şekil değişimi ve moment-şekil değişimi ilişkileri, yer değişimlerine bağlı olarak aşağıdaki (2.55) ve (2.56) ifadelerindeki gibi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial y} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2 \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} + \dfrac{\partial w_0}{\partial x}\dfrac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.55}$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial y} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2 \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} + \dfrac{\partial w_0}{\partial x}\dfrac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.56}$$

Bundan sonra (2.55)'te verilen kuvvet ve (2.56)'da verilen moment değerlerinin kısmi türevleri alınıp, (2.47), (2.48) ve (2.49)'da verilen denge denklemlerinde yerine yazılmasıyla elde edilen Klasik Laminasyon Teorisi'nin (KLT) genel diferansiyel denklemleri (2.57), (2.58) ve (2.59) aşağıdaki gibi gösterilir [39].

$$\begin{aligned} &A_{11}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right) + A_{12}\left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}\right) + A_{16}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}\right) \\ &+ A_{16}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}\right) + A_{26}\left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right) + A_{66}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}\frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right) \\ &- B_{11}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} - B_{12}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} - 2B_{16}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} - B_{16}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2 \partial y} - B_{26}\frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3} - 2B_{66}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial y^2} - \left(\frac{\partial N_{xx}^T}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}^T}{\partial y}\right) \\ &= I_0\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} - I_1\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t^2} \end{aligned} \tag{2.57}$$

$$A_{16}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right)+A_{26}\left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right)+A_{66}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial w_0}{\partial y}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right)$$
$$-B_{16}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3}-B_{26}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}-2B_{66}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2\partial y}-B_{12}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2\partial y}-B_{22}\frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3}-2B_{26}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}-\left(\frac{\partial N_{xy}^T}{\partial x}+\frac{\partial N_{yy}^T}{\partial y}\right)$$
$$+A_{12}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\right)+A_{22}\left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2}+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right)+A_{26}\left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\frac{\partial w_0}{\partial y}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\right)$$
$$=I_0\frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2}-I_1\frac{\partial^2 w_0}{\partial y\partial t^2} \qquad (2.58)$$

$$B_{11}\left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3}\right)+B_{12}\left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x\partial y^2}\frac{\partial^3 v_0}{\partial x^2\partial y}+2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2\partial y}\right)$$
$$+B_{16}\left(3\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^3 v_0}{\partial x^3}+\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3}\frac{\partial w_0}{\partial y}+4\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}+3\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2\partial y}\right)+B_{22}\left(\frac{\partial^3 v_0}{\partial y^3}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3}\right)$$
$$+B_{26}\left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial y^3}+3\frac{\partial^3 v_0}{\partial x\partial y^2}+4\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^3 w_0}{\partial y^3}+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}+\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}\frac{\partial w_0}{\partial y}\right)$$
$$+2B_{66}\left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x\partial y^2}+\frac{\partial^3 v_0}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^2\partial y}\frac{\partial w_0}{\partial y}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}+\frac{\partial w_0}{\partial x}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x\partial y^2}\right)$$
$$-D_{11}\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4}-2D_{12}\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2\partial y^2}-4D_{16}\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^3\partial y}-D_{22}\frac{\partial^4 w_0}{\partial y^4}-4D_{26}\frac{\partial^4 w_0}{\partial x\partial y^3}-4D_{66}\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2\partial y^2}$$
$$-\left(\frac{\partial^2 M_{xx}^T}{\partial x^2}+2\frac{\partial^2 M_{xy}^T}{\partial y\partial x}+\frac{\partial^2 M_{yy}^T}{\partial y^2}\right)+N(w_0)+q=I_0\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}+I_1\left(\frac{\partial^3 u_0}{\partial x\partial t^2}+\frac{\partial^3 v_0}{\partial y\partial t^2}\right)-I_2\left(\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2\partial t^2}+\frac{\partial^4 w_0}{\partial y^2\partial t^2}\right) \qquad (2.59)$$

#### 2.1.5.4 Simetrik Katmanlı Kompozit Plaklar

Simetrik katmanlı kompozit plaklar orta simetri düzlemi etrafında geometri ve malzeme özellikleri bakımından simetriktir. Orta simetri düzleminin (referans düzlemi) her iki tarafındaki tabakalar, orta simetri düzlemine eşit uzaklıkta, aynı kalınlıkta, ayn dizilim açısında ve aynı malzeme özelliklerine sahiptir. Bu yapıda tabakaların dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisleri $(\overline{Q_{ij}})_k$ ve kalınlıkların simetrisinden ötürü tüm eğilme-uzama birleşme katılık matrisi elemanları sıfır olur ($B_{ij}=0$). Bu durum hesaplamalarda önemli bir kolaylık sağlar. Bu tip yapıların bir diğer önemli özelliği sertleşme işlemini izleyen soğuma sırasında ısıl gerilmelerden dolayı bir burkulma göstermezler. Bu nedenle özel koşullar simetrik olmayan bir durum

gerektirmedikçe, simetrik katmanlı plaklar kullanılır [46]. Simetrik tabakalı yapının kuvvet ve moment denklemleri aşağıda gösterilmiştir [39].

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial y} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial w_0}{\partial y}\right)^2 \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} + \dfrac{\partial w_0}{\partial x}\dfrac{\partial w_0}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.60}$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\dfrac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{2.61}$$

## 2.2 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Statik ve Dinamik Analizi

Simetrik katmanlı kompozit plakların statik ve dinamik analizinde Navier tipi gerçek analitik çözümler sadece basit mesnet sınır koşulları ve belirli tipteki kompozit plaklar için mümkün olmaktadır. Seçilen farklı sınır koşullarında ve farklı açılarda sıralanmış tabakalardan oluşan kompozit plaklar için hesaplama yapmak için Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri (Moment, Galerkin, En Küçük Kareler ve Kolokasyon yöntemleri), Varyasyonel Yöntemler (Rayleigh-Ritz yöntemi), Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi vb. yaklaşık çözüm yöntemlerinin kullanımı zorunlu olmaktadır [39].

Bu kısımda önce Ağırlıklı Artıklar (Kalanlar) yöntemleri tanıtılmıştır. Ardından, bu çalışmadaki parametrik analizlerde kullanılan Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi'nin simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemlerine uygulanması gösterilmiştir.

### 2.2.1 Ağırlıklı Artıklar (Kalanlar) Yöntemleri

Diferansiyel denklem formunda verilmiş bir matematiksel modelde, yaklaşık çözümü elde edebilmek için seçilen yaklaşım fonksiyonunun diferansiyel denklemde yerine konulmasıyla sıfırdan farklı bir değer elde edilecektir. Bu değer kalan ya da artık değer ($\varepsilon_R$) olarak tanımlanır.

Hata fonksiyonu olarak da tanımlanabilecek bu artık değerin belli ağırlık fonksiyonlarıyla ($\varphi$) çarpımının bölge üzerinde en aza indirilmesi için yapılan işlemlere ağırlıklı artıklar (kalanlar) yöntemi denir [39].

$$\int_{\Omega} \varepsilon_R \, \varphi \, d\Omega = 0 \tag{2.62}$$

Problemin gerçek çözümü ($u$), ana denklemi her noktada $(x, y, z\ , t)$ sağlar. Ana denklemi veya sınır koşullarını sağlayan $\phi_i$ deneme fonksiyonları (yaklaşım veya koordinat fonksiyonları) ile belirlenecek sabit katsayıların ($c_i$) çarpımıyla elde edilen problemin yaklaşık çözümü ($u_{(n)}$) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u_{(n)} = \sum_{i=1}^{N} c_i \, \phi_i \ ; \ u_{(n)} \to u \quad n \to \infty \text{ (limit hali)} \tag{2.63}$$

$$\varepsilon_R(x, y, z, t) \neq 0 \tag{2.64}$$

#### 2.2.1.1 Moment Yöntemi

Moment yönteminde, hata fonksiyonu ($\varepsilon_R$) ve momentlerinin bölge üzerinde toplamı en aza indirilmeye çalışılır.

$$\int_{\Omega} \varepsilon_R \, x^n \, d\Omega = 0, \quad n = 0,1,2,... \tag{2.65}$$

#### 2.2.1.2 Kolokasyon Yöntemi

Diğer ağırlıklı artıklar yöntemlerinden farklı olarak Kolokasyan Yöntemi'nde, çözüm bölgesinde seçilen n adet $x_i \equiv (x_i, y_i)$ noktasında hata fonksiyonunun ($\varepsilon_R$) sıfırlanması yöntemidir. Nokta sayısı arttıkça sonucun hassasiyeti artar. Seçilen noktaların yeri iyi bir çözüm elde etmek için önemlidir.

$$\varepsilon_R(x_i, y_i, z\ , t) = 0, \qquad i = 1,2,..,n \tag{2.66}$$

#### 2.2.1.3 Galerkin Yöntemi

Galerkin yönteminde hata fonksiyonunu ($\varepsilon_R$) problemin temel diferansiyel denklemindeki önceden seçilen yaklaşım fonksiyonu terimleri $\phi_i$'ler ile çarpıp bölge

üzerinde integrali sıfıra eşitlenerek çözüm yapılır. Ağırlıklı artıklar yöntemleri içinde çok güçlü bir yöntem olarak bilinir.

$$\int_{\Omega} \varepsilon_R \, \phi_i \, d\Omega = 0, \quad i = 1,2,...,n \tag{2.67}$$

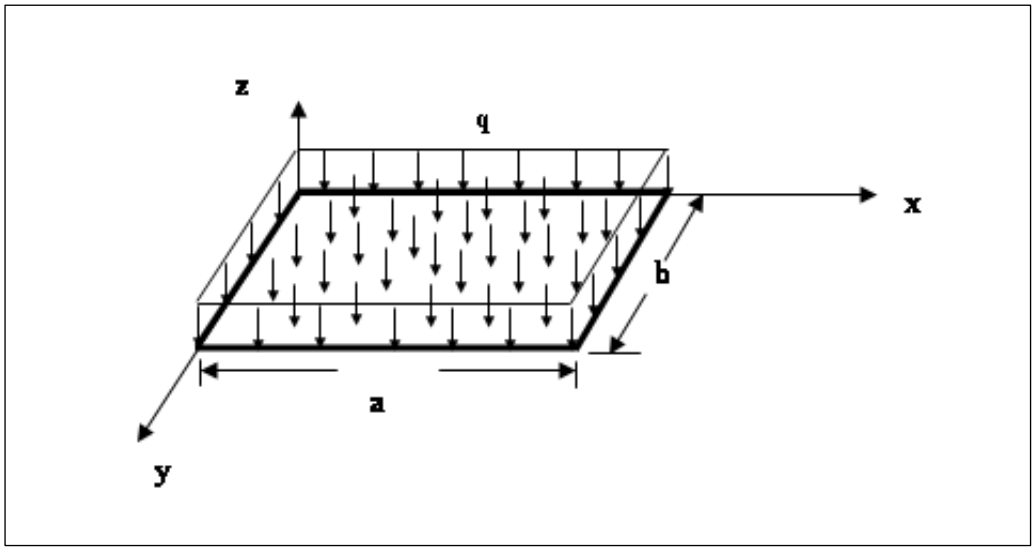
#### 2.2.1.4 En Küçük Kareler Yöntemi

Hata fonksiyonunun karesini bölge üzerinde integre ettikten sonra katsayılara göre minimize etmeye çalışan yönteme en küçük kareler yöntemi denir.

$$\frac{\partial}{\partial c_i} \int_{\Omega} (\varepsilon_R)^2 \, d\Omega = 0 \text{ veya } \int_{\Omega} \frac{\partial \varepsilon_R}{\partial c_i} \varepsilon_R \, d\Omega = 0 \tag{2.68}$$

### 2.2.2 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Eğilmesi

Mühendislikte matematiksel modelleme, doğadaki mühendislik problemlerinin matematiksel olarak ifade edilip; belirlenen denklem takımlarıyla (bölge denklemleri, başlangıç ve sınır koşulları) yardımıyla çözülmesidir. Bu çalışmadaki statik analiz kısmında düzgün yayılı yanal yük (q) etkisindeki simetrik katmanlı kompozit plakların eğilmesi incelenmiştir. Düzgün yayılı yanal yük (q) etkisindeki dikdörtgen geometrideki plak Şekil 2.7'de gösterilmiştir.




Şekil 2. 7 Düzgün yayılı yanal yük (q) etkisindeki plak

### 2.2.2.1 Galerkin Yöntemi'nin Uygulanması

Kompozit plakların Klasik Laminasyon Teorisi'ne (KLT) göre yönetici diferansiyel denklemi kartezyen formda (2.59) denkleminde verilmiştir. Simetrik katmanlı kompozit plakların eğilmesinde, eğilme-uzama birleşme matrisi $B_{ij}$ sıfır olduğundan (2.61) ifadesinden faydalanarak, en genel haldeki diferansiyel denklemde (2.59) lineer olmayan terimler, eğilme-uzama terimleri, eğilme-burulma terimleri, eksenel yönlerdeki yükler ve kütlesel atalet momenti terimleri sadeleştirildiğinde elde edilen diferansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x\partial y^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4})+q(x,y)=0 \quad (2.69)$$

Yukarıdaki ifadede w çökme fonksiyonudur. $D_{11}$, $D_{12}$, $D_{16}$, $D_{22}$, $D_{26}$ ve $D_{66}$ eğilme katılık matrisi elemanları (2.53) ifadesinde gösterildiği gibi hesaplanır.

$$D_{ij}=\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{N}\overline{Q}_{ij}^{(k)}\left(z_{k+1}^3-z_k^3\right) \quad (2.70)$$

Yukarıdaki ifadede yer alan $\overline{Q}_{ij}$ dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisinin elemanları, (2.32) ifadesinde gösterildiği gibi, her tabakanın genel eksenle yaptığı $\theta$ açısı ve $Q_{ij}$ indirgenmiş katılık matrisi elemanlarından faydalanarak her tabaka için ayrı ayrı hesaplanır.

$$\overline{Q}_{11}=Q_{11}\cos^4(\theta)+2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{22}\sin^4(\theta)$$

$$\overline{Q}_{12}=(Q_{11}+Q_{22}-4Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{12}(\sin^4(\theta)+\cos^4(\theta))$$

$$\overline{Q}_{22}=Q_{11}\sin^4(\theta)+2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{22}\cos^4(\theta)$$

$$\overline{Q}_{16}=(Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta)+(Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta)$$

$$\overline{Q}_{26}=(Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta)+(Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta)$$

$$\overline{Q}_{66}=(Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}-2Q_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta)+Q_{66}(\sin^4(\theta)+\cos^4(\theta)) \quad (2.71)$$

Yukarıdaki ifadedeki $Q_{ij}$ indirgenmiş katılık matrisi elemanlarının ortotropik malzemeler için mühendislik sabitleri cinsinden yazımı (2.24)'te gösterilmişti. Mühendislik sabitleri (E,G ve $\nu$) (2.24) ifadesinde, (2.24) ifadesi ve tabakaların açıları (2.71) ifadesinde, (2.71) ifadesi ve her bir tabakanın referans düzleminden uzaklığı da (2.70) ifadesinde yazılarak $D_{ij}$ eğilme katılık matrisi elemanları belirlenmiş olur.

Plak kenarlarındaki ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşulları aşağıdaki gibi ifade edilir.

Ankastre mesnet durumunda levha kenarları boyunca çökme ve eğim sıfırdır.

$$w = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad x = 0,\ a \text{ için}$$

$$w = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad y = 0,\ b \quad \text{için} \tag{2.72}$$

Basit mesnet durumunda levha kenarları boyunca çökme ve eğilme momenti sıfırdır.

$$w(x,0) = 0\ ,\ \ w(x,b) = 0\ ,\ \ w(0,y) = 0\ ,\ \ w(a,y) = 0$$

$$M_{xx}(0,y) = 0\ ,\ M_{xx}(a,y) = 0\ ,\ M_{yy}(x,0) = 0\ ,\ M_{yy}(x,b) = 0 \tag{2.73}$$

Diferansiyel denklemdeki yaklaşık çökme foksiyonu en genel halde seçilen $c_i$ katsayılarının yaklaşım fonksiyonu ile çarpımı olarak yazılabilir.

$$w_0 = c_i \phi_i\, \phi_j \tag{2.74}$$

Plak kenarlarındaki sınır koşullarını sağlayacak biçimde seçilen şekil fonksiyonları Çizelge 2. 2'de verilmiştir. Seçilen şekil fonksiyonlarında ilk üç terim alınmıştır.

Galerkin Yöntemi'yle $c_i$ sabitlerini belirlemek için diferansiyel formdaki bölge denklemi seçilen yaklaşım fonksiyonu ile çarpılıp bölge üzerinde integre edilip sıfıra eşitlenir.

$$\int_0^b \int_0^a \Bigg( \Bigg( D_{11} \frac{\partial^4 w_o}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w_o}{\partial x^3 \partial y} + 2\left(D_{12} + 2D_{66}\right) \frac{\partial^4 w_o}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w_o}{\partial x \partial y^3}$$

$$+ D_{22} \frac{\partial^4 w_o}{\partial y^4} - q(x,y) \Bigg) \phi_i\, \phi_j \Bigg) d_x d_y = 0 \tag{2.75}$$

Denklemin çözümünden elde edilen $c_i$ sabitleri ile yaklaşım fonksiyonu çarpılarak bölgenin aranan noktası için yaklaşık çökme değeri bulunur.

Çizelge 2. 2 Sınır koşulları için seçilen şekil fonksiyonları (i = 1,...,m ; j = 1,..,n)

| **Sınır Koşulları** | **Şekil Fonksiyonları** |
|---|---|
| Dört kenar ankastre mesnetli | $\phi_i \phi_j = x^{2i}(a-x)^{2i} y^{2j}(b-y)^{2j}$ (2.76) |
| Dört kenar basit mesnetli | $\phi_i \phi_j = \left(Sin(\frac{i\pi x}{a})\right)\left(Sin(\frac{j\pi y}{b})\right)$ (2.77) |

### 2.2.2.2 En Küçük Kareler Yöntemi'nin Uygulanması

Düzgün yayılı yanal yük ($q$) etkisindeki simetrik katmanlı kompozit plakların eğilmesinde elde edilen diferansiyel denklem (2.69)'da verilmiştir.

$$(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}) + q(x,y) = 0 \quad (2.78)$$

Burada w çökme fonksiyonunu ifade etmektedir. $D_{11}$, $D_{12}$, $D_{16}$, $D_{22}$, $D_{26}$ ve $D_{66}$ eğilme katılık matrisi elemanları Galerkin Yöntemi eğilme problemine uygulanırken bulunmuştur. Sınır koşulları için (2.72) ve (2.73) ifadelerinden yararlanılır.

Diferansiyel denklemdeki yaklaşık çökme foksiyonu en genel halde $c_i$ katsayılarının seçilen yaklaşım fonksiyonu ile çarpımı olarak yazılabilir.

$$w_0 = c_i \phi_i \phi_j \quad (2.79)$$

Plak kenarlarındaki sınır koşullarını sağlayacak şekilde seçilen şekil fonksiyonları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

$c_i$ sabitlerini belirlemek için önce diferansiyel formdaki bölge denkleminin karesi bölge üzerinde integre edilir.

Doğal frekans değerini ($\omega$) belirlemek için diferansiyel formdaki bölge denkleminin karesi bölge üzerinde integre edildikten sonra ifadenin sabitlere göre ($c_i$) türevleri sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial}{\partial c_i}\int_0^b\int_0^a\left(D_{11}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x\partial y^3}\right.$$

$$\left.+D_{22}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial y^4})+I_0 w_{mn}\right)^2 d_x d_y=0 \qquad (2.80)$$

Denklemin çözümünden elde edilen $c_i$ sabitleri ile yaklaşım fonksiyonu çarpılarak bölgenin aranan noktası için yaklaşık çökme değeri bulunur.

### 2.2.3 Simetrik Katmanlı Kompozit Plakların Serbest Titreşimi

#### 2.2.3.1 Galerkin Yöntemi'nin Uygulanması

Simetrik katmanlı kompozit plakların serbest titreşiminde (2.61) ifadesinden faydalanarak, KLPT'deki en genel haldeki (2.59) denklemindeki doğrusal olmayan terimler, eğilme-uzama terimleri, eğilme-burulma terimleri, yanal ve eksenel yönlerdeki yüklemeler sadeleştirildiğinde elde edilen diferansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x\partial y^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4})$$

$$+I_0\ddot{w}-I_2\left(\frac{\partial^2\ddot{w}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\ddot{w}}{\partial y^2}\right)=0 \qquad (2.81)$$

Burada w çökme fonksiyonunu ifade etmektedir. $D_{11}$, $D_{12}$, $D_{16}$, $D_{22}$, $D_{26}$ ve $D_{66}$ eğilme katılık matrisi elemanları bir önceki kısımda eğilme probleminin çözümünde gösterilmişti.

Burada $I_0$ ve $I_2$ kütlesel atalet momentleri (2.46) ifadesinden faydalanarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$I_0=\sum_{k=1}^{L}\rho_0^{(k)}(z_{k+1}-z_k),\quad I_2=\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{L}\rho_0^{(k)}\left(z_{k+1}^3-z_k^3\right) \qquad (2.82)$$

Burada $\rho_0$ plak malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir. $I_0$ değeri (2.82) ifadesine göre hesaplanır. $I_2$ değeri $I_0$'ın yanında ihmal edilecek kadar küçük olduğu için dikkate alınmaz [39]. Bu durumda diferansiyel denklem aşağıda verildiği gibidir.

$$(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x\partial y^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4})+I_0\ddot{w}=0 \quad (2.83)$$

Sınır koşulları için (2.72) ve (2.73) ifadelerinden yararlanılır.

Diferansiyel denklemdeki yaklaşık çökme foksiyonu en genel halde $c_i$ katsayılarının seçilen yaklaşım fonksiyonu ile çarpımı olarak yazılabilir.

$$w_0 = c_i\phi_i\,\phi_j \quad (2.84)$$

Sınır koşullarını sağlayan yaklaşım fonksiyonları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir. Seçilen şekil fonksiyonlarında ilk üç terim alınmıştır.

Serbest titreşim probleminde basit harmonik hareket kabul edilmektedir [39].

$$w_{mn}(t)=w_{mn}^0 e^{i\omega t} \quad (2.85)$$

Burada $\omega$ doğal frekans, $w_{mn}^0$ titreşim modunun genliği, m ve n ise mod şekilleri olarak tanımlanır.

Doğal frekans değerini ($\omega$) belirlemek için diferansiyel formdaki bölge denklemi seçilen yaklaşım fonksiyonu ile çarpılıp integrali sıfıra eşitlenir.

$$\int_0^b\int_0^a\Bigg(\Big(D_{11}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x\partial y^3}$$
$$+D_{22}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial y^4})+I_0 w_{mn}\Big)\phi_i\,\phi\Bigg)d_x d_y=0 \quad (2.86)$$

(2.86) ifadesinden elde edilen genelleştirilmiş özdeğer probleminde çözümün sıfırdan farklı olması için katsayılar matrisinin determinantı sıfıra eşitlenir. Bulunan en küçük pozitif kök asal doğal frekanstır $\omega_0$ ( $f_0$ ).

### 2.2.3.2 En Küçük Kareler Yöntemi'nin Uygulanması

Simetrik katmanlı kompozit plakların serbest titreşiminde elde edilen diferansiyel denklem (2.83)'te verilmiştir.

$$(D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial x\partial y^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4})+I_0\ddot{w}=0 \quad (2.83)$$

Burada w çökme fonksiyonunu, $I_0$ kütlesel atalet momentini, ifade etmektedir. $D_{11}$, $D_{12}$, $D_{16}$, $D_{22}$, $D_{26}$ ve $D_{66}$ eğilme katılık matrisi elemanlarının bulunuşu Galerkin Yöntemi'nin eğilme problemine uygulanmasında gösterilmiştir. (2.83) ifadesindeki $I_0$ kütlesel atalet momenti Galerkin yönteminin serbest titreşim problemine uygulanışı kısmında gösterildiği biçimde bulunur.

Sınır koşulları için (2.72) ve (2.73) ifadelerinden yararlanılır.

Diferansiyel denklemdeki yaklaşık çökme foksiyonu en genel halde seçilen $c_i$ katsayılarının yaklaşım fonksiyonu ile çarpımı olarak yazılabilir.

$$w_0 = c_i\phi_i\,\phi_j \quad (2.87)$$

Plak kenarlarındaki sınır koşullarını sağlayacak şekilde seçilen polinom ve trigonometrik formdaki şekil fonksiyonları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Serbest titreşim probleminde basit harmonik hareket kabul edilmektedir [39].

$$w_{mn}(t)=w_{mn}^0 e^{i\omega t} \quad (2.88)$$

Burada $\omega$ doğal frekans, $w_{mn}^0$ titreşim modunun genliği, m ve n ise mod şekilleri olarak tanımlanır.

Doğal frekans değerini ($\omega$) belirlemek için diferansiyel formdaki bölge denkleminin karesi bölge üzerinde integre edildikten sonra ifadenin sabitlere ($c_i$) göre türevleri sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial}{\partial c_i}\int_0^b\int_0^a\Bigg(D_{11}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^3\partial y}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x^2\partial y^2}+4D_{26}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial x\partial y^3}$$
$$+D_{22}\frac{\partial^4 w_{mn}}{\partial y^4})+I_0 w_{mn}\Bigg)^2 d_x d_y=0 \quad (2.89)$$

Elde edilen genelleştirilmiş özdeğer probleminde çözümün sıfırdan farklı olması için katsayılar matrisinin determinantı sıfıra eşitlenir. Bulunan en küçük pozitif kök asal doğal frekanstır $\omega_0$ ( $f_0$ ).

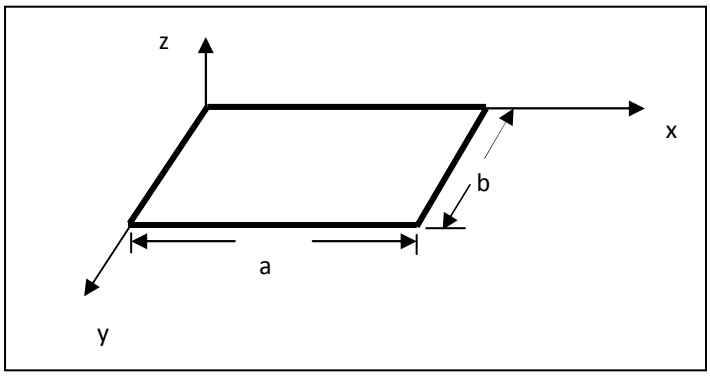
# BÖLÜM 3

## STATİK VE DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde ilk kısımda parametrik analizlerde incelenen parametreler; plak geometrisi, seçilen kenar oranları, malzeme özellikleri ve plak içindeki tabakaların dizilim sıralamaları gösterilmiştir. İkinci kısımda Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımının kullanımında yapılan kabuller; seçilen eleman tipi ve eleman büyüklüğü gösterilmiştir. Son kısımda ise önceki kısımlarda seçilen parametreler için, ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşullarındaki simetrik katmanlı kompozit plakların eğilme ve serbest titreşim problemlerinin, Galerkin Yöntemi, En Küçük Kareler Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla bulunan sonuçları gösterilmiştir.

### 3.1 Parametrik Analizlerde İncelenen Plak Geometrisi, Malzeme Özellikleri ve Tabakaların İstiflenme Sıralaması

Dikdörtgen plak geometrisi Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Plağın a kenarı x doğrultusunda, b kenarı ise y doğrultusunda yer almaktadır.




Şekil 3. 1 Plak Geometrisi

Kenarlarından basit mesnetlenmiş, düzgün yayılı yanal yük etkisindeki simetrik katmanlı kompozit plağın yaklaşık çökme değeri Galerkin Yöntemi'yle Bölüm 2'de gösterilmişti. Tek terim için $w_0$=c1.Sin(π.x/a).Sin(π.y/b) biçiminde ifade edilir. Bölüm 2'de gösterilen hesaplamalar sonucunda sabit değer c1=(16.$a^4$.$b^4$.q)/(($b^4$.D11+2.$a^2$.$b^2$.D12+$a^4$.D22+4.$a^2$.$b^2$.D66).$\pi^6$) olarak bulunur. Plak kare olduğunda (a=b) farklı kenar oranları (a/b ve b/a) için bulunan sabit "c1" değeri ve yaklaşık çökme değeri eşittir. a ve b değerlerinin birbirinden farklı olması durumunda c1 ifadesinde görüldüğü gibi $a^4$'lü terimin çarpanı D22, $b^4$'lü terimin çarpanı D11'dir, dolayısıyla maksimum çökme değerleri farklı çıkmaktadır. Bu durum eğilme problemindeki ankastre mesnet sınır koşulunda ve serbest titreşim probleminde de ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşullarında benzer olarak görülmektedir. Enine ve boyuna yapı sistemlerini temsil etmesi düşünülerek a/b ve b/a kenar oranları 11 farklı değer için incelenmiştir. Parametrik analizlerde incelenen kenar oranları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. ANSYS paket yazılımıyla yapılan karşılaştırmalarda plak kısa kenarı 0.2 m alınmıştır.

Çizelge 3. 1 Parametrik analizlerde incelenen kenar oranları

| Kenar Oranları | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a/b | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| b/a | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |

Gemilerin enine ve boyuna sistemde yapılmasına göre levha kenarında oluşabilecek farklı durumları araştırmak amacıyla ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşulları için incelenmiştir. ANSYS paket yazılımıyla yapılan karşılaştırmalarda eğilme probleminde düzgün yayılı yanal yük 10000 N/$m^2$ alınmıştır.

Günümüzde inşa edilen kompozit teknelerde genellikle, takviye çeşidi olarak cam, aramid veya karbon elyaf ile matris malzemesi olarak ise termoset reçine çeşitlerinden polyester, vinilester veya epoksi kullanılmaktadır. Bu çalışmada tabaka malzemesi olarak T300-934 kodlu karbon elyaf takviyeli epoksi seçilmiştir. Bu malzemenin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. ANSYS paket yazılımıyla yapılan karşılaştırmalarda her tabakanın kalınlığı t=0.0002 m. alınmıştır.

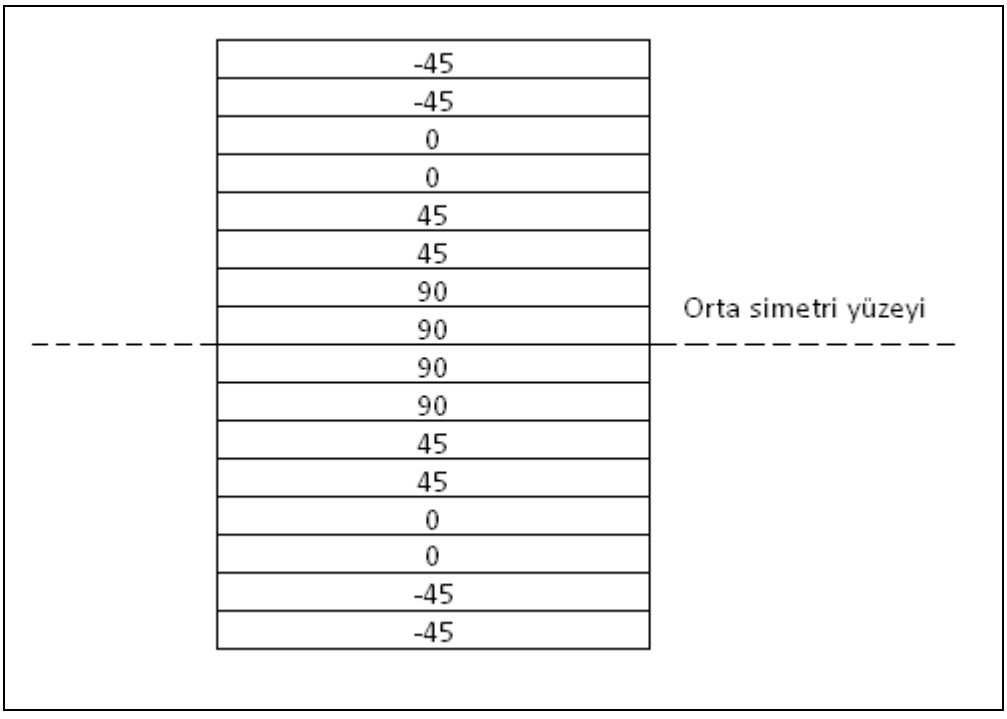
Çizelge 3. 2 Malzeme özellikleri [52, 53]

| | |
|---|---|
| Boyuna Young(Elastisite) modülü ($E_{11}$) | $148 . 10^9$ ($N/m^2$) |
| Enine Young(Elastisite) modülü ($E_{22}$) | $9{,}65 . 10^9$ ($N/m^2$) |
| Boyuna kayma modülü ($G_{12}$) | $4{,}55 . 10^9$ ($N/m^2$) |
| Boyuna Poisson oranı ($\nu_{12}$) | 0.30 |
| Yoğunluk ( $\rho_0$ ) | $1{,}5 . 10^3$ ($kg/m^3$) |
| Tabaka kalınlığı (t) | 0.000185 – 0.000213 (m) |

$0^o$, $45^o$, $90^o$ ve $-45^o$ açılarındaki tabakaların plak içindeki istiflenme kombinasyonlarından oluşan 24 tipte simetrik katmanlı kompozit plak Çizelge 3. 3'te gösterilmektedir. Burada LT ifadesi grafik ve tablolarda gösterim tekniği kolaylığı sağlaması için seçilmiş olan tabaka tiplerinin kısaltılmış gösterimidir. Tabakalardaki alt indis "n", o tabakadan n (n = 1, 2, 3…) adet bulunduğunu, alt indis "s" ise yapının orta simetri yüzeyine göre simetrik olduğunu ifade etmektedir. Örneğin; n değeri 2 seçildiğinde; LT1 kodlu simetrik katmanlı kompozit plak $[-45_2/0_2/45_2/90_2]_s$ veya [-45/-45/0/0/45/45/90/90/90/90/45/45/0/0/-45/-45] biçiminde gösterilebilir. LT1 kodlu plak içindeki tabakaların dizilimi Şekil 3. 2'de görülmektedir. ANSYS paket yazılımıyla yapılan karşılaştırmalarda n değeri 2 seçilmiştir. Bu durumda 16 tabakadan oluşan plakların kalınlığı h=0.0032 m., "plak kısa kenarı/plak kalınlığı" oranı 62.5 olmaktadır.

Çizelge 3. 3 Tabakaları farklı açılarda istiflenmiş simetrik katmanlı kompozit plak tipleri

| | | | |
|---|---|---|---|
| LT1 | $[-45_n/0_n/45_n/90_n]_s$ | LT13 | $[45_n/-45_n/0_n/90_n]_s$ |
| LT2 | $[-45_n/0_n/90_2/45_2]_s$ | LT14 | $[45_n/-45_n/90_n/0_n]_s$ |
| LT3 | $[-45_n/45_n/0_n/90_n]_s$ | LT15 | $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$ |
| LT4 | $[-45_n/45_n/90_n/0_n]_s$ | LT16 | $[45_n/0_n/90_n/-45_n]_s$ |
| LT5 | $[-45_n/90_n/0_n/45_n]_s$ | LT17 | $[45_n/90_n/-45_n/0_n]_s$ |
| LT6 | $[-45_n/90_n/45_n/0_n]_s$ | LT18 | $[45_n/90_n/0_n/-45_n]_s$ |
| LT7 | $[0_n/-45_n/45_n/90_n]_s$ | LT19 | $[90_n/-45_n/0_n/45_n]_s$ |
| LT8 | $[0_n/-45_n/90_n/45_n]_s$ | LT20 | $[90_n/-45_n/45_n/0_n]_s$ |
| LT9 | $[0_n/45_n/-45_n/90_n]_s$ | LT21 | $[90_n/0_n/-45_n/45_n]_s$ |
| LT10 | $[0_n/45_n/90_n/-45_n]_s$ | LT22 | $[90_n/0_n/45_n/-45_n]_s$ |
| LT11 | $[0_n/90_n/-45_n/45_n]_s$ | LT23 | $[90_n/45_n/-45_n/0_n]_s$ |
| LT12 | $[0_n/90_n/45_n/-45_n]_s$ | LT24 | $[90_n/45_n/0_n/-45_n]_s$ |




Şekil 3. 2 LT1 kodlu $[-45_2/0_2/45_2/90_2]_s$ plağı içindeki tabakaların istiflenmesi

## 3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) Çözümleme Yapan ANSYS Paket Yazılımının Kullanımı

1940'lı yılların başlarından [54] günümüze kadar daha çok mühendislerin yapısal analizler için kullanıp geliştirdiği Sonlu Elemanlar Yöntemi'nde yapının davranışı daha önceden belirlenmiş çok sayıda elemana bölünüp, bu elemanların düğüm noktalarıyla birleştirilmesiyle elde edilen çok sayıda denklem takımının çözümü yapılır. Bu denklem takımındaki bilinmeyen ve hesaplanması istenen düğüm noktalarındaki değerlerin çözümü bilgisayar kullanımını gerektirmektedir [55].

Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle çözümleme yapan ANSYS paket yazılımı, bu çalışmada kullanılan yaklaşık çözüm yöntemleri Galerkin ve En Küçük Kareler Yöntemleri'yle bulunan sonuçlarla karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır.

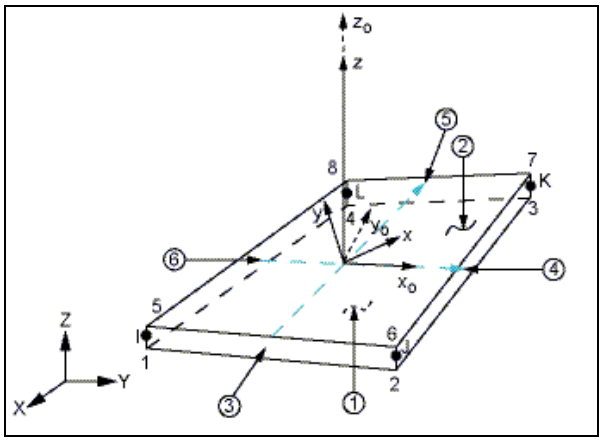
ANSYS yazılımında oluşturulacak sonlu elemanlar ağ yapısı için özel eleman tipleri bulunmaktadır. Yazılımda ince ve kalın tabakalı kompozit yapılarla, sandviç yapılar için dört farklı kabuk eleman tipi bulunmaktadır. Analizin çeşidine (doğrusal veya doğrusal olmayan) göre kabuk elemanlar SHELL99, SHELL 91, SHELL181 ve SHELL281 şeklinde değişiklik göstermektedir.

Plak kısa kenarı b=0.2 m, her tabakanın kalınlığı 0.0002 m, dört kenarı ankastre mesnetli 10000 $N/m^2$ düzgün yayılı yanal yük etkisindeki, $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$ dizilimli plağın (LT10), orta noktasındaki maksimum çökme değeri 11 farklı kenar oranı için, dört ayrı kabuk eleman kullanılarak hesaplanmıştır. Plak orta noktasındaki maksimum çökme değerlerinin (w) birbirine yakın sonuçlar verdiği Çizelge 3. 4'te görülmektedir.

Çizelge 3. 4 ANSYS yazılımında farklı kabuk eleman kullanımının sonuçlara etkisi

| **Plak orta noktasındaki maksimum çökme değeri w(mm)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **a/b** | **SHELL99** | **SHEL91** | **SHELL181** | **SHELL281** |
| | **w (mm)** | **w (mm)** | **W (mm)** | **w(mm)** |
| **1** | 0,1226 | 0,1227 | 0,1226 | 0,1226 |
| **1,1** | 0,1589 | 0,1587 | 0,1589 | 0,1588 |
| **1,2** | 0,1960 | 0,1957 | 0,1960 | 0,1959 |
| **1,3** | 0,2322 | 0,2318 | 0,2322 | 0,2322 |
| **1,4** | 0,2660 | 0,2656 | 0,2660 | 0,2662 |
| **1,6** | 0,3235 | 0,3233 | 0,3235 | 0,3243 |
| **1,8** | 0,3661 | 0,3663 | 0,3661 | 0,3675 |
| **2** | 0,3955 | 0,3960 | 0,3955 | 0,3975 |
| **2,5** | 0,4292 | 0,4307 | 0,4292 | 0,4325 |
| **3** | 0,4345 | 0,4367 | 0,4345 | 0,4386 |
| **4** | 0,4279 | 0,4304 | 0,4279 | 0,4322 |

Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni (SEY) kullanan yazılımlar ile analizler gerçekleştirilirken uygun eleman tipi seçimi ile doğru sonuçlar elde edildiği gibi, çözüm süreleri de kısalmaktadır. Bu çalışmadaki parametrik analizlerde, zamandan bağımsız doğrusal bir çözüm yapıldığından ve incelenen geometri dörtgen olduğundan dolayı oluşturulan sonlu eleman ağ yapısı için uygun çözüm veren SHELL181 elemanı kullanılmıştır. Bu elemanla en çok 250 tabakalı yapı oluşturulabilmektedir. Eleman, Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Plak Teorisi (BMKDT)'ne göre yer değiştirmektedir. Dört düğüm noktasından (I, J, K, L) oluşan SHELL181 elemanı Şekil 3. 3'te görülmektedir.




Şekil 3. 3 SHELL181 kabuk elemanı [51]

Sonlu elemanlar yönteminde, sonlu sayıda elemanla oluşturulan ağ yapısındaki eleman sayısının arttırılması çözüm hassasiyetini arttırmaktadır. Ancak bu çalışmadaki gibi çok sayıda parametrenin incelendiği analizlerde işlem süreleri oldukça artarak yüksek işlemci kapasiteli bilgisayar kullanımı gerekir. ANSYS yazılımında SHELL181 ile uygun büyüklükte eleman ile sonlu eleman ağ yapısını oluşturmak için $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$ dizilimli plağın (LT10) ankastre mesnetli durumdaki eğilme problemi incelenmiştir. Eleman kenar uzunluğunun plak kısa kenarına oranı 1/2 alınarak hesaplamalara başlanmış ardından bu değer azaltılarak sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Oranın 1/20'den sonra sonuçlara etkisi çok küçük mertebede olurken işlem süresini oldukça arttırdığı görülmektedir (Çizelge 3. 5). Bu çalışmadaki hesaplamalar için eleman kenar uzunluğunun plak kısa kenarına oranı 1/20 olan kare geometrideki ağ yapısı kullanılmıştır.

Çizelge 3. 5 ANSYS yazılımında sonlu elemanlar ağı için farklı boyutlarda eleman seçiminin, hesap sonuçlarına ve çözümleme sürelerine etkisi

| Plak orta noktasındaki maksimum çökme değeri w (mm) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Plak kısa kenarı / SHELL181 elemanı kenar uzunluğu** | | | | | | |
| | **2** | **4** | **8** | **10** | **20** | **40** | **50** |
| **a/b** | **w (mm)** | **W (mm)** | **w (mm)** | **W (mm)** | **W (mm)** | **w (mm)** | **w (mm)** |
| **1** | 0,3763 | 0,1222 | 0,1226 | 0,1225 | 0,1226 | 0,1226 | 0,1226 |
| **4** | 0,0075 | 0,3317 | 0,4078 | 0,4171 | 0,4279 | 0,4327 | 0,4331 |
| | | | | | | | |
| **Çözüm süresi (t: birim zaman)** | 3 t | 3,5 t | 5 t | 6 t | 13 t | 35 t | 55 t |

### 3.3 Statik Analiz Sonuçları

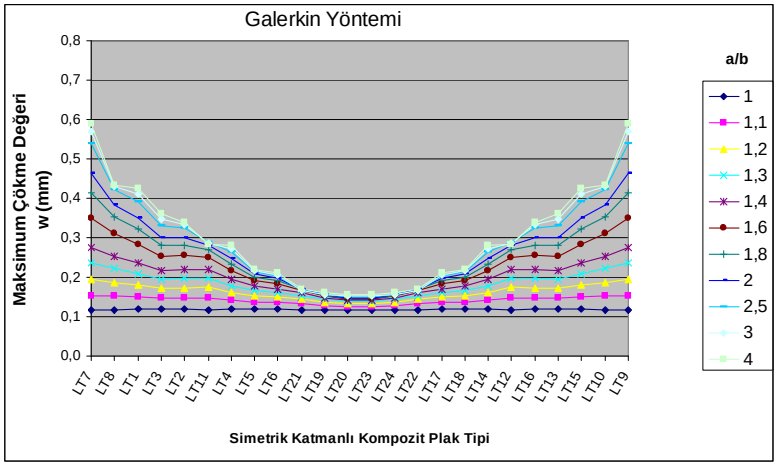
Bu bölümde, Bölüm 3. 1 ve 3. 2'deki verilen parametrelerin kullanımıyla, düzgün yayılı lateral yük etkisindeki 24 farklı simetrik katmanlı kompozit plak tipinin maksimum çökme değerleri Galerkin Yöntemi, En Küçük Kareler Yöntemi ve SEY (ANSYS) ile bulunan sonuçları; ankastre mesnet sınır koşulu için Şekil 3. 4, 3. 7 ve Çizelge 3. 6, 3. 7'de ve basit mesnet sınır koşulu için ise Şekil 3. 8, 3. 11 ve Çizelge 3. 8, 3. 9'da sunulmaktadır.

