

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASİMETRİK YÜZEYLİ ALÜMİNYUM BAL PETEĞİ SANDVIÇ PLAKALARIN
OPTİMİZASYONU, SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE YORULMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Osman Mert KÜÇÜKGÖZE

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL
II. Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Hamza Arda DEVECİ

TEZ JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Adnan ÖZEL
Doç. Dr. ATILLA KUMBASAROĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇAM

DOKTORA TEZİ
ERZİNCAN, 2026

© 2026 [Osman Mert KÜÇÜKGÖZE]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. Adnan ÖZEL danışmanlığında, Osman Mert KÜÇÜKGÖZE tarafından hazırlanan bu çalışma 19.06.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Adnan ÖZEL İmza:

Üye : Prof. Dr. Hamit AKBULUT İmza:

Üye : Prof. Dr. Salih AKPINAR İmza:

Üye : Doç. Dr. ATILLA KUMBASAROĞLU İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇAM İmza:

Yukarıdaki Doktora Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR
Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Asimetrik Yüzeyli Alüminyum Bal Peteği Sandviç Plakaların Optimizasyonu, Sonlu Elemanlar Analizi ve Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” isimli Doktora” tezım tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 19/06/2026

(İmza)

**Osman Mert
KÜÇÜKHÖZE**

ÖZET

ASİMETRİK YÜZEYLİ ALÜMİNYUM BAL PETEĞİ SANDVİÇ PLAKALARIN OPTİMİZASYONU, SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Osman Mert KÜÇÜKGÖZE

Doktora Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Arda DEVECİ

2026, 124 sayfa

Bu çalışmada, yapıştırıcı türü, yapıştırıcı miktarı, çekirdek kalınlığı ve üst ile alt yüzey plakaları arasındaki kalınlık farkından kaynaklanan yüzey levhası asimetrisinin bal peteği sandviç kompozit plakaların üç noktalı eğilme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar deney tasarım yöntemi ile planlanmış ve sonuçlar varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. İlk aşamada panel mukavemeti maksimum yük taşıma kapasitesine göre değerlendirilmiş, ardından mukavemet, ağırlık ve maliyet birlikte ele alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Mukavemet öncelikli optimum konfigürasyonun 20 mm çekirdek kalınlığı, 2 mm üst plaka, 1 mm alt plaka ve 15 g poliüretan yapıştırıcı kullanılan yapı olduğu belirlenmiş ve bu yapı 4,01 kN maksimum yük taşımıştır. Deneysel sonuçları desteklemek amacıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizler, yükün temel olarak Z doğrultusunda taşındığını, en yüksek eşdeğer gerilmelerin bal peteği hücre duvarlarında oluştuğunu ve yüzey levhası asimetrisinin gerilme dağılımı ile plastik deformasyonu önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Statik performansı en yüksek iki konfigürasyon üzerinde gerçekleştirilen yorulma deneylerinde, epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler %65 yük seviyesinde, poliüretan yapıştırıcı kullanılan numuneler ise %90 yük seviyesinde 1.000.000 ve daha fazla çevrime ulaşmıştır. Sonuç olarak, poliüretan yapıştırıcının yüksek yük seviyelerinde daha üstün yorulma performansı sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç paneller, sonlu elemanlar, yorulma, bal peteği, üç nokta eğme

ABSTRACT

OPTIMIZATION, FINITE ELEMENT ANALYSIS, AND INVESTIGATION OF THE FATIGUE BEHAVIOR OF ASYMMETRIC FACE-SHEET ALUMINUM HONEYCOMB SANDWICH PANELS

Osman Mert KÜÇÜKGÖZE

Doctoral Thesis,

Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Co-advisor: Assistant Professor Hamza Arda DEVECİ

2026, 124 pages

This study investigated the effects of adhesive type, adhesive amount, core thickness, and face sheet asymmetry resulting from the thickness difference between the upper and lower face sheets on the three-point bending performance of honeycomb sandwich composite panels. The experimental study was planned using a design of experiments (DOE) approach, and the results were evaluated by analysis of variance (ANOVA). In the first stage, the panel strength was evaluated based on the maximum load-carrying capacity. Subsequently, optimization was performed by considering strength, weight, and cost simultaneously. The optimum configuration with strength as the primary objective consisted of a 20 mm core thickness, a 2 mm upper face sheet, a 1 mm lower face sheet, and 15 g of polyurethane adhesive, achieving a maximum load-carrying capacity of 4.01 kN. Finite element analysis was performed to support the experimental results. The analyses showed that the load was primarily transferred in the Z direction, the highest equivalent stresses were concentrated in the honeycomb cell walls, and face sheet asymmetry significantly affected the stress distribution and plastic deformation. Fatigue tests were conducted on the two configurations that exhibited the best static performance. Specimens bonded with epoxy adhesive exceeded 1,000,000 cycles at 65% of the failure load, whereas those bonded with polyurethane adhesive achieved more than 1,000,000 cycles even at the higher load level of 90%. Consequently, polyurethane adhesive provided superior fatigue performance under high loading conditions.

Keywords: Sandwich panels, finite elements, fatigue, honeycomb, three-point bending

TEŞEKKÜR

Çalışmam sürecinde benden desteklerini esirgemeyen, her zorlandığım konuda bana bir ışık olan, değerli bilgi ve birikiminden yararlandığım kadar insani ilişkilerde de sonsuz desteğiyle gelişimime katkı sağlayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Adnan ÖZEL ve Dr. Öğretim Üyesi Salim ÇAM’a en derin saygılarımla teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tez çalışmam sürecinde, sağladığı katkılar için yanımda bulunan değerli ailem ve arkadaşlarıma verdikleri destekler için minnettarım.

Osman Mert KÜÇÜKGÖZE

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Amacı	1
1.2. Araştırmanın Önemi	2
1.3. Varsayımlar	3
1.4. Sınırlılıklar.....	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	6
2.1. Sandviç Yapıların Tanımı ve Özellikleri.....	6
2.2. Sandviç Yapıların Sınıflandırılması	7
2.2.1. Köpük çekirdekli sandviç yapılar	7
2.2.2. Kafes çekirdekli sandviç yapılar.....	8
2.2.3. Oluk çekirdekli sandviç yapılar	9
2.2.4. Bal peteği çekirdekli sandviç yapılar	10
2.3. Yüzey Tabakaları.....	12
2.3.1. Kompozit yüzey tabakaları.....	12
2.3.2. Alüminyum yüzey tabakaları.....	13
2.4. Çekirdek Yapı.....	16
2.5. Yapıştırıcılar	17
2.6. Bal Peteği Sandviç Yapıların Hasar Modları	18
2.7. Havacılıkta Bal Peteği sandviç Yapıların Kullanım Yerleri	21
2.8. Sandviç Plakalarda Eğilme, Kayma ve Çökme Davranışının Teorik İncelenmesi	23
2.9. Yorulma	26
2.9.1. Yükleme şartları	28
2.10. Sonlu Elemanlar Metodu	28
2.11. Literatür Taraması	30
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	37

3.1. Geometrik Detaylar ve Malzeme Özellikleri.....	37
3.2.Çekme Deneyine Tabi Tutulacak Numunelerin Hazırlanması ve Test Prosedürleri.	37
3.3. Deney Tasarımı.....	42
3.4. Numunelerin Hazırlanması.....	45
3.5. Test Metodolojisi.....	50
4. BULGULAR	52
4.1. Deformasyon Davranışı.....	52
4.2. Statik Deneyler Sonucu Elde Edilen Bulgular	57
4.3. Varyans Analizi (ANOVA) ile Elde Edilen Deneysel Bulguların İncelenmesi	65
4.4. Ortalama Yük, Ağırlık ve Maliyeti Dikkate Alarak Optimum Tasarım.....	74
4.5. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	79
4.5.1. Sandviç yapı bileşenlerinin normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımları	81
4.5.1.1. Üst plakada meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımlarının incelenmesi	81
4.5.1.2. Alt plakada meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımlarının incelenmesi	87
4.5.1.3. Bal peteği çekirdek yapısında meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımlarının incelenmesi	92
4.5.1.4. Üst plaka-bal peteği çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı.....	97
4.5.1.5. Alt plaka-bal peteği çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı.....	98
4.5.2. Plastik deformasyonun meydana geldiği konfigürasyonlarda bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von-Mises) gerilme ve plastik şekil değiştirme analizi.....	99
4.5.3. Epoksi ve poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panel konfigürasyonlarının gerilme ve plastik şekil değiştirme davranışlarının karşılaştırmalı analizi.....	104
4.5.4. Yer değiştirme analizi.....	110
4.6. Yorulma Deneyleri Test Sonuçları	111
4.6.1 Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelerin yorulma davranışı (18. Konfigürasyon)..	113
4.6.2. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerin yorulma davranışı (42. Konfigürasyon)	116
5.SONUÇLAR.....	117
KAYNAKÇA	119

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bal peteği sandviç yapılarda kalınlık ve performans ilişkisi.....	11
Tablo 2. Bal peteği çekirdekli sandviç yapılar üzerinde gerçekleştirilen literatür çalışmalarının karşılaştırılması.....	35
Tablo 3. Deneylerde kullanılan materyallerin özellikleri.....	40
Tablo 4. Deney tasarımı verileri.....	44
Tablo 5. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilen kompozit sandviç panellerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri.....	59
Tablo 6. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilen kompozit sandviç panellerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri.....	65
Tablo 7. Ortalama yük, ağırlık ve maliyet değerlerine göre optimum tasarım karşılaştırma....	76
Tablo 8.Çalışmada kullanılan malzemelerin maliyetleri.....	77
Tablo 9. Epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer (von- Mises) gerilmeler.....	106
Tablo 10. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer (von- Mises) gerilmeler.....	107
Tablo 11. Epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme.....	108
Tablo 12. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme.....	109
Tablo 13. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler için yük oranı-çevrim sayısı değerleri....	114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.Köpük çekirdekli sandviç yapı	8
Şekil 2. Kafes çekirdekli sandviç yapı	9
Şekil 3.Oluk çekirdekli sandviç yapı.....	10
Şekil 4. Bal peteği çekirdekli sandviç yapı	11
Şekil 5. Yüzey tabakası hasarı	19
Şekil 6. Enine Kesme Hasarı	19
Şekil 7. Çekirdek ezilmesi	19
Şekil 8. Genel burkulma	20
Şekil 9. Kayma burkulması	20
Şekil 10. Yüzey tabakası kırışması.....	20
Şekil 11. Hücre içi burkulma hasarı	21
Şekil 12. F-15 savaş uçağının yatay stabilizerinde kullanılan bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapı. (b) Tipik bir helikopter rotor palinin yapısal bileşenleri: (1) Bal peteği çekirdekli sandviç kompozit panel, (2) rijitliği artırmak ve yük aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan rib (kaburga), (3) titreşim ve aeroelastik kararsızlıkları azaltmak için kullanılan antiflatler ağırlığı ve (4) rotor palinin ana taşıyıcı elemanı olan spar	22
Şekil 13. Boeing 737 uçağının aileron kısmında bulunan alüminyum bal peteği sandviç kompozit	23
Şekil 14. Boeing 737 uçağının elevatör kısmı	23
Şekil 15. Uygulanan gerilme ile çevrim sayısı arasındaki Wöhler Eğrisi	27
Şekil 16. ISO 6892 standardına göre çekme deneyi numune boyutları.....	38
Şekil 17. ISO 6892 standardına göre hazırlanan örnek çekme numunesi	38
Şekil 18. Testler için kullanılan İnstron test cihazı	39
Şekil 19. ASTM D638 standardına göre çekme deneyi numune boyutları	40
Şekil 20. AA 5754 H-22 için gerçek gerilme-gerinim grafiği.....	41
Şekil 21.1210A83AB ve Pur Plus 4/1 yapıştırıcılar için gerçek gerilim-gerinim grafiği	42
Şekil 22. 80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış plakanın AFM yüzey karakterizasyonu: Tarama parametreleriyle topografik görüntü.....	46
Şekil 23. 80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış plakanın AFM yüzey karakterizasyonu: Yükseklik dağılım histogramı ve buna karşılık gelen yüzey pürüzlülüğü istatistikleri	46
Şekil 24. Zımparalanmamış yüzeyin SEM görüntüsü	47
Şekil 25.80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış yüzeyin SEM görüntüsü	48