Ankastre mesnet sınır koşullarında; Şekil 3. 4'te plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 5'te plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda üç yöntemle bulunan sonuçlar ayrı grafiklerle gösterilmektedir.

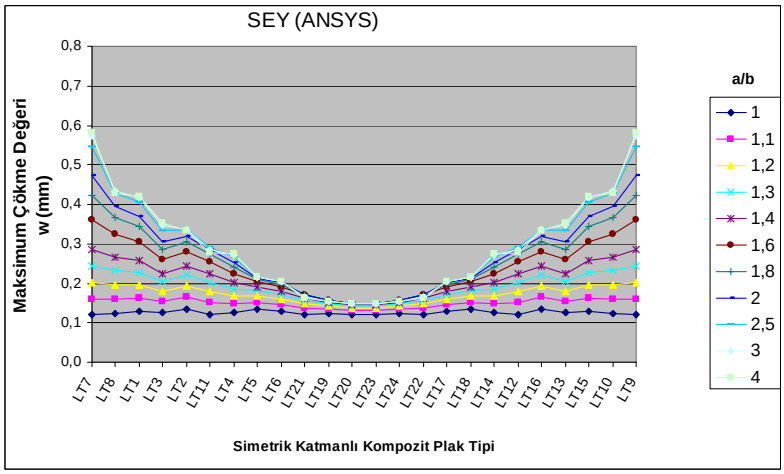
Şekil 3. 6'da plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 7'de plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda 12 farklı plak tipi üç yöntemle bulunan sonuçlar gösterilmektedir.

Basit mesnet sınır koşullarında; Şekil 3. 8'de plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 9'da plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda üç yöntemle bulunan sonuçlar ayrı grafiklerle gösterilmektedir.

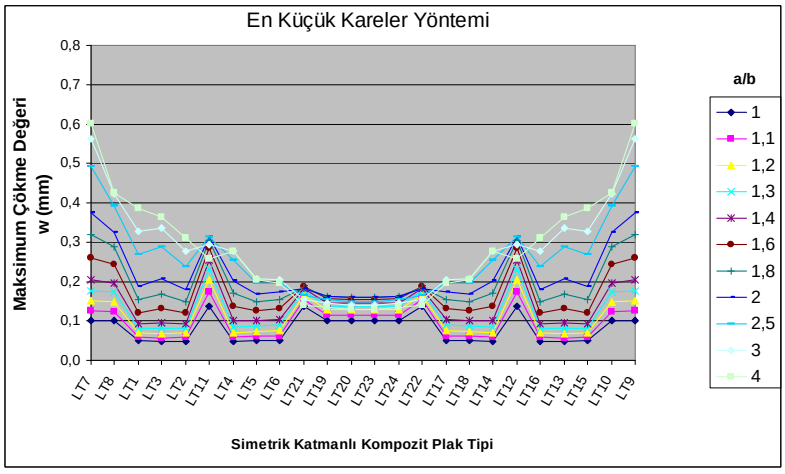
Şekil 3. 10'da plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 11'de plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda 12 farklı plak tipi üç yöntemle bulunan sonuçlar gösterilmektedir.




(a)

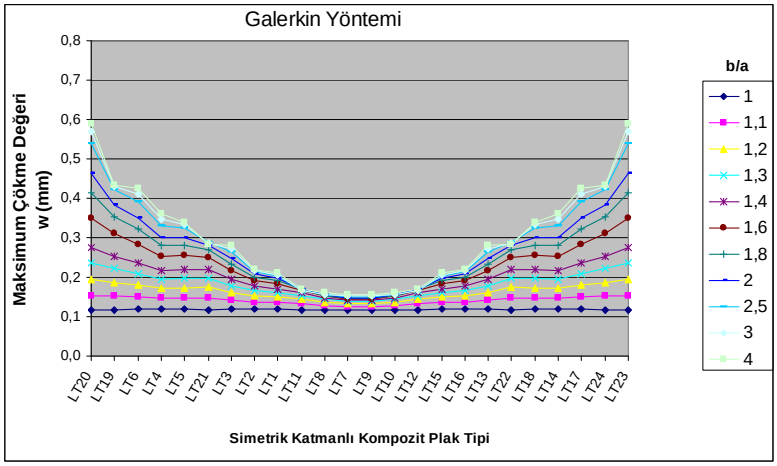



(b)

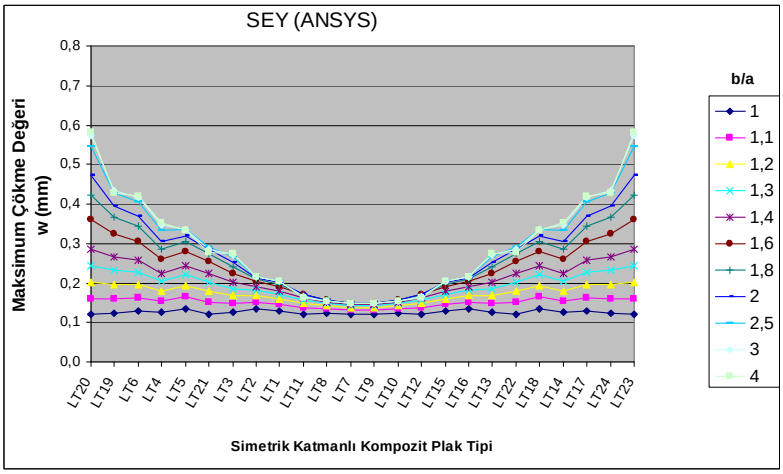



(c)

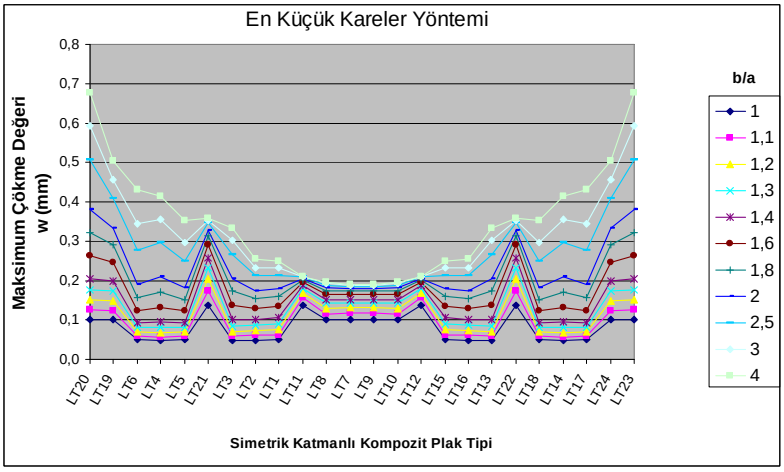
Şekil 3. 4 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

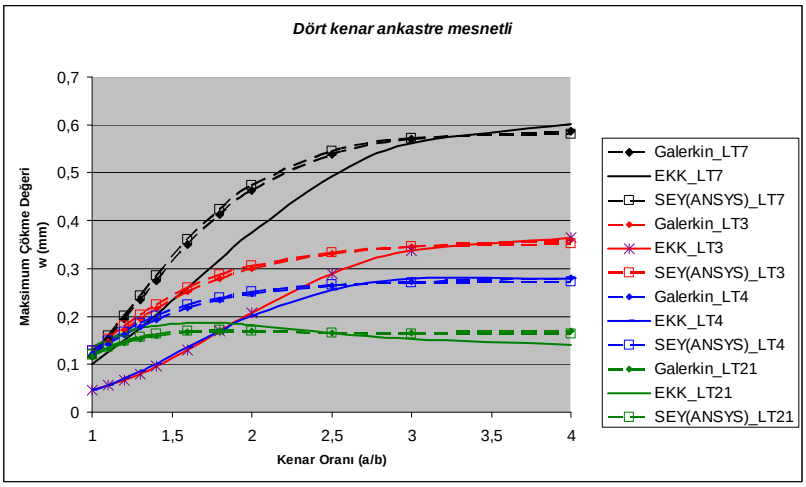



(b)

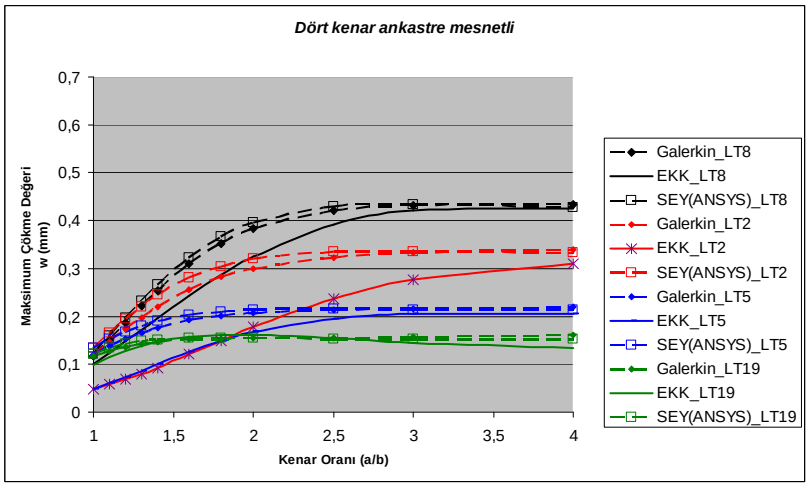



(c)

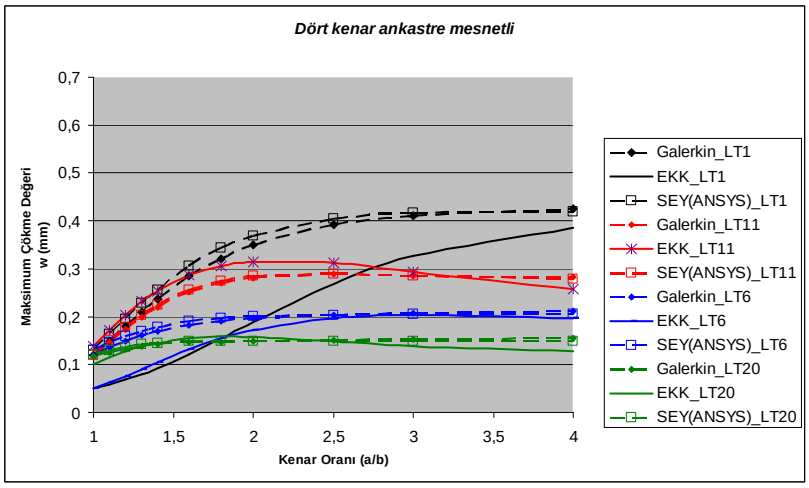
Şekil 3. 5 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

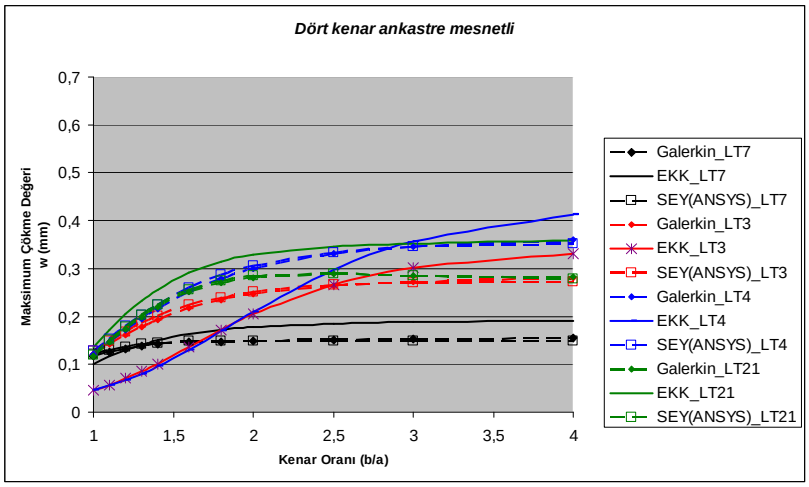



(b)

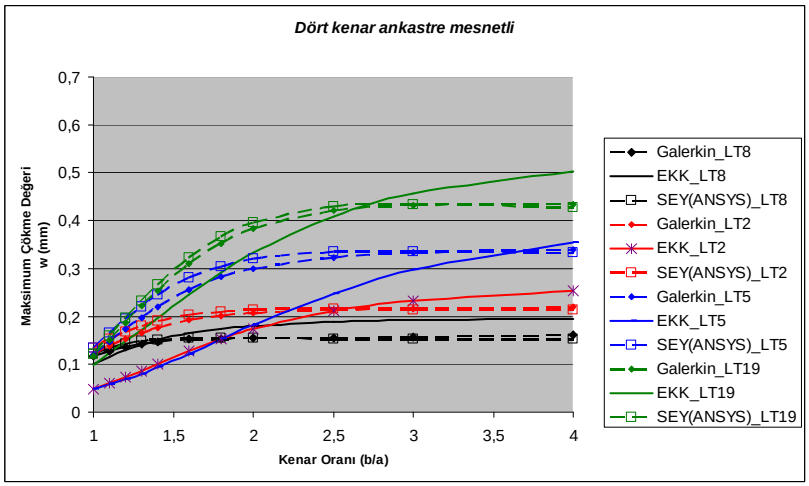



(c)

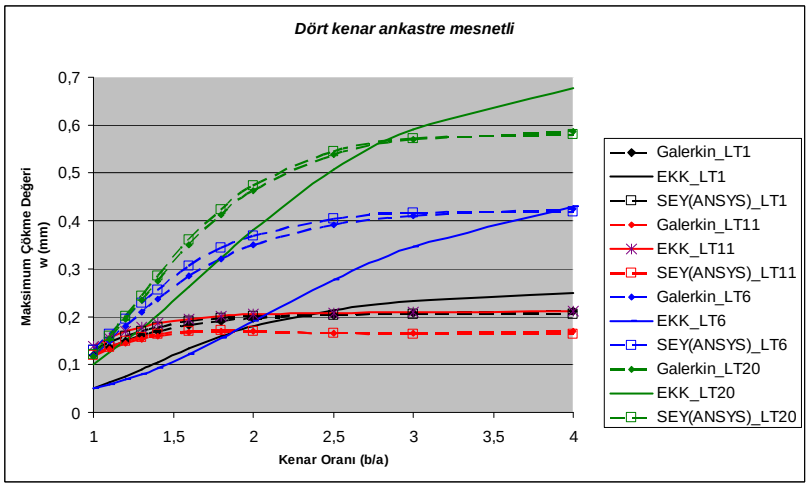
Şekil 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20




(a)




(b)




(c)

Şekil 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20

Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b

| a/b | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | W (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | W (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1192 | 0,1190 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1190 | 0,1192 | 0,1164 | 0,1168 |
| | En Küçük Kareler | 0,0499 | 0,0489 | 0,0465 | 0,0465 | 0,0490 | 0,0500 | 0,1010 | 0,1001 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1296 | 0,1333 | 0,1270 | 0,1270 | 0,1333 | 0,1296 | 0,1208 | 0,1226 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1497 | 0,1467 | 0,1467 | 0,1419 | 0,1373 | 0,1355 | 0,1539 | 0,1514 |
| | En Küçük Kareler | 0,0588 | 0,0583 | 0,0559 | 0,0574 | 0,0603 | 0,0623 | 0,1255 | 0,1239 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1629 | 0,1646 | 0,1539 | 0,1488 | 0,1524 | 0,1461 | 0,1593 | 0,1589 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1801 | 0,1733 | 0,1716 | 0,1611 | 0,1530 | 0,1492 | 0,1939 | 0,1869 |
| | En Küçük Kareler | 0,0687 | 0,0687 | 0,0672 | 0,0704 | 0,0728 | 0,0758 | 0,1509 | 0,1481 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1959 | 0,1941 | 0,1794 | 0,1683 | 0,1681 | 0,1596 | 0,2005 | 0,1960 |
| 1,30 | Galerkin | 0,2094 | 0,1979 | 0,1949 | 0,1782 | 0,1661 | 0,1605 | 0,2350 | 0,2216 |
| | En Küçük Kareler | 0,0800 | 0,0803 | 0,0804 | 0,0851 | 0,0861 | 0,0901 | 0,1770 | 0,1724 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2274 | 0,2208 | 0,2030 | 0,1855 | 0,1805 | 0,1704 | 0,2426 | 0,2322 |
| 1,40 | Galerkin | 0,2367 | 0,2199 | 0,2160 | 0,1931 | 0,1767 | 0,1697 | 0,2755 | 0,2541 |
| | En Küçük Kareler | 0,0926 | 0,0929 | 0,0955 | 0,1013 | 0,0996 | 0,1045 | 0,2041 | 0,1966 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2565 | 0,2442 | 0,2243 | 0,2003 | 0,1901 | 0,1788 | 0,2841 | 0,2660 |
| 1,60 | Galerkin | 0,2842 | 0,2558 | 0,2518 | 0,2169 | 0,1919 | 0,1830 | 0,3506 | 0,3102 |
| | En Küçük Kareler | 0,1215 | 0,1205 | 0,1304 | 0,1360 | 0,1257 | 0,1317 | 0,2609 | 0,2439 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3058 | 0,2805 | 0,2597 | 0,2235 | 0,2029 | 0,1904 | 0,3603 | 0,3235 |
| 1,80 | Galerkin | 0,3214 | 0,2819 | 0,2793 | 0,2341 | 0,2014 | 0,1915 | 0,4135 | 0,3527 |
| | En Küçük Kareler | 0,1541 | 0,1495 | 0,1689 | 0,1705 | 0,1486 | 0,1547 | 0,3194 | 0,2875 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3430 | 0,3047 | 0,2864 | 0,2397 | 0,2098 | 0,1971 | 0,4236 | 0,3661 |
| 2,00 | Galerkin | 0,3496 | 0,3001 | 0,3000 | 0,2463 | 0,2071 | 0,1968 | 0,4630 | 0,3829 |
| | En Küçük Kareler | 0,1882 | 0,1779 | 0,2075 | 0,2014 | 0,1672 | 0,1725 | 0,3761 | 0,3254 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3697 | 0,3198 | 0,3059 | 0,2509 | 0,2131 | 0,2009 | 0,4728 | 0,3955 |
| 2,50 | Galerkin | 0,3917 | 0,3238 | 0,3315 | 0,2639 | 0,2135 | 0,2035 | 0,5385 | 0,4211 |
| | En Küçük Kareler | 0,2677 | 0,2373 | 0,2883 | 0,2547 | 0,1956 | 0,1972 | 0,4926 | 0,3910 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4050 | 0,3347 | 0,3339 | 0,2654 | 0,2151 | 0,2043 | 0,5452 | 0,4292 |
| 3,00 | Galerkin | 0,4107 | 0,3326 | 0,3468 | 0,2721 | 0,2162 | 0,2068 | 0,5706 | 0,4316 |
| | En Küçük Kareler | 0,3271 | 0,2763 | 0,3367 | 0,2779 | 0,2061 | 0,2035 | 0,5622 | 0,4212 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4166 | 0,3362 | 0,3456 | 0,2708 | 0,2148 | 0,2048 | 0,5729 | 0,4345 |
| 4,00 | Galerkin | 0,4254 | 0,3396 | 0,3603 | 0,2802 | 0,2208 | 0,2116 | 0,5878 | 0,4338 |
| | En Küçük Kareler | 0,3863 | 0,3093 | 0,3643 | 0,2783 | 0,2045 | 0,1963 | 0,6005 | 0,4250 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4196 | 0,3340 | 0,3523 | 0,2734 | 0,2144 | 0,2049 | 0,5807 | 0,4279 |

Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1164 | 0,1168 | 0,1170 | 0,1170 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1192 | 0,1190 |
| | En Küçük Kareler | 0,1010 | 0,1001 | 0,1378 | 0,1378 | 0,0465 | 0,0465 | 0,0499 | 0,0489 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1208 | 0,1226 | 0,1203 | 0,1203 | 0,1270 | 0,1270 | 0,1296 | 0,1333 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1539 | 0,1514 | 0,1462 | 0,1462 | 0,1467 | 0,1419 | 0,1497 | 0,1467 |
| | En Küçük Kareler | 0,1255 | 0,1239 | 0,1723 | 0,1723 | 0,0559 | 0,0574 | 0,0588 | 0,0583 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1593 | 0,1589 | 0,1499 | 0,1499 | 0,1539 | 0,1488 | 0,1629 | 0,1646 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1939 | 0,1869 | 0,1737 | 0,1737 | 0,1716 | 0,1611 | 0,1801 | 0,1733 |
| | En Küçük Kareler | 0,1509 | 0,1481 | 0,2041 | 0,2041 | 0,0672 | 0,0704 | 0,0687 | 0,0687 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2005 | 0,1960 | 0,1777 | 0,1777 | 0,1794 | 0,1683 | 0,1959 | 0,1941 |
| 1,30 | Galerkin | 0,2350 | 0,2216 | 0,1982 | 0,1982 | 0,1949 | 0,1782 | 0,2094 | 0,1979 |
| | En Küçük Kareler | 0,1770 | 0,1724 | 0,2316 | 0,2316 | 0,0804 | 0,0851 | 0,0800 | 0,0803 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2426 | 0,2322 | 0,2025 | 0,2025 | 0,2030 | 0,1855 | 0,2274 | 0,2208 |
| 1,40 | Galerkin | 0,2755 | 0,2541 | 0,2193 | 0,2193 | 0,2160 | 0,1931 | 0,2367 | 0,2199 |
| | En Küçük Kareler | 0,2041 | 0,1966 | 0,2544 | 0,2544 | 0,0955 | 0,1013 | 0,0926 | 0,0929 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2841 | 0,2660 | 0,2237 | 0,2237 | 0,2243 | 0,2003 | 0,2565 | 0,2442 |
| 1,60 | Galerkin | 0,3506 | 0,3102 | 0,2510 | 0,2510 | 0,2518 | 0,2169 | 0,2842 | 0,2558 |
| | En Küçük Kareler | 0,2609 | 0,2439 | 0,2867 | 0,2867 | 0,1304 | 0,1360 | 0,1215 | 0,1205 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3603 | 0,3235 | 0,2553 | 0,2553 | 0,2597 | 0,2235 | 0,3058 | 0,2805 |
| 1,80 | Galerkin | 0,4135 | 0,3527 | 0,2707 | 0,2707 | 0,2793 | 0,2341 | 0,3214 | 0,2819 |
| | En Küçük Kareler | 0,3194 | 0,2875 | 0,3052 | 0,3052 | 0,1689 | 0,1705 | 0,1541 | 0,1495 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4236 | 0,3661 | 0,2747 | 0,2747 | 0,2864 | 0,2397 | 0,3430 | 0,3047 |
| 2,00 | Galerkin | 0,4630 | 0,3829 | 0,2816 | 0,2816 | 0,3000 | 0,2463 | 0,3496 | 0,3001 |
| | En Küçük Kareler | 0,3761 | 0,3254 | 0,3143 | 0,3143 | 0,2075 | 0,2014 | 0,1882 | 0,1779 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4728 | 0,3955 | 0,2851 | 0,2851 | 0,3059 | 0,2509 | 0,3697 | 0,3198 |
| 2,50 | Galerkin | 0,5385 | 0,4211 | 0,2882 | 0,2882 | 0,3315 | 0,2639 | 0,3917 | 0,3238 |
| | En Küçük Kareler | 0,4926 | 0,3910 | 0,3124 | 0,3124 | 0,2883 | 0,2547 | 0,2677 | 0,2373 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5452 | 0,4292 | 0,2901 | 0,2901 | 0,3339 | 0,2654 | 0,4050 | 0,3347 |
| 3,00 | Galerkin | 0,5706 | 0,4316 | 0,2852 | 0,2852 | 0,3468 | 0,2721 | 0,4107 | 0,3326 |
| | En Küçük Kareler | 0,5622 | 0,4212 | 0,2941 | 0,2941 | 0,3367 | 0,2779 | 0,3271 | 0,2763 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5729 | 0,4345 | 0,2849 | 0,2849 | 0,3456 | 0,2708 | 0,4166 | 0,3362 |
| 4,00 | Galerkin | 0,5878 | 0,4338 | 0,2838 | 0,2838 | 0,3603 | 0,2802 | 0,4254 | 0,3396 |
| | En Küçük Kareler | 0,6005 | 0,4250 | 0,2582 | 0,2582 | 0,3643 | 0,2783 | 0,3863 | 0,3093 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5807 | 0,4279 | 0,2779 | 0,2779 | 0,3523 | 0,2734 | 0,4196 | 0,3340 |

Çizelge 3. 6 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | W (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1192 | 0,1190 | 0,1168 | 0,1164 | 0,1170 | 0,1170 | 0,1164 | 0,1168 |
| | En Küçük Kareler | 0,0500 | 0,0490 | 0,0993 | 0,1001 | 0,1370 | 0,1370 | 0,1001 | 0,0993 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1296 | 0,1333 | 0,1226 | 0,1208 | 0,1203 | 0,1203 | 0,1208 | 0,1226 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1355 | 0,1373 | 0,1284 | 0,1260 | 0,1326 | 0,1326 | 0,1260 | 0,1284 |
| | En Küçük Kareler | 0,0623 | 0,0603 | 0,1144 | 0,1149 | 0,1539 | 0,1539 | 0,1149 | 0,1144 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1461 | 0,1524 | 0,1339 | 0,1302 | 0,1361 | 0,1361 | 0,1302 | 0,1339 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1492 | 0,1530 | 0,1370 | 0,1330 | 0,1447 | 0,1447 | 0,1330 | 0,1370 |
| | En Küçük Kareler | 0,0758 | 0,0728 | 0,1273 | 0,1275 | 0,1663 | 0,1663 | 0,1275 | 0,1273 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1596 | 0,1681 | 0,1422 | 0,1370 | 0,1482 | 0,1482 | 0,1370 | 0,1422 |
| 1,30 | Galerkin | 0,1605 | 0,1661 | 0,1432 | 0,1381 | 0,1536 | 0,1536 | 0,1381 | 0,1432 |
| | En Küçük Kareler | 0,0901 | 0,0861 | 0,1379 | 0,1376 | 0,1751 | 0,1751 | 0,1376 | 0,1379 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1704 | 0,1805 | 0,1479 | 0,1417 | 0,1571 | 0,1571 | 0,1417 | 0,1479 |
| 1,40 | Galerkin | 0,1697 | 0,1767 | 0,1475 | 0,1416 | 0,1599 | 0,1599 | 0,1416 | 0,1475 |
| | En Küçük Kareler | 0,1045 | 0,0996 | 0,1462 | 0,1454 | 0,1809 | 0,1809 | 0,1454 | 0,1462 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1788 | 0,1901 | 0,1517 | 0,1448 | 0,1633 | 0,1633 | 0,1448 | 0,1517 |
| 1,60 | Galerkin | 0,1830 | 0,1919 | 0,1522 | 0,1457 | 0,1668 | 0,1668 | 0,1457 | 0,1522 |
| | En Küçük Kareler | 0,1317 | 0,1257 | 0,1568 | 0,1549 | 0,1862 | 0,1862 | 0,1549 | 0,1568 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1904 | 0,2029 | 0,1553 | 0,1481 | 0,1698 | 0,1698 | 0,1481 | 0,1553 |
| 1,80 | Galerkin | 0,1915 | 0,2014 | 0,1540 | 0,1476 | 0,1690 | 0,1690 | 0,1476 | 0,1540 |
| | En Küçük Kareler | 0,1547 | 0,1486 | 0,1614 | 0,1585 | 0,1858 | 0,1858 | 0,1585 | 0,1614 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1971 | 0,2098 | 0,1561 | 0,1492 | 0,1715 | 0,1715 | 0,1492 | 0,1561 |
| 2,00 | Galerkin | 0,1968 | 0,2071 | 0,1545 | 0,1486 | 0,1688 | 0,1688 | 0,1486 | 0,1545 |
| | En Küçük Kareler | 0,1725 | 0,1672 | 0,1619 | 0,1581 | 0,1819 | 0,1819 | 0,1581 | 0,1619 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2009 | 0,2131 | 0,1557 | 0,1493 | 0,1707 | 0,1707 | 0,1493 | 0,1557 |
| 2,50 | Galerkin | 0,2035 | 0,2135 | 0,1549 | 0,1502 | 0,1664 | 0,1664 | 0,1502 | 0,1549 |
| | En Küçük Kareler | 0,1972 | 0,1956 | 0,1547 | 0,1493 | 0,1662 | 0,1662 | 0,1493 | 0,1547 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2043 | 0,2151 | 0,1540 | 0,1487 | 0,1664 | 0,1664 | 0,1487 | 0,1540 |
| 3,00 | Galerkin | 0,2068 | 0,2162 | 0,1564 | 0,1521 | 0,1663 | 0,1663 | 0,1521 | 0,1564 |
| | En Küçük Kareler | 0,2035 | 0,2061 | 0,1452 | 0,1393 | 0,1527 | 0,1527 | 0,1393 | 0,1452 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2048 | 0,2148 | 0,1532 | 0,1484 | 0,1641 | 0,1641 | 0,1484 | 0,1532 |
| 4,00 | Galerkin | 0,2116 | 0,2208 | 0,1606 | 0,1560 | 0,1707 | 0,1707 | 0,1560 | 0,1606 |
| | En Küçük Kareler | 0,1963 | 0,2045 | 0,1333 | 0,1276 | 0,1395 | 0,1395 | 0,1276 | 0,1333 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2049 | 0,2144 | 0,1531 | 0,1483 | 0,1636 | 0,1636 | 0,1483 | 0,1531 |

Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a

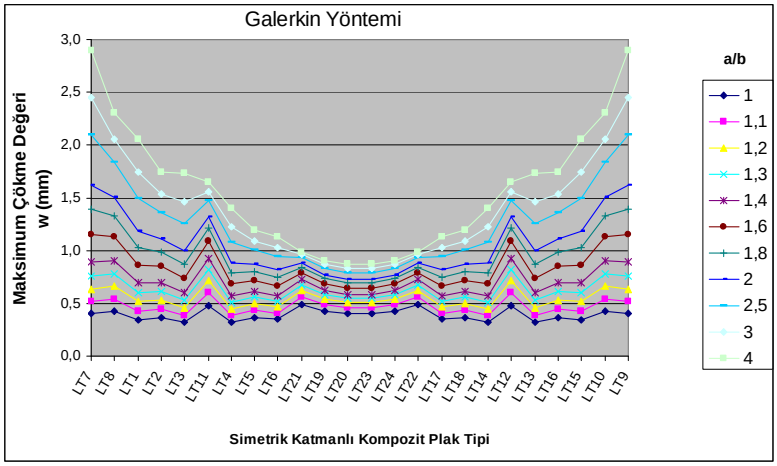
| b/a | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1192 | 0,1190 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1190 | 0,1192 | 0,1164 | 0,1168 |
| | En Küçük Kareler | 0,0499 | 0,0489 | 0,0465 | 0,0465 | 0,0490 | 0,0500 | 0,1010 | 0,1001 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1296 | 0,1333 | 0,1270 | 0,1270 | 0,1333 | 0,1296 | 0,1208 | 0,1226 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1355 | 0,1373 | 0,1419 | 0,1467 | 0,1467 | 0,1497 | 0,1260 | 0,1284 |
| | En Küçük Kareler | 0,0623 | 0,0604 | 0,0574 | 0,0559 | 0,0584 | 0,0589 | 0,1165 | 0,1158 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1461 | 0,1524 | 0,1488 | 0,1539 | 0,1646 | 0,1629 | 0,1302 | 0,1339 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1492 | 0,1530 | 0,1611 | 0,1716 | 0,1733 | 0,1801 | 0,1330 | 0,1370 |
| | En Küçük Kareler | 0,0761 | 0,0731 | 0,0704 | 0,0672 | 0,0689 | 0,0689 | 0,1301 | 0,1296 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1596 | 0,1681 | 0,1683 | 0,1794 | 0,1941 | 0,1959 | 0,1370 | 0,1422 |
| 1,30 | Galerkin | 0,1605 | 0,1661 | 0,1782 | 0,1949 | 0,1979 | 0,2094 | 0,1381 | 0,1432 |
| | En Küçük Kareler | 0,0906 | 0,0867 | 0,0853 | 0,0805 | 0,0807 | 0,0802 | 0,1414 | 0,1413 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1704 | 0,1805 | 0,1855 | 0,2030 | 0,2208 | 0,2274 | 0,1417 | 0,1479 |
| 1,40 | Galerkin | 0,1697 | 0,1767 | 0,1931 | 0,2160 | 0,2199 | 0,2367 | 0,1416 | 0,1475 |
| | En Küçük Kareler | 0,1055 | 0,1006 | 0,1016 | 0,0957 | 0,0935 | 0,0929 | 0,1507 | 0,1510 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1788 | 0,1901 | 0,2003 | 0,2243 | 0,2442 | 0,2565 | 0,1448 | 0,1517 |
| 1,60 | Galerkin | 0,1830 | 0,1919 | 0,2169 | 0,2518 | 0,2558 | 0,2842 | 0,1457 | 0,1522 |
| | En Küçük Kareler | 0,1341 | 0,1281 | 0,1371 | 0,1309 | 0,1219 | 0,1223 | 0,1641 | 0,1652 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1904 | 0,2029 | 0,2235 | 0,2597 | 0,2805 | 0,3058 | 0,1481 | 0,1553 |
| 1,80 | Galerkin | 0,1915 | 0,2014 | 0,2341 | 0,2793 | 0,2819 | 0,3214 | 0,1476 | 0,1540 |
| | En Küçük Kareler | 0,1592 | 0,1530 | 0,1728 | 0,1702 | 0,1521 | 0,1558 | 0,1726 | 0,1745 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1971 | 0,2098 | 0,2397 | 0,2864 | 0,3047 | 0,3430 | 0,1492 | 0,1561 |
| 2,00 | Galerkin | 0,1968 | 0,2071 | 0,2463 | 0,3000 | 0,3001 | 0,3496 | 0,1486 | 0,1545 |
| | En Küçük Kareler | 0,1797 | 0,1741 | 0,2055 | 0,2102 | 0,1822 | 0,1912 | 0,1781 | 0,1806 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2009 | 0,2131 | 0,2509 | 0,3059 | 0,3198 | 0,3697 | 0,1493 | 0,1557 |
| 2,50 | Galerkin | 0,2035 | 0,2135 | 0,2639 | 0,3315 | 0,3238 | 0,3917 | 0,1502 | 0,1549 |
| | En Küçük Kareler | 0,2138 | 0,2112 | 0,2667 | 0,2972 | 0,2482 | 0,2765 | 0,1849 | 0,1887 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2043 | 0,2151 | 0,2654 | 0,3339 | 0,3347 | 0,4050 | 0,1487 | 0,1540 |
| 3,00 | Galerkin | 0,2068 | 0,2162 | 0,2721 | 0,3468 | 0,3326 | 0,4107 | 0,1521 | 0,1564 |
| | En Küçük Kareler | 0,2321 | 0,2327 | 0,3017 | 0,3559 | 0,2967 | 0,3448 | 0,1877 | 0,1922 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2048 | 0,2148 | 0,2708 | 0,3456 | 0,3362 | 0,4166 | 0,1484 | 0,1532 |
| 4,00 | Galerkin | 0,2116 | 0,2208 | 0,2802 | 0,3603 | 0,3396 | 0,4254 | 0,1560 | 0,1606 |
| | En Küçük Kareler | 0,2485 | 0,2535 | 0,3321 | 0,4136 | 0,3536 | 0,4295 | 0,1897 | 0,1950 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2049 | 0,2144 | 0,2734 | 0,3523 | 0,3340 | 0,4196 | 0,1483 | 0,1531 |

Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

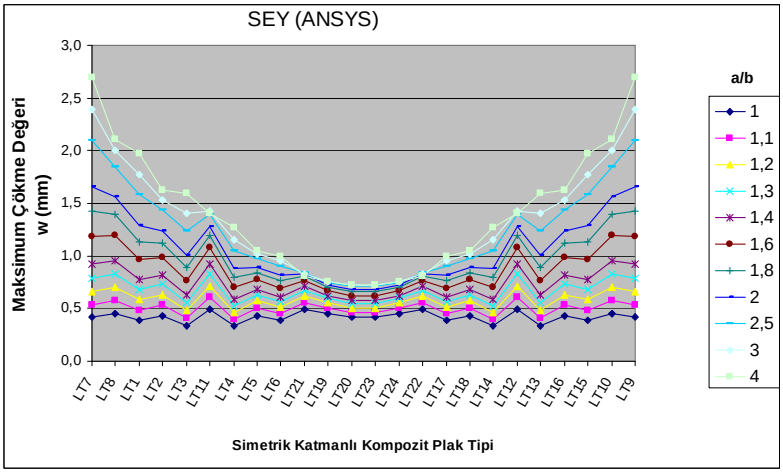
| b/a | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | W (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1164 | 0,1168 | 0,1170 | 0,1170 | 0,1207 | 0,1207 | 0,1192 | 0,1190 |
| | En Küçük Kareler | 0,1010 | 0,1001 | 0,1378 | 0,1378 | 0,0465 | 0,0465 | 0,0499 | 0,0489 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1208 | 0,1226 | 0,1203 | 0,1203 | 0,1270 | 0,1270 | 0,1296 | 0,1333 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1260 | 0,1284 | 0,1326 | 0,1326 | 0,1419 | 0,1467 | 0,1355 | 0,1373 |
| | En Küçük Kareler | 0,1165 | 0,1158 | 0,1555 | 0,1555 | 0,0574 | 0,0559 | 0,0623 | 0,0604 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1302 | 0,1339 | 0,1361 | 0,1361 | 0,1488 | 0,1539 | 0,1461 | 0,1524 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1330 | 0,1370 | 0,1447 | 0,1447 | 0,1611 | 0,1716 | 0,1492 | 0,1530 |
| | En Küçük Kareler | 0,1301 | 0,1296 | 0,1689 | 0,1689 | 0,0704 | 0,0672 | 0,0761 | 0,0731 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1370 | 0,1422 | 0,1482 | 0,1482 | 0,1683 | 0,1794 | 0,1596 | 0,1681 |
| 1,30 | Galerkin | 0,1381 | 0,1432 | 0,1536 | 0,1536 | 0,1782 | 0,1949 | 0,1605 | 0,1661 |
| | En Küçük Kareler | 0,1414 | 0,1413 | 0,1789 | 0,1789 | 0,0853 | 0,0805 | 0,0906 | 0,0867 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1417 | 0,1479 | 0,1571 | 0,1571 | 0,1855 | 0,2030 | 0,1704 | 0,1805 |
| 1,40 | Galerkin | 0,1416 | 0,1475 | 0,1599 | 0,1599 | 0,1931 | 0,2160 | 0,1697 | 0,1767 |
| | En Küçük Kareler | 0,1507 | 0,1510 | 0,1863 | 0,1863 | 0,1016 | 0,0957 | 0,1055 | 0,1006 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1448 | 0,1517 | 0,1633 | 0,1633 | 0,2003 | 0,2243 | 0,1788 | 0,1901 |
| 1,60 | Galerkin | 0,1457 | 0,1522 | 0,1668 | 0,1668 | 0,2169 | 0,2518 | 0,1830 | 0,1919 |
| | En Küçük Kareler | 0,1641 | 0,1652 | 0,1959 | 0,1959 | 0,1371 | 0,1309 | 0,1341 | 0,1281 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1481 | 0,1553 | 0,1698 | 0,1698 | 0,2235 | 0,2597 | 0,1904 | 0,2029 |
| 1,80 | Galerkin | 0,1476 | 0,1540 | 0,1690 | 0,1690 | 0,2341 | 0,2793 | 0,1915 | 0,2014 |
| | En Küçük Kareler | 0,1726 | 0,1745 | 0,2013 | 0,2013 | 0,1728 | 0,1702 | 0,1592 | 0,1530 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1492 | 0,1561 | 0,1715 | 0,1715 | 0,2397 | 0,2864 | 0,1971 | 0,2098 |
| 2,00 | Galerkin | 0,1486 | 0,1545 | 0,1688 | 0,1688 | 0,2463 | 0,3000 | 0,1968 | 0,2071 |
| | En Küçük Kareler | 0,1781 | 0,1806 | 0,2046 | 0,2046 | 0,2055 | 0,2102 | 0,1797 | 0,1741 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1493 | 0,1557 | 0,1707 | 0,1707 | 0,2509 | 0,3059 | 0,2009 | 0,2131 |
| 2,50 | Galerkin | 0,1502 | 0,1549 | 0,1664 | 0,1664 | 0,2639 | 0,3315 | 0,2035 | 0,2135 |
| | En Küçük Kareler | 0,1849 | 0,1887 | 0,2085 | 0,2085 | 0,2667 | 0,2972 | 0,2138 | 0,2112 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1487 | 0,1540 | 0,1664 | 0,1664 | 0,2654 | 0,3339 | 0,2043 | 0,2151 |
| 3,00 | Galerkin | 0,1521 | 0,1564 | 0,1663 | 0,1663 | 0,2721 | 0,3468 | 0,2068 | 0,2162 |
| | En Küçük Kareler | 0,1877 | 0,1922 | 0,2099 | 0,2099 | 0,3017 | 0,3559 | 0,2321 | 0,2327 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1484 | 0,1532 | 0,1641 | 0,1641 | 0,2708 | 0,3456 | 0,2048 | 0,2148 |
| 4,00 | Galerkin | 0,1560 | 0,1606 | 0,1707 | 0,1707 | 0,2802 | 0,3603 | 0,2116 | 0,2208 |
| | En Küçük Kareler | 0,1897 | 0,1950 | 0,2109 | 0,2109 | 0,3321 | 0,4136 | 0,2485 | 0,2535 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1483 | 0,1531 | 0,1636 | 0,1636 | 0,2734 | 0,3523 | 0,2049 | 0,2144 |

Çizelge 3. 7 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

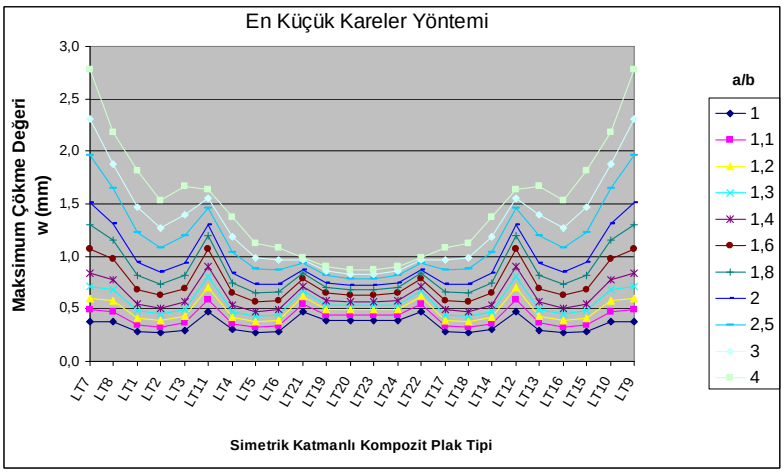
| b/a | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,1192 | 0,1190 | 0,1168 | 0,1164 | 0,1170 | 0,1170 | 0,1164 | 0,1168 |
| | En Küçük Kareler | 0,0500 | 0,0490 | 0,0993 | 0,1001 | 0,1370 | 0,1370 | 0,1001 | 0,0993 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1296 | 0,1333 | 0,1226 | 0,1208 | 0,1203 | 0,1203 | 0,1208 | 0,1226 |
| 1,10 | Galerkin | 0,1497 | 0,1467 | 0,1514 | 0,1539 | 0,1462 | 0,1462 | 0,1539 | 0,1514 |
| | En Küçük Kareler | 0,0589 | 0,0584 | 0,1235 | 0,1248 | 0,1720 | 0,1720 | 0,1248 | 0,1235 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1629 | 0,1646 | 0,1589 | 0,1593 | 0,1499 | 0,1499 | 0,1593 | 0,1589 |
| 1,20 | Galerkin | 0,1801 | 0,1733 | 0,1869 | 0,1939 | 0,1737 | 0,1737 | 0,1939 | 0,1869 |
| | En Küçük Kareler | 0,0689 | 0,0689 | 0,1480 | 0,1504 | 0,2045 | 0,2045 | 0,1504 | 0,1480 |
| | SEY (ANSYS) | 0,1959 | 0,1941 | 0,1960 | 0,2005 | 0,1777 | 0,1777 | 0,2005 | 0,1960 |
| 1,30 | Galerkin | 0,2094 | 0,1979 | 0,2216 | 0,2350 | 0,1982 | 0,1982 | 0,2350 | 0,2216 |
| | En Küçük Kareler | 0,0802 | 0,0807 | 0,1727 | 0,1769 | 0,2329 | 0,2329 | 0,1769 | 0,1727 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2274 | 0,2208 | 0,2322 | 0,2426 | 0,2025 | 0,2025 | 0,2426 | 0,2322 |
| 1,40 | Galerkin | 0,2367 | 0,2199 | 0,2541 | 0,2755 | 0,2193 | 0,2193 | 0,2755 | 0,2541 |
| | En Küçük Kareler | 0,0929 | 0,0935 | 0,1975 | 0,2043 | 0,2567 | 0,2567 | 0,2043 | 0,1975 |
| | SEY (ANSYS) | 0,2565 | 0,2442 | 0,2660 | 0,2841 | 0,2237 | 0,2237 | 0,2841 | 0,2660 |
| 1,60 | Galerkin | 0,2842 | 0,2558 | 0,3102 | 0,3506 | 0,2510 | 0,2510 | 0,3506 | 0,3102 |
| | En Küçük Kareler | 0,1223 | 0,1219 | 0,2462 | 0,2620 | 0,2916 | 0,2916 | 0,2620 | 0,2462 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3058 | 0,2805 | 0,3235 | 0,3603 | 0,2553 | 0,2553 | 0,3603 | 0,3235 |
| 1,80 | Galerkin | 0,3214 | 0,2819 | 0,3527 | 0,4135 | 0,2707 | 0,2707 | 0,4135 | 0,3527 |
| | En Küçük Kareler | 0,1558 | 0,1521 | 0,2919 | 0,3220 | 0,3139 | 0,3139 | 0,3220 | 0,2919 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3430 | 0,3047 | 0,3661 | 0,4236 | 0,2747 | 0,2747 | 0,4236 | 0,3661 |
| 2,00 | Galerkin | 0,3496 | 0,3001 | 0,3829 | 0,4630 | 0,2816 | 0,2816 | 0,4630 | 0,3829 |
| | En Küçük Kareler | 0,1912 | 0,1822 | 0,3327 | 0,3810 | 0,3281 | 0,3281 | 0,3810 | 0,3327 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3697 | 0,3198 | 0,3955 | 0,4728 | 0,2851 | 0,2851 | 0,4728 | 0,3955 |
| 2,50 | Galerkin | 0,3917 | 0,3238 | 0,4211 | 0,5385 | 0,2882 | 0,2882 | 0,5385 | 0,4211 |
| | En Küçük Kareler | 0,2765 | 0,2482 | 0,4097 | 0,5068 | 0,3457 | 0,3457 | 0,5068 | 0,4097 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4050 | 0,3347 | 0,4292 | 0,5452 | 0,2901 | 0,2901 | 0,5452 | 0,4292 |
| 3,00 | Galerkin | 0,4107 | 0,3326 | 0,4316 | 0,5706 | 0,2852 | 0,2852 | 0,5706 | 0,4316 |
| | En Küçük Kareler | 0,3448 | 0,2967 | 0,4569 | 0,5919 | 0,3527 | 0,3527 | 0,5919 | 0,4569 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4166 | 0,3362 | 0,4345 | 0,5729 | 0,2849 | 0,2849 | 0,5729 | 0,4345 |
| 4,00 | Galerkin | 0,4254 | 0,3396 | 0,4338 | 0,5878 | 0,2838 | 0,2838 | 0,5878 | 0,4338 |
| | En Küçük Kareler | 0,4295 | 0,3536 | 0,5035 | 0,6775 | 0,3576 | 0,3576 | 0,6775 | 0,5035 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4196 | 0,3340 | 0,4279 | 0,5807 | 0,2779 | 0,2779 | 0,5807 | 0,4279 |




(a)

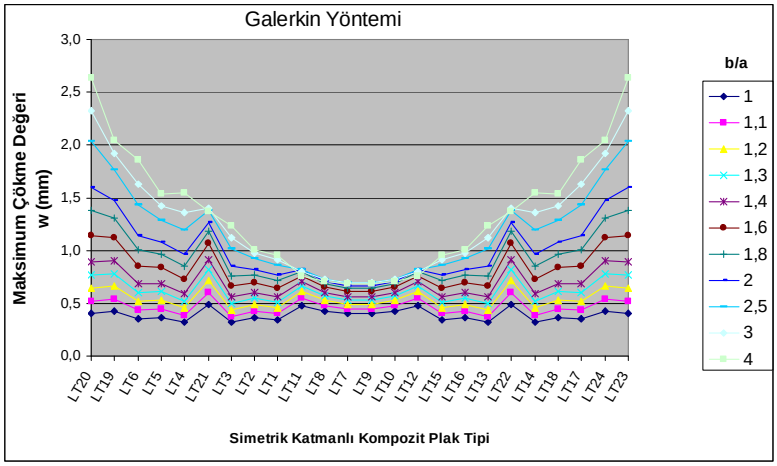



(b)

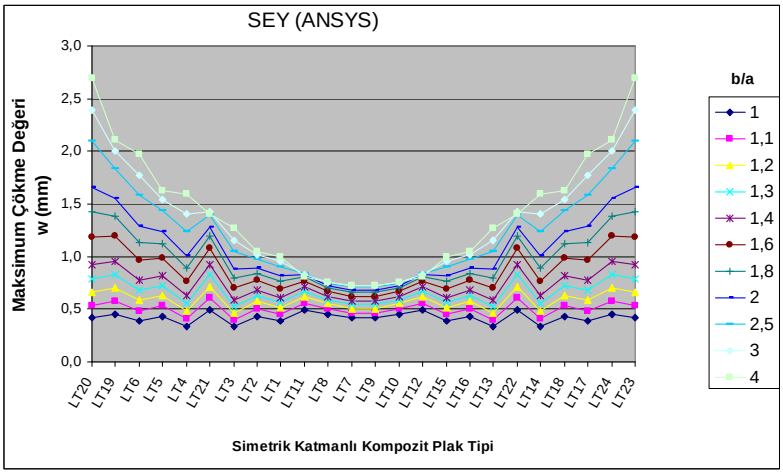



(c)

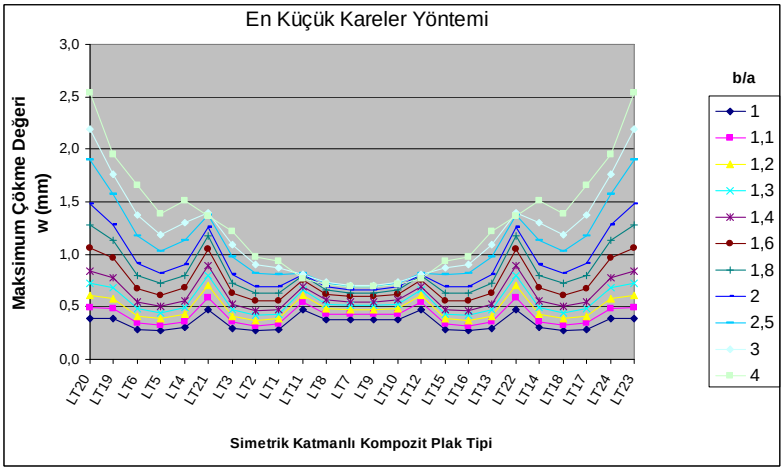
Şekil 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b)SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

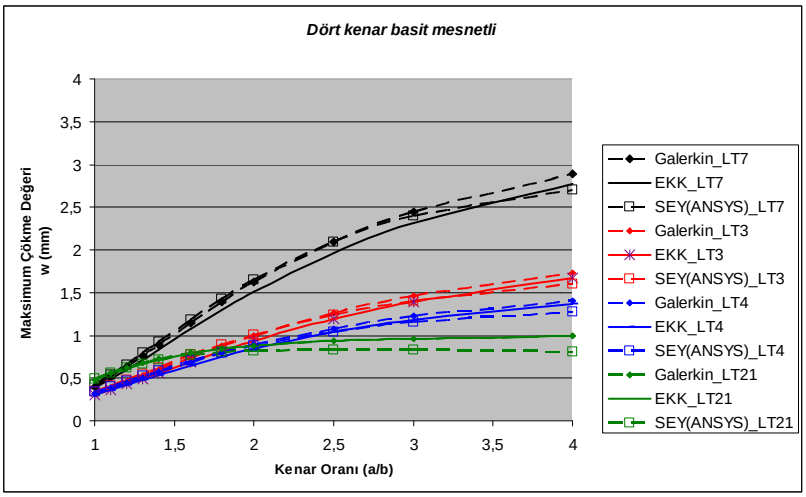



(b)

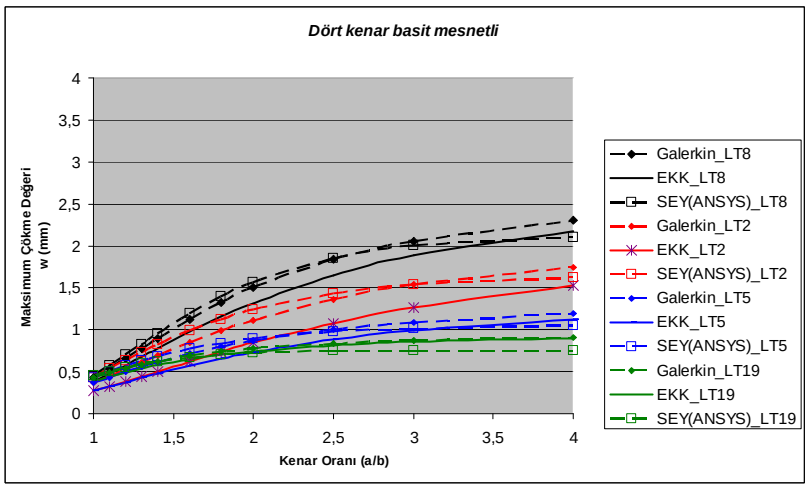



(c)

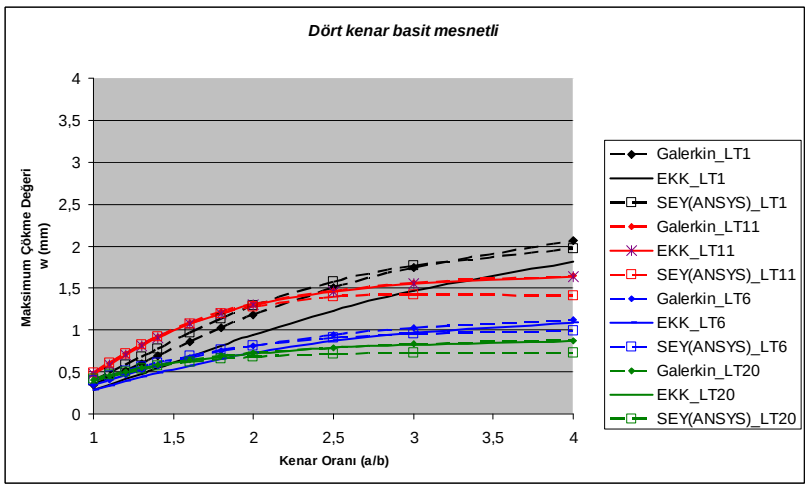
Şekil 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

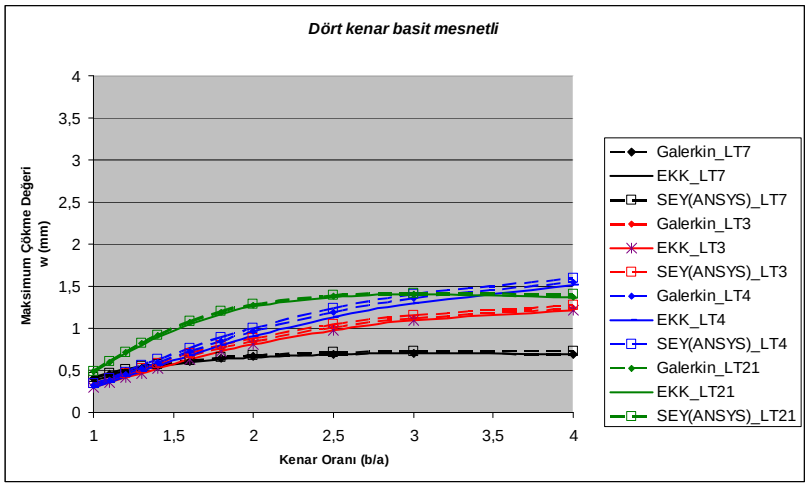



(b)

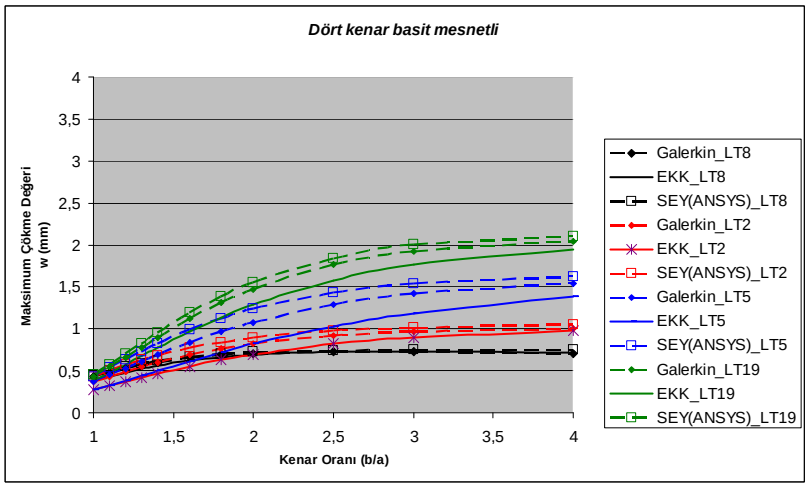



(c)

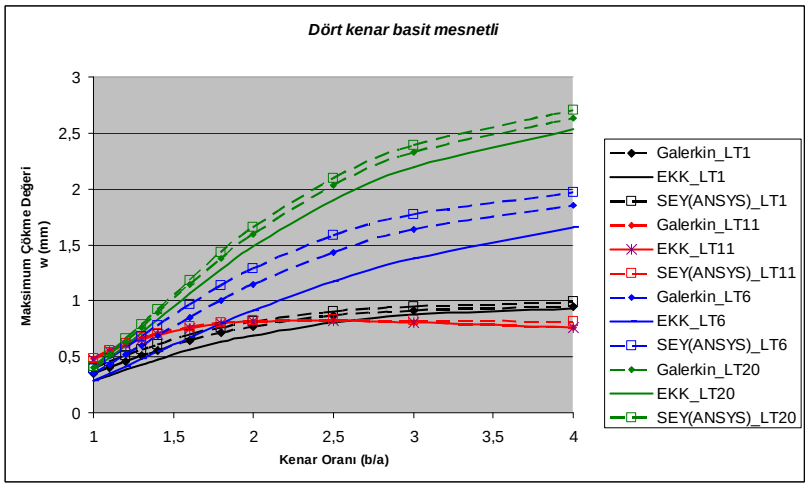
Şekil 3. 10 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20




(a)




(b)




(c)

Şekil 3. 11 Maksimum Çökme Değeri w (mm) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20

Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b

| a/b | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,3471 | 0,3649 | 0,3185 | 0,3194 | 0,3668 | 0,3500 | 0,4006 | 0,4253 |
| | En Küçük Kareler | 0,2833 | 0,2688 | 0,2983 | 0,2991 | 0,2699 | 0,2854 | 0,3825 | 0,3793 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3916 | 0,4352 | 0,3393 | 0,3393 | 0,4352 | 0,3916 | 0,4155 | 0,4513 |
| 1,10 | Galerkin | 0,4296 | 0,4475 | 0,3871 | 0,3817 | 0,4327 | 0,4099 | 0,5141 | 0,5405 |
| | En Küçük Kareler | 0,3474 | 0,3268 | 0,3622 | 0,3579 | 0,3222 | 0,3378 | 0,4879 | 0,4764 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4858 | 0,5347 | 0,4107 | 0,4029 | 0,5066 | 0,4531 | 0,5334 | 0,5750 |
| 1,20 | Galerkin | 0,5154 | 0,5313 | 0,4577 | 0,4444 | 0,4961 | 0,4676 | 0,6357 | 0,6604 |
| | En Küçük Kareler | 0,4138 | 0,3864 | 0,4280 | 0,4173 | 0,3744 | 0,3896 | 0,6000 | 0,5770 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5829 | 0,6341 | 0,4813 | 0,4640 | 0,5725 | 0,5106 | 0,6594 | 0,7010 |
| 1,30 | Galerkin | 0,6029 | 0,6147 | 0,5291 | 0,5065 | 0,5562 | 0,5226 | 0,7623 | 0,7816 |
| | En Küçük Kareler | 0,4815 | 0,4466 | 0,4947 | 0,4763 | 0,4258 | 0,4401 | 0,7164 | 0,6786 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6810 | 0,7307 | 0,5538 | 0,5254 | 0,6324 | 0,5637 | 0,7902 | 0,8297 |
| 1,40 | Galerkin | 0,6906 | 0,6963 | 0,6004 | 0,5673 | 0,6126 | 0,5743 | 0,8915 | 0,9012 |
| | En Küçük Kareler | 0,5498 | 0,5068 | 0,5616 | 0,5344 | 0,4757 | 0,4886 | 0,8348 | 0,7794 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7782 | 0,8228 | 0,6254 | 0,5848 | 0,6860 | 0,6122 | 0,9230 | 0,9541 |
| 1,60 | Galerkin | 0,8631 | 0,8510 | 0,7403 | 0,6833 | 0,7135 | 0,6678 | 1,1491 | 1,1278 |
| | En Küçük Kareler | 0,6857 | 0,6251 | 0,6931 | 0,6460 | 0,5696 | 0,5789 | 1,0709 | 0,9738 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9649 | 0,9892 | 0,7664 | 0,6983 | 0,7758 | 0,6958 | 1,1852 | 1,1932 |
| 1,80 | Galerkin | 1,0268 | 0,9911 | 0,8730 | 0,7897 | 0,7991 | 0,7479 | 1,3954 | 1,3304 |
| | En Küçük Kareler | 0,8179 | 0,7385 | 0,8190 | 0,7494 | 0,6543 | 0,6593 | 1,2980 | 1,1533 |
| | SEY (ANSYS) | 1,1357 | 1,1244 | 0,8904 | 0,7935 | 0,8416 | 0,7631 | 1,4316 | 1,3951 |
| 2,00 | Galerkin | 1,1785 | 1,1154 | 0,9964 | 0,8857 | 0,8710 | 0,8160 | 1,6234 | 1,5060 |
| | En Küçük Kareler | 0,9442 | 0,8453 | 0,9370 | 0,8436 | 0,7295 | 0,7298 | 1,5103 | 1,3152 |
| | SEY (ANSYS) | 1,2871 | 1,2364 | 1,0061 | 0,8797 | 0,8929 | 0,8166 | 1,6547 | 1,5623 |
| 2,50 | Galerkin | 1,4991 | 1,3618 | 1,2592 | 1,0812 | 1,0039 | 0,9437 | 2,0987 | 1,8390 |
| | En Küçük Kareler | 1,2284 | 1,0794 | 1,1930 | 1,0389 | 0,8794 | 0,8685 | 1,9638 | 1,6437 |
| | SEY (ANSYS) | 1,5807 | 1,4331 | 1,2406 | 1,0454 | 0,9765 | 0,9055 | 2,0971 | 1,8485 |
| 3,00 | Galerkin | 1,7420 | 1,5350 | 1,4608 | 1,2237 | 1,0907 | 1,0287 | 2,4494 | 2,0589 |
| | En Küçük Kareler | 1,4650 | 1,2673 | 1,3946 | 1,1845 | 0,9859 | 0,9655 | 2,3120 | 1,8809 |
| | SEY (ANSYS) | 1,7726 | 1,5349 | 1,4057 | 1,1555 | 1,0141 | 0,9535 | 2,3935 | 2,0009 |
| 4,00 | Galerkin | 2,0603 | 1,7462 | 1,7286 | 1,4037 | 1,1899 | 1,1274 | 2,8929 | 2,3096 |
| | En Küçük Kareler | 1,8142 | 1,5315 | 1,6718 | 1,3733 | 1,1175 | 1,0839 | 2,7753 | 2,1769 |
| | SEY (ANSYS) | 1,9680 | 1,6217 | 1,5980 | 1,2714 | 1,0454 | 0,9930 | 2,7010 | 2,1073 |

Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,4006 | 0,4253 | 0,4823 | 0,4823 | 0,3185 | 0,3194 | 0,3471 | 0,3649 |
| | En Küçük Kareler | 0,3825 | 0,3793 | 0,4743 | 0,4743 | 0,2983 | 0,2991 | 0,2833 | 0,2688 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4155 | 0,4513 | 0,4878 | 0,4878 | 0,3393 | 0,3393 | 0,3916 | 0,4352 |
| 1,10 | Galerkin | 0,5141 | 0,5405 | 0,5992 | 0,5992 | 0,3871 | 0,3817 | 0,4296 | 0,4475 |
| | En Küçük Kareler | 0,4879 | 0,4764 | 0,5888 | 0,5888 | 0,3622 | 0,3579 | 0,3474 | 0,3268 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5334 | 0,5750 | 0,6050 | 0,6050 | 0,4107 | 0,4029 | 0,4858 | 0,5347 |
| 1,20 | Galerkin | 0,6357 | 0,6604 | 0,7133 | 0,7133 | 0,4577 | 0,4444 | 0,5154 | 0,5313 |
| | En Küçük Kareler | 0,6000 | 0,5770 | 0,7006 | 0,7006 | 0,4280 | 0,4173 | 0,4138 | 0,3864 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6594 | 0,7010 | 0,7184 | 0,7184 | 0,4813 | 0,4640 | 0,5829 | 0,6341 |
| 1,30 | Galerkin | 0,7623 | 0,7816 | 0,8206 | 0,8206 | 0,5291 | 0,5065 | 0,6029 | 0,6147 |
| | En Küçük Kareler | 0,7164 | 0,6786 | 0,8061 | 0,8061 | 0,4947 | 0,4763 | 0,4815 | 0,4466 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7902 | 0,8297 | 0,8242 | 0,8242 | 0,5538 | 0,5254 | 0,6810 | 0,7307 |
| 1,40 | Galerkin | 0,8915 | 0,9012 | 0,9189 | 0,9189 | 0,6004 | 0,5673 | 0,6906 | 0,6963 |
| | En Küçük Kareler | 0,8348 | 0,7794 | 0,9031 | 0,9031 | 0,5616 | 0,5344 | 0,5498 | 0,5068 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9230 | 0,9541 | 0,9199 | 0,9199 | 0,6254 | 0,5848 | 0,7782 | 0,8228 |
| 1,60 | Galerkin | 1,1491 | 1,1278 | 1,0857 | 1,0857 | 0,7403 | 0,6833 | 0,8631 | 0,8510 |
| | En Küçük Kareler | 1,0709 | 0,9738 | 1,0689 | 1,0689 | 0,6931 | 0,6460 | 0,6857 | 0,6251 |
| | SEY (ANSYS) | 1,1852 | 1,1932 | 1,0788 | 1,0788 | 0,7664 | 0,6983 | 0,9649 | 0,9892 |
| 1,80 | Galerkin | 1,3954 | 1,3304 | 1,2153 | 1,2153 | 0,8730 | 0,7897 | 1,0268 | 0,9911 |
| | En Küçük Kareler | 1,2980 | 1,1533 | 1,1990 | 1,1990 | 0,8190 | 0,7494 | 0,8179 | 0,7385 |
| | SEY (ANSYS) | 1,4316 | 1,3951 | 1,1967 | 1,1967 | 0,8904 | 0,7935 | 1,1357 | 1,1244 |
| 2,00 | Galerkin | 1,6234 | 1,5060 | 1,3146 | 1,3146 | 0,9964 | 0,8857 | 1,1785 | 1,1154 |
| | En Küçük Kareler | 1,5103 | 1,3152 | 1,2993 | 1,2993 | 0,9370 | 0,8436 | 0,9442 | 0,8453 |
| | SEY (ANSYS) | 1,6547 | 1,5623 | 1,2810 | 1,2810 | 1,0061 | 0,8797 | 1,2871 | 1,2364 |
| 2,50 | Galerkin | 2,0987 | 1,8390 | 1,4737 | 1,4737 | 1,2592 | 1,0812 | 1,4991 | 1,3618 |
| | En Küçük Kareler | 1,9638 | 1,6437 | 1,4620 | 1,4620 | 1,1930 | 1,0389 | 1,2284 | 1,0794 |
| | SEY (ANSYS) | 2,0971 | 1,8485 | 1,3915 | 1,3915 | 1,2406 | 1,0454 | 1,5807 | 1,4331 |
| 3,00 | Galerkin | 2,4494 | 2,0589 | 1,5609 | 1,5609 | 1,4608 | 1,2237 | 1,7420 | 1,5350 |
| | En Küçük Kareler | 2,3120 | 1,8809 | 1,5523 | 1,5523 | 1,3946 | 1,1845 | 1,4650 | 1,2673 |
| | SEY (ANSYS) | 2,3935 | 2,0009 | 1,4219 | 1,4219 | 1,4057 | 1,1555 | 1,7726 | 1,5349 |
| 4,00 | Galerkin | 2,8929 | 2,3096 | 1,6457 | 1,6457 | 1,7286 | 1,4037 | 2,0603 | 1,7462 |
| | En Küçük Kareler | 2,7753 | 2,1769 | 1,6410 | 1,6410 | 1,6718 | 1,3733 | 1,8142 | 1,5315 |
| | SEY (ANSYS) | 2,7010 | 2,1073 | 1,4055 | 1,4055 | 1,5980 | 1,2714 | 1,9680 | 1,6217 |

Çizelge 3. 8 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,3500 | 0,3668 | 0,4302 | 0,4073 | 0,4847 | 0,4847 | 0,4073 | 0,4302 |
| | En Küçük Kareler | 0,2854 | 0,2699 | 0,3835 | 0,3886 | 0,4768 | 0,4768 | 0,3886 | 0,3835 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3916 | 0,4352 | 0,4513 | 0,4155 | 0,4878 | 0,4878 | 0,4155 | 0,4513 |
| 1,10 | Galerkin | 0,4099 | 0,4327 | 0,4884 | 0,4596 | 0,5584 | 0,5584 | 0,4596 | 0,4884 |
| | En Küçük Kareler | 0,3378 | 0,3222 | 0,4409 | 0,4410 | 0,5501 | 0,5501 | 0,4410 | 0,4409 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4531 | 0,5066 | 0,5065 | 0,4644 | 0,5594 | 0,5594 | 0,4644 | 0,5065 |
| 1,20 | Galerkin | 0,4676 | 0,4961 | 0,5398 | 0,5063 | 0,6222 | 0,6222 | 0,5063 | 0,5398 |
| | En Küçük Kareler | 0,3896 | 0,3744 | 0,4930 | 0,4883 | 0,6139 | 0,6139 | 0,4883 | 0,4930 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5106 | 0,5725 | 0,5515 | 0,5068 | 0,6201 | 0,6201 | 0,5068 | 0,5515 |
| 1,30 | Galerkin | 0,5226 | 0,5562 | 0,5848 | 0,5478 | 0,6763 | 0,6763 | 0,5478 | 0,5848 |
| | En Küçük Kareler | 0,4401 | 0,4258 | 0,5397 | 0,5306 | 0,6683 | 0,6683 | 0,5306 | 0,5397 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5637 | 0,6324 | 0,5929 | 0,5432 | 0,6702 | 0,6702 | 0,5432 | 0,5929 |
| 1,40 | Galerkin | 0,5743 | 0,6126 | 0,6240 | 0,5844 | 0,7219 | 0,7219 | 0,5844 | 0,6240 |
| | En Küçük Kareler | 0,4886 | 0,4757 | 0,5811 | 0,5682 | 0,7144 | 0,7144 | 0,5682 | 0,5811 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6122 | 0,6860 | 0,6222 | 0,5741 | 0,7109 | 0,7109 | 0,5741 | 0,6222 |
| 1,60 | Galerkin | 0,6678 | 0,7135 | 0,6877 | 0,6451 | 0,7923 | 0,7923 | 0,6451 | 0,6877 |
| | En Küçük Kareler | 0,5789 | 0,5696 | 0,6500 | 0,6310 | 0,7860 | 0,7860 | 0,6310 | 0,6500 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6958 | 0,7758 | 0,6742 | 0,6222 | 0,7691 | 0,7691 | 0,6222 | 0,6742 |
| 1,80 | Galerkin | 0,7479 | 0,7991 | 0,7361 | 0,6924 | 0,8423 | 0,8423 | 0,6924 | 0,7361 |
| | En Küçük Kareler | 0,6593 | 0,6543 | 0,7035 | 0,6802 | 0,8370 | 0,8370 | 0,6802 | 0,7035 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7631 | 0,8416 | 0,7063 | 0,6560 | 0,8043 | 0,8043 | 0,6560 | 0,7063 |
| 2,00 | Galerkin | 0,8160 | 0,8710 | 0,7732 | 0,7295 | 0,8783 | 0,8783 | 0,7295 | 0,7732 |
| | En Küçük Kareler | 0,7298 | 0,7295 | 0,7451 | 0,7190 | 0,8740 | 0,8740 | 0,7190 | 0,7451 |
| | SEY (ANSYS) | 0,8166 | 0,8929 | 0,7240 | 0,6795 | 0,8238 | 0,8238 | 0,6795 | 0,7240 |
| 2,50 | Galerkin | 0,9437 | 1,0039 | 0,8344 | 0,7925 | 0,9333 | 0,9333 | 0,7925 | 0,8344 |
| | En Küçük Kareler | 0,8685 | 0,8794 | 0,8149 | 0,7852 | 0,9307 | 0,9307 | 0,7852 | 0,8149 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9055 | 0,9765 | 0,7497 | 0,7108 | 0,8352 | 0,8352 | 0,7108 | 0,7497 |
| 3,00 | Galerkin | 1,0287 | 1,0907 | 0,8700 | 0,8301 | 0,9625 | 0,9625 | 0,8301 | 0,8700 |
| | En Küçük Kareler | 0,9655 | 0,9859 | 0,8560 | 0,8249 | 0,9609 | 0,9609 | 0,8249 | 0,8560 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9535 | 1,0141 | 0,7548 | 0,7227 | 0,8266 | 0,8266 | 0,7227 | 0,7548 |
| 4,00 | Galerkin | 1,1274 | 1,1899 | 0,9071 | 0,8703 | 0,9908 | 0,9908 | 0,8703 | 0,9071 |
| | En Küçük Kareler | 1,0839 | 1,1175 | 0,8991 | 0,8674 | 0,9901 | 0,9901 | 0,8674 | 0,8991 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9930 | 1,0454 | 0,7544 | 0,7286 | 0,8106 | 0,8106 | 0,7286 | 0,7544 |

Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a

| b/a | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,3471 | 0,3649 | 0,3185 | 0,3194 | 0,3668 | 0,3500 | 0,4006 | 0,4253 |
| | En Küçük Kareler | 0,2833 | 0,2688 | 0,2983 | 0,2991 | 0,2699 | 0,2854 | 0,3825 | 0,3793 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3916 | 0,4352 | 0,3393 | 0,3393 | 0,4352 | 0,3916 | 0,4155 | 0,4513 |
| 1,10 | Galerkin | 0,4045 | 0,4285 | 0,3788 | 0,3866 | 0,4478 | 0,4314 | 0,4493 | 0,4802 |
| | En Küçük Kareler | 0,3339 | 0,3194 | 0,3553 | 0,3617 | 0,3268 | 0,3484 | 0,4315 | 0,4338 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4531 | 0,5066 | 0,4029 | 0,4107 | 0,5347 | 0,4858 | 0,4644 | 0,5065 |
| 1,20 | Galerkin | 0,4593 | 0,4892 | 0,4391 | 0,4552 | 0,5296 | 0,5154 | 0,4918 | 0,5277 |
| | En Küçük Kareler | 0,3834 | 0,3696 | 0,4124 | 0,4256 | 0,3848 | 0,4133 | 0,4750 | 0,4825 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5106 | 0,5725 | 0,4640 | 0,4813 | 0,6341 | 0,5829 | 0,5068 | 0,5515 |
| 1,30 | Galerkin | 0,5108 | 0,5460 | 0,4984 | 0,5241 | 0,6105 | 0,6007 | 0,5285 | 0,5681 |
| | En Küçük Kareler | 0,4312 | 0,4186 | 0,4689 | 0,4901 | 0,4430 | 0,4792 | 0,5128 | 0,5253 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5637 | 0,6299 | 0,5254 | 0,5538 | 0,7278 | 0,6810 | 0,5432 | 0,5907 |
| 1,40 | Galerkin | 0,5587 | 0,5986 | 0,5561 | 0,5926 | 0,6891 | 0,6857 | 0,5598 | 0,6021 |
| | En Küçük Kareler | 0,4767 | 0,4658 | 0,5240 | 0,5542 | 0,5009 | 0,5452 | 0,5455 | 0,5623 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6122 | 0,6833 | 0,5848 | 0,6254 | 0,8195 | 0,7782 | 0,5741 | 0,6222 |
| 1,60 | Galerkin | 0,6431 | 0,6904 | 0,6644 | 0,7255 | 0,8362 | 0,8512 | 0,6084 | 0,6535 |
| | En Küçük Kareler | 0,5600 | 0,5532 | 0,6285 | 0,6792 | 0,6135 | 0,6754 | 0,5971 | 0,6208 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6958 | 0,7758 | 0,6983 | 0,7664 | 0,9892 | 0,9649 | 0,6222 | 0,6742 |
| 1,80 | Galerkin | 0,7127 | 0,7651 | 0,7618 | 0,8496 | 0,9666 | 1,0060 | 0,6423 | 0,6877 |
| | En Küçük Kareler | 0,6322 | 0,6303 | 0,7236 | 0,7971 | 0,7196 | 0,8002 | 0,6338 | 0,6622 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7631 | 0,8403 | 0,7922 | 0,8888 | 1,1225 | 1,1357 | 0,6560 | 0,7025 |
| 2,00 | Galerkin | 0,7692 | 0,8247 | 0,8475 | 0,9630 | 1,0792 | 1,1469 | 0,6652 | 0,7094 |
| | En Küçük Kareler | 0,6935 | 0,6969 | 0,8082 | 0,9058 | 0,8180 | 0,9178 | 0,6592 | 0,6905 |
| | SEY (ANSYS) | 0,8166 | 0,8929 | 0,8782 | 1,0042 | 1,2364 | 1,2871 | 0,6795 | 0,7269 |
| 2,50 | Galerkin | 0,8647 | 0,9227 | 1,0132 | 1,1954 | 1,2895 | 1,4333 | 0,6922 | 0,7307 |
| | En Küçük Kareler | 0,8059 | 0,8216 | 0,9756 | 1,1335 | 1,0264 | 1,1747 | 0,6907 | 0,7247 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9055 | 0,9765 | 1,0454 | 1,2406 | 1,4331 | 1,5807 | 0,7108 | 0,7436 |
| 3,00 | Galerkin | 0,9157 | 0,9723 | 1,1223 | 1,3614 | 1,4196 | 1,6343 | 0,6970 | 0,7293 |
| | En Küçük Kareler | 0,8742 | 0,8999 | 1,0899 | 1,3020 | 1,1840 | 1,3786 | 0,6980 | 0,7309 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9535 | 1,0160 | 1,1519 | 1,4029 | 1,5380 | 1,7726 | 0,7227 | 0,7505 |
| 4,00 | Galerkin | 0,9510 | 1,0019 | 1,2331 | 1,5508 | 1,5382 | 1,8573 | 0,6861 | 0,7103 |
| | En Küçük Kareler | 0,9354 | 0,9739 | 1,2130 | 1,5061 | 1,3822 | 1,6541 | 0,6888 | 0,7171 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9930 | 1,0454 | 1,2714 | 1,5980 | 1,6217 | 1,9680 | 0,7286 | 0,7544 |

Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

| b/a | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,4006 | 0,4253 | 0,4823 | 0,4823 | 0,3185 | 0,3194 | 0,3471 | 0,3649 |
| | En Küçük Kareler | 0,3825 | 0,3793 | 0,4743 | 0,4743 | 0,2983 | 0,2991 | 0,2833 | 0,2688 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4155 | 0,4513 | 0,4878 | 0,4878 | 0,3393 | 0,3393 | 0,3916 | 0,4352 |
| 1,10 | Galerkin | 0,4493 | 0,4802 | 0,5533 | 0,5533 | 0,3788 | 0,3866 | 0,4045 | 0,4285 |
| | En Küçük Kareler | 0,4315 | 0,4338 | 0,5450 | 0,5450 | 0,3553 | 0,3617 | 0,3339 | 0,3194 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4644 | 0,5065 | 0,5594 | 0,5594 | 0,4029 | 0,4107 | 0,4531 | 0,5066 |
| 1,20 | Galerkin | 0,4918 | 0,5277 | 0,6136 | 0,6136 | 0,4391 | 0,4552 | 0,4593 | 0,4892 |
| | En Küçük Kareler | 0,4750 | 0,4825 | 0,6054 | 0,6054 | 0,4124 | 0,4256 | 0,3834 | 0,3696 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5068 | 0,5515 | 0,6201 | 0,6201 | 0,4640 | 0,4813 | 0,5106 | 0,5725 |
| 1,30 | Galerkin | 0,5285 | 0,5681 | 0,6636 | 0,6636 | 0,4984 | 0,5241 | 0,5108 | 0,5460 |
| | En Küçük Kareler | 0,5128 | 0,5253 | 0,6558 | 0,6558 | 0,4689 | 0,4901 | 0,4312 | 0,4186 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5432 | 0,5907 | 0,6702 | 0,6702 | 0,5254 | 0,5538 | 0,5637 | 0,6299 |
| 1,40 | Galerkin | 0,5598 | 0,6021 | 0,7043 | 0,7043 | 0,5561 | 0,5926 | 0,5587 | 0,5986 |
| | En Küçük Kareler | 0,5455 | 0,5623 | 0,6970 | 0,6970 | 0,5240 | 0,5542 | 0,4767 | 0,4658 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5741 | 0,6222 | 0,7109 | 0,7109 | 0,5848 | 0,6254 | 0,6122 | 0,6833 |
| 1,60 | Galerkin | 0,6084 | 0,6535 | 0,7624 | 0,7624 | 0,6644 | 0,7255 | 0,6431 | 0,6904 |
| | En Küçük Kareler | 0,5971 | 0,6208 | 0,7565 | 0,7565 | 0,6285 | 0,6792 | 0,5600 | 0,5532 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6222 | 0,6742 | 0,7691 | 0,7691 | 0,6983 | 0,7664 | 0,6958 | 0,7758 |
| 1,80 | Galerkin | 0,6423 | 0,6877 | 0,7972 | 0,7972 | 0,7618 | 0,8496 | 0,7127 | 0,7651 |
| | En Küçük Kareler | 0,6338 | 0,6622 | 0,7927 | 0,7927 | 0,7236 | 0,7971 | 0,6322 | 0,6303 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6560 | 0,7025 | 0,8043 | 0,8043 | 0,7922 | 0,8888 | 0,7631 | 0,8403 |
| 2,00 | Galerkin | 0,6652 | 0,7094 | 0,8157 | 0,8157 | 0,8475 | 0,9630 | 0,7692 | 0,8247 |
| | En Küçük Kareler | 0,6592 | 0,6905 | 0,8125 | 0,8125 | 0,8082 | 0,9058 | 0,6935 | 0,6969 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6795 | 0,7269 | 0,8238 | 0,8238 | 0,8782 | 1,0042 | 0,8166 | 0,8929 |
| 2,50 | Galerkin | 0,6922 | 0,7307 | 0,8218 | 0,8218 | 1,0132 | 1,1954 | 0,8647 | 0,9227 |
| | En Küçük Kareler | 0,6907 | 0,7247 | 0,8212 | 0,8212 | 0,9756 | 1,1335 | 0,8059 | 0,8216 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7108 | 0,7436 | 0,8352 | 0,8352 | 1,0454 | 1,2406 | 0,9055 | 0,9765 |
| 3,00 | Galerkin | 0,6970 | 0,7293 | 0,8038 | 0,8038 | 1,1223 | 1,3614 | 0,9157 | 0,9723 |
| | En Küçük Kareler | 0,6980 | 0,7309 | 0,8048 | 0,8048 | 1,0899 | 1,3020 | 0,8742 | 0,8999 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7227 | 0,7505 | 0,8266 | 0,8266 | 1,1519 | 1,4029 | 0,9535 | 1,0160 |
| 4,00 | Galerkin | 0,6861 | 0,7103 | 0,7628 | 0,7628 | 1,2331 | 1,5508 | 0,9510 | 1,0019 |
| | En Küçük Kareler | 0,6888 | 0,7171 | 0,7647 | 0,7647 | 1,2130 | 1,5061 | 0,9354 | 0,9739 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7286 | 0,7544 | 0,8106 | 0,8106 | 1,2714 | 1,5980 | 0,9930 | 1,0454 |

Çizelge 3. 9 Maksimum Çökme Değeri w (mm), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

| b/a | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) | w (mm) |
| 1,00 | Galerkin | 0,3500 | 0,3668 | 0,4302 | 0,4073 | 0,4847 | 0,4847 | 0,4073 | 0,4302 |
| | En Küçük Kareler | 0,2854 | 0,2699 | 0,3835 | 0,3886 | 0,4768 | 0,4768 | 0,3886 | 0,3835 |
| | SEY (ANSYS) | 0,3916 | 0,4352 | 0,4513 | 0,4155 | 0,4878 | 0,4878 | 0,4155 | 0,4513 |
| 1,10 | Galerkin | 0,4314 | 0,4478 | 0,5442 | 0,5200 | 0,6001 | 0,6001 | 0,5200 | 0,5442 |
| | En Küçük Kareler | 0,3484 | 0,3268 | 0,4796 | 0,4932 | 0,5896 | 0,5896 | 0,4932 | 0,4796 |
| | SEY (ANSYS) | 0,4858 | 0,5347 | 0,5750 | 0,5334 | 0,6050 | 0,6050 | 0,5334 | 0,5750 |
| 1,20 | Galerkin | 0,5154 | 0,5296 | 0,6625 | 0,6402 | 0,7120 | 0,7120 | 0,6402 | 0,6625 |
| | En Küçük Kareler | 0,4133 | 0,3848 | 0,5786 | 0,6041 | 0,6993 | 0,6993 | 0,6041 | 0,5786 |
| | SEY (ANSYS) | 0,5829 | 0,6341 | 0,7010 | 0,6594 | 0,7184 | 0,7184 | 0,6594 | 0,7010 |
| 1,30 | Galerkin | 0,6007 | 0,6105 | 0,7815 | 0,7650 | 0,8165 | 0,8165 | 0,7650 | 0,7815 |
| | En Küçük Kareler | 0,4792 | 0,4430 | 0,6781 | 0,7187 | 0,8021 | 0,8021 | 0,7187 | 0,6781 |
| | SEY (ANSYS) | 0,6810 | 0,7278 | 0,8297 | 0,7902 | 0,8242 | 0,8242 | 0,7902 | 0,8297 |
| 1,40 | Galerkin | 0,6857 | 0,6891 | 0,8983 | 0,8918 | 0,9114 | 0,9114 | 0,8918 | 0,8983 |
| | En Küçük Kareler | 0,5452 | 0,5009 | 0,7764 | 0,8348 | 0,8957 | 0,8957 | 0,8348 | 0,7764 |
| | SEY (ANSYS) | 0,7782 | 0,8195 | 0,9541 | 0,9230 | 0,9199 | 0,9199 | 0,9230 | 0,9541 |
| 1,60 | Galerkin | 0,8512 | 0,8362 | 1,1175 | 1,1427 | 1,0694 | 1,0694 | 1,1427 | 1,1175 |
| | En Küçük Kareler | 0,6754 | 0,6135 | 0,9638 | 1,0645 | 1,0528 | 1,0528 | 1,0645 | 0,9638 |
| | SEY (ANSYS) | 0,9649 | 0,9892 | 1,1932 | 1,1852 | 1,0788 | 1,0788 | 1,1852 | 1,1932 |
| 1,80 | Galerkin | 1,0060 | 0,9666 | 1,3099 | 1,3799 | 1,1871 | 1,1871 | 1,3799 | 1,3099 |
| | En Küçük Kareler | 0,8002 | 0,7196 | 1,1340 | 1,2827 | 1,1710 | 1,1710 | 1,2827 | 1,1340 |
| | SEY (ANSYS) | 1,1357 | 1,1225 | 1,3876 | 1,4316 | 1,1967 | 1,1967 | 1,4316 | 1,3876 |
| 2,00 | Galerkin | 1,1469 | 1,0792 | 1,4728 | 1,5962 | 1,2713 | 1,2713 | 1,5962 | 1,4728 |
| | En Küçük Kareler | 0,9178 | 0,8180 | 1,2843 | 1,4837 | 1,2565 | 1,2565 | 1,4837 | 1,2843 |
| | SEY (ANSYS) | 1,2871 | 1,2364 | 1,5559 | 1,6547 | 1,2810 | 1,2810 | 1,6547 | 1,5559 |
| 2,50 | Galerkin | 1,4333 | 1,2895 | 1,7623 | 2,0309 | 1,3801 | 1,3801 | 2,0309 | 1,7623 |
| | En Küçük Kareler | 1,1747 | 1,0264 | 1,5743 | 1,8987 | 1,3698 | 1,3698 | 1,8987 | 1,5743 |
| | SEY (ANSYS) | 1,5807 | 1,4331 | 1,8338 | 2,0971 | 1,3915 | 1,3915 | 2,0971 | 1,8338 |
| 3,00 | Galerkin | 1,6343 | 1,4196 | 1,9251 | 2,3269 | 1,4051 | 1,4051 | 2,3269 | 1,9251 |
| | En Küçük Kareler | 1,3786 | 1,1840 | 1,7625 | 2,1956 | 1,3992 | 1,3992 | 2,1956 | 1,7625 |
| | SEY (ANSYS) | 1,7726 | 1,5380 | 2,0009 | 2,3935 | 1,4219 | 1,4219 | 2,3935 | 2,0009 |
| 4,00 | Galerkin | 1,8573 | 1,5382 | 2,0434 | 2,6353 | 1,3659 | 1,3659 | 2,6353 | 2,0434 |
| | En Küçük Kareler | 1,6541 | 1,3822 | 1,9473 | 2,5342 | 1,3661 | 1,3661 | 2,5342 | 1,9473 |
| | SEY (ANSYS) | 1,9680 | 1,6217 | 2,1073 | 2,7010 | 1,4055 | 1,4055 | 2,7010 | 2,1073 |

### 3.4 Dinamik Analiz Sonuçları

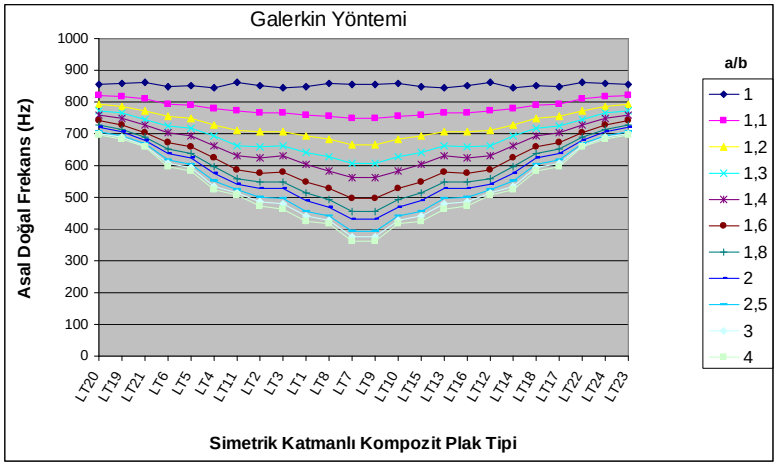
Bu bölümde, Bölüm 3. 1 ve 3. 2'deki verilen parametrelerin kullanımıyla, 24 farklı simetrik katmanlı kompozit plak tipinin asal doğal frekansı Galerkin Yöntemi, En Küçük Kareler Yöntemi ve SEY (ANSYS) ile bulunan sonuçları; ankastre mesnet sınır koşulu için Şekil 3. 12, 3. 15 ve Çizelge 3. 10, 3. 11'de ve basit mesnet sınır koşulu için ise Şekil 3. 16, 3. 19 ve Çizelge 3. 12, 3. 13'te sunulmaktadır.