Şekil 26. 80’lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış yüzeyin SEM görüntüsü; test sonrasında kalan yapıştırıcı kalıntısı.....	48
Şekil 27. Üç nokta eğme deneyi için üretilmiş sandviç kompozit panel.....	49
Şekil 28. Deney düzeneği	50
Şekil 29. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin tipik kuvvet–deformasyon davranışı.....	54
Şekil 30. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin deformasyon davranışı	54
Şekil 31. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin tipik kuvvet–deformasyon davranışı.....	56
Şekil 32. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin deformasyon davranışı.....	57
Şekil 33. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelere ait maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 34. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelere ait yük–deformasyon eğrileri.....	61
Şekil 35. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelere ait maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 36. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelere ait yük–deformasyon eğrileri	64
Şekil 37. Bireysel değişkenlere ait faktöriyel grafikleri	66
Şekil 38. Ortalama maksimum yük için yapıştırıcı türü ve çekirdek kalınlığı etkileşim grafiği.	69
Şekil 39. Ortalama maksimum yük için çekirdek kalınlığı ve üst yüzey levhası kalınlığı etkileşim grafiği.....	71
Şekil 40. Ortalama maksimum yük için üst yüzey levhası kalınlığı ve alt yüzey levhası kalınlığı etkileşim grafiği	73
Şekil 41. DeneySEL sonuçlar, her bir konfigürasyon için ortalama maksimum kuvvet, ağırlık ve maliyet değerlerini içerecek şekilde sunulmuştur; (a) epoksi kullanılan numuneler, (b) poliüretan kullanılan numuneler.....	78
Şekil 42. Sandviç yapı modelinin sonlu elemanlar ağı (mesh) görünümü	79
Şekil 43. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_x normal gerilme dağılımı	82
Şekil 44. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_x normal gerilme dağılımı	82
Şekil 45. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı	83
Şekil 46. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı	83
Şekil 47. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı	84

Şekil 48. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı	84
Şekil 49. Üst plakanın τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı	85
Şekil 50. Üst plakanın τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı	85
Şekil 51. Üst plakanın τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı.....	86
Şekil 52. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	87
Şekil 53. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	87
Şekil 54. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait σ_x normal gerilme dağılımı.....	88
Şekil 55. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine σ_x normal gerilme dağılımı.....	88
Şekil 56. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı.....	88
Şekil 57. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı.....	89
Şekil 58. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı.....	89
Şekil 59. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı	90
Şekil 60. Alt plakanın τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı	90
Şekil 61. Alt plakanın τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı	91
Şekil 62. Alt plakanın τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı	91
Şekil 63. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı	92
Şekil 64. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait eşdeğer (von-Misses) gerilme dağılımı.....	92
Şekil 65. Bal peteği çekirdeğin σ_x normal gerilmesi	93
Şekil 66. Bal peteği çekirdeğin σ_y yönünde oluşan normal gerilmesi.....	93
Şekil 67. Bal peteği çekirdeğin σ_z normal gerilmesi	94
Şekil 68. Bal peteği çekirdeğin τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı	94
Şekil 69. Bal peteği çekirdeğin τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı	95
Şekil 70. Bal peteği çekirdeğin τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı.....	95
Şekil 71. Bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımının ön yüzey görünümü	96
Şekil 72. Bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı arka yüzey görünümü	97
Şekil 73. Üst plaka–çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı	98
Şekil 74. Alt plaka–çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı.....	99
Şekil 75. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	100

Şekil 76. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı	100
Şekil 77. Üst plaka 2 mm, alt plaka 1 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	101
Şekil 78. Üst plaka 2 mm, alt plaka 1 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı	101
Şekil 79. Üst ve alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı	102
Şekil 80. Üst ve alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı.....	102
Şekil 81. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 20 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	103
Şekil 82. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 20 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı	103
Şekil 83. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 30 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı.....	104
Şekil 84. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 30 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı	104
Şekil 85. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki Z eksen doğrultusundaki yönlü deformasyonu	110
Şekil 86. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki X eksen doğrultusundaki yönlü deformasyonu	111
Şekil 87. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki Y eksen doğrultusundaki yönlü deformasyonu	111
Şekil 88. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler için yorulma grafikleri	115

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\delta_{eğilme}$	Eğilmeden Kaynaklanan Çökme
δ_{kayma}	Kesmeden Kaynaklanan Çökme
P	Uygulanan Yük
L	Mesnetler Arası Açıklığı
E	Elastisite Modülünü
I	Kesitin Atalet Momentin
A_c	Çekirdek Kesit Alanı
G_c	Çekirdek Malzemenin Kayma Modülünü
t	Hücre Duvarı Kalınlığı
l	Hücre Kenar Uzunluğu
τ_c	Kayma Gerilmesi
V	Kesme Kuvveti
b	Genişlik
h_c	Çekirdek Kalınlığı
θ	Hücre Açısı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kuruluşu
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
R	Maksimum Yükün, minimum Yüke Oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
Kg	Kilogram
Ra	Yüzey Pürüzlülüğü
mm	Milimetre
N	Newton
σ	Normal Gerilme
\$	Dolar
m ²	Metrekare
F	Uygulanan Yorulma Yükü
$\bar{N}$:	Ortalama çevrim sayısı
n :	Numune Sayısı

1. GİRİŞ

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı; alt ve üst yüzey plakaları 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm kalınlıktaki alüminyum levhalardan, çekirdeği ise 10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlığındaki alüminyum bal peteği (honeycomb) yapıdan oluşan metal esaslı sandviç yapıların incelenmesidir. Bu yapılar, iki farklı yapıştırıcı türü (epoksi ve poliüretan) kullanılarak üretilmiştir. Çalışma kapsamında, söz konusu yapıştırıcılar 7,5 g, 15 g ve 22,5 g olmak üzere üç farklı miktarda uygulanmış ve elde edilen numuneler üzerinde üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, yapıların maksimum yük taşıma kapasiteleri değerlendirilerek en uygun konfigürasyon belirlenmiştir. Belirlenen en iyi konfigürasyon için ise her iki yapıştırıcı türü ayrı ayrı ele alınmış ve üç nokta eğme koşulları altındaki yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın temel hedeflerinden biri, yüzey plaka kalınlığının sandviç yapıların üç nokta eğme altındaki eğilme rijitliği ve yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Eğilme yüklemesi altında sandviç yapıların yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde yüzey plakalarının taşıdığı normal gerilmeler tarafından belirlendiğinden, küçük kalınlık değişimlerinin bile yapısal rijitliği ve maksimum yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Bitzer, 1997; Zhou & Mayer, 2005) Bu nedenle yüzey kalınlığı–yük taşıma kapasitesi ilişkisi deneysel olarak yüksek hassasiyetle incelenmiştir.

Çalışmanın bir diğer temel hedefi, bal peteği çekirdek kalınlığının (10, 20 ve 30 mm) sandviç yapıların eğilme yükleri altındaki mekanik davranışı ve özellikle eğilme mukavemeti üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Çekirdek yüksekliği, sandviç yapının efektif atalet momentini doğrudan artırmakta olup, bu durum yapı rijitliğinin ve taşıma kapasitesinin önemli ölçüde yükselmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle çekirdek kalınlığı, sandviç kompozitlerin eğilme performansı üzerinde belirleyici bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır (Gibson & Ashby, 1997; Evans vd., 2001). Artan çekirdek yüksekliği ile birlikte üst ve alt yüzey levhaları arasındaki mesafe büyümekte, bu da eğilme sırasında oluşan normal gerilmelerin daha etkin bir şekilde taşınmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, çekirdek kalınlığındaki artışın maksimum eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın özgün hedeflerinden biri, iki farklı yapıştırıcı türü ile üç farklı yapıştırıcı miktarının (7,5 g – 15 g – 22,5 g) alüminyum–alüminyum ara yüzeyinde oluşan maksimum taşıma kapasitesi ve bağ dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Yapıştırıcı miktarı, bağ tabakası kalınlığını doğrudan etkileyerek yük aktarım kapasitesini ve ara yüzeyin taşıyabildiği maksimum kuvvet seviyesini belirleyici hale getirmektedir (Da Silva vd., 2011; Petrie, 2011). Bu nedenle çalışmada, en yüksek yük taşıma kapasitesi sağlayan optimum yapıştırıcı tür ve miktarının belirlenmesi temel hedeflerden biri olarak ele alınmaktadır.

Çalışmanın temel bilimsel hipotezi, yüzey levhası kalınlıkları, çekirdek kalınlığı, yapıştırıcı türü ve yapıştırıcı miktarında meydana gelen değişimlerin sandviç yapıların eğilme mukavemeti ve hasar davranışı üzerinde anlamlı etkiler oluşturacağıdır. Bu kapsamda; çekirdek kalınlığının artırılmasının eğilme mukavemetini artıracığı, üst ve alt yüzey levhaları arasındaki kalınlık farkından kaynaklanan yüzey levhası asimetrisinin yapısal performansı değiştireceği, farklı yapıştırıcı türlerinin yük aktarım mekanizmasını etkileyerek farklı dayanım seviyeleri oluşturacağı ve yapıştırıcı miktarındaki artışın yüzey levhası–çekirdek ara yüzey bağlantısını güçlendirerek maksimum taşıma kapasitesini artıracığı hipotezleri test edilmiştir. Ayrıca, bu parametrelerin etkileşimlerinin sandviç yapıların mekanik davranışında tekil etkilerinden farklı sonuçlar oluşturabileceği varsayımı da değerlendirilmiştir.

Son olarak üç nokta eğme yorulma deneyleri ile sandviç yapıların uzun dönem servis davranışına yönelik güvenilir mühendislik verilerinin üretilmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Araştırmanın Önemi

Sandviç yapılar, yüksek özgül eğilme rijitliği ve yüksek özgül dayanım (σ/m) kabiliyetleri nedeniyle havacılık ve uzay yapıları, otomotiv taşıyıcı sistemleri, raylı sistem araçları, denizcilik yapıları ve savunma sanayi uygulamalarında temel yapısal elemanlar arasında yer almaktadır (Allen, 1969; Zenkert, 1997). Bu yapıların en önemli avantajı, aynı ağırlıktaki monolitik malzemelere kıyasla çok daha yüksek eğilme mukavemeti sunmalarıdır.

Metal esaslı sandviç yapılar, özellikle kompozit esaslı sandviç yapıların sınırlı kaldığı; yüksek sıcaklık, darbe, aşınma, yangın ve elektromanyetik girişim gibi olumsuz çevresel koşullar altında üstün performans göstermeleri nedeniyle kritik uygulamalarda tercih edilmektedir

(Davis, 1993). Bu noktada alüminyum yüzey plakaları ve alüminyum bal peteği çekirdekten oluşan sandviç yapılar; hafiflik, korozyon direnci, imalat kolaylığı ve geri dönüştürülebilirlik özelliklerinin tamamını bir arada sunması açısından stratejik bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır.