Ankastre mesnet sınır koşullarında; Şekil 3. 12'de plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 13'te plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda üç yöntemle bulunan sonuçlar ayrı grafiklerle gösterilmektedir.

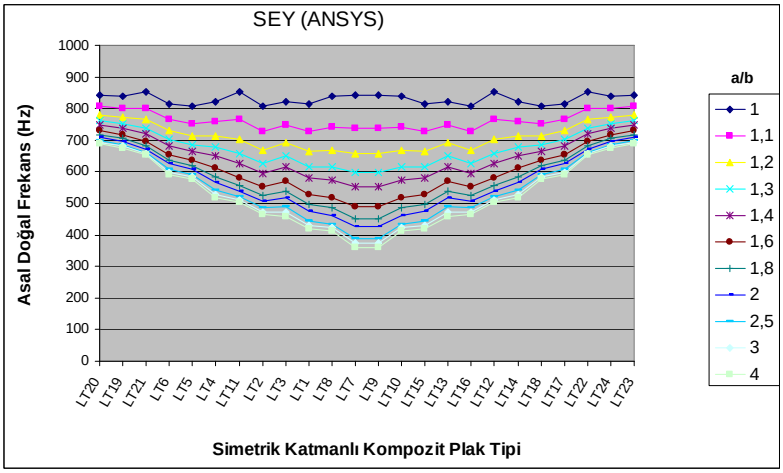
Şekil 3. 14'te plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 15'te plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda 12 farklı plak tipi üç yöntemle bulunan sonuçlar gösterilmektedir.

Basit mesnet sınır koşullarında; Şekil 3. 16'da plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 17'de plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda üç yöntemle bulunan sonuçlar ayrı grafiklerle gösterilmektedir.

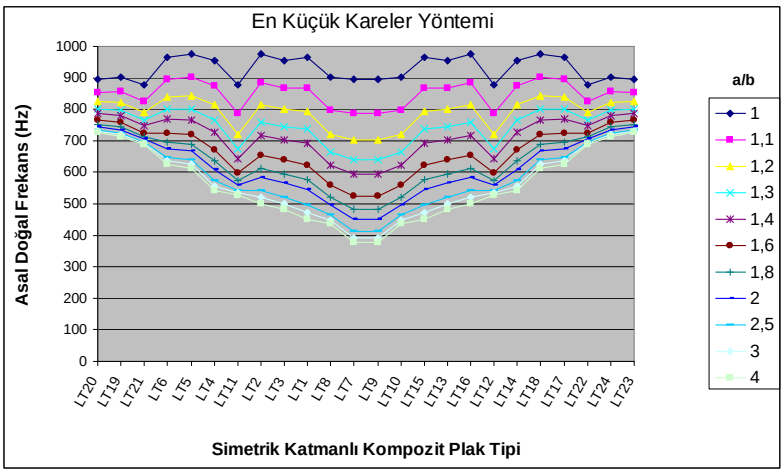
Şekil 3. 18'te plak kısa kenarının b kenarı seçilmesi durumunda ve Şekil 3. 19'da plak kısa kenarının a kenarı seçilmesi durumunda 12 farklı plak tipi üç yöntemle bulunan sonuçlar gösterilmektedir.




(a)

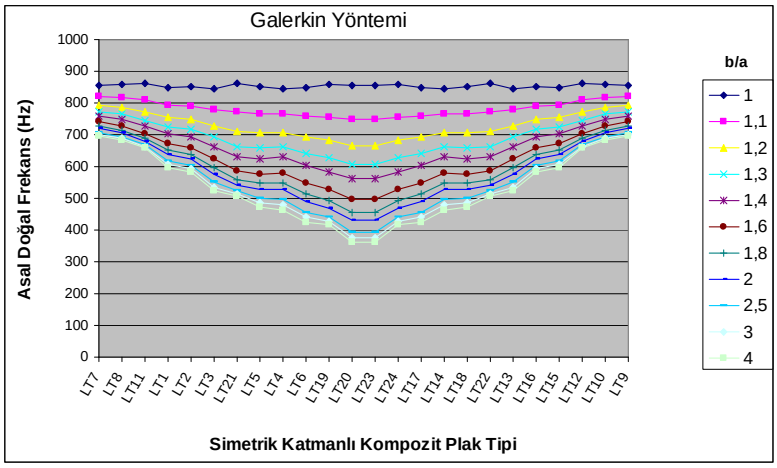



(b)

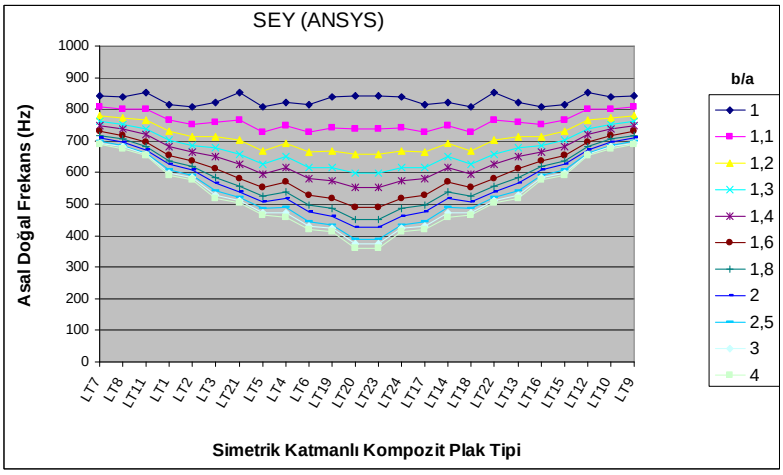



(c)

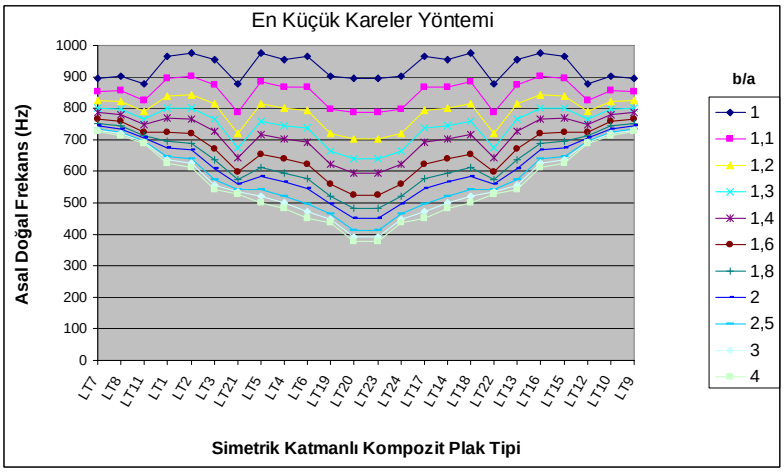
Şekil 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

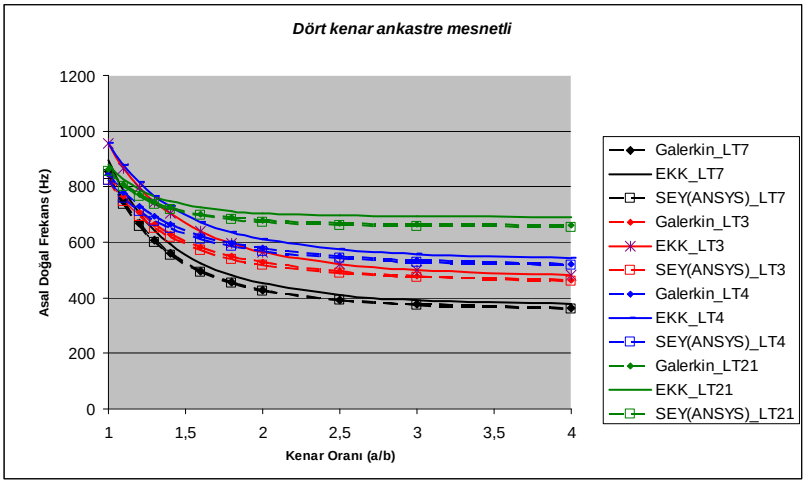



(b)

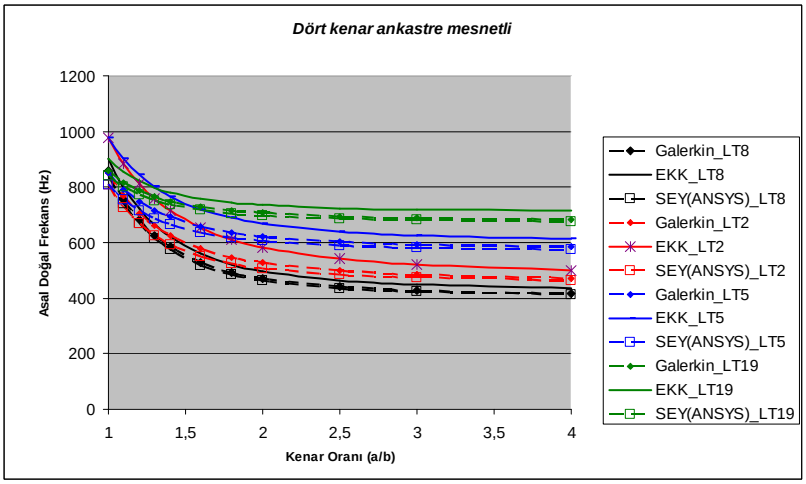



(c)

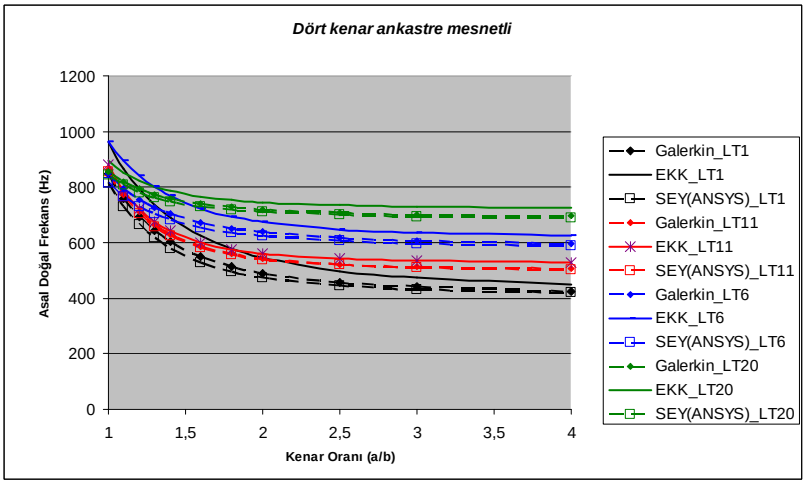
Şekil 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

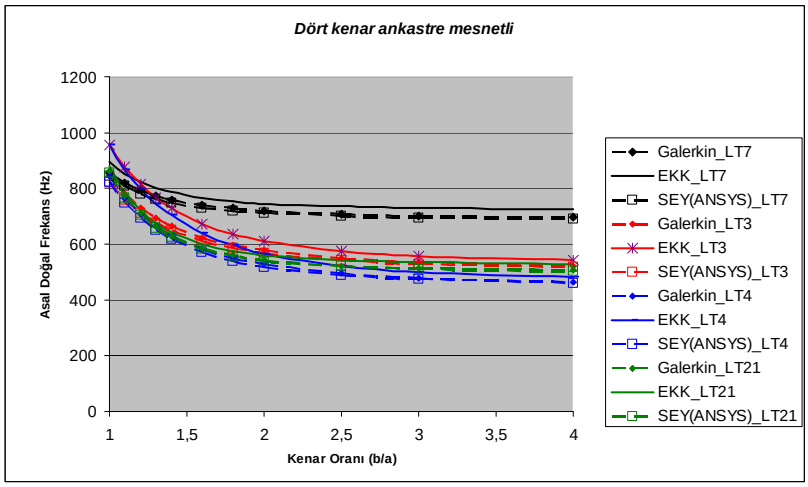



(b)

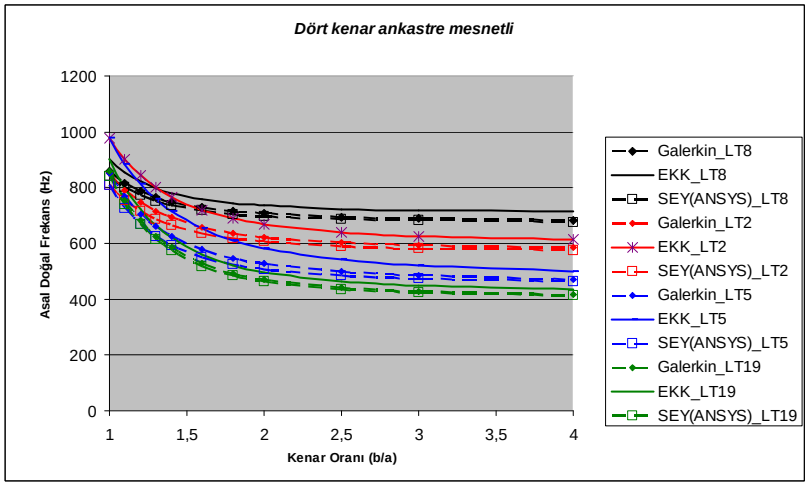



(c)

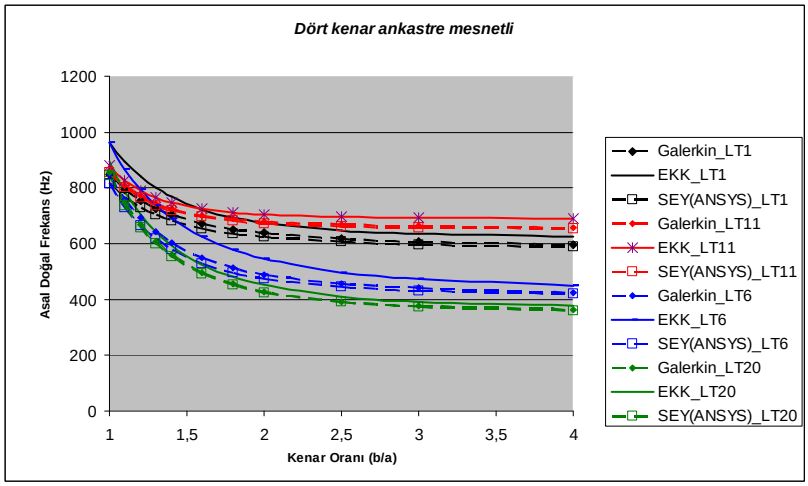
Şekil 3. 14 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1,LT11, LT6, LT20




(a)




(b)




(c)

Şekil 3. 15 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1,LT11, LT6, LT20

Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b

| a/b | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 849,13 | 851,53 | 844,30 | 844,30 | 851,53 | 849,13 | 856,32 | 858,71 |
| | En Küçük Kareler | 964,03 | 976,26 | 954,70 | 954,70 | 976,26 | 964,03 | 895,49 | 903,56 |
| | SEY (ANSYS) | 815,79 | 807,37 | 823,32 | 823,32 | 807,37 | 815,79 | 842,52 | 840,90 |
| 1,10 | Galerkin | 758,55 | 767,20 | 765,87 | 778,03 | 791,29 | 794,81 | 747,45 | 756,22 |
| | En Küçük Kareler | 867,31 | 883,21 | 866,91 | 875,48 | 900,65 | 893,65 | 785,17 | 798,68 |
| | SEY (ANSYS) | 728,70 | 727,13 | 747,92 | 759,55 | 752,86 | 765,68 | 736,33 | 740,77 |
| 1,20 | Galerkin | 691,75 | 705,71 | 707,69 | 729,03 | 747,90 | 755,32 | 667,12 | 681,58 |
| | En Küçük Kareler | 793,70 | 812,94 | 799,06 | 814,36 | 843,94 | 840,55 | 703,50 | 721,97 |
| | SEY (ANSYS) | 664,66 | 669,19 | 692,00 | 712,48 | 714,16 | 729,53 | 657,85 | 667,83 |
| 1,30 | Galerkin | 641,41 | 659,89 | 663,53 | 691,93 | 715,84 | 725,86 | 606,70 | 626,21 |
| | En Küçük Kareler | 736,30 | 758,63 | 745,48 | 766,34 | 800,58 | 799,81 | 641,60 | 664,61 |
| | SEY (ANSYS) | 616,62 | 626,52 | 649,58 | 676,88 | 685,97 | 702,75 | 598,76 | 613,77 |
| 1,40 | Galerkin | 602,76 | 625,09 | 629,35 | 663,24 | 691,63 | 703,38 | 560,51 | 584,46 |
| | En Küçük Kareler | 690,65 | 715,84 | 702,48 | 728,10 | 766,89 | 768,11 | 593,73 | 620,91 |
| | SEY (ANSYS) | 579,94 | 594,55 | 616,75 | 649,40 | 664,93 | 682,45 | 553,54 | 573,09 |
| 1,60 | Galerkin | 548,67 | 577,10 | 580,86 | 622,56 | 658,35 | 672,01 | 496,48 | 527,73 |
| | En Küçük Kareler | 623,59 | 653,85 | 638,85 | 672,32 | 719,25 | 723,28 | 526,08 | 560,50 |
| | SEY (ANSYS) | 529,09 | 551,33 | 570,26 | 610,53 | 636,44 | 654,33 | 490,87 | 518,07 |
| 1,80 | Galerkin | 513,83 | 546,73 | 548,99 | 595,80 | 637,25 | 651,74 | 456,03 | 492,81 |
| | En Küçük Kareler | 577,76 | 612,26 | 595,31 | 635,04 | 688,42 | 694,38 | 482,09 | 522,40 |
| | SEY (ANSYS) | 496,84 | 524,76 | 539,79 | 585,06 | 618,68 | 636,33 | 451,30 | 484,45 |
| 2,00 | Galerkin | 490,28 | 526,51 | 527,02 | 577,30 | 623,10 | 637,92 | 429,32 | 470,27 |
| | En Küçük Kareler | 545,32 | 583,29 | 564,75 | 609,49 | 667,69 | 675,06 | 452,37 | 497,33 |
| | SEY (ANSYS) | 475,40 | 507,54 | 518,86 | 567,54 | 606,95 | 624,16 | 425,23 | 462,95 |
| 2,50 | Galerkin | 456,83 | 498,30 | 494,86 | 550,09 | 603,09 | 617,91 | 392,93 | 440,46 |
| | En Küçük Kareler | 497,05 | 541,02 | 520,48 | 573,66 | 638,81 | 648,44 | 411,11 | 463,54 |
| | SEY (ANSYS) | 445,73 | 484,43 | 488,46 | 541,98 | 590,65 | 606,75 | 389,85 | 434,92 |
| 3,00 | Galerkin | 440,24 | 484,59 | 478,30 | 535,97 | 593,14 | 607,69 | 375,99 | 427,06 |
| | En Küçük Kareler | 472,49 | 519,84 | 499,13 | 556,91 | 625,05 | 635,96 | 392,05 | 448,27 |
| | SEY (ANSYS) | 431,58 | 473,74 | 473,01 | 528,91 | 582,73 | 598,02 | 373,51 | 422,59 |
| 4,00 | Galerkin | 425,03 | 472,21 | 462,56 | 522,45 | 583,92 | 598,02 | 361,48 | 415,94 |
| | En Küçük Kareler | 450,26 | 500,71 | 481,11 | 542,96 | 613,04 | 625,23 | 376,52 | 435,79 |
| | SEY (ANSYS) | 419,14 | 464,57 | 458,60 | 516,62 | 575,58 | 589,92 | 359,70 | 412,60 |

Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 856,32 | 858,71 | 863,46 | 863,46 | 844,30 | 844,30 | 849,13 | 851,53 |
| | En Küçük Kareler | 895,49 | 903,56 | 878,73 | 878,73 | 954,70 | 954,70 | 964,03 | 976,26 |
| | SEY (ANSYS) | 842,52 | 840,90 | 854,39 | 854,39 | 823,32 | 823,32 | 815,79 | 807,37 |
| 1,10 | Galerkin | 747,45 | 756,22 | 773,48 | 773,48 | 765,87 | 778,03 | 758,55 | 767,20 |
| | En Küçük Kareler | 785,17 | 798,68 | 786,34 | 786,34 | 866,91 | 875,48 | 867,31 | 883,21 |
| | SEY (ANSYS) | 736,33 | 740,77 | 766,13 | 766,13 | 747,92 | 759,55 | 728,70 | 727,13 |
| 1,20 | Galerkin | 667,12 | 681,59 | 709,63 | 709,63 | 707,69 | 729,03 | 691,75 | 705,71 |
| | En Küçük Kareler | 703,50 | 721,97 | 721,56 | 721,56 | 799,06 | 814,36 | 793,70 | 812,94 |
| | SEY (ANSYS) | 657,85 | 667,83 | 703,41 | 703,41 | 692,00 | 712,48 | 664,66 | 669,19 |
| 1,30 | Galerkin | 606,70 | 626,21 | 663,51 | 663,51 | 663,53 | 691,93 | 641,41 | 659,89 |
| | En Küçük Kareler | 641,60 | 664,61 | 675,39 | 675,38 | 745,48 | 766,34 | 736,30 | 758,63 |
| | SEY (ANSYS) | 598,76 | 613,77 | 658,06 | 658,06 | 649,58 | 676,88 | 616,62 | 626,52 |
| 1,40 | Galerkin | 560,51 | 584,46 | 629,64 | 629,64 | 629,35 | 663,24 | 602,76 | 625,09 |
| | En Küçük Kareler | 593,73 | 620,91 | 641,97 | 641,97 | 702,48 | 728,10 | 690,65 | 715,84 |
| | SEY (ANSYS) | 553,54 | 573,09 | 624,72 | 624,72 | 616,75 | 649,40 | 579,94 | 594,55 |
| 1,60 | Galerkin | 496,48 | 527,74 | 585,25 | 585,25 | 580,86 | 622,56 | 548,67 | 577,10 |
| | En Küçük Kareler | 526,08 | 560,50 | 599,09 | 599,09 | 638,85 | 672,32 | 623,59 | 653,85 |
| | SEY (ANSYS) | 490,87 | 518,07 | 581,01 | 581,01 | 570,26 | 610,53 | 529,09 | 551,33 |
| 1,80 | Galerkin | 456,03 | 492,81 | 559,15 | 559,15 | 548,99 | 595,80 | 513,83 | 546,73 |
| | En Küçük Kareler | 482,09 | 522,40 | 574,59 | 574,59 | 595,31 | 635,04 | 577,76 | 612,26 |
| | SEY (ANSYS) | 451,30 | 484,45 | 555,28 | 555,28 | 539,79 | 585,06 | 496,84 | 524,76 |
| 2,00 | Galerkin | 429,32 | 470,27 | 542,98 | 542,98 | 527,02 | 577,30 | 490,28 | 526,51 |
| | En Küçük Kareler | 452,37 | 497,33 | 559,80 | 559,80 | 564,75 | 609,49 | 545,32 | 583,29 |
| | SEY (ANSYS) | 425,23 | 462,95 | 539,33 | 539,33 | 518,86 | 567,54 | 475,40 | 507,54 |
| 2,50 | Galerkin | 392,93 | 440,46 | 522,71 | 522,71 | 494,86 | 550,09 | 456,83 | 498,30 |
| | En Küçük Kareler | 411,11 | 463,54 | 541,95 | 541,95 | 520,48 | 573,66 | 497,05 | 541,02 |
| | SEY (ANSYS) | 389,85 | 434,92 | 519,32 | 519,32 | 488,46 | 541,98 | 445,73 | 484,43 |
| 3,00 | Galerkin | 375,99 | 427,06 | 514,20 | 514,20 | 478,30 | 535,97 | 440,24 | 484,59 |
| | En Küçük Kareler | 392,05 | 448,27 | 534,85 | 534,85 | 499,13 | 556,91 | 472,49 | 519,84 |
| | SEY (ANSYS) | 373,51 | 422,59 | 510,92 | 510,92 | 473,01 | 528,91 | 431,58 | 473,74 |
| 4,00 | Galerkin | 361,48 | 415,94 | 507,62 | 507,62 | 462,56 | 522,45 | 425,03 | 472,21 |
| | En Küçük Kareler | 376,52 | 435,79 | 529,70 | 529,70 | 481,11 | 542,96 | 450,26 | 500,71 |
| | SEY (ANSYS) | 359,70 | 412,60 | 504,43 | 504,43 | 458,60 | 516,62 | 419,14 | 464,57 |

Çizelge 3. 10 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 849,13 | 851,53 | 858,71 | 856,32 | 863,46 | 863,46 | 856,32 | 858,71 |
| | En Küçük Kareler | 964,03 | 976,26 | 903,56 | 895,49 | 878,73 | 878,73 | 895,49 | 903,56 |
| | SEY (ANSYS) | 815,79 | 807,37 | 840,90 | 842,52 | 854,39 | 854,39 | 842,52 | 840,90 |
| 1,10 | Galerkin | 794,81 | 791,29 | 815,93 | 819,34 | 809,07 | 809,07 | 819,34 | 815,93 |
| | En Küçük Kareler | 893,65 | 900,65 | 855,42 | 853,29 | 825,11 | 825,11 | 853,29 | 855,42 |
| | SEY (ANSYS) | 765,68 | 752,86 | 800,19 | 806,62 | 800,83 | 800,83 | 806,62 | 800,19 |
| 1,20 | Galerkin | 755,32 | 747,90 | 786,05 | 793,11 | 771,73 | 771,73 | 793,11 | 786,05 |
| | En Küçük Kareler | 840,55 | 843,94 | 821,73 | 823,49 | 789,02 | 789,02 | 823,49 | 821,72 |
| | SEY (ANSYS) | 729,53 | 714,16 | 771,89 | 781,21 | 764,04 | 764,04 | 781,21 | 771,89 |
| 1,30 | Galerkin | 725,86 | 715,84 | 764,58 | 773,96 | 745,46 | 745,46 | 773,96 | 764,58 |
| | En Küçük Kareler | 799,81 | 800,58 | 797,62 | 802,01 | 764,13 | 764,13 | 802,01 | 797,62 |
| | SEY (ANSYS) | 702,75 | 685,97 | 751,61 | 762,68 | 738,15 | 738,15 | 762,68 | 751,61 |
| 1,40 | Galerkin | 703,38 | 691,63 | 748,75 | 759,61 | 726,54 | 726,54 | 759,62 | 748,75 |
| | En Küçük Kareler | 768,11 | 766,89 | 780,03 | 786,24 | 746,54 | 746,54 | 786,24 | 780,03 |
| | SEY (ANSYS) | 682,45 | 664,93 | 736,71 | 748,82 | 719,50 | 719,50 | 748,82 | 736,71 |
| 1,60 | Galerkin | 672,01 | 658,35 | 727,63 | 740,02 | 702,20 | 702,20 | 740,02 | 727,63 |
| | En Küçük Kareler | 723,28 | 719,25 | 757,03 | 765,45 | 724,47 | 724,47 | 765,45 | 757,03 |
| | SEY (ANSYS) | 654,33 | 636,44 | 716,88 | 729,92 | 695,49 | 695,49 | 729,92 | 716,88 |
| 1,80 | Galerkin | 651,74 | 637,25 | 714,68 | 727,64 | 688,04 | 688,04 | 727,64 | 714,68 |
| | En Küçük Kareler | 694,38 | 688,42 | 743,42 | 753,05 | 712,06 | 712,06 | 753,05 | 743,42 |
| | SEY (ANSYS) | 636,33 | 618,68 | 704,77 | 718,02 | 681,53 | 681,53 | 718,02 | 704,77 |
| 2,00 | Galerkin | 637,92 | 623,10 | 706,24 | 719,34 | 679,26 | 679,26 | 719,34 | 706,24 |
| | En Küçük Kareler | 675,06 | 667,68 | 734,87 | 745,19 | 704,60 | 704,60 | 745,19 | 734,87 |
| | SEY (ANSYS) | 624,16 | 606,95 | 696,89 | 710,07 | 672,87 | 672,87 | 710,07 | 696,89 |
| 2,50 | Galerkin | 617,91 | 603,09 | 694,66 | 707,56 | 668,09 | 668,09 | 707,56 | 694,66 |
| | En Küçük Kareler | 648,44 | 638,81 | 723,82 | 734,93 | 695,53 | 695,53 | 734,93 | 723,82 |
| | SEY (ANSYS) | 606,75 | 590,65 | 686,15 | 698,85 | 661,86 | 661,86 | 698,85 | 686,15 |
| 3,00 | Galerkin | 607,69 | 593,14 | 689,09 | 701,66 | 663,24 | 663,24 | 701,66 | 689,09 |
| | En Küçük Kareler | 635,96 | 625,05 | 718,91 | 730,32 | 691,83 | 691,83 | 730,32 | 718,91 |
| | SEY (ANSYS) | 598,02 | 582,73 | 681,04 | 693,30 | 657,08 | 657,08 | 693,30 | 681,04 |
| 4,00 | Galerkin | 598,02 | 583,92 | 684,08 | 696,15 | 659,28 | 659,28 | 696,15 | 684,08 |
| | En Küçük Kareler | 625,23 | 613,04 | 714,83 | 726,43 | 689,04 | 689,04 | 726,43 | 714,83 |
| | SEY (ANSYS) | 589,92 | 575,58 | 676,50 | 688,20 | 653,20 | 653,20 | 688,20 | 676,50 |

Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a

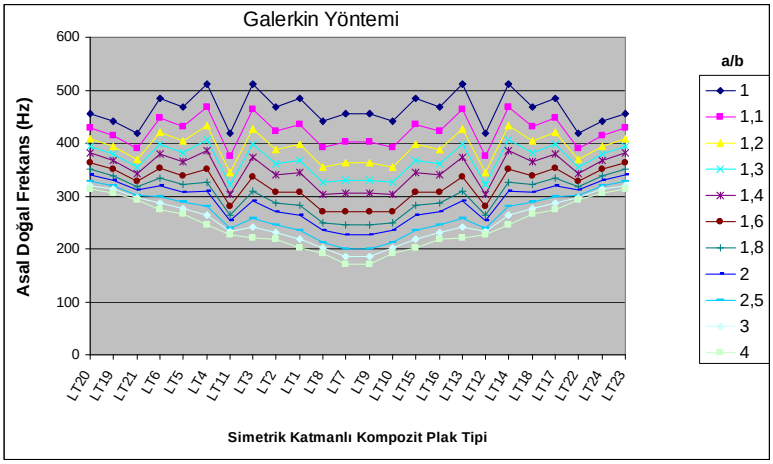
| b/a | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 849,13 | 851,53 | 844,30 | 844,30 | 851,53 | 849,13 | 856,32 | 858,71 |
| | En Küçük Kareler | 964,03 | 976,26 | 954,70 | 954,70 | 976,26 | 964,03 | 895,49 | 903,56 |
| | SEY (ANSYS) | 815,79 | 807,37 | 823,32 | 823,32 | 807,37 | 815,79 | 842,52 | 840,90 |
| 1,10 | Galerkin | 794,81 | 791,29 | 778,02 | 765,87 | 767,20 | 758,55 | 819,34 | 815,93 |
| | En Küçük Kareler | 893,65 | 900,65 | 875,48 | 866,91 | 883,21 | 867,31 | 853,29 | 855,42 |
| | SEY (ANSYS) | 765,68 | 752,86 | 759,55 | 747,92 | 727,13 | 728,70 | 806,62 | 800,19 |
| 1,20 | Galerkin | 755,32 | 747,90 | 729,03 | 707,69 | 705,71 | 691,75 | 793,11 | 786,05 |
| | En Küçük Kareler | 840,55 | 843,94 | 814,36 | 799,06 | 812,94 | 793,70 | 823,49 | 821,73 |
| | SEY (ANSYS) | 729,53 | 714,16 | 712,48 | 692,00 | 669,19 | 664,66 | 781,21 | 771,89 |
| 1,30 | Galerkin | 725,86 | 715,84 | 691,93 | 663,53 | 659,89 | 641,41 | 773,96 | 764,58 |
| | En Küçük Kareler | 799,81 | 800,58 | 766,34 | 745,48 | 758,63 | 736,30 | 802,01 | 797,62 |
| | SEY (ANSYS) | 702,75 | 685,97 | 676,88 | 649,58 | 626,52 | 616,62 | 762,68 | 751,61 |
| 1,40 | Galerkin | 703,38 | 691,63 | 663,24 | 629,35 | 625,09 | 602,76 | 759,61 | 748,75 |
| | En Küçük Kareler | 768,11 | 766,89 | 728,10 | 702,48 | 715,84 | 690,65 | 786,24 | 780,03 |
| | SEY (ANSYS) | 682,45 | 664,93 | 649,40 | 616,75 | 594,55 | 579,94 | 748,82 | 736,71 |
| 1,60 | Galerkin | 672,01 | 658,34 | 622,56 | 580,86 | 577,10 | 548,67 | 740,01 | 727,63 |
| | En Küçük Kareler | 723,28 | 719,25 | 672,32 | 638,85 | 653,85 | 623,59 | 765,45 | 757,03 |
| | SEY (ANSYS) | 654,33 | 636,44 | 610,53 | 570,26 | 551,33 | 529,09 | 729,92 | 716,88 |
| 1,80 | Galerkin | 651,74 | 637,24 | 595,80 | 548,99 | 546,73 | 513,83 | 727,64 | 714,68 |
| | En Küçük Kareler | 694,38 | 688,42 | 635,04 | 595,31 | 612,26 | 577,76 | 753,05 | 743,42 |
| | SEY (ANSYS) | 636,33 | 618,68 | 585,06 | 539,79 | 524,76 | 496,84 | 718,02 | 704,77 |
| 2,00 | Galerkin | 637,92 | 623,10 | 577,30 | 527,02 | 526,51 | 490,28 | 719,34 | 706,23 |
| | En Küçük Kareler | 675,06 | 667,69 | 609,49 | 564,75 | 583,29 | 545,32 | 745,19 | 734,87 |
| | SEY (ANSYS) | 624,16 | 606,95 | 567,54 | 518,86 | 507,54 | 475,40 | 710,07 | 696,89 |
| 2,50 | Galerkin | 617,91 | 603,09 | 550,09 | 494,86 | 498,30 | 456,83 | 707,56 | 694,65 |
| | En Küçük Kareler | 648,44 | 638,81 | 573,66 | 520,48 | 541,02 | 497,05 | 734,93 | 723,82 |
| | SEY (ANSYS) | 606,75 | 590,65 | 541,98 | 488,46 | 484,43 | 445,73 | 698,85 | 686,15 |
| 3,00 | Galerkin | 607,69 | 593,14 | 535,97 | 478,30 | 484,59 | 440,24 | 701,66 | 689,09 |
| | En Küçük Kareler | 635,96 | 625,05 | 556,91 | 499,13 | 519,84 | 472,49 | 730,32 | 718,91 |
| | SEY (ANSYS) | 598,02 | 582,73 | 528,91 | 473,01 | 473,74 | 431,58 | 693,30 | 681,04 |
| 4,00 | Galerkin | 598,02 | 583,92 | 522,45 | 462,56 | 472,21 | 425,03 | 696,15 | 684,08 |
| | En Küçük Kareler | 625,23 | 613,04 | 542,96 | 481,11 | 500,71 | 450,26 | 726,43 | 714,83 |
| | SEY (ANSYS) | 589,92 | 575,58 | 516,62 | 458,60 | 464,57 | 419,14 | 688,20 | 676,50 |

Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

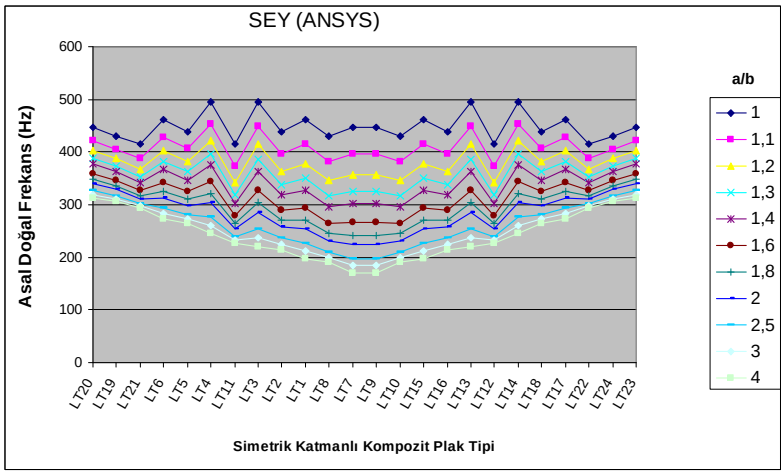
| b/a | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 856,32 | 858,71 | 863,46 | 863,46 | 844,30 | 844,30 | 849,13 | 851,53 |
| | En Küçük Kareler | 895,49 | 903,56 | 878,73 | 878,73 | 954,70 | 954,70 | 964,03 | 976,26 |
| | SEY (ANSYS) | 842,52 | 840,90 | 854,39 | 854,39 | 823,32 | 823,32 | 815,79 | 807,37 |
| 1,10 | Galerkin | 819,34 | 815,93 | 809,07 | 809,07 | 778,03 | 765,87 | 794,81 | 791,29 |
| | En Küçük Kareler | 853,29 | 855,42 | 825,11 | 825,11 | 875,48 | 866,91 | 893,65 | 900,65 |
| | SEY (ANSYS) | 806,62 | 800,19 | 800,83 | 800,83 | 759,55 | 747,92 | 765,68 | 752,86 |
| 1,20 | Galerkin | 793,11 | 786,05 | 771,73 | 771,73 | 729,03 | 707,69 | 755,32 | 747,90 |
| | En Küçük Kareler | 823,49 | 821,73 | 789,02 | 789,02 | 814,36 | 799,06 | 840,55 | 843,94 |
| | SEY (ANSYS) | 781,21 | 771,89 | 764,04 | 764,04 | 712,48 | 692,00 | 729,53 | 714,16 |
| 1,30 | Galerkin | 773,96 | 764,58 | 745,46 | 745,46 | 691,93 | 663,53 | 725,86 | 715,84 |
| | En Küçük Kareler | 802,01 | 797,62 | 764,13 | 764,13 | 766,34 | 745,48 | 799,81 | 800,58 |
| | SEY (ANSYS) | 762,68 | 751,61 | 738,15 | 738,15 | 676,88 | 649,58 | 702,75 | 685,97 |
| 1,40 | Galerkin | 759,61 | 748,75 | 726,54 | 726,54 | 663,24 | 629,35 | 703,38 | 691,63 |
| | En Küçük Kareler | 786,24 | 780,03 | 746,54 | 746,54 | 728,10 | 702,48 | 768,11 | 766,89 |
| | SEY (ANSYS) | 748,82 | 736,71 | 719,50 | 719,50 | 649,40 | 616,75 | 682,45 | 664,93 |
| 1,60 | Galerkin | 740,01 | 727,63 | 702,20 | 702,20 | 622,56 | 580,86 | 672,01 | 658,35 |
| | En Küçük Kareler | 765,45 | 757,03 | 724,47 | 724,47 | 672,32 | 638,85 | 723,28 | 719,25 |
| | SEY (ANSYS) | 729,92 | 716,88 | 695,49 | 695,49 | 610,53 | 570,26 | 654,33 | 636,44 |
| 1,80 | Galerkin | 727,64 | 714,68 | 688,04 | 688,04 | 595,80 | 548,99 | 651,74 | 637,25 |
| | En Küçük Kareler | 753,05 | 743,42 | 712,06 | 712,06 | 635,04 | 595,31 | 694,38 | 688,42 |
| | SEY (ANSYS) | 718,02 | 704,77 | 681,53 | 681,53 | 585,06 | 539,79 | 636,33 | 618,69 |
| 2,00 | Galerkin | 719,34 | 706,23 | 679,26 | 679,26 | 577,30 | 527,02 | 637,92 | 623,10 |
| | En Küçük Kareler | 745,19 | 734,87 | 704,60 | 704,60 | 609,49 | 564,75 | 675,06 | 667,69 |
| | SEY (ANSYS) | 710,07 | 696,89 | 672,87 | 672,87 | 567,54 | 518,86 | 624,16 | 606,95 |
| 2,50 | Galerkin | 707,56 | 694,65 | 668,09 | 668,09 | 550,09 | 494,86 | 617,91 | 603,09 |
| | En Küçük Kareler | 734,93 | 723,82 | 695,53 | 695,53 | 573,66 | 520,48 | 648,44 | 638,81 |
| | SEY (ANSYS) | 698,85 | 686,15 | 661,86 | 661,86 | 541,98 | 488,46 | 606,75 | 590,65 |
| 3,00 | Galerkin | 701,66 | 689,09 | 663,24 | 663,24 | 535,97 | 478,30 | 607,69 | 593,14 |
| | En Küçük Kareler | 730,32 | 718,91 | 691,83 | 691,83 | 556,91 | 499,13 | 635,96 | 625,05 |
| | SEY (ANSYS) | 693,30 | 681,04 | 657,08 | 657,08 | 528,91 | 473,01 | 598,02 | 582,73 |
| 4,00 | Galerkin | 696,15 | 684,08 | 659,28 | 659,28 | 522,45 | 462,56 | 598,02 | 583,92 |
| | En Küçük Kareler | 726,43 | 714,83 | 689,04 | 689,04 | 542,96 | 481,11 | 625,23 | 613,04 |
| | SEY (ANSYS) | 688,20 | 676,50 | 653,20 | 653,20 | 516,62 | 458,60 | 589,92 | 575,58 |

Çizelge 3. 11 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar ankastre mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

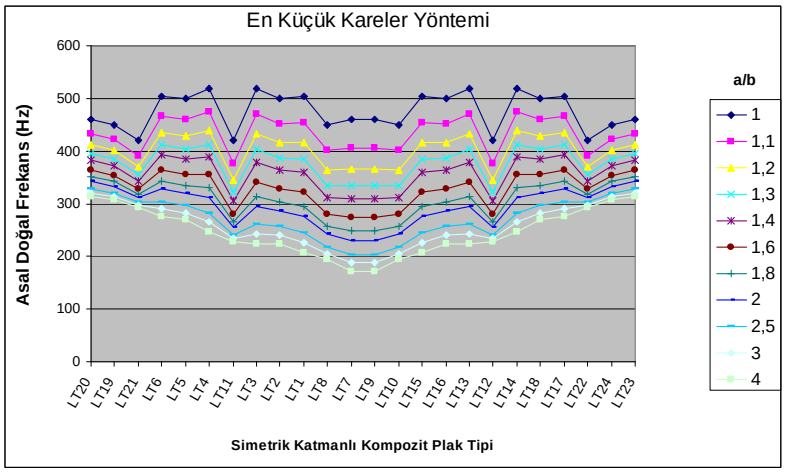
| b/a | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 849,13 | 851,53 | 858,71 | 856,32 | 863,46 | 863,46 | 856,32 | 858,71 |
| | En Küçük Kareler | 964,03 | 976,26 | 903,56 | 895,49 | 878,73 | 878,73 | 895,49 | 903,56 |
| | SEY (ANSYS) | 815,79 | 807,37 | 840,90 | 842,52 | 854,39 | 854,39 | 842,52 | 840,90 |
| 1,10 | Galerkin | 758,55 | 767,20 | 756,22 | 747,45 | 773,48 | 773,48 | 747,45 | 756,22 |
| | En Küçük Kareler | 867,31 | 883,21 | 798,68 | 785,17 | 786,34 | 786,34 | 785,17 | 798,68 |
| | SEY (ANSYS) | 728,70 | 727,13 | 740,77 | 736,33 | 766,13 | 766,13 | 736,33 | 740,77 |
| 1,20 | Galerkin | 691,75 | 705,71 | 681,59 | 667,12 | 709,63 | 709,63 | 667,12 | 681,59 |
| | En Küçük Kareler | 793,70 | 812,94 | 721,97 | 703,50 | 721,56 | 721,56 | 703,50 | 721,97 |
| | SEY (ANSYS) | 664,66 | 669,19 | 667,83 | 657,85 | 703,41 | 703,41 | 657,85 | 667,83 |
| 1,30 | Galerkin | 641,41 | 659,89 | 626,21 | 606,70 | 663,51 | 663,51 | 606,70 | 626,21 |
| | En Küçük Kareler | 736,30 | 758,63 | 664,61 | 641,60 | 675,39 | 675,39 | 641,60 | 664,61 |
| | SEY (ANSYS) | 616,62 | 626,52 | 613,77 | 598,76 | 658,06 | 658,06 | 598,76 | 613,77 |
| 1,40 | Galerkin | 602,76 | 625,09 | 584,46 | 560,51 | 629,64 | 629,64 | 560,51 | 584,46 |
| | En Küçük Kareler | 690,65 | 715,84 | 620,91 | 593,73 | 641,97 | 641,97 | 593,73 | 620,91 |
| | SEY (ANSYS) | 579,94 | 594,55 | 573,09 | 553,54 | 624,72 | 624,72 | 553,54 | 573,09 |
| 1,60 | Galerkin | 548,67 | 577,10 | 527,73 | 496,48 | 585,25 | 585,25 | 496,48 | 527,73 |
| | En Küçük Kareler | 623,59 | 653,85 | 560,50 | 526,08 | 599,09 | 599,09 | 526,08 | 560,50 |
| | SEY (ANSYS) | 529,09 | 551,33 | 518,07 | 490,87 | 581,01 | 581,01 | 490,87 | 518,07 |
| 1,80 | Galerkin | 513,83 | 546,73 | 492,80 | 456,03 | 559,15 | 559,15 | 456,03 | 492,81 |
| | En Küçük Kareler | 577,76 | 612,26 | 522,40 | 482,09 | 574,59 | 574,59 | 482,09 | 522,40 |
| | SEY (ANSYS) | 496,84 | 524,76 | 484,45 | 451,30 | 555,28 | 555,28 | 451,30 | 484,45 |
| 2,00 | Galerkin | 490,28 | 526,51 | 470,27 | 429,32 | 542,98 | 542,98 | 429,32 | 470,27 |
| | En Küçük Kareler | 545,32 | 583,29 | 497,33 | 452,37 | 559,80 | 559,80 | 452,37 | 497,33 |
| | SEY (ANSYS) | 475,40 | 507,54 | 462,95 | 425,23 | 539,33 | 539,33 | 425,23 | 462,95 |
| 2,50 | Galerkin | 456,83 | 498,30 | 440,46 | 392,93 | 522,71 | 522,71 | 392,93 | 440,46 |
| | En Küçük Kareler | 497,05 | 541,02 | 463,54 | 411,11 | 541,95 | 541,95 | 411,11 | 463,54 |
| | SEY (ANSYS) | 445,73 | 484,43 | 434,92 | 389,85 | 519,32 | 519,32 | 389,85 | 434,92 |
| 3,00 | Galerkin | 440,24 | 484,59 | 427,06 | 375,99 | 514,20 | 514,20 | 375,99 | 427,06 |
| | En Küçük Kareler | 472,49 | 519,84 | 448,27 | 392,05 | 534,85 | 534,85 | 392,05 | 448,27 |
| | SEY (ANSYS) | 431,58 | 473,74 | 422,59 | 373,51 | 510,92 | 510,92 | 373,51 | 422,59 |
| 4,00 | Galerkin | 425,03 | 472,21 | 415,94 | 361,48 | 507,62 | 507,62 | 361,48 | 415,94 |
| | En Küçük Kareler | 450,26 | 500,71 | 435,79 | 376,52 | 529,70 | 529,70 | 376,52 | 435,79 |
| | SEY (ANSYS) | 419,14 | 464,57 | 412,60 | 359,70 | 504,43 | 504,43 | 359,70 | 412,60 |




(a)

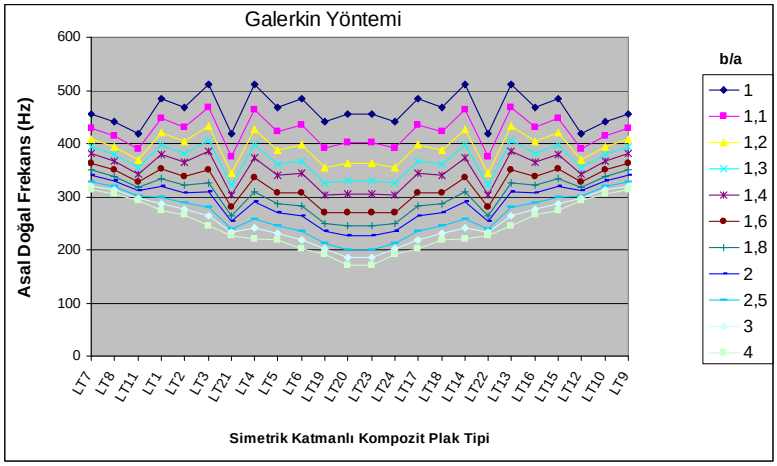



(b)

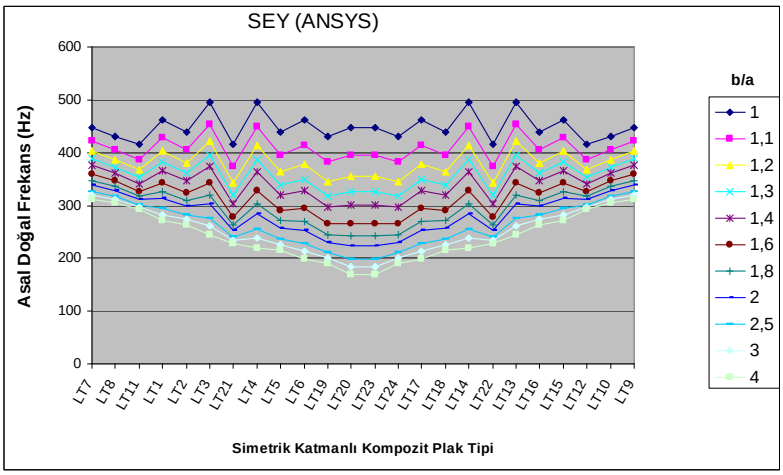



(c)

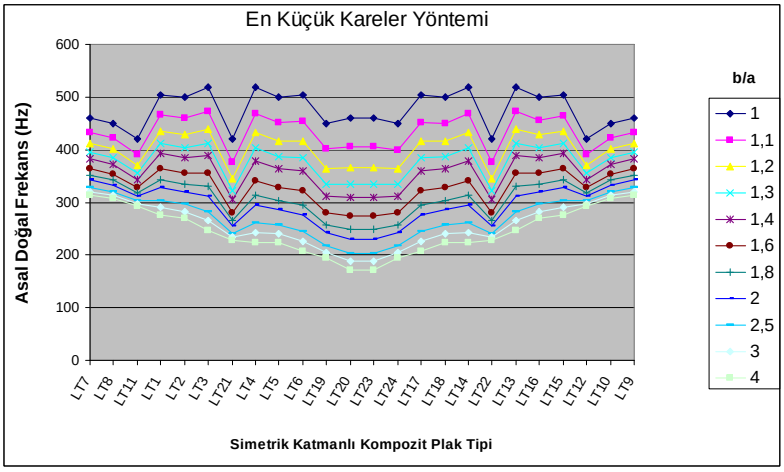
Şekil 3. 16 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

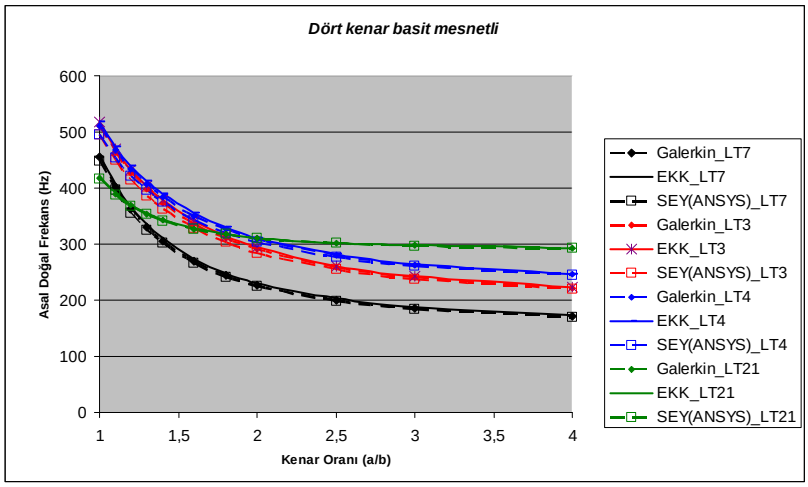



(b)

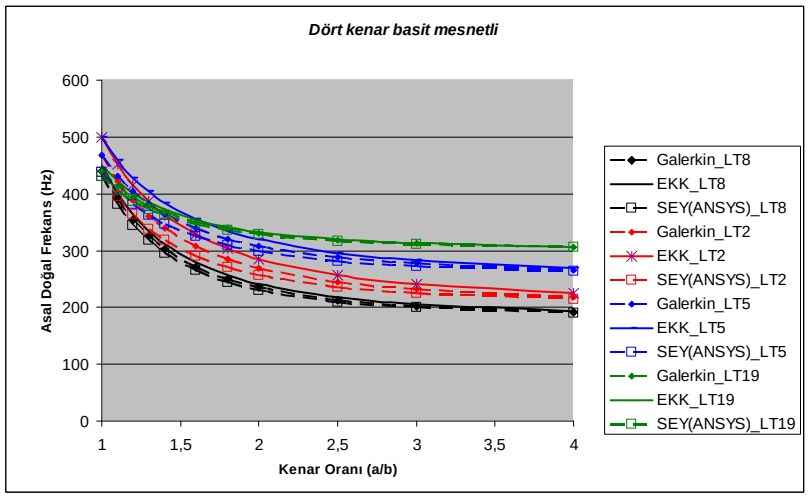



(c)

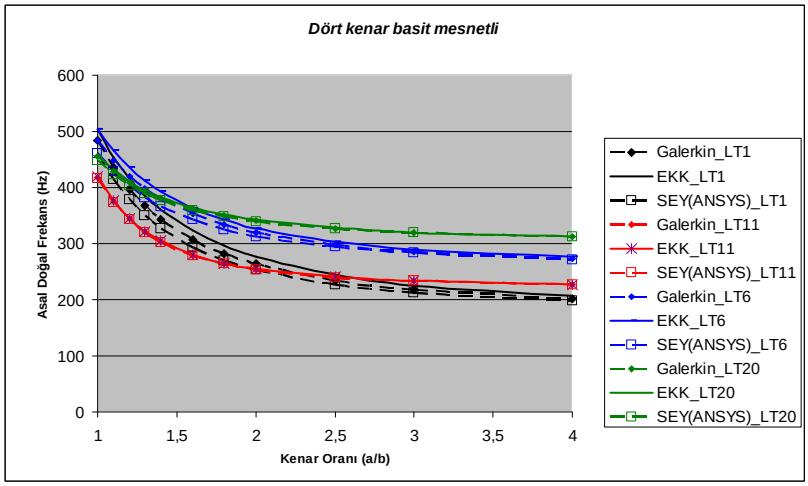
Şekil 3. 17 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) Galerkin Yöntemi, b) SEY (ANSYS), c) En Küçük Kareler Yöntemi




(a)

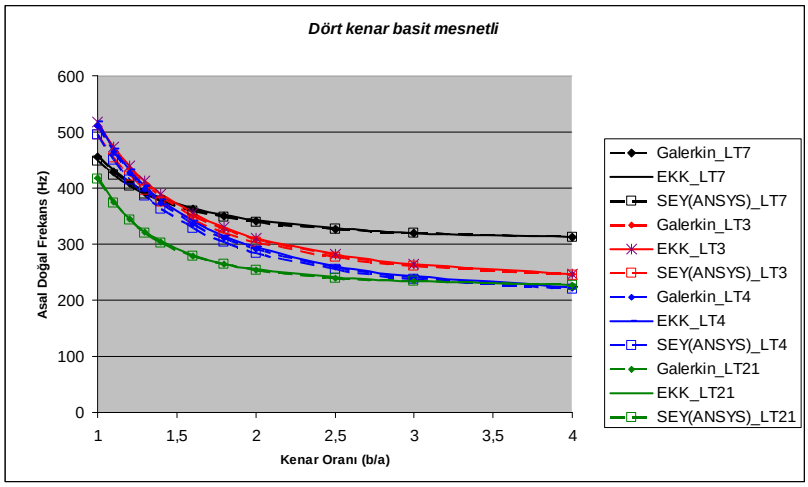



(b)

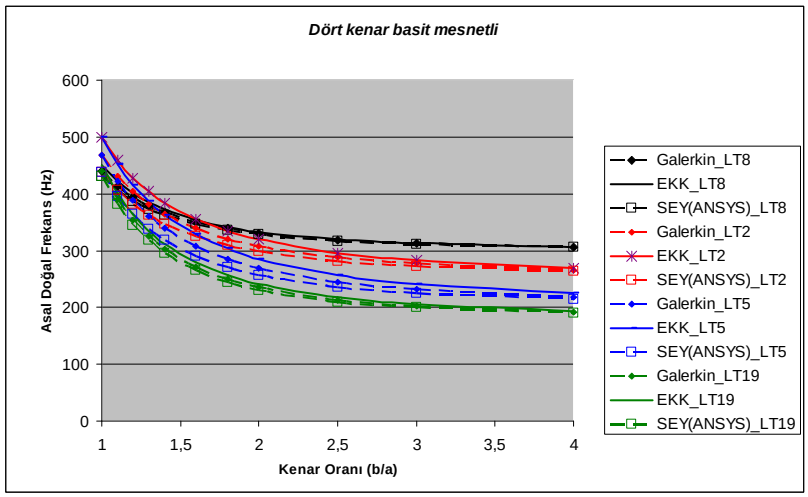



(c)

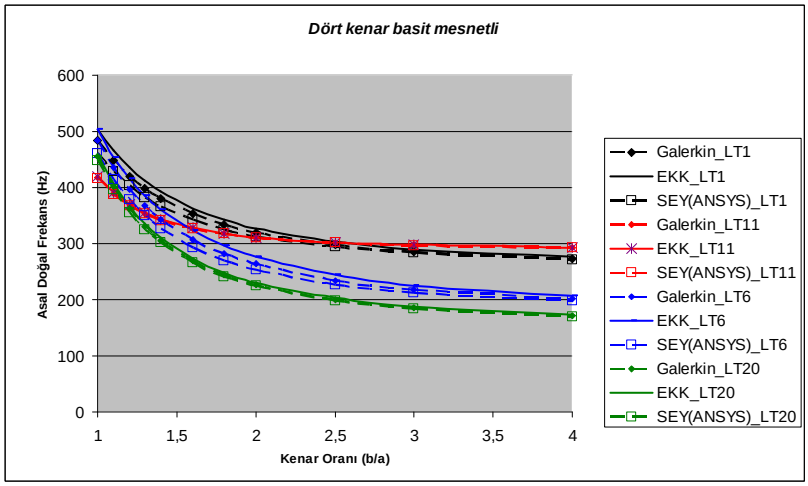
Şekil 3. 18 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20




(a)




(b)




(c)

Şekil 3. 19 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz) grafiği, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli; a) LT7, LT3, LT4, LT21, b) LT8, LT2, LT5, LT19, c) LT1, LT11, LT6, LT20

Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b

| a/b | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 483,59 | 467,97 | 510,90 | 510,90 | 467,97 | 483,59 | 454,71 | 440,21 |
| | En Küçük Kareler | 504,22 | 499,21 | 517,58 | 517,58 | 499,21 | 504,22 | 458,96 | 450,44 |
| | SEY (ANSYS) | 461,25 | 438,74 | 494,90 | 494,90 | 438,74 | 461,25 | 447,61 | 430,70 |
| 1,10 | Galerkin | 434,90 | 422,78 | 463,89 | 467,82 | 431,68 | 447,61 | 402,06 | 390,83 |
| | En Küçük Kareler | 454,36 | 451,86 | 470,04 | 473,83 | 459,27 | 465,62 | 406,28 | 400,86 |
| | SEY (ANSYS) | 414,43 | 396,00 | 449,82 | 453,93 | 406,10 | 428,24 | 395,63 | 382,01 |
| 1,20 | Galerkin | 397,24 | 388,20 | 427,01 | 433,95 | 403,87 | 419,67 | 362,02 | 353,75 |
| | En Küçük Kareler | 415,65 | 415,31 | 432,71 | 439,40 | 428,39 | 435,55 | 366,19 | 363,50 |
| | SEY (ANSYS) | 378,44 | 363,65 | 414,52 | 421,78 | 381,39 | 402,75 | 356,16 | 345,58 |
| 1,30 | Galerkin | 367,46 | 361,13 | 397,43 | 406,76 | 382,07 | 397,50 | 330,86 | 325,31 |
| | En Küçük Kareler | 384,91 | 386,44 | 402,75 | 411,74 | 403,99 | 411,62 | 334,96 | 334,70 |
| | SEY (ANSYS) | 350,13 | 338,62 | 386,28 | 396,02 | 362,22 | 382,63 | 325,50 | 317,73 |
| 1,40 | Galerkin | 343,45 | 339,54 | 373,29 | 384,56 | 364,66 | 379,60 | 306,14 | 303,06 |
| | En Küçük Kareler | 360,02 | 363,20 | 378,27 | 389,13 | 384,36 | 392,24 | 310,16 | 312,07 |
| | SEY (ANSYS) | 327,45 | 318,88 | 363,27 | 375,01 | 347,04 | 366,45 | 301,23 | 296,05 |
| 1,60 | Galerkin | 307,48 | 307,65 | 336,51 | 350,75 | 338,89 | 352,76 | 269,90 | 271,12 |
| | En Küçük Kareler | 322,45 | 328,39 | 340,93 | 354,66 | 355,03 | 363,07 | 273,70 | 279,28 |
| | SEY (ANSYS) | 293,73 | 290,20 | 328,30 | 343,06 | 324,82 | 342,29 | 265,74 | 265,12 |
| 1,80 | Galerkin | 282,16 | 285,62 | 310,10 | 326,51 | 321,04 | 333,87 | 245,08 | 249,86 |
| | En Küçük Kareler | 295,73 | 303,88 | 314,06 | 329,91 | 334,48 | 342,44 | 248,63 | 257,17 |
| | SEY (ANSYS) | 270,27 | 270,79 | 303,26 | 320,21 | 309,60 | 325,38 | 241,53 | 244,73 |
| 2,00 | Galerkin | 263,64 | 269,77 | 290,45 | 308,51 | 308,17 | 320,08 | 227,35 | 235,07 |
| | En Küçük Kareler | 275,97 | 285,92 | 294,01 | 311,49 | 319,51 | 327,32 | 230,64 | 241,58 |
| | SEY (ANSYS) | 253,28 | 257,09 | 284,67 | 303,26 | 298,71 | 313,07 | 224,30 | 230,66 |
| 2,50 | Galerkin | 234,38 | 245,29 | 258,70 | 279,55 | 288,20 | 298,38 | 200,21 | 213,23 |
| | En Küçük Kareler | 244,15 | 257,38 | 261,48 | 281,77 | 296,00 | 303,36 | 202,86 | 218,09 |
| | SEY (ANSYS) | 226,87 | 236,43 | 254,74 | 276,06 | 281,98 | 293,77 | 198,07 | 210,16 |
| 3,00 | Galerkin | 217,99 | 231,92 | 240,41 | 262,99 | 277,24 | 286,28 | 185,52 | 201,92 |
| | En Küçük Kareler | 225,82 | 241,21 | 242,63 | 264,70 | 282,90 | 289,90 | 187,65 | 205,59 |
| | SEY (ANSYS) | 212,37 | 225,47 | 237,58 | 260,53 | 272,87 | 283,04 | 183,98 | 199,71 |
| 4,00 | Galerkin | 201,28 | 218,60 | 221,30 | 245,81 | 266,25 | 273,99 | 170,98 | 191,14 |
| | En Küçük Kareler | 206,50 | 224,46 | 222,77 | 246,88 | 269,59 | 276,13 | 172,39 | 193,40 |
| | SEY (ANSYS) | 197,89 | 214,81 | 219,71 | 244,44 | 263,78 | 272,16 | 170,14 | 189,91 |

Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 454,71 | 440,21 | 417,78 | 417,78 | 510,90 | 510,90 | 483,59 | 467,97 |
| | En Küçük Kareler | 458,96 | 450,44 | 419,17 | 419,17 | 517,58 | 517,58 | 504,22 | 499,21 |
| | SEY (ANSYS) | 447,61 | 430,70 | 415,61 | 415,61 | 494,90 | 494,90 | 461,25 | 438,74 |
| 1,10 | Galerkin | 402,06 | 390,83 | 375,20 | 375,20 | 463,89 | 467,82 | 434,90 | 422,78 |
| | En Küçük Kareler | 406,28 | 400,86 | 376,52 | 376,52 | 470,04 | 473,83 | 454,36 | 451,86 |
| | SEY (ANSYS) | 395,63 | 382,01 | 373,31 | 373,31 | 449,82 | 453,93 | 414,43 | 396,00 |
| 1,20 | Galerkin | 362,02 | 353,75 | 344,17 | 344,17 | 427,01 | 433,95 | 397,24 | 388,20 |
| | En Küçük Kareler | 366,19 | 363,50 | 345,40 | 345,40 | 432,71 | 439,40 | 415,65 | 415,31 |
| | SEY (ANSYS) | 356,16 | 345,58 | 342,52 | 342,52 | 414,52 | 421,78 | 378,44 | 363,65 |
| 1,30 | Galerkin | 330,86 | 325,31 | 321,07 | 321,07 | 397,43 | 406,76 | 367,46 | 361,13 |
| | En Küçük Kareler | 334,96 | 334,70 | 322,21 | 322,21 | 402,75 | 411,74 | 384,91 | 386,44 |
| | SEY (ANSYS) | 325,50 | 317,73 | 319,63 | 319,63 | 386,28 | 396,02 | 350,13 | 338,62 |
| 1,40 | Galerkin | 306,14 | 303,06 | 303,54 | 303,54 | 373,29 | 384,56 | 343,45 | 339,54 |
| | En Küçük Kareler | 310,16 | 312,07 | 304,59 | 304,59 | 378,27 | 389,13 | 360,02 | 363,20 |
| | SEY (ANSYS) | 301,23 | 296,05 | 302,29 | 302,29 | 363,27 | 375,01 | 327,45 | 318,88 |
| 1,60 | Galerkin | 269,90 | 271,12 | 279,43 | 279,43 | 336,51 | 350,75 | 307,48 | 307,65 |
| | En Küçük Kareler | 273,70 | 279,28 | 280,30 | 280,30 | 340,93 | 354,66 | 322,45 | 328,39 |
| | SEY (ANSYS) | 265,74 | 265,12 | 278,47 | 278,47 | 328,30 | 343,06 | 293,73 | 290,20 |
| 1,80 | Galerkin | 245,08 | 249,86 | 264,22 | 264,22 | 310,10 | 326,51 | 282,16 | 285,62 |
| | En Küçük Kareler | 248,63 | 257,17 | 264,95 | 264,95 | 314,06 | 329,91 | 295,73 | 303,88 |
| | SEY (ANSYS) | 241,53 | 244,73 | 263,49 | 263,49 | 303,26 | 320,21 | 270,27 | 270,79 |
| 2,00 | Galerkin | 227,35 | 235,07 | 254,14 | 254,14 | 290,45 | 308,51 | 263,64 | 269,77 |
| | En Küçük Kareler | 230,64 | 241,58 | 254,74 | 254,74 | 294,01 | 311,49 | 275,97 | 285,92 |
| | SEY (ANSYS) | 224,30 | 230,66 | 253,58 | 253,58 | 284,67 | 303,26 | 253,28 | 257,09 |
| 2,50 | Galerkin | 200,21 | 213,23 | 240,16 | 240,16 | 258,70 | 279,55 | 234,38 | 245,29 |
| | En Küçük Kareler | 202,86 | 218,09 | 240,55 | 240,55 | 261,48 | 281,77 | 244,15 | 257,38 |
| | SEY (ANSYS) | 198,07 | 210,16 | 239,87 | 239,87 | 254,74 | 276,06 | 226,87 | 236,43 |
| 3,00 | Galerkin | 185,52 | 201,92 | 233,42 | 233,42 | 240,41 | 262,99 | 217,99 | 231,92 |
| | En Küçük Kareler | 187,65 | 205,59 | 233,69 | 233,69 | 242,63 | 264,70 | 225,82 | 241,21 |
| | SEY (ANSYS) | 183,98 | 199,71 | 233,29 | 233,29 | 237,58 | 260,53 | 212,37 | 225,47 |
| 4,00 | Galerkin | 170,98 | 191,14 | 227,38 | 227,38 | 221,30 | 245,81 | 201,28 | 218,60 |
| | En Küçük Kareler | 172,39 | 193,40 | 227,54 | 227,54 | 222,77 | 246,88 | 206,50 | 224,46 |
| | SEY (ANSYS) | 170,14 | 189,91 | 227,41 | 227,41 | 219,71 | 244,44 | 197,89 | 214,81 |

Çizelge 3. 12 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı b (devamı)

| a/b | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 483,59 | 467,97 | 440,21 | 454,71 | 417,78 | 417,78 | 454,71 | 440,21 |
| | En Küçük Kareler | 504,22 | 499,21 | 450,44 | 458,96 | 419,17 | 419,17 | 458,96 | 450,44 |
| | SEY (ANSYS) | 461,25 | 438,74 | 430,70 | 447,61 | 415,61 | 415,61 | 447,61 | 430,70 |
| 1,10 | Galerkin | 447,61 | 431,68 | 413,75 | 428,45 | 389,47 | 389,47 | 428,45 | 413,75 |
| | En Küçük Kareler | 465,62 | 459,27 | 422,29 | 431,95 | 390,65 | 390,65 | 431,95 | 422,29 |
| | SEY (ANSYS) | 428,24 | 406,10 | 405,66 | 422,43 | 387,62 | 387,62 | 422,43 | 405,66 |
| 1,20 | Galerkin | 419,67 | 403,87 | 394,02 | 408,47 | 369,15 | 369,15 | 408,47 | 394,02 |
| | En Küçük Kareler | 435,55 | 428,39 | 401,21 | 411,40 | 370,15 | 370,15 | 411,40 | 401,21 |
| | SEY (ANSYS) | 402,75 | 381,39 | 387,10 | 403,32 | 367,56 | 367,56 | 403,32 | 387,10 |
| 1,30 | Galerkin | 397,50 | 382,07 | 378,94 | 392,91 | 354,18 | 354,18 | 392,91 | 378,94 |
| | En Küçük Kareler | 411,62 | 403,99 | 385,04 | 395,40 | 355,04 | 355,04 | 395,40 | 385,04 |
| | SEY (ANSYS) | 382,63 | 362,22 | 372,98 | 388,48 | 352,82 | 352,82 | 388,48 | 372,98 |
| 1,40 | Galerkin | 379,60 | 364,66 | 367,16 | 380,57 | 342,91 | 342,91 | 380,57 | 367,16 |
| | En Küçük Kareler | 392,24 | 384,36 | 372,38 | 382,69 | 343,64 | 343,64 | 382,69 | 372,38 |
| | SEY (ANSYS) | 366,45 | 347,04 | 361,98 | 376,72 | 341,73 | 341,73 | 376,72 | 361,98 |
| 1,60 | Galerkin | 352,76 | 338,89 | 350,21 | 362,45 | 327,45 | 327,45 | 362,45 | 350,21 |
| | En Küçük Kareler | 363,07 | 355,03 | 354,14 | 364,05 | 328,00 | 328,00 | 364,05 | 354,14 |
| | SEY (ANSYS) | 342,29 | 324,82 | 346,23 | 359,49 | 326,57 | 326,57 | 359,49 | 346,23 |
| 1,80 | Galerkin | 333,87 | 321,04 | 338,84 | 350,03 | 317,68 | 317,68 | 350,03 | 338,84 |
| | En Küçük Kareler | 342,44 | 334,48 | 341,90 | 351,27 | 318,10 | 318,10 | 351,27 | 341,90 |
| | SEY (ANSYS) | 325,38 | 309,60 | 335,71 | 347,68 | 317,01 | 317,01 | 347,68 | 335,71 |
| 2,00 | Galerkin | 320,08 | 308,17 | 330,85 | 341,13 | 311,15 | 311,15 | 341,13 | 330,85 |
| | En Küçük Kareler | 327,32 | 319,51 | 333,28 | 342,13 | 311,48 | 311,48 | 342,13 | 333,28 |
| | SEY (ANSYS) | 313,07 | 298,71 | 328,33 | 339,24 | 310,62 | 310,62 | 339,24 | 328,33 |
| 2,50 | Galerkin | 298,38 | 288,20 | 318,82 | 327,48 | 301,93 | 301,93 | 327,48 | 318,82 |
| | En Küçük Kareler | 303,36 | 296,00 | 320,33 | 328,10 | 302,12 | 302,12 | 328,10 | 320,33 |
| | SEY (ANSYS) | 293,77 | 281,98 | 317,25 | 326,28 | 301,63 | 301,63 | 326,28 | 317,25 |
| 3,00 | Galerkin | 286,28 | 277,24 | 312,42 | 320,05 | 297,35 | 297,35 | 320,05 | 312,42 |
| | En Küçük Kareler | 289,90 | 282,90 | 313,44 | 320,48 | 297,48 | 297,48 | 320,48 | 313,44 |
| | SEY (ANSYS) | 283,04 | 272,87 | 311,36 | 319,24 | 297,18 | 297,18 | 319,24 | 311,36 |
| 4,00 | Galerkin | 273,99 | 266,25 | 306,15 | 312,67 | 293,12 | 293,12 | 312,67 | 306,15 |
| | En Küçük Kareler | 276,13 | 269,59 | 306,72 | 312,90 | 293,19 | 293,19 | 312,90 | 306,72 |
| | SEY (ANSYS) | 272,16 | 263,78 | 305,59 | 312,23 | 293,07 | 293,07 | 312,23 | 305,59 |

Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a

| b/a | YÖNTEM | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 483,59 | 467,97 | 510,90 | 510,90 | 467,97 | 483,59 | 454,71 | 440,21 |
| | En Küçük Kareler | 504,22 | 499,21 | 517,58 | 517,58 | 499,21 | 504,22 | 458,96 | 450,44 |
| | SEY (ANSYS) | 461,25 | 438,74 | 494,90 | 494,90 | 438,74 | 461,25 | 447,61 | 430,70 |
| 1,10 | Galerkin | 447,61 | 431,68 | 467,82 | 463,89 | 422,78 | 434,90 | 428,45 | 413,75 |
| | En Küçük Kareler | 465,62 | 459,27 | 473,08 | 469,29 | 451,86 | 454,36 | 431,95 | 422,29 |
| | SEY (ANSYS) | 428,24 | 406,10 | 453,93 | 449,82 | 396,00 | 414,43 | 422,43 | 405,66 |
| 1,20 | Galerkin | 419,67 | 403,87 | 433,95 | 427,01 | 388,20 | 397,24 | 408,47 | 394,02 |
| | En Küçük Kareler | 435,55 | 428,39 | 439,40 | 432,71 | 415,31 | 415,65 | 411,40 | 401,21 |
| | SEY (ANSYS) | 402,75 | 381,39 | 421,78 | 414,52 | 363,65 | 378,44 | 403,32 | 387,10 |
| 1,30 | Galerkin | 397,50 | 382,07 | 406,76 | 397,43 | 361,13 | 367,46 | 392,91 | 378,94 |
| | En Küçük Kareler | 411,62 | 403,99 | 411,74 | 402,75 | 386,44 | 384,91 | 395,40 | 385,04 |
| | SEY (ANSYS) | 382,63 | 362,22 | 396,02 | 386,28 | 338,62 | 350,13 | 388,48 | 372,98 |
| 1,40 | Galerkin | 379,60 | 364,66 | 384,56 | 373,29 | 339,54 | 343,45 | 380,57 | 367,16 |
| | En Küçük Kareler | 392,24 | 384,36 | 389,13 | 378,27 | 363,20 | 360,02 | 382,69 | 372,38 |
| | SEY (ANSYS) | 366,45 | 347,04 | 375,01 | 363,27 | 318,88 | 327,45 | 376,72 | 361,98 |
| 1,60 | Galerkin | 352,76 | 338,89 | 350,75 | 336,51 | 307,65 | 307,48 | 362,45 | 350,21 |
| | En Küçük Kareler | 363,07 | 355,03 | 354,66 | 340,93 | 328,39 | 322,45 | 364,05 | 354,14 |
| | SEY (ANSYS) | 342,29 | 324,82 | 343,06 | 328,30 | 290,20 | 293,73 | 359,49 | 346,23 |
| 1,80 | Galerkin | 333,87 | 321,04 | 326,51 | 310,10 | 285,62 | 282,16 | 350,03 | 338,84 |
| | En Küçük Kareler | 342,44 | 334,48 | 329,91 | 314,06 | 303,88 | 295,73 | 351,27 | 341,90 |
| | SEY (ANSYS) | 325,38 | 309,60 | 320,21 | 303,26 | 270,79 | 270,27 | 347,68 | 335,71 |
| 2,00 | Galerkin | 320,08 | 308,17 | 308,51 | 290,45 | 269,77 | 263,64 | 341,13 | 330,85 |
| | En Küçük Kareler | 327,32 | 319,51 | 311,49 | 294,01 | 285,92 | 275,97 | 342,13 | 333,28 |
| | SEY (ANSYS) | 313,07 | 298,71 | 303,26 | 284,67 | 257,09 | 253,28 | 339,24 | 328,33 |
| 2,50 | Galerkin | 298,38 | 288,20 | 279,55 | 258,70 | 245,29 | 234,38 | 327,48 | 318,82 |
| | En Küçük Kareler | 303,36 | 296,00 | 281,77 | 261,48 | 257,38 | 244,15 | 328,10 | 320,33 |
| | SEY (ANSYS) | 293,77 | 281,98 | 276,06 | 254,74 | 236,43 | 226,87 | 326,28 | 317,25 |
| 3,00 | Galerkin | 286,28 | 277,24 | 262,99 | 240,41 | 231,92 | 217,99 | 320,05 | 312,42 |
| | En Küçük Kareler | 289,90 | 282,90 | 264,70 | 242,63 | 241,21 | 225,82 | 320,48 | 313,44 |
| | SEY (ANSYS) | 283,04 | 272,87 | 260,53 | 237,58 | 225,47 | 212,37 | 319,24 | 311,36 |
| 4,00 | Galerkin | 273,99 | 266,25 | 245,81 | 221,30 | 218,60 | 201,28 | 312,67 | 306,15 |
| | En Küçük Kareler | 276,13 | 269,59 | 246,88 | 222,77 | 224,46 | 206,50 | 312,90 | 306,72 |
| | SEY (ANSYS) | 272,16 | 263,78 | 244,44 | 219,71 | 214,81 | 197,89 | 312,23 | 305,59 |

Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

| b/a | YÖNTEM | LT9 | LT10 | LT11 | LT12 | LT13 | LT14 | LT15 | LT16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 454,71 | 440,21 | 417,78 | 417,78 | 510,90 | 510,90 | 483,59 | 467,97 |
| | En Küçük Kareler | 458,96 | 450,44 | 419,17 | 419,17 | 517,58 | 517,58 | 504,22 | 499,21 |
| | SEY (ANSYS) | 447,61 | 430,70 | 415,61 | 415,61 | 494,90 | 494,90 | 461,25 | 438,74 |
| 1,10 | Galerkin | 428,45 | 413,75 | 389,47 | 389,47 | 467,82 | 463,89 | 447,61 | 431,68 |
| | En Küçük Kareler | 431,95 | 421,46 | 390,65 | 390,65 | 472,86 | 469,07 | 463,40 | 456,54 |
| | SEY (ANSYS) | 422,43 | 405,66 | 387,62 | 387,62 | 453,93 | 449,82 | 428,24 | 406,10 |
| 1,20 | Galerkin | 408,47 | 394,02 | 369,15 | 369,15 | 433,95 | 427,01 | 419,67 | 403,87 |
| | En Küçük Kareler | 411,40 | 401,21 | 370,15 | 370,15 | 439,40 | 432,71 | 435,55 | 428,39 |
| | SEY (ANSYS) | 403,32 | 387,10 | 367,56 | 367,56 | 421,78 | 414,52 | 402,75 | 381,39 |
| 1,30 | Galerkin | 392,91 | 378,94 | 354,18 | 354,18 | 406,76 | 397,43 | 397,50 | 382,07 |
| | En Küçük Kareler | 395,40 | 385,04 | 355,04 | 355,04 | 411,74 | 402,75 | 411,62 | 403,99 |
| | SEY (ANSYS) | 388,48 | 372,98 | 352,82 | 352,82 | 396,02 | 386,28 | 382,63 | 362,22 |
| 1,40 | Galerkin | 380,57 | 367,16 | 342,91 | 342,91 | 384,56 | 373,29 | 379,60 | 364,66 |
| | En Küçük Kareler | 382,69 | 372,38 | 343,64 | 343,64 | 389,13 | 378,27 | 392,24 | 384,36 |
| | SEY (ANSYS) | 376,72 | 361,98 | 341,73 | 341,73 | 375,01 | 363,27 | 366,45 | 347,04 |
| 1,60 | Galerkin | 362,45 | 350,21 | 327,45 | 327,45 | 350,75 | 336,51 | 352,76 | 338,89 |
| | En Küçük Kareler | 364,05 | 354,14 | 328,00 | 328,00 | 354,66 | 340,93 | 363,07 | 355,03 |
| | SEY (ANSYS) | 359,49 | 346,23 | 326,57 | 326,57 | 343,06 | 328,30 | 342,29 | 324,82 |
| 1,80 | Galerkin | 350,03 | 338,84 | 317,68 | 317,68 | 326,51 | 310,10 | 333,87 | 321,04 |
| | En Küçük Kareler | 351,27 | 341,90 | 318,10 | 318,10 | 329,91 | 314,06 | 342,44 | 334,48 |
| | SEY (ANSYS) | 347,68 | 335,71 | 317,01 | 317,01 | 320,21 | 303,26 | 325,38 | 309,60 |
| 2,00 | Galerkin | 341,13 | 330,85 | 311,15 | 311,15 | 308,51 | 290,45 | 320,08 | 308,17 |
| | En Küçük Kareler | 342,13 | 333,28 | 311,48 | 311,48 | 311,49 | 294,01 | 327,32 | 319,51 |
| | SEY (ANSYS) | 339,24 | 328,33 | 310,62 | 310,62 | 303,26 | 284,67 | 313,07 | 298,71 |
| 2,50 | Galerkin | 327,48 | 318,82 | 301,93 | 301,93 | 279,55 | 258,70 | 298,38 | 288,20 |
| | En Küçük Kareler | 328,10 | 320,33 | 302,12 | 302,12 | 281,77 | 261,48 | 303,36 | 296,00 |
| | SEY (ANSYS) | 326,28 | 317,25 | 301,63 | 301,63 | 276,06 | 254,74 | 293,77 | 281,98 |
| 3,00 | Galerkin | 320,05 | 312,42 | 297,35 | 297,35 | 262,99 | 240,41 | 286,28 | 277,24 |
| | En Küçük Kareler | 320,48 | 313,44 | 297,48 | 297,48 | 264,70 | 242,63 | 289,90 | 282,90 |
| | SEY (ANSYS) | 319,24 | 311,36 | 297,18 | 297,18 | 260,53 | 237,58 | 283,04 | 272,87 |
| 4,00 | Galerkin | 312,67 | 306,15 | 293,12 | 293,12 | 245,81 | 221,30 | 273,99 | 266,25 |
| | En Küçük Kareler | 312,90 | 306,72 | 293,19 | 293,19 | 246,88 | 222,77 | 276,13 | 269,59 |
| | SEY (ANSYS) | 312,23 | 305,59 | 293,07 | 293,07 | 244,44 | 219,71 | 272,16 | 263,78 |