Üç nokta eğme deneyleri, sandviç yapıların yüzey plaka çekme/kopma hasarı, çekirdek kesme göçmesi, ara yüzey delaminasyonu ve lokal burkulma gibi temel hasar mekanizmalarını aynı anda değerlendirebilen en etkin mekanik test yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Gibson & Ashby, 1997; Abrate, 1997; Hou vd., 2008). Buna ek olarak üç nokta eğme yorulma deneyleri, sandviç yapıların servis şartlarını temsil eden tekrarlı yükler altındaki rijitlik bozunumu ve hasar birikim süreçlerinin ortaya konulması açısından büyük önem taşımaktadır (Schütz, 2007).

Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu; sabit plaka kalınlığı, tek çekirdek yüksekliği ve tek yapıştırıcı miktarı ile sınırlıdır. Ancak gerçek mühendislik uygulamalarında sandviç yapı performansı; plaka kalınlığı, çekirdek kalınlığı, yapıştırıcı türü ve yapıştırıcı miktarının birlikte etkileşimi sonucunda şekillenmektedir. Özellikle yapıştırıcı miktarının, yorulma ömrü üzerindeki etkisini sistematik biçimde ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır (Da Silva vd., 2011; Petrie, 2011).

Bu çalışmanın önemi; plaka kalınlığı, çekirdek kalınlığı, yapıştırıcı türü ve yapıştırıcı miktarı olmak üzere dört temel parametrenin aynı deneysel düzen içerisinde eş zamanlı ve sistematik biçimde incelenmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, metal esaslı sandviç yapıların mekanik tasarımına doğrudan katkı sağlayabilecek kapsamlı ve bütüncül bir veri seti elde edilmesi hedeflenmektedir.

1.3. Varsayımlar

Bu çalışmada gerçekleştirilen üç nokta eğme ve üç nokta eğme yorulma deneylerinin yorumlanmasında aşağıdaki temel varsayımlar esas alınmıştır. Öncelikle alt ve üst yüzey plakalarını oluşturan alüminyum levhalar ile alüminyum bal peteği çekirdeğin makro ölçekte homojen, izotropik ve doğrusal elastik davranış sergilediği varsayılmıştır. Kullanılan iki farklı yapıştırıcının ve üç farklı yapıştırıcı miktarının, yüzeyler arasında sürekli, boşluksuz ve uniform kalınlığa sahip bir bağ tabakası oluşturduğu kabul edilmiştir. Yapıştırma işlemi sırasında

oluşabilecek mikroskobik boşluklar, hava ve yerel aderans zayıflıklarının makro mekanik davranış üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayılmıştır.

Deneylerin tamamının oda sıcaklığında ($\approx 23^{\circ}\text{C}$) ve sabit bağıl nem koşullarında gerçekleştirildiği; sıcaklık, nem ve zaman bağımlı çevresel etkilerin mekanik davranış üzerinde anlamlı bir değişime neden olmadığı öngörülmüştür. Üç nokta eğme ve yorulma yüklemelerinin, atalet ve hız etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılmıştır. Deney sisteminde kullanılan mesnetler, yük uygulama burunları ve ölçüm sistemlerinin tam rijit ve ideal hizalanmış olduğu, sistemden kaynaklanan ek deformasyonların ölçümlere yansımadağı kabul edilmiştir. Ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının doğru olduğu ve ölçüm belirsizliklerinin istatistiksel olarak ihmal edilebilir seviyede olduğu varsayılmıştır.

1.4. Sınırlılıklar

Bu çalışmanın kapsamı, deney düzeneği kapasitesi ve seçilen parametre aralıkları doğrultusunda belirli sınırlılıklar içermektedir. Öncelikle, araştırma yalnızca alt ve üst plakaları alüminyum, çekirdeği alüminyum bal peteği olan metal esaslı sandviç yapılarla sınırlandırılmıştır. Kompozit esaslı yüzey plakalarına sahip sandviç yapılar, hibrit çekirdekli yapılar ve polimer esaslı sandviç sistemleri, farklı mekanik davranış sergileme potansiyelleri taşıdıkları için bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Böylece deneysel ve sayısal analizlerin odak noktası, metal esaslı sandviç yapılarla sınırlı kalmıştır.

Yüzey plaka kalınlıkları yalnızca 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm, çekirdek kalınlıkları ise yalnızca 10 mm, 20 mm ve 30 mm ile sınırlandırılmıştır. Bu sınırlamalar, numune temin imkanları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Çalışmada yalnızca iki farklı yapıştırıcı türü ve üç farklı yapıştırıcı miktarı (7,5 g – 15 g – 22,5 g) kullanılmıştır. Bu bağlamda elde edilen bulgular, farklı kimyasal yapıya sahip diğer yapıştırıcılar veya farklı bağ kalınlıkları için doğrudan genellenemez; dolayısıyla sonuçların geçerliliği seçilen parametre aralıkları ile sınırlıdır.

Deneysel çalışmalar yalnızca üç nokta eğme ve üç nokta eğme yorulma testleri ile sınırlandırılmıştır. Darbe, yüksek hızlı deformasyon, patlama yükleri ve çok eksenli yükleme koşulları bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Ayrıca yorulma deneyleri sınırlı sayıda

numune ile gerçekleştirilmiş olup, çok yüksek çevrim sayılarını temsil eden yorulma davranışı ayrıntılı olarak modellenememektedir. Bununla birlikte, elde edilen deneysel sonuçların sayısal olarak desteklenmesi ve maksimum yük taşıma kapasitesi açısından en başarılı performansı gösteren numunelerin mekanik davranışlarının daha ayrıntılı incelenmesi amacıyla, deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen en iyi iki numune konfigürasyonu için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller kullanılarak yükleme altındaki gerilme dağılımları ve kritik bölgelerde oluşan gerilme yoğunlaşmaları analiz edilmiştir. Sonlu eleman analizleri, maksimum yük taşıma kapasitesi açısından optimum performans gösteren konfigürasyonların yapısal davranışlarının daha kapsamlı değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sayısal çalışmalar yalnızca en yüksek maksimum yük değerlerine sahip iki numune ile sınırlandırılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Sandviç Yapıların Tanımı ve Özellikleri

Sandviç yapılar, temel olarak yüksek rijitliğe ve mukavemete sahip iki dış yüzey tabakası arasına düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin yerleştirilmesi ve bu çekirdeğin yüzey tabakalarına uygun bir yapıştırıcı aracılığıyla sürekli, homojen ve yüksek mukavemetli bir şekilde bağlanmasıyla oluşturulan çok katmanlı mühendislik yapılarıdır. Bu yapı sisteminde yüzey levhaları, çekirdek tarafından birbirinden ayrılmakta ve yapıştırıcı yardımıyla çekirdeğe bağlanarak bütüncül bir yapı davranışı sergilemektedir. Çekirdek tabaka, yüzey levhalarına bağlanarak yükün bir yüzeyden diğerine etkin bir biçimde aktarılmasını sağlamakta ve böylece sandviç yapının birlikte çalışmasını mümkün kılmaktadır. Yüzey levhaları esas olarak düzlem içi normal gerilmeleri (çekme ve basma) taşıırken, çekirdek tabaka ise yüzey levhaları arasındaki mesafeyi koruyarak yapının ikinci alan momentini artırmakta ve enine kayma gerilmelerini karşılamaktadır. (Alsubari vd., 2021).

Bu yönüyle sandviç yapılar, ana eğilme ve düzlem içi yüklerin büyük kısmının yüzey levhaları tarafından taşındığı, çekirdeğin ise enine kayma gerilmelerini üstlenerek yüzeye dik yöndeki yoğunlaşmış kuvvetleri daha geniş bir alana yaydığı ve yapının genel bütünlüğünü koruduğu bir I-kirişi sistemine benzetilmektedir. Bu benzetme, sandviç yapıların mekanik çalışma prensibini açıklamada yaygın olarak kullanılmakta olup, yüzey levhalarının flanş, çekirdeğin ise gövde (dikme) görevini üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bu yapı tipi, düşük ağırlığa rağmen yüksek mekanik dayanım ve rijitlik sağlaması, ayrıca yüksek özgül rijitlik (rijitlik/ağırlık oranı) değerlerine ulaşabilmesi sayesinde günümüzde havacılık, uzay, savunma sanayi, otomotiv, denizcilik ve inşaat mühendisliği gibi birçok ileri mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanında sandviç yapılar, ısı yalıtım, akustik sönümleme ve darbe enerjisi yutma gibi çok fonksiyonlu özellikler de sunabilmektedir.

Sandviç yapıların yüzey levhaları, çekirdeğe kıyasla oldukça ince olup genellikle birkaç milimetre kalınlığındadır; buna karşın çekirdek tabaka daha kalın bir yapıya sahiptir ve kullanım alanına bağlı olarak çekirdek kalınlığı 50 mm'nin üzerine çıkabilmektedir. Yüzey levhaları rijit, yüksek elastik modüllü ve yüksek mukavemetli özellikleriyle karakterize edilirken, çekirdek tabakanın ise sandviç yapının genel mekanik performansını artırabilmesi için hafif, kalın ve yeterli kayma rijitliğine sahip olması gerekmektedir. Bu sayede yüzey

levhaları arasındaki mesafe artırılarak yapının eğilme rijitliği önemli ölçüde yükseltilmekte, ancak toplam ağırlıkta görece düşük bir artış meydana gelmektedir. Çekirdeğin hafif olması, sandviç yapının özgül dayanımını artırırken, kalın olması ise burkulma direncini ve global stabiliteyi olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca çekirdek malzemenin hücresel yapısı sayesinde lokal yüklerin yayılması kolaylaşmakta ve yüzey levhalarında oluşabilecek lokal hasarların yayılımı sınırlandırılabilir. (Birman & Kardomateas, 2018).

Sandviç yapılarda yüzey levhası ile çekirdek arasındaki ara yüzey, yapının en zayıf bölgesi olarak kabul edilmektedir. Bunun temel nedeni, bu bölgede hem farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin bir araya gelmesi hem de yük aktarımının tamamen yapıştırıcı tabakası üzerinden gerçekleşmesidir. Bu ara yüzde, üst ve alt yüzey levhalarını iç çekirdeğe bağlamak amacıyla genellikle epoksi, poliüretan veya akrilik esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Ara yüzey mukavemetini artırmak için sandviç yapılarda iyi bir yapışma performansının sağlanması son derece kritik olup, yüzey hazırlığı, yapıştırıcı türü, yapıştırıcı miktarı ve kürlenme koşulları gibi parametreler doğrudan bağ mukavemetini etkilemektedir.