Çizelge 3. 13 Asal Doğal Frekans $\omega_0$ (Hz), dört kenar basit mesnetli, plak kısa kenarı a (devamı)

| b/a | YÖNTEM | LT17 | LT18 | LT19 | LT20 | LT21 | LT22 | LT23 | LT24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) | $\omega_0$ (Hz) |
| 1,00 | Galerkin | 483,59 | 467,97 | 440,21 | 454,71 | 417,78 | 417,78 | 454,71 | 440,21 |
| | En Küçük Kareler | 504,22 | 499,21 | 450,44 | 458,96 | 419,17 | 419,17 | 458,96 | 450,44 |
| | SEY (ANSYS) | 461,25 | 438,74 | 430,70 | 447,61 | 415,61 | 415,61 | 447,61 | 430,70 |
| 1,10 | Galerkin | 434,90 | 422,78 | 390,83 | 402,06 | 375,20 | 375,20 | 402,06 | 390,83 |
| | En Küçük Kareler | 452,09 | 449,11 | 400,86 | 406,28 | 376,52 | 376,52 | 406,28 | 399,98 |
| | SEY (ANSYS) | 414,43 | 396,00 | 382,01 | 395,63 | 373,31 | 373,31 | 395,63 | 382,01 |
| 1,20 | Galerkin | 397,24 | 388,20 | 353,75 | 362,02 | 344,17 | 344,17 | 362,02 | 353,75 |
| | En Küçük Kareler | 415,65 | 415,31 | 363,50 | 366,19 | 345,40 | 345,40 | 366,19 | 363,50 |
| | SEY (ANSYS) | 378,44 | 363,65 | 345,58 | 356,16 | 342,52 | 342,52 | 356,16 | 345,58 |
| 1,30 | Galerkin | 367,46 | 361,13 | 325,31 | 330,86 | 321,07 | 321,07 | 330,86 | 325,31 |
| | En Küçük Kareler | 384,91 | 386,44 | 334,70 | 334,96 | 322,21 | 322,21 | 334,96 | 334,70 |
| | SEY (ANSYS) | 350,13 | 338,62 | 317,73 | 325,50 | 319,63 | 319,63 | 325,50 | 317,73 |
| 1,40 | Galerkin | 343,45 | 339,54 | 303,06 | 306,14 | 303,54 | 303,54 | 306,14 | 303,06 |
| | En Küçük Kareler | 360,02 | 363,20 | 312,07 | 310,16 | 304,59 | 304,59 | 310,16 | 312,07 |
| | SEY (ANSYS) | 327,45 | 318,88 | 296,05 | 301,23 | 302,29 | 302,29 | 301,23 | 296,05 |
| 1,60 | Galerkin | 307,48 | 307,65 | 271,12 | 269,90 | 279,43 | 279,43 | 269,90 | 271,12 |
| | En Küçük Kareler | 322,45 | 328,39 | 279,28 | 273,70 | 280,30 | 280,30 | 273,70 | 279,28 |
| | SEY (ANSYS) | 293,73 | 290,20 | 265,12 | 265,74 | 278,47 | 278,47 | 265,74 | 265,12 |
| 1,80 | Galerkin | 282,16 | 285,62 | 249,86 | 245,08 | 264,22 | 264,22 | 245,08 | 249,86 |
| | En Küçük Kareler | 295,73 | 303,88 | 257,17 | 248,63 | 264,95 | 264,95 | 248,63 | 257,17 |
| | SEY (ANSYS) | 270,27 | 270,79 | 244,73 | 241,53 | 263,49 | 263,49 | 241,53 | 244,73 |
| 2,00 | Galerkin | 263,64 | 269,77 | 235,07 | 227,35 | 254,14 | 254,14 | 227,35 | 235,07 |
| | En Küçük Kareler | 275,97 | 285,92 | 241,58 | 230,64 | 254,74 | 254,74 | 230,64 | 241,58 |
| | SEY (ANSYS) | 253,28 | 257,09 | 230,66 | 224,30 | 253,58 | 253,58 | 224,30 | 230,66 |
| 2,50 | Galerkin | 234,38 | 245,29 | 213,23 | 200,21 | 240,16 | 240,16 | 200,21 | 213,23 |
| | En Küçük Kareler | 244,15 | 257,38 | 218,09 | 202,86 | 240,55 | 240,55 | 202,86 | 218,09 |
| | SEY (ANSYS) | 226,87 | 236,43 | 210,16 | 198,07 | 239,87 | 239,87 | 198,07 | 210,16 |
| 3,00 | Galerkin | 217,99 | 231,92 | 201,92 | 185,52 | 233,42 | 233,42 | 185,52 | 201,92 |
| | En Küçük Kareler | 225,82 | 241,21 | 205,59 | 187,65 | 233,69 | 233,69 | 187,65 | 205,59 |
| | SEY (ANSYS) | 212,37 | 225,47 | 199,71 | 183,98 | 233,29 | 233,29 | 183,98 | 199,71 |
| 4,00 | Galerkin | 201,28 | 218,60 | 191,14 | 170,98 | 227,38 | 227,38 | 170,98 | 191,14 |
| | En Küçük Kareler | 206,50 | 224,46 | 193,40 | 172,39 | 227,54 | 227,54 | 172,39 | 193,40 |
| | SEY (ANSYS) | 197,89 | 214,81 | 189,91 | 170,14 | 227,41 | 227,41 | 170,14 | 189,91 |

# BÖLÜM 4

# SONUÇ VE ÖNERİLER

## 4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada düzgün yayılı yanal yük etkisindeki simetrik katmanlı kompozit plakların eğilmesi ve serbest titreşimi incelenmiştir. Plağın kenarlarından ankastre mesnetli veya basit mesnetli olduğu sınır koşullarında, tabaka istiflenme açısının ve kenar oranı değişiminin, plak orta noktasındaki maksimum çökme değeri ve asal doğal frekansına etkisi, Klasik Laminasyon Teorisi'nin (KLT) yönetici diferansiyel denklemleri kullanılarak Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi ile hesaplanmıştır. Sonuçlar, Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Simetrik katmanlı kompozit plak içindeki ağırlık dağılımı aynı olan tabakaların, farklı açılarda ($-45^0$,$0^0$, $45^0$, $90^0$) istiflenmesiyle oluşan 24 farklı plak çeşidi (LT1, ... , LT24) için plak kısa kenarının farklı eksenlerde (y ve x) seçimiyle oluşan 22 farklı kenar oranı (a/b ve b/a) ve farklı sınır koşullarında (ankastre mesnet ve basit mesnet) plak ortasındaki maksimum çökme değeri ve asal doğal frekansının, kullanılan yöntemlerle bulunan sonuçları Bölüm 3.3 ve 3.4'te sunulmuştur (Şekil 3.4, 3.19 ve Çizelge 3.6, 3.13).

Statik ve dinamik analiz sonuçlarında; aynı şekil fonksiyonları (Çizelge 2.2) kullanılarak yapılan hesaplamalarda, incelenen iki sınır koşulunda da Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nden güçlü bir yöntem olarak bilinen Galerkin Yöntemi'nin, En Küçük Kareler Yöntemi'ne göre Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 3.4, 3.19 ve Çizelge 3.6, 3.13).

Statik analiz sonuçlarındaki ankastre mesnet sınır koşulunda, plak kısa kenarının (b kenarı) y ekseninde seçildiği durumda, tabakaların farklı açılarda istiflenmesinden oluşan 24 farklı kombinasyondaki plağın arasında, plakların ikişer ikişer aynı maksimum çökme değerini verdikleri görülmektedir. Bu durum, tabakaları farklı açılarda sıralanan plakların dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisi elemanlarıyla, eğilme rijitlik matrisi (Dij) elemanlarının yaklaşık çökme ifadesinde aynı ağırlıkta yer almasından kaynaklanmaktadır. Örneğin grafiklerdeki en alttaki eğri kenar oranının (a/b) bir, en üstteki eğri ise kenar oranın dört olduğu durumu göstermektedir. Eğrilerin eğilimlerinden kenar oranının (a/b) artmasıyla, maksimum çökme değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 3.4). Plak kısa kenarının (b kenarı) y ekseninde seçildiği durumda, 24 farklı plak tipinin maksimum çökme değerlerinin değiştiği görülmektedir (Şekil 3.5).

Statik analiz sonuçlarındaki basit mesnet sınır koşulunda, plak kısa kenarının y ve x ekseninde seçildiği durumlarda, 24 farklı plak tipinin maksimum çökme değerlerinin kendi aralarında, ankastre mesnet sınır koşulundaki durumlara benzer biçimde sıralandığı görülmektedir ( Şekil 3. 8, 3.9).

Dinamik analiz sonuçlarındaki ankastre mesnet sınır koşulunda, plak kısa kenarının (b kenarı) y ekseninde seçildiği durumda, tabakaların farklı açılarda istiflenmesinden oluşan 24 farklı kombinasyondaki plağın arasında, plakların ikişer ikişer aynı asal doğal frekans değerini verdikleri görülmektedir. Bu durum, statik analiz sonuçlarına benzer biçimde, tabakaları farklı açılarda sıralanmış plakların dönüşüme uğramış indirgenmiş katılık matrisi elemanlarıyla, (Dij) eğilme rijitlik matrisi elemanlarının doğal frekans ifadelerinde aynı ağırlıkta yer almasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerdeki en alttaki eğri kenar oranının (a/b) dört, en üstteki eğri ise kenar oranının bir olduğu durumu göstermektedir. Eğrilerin eğilimlerinden kenar oranının (a/b) artmasıyla, asal serbest titreşim frekansı değerlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 3.12). Plak kısa kenarının (b kenarı) y ekseninde seçildiği durumda, 24 farklı plak tipinin asal doğal frekans değerlerinin değiştiği görülmektedir (Şekil 3.13).

Dinamik analiz sonuçlarındaki basit mesnet sınır koşulunda, plak kısa kenarının y ve x ekseninde seçildiği durumlarda, 24 farklı plak tipinin asal doğal frekans değerlerinin

kendi aralarında, ankastre mesnet sınır koşulundaki durumlara benzer biçimde sıralandığı görülmektedir (Şekil 3. 16, 3.17).

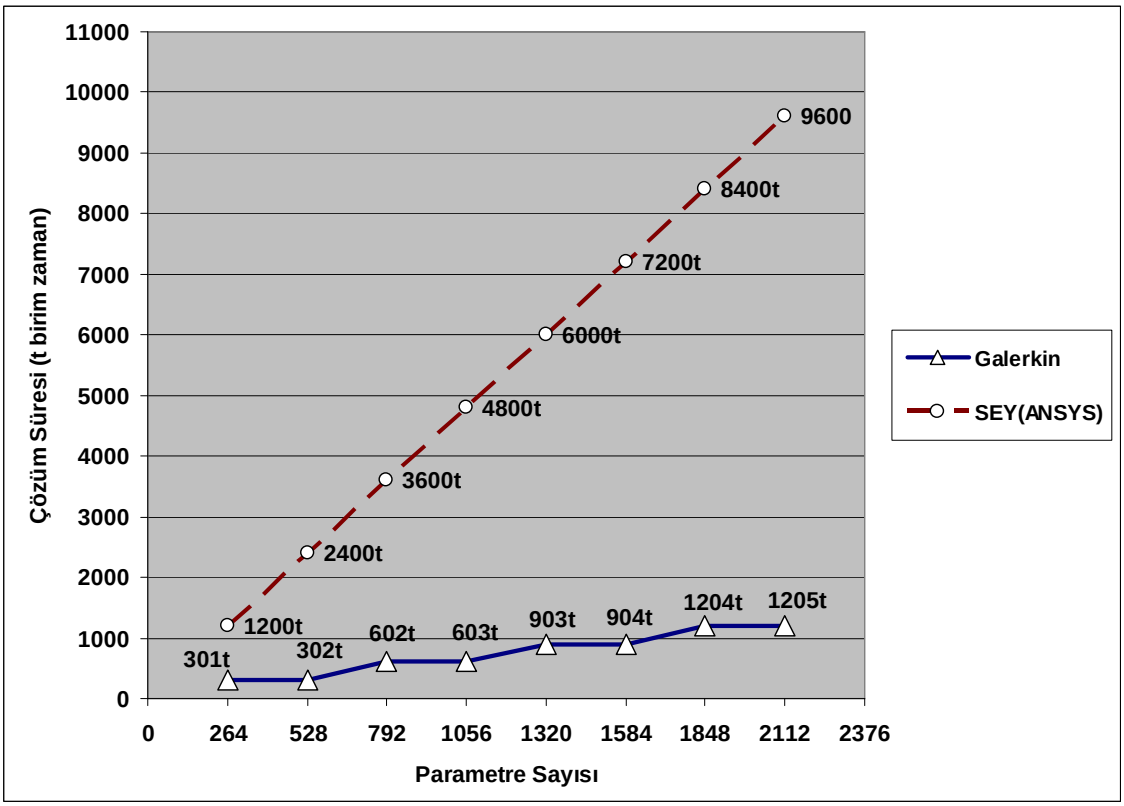
Statik ve dinamik analiz sonuçlarında, 24 farklı tipteki plağın kendi aralarındaki maksimum çökme ve asal doğal frekans sıralamasının farklı kenar oranlarında değiştiği görülmektedir (Çizelge 3. 6, 3. 13). Örneğin; statik analiz sonuçlarında; ankastre mesnet sınır koşulunda, kenar oranının (b/a) "bir" olduğu durumda, en düşük maksimum çökme değerini LT11, LT12, LT21 ve LT22 plaklarının, kenar oranının (b/a) "dört" olduğu durumda ise en düşük maksimum çökme değerini LT7 ve LT9 plaklarının verdiği SEY (ANSYS) sonuçlarından görülmektedir (Çizelge 3. 7). Dinamik analiz sonuçlarında; basit mesnet sınır koşulunda, kenar oranının (a/b) "bir" olduğu durumda, en düşük asal doğal frekans değerini LT11, LT12, LT21 ve LT22 plaklarının, kenar oranının (a/b) "dört" olduğu durumda ise en düşük asal doğal frekans değerini LT20 ve LT23 plaklarının verdiği SEY (ANSYS) sonuçlarından görülmektedir (Çizelge 3. 12).

Bu çalışmada Galerkin Yöntemi ve En Küçük Kareler Yöntemi'ndeki integral denklemleri MATLAB programlama dilinin sembollere bağlı çözüm tekniği kullanılarak boyutsuz olarak hesaplandıktan sonra, elde edilen sonuç denklemleri hazırlanan bilgisayar programında kullanılarak parametrik analiz yapılmıştır. En Küçük Kareler Yöntemi'nde, hata fonksiyonunun karesi bölge üzerinde integre edilerek çözüm yapıldığından, Galerkin Yöntemi'ne göre çok daha uzun sürede sonuç alınabilmiştir. Literatürdeki araştırmacıların [34, 35, 36] Galerkin Yöntemi'yle hızlı sonuç alınmasına vurgu yaptıklarına benzer biçimde bu çalışmada da Galerkin Yöntemi'yle, Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözüm yapan ANSYS paket programına göre çok hızlı sonuç alınmıştır.

Bu durum Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) hassas sonuç alabilmek için ANSYS paket yazılımında, geometrinin sonlu sayıda elemandan oluşan ağ yapısı biçiminde düzenlenip elde edilen denklemlerin ayrı ayrı çözülmesinden kaynaklanmaktadır. Yazılımın çözüm hiyerarşisi gereği incelenen her sınır koşulunda, bütün plak tipleri ve kenar oranları için ayrı ayrı ağ yapısı oluşturulup problemlerin ayrı ayrı çözülmesi işlem süresini arttırmaktadır. Bunun yanında çalışmada kullanılan Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'nde, plak tipi ve kenar oranı gibi istenilen sayıda parametre MATLAB

programlama dilinde sembollere bağlı olarak tanımlanıp problemler boyutsuz biçimde çözüldükten sonra, elde edilen boyutsuz denklem hazırlanan bilgisayar programında veri olarak kullanılıp istenen tüm parametreler için sonuçlar çok hızlı biçimde alınabilmektedir.

Çalışmada incelenen her sınır koşulundaki kısa kenar seçiminde (a ve b) 24 farklı simetrik katmanlı kompozit plak tipi 11 farklı kenar oranı için hesaplanmıştır. Parametre sayısına bağlı olarak çözüm süresi artmaktadır. Bu durum Şekil 4. 1'de gösterilmektedir. Galerkin Yöntemi'nde bir sınır koşulu incelenirken, öncelikle çalışmadaki parametreler sembollere bağlı olarak tanımlanıp boyutsuz çözüm denklemi MATLAB programlama dilinde 300 t zamanda elde edilmiştir. Ardından MATLAB programlama dilinde hazırlanan bilgisayar programı içinde kullanılan bu boyutsuz denklemle 264 parametre (24 farklı simetrik katmanlı kompozit plak tipi ve kısa kenar b için 11 farklı kenar oranı) için çözüm t zamanda elde edilmiştir. ANSYS ile 264 parametre için çözümü 1200 t zamanda elde edilebilmiştir. Kısa kenarın a kenarı olduğu durum incelenirken, ANSYS ile yine 1200 t sürede sonuç alınırken; Galerkin Yöntemi'nde çözüm denklemi bir kez bulunduğu için sonuç 302 t sürede elde edilebilmektedir. Aynı anda çok sayıda paremetrenin inceleneceği bu tür parametrik analizlerde Galerkin Yöntemi'nin, hassas çözüm vermek için yapıyı çok sayıda elemana bölüp çözüm arayan Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden (SEY) çözüm süresi yönünden daha üstün olduğu düşünülmüştür. Galerkin Yöntemi'yle bulunan detaylı boyutsuz sonuçlar tabaka kullanım adedi "n" 1, 2 ve 3 için EK-A'da verilmiştir.




Şekil 4. 1 Galerkin Yöntemi kullanılarak hazırlanan bilgisayar programı (MATLAB) ve SEY (ANSYS) ile yapılan parametrik analizlerde, parametre sayısının çözüm süresine etkisi

Bu çalışmada, düzgün yayılı yanal yük etkisindeki, simetrik katmanlı kompozit plakların, tabaka açılarının değiştirilip, plak kısa kenarının ve boyutlarının farklı seçilmesi durumunda ankastre ve basit mesnet sınır koşullarında, maksimum çökme ve asal doğal frekans değerlerinin belirgin olarak değiştiği belirlenmiştir. Kompozit tekne üretiminde, farklı tekne ana boyutları, enine veya boyuna farklı yapı sistemleri, farklı panel boyutları, farklı panel kalınlıkları, yapının farklı bölgelerinde değişen yükleme ve sınır koşulları gibi çok sayıda parametreye bağlı oluşabilecek durumlar söz konusudur. Kompozit teknelerin ön tasarımında, hızlı çözümleme yapan Galerkin Yöntemi'nin kullanımıyla yapılacak parametrik çalışmaların uygulanmasının, teknenin farklı bölgelerinde istenen yapısal davranışa uygun cevap verecek bileşik tabakalı kompozit plakların belirlenmesinde faydalı olacağı düşünülmüştür. Galerkin Yöntemi kullanımıyla hazırlanan EK-A'da sunulmuş boyutsuz çökme ve asal doğal frekans değerlerinin verildiği çizelgelerde, yapıların farklı bölgelerindeki farklı yükleme durumları için en uygun plaklar belirlenebilecektir.

Günümüzde denizcilik alanındaki bileşik tabakalı kompozit yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan termosetlerin (polyester, epoksi, vinilester vd.) üretimdeki tersinmez reaksiyonları sonucu, geri dönüşümü olmayan malzemeler elde edilmiş olmaktadır [56]. Ön tasarımda yapılacak parametrik analizlerle en uygun yapının belirlenmesiyle, üretimdeki zaman, malzeme ve emek kayıplarının yanında, üretimden kaynaklanan çevresel etkiler de azaltılmış olacaktır.

### 4.2 Öneriler

Konuyla ilgilenen araştırmacılara aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Bu çalışmadaki Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri kullanımıyla yapılan sayısal uygulamalarda Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımı ile yakın sonuçlar bulunmuştur. Daha yakın sonuçlar bulmak isteyen araştırmacılar, seçilen şekil fonksiyonlarındaki terim sayılarını arttırarak çözüm arayabilir.
- Hesaplamaların yanında gerçek sonuçlara ulaşmak için deneysel çalışmalar yapılıp hesaplamalarla karşılaştırılabilir.
- Statik ve dinamik analiz sonuçlarında; En Küçük Kareler Yöntemi'nin basit mesnet sınır koşulunda, ankastre mesnet sınır koşulundaki durumlara göre SEY ile daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 3.4, 3.19 ve Çizelge 3.6, 3.13). Bu durum seçilen şekil fonksiyonlarının, basit mesnet sınır koşulunda bulunan sonuçları etkilediğini göstermektedir. En Küçük Kareler Yöntemi'ye yapılan sayısal uygulamalarda literatürde verilen [39] farklı şekil fonksiyonları kullanılarak çözüm aranabilir.
- Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri'yle yapılan sayısal uygulamalarda, "plak kısa kenarı/plak kalınlığı" oranı 62.5 olduğu durum için, kayma deformasyonlarının dikkate alınmadığı, Klasik Laminasyon Teorisi (KLT)'nin yönetici diferansiyel denklemleri kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle (SEY) çözümleme yapan ANSYS paket yazılımıyla yapılan hesaplamalarda kullanılan SHELL181 kabuk elemanı Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi'ne (BMKDT) göre şekil değiştirmektedir. "Plak kısa kenarı/plak kalınlığı" oranının farklı olduğu durumlar

için yapılacak sayısal uygulamalarla, Ağırlıklı Artıklar Yöntemleri ve SEY sonuçları birlikte araştırılabilir.

- Bu çalışmada incelenen ankastre mesnet ve basit mesnet sınır koşulları alt ve üst limitler olarak tanımlanabilecek ideal durumları temsil etmektedir. Gemi yapısındaki plakları destekleyen destek elemanlarının durumlarına bağlı olarak, gerçeğe daha uygun elastik mesnet sınır koşulları için problemler incelenebilir.
- Gemi bordalarındaki eğilme ve serbest titreşim problemleri incelenebilir. Bu durumda eğilme probleminde bordaya gelen yük hidrostatik basınç yükü alınarak, titreşim probleminde ise sönüm etkileri dikkate alınarak çözüm aranabilir.
- Düzlemsel kuvvetlerin etkisindeki levhaların burkulması incelenebilir. Levhaların geometrik olarak kusurlu olması durumunda sonuçlara etkisi incelenebilir.
- Eğrisel geometri için hesaplamalar yapılabilir.
- Sıcaklık ve nem etkisi incelenebilir.
- Hasar analizi yapılabilir.
- Bu çalışmadaki parametrik analizlerde P4- 2GHz işlemci ve 3 GB RAM özelliklerindeki masaüstü bilgisayarıyla, Galerkin Yöntemi'nde üç terimli yaklaşım fonksiyonları kullanılarak, Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle yakın sonuçlar çok daha kısa sürede elde edilmiştir. Analizlerde parametre sayılarını arttırarak uygun sürelerde sonuç elde etmek isteyen araştırmacılar, yüksek kapasiteli bilgisayar kullanımıyla çözüm arayabilir.

## KAYNAKLAR


[1] Smith, W.F. ve Hashemi, J., (2006). "Foundations of Materials Science and Engineering", Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition.

[2] Askeland, D.R. ve P.P.Phule, (2006). "The Science and Engineering of Materials", Thomson Pub. 5th Edition.

[3] Reuben, R.L., (1994). "Materials in Marine Technology", Springer-Verlag London Limited, UK.

[4] Shenoi, R.A., ve Wellicome, J.F., (1993). "Composite Materials in Maritime Structures, Volume-I (Fundamental Aspects)", Cambridge University Pres, NY.

[5] Shenoi, R.A., ve Wellicome, J.F., (1993). "Composite Materials in Maritime Structures, Volume-II (Practical Considerations),"Cambridge University Pres, NY.

[6] Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P. ve Challis K., (2001), "Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines", Composite Structures, 53:21-41.

[7] Bai, Y., , (2003). "Marine Structural Design", Elsevier Science Ltd., UK.

[8] Savcı, M., (1987). "Gemi Yapısında Levhalar ve Silindirik Kabuklar", İ.T.Ü. Gemi İnş. Ve Deniz Bil. Fak, İstanbul.

[9] Özalp, T., ( 1977). "Gemi Yapısı ve Elemanları", Özarkadaş Matbaası, İstanbul.

[10] Türk Loydu, (2004). "Cilt A – Kısım 2 – Malzeme Kuralları". http://www.turkloydu.org/turkloydu/Plan-Kontrol-ve-Arast%c4%b1rma-Hizmetleri/Turk-Loydu-Kurallari/Kurallara-Erisim.aspx. 24 Ağustos 2011.

[11] Türk Loydu, (2005)."Cilt C - Kısım 7 - Yüksek Hızlı Tekneler". http://www.turkloydu.org/turkloydu/Plan-Kontrol-ve-Arast%c4%b1rma-Hizmetleri/Turk-Loydu-Kurallari/Kurallara-Erisim.aspx. 24 Ağustos 2011.

[12] Türk Loydu, (2004). "Cilt C - Kısım 9 - Yatların Yapımı ve Klaslanmasına İlişkin Kurallar".http://www.turkloydu.org/turkloydu/Plan-Kontrol-ve-Arast%c4%b1rma-Hizmetleri/Turk-Loydu-Kurallari/Kurallara-Erisim.aspx.

24 Ağustos 2011.

[13] Türk Loydu, (2011). "Cilt B-Kısım 4 – Makina Kuralları".http://www.turkloydu.org/turkloydu/Plan-Kontrol-ve-Arast%c4%b1rma-Hizmetleri/Turk-Loydu-Kurallari/Kurallara-Erisim.aspx.

24 Ağustos 2011.

[14] DNV (Det Norske Veritas), (2011). "DNV Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft", Det Norske Veritas rules. http://www.dnv.com/resources/rules_standards. 24 Ağustos 2011.

[15] Todd, F.H., (1961) "Ship Hull Vibration" Edward Arnold (Publishers) Ltd., London.

[16] Plessis, H.D., (1996). "Fiberglass Boats", 3rd Edition, Adlard Coles Nautical, London.

[17] Scott, R.J., (1996). "Fiberglass Boat Design and Construction", Second Edition, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey.

[18] Gerr, D., (2000). "The Elements of Boat Strength: For Builders, Designers, and Owners", International Marine/McGraw-Hill ,USA.

[19] Eric Green Associates, (1999). "Marine Composites", Second Edition, Eric Green Associates Inc., Maryland.

[20] Chalmers, D.W., (1991). "Experience in design and production of FRP marine structure", Marine Structures, 4: 93-115.

[21] Ojeda R., Prusty B.G. ve Salas M., (2004). "Finite element investigation on THA static response of a composite catamaran under slamming loads", Ocean Engineering 31: 901-929.

[22] Santos, F.M., Temarel, P. ve Soares, C.G. (2009) "Modal analysis of a fast patrol boat made of composite material", Ocean Engineering 36: 179-192.

[23] Bayer, İ., (2002). Değişken kalınlıklı eliptik levhaların burkulması ve titreşimleri, Doktora Tezi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İTÜ.

[24] Szilard, R., (1974). "Theory and Analysis of Plates", Prentice-Hall Inc., New Jersey.

[25] Ventsel, E ve Krauthammer, T. (2001). "Thin Plates and Shells, Theory, Analysis, and Applications" Marcel Dekker Inc., NY.

[26] Lekhnitskii, S.G., (1963). "Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body", Holden-Day, San Francisco.

[27] Lekhnitskii, S.G., (1968). "Anisotropic Plates", Gordon and Breach, NewYork.

[28] Ambartsumyan, S.A, (1970). "Theory of Anisotropic Plates", Technomic Publishing, Co., Wesport Conn.

[29] Whitney, J.M. ve Leissa A.W., (1970). "Analysis of simply supported laminated anisotropic rectangular plates", AEII Journal, 8: 28-33.

[30] Whitney, J.M., (1971). "Fourier analysis of clamped anisotropic rectangular plates", ASME Journal of Applied Mechanics, 38: 530-2.

[31] Tsay, C.S. ve Reddy, J.N., (1978). “Bending, stability and free vibration of thin orthotropic plates by simplified mixed finite elements”, Journal of Sound and Vibration, 59: 307-11.

[32] Leissa, A.W. ve Narita, Y., (1989). “Vibration studies for simply supported symmetrically laminated rectangular plates”, Composite Structures 12: 113-132.

[33] Mohan, D., ve Kingsbury, H.B., (1971). “Free vibrations of generally orthotropic plates”, J. Acoust. Soc.Am., 50: 266-9.

[34] Soni P.J. ve Iyengar, N.G.R., (1983). “Optimal design of clamped laminated composite plates”, Fiber Sci. & Tech., 19: 281-96.

[35] Iyengar, N.G.R. ve Umeriyata, J.R., (1986). “Deflection Analysis of Hybrid Laminated Composite Plates”, Composite Structures, 5, 15-32.

[36] Hosokawa, K., Yada, T. ve Sakata, (1993) T. “Free Vibrations of Symmetrically Laminated Composite Plates”, The Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.36, No.3.

[37] Mottram, J.T. ve Selby, A.R., (1987). “Bending of thin laminated plates”, Computers and Structures, V.25, No.2: 271-280.

[38] Chen, W.C., ve Lui, W.H., (1990). “Deflections and free vibrations of laminated plates-Levy type solutions”, International Journal of Mechanical Sciences, 3 (9): 779-793.

[39] Reddy, J. N., (1997). “Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis”, CRC Press, Boca Raton, FL.

[40] Noor, A.K. ve Burton W.S., (1989). “Assesment of shear deformation theories for multilayered composite plates”, Appl Mech Rev. 42 (1).

[41] Noor, A.K. ve Burton W.S., (1990). “Assesment of computational model for multilayered composite plates”, Appl Mech Rev., 43 (4): 67-97.

[42] Mallikarjuna ve Kant, T., (1993). “A critical review and some results of recently developed refined theories of fiber-reinforced laminated composites and sandwiches”, Composite Structures, 23: 293-312.

[43] Reddy, J.N. ve Robbins Jr.D.H., (1994). “Theories and computational models for composite laminates”, Appl Mech Rev. 47 (6): 147-69.

[44] Kreja, I., (2011). “A literature review on computational models for laminated composite and sandwich panels”, Cent. Eur. J. Eng., 1 (1): 59-80.

[45] ASM Handbook, (2001). Volume 21, Composites, ASM International.

[46] Aran, A., (1990). Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler, İTÜ.

[47] Powell, P.C., (1994). “Engineering with fibre-polymer laminates”, Chapman & Hall, London, UK.

[48] Mallick P. K., (1997). “Composites engineering handbook”, Marcel Dekker Inc., NY.

[49] Harper, C.A., (1994). “Handbook of plastics, elastomers, and composites”, McGraw-Hill, NY, 2002. P.C., Engineering with fibre-polymer laminates, Chapman & Hall, London, UK.

[50] Matlab R2011b, Symbolic Math Toolbox, MathWorks, YTÜ, (2011).

[51] Release 9.0, Documentation for ANSYS, YTÜ, (2009).

[52] About.com Composites/Plastics http://composite.about.com, 24 Ağustos 2011.

[53] ides The Plastic Web, http://www.ides.com, 24 Ağustos 2011.

[54] Hrennikoff A., (1941). “Solution of Problems in Elasticity by the Framework method”, Journal of Applied Mechanics, A8: 169-175.

[55] Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları, Ergin A., Bayraktarkatal E., Ünsan Y., (2000). Yapım Matbaacılık Ltd., İstanbul.

[56] CTP Teknolojisi, Cam Elyaf Sanayii A.Ş., http://www.camelyaf.com.tr/images/pdf/CTPcamelyaf.pdf , 24 Ağustos 2011.

# EK-A

## DETAYLI BOYUTSUZ SONUÇLAR

Bu bölümde, tez çalışmasında incelenen 24 farklı simetrik katmanlı kompozit plağın, tabaka kullanım adedi "n"nin 1, 2 ve 3 değerleri için, yapılan statik ve dinamik analizlerinin Galerkin Yöntemi ile bulunmuş detaylı boyutsuz sonuçları sunulmuştur (Çizelge EK-A. 1, EK-A. 24).

Statik analizde, düzgün yayılı yanal yük etkisindeki bileşik katmanlı kompozit plakların orta noktasındaki maksimum çökme değerleri plak kısa kenarının, yükün ve tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qb^4}$ ve $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qa^4}$ biçiminde boyutsuz olarak verilmiştir (Çizelge EK-A. 1, EK-A..12).

Dinamik analizde, bileşik katmanlı kompozit plakların asal serbest titreşim frekansları plak kısa kenarının ve tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2\pi}{t}$ ve $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$ biçiminde boyutsuz olarak verilmiştir (Çizelge EK-A. 13, EK-A. 24).

Çizelge EK-A. 1 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 47678 | 59884 | 72057 | 83763 | 94700 | 113666 | 128577 | 139855 | 156677 | 164299 | 170166 |
| LT2 | 47588 | 58697 | 69339 | 79160 | 87963 | 102344 | 112766 | 120033 | 129522 | 133033 | 135844 |
| LT3 | 48270 | 58678 | 68656 | 77948 | 86412 | 100711 | 111722 | 120011 | 132599 | 138733 | 144133 |
| LT4 | 48270 | 56750 | 64456 | 71293 | 77253 | 86770 | 93638 | 98538 | 105544 | 108866 | 112100 |
| LT5 | 47588 | 54936 | 61212 | 66425 | 70669 | 76769 | 80542 | 82824 | 85383 | 86490 | 88326 |
| LT6 | 47678 | 54195 | 59688 | 64217 | 67897 | 73218 | 76589 | 78723 | 81407 | 82733 | 84635 |
| LT7 | 46575 | 61546 | 77577 | 94001 | 110222 | 140233 | 165388 | 185211 | 215411 | 228233 | 235144 |
| LT8 | 46731 | 60569 | 74754 | 88621 | 101666 | 124077 | 141088 | 153177 | 168455 | 172655 | 173533 |
| LT9 | 46575 | 61546 | 77577 | 94001 | 110222 | 140233 | 165388 | 185211 | 215411 | 228233 | 235144 |
| LT10 | 46731 | 60569 | 74754 | 88621 | 101666 | 124077 | 141088 | 153177 | 168455 | 172655 | 173533 |
| LT11 | 46814 | 58477 | 69463 | 79293 | 87733 | 100400 | 108277 | 112644 | 115300 | 114099 | 113511 |
| LT12 | 46814 | 58477 | 69463 | 79293 | 87733 | 100400 | 108277 | 112644 | 115300 | 114099 | 113511 |
| LT13 | 48270 | 58678 | 68656 | 77948 | 86412 | 100711 | 111722 | 120011 | 132599 | 138733 | 144133 |
| LT14 | 48270 | 56750 | 64456 | 71293 | 77253 | 86770 | 93638 | 98538 | 105544 | 108866 | 112100 |
| LT15 | 47678 | 59884 | 72057 | 83763 | 94700 | 113666 | 128577 | 139855 | 156677 | 164299 | 170166 |
| LT16 | 47588 | 58697 | 69339 | 79160 | 87963 | 102344 | 112766 | 120033 | 129522 | 133033 | 135844 |
| LT17 | 47678 | 54195 | 59688 | 64217 | 67897 | 73218 | 76589 | 78723 | 81407 | 82733 | 84635 |
| LT18 | 47588 | 54936 | 61212 | 66425 | 70669 | 76769 | 80542 | 82824 | 85383 | 86490 | 88326 |
| LT19 | 46731 | 51352 | 54792 | 57265 | 58985 | 60881 | 61589 | 61783 | 61955 | 62559 | 64252 |
| LT20 | 46575 | 50405 | 53220 | 55237 | 56654 | 58293 | 59046 | 59424 | 60071 | 60853 | 62406 |
| LT21 | 46814 | 53045 | 57869 | 61438 | 63965 | 66733 | 67595 | 67524 | 66566 | 66509 | 68296 |
| LT22 | 46814 | 53045 | 57869 | 61438 | 63965 | 66733 | 67595 | 67524 | 66566 | 66509 | 68296 |
| LT23 | 46575 | 50405 | 53220 | 55237 | 56654 | 58293 | 59046 | 59424 | 60071 | 60853 | 62406 |
| LT24 | 46731 | 51352 | 54792 | 57265 | 58985 | 60881 | 61589 | 61783 | 61955 | 62559 | 64252 |

Çizelge EK-A. 2 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 47678 | 54195 | 59688 | 64217 | 67897 | 73218 | 76589 | 78723 | 81407 | 82733 | 84635 |
| LT2 | 47588 | 54936 | 61212 | 66425 | 70669 | 76769 | 80542 | 82824 | 85383 | 86490 | 88326 |
| LT3 | 48270 | 56750 | 64456 | 71293 | 77253 | 86770 | 93638 | 98538 | 105544 | 108866 | 112100 |
| LT4 | 48270 | 58678 | 68656 | 77948 | 86412 | 100711 | 111722 | 120011 | 132599 | 138733 | 144133 |
| LT5 | 47588 | 58697 | 69339 | 79160 | 87963 | 102344 | 112766 | 120033 | 129522 | 133033 | 135844 |
| LT6 | 47678 | 59884 | 72057 | 83763 | 94700 | 113666 | 128577 | 139855 | 156677 | 164299 | 170166 |
| LT7 | 46575 | 50405 | 53220 | 55237 | 56654 | 58293 | 59046 | 59424 | 60071 | 60853 | 62406 |
| LT8 | 46731 | 51352 | 54792 | 57265 | 58985 | 60881 | 61589 | 61783 | 61955 | 62559 | 64252 |
| LT9 | 46575 | 50405 | 53220 | 55237 | 56654 | 58293 | 59046 | 59424 | 60071 | 60853 | 62406 |
| LT10 | 46731 | 51352 | 54792 | 57265 | 58985 | 60881 | 61589 | 61783 | 61955 | 62559 | 64252 |
| LT11 | 46814 | 53045 | 57869 | 61438 | 63965 | 66733 | 67595 | 67524 | 66566 | 66509 | 68296 |
| LT12 | 46814 | 53045 | 57869 | 61438 | 63965 | 66733 | 67595 | 67524 | 66566 | 66509 | 68296 |
| LT13 | 48270 | 56750 | 64456 | 71293 | 77253 | 86770 | 93638 | 98538 | 105544 | 108866 | 112100 |
| LT14 | 48270 | 58678 | 68656 | 77948 | 86412 | 100711 | 111722 | 120011 | 132599 | 138733 | 144133 |
| LT15 | 47678 | 54195 | 59688 | 64217 | 67897 | 73218 | 76589 | 78723 | 81407 | 82733 | 84635 |
| LT16 | 47588 | 54936 | 61212 | 66425 | 70669 | 76769 | 80542 | 82824 | 85383 | 86490 | 88326 |
| LT17 | 47678 | 59884 | 72057 | 83763 | 94700 | 113666 | 128577 | 139855 | 156677 | 164299 | 170166 |
| LT18 | 47588 | 58697 | 69339 | 79160 | 87963 | 102344 | 112766 | 120033 | 129522 | 133033 | 135844 |
| LT19 | 46731 | 60569 | 74754 | 88621 | 101666 | 124077 | 141088 | 153177 | 168455 | 172655 | 173533 |
| LT20 | 46575 | 61546 | 77577 | 94001 | 110222 | 140233 | 165388 | 185211 | 215411 | 228233 | 235144 |
| LT21 | 46814 | 58477 | 69463 | 79293 | 87733 | 100400 | 108277 | 112644 | 115300 | 114099 | 113511 |
| LT22 | 46814 | 58477 | 69463 | 79293 | 87733 | 100400 | 108277 | 112644 | 115300 | 114099 | 113511 |
| LT23 | 46575 | 61546 | 77577 | 94001 | 110222 | 140233 | 165388 | 185211 | 215411 | 228233 | 235144 |
| LT24 | 46731 | 60569 | 74754 | 88621 | 101666 | 124077 | 141088 | 153177 | 168455 | 172655 | 173533 |

Çizelge EK-A. 3 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 138822 | 171866 | 206188 | 241155 | 276266 | 345233 | 410722 | 471400 | 599633 | 696822 | 824100 |
| LT2 | 145977 | 179000 | 212522 | 245877 | 278533 | 340400 | 396455 | 446166 | 544711 | 614011 | 698477 |
| LT3 | 127388 | 154844 | 183066 | 211633 | 240177 | 296100 | 349211 | 398577 | 503699 | 584322 | 691433 |
| LT4 | 127788 | 152700 | 177766 | 202600 | 226933 | 273322 | 315899 | 354277 | 432477 | 489477 | 561500 |
| LT5 | 146711 | 173066 | 198433 | 222499 | 245055 | 285422 | 319655 | 348411 | 401577 | 436266 | 475944 |
| LT6 | 140000 | 163955 | 187044 | 209033 | 229744 | 267100 | 299166 | 326399 | 377500 | 411477 | 450966 |
| LT7 | 160255 | 205666 | 254266 | 304922 | 356600 | 459622 | 558188 | 649377 | 839488 | 979766 | 1157220 |
| LT8 | 170133 | 216200 | 264177 | 312655 | 360500 | 451144 | 532144 | 602411 | 735611 | 823577 | 923833 |
| LT9 | 160255 | 205666 | 254266 | 304922 | 356600 | 459622 | 558188 | 649377 | 839488 | 979766 | 1157220 |
| LT10 | 170133 | 216200 | 264177 | 312655 | 360500 | 451144 | 532144 | 602411 | 735611 | 823577 | 923833 |
| LT11 | 192911 | 239700 | 285311 | 328233 | 367544 | 434288 | 486144 | 525833 | 589466 | 624355 | 658300 |
| LT12 | 192911 | 239700 | 285311 | 328233 | 367544 | 434288 | 486144 | 525833 | 589466 | 624355 | 658300 |
| LT13 | 127388 | 154844 | 183066 | 211633 | 240177 | 296100 | 349211 | 398577 | 503699 | 584322 | 691433 |
| LT14 | 127788 | 152700 | 177766 | 202600 | 226933 | 273322 | 315899 | 354277 | 432477 | 489477 | 561500 |
| LT15 | 138822 | 171866 | 206188 | 241155 | 276266 | 345233 | 410722 | 471400 | 599633 | 696822 | 824100 |
| LT16 | 145977 | 179000 | 212522 | 245877 | 278533 | 340400 | 396455 | 446166 | 544711 | 614011 | 698477 |
| LT17 | 140000 | 163955 | 187044 | 209033 | 229744 | 267100 | 299166 | 326399 | 377500 | 411477 | 450966 |
| LT18 | 146711 | 173066 | 198433 | 222499 | 245055 | 285422 | 319655 | 348411 | 401577 | 436266 | 475944 |
| LT19 | 172099 | 195366 | 215922 | 233933 | 249611 | 275099 | 294433 | 309266 | 333788 | 348011 | 362844 |
| LT20 | 162933 | 183833 | 202522 | 219100 | 233755 | 258055 | 276966 | 291799 | 316988 | 332066 | 348144 |
| LT21 | 193900 | 223377 | 248877 | 270533 | 288788 | 316944 | 336900 | 351333 | 373333 | 385022 | 396311 |
| LT22 | 193900 | 223377 | 248877 | 270533 | 288788 | 316944 | 336900 | 351333 | 373333 | 385022 | 396311 |
| LT23 | 162933 | 183833 | 202522 | 219100 | 233755 | 258055 | 276966 | 291799 | 316988 | 332066 | 348144 |
| LT24 | 172099 | 195366 | 215922 | 233933 | 249611 | 275099 | 294433 | 309266 | 333788 | 348011 | 362844 |