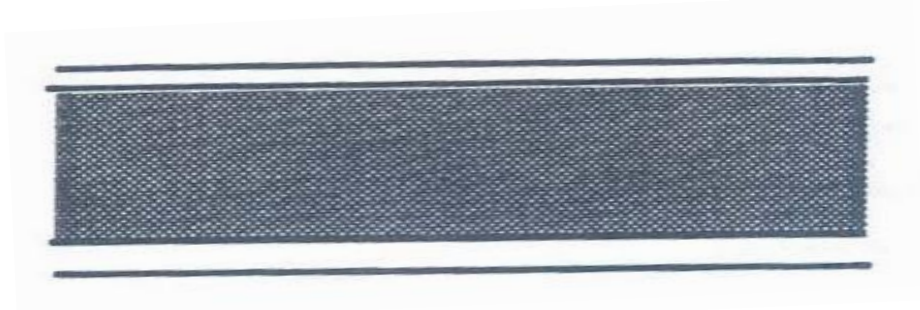
Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı çoğu uygulamada ihmal edilecek düzeydedir; çünkü bu kalınlık, yüzey levhaları veya çekirdek kalınlığına kıyasla oldukça küçüktür. Ancak her ne kadar geometrik olarak küçük olsa da, yapıştırıcı tabakası sandviç yapının kuvvet aktarım kapasitesi, hasar başlangıcı ve delaminasyon davranışı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Ara yüzde oluşabilecek zayıf yapışma, sandviç yapının ani ve gevrek bir şekilde göçmesine neden olabilmekte ve taşıma kapasitesini ciddi oranda düşürebilmektedir. Bu nedenle literatürde ara yüzey davranışı, sandviç yapıların en kritik tasarım unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir (Njiguna, 2016).

2.2. Sandviç Yapıların Sınıflandırılması

2.2.1 Köpük çekirdekli sandviç yapılar

Köpük çekirdekli sandviç paneller, hafif yapı malzemeleri arasında önemli bir yere sahip olup birçok mühendislik alanında yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, köpük çekirdeğin nispeten düşük basma dayanımına sahip olması, bu tür yapıların taşıyıcı sistemlerde kullanımını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Düşük yoğunluklu köpük çekirdek içeren kompozit sandviç yapılar çoğunlukla çekirdek bölgesinde meydana gelen çökme ve ezilme hasarları

nedeniyle işlevini kaybeder (Brocca vd., 2001). Buna ek olarak, köpük çekirdeğin ortamdan nem emmesi ve bu nemi bünyesinde tutması, sandviç yapının mekanik performansında azalmaya yol açarken aynı zamanda yapının toplam ağırlığının artmasına da sebep olmaktadır (Manalo vd., 2013).



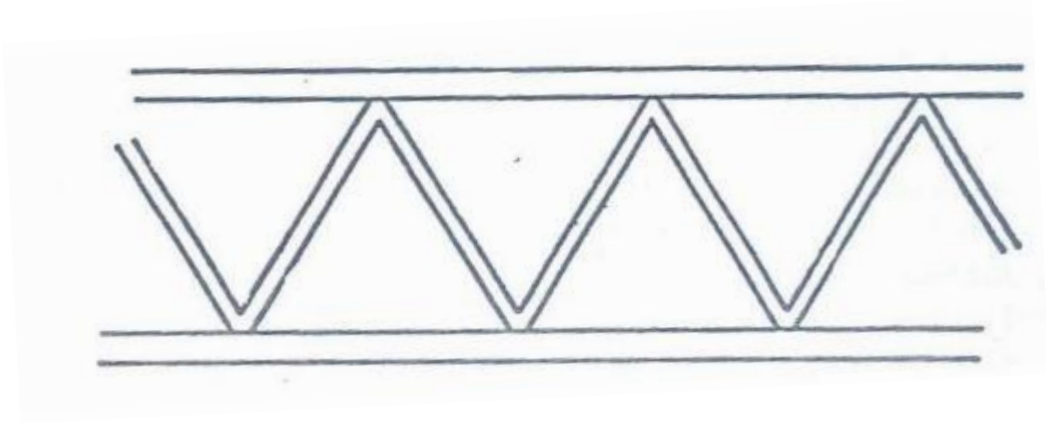
Şekil 1.Köpük çekirdekli sandviç yapı (Vinson, 1999)

2.2.2. Kafes çekirdekli sandviç yapılar

Kafes çekirdekli sandviç yapılar, hafiflik ile yüksek mekanik performansın eş zamanlı olarak sağlanmasının hedeflendiği modern mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanan gelişmiş çok katmanlı yapısal sistemlerdir. Bu yapılar genellikle iki ince fakat yüksek mukavemetli yüzey levhası arasında yer alan üç boyutlu kafes geometrisine sahip bir çekirdek yapıdan oluşmaktadır. Geleneksel köpük veya bal peteği çekirdekli sandviç yapılardan farklı olarak, kafes çekirdekler açık hücreli mimarileri sayesinde yük aktarım mekanizmasını yalnızca basma veya kesme dayanımı ile sınırlamamakta; eğilme, burkulma ve enerji dağılımı gibi çoklu mekanik davranışların etkin şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır (Zenkert, 1997; Gibson & Ashby, 1999).

Kafes çekirdek geometrilerinin en önemli avantajlarından biri, birim hücre (unit cell) topolojisinin tasarım aşamasında kontrol edilebilmesidir. Çubuk tabanlı (strut-based), yüzey tabanlı (TPMS) veya hibrit kafes konfigürasyonları sayesinde yoğunluk dağılımı, elastik modül, enerji absorpsiyon kapasitesi ve titreşim sönümleme özellikleri uygulamaya özgü olarak optimize edilebilmektedir. Özellikle eklemeli imalat (Additive Manufacturing – AM) teknolojilerindeki gelişmeler, geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi mümkün olmayan karmaşık kafes geometrilerinin yüksek hassasiyetle üretilmesini mümkün hale getirmiştir (Maskery vd., 2018; Gibson vd., 2021).

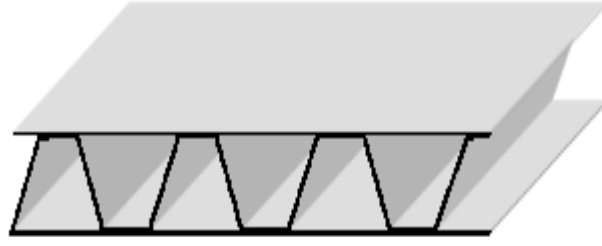
Kafes çekirdekli sandviç yapılar havacılık, otomotiv, savunma sanayi ve biyomedikal mühendislik gibi alanlarda yaygın olarak araştırılmaktadır. Bu yapıların yüksek özgül rijitlik ve mukavemet değerleri sunması, darbe ve çarpma yükleri altında üstün enerji absorpsiyon performansı göstermesi ve aynı zamanda ağırlık azaltımına katkı sağlaması önemli avantajlar arasında yer almaktadır. Ayrıca açık hücreli mimari, termal yönetim ve akışkan geçişine izin vererek çok fonksiyonlu kullanım imkânı sunmaktadır (Evans vd., 2001; Deshpande vd., 2001).



Şekil 2. Kafes çekirdekli sandviç yapı (Vinson, 1999)

2.2.3. Oluk çekirdekli sandviç yapılar

Oluklu çekirdekli bir sandviç yapı, iki ince yüzey levhası arasına konumlandırılmış dalgalı geometrili bir çekirdek levhadan meydana gelmektedir. Bu yapı tipinin en belirgin avantajı, düşük ağırlık ile yüksek rijitlik sağlayabilmesidir. Oluklu çekirdek, yüzey levhaları arasında belirli bir mesafe oluşturarak onları birbirinden ayırmakta ve düzlem dışı deformasyonlara karşı direnç göstererek yapısal kararlılığı artırmaktadır. Aynı zamanda kesme yüklerinin etkin biçimde taşınmasına katkı sağlayarak tüm sistemin tek parça kalın bir plaka gibi davranmasına imkân tanımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı yüksek sertlik-ağırlık oranı sunan oluklu çekirdekli sandviç paneller; havacılık ve uzay mühendisliği başta olmak üzere, sivil yapı uygulamaları ve ağırlık azaltımının kritik olduğu birçok mühendislik alanında yaygın şekilde tercih edilmektedir.



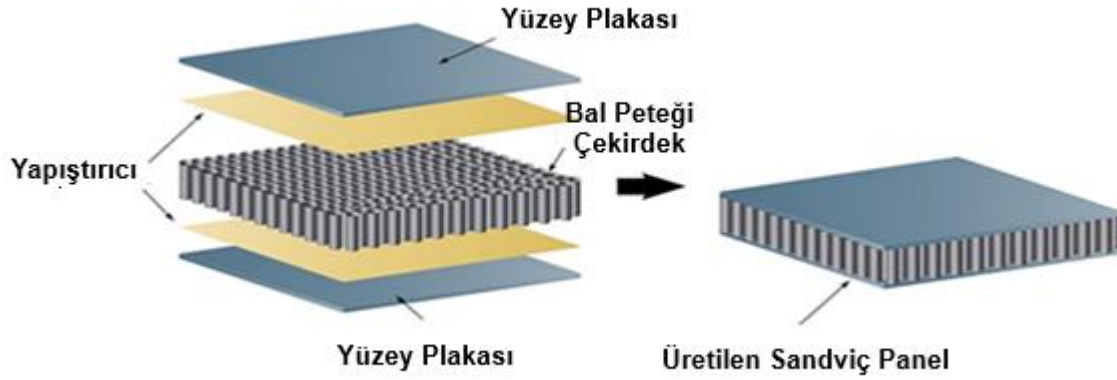
Şekil 3. Oluk çekirdekli sandviç yapı (Petras, 1999)

2.2.4. Bal peteği çekirdekli sandviç yapılar

Doğadaki arıların altıgen petek yapısının üstün verimliliğinden esinlenilerek mühendislik alanına uyarlanan bal peteği sandviç kompozit yapılar, altıgen formdaki hücresel birimlerin düzenli ve periyodik bir şekilde tekrarlanmasıyla karakterize edilen, kendine has bir hücresel malzeme sınıfını temsil etmektedir. Bu tür ileri kompozit malzemelerin tasarım ve üretim süreçleri, nihai olarak kullanılacağı operasyonel şartlar ve çevresel koşullar titizlikle göz önünde bulundurularak belirlenir. Tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken temel faktörler ve kısıtlamalar arasında, malzemenin uzun süre mukavemetini etkileyen korozyon direnci, zamanla sürekli yük altında meydana gelen kalıcı deformasyon potansiyeli olan sürünme davranışı, yapısal bütünlüğünü koruma yeteneğini tanımlayan rijitlik (sertlik), taşıma kapasitesini belirleyen mukavemet (dayanım), tekrarlı yükler altındaki ömrünü belirleyen yorulma performansı, özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında hayati önem taşıyan düşük yoğunluk (hafiflik) ve elbette üretim ile uygulama maliyetleri gibi çeşitli parametreler kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle ağırlığın minimize edilmesinin birincil hedef olduğu uygulamalarda, yalnızca ince ve tek katmanlı malzemelerin kullanılması, üzerlerine etki eden yoğunlaşmış yükler (konsantre yükler) sebebiyle erken ve ani burkulma (yerel stabilite kaybı) arızalarına yol açma riskini taşır. Bu kritik yapısal senaryolarda hem yüksek özgül mukavemet hem de üstün hafiflik avantajlarını bir arada sunan bal peteği sandviç kompozitler uygun bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmektedir (Rupani vd., 2017; Bitzer, 1997). Genel olarak bu yapısal kompozit malzeme, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özelliklerinin eş zamanlı olarak istendiği zorlu uygulamalarda başarıyla kullanılan bir yapısal çözümdür (Wang, 2020).

Bu yüksek performanslı yapısal kompozitler, uygulanacak ilk gerilme ve basma yüklerini etkin bir şekilde karşılamak üzere tasarlanmış, alt ve üst kısımlarında bulunan, nispeten ince, ancak

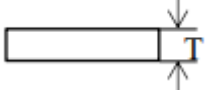
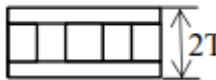
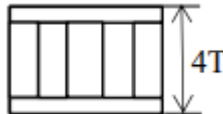
oldukça sert ve yüksek mukavemetli iki dış tabakadan (yüzey plakaları); bu dış tabakalara kıyasla çok daha kalın bir kesite sahip olan, ancak yoğunluğu önemli ölçüde düşük olan çekirdek (core) yapıdan ve tüm bu bileşenleri yapısal olarak birbirine bağlayan yapışkan (adhesive) ara tabakadan oluşmaktadır (Rupani vd., 2017).



Şekil 4. Bal peteği çekirdekli sandviç yapı (Kumar vd., 2020)

Tablo 1’de sunulan deneysel veya teorik veriler, bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin tasarım aşamasında kalınlık faktörünün ne denli belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Çekirdek kalınlığının artırılması yoluyla toplam panel yüksekliğinin artırılması süreci; malzemenin birim hacimdeki ağırlık yoğunluğunu radikal bir şekilde değiştirmeksizin, dış yüzey levhaları arasındaki mesafeyi açarak eğilme yükleri altında oluşacak gerilmeleri minimize eder. Böylece, minimum ağırlık artışı ile maksimum eğilme mukavemeti elde edilmesi prensibi, bu yapısal modifikasyonla optimize edilmiş olur (Bitzer, 1997).

Tablo 1. Bal peteği sandviç yapılarda kalınlık ve performans ilişkisi (Bitzer, 1997)

			
Rijitlik	1	7	37
Şekil Değişimi	1	0.14	0.27
Eğilme mukavemeti	1	3	7
Ağırlık	0.910	0.978	0.994

2.3. Yüzey Tabakaları

Sandviç yapılarda yüzey levhaları, yapının mekanik performansını belirleyen en kritik bileşenlerden biridir. Bu levhaların başlıca görevi, yapıya gerekli olan eğilme rijitliğini ve düzlem içi kayma dayanımını kazandırmakla birlikte, dış yükler altında oluşan eksenel kuvvetleri, eğilme momentlerini ve düzlem içi kesme yüklerini güvenli bir şekilde taşımaktır. Yüklerin büyük bir bölümü yüzey levhaları tarafından karşılandığından, bu tabakaların mekanik özellikleri sandviç panelin genel mukavemet ve rijitliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Marshall, 1982).

Yüzey levhası malzemesi seçimi, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu amaçla metalik malzemelerden kompozit esaslı malzemelere kadar geniş bir malzeme yelpazesi kullanılmaktadır. Alüminyum ve çelik gibi metaller yüksek mukavemet ve dayanıklılık sunarken, karbon/epoksi, cam elyaf/epoksi ve aramid/epoksi gibi lif takviyeli kompozitler düşük ağırlık ve yüksek özgül dayanım avantajları sağlamaktadır. Ayrıca, belirli uygulamalarda kontrplak gibi ahşap esaslı malzemeler de yüzey levhası olarak tercih edilebilmektedir.

Sandviç panellerin tasarımında, genellikle çekirdek yapının her iki yüzeyinde aynı tür malzemelerin kullanılması tercih edilir. Bu yaklaşım, yapının simetrik davranmasını sağlayarak eğilme ve burulma altında daha dengeli bir mekanik tepki elde edilmesine olanak tanır. Bununla birlikte, bazı özel mühendislik uygulamalarında farklı özelliklere sahip yüzey levhalarının birlikte kullanılması gerekebilir. Böyle durumlarda, yüzey levhalarının ısıl genleşme katsayıları arasındaki farklar dikkatle değerlendirilmelidir. Aksi takdirde, sıcaklık değişimleri nedeniyle levhalar arasında gerilme farklılıkları oluşabilir ve bu durum panelde şekil bozulmalarına, kalıcı deformasyonlara veya bağ ara yüzeyinde hasara yol açabilir. Bu nedenle, farklı malzemelerin birlikte kullanıldığı sandviç yapılarda tasarım aşamasında termal uyumluluk büyük önem taşımaktadır (Niu, 1998).

2.3.1. Kompozit yüzey tabakaları

Tasarım sürecinde sağlanan esneklik, üreticiler açısından önemli bir mühendislik avantajı oluşturmaktadır. Bu esneklik sayesinde, yapının maruz kaldığı gerilmelerin düşük seviyelerde olduğu bölgelerde gereksiz malzeme kullanımından kaçınılabilmekte, böylece hem malzeme israfı önlenmekte hem de yapının toplam kütlesi önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Özellikle

hafiflik gereksiniminin kritik olduğu uygulamalarda, bu durum performans ve verimlilik açısından büyük bir kazanım sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, kompozit malzemeler; korozyon, kimyasal etkileşimler, sıcaklık değışimleri ve çevresel etkilere karşı gösterdikleri yüksek direnç nedeniyle geleneksel malzemelere kıyasla tercih edilmektedir. Ayrıca bu malzemelerin üretimi, çoğu durumda karmaşık ve yüksek maliyetli üretim ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaksızın gerçekleştirilebilmekte ve bu durum farklı ölçeklerdeki üreticiler için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Kompozitlerin bir diğerk dikkat çekici özelliğı ise, karmaşık ve özgün geometrilerin kolaylıkla elde edilebilmesine olanak tanımasıdır. Bu özellik, tasarım özgürlüğünü artırmakta ve özel uygulamalara yönelik çözümlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla, kompozit malzeme kullanımından beklenen hedeflerin tasarım aşamasında net bir biçimde ortaya konulması, buna uygun matris sistemi ve takviye elemanlarının bilinçli bir şekilde seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kompozit yapılarda kullanılan lifler, yapıya etki eden dış yüklerin büyük bölümünü taşıyan birincil yük taşıyıcı elemanlar olarak görev yapmaktadır. Lifler, kompozit malzemeye yalnızca yüksek mukavemet kazandırmakla kalmayıp, aynı zamanda rijitlik ve ısı mukavemet gibi kritik mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Buna karşılık, matris malzemesi kompozit yapı içerisinde tamamlayıcı ve hayati bir rol üstlenmektedir. Matris, lifleri bir arada tutarak yapısal bütünlüğü sağlamakta, uygulanan yüklerin liflere homojen ve etkin bir şekilde aktarılmasına aracılık etmekte ve takviye elemanlarını dış etkilere karşı korumaktadır. Özellikle kimyasal saldırılar, mekanik darbeler, rutubet ve diğerk çevresel koşullar matris tarafından sönümlenmekte, böylece kompozit yapının uzun süreli performansı ve dayanıklılığı güvence altına alınmaktadır. Bu nedenlerle, lif ve matris malzemelerinin birbiriyle uyumu, kompozit yapıların tasarımında ve performansında belirleyici unsur olarak öne çıkmaktadır (Niu, 1998).

2.3.2. Alüminyum yüzey tabakaları

Alüminyum ve alüminyum esaslı alaşımlar, sahip oldukları yüksek mukavemet/ağırlık oranı sayesinde hafiflik ve mukavemet gereksinimlerinin bir arada bulunduğu mühendislik uygulamalarında önemli bir malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemeler yüksek termal ve elektriksel iletkenlik özellikleri, iyi düzeyde basma ve kesme dayanımı ve servis koşullarında gösterdikleri güvenilir mekanik performans nedeniyle birçok endüstriyel alanda yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum alaşımlarının bir diğerk önemli avantajı ise, korozyona karşı doğal dirençleri ve yüksek sıcaklıklarda yapısal

bütünlüklerini koruyabilme yetenekleridir. Bu özellikler, alüminyum alaşımlarını çelik gibi geleneksel yapısal malzemelere kıyasla daha uzun ömürlü ve bakım gereksinimi daha düşük bir alternatif hâline getirmektedir. Ayrıca, hammadde temininin kolay olması ve üretim süreçlerinin nispeten düşük maliyetli olması, alüminyum alaşımlarını ekonomik açıdan da cazip bir seçenek durumuna getirmektedir.

Alüminyum alaşımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri, saf alüminyumun belirli oranlarda farklı alaşım elementleri ile bir araya getirilmesiyle önemli ölçüde değiştirilebilmektedir. Bu alaşım elementlerinin bir kısmı, alüminyum matris içerisinde katı çözelti oluşturarak mukavemet artışına katkı sağlarken, bazı elementler ise uygun ısı işlem koşullarında çökelme mekanizmaları aracılığıyla alaşımların sertlik ve mukavemet seviyelerini yükseltmektedir. Bu mikro yapısal mekanizmalar, alüminyum alaşımlarının istenilen uygulama koşullarına göre özelleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının performansını daha da iyileştirmek amacıyla, üretim sürecinin farklı aşamalarında çeşitli ısı işlem teknikleri uygulanmaktadır. Döküm işlemini takiben gerçekleştirilen homojenizasyon ısı işlemi, alaşım elementlerinin mikroyapı içerisindeki düzensiz dağılımını gidermeyi ve kimyasal bileşimin daha homojen bir hâle gelmesini amaçlamaktadır. Bu işlem, özellikle segregasyonun azaltılması ve sonraki şekillendirme işlemleri için uygun bir yapı elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Tavlama işlemi ise, soğuk şekillendirme veya plastik deformasyon sonucunda sertleşmiş olan alaşımların iç gerilmelerini azaltmak, sünekliklerini artırmak ve işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu tür işlemler başlıca 1xxx, 2xxx ve 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Öte yandan, bazı alüminyum alaşımları ısı işlemle sertleştirilebilir özellik göstermektedir. Bu kapsamda uygulanan çözeltiye alma ve ardından gerçekleştirilen yaşlandırma işlemleri, özellikle 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlarda çökelme sertleşmesi mekanizması yoluyla mukavemetin önemli ölçüde artırılmasını sağlamaktadır. Buna karşılık, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serisi alaşımlar ise çökelme sertleşmesine uygun olmadıklarından ısı işlemle sertleştirilemeyen alaşımlar sınıfında değerlendirilmektedir. Bu alaşımlarda mukavemet artışı genellikle soğuk şekillendirme gibi mekanik işlemlerle sağlanmaktadır.

Özellikle 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları, sundukları üstün mekanik

özellikler, düşük yoğunluk ve çevresel dayanım avantajları sayesinde havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan metal matrisli kompozitlerin (MMK) üretiminde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu alaşımlar, kompozit yapı içerisinde yük taşıyıcı matris fazı olarak görev yaparak, takviye elemanları ile birlikte yüksek performanslı ve hafif yapısal çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönleriyle alüminyum alaşımları, ileri mühendislik uygulamalarında stratejik öneme sahip malzemeler arasında yer almaktadır (Subramanian, 2010).

5xxx serisi alüminyum alaşımları, temel alaşım elementi olarak magnezyum (Mg) içermekte olup, bu özellikleri sayesinde orta-yüksek seviyede mukavemet ile iyi süneklik ve tokluk kombinasyonu sunmaktadır. Bu alaşımların mekanik ve çevresel performanslarını daha da iyileştirmek amacıyla, bileşimlerine çoğunlukla krom (Cr) ve manganez (Mn) gibi yardımcı alaşım elementleri ilave edilmektedir. Söz konusu katkı elementleri, tane yapısının kontrol edilmesine ve mikroyapısal kararlılığın artırılmasına katkı sağlayarak alaşımın genel performansını olumlu yönde etkilemektedir.