Çizelge EK-A. 4 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 138822 | 161788 | 183700 | 204322 | 223477 | 257233 | 285099 | 307677 | 345888 | 366300 | 380400 |
| LT2 | 145977 | 171422 | 195677 | 218411 | 239433 | 276155 | 306055 | 329900 | 369100 | 388922 | 400744 |
| LT3 | 127388 | 151544 | 175666 | 199377 | 222422 | 265766 | 304722 | 338999 | 405299 | 448922 | 493244 |
| LT4 | 127788 | 154633 | 182066 | 209666 | 237066 | 290199 | 339855 | 385199 | 478188 | 544555 | 620344 |
| LT5 | 146711 | 179133 | 211855 | 244200 | 275644 | 334477 | 386633 | 431700 | 515799 | 567855 | 615299 |
| LT6 | 140000 | 172544 | 206188 | 240266 | 274288 | 340499 | 402400 | 458766 | 573333 | 653744 | 742933 |
| LT7 | 160255 | 179711 | 196722 | 211399 | 223900 | 243377 | 256911 | 266066 | 276888 | 278800 | 274455 |
| LT8 | 170133 | 192099 | 211099 | 227266 | 240833 | 261411 | 275088 | 283766 | 292288 | 291733 | 284111 |
| LT9 | 160255 | 179711 | 196722 | 211399 | 223900 | 243377 | 256911 | 266066 | 276888 | 278800 | 274455 |
| LT10 | 170133 | 192099 | 211099 | 227266 | 240833 | 261411 | 275088 | 283766 | 292288 | 291733 | 284111 |
| LT11 | 192911 | 221300 | 245444 | 265444 | 281711 | 304977 | 318877 | 326299 | 328711 | 321544 | 305133 |
| LT12 | 192911 | 221300 | 245444 | 265444 | 281711 | 304977 | 318877 | 326299 | 328711 | 321544 | 305133 |
| LT13 | 127388 | 151544 | 175666 | 199377 | 222422 | 265766 | 304722 | 338999 | 405299 | 448922 | 493244 |
| LT14 | 127788 | 154633 | 182066 | 209666 | 237066 | 290199 | 339855 | 385199 | 478188 | 544555 | 620344 |
| LT15 | 138822 | 161788 | 183700 | 204322 | 223477 | 257233 | 285099 | 307677 | 345888 | 366300 | 380400 |
| LT16 | 145977 | 171422 | 195677 | 218411 | 239433 | 276155 | 306055 | 329900 | 369100 | 388922 | 400744 |
| LT17 | 140000 | 172544 | 206188 | 240266 | 274288 | 340499 | 402400 | 458766 | 573333 | 653744 | 742933 |
| LT18 | 146711 | 179133 | 211855 | 244200 | 275644 | 334477 | 386633 | 431700 | 515799 | 567855 | 615299 |
| LT19 | 172099 | 217700 | 265000 | 312599 | 359322 | 446999 | 523988 | 589122 | 704911 | 770033 | 817355 |
| LT20 | 162933 | 208011 | 256099 | 306000 | 356711 | 457088 | 551977 | 638477 | 812344 | 930766 | 1054110 |
| LT21 | 193900 | 240044 | 284799 | 326611 | 364588 | 427777 | 474855 | 508522 | 552044 | 562044 | 546344 |
| LT22 | 193900 | 240044 | 284799 | 326611 | 364588 | 427777 | 474855 | 508522 | 552044 | 562044 | 546344 |
| LT23 | 162933 | 208011 | 256099 | 306000 | 356711 | 457088 | 551977 | 638477 | 812344 | 930766 | 1054110 |
| LT24 | 172099 | 217700 | 265000 | 312599 | 359322 | 446999 | 523988 | 589122 | 704911 | 770033 | 817355 |

Çizelge EK-A. 5 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 5959,8 | 7485,5 | 9007,1 | 10470,0 | 11837,0 | 14208,0 | 16071,0 | 17481,0 | 19584,0 | 20537,0 | 21270,0 |
| LT2 | 5948,5 | 7337,1 | 8667,4 | 9894,9 | 10995,0 | 12792,0 | 14095,0 | 15004,0 | 16190,0 | 16629,0 | 16980,0 |
| LT3 | 6033,7 | 7334,7 | 8582,0 | 9743,5 | 10802,0 | 12588,0 | 13965,0 | 15001,0 | 16574,0 | 17342,0 | 18017,0 |
| LT4 | 6033,7 | 7093,8 | 8057,1 | 8911,6 | 9656,6 | 10846,0 | 11705,0 | 12317,0 | 13193,0 | 13607,0 | 14012,0 |
| LT5 | 5948,5 | 6867,0 | 7651,5 | 8303,1 | 8833,6 | 9596,1 | 10068,0 | 10353,0 | 10673,0 | 10811,0 | 11041,0 |
| LT6 | 5959,8 | 6774,4 | 7461,0 | 8027,2 | 8487,1 | 9152,3 | 9573,7 | 9840,4 | 10176,0 | 10342,0 | 10579,0 |
| LT7 | 5821,9 | 7693,3 | 9697,1 | 11750,0 | 13777,0 | 17528,0 | 20673,0 | 23151,0 | 26926,0 | 28529,0 | 29392,0 |
| LT8 | 5841,4 | 7571,1 | 9344,3 | 11078,0 | 12707,0 | 15509,0 | 17635,0 | 19146,0 | 21056,0 | 21581,0 | 21692,0 |
| LT9 | 5821,9 | 7693,3 | 9697,1 | 11750,0 | 13777,0 | 17528,0 | 20673,0 | 23151,0 | 26926,0 | 28529,0 | 29392,0 |
| LT10 | 5841,4 | 7571,1 | 9344,3 | 11078,0 | 12707,0 | 15509,0 | 17635,0 | 19146,0 | 21056,0 | 21581,0 | 21692,0 |
| LT11 | 5851,7 | 7309,6 | 8682,9 | 9911,6 | 10967,0 | 12550,0 | 13533,0 | 14080,0 | 14412,0 | 14261,0 | 14189,0 |
| LT12 | 5851,7 | 7309,6 | 8682,9 | 9911,6 | 10967,0 | 12550,0 | 13533,0 | 14080,0 | 14412,0 | 14261,0 | 14189,0 |
| LT13 | 6033,7 | 7334,7 | 8582,0 | 9743,5 | 10802,0 | 12588,0 | 13965,0 | 15001,0 | 16574,0 | 17342,0 | 18017,0 |
| LT14 | 6033,7 | 7093,8 | 8057,1 | 8911,6 | 9656,6 | 10846,0 | 11705,0 | 12317,0 | 13193,0 | 13607,0 | 14012,0 |
| LT15 | 5959,8 | 7485,5 | 9007,1 | 10470,0 | 11837,0 | 14208,0 | 16071,0 | 17481,0 | 19584,0 | 20537,0 | 21270,0 |
| LT16 | 5948,5 | 7337,1 | 8667,4 | 9894,9 | 10995,0 | 12792,0 | 14095,0 | 15004,0 | 16190,0 | 16629,0 | 16980,0 |
| LT17 | 5959,8 | 6774,4 | 7461,0 | 8027,2 | 8487,1 | 9152,3 | 9573,7 | 9840,4 | 10176,0 | 10342,0 | 10579,0 |
| LT18 | 5948,5 | 6867,0 | 7651,5 | 8303,1 | 8833,6 | 9596,1 | 10068,0 | 10353,0 | 10673,0 | 10811,0 | 11041,0 |
| LT19 | 5841,4 | 6419,0 | 6849,0 | 7158,2 | 7373,2 | 7610,1 | 7698,6 | 7722,9 | 7744,3 | 7819,9 | 8031,6 |
| LT20 | 5821,9 | 6300,6 | 6652,4 | 6904,7 | 7081,7 | 7286,6 | 7380,8 | 7428,0 | 7508,9 | 7606,6 | 7800,7 |
| LT21 | 5851,7 | 6630,6 | 7233,6 | 7679,7 | 7995,6 | 8341,6 | 8449,4 | 8440,5 | 8320,7 | 8313,6 | 8537,0 |
| LT22 | 5851,7 | 6630,6 | 7233,6 | 7679,7 | 7995,6 | 8341,6 | 8449,4 | 8440,5 | 8320,7 | 8313,6 | 8537,0 |
| LT23 | 5821,9 | 6300,6 | 6652,4 | 6904,7 | 7081,7 | 7286,6 | 7380,8 | 7428,0 | 7508,9 | 7606,6 | 7800,7 |
| LT24 | 5841,4 | 6419,0 | 6849,0 | 7158,2 | 7373,2 | 7610,1 | 7698,6 | 7722,9 | 7744,3 | 7819,9 | 8031,6 |

Çizelge EK-A. 6 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 5959,8 | 6774,4 | 7461,0 | 8027,2 | 8487,1 | 9152,3 | 9573,7 | 9840,4 | 10176,0 | 10342,0 | 10579,0 |
| LT2 | 5948,5 | 6867,0 | 7651,5 | 8303,1 | 8833,6 | 9596,1 | 10068,0 | 10353,0 | 10673,0 | 10811,0 | 11041,0 |
| LT3 | 6033,7 | 7093,8 | 8057,1 | 8911,6 | 9656,6 | 10846,0 | 11705,0 | 12317,0 | 13193,0 | 13607,0 | 14012,0 |
| LT4 | 6033,7 | 7334,7 | 8582,0 | 9743,5 | 10802,0 | 12588,0 | 13965,0 | 15001,0 | 16574,0 | 17342,0 | 18017,0 |
| LT5 | 5948,5 | 7337,1 | 8667,4 | 9894,9 | 10995,0 | 12792,0 | 14095,0 | 15004,0 | 16190,0 | 16629,0 | 16980,0 |
| LT6 | 5959,8 | 7485,5 | 9007,1 | 10470,0 | 11837,0 | 14208,0 | 16071,0 | 17481,0 | 19584,0 | 20537,0 | 21270,0 |
| LT7 | 5821,9 | 6300,6 | 6652,4 | 6904,7 | 7081,7 | 7286,6 | 7380,8 | 7428,0 | 7508,9 | 7606,6 | 7800,7 |
| LT8 | 5841,4 | 6419,0 | 6849,0 | 7158,2 | 7373,2 | 7610,1 | 7698,6 | 7722,9 | 7744,3 | 7819,9 | 8031,6 |
| LT9 | 5821,9 | 6300,6 | 6652,4 | 6904,7 | 7081,7 | 7286,6 | 7380,8 | 7428,0 | 7508,9 | 7606,6 | 7800,7 |
| LT10 | 5841,4 | 6419,0 | 6849,0 | 7158,2 | 7373,2 | 7610,1 | 7698,6 | 7722,9 | 7744,3 | 7819,9 | 8031,6 |
| LT11 | 5851,7 | 6630,6 | 7233,6 | 7679,7 | 7995,6 | 8341,6 | 8449,4 | 8440,5 | 8320,7 | 8313,6 | 8537,0 |
| LT12 | 5851,7 | 6630,6 | 7233,6 | 7679,7 | 7995,6 | 8341,6 | 8449,4 | 8440,5 | 8320,7 | 8313,6 | 8537,0 |
| LT13 | 6033,7 | 7093,8 | 8057,1 | 8911,6 | 9656,6 | 10846,0 | 11705,0 | 12317,0 | 13193,0 | 13607,0 | 14012,0 |
| LT14 | 6033,7 | 7334,7 | 8582,0 | 9743,5 | 10802,0 | 12588,0 | 13965,0 | 15001,0 | 16574,0 | 17342,0 | 18017,0 |
| LT15 | 5959,8 | 6774,4 | 7461,0 | 8027,2 | 8487,1 | 9152,3 | 9573,7 | 9840,4 | 10176,0 | 10342,0 | 10579,0 |
| LT16 | 5948,5 | 6867,0 | 7651,5 | 8303,1 | 8833,6 | 9596,1 | 10068,0 | 10353,0 | 10673,0 | 10811,0 | 11041,0 |
| LT17 | 5959,8 | 7485,5 | 9007,1 | 10470,0 | 11837,0 | 14208,0 | 16071,0 | 17481,0 | 19584,0 | 20537,0 | 21270,0 |
| LT18 | 5948,5 | 7337,1 | 8667,4 | 9894,9 | 10995,0 | 12792,0 | 14095,0 | 15004,0 | 16190,0 | 16629,0 | 16980,0 |
| LT19 | 5841,4 | 7571,1 | 9344,3 | 11078,0 | 12707,0 | 15509,0 | 17635,0 | 19146,0 | 21056,0 | 21581,0 | 21692,0 |
| LT20 | 5821,9 | 7693,3 | 9697,1 | 11750,0 | 13777,0 | 17528,0 | 20673,0 | 23151,0 | 26926,0 | 28529,0 | 29392,0 |
| LT21 | 5851,7 | 7309,6 | 8682,9 | 9911,6 | 10967,0 | 12550,0 | 13533,0 | 14080,0 | 14412,0 | 14261,0 | 14189,0 |
| LT22 | 5851,7 | 7309,6 | 8682,9 | 9911,6 | 10967,0 | 12550,0 | 13533,0 | 14080,0 | 14412,0 | 14261,0 | 14189,0 |
| LT23 | 5821,9 | 7693,3 | 9697,1 | 11750,0 | 13777,0 | 17528,0 | 20673,0 | 23151,0 | 26926,0 | 28529,0 | 29392,0 |
| LT24 | 5841,4 | 7571,1 | 9344,3 | 11078,0 | 12707,0 | 15509,0 | 17635,0 | 19146,0 | 21056,0 | 21581,0 | 21692,0 |

Çizelge EK-A. 7 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 17353,0 | 21482,0 | 25772,0 | 30144,0 | 34532,0 | 43154,0 | 51339,0 | 58924,0 | 74954,0 | 87102,0 | 103011,0 |
| LT2 | 18247,0 | 22375,0 | 26565,0 | 30734,0 | 34816,0 | 42551,0 | 49556,0 | 55770,0 | 68089,0 | 76752,0 | 87309,0 |
| LT3 | 15923,0 | 19355,0 | 22883,0 | 26453,0 | 30021,0 | 37013,0 | 43651,0 | 49821,0 | 62961,0 | 73040,0 | 86428,0 |
| LT4 | 15972,0 | 19087,0 | 22220,0 | 25324,0 | 28366,0 | 34165,0 | 39486,0 | 44283,0 | 54059,0 | 61183,0 | 70187,0 |
| LT5 | 18339,0 | 21633,0 | 24804,0 | 27812,0 | 30631,0 | 35677,0 | 39956,0 | 43552,0 | 50196,0 | 54533,0 | 59493,0 |
| LT6 | 17500,0 | 20493,0 | 23380,0 | 26128,0 | 28717,0 | 33388,0 | 37395,0 | 40798,0 | 47187,0 | 51434,0 | 56370,0 |
| LT7 | 20031,0 | 25707,0 | 31783,0 | 38115,0 | 44575,0 | 57453,0 | 69772,0 | 81171,0 | 104933,0 | 122477,0 | 144655,0 |
| LT8 | 21266,0 | 27025,0 | 33021,0 | 39081,0 | 45062,0 | 56392,0 | 66518,0 | 75301,0 | 91951,0 | 102955,0 | 115488,0 |
| LT9 | 20031,0 | 25707,0 | 31783,0 | 38115,0 | 44575,0 | 57453,0 | 69772,0 | 81171,0 | 104933,0 | 122477,0 | 144655,0 |
| LT10 | 21266,0 | 27025,0 | 33021,0 | 39081,0 | 45062,0 | 56392,0 | 66518,0 | 75301,0 | 91951,0 | 102955,0 | 115488,0 |
| LT11 | 24113,0 | 29962,0 | 35664,0 | 41028,0 | 45943,0 | 54286,0 | 60767,0 | 65729,0 | 73683,0 | 78044,0 | 82287,0 |
| LT12 | 24113,0 | 29962,0 | 35664,0 | 41028,0 | 45943,0 | 54286,0 | 60767,0 | 65729,0 | 73683,0 | 78044,0 | 82287,0 |
| LT13 | 15923,0 | 19355,0 | 22883,0 | 26453,0 | 30021,0 | 37013,0 | 43651,0 | 49821,0 | 62961,0 | 73040,0 | 86428,0 |
| LT14 | 15972,0 | 19087,0 | 22220,0 | 25324,0 | 28366,0 | 34165,0 | 39486,0 | 44283,0 | 54059,0 | 61183,0 | 70187,0 |
| LT15 | 17353,0 | 21482,0 | 25772,0 | 30144,0 | 34532,0 | 43154,0 | 51339,0 | 58924,0 | 74954,0 | 87102,0 | 103011,0 |
| LT16 | 18247,0 | 22375,0 | 26565,0 | 30734,0 | 34816,0 | 42551,0 | 49556,0 | 55770,0 | 68089,0 | 76752,0 | 87309,0 |
| LT17 | 17500,0 | 20493,0 | 23380,0 | 26128,0 | 28717,0 | 33388,0 | 37395,0 | 40798,0 | 47187,0 | 51434,0 | 56370,0 |
| LT18 | 18339,0 | 21633,0 | 24804,0 | 27812,0 | 30631,0 | 35677,0 | 39956,0 | 43552,0 | 50196,0 | 54533,0 | 59493,0 |
| LT19 | 21512,0 | 24419,0 | 26991,0 | 29241,0 | 31201,0 | 34386,0 | 36803,0 | 38658,0 | 41722,0 | 43502,0 | 45355,0 |
| LT20 | 20367,0 | 22978,0 | 25315,0 | 27388,0 | 29219,0 | 32256,0 | 34620,0 | 36474,0 | 39623,0 | 41507,0 | 43517,0 |
| LT21 | 24237,0 | 27922,0 | 31109,0 | 33817,0 | 36097,0 | 39617,0 | 42113,0 | 43916,0 | 46666,0 | 48127,0 | 49539,0 |
| LT22 | 24237,0 | 27922,0 | 31109,0 | 33817,0 | 36097,0 | 39617,0 | 42113,0 | 43916,0 | 46666,0 | 48127,0 | 49539,0 |
| LT23 | 20367,0 | 22978,0 | 25315,0 | 27388,0 | 29219,0 | 32256,0 | 34620,0 | 36474,0 | 39623,0 | 41507,0 | 43517,0 |
| LT24 | 21512,0 | 24419,0 | 26991,0 | 29241,0 | 31201,0 | 34386,0 | 36803,0 | 38658,0 | 41722,0 | 43502,0 | 45355,0 |

Çizelge EK-A. 8 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 17353,0 | 20223,0 | 22963,0 | 25540,0 | 27934,0 | 32153,0 | 35636,0 | 38458,0 | 43234,0 | 45787,0 | 47550,0 |
| LT2 | 18247,0 | 21427,0 | 24459,0 | 27301,0 | 29929,0 | 34519,0 | 38256,0 | 41237,0 | 46137,0 | 48615,0 | 50093,0 |
| LT3 | 15923,0 | 18942,0 | 21957,0 | 24922,0 | 27803,0 | 33220,0 | 38090,0 | 42373,0 | 50661,0 | 56115,0 | 61656,0 |
| LT4 | 15972,0 | 19328,0 | 22758,0 | 26207,0 | 29632,0 | 36274,0 | 42482,0 | 48149,0 | 59772,0 | 68069,0 | 77542,0 |
| LT5 | 18339,0 | 22391,0 | 26482,0 | 30525,0 | 34456,0 | 41808,0 | 48329,0 | 53962,0 | 64473,0 | 70981,0 | 76911,0 |
| LT6 | 17500,0 | 21568,0 | 25772,0 | 30033,0 | 34285,0 | 42561,0 | 50300,0 | 57346,0 | 71666,0 | 81717,0 | 92866,0 |
| LT7 | 20031,0 | 22464,0 | 24591,0 | 26424,0 | 27988,0 | 30421,0 | 32114,0 | 33258,0 | 34610,0 | 34850,0 | 34306,0 |
| LT8 | 21266,0 | 24012,0 | 26387,0 | 28407,0 | 30104,0 | 32676,0 | 34385,0 | 35470,0 | 36534,0 | 36467,0 | 35514,0 |
| LT9 | 20031,0 | 22464,0 | 24591,0 | 26424,0 | 27988,0 | 30421,0 | 32114,0 | 33258,0 | 34610,0 | 34850,0 | 34306,0 |
| LT10 | 21266,0 | 24012,0 | 26387,0 | 28407,0 | 30104,0 | 32676,0 | 34385,0 | 35470,0 | 36534,0 | 36467,0 | 35514,0 |
| LT11 | 24113,0 | 27663,0 | 30680,0 | 33180,0 | 35213,0 | 38121,0 | 39859,0 | 40786,0 | 41089,0 | 40192,0 | 38142,0 |
| LT12 | 24113,0 | 27663,0 | 30680,0 | 33180,0 | 35213,0 | 38121,0 | 39859,0 | 40786,0 | 41089,0 | 40192,0 | 38142,0 |
| LT13 | 15923,0 | 18942,0 | 21957,0 | 24922,0 | 27803,0 | 33220,0 | 38090,0 | 42373,0 | 50661,0 | 56115,0 | 61656,0 |
| LT14 | 15972,0 | 19328,0 | 22758,0 | 26207,0 | 29632,0 | 36274,0 | 42482,0 | 48149,0 | 59772,0 | 68069,0 | 77542,0 |
| LT15 | 17353,0 | 20223,0 | 22963,0 | 25540,0 | 27934,0 | 32153,0 | 35636,0 | 38458,0 | 43234,0 | 45787,0 | 47550,0 |
| LT16 | 18247,0 | 21427,0 | 24459,0 | 27301,0 | 29929,0 | 34519,0 | 38256,0 | 41237,0 | 46137,0 | 48615,0 | 50093,0 |
| LT17 | 17500,0 | 21568,0 | 25772,0 | 30033,0 | 34285,0 | 42561,0 | 50300,0 | 57346,0 | 71666,0 | 81717,0 | 92866,0 |
| LT18 | 18339,0 | 22391,0 | 26482,0 | 30525,0 | 34456,0 | 41808,0 | 48329,0 | 53962,0 | 64473,0 | 70981,0 | 76911,0 |
| LT19 | 21512,0 | 27212,0 | 33124,0 | 39073,0 | 44915,0 | 55874,0 | 65497,0 | 73640,0 | 88114,0 | 96254,0 | 102177,0 |
| LT20 | 20367,0 | 26002,0 | 32011,0 | 38251,0 | 44589,0 | 57135,0 | 68997,0 | 79808,0 | 101544,0 | 116355,0 | 131766,0 |
| LT21 | 24237,0 | 30005,0 | 35599,0 | 40826,0 | 45572,0 | 53471,0 | 59357,0 | 63565,0 | 69005,0 | 70255,0 | 68293,0 |
| LT22 | 24237,0 | 30005,0 | 35599,0 | 40826,0 | 45572,0 | 53471,0 | 59357,0 | 63565,0 | 69005,0 | 70255,0 | 68293,0 |
| LT23 | 20367,0 | 26002,0 | 32011,0 | 38251,0 | 44589,0 | 57135,0 | 68997,0 | 79808,0 | 101544,0 | 116355,0 | 131766,0 |
| LT24 | 21512,0 | 27212,0 | 33124,0 | 39073,0 | 44915,0 | 55874,0 | 65497,0 | 73640,0 | 88114,0 | 96254,0 | 102177,0 |

Çizelge EK-A. 9 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 1766,3 | 2233,0 | 2701,7 | 3154,9 | 3580,0 | 4319,3 | 4900,8 | 5339,5 | 5985,9 | 6269,0 | 6475,7 |
| LT2 | 1761,9 | 2175,9 | 2570,7 | 2932,4 | 3253,9 | 3770,7 | 4136,0 | 4382,9 | 4683,3 | 4778,6 | 4854,8 |
| LT3 | 1786,1 | 2180,9 | 2560,9 | 2915,6 | 3239,1 | 3785,5 | 4205,4 | 4520,0 | 4992,5 | 5218,2 | 5413,5 |
| LT4 | 1786,1 | 2089,6 | 2362,1 | 2600,9 | 2806,8 | 3130,0 | 3358,2 | 3517,6 | 3739,3 | 3842,4 | 3947,8 |
| LT5 | 1761,9 | 2029,3 | 2254,5 | 2438,6 | 2585,8 | 2791,1 | 2911,5 | 2979,6 | 3047,0 | 3076,1 | 3139,7 |
| LT6 | 1766,3 | 1994,3 | 2182,9 | 2335,6 | 2457,4 | 2628,7 | 2733,0 | 2796,6 | 2874,2 | 2915,2 | 2981,6 |
| LT7 | 1739,2 | 2263,0 | 2810,9 | 3359,9 | 3891,1 | 4849,1 | 5629,9 | 6232,2 | 7129,3 | 7506,1 | 7728,7 |
| LT8 | 1743,0 | 2213,9 | 2680,4 | 3121,7 | 3524,2 | 4189,0 | 4669,6 | 4996,8 | 5382,2 | 5475,9 | 5510,1 |
| LT9 | 1739,2 | 2263,0 | 2810,9 | 3359,9 | 3891,1 | 4849,1 | 5629,9 | 6232,2 | 7129,3 | 7506,1 | 7728,7 |
| LT10 | 1743,0 | 2213,9 | 2680,4 | 3121,7 | 3524,2 | 4189,0 | 4669,6 | 4996,8 | 5382,2 | 5475,9 | 5510,1 |
| LT11 | 1738,8 | 2126,5 | 2478,3 | 2782,4 | 3035,3 | 3398,9 | 3611,1 | 3719,8 | 3766,4 | 3729,1 | 3740,3 |
| LT12 | 1738,8 | 2126,5 | 2478,3 | 2782,4 | 3035,3 | 3398,9 | 3611,1 | 3719,8 | 3766,4 | 3729,1 | 3740,3 |
| LT13 | 1786,1 | 2180,9 | 2560,9 | 2915,6 | 3239,1 | 3785,5 | 4205,4 | 4520,0 | 4992,5 | 5218,2 | 5413,5 |
| LT14 | 1786,1 | 2089,6 | 2362,1 | 2600,9 | 2806,8 | 3130,0 | 3358,2 | 3517,6 | 3739,3 | 3842,4 | 3947,8 |
| LT15 | 1766,3 | 2233,0 | 2701,7 | 3154,9 | 3580,0 | 4319,3 | 4900,8 | 5339,5 | 5985,9 | 6269,0 | 6475,7 |
| LT16 | 1761,9 | 2175,9 | 2570,7 | 2932,4 | 3253,9 | 3770,7 | 4136,0 | 4382,9 | 4683,3 | 4778,6 | 4854,8 |
| LT17 | 1766,3 | 1994,3 | 2182,9 | 2335,6 | 2457,4 | 2628,7 | 2733,0 | 2796,6 | 2874,2 | 2915,2 | 2981,6 |
| LT18 | 1761,9 | 2029,3 | 2254,5 | 2438,6 | 2585,8 | 2791,1 | 2911,5 | 2979,6 | 3047,0 | 3076,1 | 3139,7 |
| LT19 | 1743,0 | 1951,5 | 2114,3 | 2237,4 | 2327,9 | 2437,8 | 2488,0 | 2507,7 | 2519,4 | 2537,5 | 2600,3 |
| LT20 | 1739,2 | 1909,5 | 2040,2 | 2138,5 | 2211,0 | 2301,8 | 2348,7 | 2373,5 | 2406,1 | 2435,4 | 2495,0 |
| LT21 | 1738,8 | 2011,0 | 2232,4 | 2404,6 | 2533,8 | 2691,6 | 2759,2 | 2776,6 | 2750,1 | 2737,2 | 2794,9 |
| LT22 | 1738,8 | 2011,0 | 2232,4 | 2404,6 | 2533,8 | 2691,6 | 2759,2 | 2776,6 | 2750,1 | 2737,2 | 2794,9 |
| LT23 | 1739,2 | 1909,5 | 2040,2 | 2138,5 | 2211,0 | 2301,8 | 2348,7 | 2373,5 | 2406,1 | 2435,4 | 2495,0 |
| LT24 | 1743,0 | 1951,5 | 2114,3 | 2237,4 | 2327,9 | 2437,8 | 2488,0 | 2507,7 | 2519,4 | 2537,5 | 2600,3 |

Çizelge EK-A. 10 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 1766,3 | 1994,3 | 2182,9 | 2335,6 | 2457,4 | 2628,7 | 2733,0 | 2796,6 | 2874,2 | 2915,2 | 2981,6 |
| LT2 | 1761,9 | 2029,3 | 2254,5 | 2438,6 | 2585,8 | 2791,1 | 2911,5 | 2979,6 | 3047,0 | 3076,1 | 3139,7 |
| LT3 | 1786,1 | 2089,6 | 2362,1 | 2600,9 | 2806,8 | 3130,0 | 3358,2 | 3517,6 | 3739,3 | 3842,4 | 3947,8 |
| LT4 | 1786,1 | 2180,9 | 2560,9 | 2915,6 | 3239,1 | 3785,5 | 4205,4 | 4520,0 | 4992,5 | 5218,2 | 5413,5 |
| LT5 | 1761,9 | 2175,9 | 2570,7 | 2932,4 | 3253,9 | 3770,7 | 4136,0 | 4382,9 | 4683,3 | 4778,6 | 4854,8 |
| LT6 | 1766,3 | 2233,0 | 2701,7 | 3154,9 | 3580,0 | 4319,3 | 4900,8 | 5339,5 | 5985,9 | 6269,0 | 6475,7 |
| LT7 | 1739,2 | 1909,5 | 2040,2 | 2138,5 | 2211,0 | 2301,8 | 2348,7 | 2373,5 | 2406,1 | 2435,4 | 2495,0 |
| LT8 | 1743,0 | 1951,5 | 2114,3 | 2237,4 | 2327,9 | 2437,8 | 2488,0 | 2507,7 | 2519,4 | 2537,5 | 2600,3 |
| LT9 | 1739,2 | 1909,5 | 2040,2 | 2138,5 | 2211,0 | 2301,8 | 2348,7 | 2373,5 | 2406,1 | 2435,4 | 2495,0 |
| LT10 | 1743,0 | 1951,5 | 2114,3 | 2237,4 | 2327,9 | 2437,8 | 2488,0 | 2507,7 | 2519,4 | 2537,5 | 2600,3 |
| LT11 | 1738,8 | 2011,0 | 2232,4 | 2404,6 | 2533,8 | 2691,6 | 2759,2 | 2776,6 | 2750,1 | 2737,2 | 2794,9 |
| LT12 | 1738,8 | 2011,0 | 2232,4 | 2404,6 | 2533,8 | 2691,6 | 2759,2 | 2776,6 | 2750,1 | 2737,2 | 2794,9 |
| LT13 | 1786,1 | 2089,6 | 2362,1 | 2600,9 | 2806,8 | 3130,0 | 3358,2 | 3517,6 | 3739,3 | 3842,4 | 3947,8 |
| LT14 | 1786,1 | 2180,9 | 2560,9 | 2915,6 | 3239,1 | 3785,5 | 4205,4 | 4520,0 | 4992,5 | 5218,2 | 5413,5 |
| LT15 | 1766,3 | 1994,3 | 2182,9 | 2335,6 | 2457,4 | 2628,7 | 2733,0 | 2796,6 | 2874,2 | 2915,2 | 2981,6 |
| LT16 | 1761,9 | 2029,3 | 2254,5 | 2438,6 | 2585,8 | 2791,1 | 2911,5 | 2979,6 | 3047,0 | 3076,1 | 3139,7 |
| LT17 | 1766,3 | 2233,0 | 2701,7 | 3154,9 | 3580,0 | 4319,3 | 4900,8 | 5339,5 | 5985,9 | 6269,0 | 6475,7 |
| LT18 | 1761,9 | 2175,9 | 2570,7 | 2932,4 | 3253,9 | 3770,7 | 4136,0 | 4382,9 | 4683,3 | 4778,6 | 4854,8 |
| LT19 | 1743,0 | 2213,9 | 2680,4 | 3121,7 | 3524,2 | 4189,0 | 4669,6 | 4996,8 | 5382,2 | 5475,9 | 5510,1 |
| LT20 | 1739,2 | 2263,0 | 2810,9 | 3359,9 | 3891,1 | 4849,1 | 5629,9 | 6232,2 | 7129,3 | 7506,1 | 7728,7 |
| LT21 | 1738,8 | 2126,5 | 2478,3 | 2782,4 | 3035,3 | 3398,9 | 3611,1 | 3719,8 | 3766,4 | 3729,1 | 3740,3 |
| LT22 | 1738,8 | 2126,5 | 2478,3 | 2782,4 | 3035,3 | 3398,9 | 3611,1 | 3719,8 | 3766,4 | 3729,1 | 3740,3 |
| LT23 | 1739,2 | 2263,0 | 2810,9 | 3359,9 | 3891,1 | 4849,1 | 5629,9 | 6232,2 | 7129,3 | 7506,1 | 7728,7 |
| LT24 | 1743,0 | 2213,9 | 2680,4 | 3121,7 | 3524,2 | 4189,0 | 4669,6 | 4996,8 | 5382,2 | 5475,9 | 5510,1 |

Çizelge EK-A. 11 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\frac{t^3 10^{20}}{qb^4}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 5296,7 | 6585,2 | 7925,8 | 9292,7 | 10664,0 | 13353,0 | 15897,0 | 18244,0 | 23164,0 | 26853,0 | 31631,0 |
| LT2 | 5653,4 | 6940,7 | 8239,1 | 9520,4 | 10764,0 | 13085,0 | 15146,0 | 16939,0 | 20395,0 | 22746,0 | 25524,0 |
| LT3 | 4807,4 | 5857,4 | 6936,8 | 8028,6 | 9118,8 | 11251,0 | 13271,0 | 15141,0 | 19106,0 | 22128,0 | 26116,0 |
| LT4 | 4826,0 | 5751,0 | 6674,7 | 7584,1 | 8469,1 | 10140,0 | 11654,0 | 13004,0 | 15712,0 | 17649,0 | 20054,0 |
| LT5 | 5681,7 | 6684,4 | 7637,7 | 8529,7 | 9355,2 | 10805,0 | 12008,0 | 12998,0 | 14780,0 | 15911,0 | 17173,0 |
| LT6 | 5346,6 | 6230,8 | 7074,2 | 7868,3 | 8608,6 | 9925,5 | 11036,0 | 11966,0 | 13679,0 | 14794,0 | 16067,0 |
| LT7 | 5718,1 | 7252,3 | 8875,1 | 10550,0 | 12245,0 | 15594,0 | 18775,0 | 21707,0 | 27809,0 | 32322,0 | 38062,0 |
| LT8 | 6159,8 | 7714,0 | 9301,9 | 10880,0 | 12415,0 | 15273,0 | 17782,0 | 19931,0 | 23955,0 | 26588,0 | 29578,0 |
| LT9 | 5718,1 | 7252,3 | 8875,1 | 10550,0 | 12245,0 | 15594,0 | 18775,0 | 21707,0 | 27809,0 | 32322,0 | 38062,0 |
| LT10 | 6159,8 | 7714,0 | 9301,9 | 10880,0 | 12415,0 | 15273,0 | 17782,0 | 19931,0 | 23955,0 | 26588,0 | 29578,0 |
| LT11 | 6980,2 | 8529,9 | 10008,0 | 11375,0 | 12610,0 | 14680,0 | 16273,0 | 17490,0 | 19450,0 | 20539,0 | 21615,0 |
| LT12 | 6980,2 | 8529,9 | 10008,0 | 11375,0 | 12610,0 | 14680,0 | 16273,0 | 17490,0 | 19450,0 | 20539,0 | 21615,0 |
| LT13 | 4807,4 | 5857,4 | 6936,8 | 8028,6 | 9118,8 | 11251,0 | 13271,0 | 15141,0 | 19106,0 | 22128,0 | 26116,0 |
| LT14 | 4826,0 | 5751,0 | 6674,7 | 7584,1 | 8469,1 | 10140,0 | 11654,0 | 13004,0 | 15712,0 | 17649,0 | 20054,0 |
| LT15 | 5296,7 | 6585,2 | 7925,8 | 9292,7 | 10664,0 | 13353,0 | 15897,0 | 18244,0 | 23164,0 | 26853,0 | 31631,0 |
| LT16 | 5653,4 | 6940,7 | 8239,1 | 9520,4 | 10764,0 | 13085,0 | 15146,0 | 16939,0 | 20395,0 | 22746,0 | 25524,0 |
| LT17 | 5346,6 | 6230,8 | 7074,2 | 7868,3 | 8608,6 | 9925,5 | 11036,0 | 11966,0 | 13679,0 | 14794,0 | 16067,0 |
| LT18 | 5681,7 | 6684,4 | 7637,7 | 8529,7 | 9355,2 | 10805,0 | 12008,0 | 12998,0 | 14780,0 | 15911,0 | 17173,0 |
| LT19 | 6212,3 | 7151,3 | 8001,2 | 8760,4 | 9433,1 | 10550,0 | 11417,0 | 12093,0 | 13233,0 | 13908,0 | 14621,0 |
| LT20 | 5797,9 | 6617,7 | 7367,6 | 8046,5 | 8657,0 | 9692,7 | 10519,0 | 11181,0 | 12332,0 | 13038,0 | 13806,0 |
| LT21 | 7000,6 | 8200,5 | 9271,8 | 10208,0 | 11016,0 | 12299,0 | 13237,0 | 13930,0 | 15013,0 | 15602,0 | 16181,0 |
| LT22 | 7000,6 | 8200,5 | 9271,8 | 10208,0 | 11016,0 | 12299,0 | 13237,0 | 13930,0 | 15013,0 | 15602,0 | 16181,0 |
| LT23 | 5797,9 | 6617,7 | 7367,6 | 8046,5 | 8657,0 | 9692,7 | 10519,0 | 11181,0 | 12332,0 | 13038,0 | 13806,0 |
| LT24 | 6212,3 | 7151,3 | 8001,2 | 8760,4 | 9433,1 | 10550,0 | 11417,0 | 12093,0 | 13233,0 | 13908,0 | 14621,0 |

Çizelge EK-A. 12 Boyutsuz Maksimum Çökme $w_0^* = w\dfrac{t^3 10^{20}}{qa^4}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ | $w_0^*$ |
| LT1 | 5296,7 | 6142,5 | 6940,0 | 7680,6 | 8360,5 | 9537,1 | 10486,0 | 11236,0 | 12457,0 | 13064,0 | 13411,0 |
| LT2 | 5653,4 | 6621,5 | 7532,0 | 8373,1 | 9139,4 | 10448,0 | 11481,0 | 12279,0 | 13516,0 | 14072,0 | 14290,0 |
| LT3 | 4807,4 | 5702,8 | 6590,3 | 7456,7 | 8292,4 | 9846,5 | 11223,0 | 12417,0 | 14675,0 | 16112,0 | 17497,0 |
| LT4 | 4826,0 | 5853,9 | 6904,4 | 7960,6 | 9008,4 | 11036,0 | 12926,0 | 14645,0 | 18149,0 | 20627,0 | 23417,0 |
| LT5 | 5681,7 | 6946,2 | 8214,2 | 9457,4 | 10655,0 | 12859,0 | 14771,0 | 16384,0 | 19274,0 | 20950,0 | 22297,0 |
| LT6 | 5346,6 | 6617,3 | 7932,8 | 9267,1 | 10598,0 | 13184,0 | 15594,0 | 17776,0 | 22171,0 | 25209,0 | 28499,0 |
| LT7 | 5718,1 | 6490,7 | 7184,8 | 7799,5 | 8338,0 | 9209,4 | 9850,6 | 10312,0 | 10942,0 | 11148,0 | 11095,0 |
| LT8 | 6159,8 | 7056,8 | 7855,2 | 8553,3 | 9155,7 | 10105,0 | 10776,0 | 11233,0 | 11782,0 | 11882,0 | 11667,0 |
| LT9 | 5718,1 | 6490,7 | 7184,8 | 7799,5 | 8338,0 | 9209,4 | 9850,6 | 10312,0 | 10942,0 | 11148,0 | 11095,0 |
| LT10 | 6159,8 | 7056,8 | 7855,2 | 8553,3 | 9155,7 | 10105,0 | 10776,0 | 11233,0 | 11782,0 | 11882,0 | 11667,0 |
| LT11 | 6980,2 | 8144,7 | 9171,2 | 10052,0 | 10794,0 | 11912,0 | 12642,0 | 13090,0 | 13459,0 | 13317,0 | 12731,0 |
| LT12 | 6980,2 | 8144,7 | 9171,2 | 10052,0 | 10794,0 | 11912,0 | 12642,0 | 13090,0 | 13459,0 | 13317,0 | 12731,0 |
| LT13 | 4807,4 | 5702,8 | 6590,3 | 7456,7 | 8292,4 | 9846,5 | 11223,0 | 12417,0 | 14675,0 | 16112,0 | 17497,0 |
| LT14 | 4826,0 | 5853,9 | 6904,4 | 7960,6 | 9008,4 | 11036,0 | 12926,0 | 14645,0 | 18149,0 | 20627,0 | 23417,0 |
| LT15 | 5296,7 | 6142,5 | 6940,0 | 7680,6 | 8360,5 | 9537,1 | 10486,0 | 11236,0 | 12457,0 | 13064,0 | 13411,0 |
| LT16 | 5653,4 | 6621,5 | 7532,0 | 8373,1 | 9139,4 | 10448,0 | 11481,0 | 12279,0 | 13516,0 | 14072,0 | 14290,0 |
| LT17 | 5346,6 | 6617,3 | 7932,8 | 9267,1 | 10598,0 | 13184,0 | 15594,0 | 17776,0 | 22171,0 | 25209,0 | 28499,0 |
| LT18 | 5681,7 | 6946,2 | 8214,2 | 9457,4 | 10655,0 | 12859,0 | 14771,0 | 16384,0 | 19274,0 | 20950,0 | 22297,0 |
| LT19 | 6212,3 | 7746,5 | 9306,9 | 10849,0 | 12341,0 | 15084,0 | 17440,0 | 19399,0 | 22794,0 | 24635,0 | 25877,0 |
| LT20 | 5797,9 | 7317,9 | 8919,0 | 10564,0 | 12221,0 | 15470,0 | 18515,0 | 21276,0 | 26802,0 | 30561,0 | 34499,0 |
| LT21 | 7000,6 | 8523,9 | 9967,6 | 11291,0 | 12473,0 | 14404,0 | 15816,0 | 16808,0 | 18043,0 | 18277,0 | 17746,0 |
| LT22 | 7000,6 | 8523,9 | 9967,6 | 11291,0 | 12473,0 | 14404,0 | 15816,0 | 16808,0 | 18043,0 | 18277,0 | 17746,0 |
| LT23 | 5797,9 | 7317,9 | 8919,0 | 10564,0 | 12221,0 | 15470,0 | 18515,0 | 21276,0 | 26802,0 | 30561,0 | 34499,0 |
| LT24 | 6212,3 | 7746,5 | 9306,9 | 10849,0 | 12341,0 | 15084,0 | 17440,0 | 19399,0 | 22794,0 | 24635,0 | 25877,0 |