5xxx serisi alaşımlar; yüksek mukavemet, iyi tokluk ve süneklik, üstün korozyon direnci, yüksek şekillendirilebilirlik, iyi yüzey kalitesi, tatmin edici yorulma mukavemeti, yüksek balistik performans ve oldukça iyi kaynaklanabilirlik gibi çok sayıda avantajlı özelliği bir arada sunmalarıyla dikkat çekmektedir. Bu özellikler, söz konusu alaşımların özellikle denizcilik, ulaşım, savunma sanayii ve yapısal mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır. Diğer alüminyum alaşım serileriyle karşılaştırıldığında, 5xxx serisi alaşımlar öncelikle korozyon direncinin kritik önem taşıdığı yapısal bileşenlerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

Bu alaşım grubunun mukavemeti, esas olarak magnezyum elementinin alüminyum matris içerisinde oluşturduğu katı çözelti sertleşmesi mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Isıl işlemle sertleştirilemeyen bu alaşımlarda, mukavemet artışı büyük ölçüde alaşım bileşimi ve soğuk şekillendirme işlemleriyle sağlanmaktadır. Bununla birlikte, uygun alaşım katkılarının kullanılması sayesinde korozyon direncinden ödün vermeksizin mukavemet seviyelerinin daha da yükseltilmesi mümkün olabilmektedir. Bu durum, 5xxx serisi alaşımların hem mukavemet hem de çevresel performans açısından dengeli bir malzeme grubu olarak öne çıkmasına olanak tanımaktadır.

Bugüne kadar geliştirilen ve hizmete alınan askerî kara araçlarının büyük bir bölümünde 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının kullanılmış olması, bu malzemelerin zorlu servis koşulları altındaki güvenilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek korozyon direnci ile birlikte yeterli mekanik mukavemet sunmaları sayesinde, 5xxx serisi alaşımlar yalnızca savunma sanayiinde değil, aynı zamanda korozyon ve mukavemet gereksiniminin bir arada bulunduğu tüm mühendislik uygulamalarında tercih edilen önemli bir alüminyum alaşımı grubu olarak değerlendirilmektedir (Çağan vd., 2017; Mooy vd., 2015; Fuller vd., 2002).

2.4. Çekirdek Yapı

Sandviç yapıların temel bileşenlerinden biri olan çekirdek (core) yapı, sistemin mekanik davranışını ve yapısal bütünlüğünü belirleyen kritik bir rol üstlenmektedir. Çekirdek yapının başlıca işlevlerinden biri, panele dik doğrultuda etki eden basma ve yer değiştirme karakterli yükler altında yeterli taşıma kapasitesini sağlayabilmesidir. Bu amaçla çekirdek yapının, yüzey tabakaları arasındaki mesafeyi sabit tutacak şekilde yüksek rijitliğe ve stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Yüzey tabakaları arasındaki bu mesafenin korunması, sandviç yapının eğilme rijitliğinin sürekliliği açısından son derece önemlidir.

Bununla birlikte çekirdek yapı, sandviç panelin yükler altında birlikte çalışmasını mümkün kılan temel elemanlardan biridir. Yüzey tabakaları arasında oluşabilecek göreceli kaymaları engelleyebilmek için çekirdeğin, özellikle kesme gerilmeleri ve eğilme momentleri altında yeterli sertlik göstermesi zorunludur. Çekirdek yapının bu gereksinimleri karşılayamaması durumunda, yüzey tabakaları birbirinden bağımsız iki ayrı plaka gibi davranmakta ve bu durum sandviç yapıların temel avantajı olan yüksek özgül rijitlik ve taşıma kapasitesi özelliklerinin kaybolmasına yol açmaktadır.

Ayrıca, çekirdek yapının yeterli rijitliğe sahip olması, eğilme yükleri etkisi altında yüzey tabakalarında meydana gelebilecek yerel burkulma, göçme ve çökelme gibi stabilite problemlerinin önlenmesine katkı sağlamaktadır. Çekirdek yapı, yüzey tabakalarını sürekli olarak destekleyerek yüklerin daha homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlamakta ve bu sayede sandviç panelin hem statik hem de dinamik yükler altındaki performansını artırmaktadır.

Bal peteği (honeycomb) tipi sandviç kompozit yapılarda çekirdek malzemesi olarak farklı malzeme türleri kullanılabilmektedir. Çekirdek yapının yoğunluğu ve mekanik özellikleri,

tercih edilen malzeme türüne ek olarak hücre boyutu, hücre duvar kalınlığı ve hücre geometrisinin konfigürasyonu gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Uygulamada en yaygın kullanılan çekirdek malzemeleri arasında alüminyum alaşımları (AA5052, AA5056, AA3003, AA3104), aramid esaslı fiberler (Nomex, Kevlar) ile yüksek sıcaklık ve mukavemet gerektiren uygulamalar için tercih edilen titanyum ve nikel esaslı alaşımlar yer almaktadır. Bu farklı çekirdek malzemeleri, kullanım alanına ve tasarım gereksinimlerine bağlı olarak sandviç yapıların mekanik, termal ve çevresel performansını optimize edecek şekilde seçilmektedir (Bitzer, 1997; Aydınçak, 2007).

2.5. Yapıştırıcılar

Sandviç yapılarda yapıştırıcı tabakanın (bağlayıcı ara yüzeyin) temel ve vazgeçilmez görevi, yapı sistemini oluşturan yüzey tabakaları ile çekirdek malzemenin (core) mekanik olarak birbirleriyle uyumlu biçimde çalışmasını sağlamak ve bu bileşenler arasında sürekliliği temin etmektir. Yüzey tabakaları ile çekirdek arasında yer alan yapıştırıcının, özellikle yükleme koşulları altında yüzey tabakalarında oluşan kayma gerilmelerini etkin bir şekilde çekirdek malzemeye aktarabilmesi gerekmektedir; aksi takdirde sandviç yapının bütünsel taşıma kapasitesi ve rijitliği ciddi ölçüde azalacaktır.

Bu bağlamda, kullanılan yapıştırıcının yalnızca birleştirici bir unsur olmasının ötesinde, yapı elemanı gibi davranarak hem kayma gerilmelerini hem de yükleme durumuna bağlı olarak ortaya çıkan çekme gerilmelerini güvenli bir şekilde taşıyabilecek yeterli mekanik mukavemet ve tokluğa sahip olması zorunludur. Ancak sandviç yapı bağlantılarında yapıştırıcıdan beklenen performans kriterlerini açık ve kesin sınırlarla tanımlamak oldukça güçtür; bu nedenle literatürde yaygın olarak kabul edilen basit fakat etkili bir yaklaşım, yapıştırıcının en azından çekirdek malzemenin dayanabildiği kayma gerilmesi seviyesine eşdeğer bir kayma gerilmesini karşılayabilecek kapasitede olması gerektiği yönündedir (Marshall, 1982).

Öte yandan, fenolik esaslı bazı yapıştırıcı türlerinin kürlenme reaksiyonu sırasında uçucu bileşenler ve buhar açığa çıkardığı bilinmektedir. Kürlenme sürecinde oluşan bu buharın yapı içerisinde yeterince dışarı atılamaması ve ara yüzeyde hapsolmesi durumunda, sandviç yapının performansını olumsuz yönde etkileyebilecek çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Bu sorunlar arasında, bazı bölgelerde yapışmanın hiç oluşmaması veya son derece zayıf kalması, açığa çıkan buharın oluşturduğu iç basınç nedeniyle çekirdek malzemenin yapısal olarak zarar

görmesi, hatta kütleme sırasında çekirdeğin tasarlanan konumundan saparak istenmeyen bir pozisyona hareket etmesi sayılabilir.

Günümüzde, farklı mekanik özelliklere, çevresel dayanım seviyelerine ve üretim yöntemlerine uygun olacak şekilde geliştirilmiş çok sayıda yapıştırıcı türü bulunmakta olup, sandviç yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan başlıca yapıştırıcı türleri nitril fenolik, vinil fenolik, epoksi, poliüretan, polyimide, poliamid'dir (B Group, 2007).

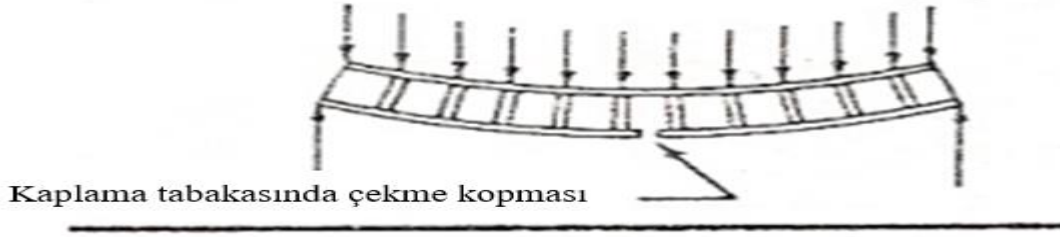
Sandviç yapı uygulamalarında alüminyum alaşımlarının çekirdek veya yüzey tabakalarıyla güvenli biçimde birleştirilebilmesi için kullanılan yapıştırıcının yeterli mekanik mukavemet ve yüzey uyumluluğuna sahip olması gerekmektedir. Bu kapsamda, epoksi ve poliüretan esaslı yapıştırıcılar, alüminyum alaşımlarında yüksek kayma ve çekme dayanımı sağlamaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yapıştırıcıların alüminyum yüzeylerde güvenilir ve yapısal nitelikte bağlar oluşturabildiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, epoksi yapıştırıcıların yüksek rijitlik ve statik mukavemet sağladığını, poliüretan yapıştırıcıların ise esnek yapıları sayesinde darbe ve titreşim etkilerinin bulunduğu durumlarda avantaj sunduğu görülmektedir. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının yapıştırılmasında servis koşullarına bağlı olarak epoksi veya poliüretan esaslı yapıştırıcıların kullanımı uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Shields, 1984; Da Silva vd., 2011).

2.6. Bal Peteği Sandviç Yapıların Hasar Modları

Yükleme koşullarına bağlı olarak, bal peteği sandviç yapılarda Şekil 5–12 arasında gösterilen farklı hasar türleri gözlemlenmektedir

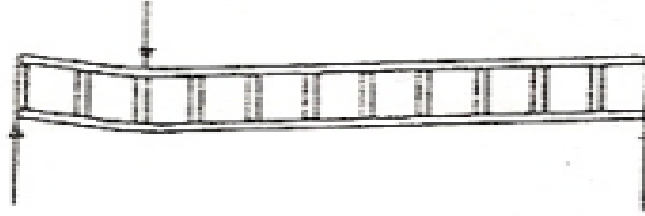
- Yüzey Tabakası Hasarı
- Enine Kesme Hasarı
- Çekirdek Ezilmesi
- Genel Burkulma
- Kayma Burkulması
- Yüzey Tabakası Kırışması
- Hücre İçi Burkulma Hasarı

Bal peteği sandviç yapılar da hasar oluşumu, uygulanan yükleme türü, yükleme yönü ve malzeme özelliklerine bağlı olarak farklı mekanizmalarla gerçekleşmektedir. Bu yapılar da hasar; yüzey tabakalarında, çekirdek malzemede veya yüzey–çekirdek ara yüzeyinde meydana gelebilmekte ve çoğu zaman bu mekanizmaların bir kombinasyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Şekil 5'te, eğilme yükleri altında alt yüzey tabakasında meydana gelen çekme gerilmeleri sonucunda oluşan yüzey tabakası hasarı gösterilmektedir.



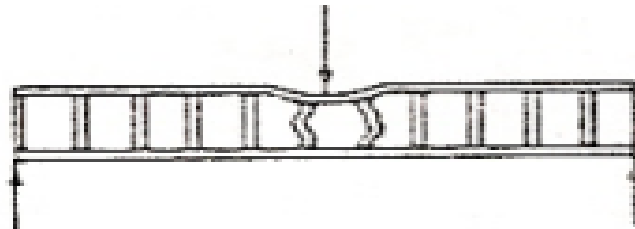
Şekil 5. Yüzey tabakası hasarı (Marshall, 1982)

Şekil 6'da, çekirdek malzemenin kayma dayanımının aşılması sonucu meydana gelen enine kesme hasarı görölmektedir.



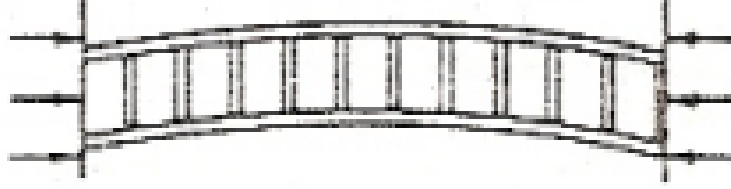
Şekil 6. Enine Kesme Hasarı (Marshall, 1982).

Şekil 7'de ise lokal yükleme etkisiyle çekirdek yapıda meydana gelen ezilme hasarı sunulmaktadır.

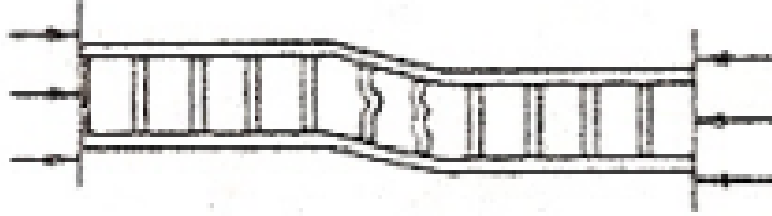


Şekil 7. Çekirdek ezilmesi (Marshall, 1982).

Düzlem içi basma yükleri altında oluşan kararsızlık kaynaklı hasar modlarından biri olan genel burkulma Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 9'da, çekirdek yapının kayma deformasyonları sonucu ortaya çıkan kayma burkulması (shear crimping) hasarı görülmektedir.



Şekil 8. Genel burkulma (Marshall, 1982)

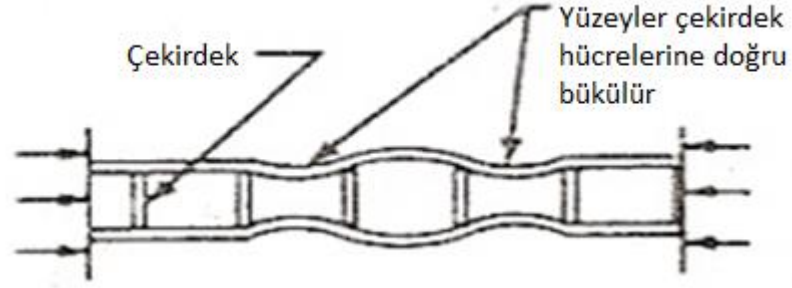


Şekil 9. Kayma burkulması (Marshall, 1982)

Çekirdek tarafından yeterli desteğin sağlanamadığı durumlarda yüzey tabakalarında meydana gelen yerel burkulmalar ise Şekil 10'da gösterilen yüzey tabakası kırışması hasarına neden olmaktadır. Ayrıca, bal peteği hücre duvarlarında veya hücre geometrisinde meydana gelen yerel kararsızlıklar sonucu oluşan hücre içi burkulma hasarı Şekil 11'de sunulmaktadır.



Şekil 10. Yüzey tabakası kırışması (Marshall, 1982).

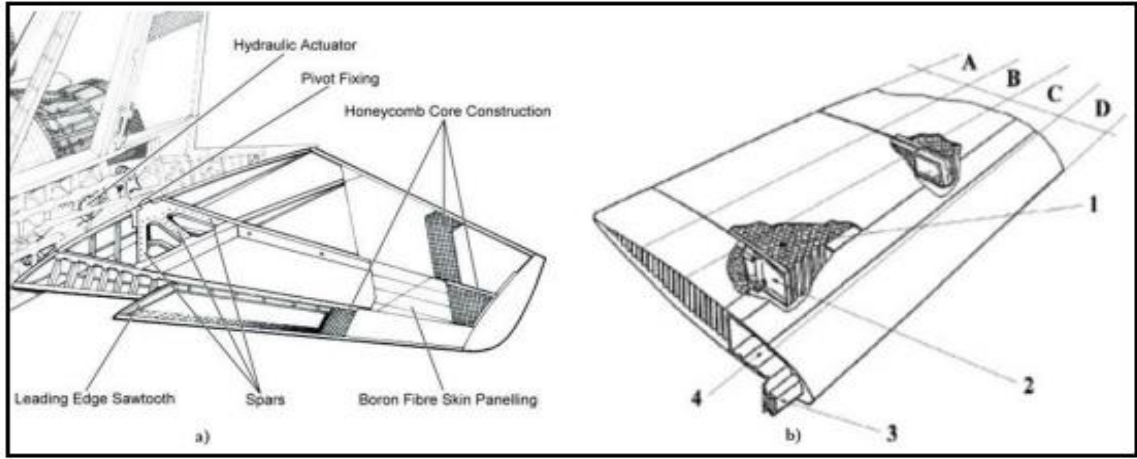


Şekil 11. Hücre içi burkulma hasarı (Marshall, 1982).

Sonuç olarak, bal peteği sandviç yapıların mekanik davranışı ve hasar türleri; yüzey tabakalarının elastik özellikleri, çekirdek malzemenin kayma ve basma rijitliği ile geometrik parametrelere doğrudan bağlıdır (Marshall, 1982).

2.7. Havacılıkta Bal Peteği Sandviç Yapıların Kullanım Yerleri

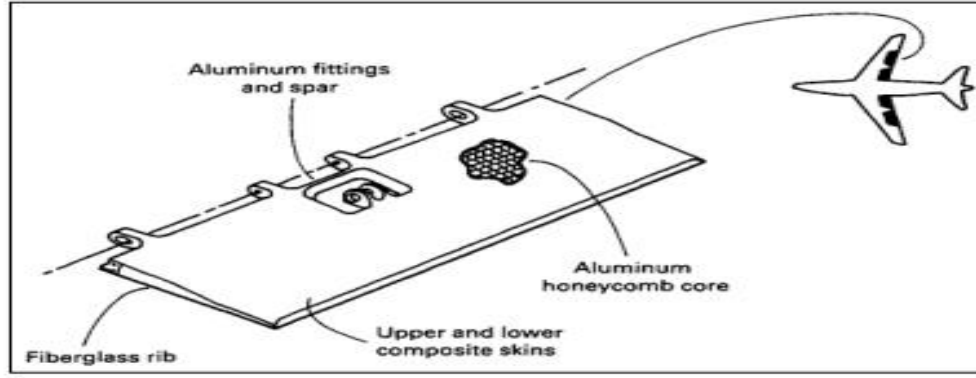
Uçak yapılarında kullanılan bal peteği çekirdekli sandviç elemanların önemli bir bölümü, hasar görmeleri durumunda uçağın uçuş emniyetini doğrudan tehlikeye atarak kazaya neden olabilecek birincil yapılar kapsamında değil, ikincil yapılar sınıfında değerlendirilmektedir. İkincil yapılar; görevleri uçağın aerodinamik performansını, yapısal bütünlüğünü ve işlevselliğini desteklemek olan, ancak herhangi bir hasar durumunda uçağın kontrol edilebilirliğini veya havada kalmasını doğrudan etkilemeyen yapısal bileşenlerdir. Bu tür yapılarda bal peteği sandviç kompozit paneller, yüksek özgül dayanım ve rijitlik sağlamaları, düşük ağırlıkta üretilibilmeleri ve karmaşık geometrilere kolayca uyarlanabilmeleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Uçaklarda bal peteği sandviç panellerin başlıca kullanım alanları arasında ön kenar (leading edge) ve arka kenar (trailing edge) bölgeleri ile birlikte flap, spoiler, elevator, aileron ve rudder gibi kumanda yüzeyleri; ayrıca cowling ve spar gibi yapısal bileşenler yer almaktadır [42].



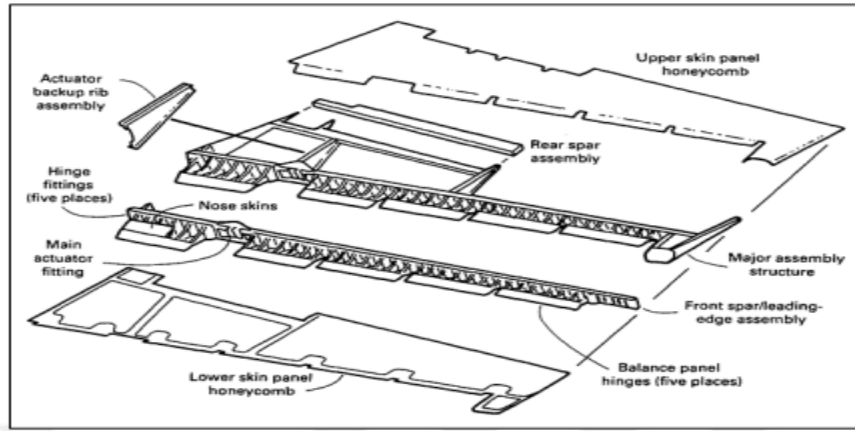
Şekil 12. F-15 savaş uçağının yatay stabilizerinde kullanılan bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapı. (b) Tipik bir helikopter rotor palinin yapısal bileşenleri: (1) Bal peteği çekirdekli sandviç kompozit panel, (2) rijitliği artırmak ve yük aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan rib (kaburga), (3) titreşim ve aeroelastik kararsızlıkları azaltmak için kullanılan antiflutter ağırlığı ve (4) rotor palinin ana taşıyıcı elemanı olan spar (Balasko vd., 2005; Gunston & Badrocke, 1998).

F-16 savaş uçağında, tüm kuyruk yüzeyleri ile kanatlar ve gövde üzerinde yer alan diğer kumanda yüzeyleri bal peteği çekirdekli yapılardan oluşmaktadır. Benzer şekilde, F-18 uçağında toplam yapısal yüzey alanının yaklaşık %35'i bal peteği yapı kullanılarak üretilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı sayesinde, uçağın ortalama yapısal ağırlığında yaklaşık %25 oranında bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca, pek çok uçakta radom bölümü; hafiflik, elektromanyetik geçirgenlik ve yapısal yeterlilik avantajları nedeniyle Nomex veya cam elyafı bal peteği çekirdekli malzemelerden imal edilmektedir (Irving, 2019).

Boeing 737 tipi uçakta, Şekil 13'te görüldüğü gibi spoiler sistemini oluşturan bileşenlerin büyük bir bölümü; merkez bağlantı elemanları ve ön spar bölgeleri de dâhil olmak üzere, bal peteği çekirdekli alüminyum sandviç kompozit malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Şekil 14'te, Boeing 737 uçağının elevatör bölümünde tek parça hâlinde yer alan alt ve üst kaplama panelleri ile bu panelleri taşıyan ön ve arka sparlar ve rib yapıları görülmektedir. Elevatör yapısında kullanılan söz konusu ribler de bal peteği çekirdekli sandviç kompozit malzemeden imal edilmiştir (Miracle vd., 2001).