Çizelge EK-A. 13 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 266766 | 238311 | 217322 | 201500 | 189366 | 172377 | 161422 | 154033 | 143522 | 138311 | 133533 |
| LT2 | 267522 | 241022 | 221700 | 207311 | 196388 | 181300 | 171766 | 165411 | 156544 | 152244 | 148355 |
| LT3 | 265244 | 240600 | 222333 | 208466 | 197722 | 182488 | 172477 | 165577 | 155477 | 150266 | 145322 |
| LT4 | 265244 | 244422 | 229033 | 217388 | 208366 | 195588 | 187188 | 181366 | 172811 | 168388 | 164133 |
| LT5 | 267522 | 248599 | 234966 | 224899 | 217288 | 206833 | 200200 | 195755 | 189477 | 186344 | 183455 |
| LT6 | 266766 | 249700 | 237299 | 228033 | 220977 | 211122 | 204755 | 200411 | 194122 | 190911 | 187877 |
| LT7 | 269022 | 234822 | 209588 | 190600 | 176099 | 155988 | 143277 | 134888 | 123444 | 118122 | 113566 |
| LT8 | 269777 | 237577 | 214133 | 196733 | 183611 | 165799 | 154822 | 147744 | 138377 | 134177 | 130677 |
| LT9 | 269022 | 234822 | 209588 | 190600 | 176099 | 155988 | 143277 | 134888 | 123444 | 118122 | 113566 |
| LT10 | 269777 | 237577 | 214133 | 196733 | 183611 | 165799 | 154822 | 147744 | 138377 | 134177 | 130677 |
| LT11 | 271266 | 243000 | 222944 | 208455 | 197811 | 183866 | 175666 | 170588 | 164211 | 161544 | 159477 |
| LT12 | 271266 | 243000 | 222944 | 208455 | 197811 | 183866 | 175666 | 170588 | 164211 | 161544 | 159477 |
| LT13 | 265244 | 240600 | 222333 | 208466 | 197722 | 182488 | 172477 | 165577 | 155477 | 150266 | 145322 |
| LT14 | 265244 | 244422 | 229033 | 217388 | 208366 | 195588 | 187188 | 181366 | 172811 | 168388 | 164133 |
| LT15 | 266766 | 238311 | 217322 | 201500 | 189366 | 172377 | 161422 | 154033 | 143522 | 138311 | 133533 |
| LT16 | 267522 | 241022 | 221700 | 207311 | 196388 | 181300 | 171766 | 165411 | 156544 | 152244 | 148355 |
| LT17 | 266766 | 249700 | 237299 | 228033 | 220977 | 211122 | 204755 | 200411 | 194122 | 190911 | 187877 |
| LT18 | 267522 | 248599 | 234966 | 224899 | 217288 | 206833 | 200200 | 195755 | 189477 | 186344 | 183455 |
| LT19 | 269777 | 256333 | 246955 | 240200 | 235233 | 228599 | 224522 | 221877 | 218233 | 216488 | 214911 |
| LT20 | 269022 | 257400 | 249166 | 243155 | 238644 | 232488 | 228599 | 225999 | 222299 | 220433 | 218700 |
| LT21 | 271266 | 254188 | 242455 | 234199 | 228255 | 220600 | 216155 | 213400 | 209899 | 208366 | 207122 |
| LT22 | 271266 | 254188 | 242455 | 234199 | 228255 | 220600 | 216155 | 213400 | 209899 | 208366 | 207122 |
| LT23 | 269022 | 257400 | 249166 | 243155 | 238644 | 232488 | 228599 | 225999 | 222299 | 220433 | 218700 |
| LT24 | 269777 | 256333 | 246955 | 240200 | 235233 | 228599 | 224522 | 221877 | 218233 | 216488 | 214911 |

Çizelge EK-A. 14 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 266766 | 249700 | 237299 | 228033 | 220977 | 211122 | 204755 | 200411 | 194122 | 190911 | 187877 |
| LT2 | 267522 | 248599 | 234966 | 224899 | 217288 | 206833 | 200200 | 195755 | 189477 | 186344 | 183444 |
| LT3 | 265244 | 244422 | 229033 | 217388 | 208366 | 195588 | 187188 | 181366 | 172811 | 168388 | 164133 |
| LT4 | 265244 | 240600 | 222333 | 208466 | 197722 | 182488 | 172477 | 165577 | 155466 | 150266 | 145322 |
| LT5 | 267522 | 241022 | 221700 | 207311 | 196388 | 181300 | 171766 | 165411 | 156544 | 152244 | 148355 |
| LT6 | 266766 | 238311 | 217322 | 201500 | 189366 | 172377 | 161422 | 154033 | 143522 | 138311 | 133533 |
| LT7 | 269022 | 257400 | 249166 | 243155 | 238644 | 232488 | 228599 | 225999 | 222299 | 220433 | 218700 |
| LT8 | 269777 | 256333 | 246944 | 240200 | 235233 | 228599 | 224522 | 221877 | 218233 | 216488 | 214911 |
| LT9 | 269022 | 257400 | 249166 | 243155 | 238644 | 232488 | 228599 | 225999 | 222299 | 220433 | 218700 |
| LT10 | 269777 | 256333 | 246944 | 240200 | 235233 | 228599 | 224522 | 221877 | 218233 | 216488 | 214911 |
| LT11 | 271266 | 254188 | 242455 | 234199 | 228255 | 220600 | 216155 | 213400 | 209899 | 208366 | 207122 |
| LT12 | 271266 | 254188 | 242455 | 234199 | 228255 | 220600 | 216155 | 213400 | 209899 | 208366 | 207122 |
| LT13 | 265244 | 244422 | 229033 | 217388 | 208366 | 195588 | 187188 | 181366 | 172811 | 168388 | 164133 |
| LT14 | 265244 | 240600 | 222333 | 208466 | 197722 | 182488 | 172477 | 165577 | 155466 | 150266 | 145322 |
| LT15 | 266766 | 249700 | 237299 | 228033 | 220977 | 211122 | 204755 | 200411 | 194122 | 190911 | 187877 |
| LT16 | 267522 | 248599 | 234966 | 224899 | 217288 | 206833 | 200200 | 195755 | 189477 | 186344 | 183455 |
| LT17 | 266766 | 238311 | 217322 | 201500 | 189366 | 172377 | 161422 | 154033 | 143522 | 138311 | 133533 |
| LT18 | 267522 | 241022 | 221700 | 207311 | 196388 | 181300 | 171766 | 165411 | 156544 | 152244 | 148355 |
| LT19 | 269777 | 237577 | 214133 | 196733 | 183611 | 165799 | 154822 | 147744 | 138377 | 134166 | 130677 |
| LT20 | 269022 | 234822 | 209588 | 190600 | 176099 | 155988 | 143266 | 134888 | 123444 | 118122 | 113566 |
| LT21 | 271266 | 243000 | 222944 | 208455 | 197811 | 183866 | 175666 | 170588 | 164211 | 161544 | 159477 |
| LT22 | 271266 | 243000 | 222944 | 208455 | 197811 | 183866 | 175666 | 170588 | 164211 | 161544 | 159477 |
| LT23 | 269022 | 234822 | 209588 | 190600 | 176099 | 155988 | 143277 | 134888 | 123444 | 118122 | 113566 |
| LT24 | 269777 | 237577 | 214133 | 196733 | 183611 | 165799 | 154822 | 147744 | 138377 | 134166 | 130677 |

Çizelge EK-A. 15 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2 \pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 151927 | 136622 | 124797 | 115441 | 107899 | 96598 | 88643 | 82824 | 73634 | 68484 | 63235 |
| LT2 | 147014 | 132814 | 121955 | 113452 | 106670 | 96652 | 89730 | 84750 | 77059 | 72861 | 68675 |
| LT3 | 160498 | 145732 | 134146 | 124856 | 117272 | 105718 | 97422 | 91248 | 81272 | 75528 | 69525 |
| LT4 | 160498 | 146976 | 136333 | 127787 | 120813 | 110191 | 102574 | 96921 | 87824 | 82623 | 77223 |
| LT5 | 147014 | 135616 | 126883 | 120031 | 114561 | 106466 | 100859 | 96814 | 90542 | 87099 | 83644 |
| LT6 | 151927 | 140618 | 131846 | 124878 | 119255 | 110822 | 104889 | 100557 | 93739 | 89936 | 86076 |
| LT7 | 142855 | 126305 | 113731 | 103943 | 96177 | 84793 | 76995 | 71425 | 62897 | 58283 | 53714 |
| LT8 | 138293 | 122781 | 111134 | 102197 | 95209 | 85176 | 78497 | 73849 | 66989 | 63435 | 60048 |
| LT9 | 142855 | 126305 | 113731 | 103943 | 96177 | 84793 | 76995 | 71425 | 62897 | 58283 | 53714 |
| LT10 | 138293 | 122781 | 111134 | 102197 | 95209 | 85176 | 78497 | 73849 | 66989 | 63435 | 60048 |
| LT11 | 131256 | 117874 | 108124 | 100866 | 95360 | 87784 | 83008 | 79840 | 75447 | 73331 | 71435 |
| LT12 | 131256 | 117874 | 108124 | 100866 | 95360 | 87784 | 83008 | 79840 | 75447 | 73331 | 71435 |
| LT13 | 160498 | 145732 | 134146 | 124856 | 117272 | 105718 | 97422 | 91248 | 81272 | 75528 | 69525 |
| LT14 | 160498 | 146976 | 136333 | 127787 | 120813 | 110191 | 102574 | 96921 | 87824 | 82623 | 77223 |
| LT15 | 151927 | 136622 | 124797 | 115441 | 107899 | 96598 | 88643 | 82824 | 73634 | 68484 | 63235 |
| LT16 | 147014 | 132814 | 121955 | 113452 | 106670 | 96652 | 89730 | 84750 | 77059 | 72861 | 68675 |
| LT17 | 151927 | 140618 | 131846 | 124878 | 119255 | 110822 | 104889 | 100557 | 93739 | 89936 | 86076 |
| LT18 | 147014 | 135616 | 126883 | 120031 | 114561 | 106466 | 100859 | 96814 | 90542 | 87099 | 83644 |
| LT19 | 138293 | 129987 | 123785 | 119046 | 115345 | 110021 | 106450 | 103939 | 100162 | 98150 | 96182 |
| LT20 | 142855 | 134598 | 128328 | 123437 | 119559 | 113868 | 109965 | 107170 | 102880 | 100549 | 98228 |
| LT21 | 131256 | 122356 | 115971 | 111270 | 107728 | 102872 | 99803 | 97751 | 94852 | 93415 | 92085 |
| LT22 | 131256 | 122356 | 115971 | 111270 | 107728 | 102872 | 99803 | 97751 | 94852 | 93415 | 92085 |
| LT23 | 142855 | 134598 | 128328 | 123437 | 119559 | 113868 | 109965 | 107170 | 102880 | 100549 | 98228 |
| LT24 | 138293 | 129987 | 123785 | 119046 | 115345 | 110021 | 106450 | 103939 | 100162 | 98150 | 96182 |

Çizelge EK-A. 16 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=1

| n = 1 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 151927 | 140618 | 131846 | 124878 | 119255 | 110822 | 104889 | 100557 | 93739 | 89936 | 86076 |
| LT2 | 147014 | 135616 | 126883 | 120031 | 114561 | 106466 | 100859 | 96814 | 90542 | 87099 | 83644 |
| LT3 | 160498 | 146976 | 136333 | 127787 | 120813 | 110191 | 102574 | 96921 | 87824 | 82623 | 77223 |
| LT4 | 160498 | 145732 | 134146 | 124856 | 117272 | 105718 | 97422 | 91248 | 81272 | 75528 | 69525 |
| LT5 | 147014 | 132814 | 121955 | 113452 | 106670 | 96652 | 89730 | 84750 | 77059 | 72861 | 68675 |
| LT6 | 151927 | 136622 | 124797 | 115441 | 107899 | 96598 | 88643 | 82824 | 73634 | 68484 | 63235 |
| LT7 | 142855 | 134598 | 128328 | 123437 | 119559 | 113868 | 109965 | 107170 | 102880 | 100549 | 98228 |
| LT8 | 138293 | 129987 | 123785 | 119046 | 115345 | 110021 | 106450 | 103939 | 100162 | 98150 | 96182 |
| LT9 | 142855 | 134598 | 128328 | 123437 | 119559 | 113868 | 109965 | 107170 | 102880 | 100549 | 98228 |
| LT10 | 138293 | 129987 | 123785 | 119046 | 115345 | 110021 | 106450 | 103939 | 100162 | 98150 | 96182 |
| LT11 | 131256 | 122356 | 115971 | 111270 | 107728 | 102872 | 99803 | 97751 | 94852 | 93415 | 92085 |
| LT12 | 131256 | 122356 | 115971 | 111270 | 107728 | 102872 | 99803 | 97751 | 94852 | 93415 | 92085 |
| LT13 | 160498 | 146976 | 136333 | 127787 | 120813 | 110191 | 102574 | 96921 | 87824 | 82623 | 77223 |
| LT14 | 160498 | 145732 | 134146 | 124856 | 117272 | 105718 | 97422 | 91248 | 81272 | 75528 | 69525 |
| LT15 | 151927 | 140618 | 131846 | 124878 | 119255 | 110822 | 104889 | 100557 | 93739 | 89936 | 86076 |
| LT16 | 147014 | 135616 | 126883 | 120031 | 114561 | 106466 | 100859 | 96814 | 90542 | 87099 | 83644 |
| LT17 | 151927 | 136622 | 124797 | 115441 | 107899 | 96598 | 88643 | 82824 | 73634 | 68484 | 63235 |
| LT18 | 147014 | 132814 | 121955 | 113452 | 106670 | 96652 | 89730 | 84750 | 77059 | 72861 | 68675 |
| LT19 | 138293 | 122781 | 111134 | 102197 | 95209 | 85176 | 78497 | 73849 | 66989 | 63435 | 60048 |
| LT20 | 142855 | 126305 | 113731 | 103943 | 96177 | 84793 | 76995 | 71425 | 62897 | 58283 | 53714 |
| LT21 | 131256 | 117874 | 108124 | 100866 | 95360 | 87784 | 83008 | 79840 | 75447 | 73331 | 71435 |
| LT22 | 131256 | 117874 | 108124 | 100866 | 95360 | 87784 | 83008 | 79840 | 75447 | 73331 | 71435 |
| LT23 | 142855 | 126305 | 113731 | 103943 | 96177 | 84793 | 76995 | 71425 | 62897 | 58283 | 53714 |
| LT24 | 138293 | 122781 | 111134 | 102197 | 95209 | 85176 | 78497 | 73849 | 66989 | 63435 | 60048 |

Çizelge EK-A. 17 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2 \pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 533522 | 476611 | 434644 | 403011 | 378722 | 344744 | 322855 | 308055 | 287033 | 276611 | 267055 |
| LT2 | 535033 | 482055 | 443411 | 414622 | 392766 | 362600 | 343522 | 330822 | 313099 | 304477 | 296700 |
| LT3 | 530499 | 481211 | 444655 | 416911 | 395433 | 364966 | 344944 | 331144 | 310933 | 300533 | 290644 |
| LT4 | 530499 | 488855 | 458066 | 434755 | 416733 | 391177 | 374355 | 362733 | 345633 | 336766 | 328277 |
| LT5 | 535033 | 497188 | 469922 | 449788 | 434577 | 413655 | 400399 | 391511 | 378933 | 372688 | 366899 |
| LT6 | 533522 | 499399 | 474588 | 456077 | 441944 | 422244 | 409500 | 400822 | 388255 | 381833 | 375755 |
| LT7 | 538044 | 469633 | 419166 | 381200 | 352188 | 311955 | 286533 | 269755 | 246899 | 236244 | 227133 |
| LT8 | 539544 | 475155 | 428255 | 393466 | 367233 | 331599 | 309644 | 295488 | 276755 | 268333 | 261344 |
| LT9 | 538044 | 469633 | 419166 | 381200 | 352188 | 311955 | 286533 | 269755 | 246899 | 236244 | 227133 |
| LT10 | 539544 | 475155 | 428255 | 393466 | 367233 | 331599 | 309644 | 295488 | 276755 | 268333 | 261344 |
| LT11 | 542533 | 485999 | 445877 | 416899 | 395611 | 367722 | 351322 | 341166 | 328433 | 323088 | 318944 |
| LT12 | 542533 | 485999 | 445877 | 416899 | 395611 | 367722 | 351322 | 341166 | 328433 | 323088 | 318944 |
| LT13 | 530499 | 481211 | 444655 | 416911 | 395433 | 364966 | 344944 | 331144 | 310933 | 300533 | 290644 |
| LT14 | 530499 | 488855 | 458066 | 434755 | 416733 | 391177 | 374355 | 362733 | 345633 | 336766 | 328277 |
| LT15 | 533522 | 476611 | 434644 | 403011 | 378722 | 344744 | 322855 | 308055 | 287033 | 276611 | 267055 |
| LT16 | 535033 | 482055 | 443411 | 414622 | 392766 | 362600 | 343522 | 330822 | 313099 | 304477 | 296700 |
| LT17 | 533522 | 499399 | 474588 | 456077 | 441944 | 422244 | 409500 | 400822 | 388255 | 381833 | 375755 |
| LT18 | 535033 | 497188 | 469922 | 449788 | 434577 | 413655 | 400399 | 391511 | 378933 | 372688 | 366899 |
| LT19 | 539544 | 512666 | 493899 | 480400 | 470466 | 457188 | 449055 | 443744 | 436466 | 432977 | 429822 |
| LT20 | 538044 | 514811 | 498333 | 486300 | 477288 | 464977 | 457199 | 451988 | 444577 | 440877 | 437411 |
| LT21 | 542533 | 508355 | 484899 | 468399 | 456500 | 441200 | 432311 | 426799 | 419788 | 416733 | 414244 |
| LT22 | 542533 | 508355 | 484899 | 468399 | 456500 | 441200 | 432311 | 426799 | 419788 | 416733 | 414244 |
| LT23 | 538044 | 514811 | 498333 | 486300 | 477288 | 464977 | 457199 | 451988 | 444577 | 440877 | 437411 |
| LT24 | 539544 | 512666 | 493899 | 480400 | 470466 | 457188 | 449055 | 443744 | 436466 | 432977 | 429822 |

Çizelge EK-A. 18 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 533522 | 499399 | 474588 | 456077 | 441944 | 422244 | 409500 | 400822 | 388244 | 381822 | 375755 |
| LT2 | 535033 | 497188 | 469922 | 449788 | 434577 | 413655 | 400399 | 391511 | 378933 | 372688 | 366899 |
| LT3 | 530499 | 488855 | 458066 | 434755 | 416733 | 391177 | 374355 | 362733 | 345633 | 336766 | 328277 |
| LT4 | 530499 | 481211 | 444655 | 416911 | 395433 | 364966 | 344944 | 331144 | 310933 | 300533 | 290644 |
| LT5 | 535033 | 482055 | 443411 | 414622 | 392766 | 362600 | 343522 | 330822 | 313099 | 304477 | 296700 |
| LT6 | 533522 | 476611 | 434644 | 403011 | 378722 | 344744 | 322855 | 308055 | 287033 | 276611 | 267055 |
| LT7 | 538044 | 514800 | 498333 | 486300 | 477288 | 464966 | 457199 | 451988 | 444577 | 440877 | 437411 |
| LT8 | 539544 | 512666 | 493899 | 480400 | 470455 | 457188 | 449055 | 443744 | 436466 | 432977 | 429822 |
| LT9 | 538044 | 514811 | 498333 | 486300 | 477288 | 464966 | 457199 | 451988 | 444577 | 440877 | 437411 |
| LT10 | 539544 | 512666 | 493899 | 480400 | 470466 | 457188 | 449055 | 443744 | 436466 | 432977 | 429822 |
| LT11 | 542533 | 508355 | 484899 | 468388 | 456500 | 441200 | 432311 | 426799 | 419777 | 416722 | 414244 |
| LT12 | 542533 | 508355 | 484899 | 468388 | 456500 | 441200 | 432311 | 426799 | 419777 | 416722 | 414244 |
| LT13 | 530499 | 488855 | 458066 | 434755 | 416733 | 391177 | 374355 | 362733 | 345633 | 336766 | 328277 |
| LT14 | 530499 | 481211 | 444655 | 416911 | 395433 | 364966 | 344944 | 331144 | 310933 | 300533 | 290644 |
| LT15 | 533522 | 499399 | 474588 | 456077 | 441944 | 422244 | 409500 | 400822 | 388255 | 381822 | 375755 |
| LT16 | 535033 | 497188 | 469922 | 449788 | 434577 | 413655 | 400399 | 391511 | 378933 | 372688 | 366899 |
| LT17 | 533522 | 476611 | 434644 | 403011 | 378722 | 344744 | 322855 | 308055 | 287033 | 276611 | 267055 |
| LT18 | 535033 | 482055 | 443411 | 414622 | 392766 | 362600 | 343522 | 330822 | 313099 | 304477 | 296700 |
| LT19 | 539544 | 475155 | 428255 | 393466 | 367233 | 331599 | 309644 | 295488 | 276755 | 268333 | 261344 |
| LT20 | 538044 | 469633 | 419166 | 381200 | 352188 | 311955 | 286533 | 269755 | 246888 | 236244 | 227133 |
| LT21 | 542533 | 485999 | 445877 | 416899 | 395611 | 367722 | 351322 | 341166 | 328433 | 323088 | 318944 |
| LT22 | 542533 | 485999 | 445877 | 416899 | 395611 | 367722 | 351322 | 341166 | 328433 | 323088 | 318944 |
| LT23 | 538044 | 469633 | 419166 | 381200 | 352188 | 311955 | 286533 | 269755 | 246899 | 236244 | 227133 |
| LT24 | 539544 | 475155 | 428255 | 393466 | 367233 | 331599 | 309644 | 295488 | 276755 | 268333 | 261344 |

Çizelge EK-A. 19 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2 \pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 303855 | 273256 | 249593 | 230882 | 215802 | 193195 | 177286 | 165650 | 147265 | 136973 | 126468 |
| LT2 | 294028 | 265641 | 243913 | 226898 | 213339 | 193308 | 179460 | 169495 | 154114 | 145720 | 137350 |
| LT3 | 321008 | 291477 | 268292 | 249706 | 234539 | 211442 | 194842 | 182501 | 162546 | 151060 | 139047 |
| LT4 | 321008 | 293940 | 272665 | 255575 | 241626 | 220376 | 205146 | 193836 | 175653 | 165248 | 154441 |
| LT5 | 294028 | 271233 | 253753 | 240068 | 229123 | 212937 | 201715 | 193623 | 181081 | 174195 | 167284 |
| LT6 | 303855 | 281235 | 263680 | 249757 | 238510 | 221646 | 209783 | 201112 | 187478 | 179875 | 172147 |
| LT7 | 285709 | 252622 | 227464 | 207885 | 192353 | 169583 | 153988 | 142855 | 125789 | 116564 | 107427 |
| LT8 | 276586 | 245559 | 222274 | 204392 | 190418 | 170350 | 156992 | 147693 | 133983 | 126870 | 120098 |
| LT9 | 285709 | 252622 | 227464 | 207885 | 192353 | 169583 | 153988 | 142855 | 125789 | 116564 | 107427 |
| LT10 | 276586 | 245559 | 222274 | 204392 | 190418 | 170350 | 156992 | 147693 | 133983 | 126870 | 120098 |
| LT11 | 262499 | 235745 | 216242 | 201728 | 190720 | 175565 | 166014 | 159681 | 150897 | 146662 | 142867 |
| LT12 | 262499 | 235745 | 216242 | 201728 | 190720 | 175565 | 166014 | 159681 | 150897 | 146662 | 142867 |
| LT13 | 321008 | 291477 | 268292 | 249706 | 234539 | 211442 | 194842 | 182501 | 162546 | 151060 | 139047 |
| LT14 | 321008 | 293940 | 272665 | 255575 | 241626 | 220376 | 205146 | 193836 | 175653 | 165248 | 154441 |
| LT15 | 303855 | 273256 | 249593 | 230882 | 215802 | 193195 | 177286 | 165650 | 147265 | 136973 | 126468 |
| LT16 | 294028 | 265641 | 243913 | 226898 | 213339 | 193308 | 179460 | 169495 | 154114 | 145720 | 137350 |
| LT17 | 303855 | 281235 | 263680 | 249757 | 238510 | 221646 | 209783 | 201112 | 187478 | 179875 | 172147 |
| LT18 | 294028 | 271233 | 253753 | 240068 | 229123 | 212937 | 201715 | 193623 | 181081 | 174195 | 167284 |
| LT19 | 276586 | 259961 | 247570 | 238095 | 230693 | 220037 | 212899 | 207873 | 200321 | 196299 | 192366 |
| LT20 | 285709 | 269197 | 256643 | 246879 | 239113 | 227740 | 219924 | 214345 | 205762 | 201100 | 196450 |
| LT21 | 262499 | 244718 | 231938 | 222538 | 215450 | 205749 | 199604 | 195508 | 189702 | 186824 | 184173 |
| LT22 | 262499 | 244718 | 231938 | 222538 | 215450 | 205749 | 199604 | 195508 | 189702 | 186824 | 184173 |
| LT23 | 285709 | 269197 | 256643 | 246879 | 239113 | 227740 | 219924 | 214345 | 205762 | 201100 | 196450 |
| LT24 | 276586 | 259961 | 247570 | 238095 | 230693 | 220037 | 212899 | 207873 | 200321 | 196299 | 192366 |

Çizelge EK-A. 20 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=2

| n = 2 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 303855 | 281235 | 263680 | 249757 | 238510 | 221646 | 209783 | 201112 | 187478 | 179875 | 172147 |
| LT2 | 294028 | 271233 | 253753 | 240068 | 229123 | 212937 | 201715 | 193623 | 181081 | 174195 | 167284 |
| LT3 | 321008 | 293940 | 272665 | 255575 | 241626 | 220376 | 205146 | 193836 | 175653 | 165248 | 154441 |
| LT4 | 321008 | 291477 | 268292 | 249706 | 234539 | 211442 | 194842 | 182501 | 162546 | 151060 | 139047 |
| LT5 | 294028 | 265641 | 243913 | 226898 | 213339 | 193308 | 179460 | 169495 | 154114 | 145720 | 137350 |
| LT6 | 303855 | 273256 | 249593 | 230882 | 215802 | 193195 | 177286 | 165650 | 147265 | 136973 | 126468 |
| LT7 | 285709 | 269197 | 256643 | 246879 | 239113 | 227740 | 219924 | 214345 | 205762 | 201100 | 196450 |
| LT8 | 276586 | 259961 | 247570 | 238095 | 230693 | 220037 | 212899 | 207873 | 200321 | 196299 | 192366 |
| LT9 | 285709 | 269197 | 256643 | 246879 | 239113 | 227740 | 219924 | 214345 | 205762 | 201100 | 196450 |
| LT10 | 276586 | 259961 | 247570 | 238095 | 230693 | 220037 | 212899 | 207873 | 200321 | 196299 | 192366 |
| LT11 | 262499 | 244718 | 231938 | 222538 | 215450 | 205749 | 199604 | 195508 | 189702 | 186824 | 184173 |
| LT12 | 262499 | 244718 | 231938 | 222538 | 215450 | 205749 | 199604 | 195508 | 189702 | 186824 | 184173 |
| LT13 | 321008 | 293940 | 272665 | 255575 | 241626 | 220376 | 205146 | 193836 | 175653 | 165248 | 154441 |
| LT14 | 321008 | 291477 | 268292 | 249706 | 234539 | 211442 | 194842 | 182501 | 162546 | 151060 | 139047 |
| LT15 | 303855 | 281235 | 263680 | 249757 | 238510 | 221646 | 209783 | 201112 | 187478 | 179875 | 172147 |
| LT16 | 294028 | 271233 | 253753 | 240068 | 229123 | 212937 | 201715 | 193623 | 181081 | 174195 | 167284 |
| LT17 | 303855 | 273256 | 249593 | 230882 | 215802 | 193195 | 177286 | 165650 | 147265 | 136973 | 126468 |
| LT18 | 294028 | 265641 | 243913 | 226898 | 213339 | 193308 | 179460 | 169495 | 154114 | 145720 | 137350 |
| LT19 | 276586 | 245559 | 222274 | 204392 | 190418 | 170350 | 156992 | 147693 | 133983 | 126870 | 120098 |
| LT20 | 285709 | 252622 | 227464 | 207885 | 192353 | 169583 | 153988 | 142855 | 125789 | 116564 | 107427 |
| LT21 | 262499 | 235745 | 216242 | 201728 | 190720 | 175565 | 166014 | 159681 | 150897 | 146662 | 142867 |
| LT22 | 262499 | 235745 | 216242 | 201728 | 190720 | 175565 | 166014 | 159681 | 150897 | 146662 | 142867 |
| LT23 | 285709 | 252622 | 227464 | 207885 | 192353 | 169583 | 153988 | 142855 | 125789 | 116564 | 107427 |
| LT24 | 276586 | 245559 | 222274 | 204392 | 190418 | 170350 | 156992 | 147693 | 133983 | 126870 | 120098 |

Çizelge EK-A. 21 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2 \pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar ankastre mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 800122 | 712633 | 648200 | 599744 | 562622 | 510877 | 477733 | 455455 | 424099 | 408711 | 800122 |
| LT2 | 803299 | 723344 | 665333 | 622344 | 589899 | 545511 | 517755 | 499466 | 474333 | 462344 | 803299 |
| LT3 | 796144 | 720677 | 664800 | 622499 | 589822 | 543644 | 513444 | 492700 | 462544 | 447133 | 796144 |
| LT4 | 796144 | 735344 | 690544 | 656733 | 630666 | 593844 | 569722 | 553111 | 528788 | 516211 | 796144 |
| LT5 | 803299 | 747244 | 707166 | 677788 | 655744 | 625744 | 606955 | 594500 | 577100 | 568588 | 803299 |
| LT6 | 800122 | 751233 | 715877 | 689600 | 669644 | 641922 | 624111 | 612033 | 594611 | 585777 | 800122 |
| LT7 | 805033 | 707599 | 635822 | 581911 | 540711 | 483600 | 447433 | 423466 | 390488 | 374888 | 805033 |
| LT8 | 807711 | 717933 | 652866 | 604800 | 568688 | 519777 | 489699 | 470266 | 444399 | 432622 | 807711 |
| LT9 | 805033 | 707599 | 635822 | 581911 | 540711 | 483600 | 447433 | 423466 | 390488 | 374888 | 805033 |
| LT10 | 807711 | 717933 | 652877 | 604800 | 568688 | 519777 | 489699 | 470266 | 444399 | 432622 | 807711 |
| LT11 | 812911 | 735377 | 680666 | 641311 | 612499 | 574800 | 552611 | 538800 | 521322 | 513855 | 812911 |
| LT12 | 812911 | 735377 | 680666 | 641311 | 612499 | 574800 | 552611 | 538811 | 521322 | 513855 | 812911 |
| LT13 | 796144 | 720677 | 664800 | 622499 | 589822 | 543644 | 513444 | 492700 | 462544 | 447133 | 796144 |
| LT14 | 796144 | 735344 | 690544 | 656733 | 630666 | 593844 | 569722 | 553111 | 528788 | 516211 | 796144 |
| LT15 | 800122 | 712633 | 648200 | 599744 | 562622 | 510877 | 477733 | 455455 | 424099 | 408711 | 800122 |
| LT16 | 803299 | 723344 | 665333 | 622344 | 589899 | 545511 | 517755 | 499466 | 474333 | 462344 | 803299 |
| LT17 | 800122 | 751233 | 715877 | 689600 | 669644 | 641922 | 624111 | 612033 | 594611 | 585777 | 800122 |
| LT18 | 803299 | 747244 | 707166 | 677788 | 655744 | 625744 | 606955 | 594500 | 577100 | 568588 | 803299 |
| LT19 | 807711 | 761088 | 728344 | 704722 | 687266 | 663911 | 649588 | 640233 | 627433 | 621300 | 807711 |
| LT20 | 805033 | 765422 | 737155 | 716411 | 700811 | 679400 | 665822 | 656699 | 643677 | 637133 | 805033 |
| LT21 | 812911 | 754611 | 714233 | 685600 | 664866 | 637999 | 622255 | 612455 | 599922 | 594444 | 812911 |
| LT22 | 812911 | 754611 | 714233 | 685600 | 664866 | 637999 | 622255 | 612455 | 599922 | 594444 | 812911 |
| LT23 | 805033 | 765422 | 737155 | 716411 | 700811 | 679400 | 665822 | 656699 | 643677 | 637133 | 805033 |
| LT24 | 807711 | 761088 | 728344 | 704722 | 687266 | 663911 | 649588 | 640233 | 627433 | 621300 | 807711 |

Çizelge EK-A. 22 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar ankastre mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 800122 | 751233 | 715877 | 689600 | 669644 | 641922 | 624111 | 612022 | 594611 | 585777 | 800122 |
| LT2 | 803299 | 747244 | 707166 | 677788 | 655744 | 625744 | 606955 | 594499 | 577100 | 568588 | 803299 |
| LT3 | 796144 | 735344 | 690544 | 656733 | 630666 | 593844 | 569722 | 553111 | 528788 | 516211 | 796144 |
| LT4 | 796144 | 720677 | 664800 | 622499 | 589822 | 543644 | 513444 | 492700 | 462544 | 447133 | 796144 |
| LT5 | 803299 | 723344 | 665333 | 622344 | 589899 | 545511 | 517744 | 499466 | 474322 | 462344 | 803299 |
| LT6 | 800122 | 712633 | 648200 | 599744 | 562622 | 510877 | 477733 | 455455 | 424088 | 408711 | 800122 |
| LT7 | 805033 | 765422 | 737155 | 716411 | 700811 | 679400 | 665822 | 656699 | 643677 | 637133 | 805033 |
| LT8 | 807711 | 761088 | 728344 | 704722 | 687266 | 663900 | 649588 | 640233 | 627433 | 621300 | 807711 |
| LT9 | 805033 | 765422 | 737155 | 716411 | 700811 | 679400 | 665822 | 656699 | 643677 | 637133 | 805033 |
| LT10 | 807711 | 761088 | 728344 | 704722 | 687266 | 663900 | 649588 | 640233 | 627433 | 621300 | 807711 |
| LT11 | 812911 | 754611 | 714233 | 685600 | 664866 | 637999 | 622255 | 612455 | 599922 | 594444 | 812911 |
| LT12 | 812911 | 754611 | 714233 | 685600 | 664866 | 637999 | 622255 | 612455 | 599922 | 594444 | 812911 |
| LT13 | 796144 | 735344 | 690544 | 656733 | 630666 | 593844 | 569722 | 553111 | 528788 | 516211 | 796144 |
| LT14 | 796144 | 720677 | 664800 | 622499 | 589822 | 543644 | 513444 | 492700 | 462544 | 447133 | 796144 |
| LT15 | 800122 | 751233 | 715877 | 689600 | 669644 | 641922 | 624111 | 612033 | 594611 | 585777 | 800122 |
| LT16 | 803299 | 747244 | 707166 | 677788 | 655744 | 625744 | 606955 | 594499 | 577100 | 568588 | 803299 |
| LT17 | 800122 | 712633 | 648200 | 599744 | 562622 | 510877 | 477733 | 455455 | 424099 | 408711 | 800122 |
| LT18 | 803299 | 723344 | 665333 | 622344 | 589899 | 545511 | 517755 | 499466 | 474322 | 462344 | 803299 |
| LT19 | 807711 | 717933 | 652866 | 604800 | 568688 | 519766 | 489699 | 470266 | 444399 | 432622 | 807711 |
| LT20 | 805033 | 707599 | 635822 | 581911 | 540711 | 483600 | 447433 | 423466 | 390488 | 374888 | 805033 |
| LT21 | 812911 | 735377 | 680666 | 641311 | 612499 | 574800 | 552611 | 538800 | 521322 | 513855 | 812911 |
| LT22 | 812911 | 735377 | 680666 | 641311 | 612499 | 574800 | 552611 | 538800 | 521322 | 513855 | 812911 |
| LT23 | 805033 | 707599 | 635822 | 581911 | 540711 | 483600 | 447433 | 423466 | 390488 | 374888 | 805033 |
| LT24 | 807711 | 717933 | 652877 | 604800 | 568688 | 519777 | 489699 | 470266 | 444399 | 432622 | 807711 |

Çizelge EK-A. 23 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{b^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı b, dört kenar basit mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( a / b ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 451711 | 405479 | 369853 | 341755 | 319173 | 285470 | 261845 | 244617 | 217536 | 202407 | 187013 |
| LT2 | 433779 | 391706 | 359725 | 334856 | 315152 | 286312 | 266596 | 252534 | 231058 | 219472 | 208024 |
| LT3 | 478477 | 433967 | 399146 | 371286 | 348591 | 314109 | 289416 | 271082 | 241538 | 224574 | 206868 |
| LT4 | 478477 | 438717 | 407527 | 382545 | 362175 | 331250 | 309158 | 292796 | 266570 | 251629 | 236185 |
| LT5 | 433779 | 400603 | 375383 | 355754 | 340184 | 317351 | 301693 | 290484 | 273268 | 263906 | 254595 |
| LT6 | 451711 | 418975 | 393654 | 373636 | 357513 | 333436 | 316572 | 304307 | 285093 | 274424 | 263630 |
| LT7 | 436983 | 388602 | 351657 | 322792 | 299808 | 265917 | 242518 | 225679 | 199629 | 185354 | 171053 |
| LT8 | 419290 | 374943 | 341617 | 316032 | 295988 | 267148 | 247872 | 234388 | 214357 | 203877 | 193799 |
| LT9 | 436983 | 388602 | 351657 | 322792 | 299808 | 265917 | 242518 | 225679 | 199629 | 185354 | 171053 |
| LT10 | 419290 | 374943 | 341617 | 316032 | 295988 | 267148 | 247872 | 234388 | 214357 | 203877 | 193799 |
| LT11 | 398329 | 360680 | 333210 | 312714 | 297132 | 275581 | 261871 | 252685 | 239754 | 233395 | 227590 |
| LT12 | 398329 | 360680 | 333210 | 312714 | 297132 | 275581 | 261871 | 252685 | 239754 | 233395 | 227590 |
| LT13 | 478477 | 433967 | 399146 | 371286 | 348591 | 314109 | 289416 | 271082 | 241538 | 224574 | 206868 |
| LT14 | 478477 | 438717 | 407527 | 382545 | 362175 | 331250 | 309158 | 292796 | 266570 | 251629 | 236185 |
| LT15 | 451711 | 405479 | 369853 | 341755 | 319173 | 285470 | 261845 | 244617 | 217536 | 202407 | 187013 |
| LT16 | 433779 | 391706 | 359725 | 334856 | 315152 | 286312 | 266596 | 252534 | 231058 | 219472 | 208024 |
| LT17 | 451711 | 418975 | 393654 | 373636 | 357513 | 333436 | 316572 | 304307 | 285093 | 274424 | 263630 |
| LT18 | 433779 | 400603 | 375383 | 355754 | 340184 | 317351 | 301693 | 290484 | 273268 | 263906 | 254595 |
| LT19 | 419290 | 391354 | 370469 | 354447 | 341918 | 323835 | 311671 | 303101 | 290183 | 283284 | 276536 |
| LT20 | 436983 | 409362 | 388238 | 371713 | 358531 | 339078 | 325645 | 315994 | 301078 | 292910 | 284754 |
| LT21 | 398329 | 368308 | 346568 | 330433 | 318206 | 301316 | 290547 | 283309 | 273017 | 267865 | 263090 |
| LT22 | 398329 | 368308 | 346568 | 330433 | 318206 | 301316 | 290547 | 283309 | 273017 | 267865 | 263090 |
| LT23 | 436983 | 409362 | 388238 | 371713 | 358531 | 339078 | 325645 | 315994 | 301078 | 292910 | 284754 |
| LT24 | 419290 | 391354 | 370469 | 354447 | 341918 | 323835 | 311671 | 303101 | 290183 | 283284 | 276536 |

Çizelge EK-A. 24 Boyutsuz Asal Doğal Frekans $\omega_0^* = \omega_0 \frac{a^2\pi}{t}$, plak kısa kenarı a, dört kenar basit mesnetli, n=3

| n = 3 | Kenar Oranı ( b / a ) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 |
| Plak Tipi | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ | $\omega_0^*$ |
| LT1 | 451711 | 418975 | 393654 | 373636 | 357513 | 333436 | 316572 | 304307 | 285093 | 274424 | 263630 |
| LT2 | 433779 | 400603 | 375383 | 355754 | 340184 | 317351 | 301693 | 290484 | 273268 | 263906 | 254595 |
| LT3 | 478477 | 438717 | 407527 | 382545 | 362175 | 331250 | 309158 | 292796 | 266570 | 251629 | 236185 |
| LT4 | 478477 | 433967 | 399146 | 371286 | 348591 | 314109 | 289416 | 271082 | 241538 | 224574 | 206868 |
| LT5 | 433779 | 391706 | 359725 | 334856 | 315152 | 286312 | 266596 | 252534 | 231058 | 219472 | 208024 |
| LT6 | 451711 | 405479 | 369853 | 341755 | 319173 | 285470 | 261845 | 244617 | 217536 | 202407 | 187013 |
| LT7 | 436983 | 409362 | 388238 | 371713 | 358531 | 339078 | 325645 | 315994 | 301078 | 292910 | 284754 |
| LT8 | 419290 | 391354 | 370469 | 354447 | 341918 | 323835 | 311671 | 303101 | 290183 | 283284 | 276536 |
| LT9 | 436983 | 409362 | 388238 | 371713 | 358531 | 339078 | 325645 | 315994 | 301078 | 292910 | 284754 |
| LT10 | 419290 | 391354 | 370469 | 354447 | 341918 | 323835 | 311671 | 303101 | 290183 | 283284 | 276536 |
| LT11 | 398329 | 368308 | 346568 | 330433 | 318206 | 301316 | 290547 | 283309 | 273017 | 267865 | 263090 |
| LT12 | 398329 | 368308 | 346568 | 330433 | 318206 | 301316 | 290547 | 283309 | 273017 | 267865 | 263090 |
| LT13 | 478477 | 438717 | 407527 | 382545 | 362175 | 331250 | 309158 | 292796 | 266570 | 251629 | 236185 |
| LT14 | 478477 | 433967 | 399146 | 371286 | 348591 | 314109 | 289416 | 271082 | 241538 | 224574 | 206868 |
| LT15 | 451711 | 418975 | 393654 | 373636 | 357513 | 333436 | 316572 | 304307 | 285093 | 274424 | 263630 |
| LT16 | 433779 | 400603 | 375383 | 355754 | 340184 | 317351 | 301693 | 290484 | 273268 | 263906 | 254595 |
| LT17 | 451711 | 405479 | 369853 | 341755 | 319173 | 285470 | 261845 | 244617 | 217536 | 202407 | 187013 |
| LT18 | 433779 | 391706 | 359725 | 334856 | 315152 | 286312 | 266596 | 252534 | 231058 | 219472 | 208024 |
| LT19 | 419290 | 374943 | 341617 | 316032 | 295988 | 267148 | 247872 | 234388 | 214357 | 203877 | 193799 |
| LT20 | 436983 | 388602 | 351657 | 322792 | 299808 | 265917 | 242518 | 225679 | 199629 | 185354 | 171053 |
| LT21 | 398329 | 360680 | 333210 | 312714 | 297132 | 275581 | 261871 | 252685 | 239754 | 233395 | 227590 |
| LT22 | 398329 | 360680 | 333210 | 312714 | 297132 | 275581 | 261871 | 252685 | 239754 | 233395 | 227590 |
| LT23 | 436983 | 388602 | 351657 | 322792 | 299808 | 265917 | 242518 | 225679 | 199629 | 185354 | 171053 |
| LT24 | 419290 | 374943 | 341617 | 316032 | 295988 | 267148 | 247872 | 234388 | 214357 | 203877 | 193799 |

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Erkin ALTUNSARAY

**Doğum Tarihi ve Yeri** :23.01.1977 – Adana

**Yabancı Dili** :İngilizce

**E-posta** :erkina@yildiz.edu.tr

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|---|---|---|---|
| Y. Lisans | Deniz Bil.ve Deniz Tekn. A.B.D./Gemi İnş. Programı | Dokuz Eylül Üniversitesi | 2005 |
| Lisans | Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Bölümü | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2000 |
| Lise | Fen | Kayseri Fen Lisesi | 1994 |

## İŞ TECRÜBESİ

| Yıl | Firma/Kurum | Görevi |
|---|---|---|
| 2005-halen | Yıldız Teknik Üniversitesi | Araş.Gör. (2547,35-b md.) |
| 2004-halen | Dokuz Eylül Üniversitesi | Araş.Gör. |
| 2000-2001 | ARKAS Denizcilik-M/V Diane-A Gemisi | Uzakyol Yrd.Vard.Mühendisi |