Şekil 13. Boeing 737 uçağının aileron kısmında bulunan alüminyum bal peteği sandviç kompozit (Miracle vd., 2001)



Şekil 14. Boeing 737 uçağının elevatör kısmı (Miracle vd., 2001)

2.8. Sandviç Plakalarda Eğilme, Kayma ve Çökme Davranışının Teorik İncelenmesi

Eğilme yüklemesi altında sandviç plakaların davranışı incelendiğinde, yüzey plakalarının çekme ve basma yönünde oluşan normal gerilmeleri taşıdığı, çekirdek malzemenin ise esas olarak kesme (kayma) gerilmelerine maruz kaldığı bilinmektedir. Bu yük paylaşımı sayesinde, düşük yoğunluklu bir çekirdek kullanılarak yüksek eğilme rijitliği elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, çekirdek malzemenin düşük elastisite ve kayma modülüne sahip olması, deformasyon davranışında kayma etkilerinin ihmal edilemeyecek düzeyde olmasına neden olmaktadır.

Üç nokta eğme yüklemesi, sandviç yapıların mekanik performansını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yükleme durumunda, basit mesnetli bir kirişin orta noktasına tekil yük uygulanmakta ve sistemin hem eğilme hem de kesme etkileri altında verdiği

tepkisi incelenmektedir. Klasik kiriş teorisine göre, yalnızca eğilme etkisi dikkate alındığında maksimum çökme aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\delta_{eğilme} = \frac{PL^3}{48EI}$$

Bu bağıntıda P uygulanan yükü, L mesnetler arası açıklığı, E elastisite modülünü ve I kesitin atalet momentini temsil etmektedir. Ancak bu ifade, homojen ve izotropik kirişler için geçerli olup, sandviç yapılar gibi heterojen sistemlerde gerçek davranışı tam olarak yansıtamamaktadır. Sandviç yapılarda çekirdek malzemenin kayma deformasyonuna uğraması nedeniyle, toplam çökme yalnızca eğilme bileşeninden oluşmaz. Bu nedenle daha gerçekçi bir yaklaşımda toplam çökme, eğilme ve kayma deformasyonlarının toplamı olarak ifade edilmektedir:

$$\delta_{toplam} = \delta_{eğilme} + \delta_{kayma}$$

Çekirdek malzemenin kayma deformasyonundan kaynaklanan çökme bileşeni aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\delta_{kayma} = \frac{PL}{4A_c G_c}$$

Burada A_c çekirdek kesit alanını, G_c ise çekirdek malzemenin kayma modülünü ifade etmektedir. Bu iki bileşenin birlikte değerlendirilmesiyle toplam çökme:

$$\delta_{toplam} = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4A_c G_c}$$

Bal peteği çekirdek için spesifik kayma modülü (G_c), bu yapıların anizotropik özellik göstermesinden dolayı deformasyon yönüne bağlı olarak (L – boyuna ve W – enine yönlerde) değişen rijitlik davranışını ifade eder. Teorik olarak, hücre duvarı kalınlığı (t) ve hücre kenar uzunluğu (l) bilinen altıgen (hexagonal) bal peteği yapılar için kayma modülü aşağıdaki ifade ile verilmektedir:

$$G_L = G_s \frac{t}{l} \cos(\theta)$$

$$G_W = G_s \frac{t}{l} \frac{\sin(\theta)}{1 + \sin^2(\theta)}$$

Gs, çekirdeğin yapıldığı ana malzemenin (Alüminyum, Nomex vb.) kayma modülünü, θ ise hücre açısını (standart altıgenler için 30°) ifade eder.

Bu ifade, sandviç yapıların deformasyon davranışının yalnızca eğilme rijitliğine değil, aynı zamanda çekirdek malzemenin kayma rijitliğine de doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir (Allen, H. G., 1969).

Bal peteği çekirdekli sandviç yapılarda, hücresel yapı nedeniyle kayma modülü oldukça düşük değerlere sahiptir. Bu durum, özellikle düşük yük seviyelerinde dahi kayma deformasyonunun toplam çökme üzerindeki etkisini artırmaktadır. Dolayısıyla, çekirdek kalınlığının artırılması her ne kadar eğilme rijitliğini artırsa da, kayma deformasyonu üzerindeki etkisi sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında yalnızca geometrik parametrelerin değil, çekirdek malzemenin mekanik özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Sandviç yapılarda çekirdek içerisinde oluşan kayma gerilmesi de kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Ortalama kayma gerilmesi, kesme kuvvetinin çekirdek kesit alanına oranı olarak ifade edilmektedir:

$$\tau_c = \frac{V}{A_c}$$

Üç nokta eğme yüklemesinde kesme kuvveti $V = \frac{P}{2}$ olduğundan, çekirdek kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\tau_c = \frac{P}{2A_c}$$

Çekirdek kesit alanı, genişlik (b) ve çekirdek kalınlığı (h_c) cinsinden ifade edilirse:

$$A_c = bh_c$$

olur ve bu durumda:

$$\tau_c = \frac{P}{2bh_c}$$

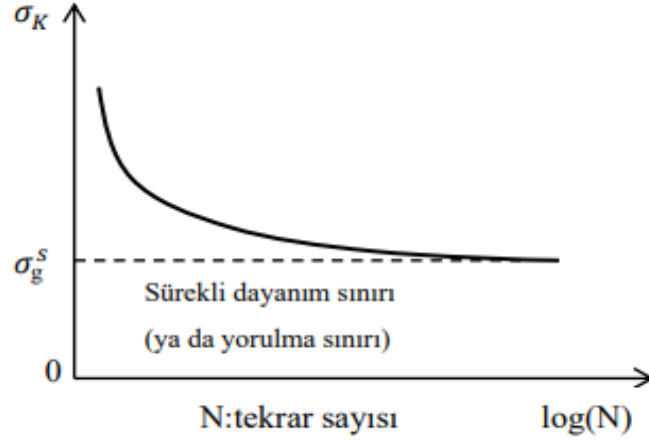
bağıntısı elde edilir. Bu ifade, çekirdek kalınlığının artmasıyla kayma gerilmesinin azaldığını göstermektedir.

Sonuç olarak, sandviç plakalarda mekanik davranışın doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi

için eğilme, kayma ve çökme etkilerinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Özellikle bal peteği çekirdekli yapılarda kayma deformasyonunun ihmal edilmesi, toplam çökmenin olduğundan daha düşük hesaplanmasına neden olabilir. Bu nedenle üç nokta eğme analizlerinde klasik eğilme teorisine ek olarak çekirdek kayma etkisinin de dikkate alınması, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. (Gibson, L. J. & Ashby, M. F., 1997).

2.9. Yorulma

Yorulma hasarı, mühendislik uygulamalarında uzun yıllardır karşılaşılan ve önemli sonuçlar doğurabilen bir problemdir. 19. yüzyılda meydana gelen çok sayıda yapısal hasar olayı, yorulma davranışına yönelik bilimsel çalışmaların başlamasına neden olmuş ve bu konuda gerçekleştirilen ilk deneysel araştırmalar August Wöhler tarafından yapılmıştır. Wöhler, statik mukavemet sınırının altında kalan tekil yüklemelerin doğrudan hasara yol açmadığını; ancak aynı yüklerin tekrar eden biçimde uygulanması durumunda malzeme içerisinde zamanla hasar birikiminin oluşabileceğini göstermiştir. O dönemde yorulma olayı tam olarak anlaşılamadığından gizemli bir süreç olarak değerlendirilmekteydi. Çünkü hasar, önceden gözle görülür bir belirti vermeden ve herhangi bir uyarı işareti oluşturmadan ani kırılmalar şeklinde ortaya çıkıyordu. 20. yüzyılda yapılan araştırmalar sayesinde yorulma mekanizmasının aşamalı bir süreç olduğu anlaşılmıştır. Buna göre hasar; başlangıçta mikro çatlakların oluşması, ardından bu çatlakların ilerlemesi ve son aşamada yapının tamamen kırılması şeklinde gelişmektedir. Günümüzde makineler, taşıt sistemleri, kaynaklı birleşimler ve uçak yapıları başta olmak üzere pek çok mühendislik yapısının hizmet ömrü boyunca yorulma etkilerine maruz kaldığı bilinmektedir. Yorulma kaynaklı hasarlar geçmişte basınçlı kap patlamaları, köprü göçmeleri ve uçak kazaları gibi ciddi can ve mal kayıplarına neden olan olaylara yol açmıştır. Günümüzde yorulma davranışı kapsamlı biçimde anlaşılmış olup, 1837–1994 yılları arasındaki gelişim süreci Walter Schütz tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir (Schütz, 1996). Yorulma çalışmalarında temel amaçlardan biri, bir numunenin hasar oluşmadan güvenle dayanabileceği gerilme seviyesinin belirlenmesidir. Çoğu durumda bu sınır değerinin ortaya konulması, numunenin hangi gerilme altında kırılacağı ya da kaç yükleme çevrimi sonunda hasar göreceğinin belirlenmesinden daha kritik kabul edilmektedir. Mühendislik tasarım süreçlerinde ise yapıların maruz kalacağı yüklerin güvenli şekilde taşınabilmesi için uygun malzemenin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Doğru malzeme tercihinin yapılması, yorulma kaynaklı hasar riskinin azaltılmasına ve yapı ömrünün artırılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Demirci, 2004).



Şekil 15. Uygulanan gerilme ile çevrim sayısı arasındaki Wöhler Eğrisi (Omurtag, 2011)

Şekil 15’te uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak çevrim sayısının değişimini gösteren S–N (Wöhler) eğrisi sunulmaktadır. Wöhler diyagramı, bir malzemenin yorulma ömrü ile sürekli dayanım sınırı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bununla birlikte yorulma davranışı yalnızca malzemenin içsel özelliklerine bağlı değildir. Numunenin geometrisi, boyutları, yüzey durumu ve üretim yöntemi gibi birçok parametre yorulma performansını doğrudan etkilediğinden, yorulma mukavemeti belirli ölçülere ve belirli yüzey kalitesine sahip numuneler için tanımlanmaktadır (Omurtag, 2011). Uygulanan yük seviyesinin artırılması ve belirli bir süre boyunca devam ettirilmesi her zaman yorulma ömründe azalmaya neden olmayabilir. Bu noktada yük artışının büyüklüğü ile yükün uygulanma süresi, malzemenin yorulma davranışını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Özmen, 2007).

Gerilme temelli yorulma tahmin yaklaşımı, uygulanan gerilme düzeyini esas almakta olup özellikle yüksek çevrimli yorulma analizlerinde yaygın olarak kullanılan klasik yöntemlerden biridir. Uygulama kolaylığı sayesinde farklı mühendislik alanlarında tercih edilen bu yöntem, yüksek çevrimli yorulma durumlarında da güvenilir sonuçlar sunabilmektedir (Topkaya, 2013; Budynas & Nisbett, 2011). Bu yaklaşımda malzemenin kırılmaya kadar geçen toplam hizmet ömrü değerlendirilmekte, ancak çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme süreçleri ayrı ayrı ele alınmamaktadır.

2.9.1 Yükleme şartları

Statik yükleme deneylerinden elde edilen gerilme–şekil değiştirme davranışı, mühendislik malzemelerinin yorulma performansının değerlendirilmesinde temel bir kriter olarak kabul edilmektedir (Solmaz & Topkaya, 2020; Wu vd., 2019; Khalid vd., 2023). Özellikle statik eğilme testleri, yorulma deneylerinde uygulanacak yük seviyesi ve çevrimsel gerilme genliğinin belirlenmesinde referans sağlamaktadır (Wu vd., 2019; Anonymous, 2020). Üç nokta eğme altında çalışan bal peteği sandviç panellerde yüzey levhalarında meydana gelen çekme ve basma gerilmeleri yorulma çatlaklarının başlatılmasında önemli bir rol oynamakta; çekirdek malzemede ise lokal burkulma ve yüzey–çekirdek ara yüzey ayrılması gibi hasar mekanizmaları yaygın olarak gözlemlenmektedir (Solmaz & Topkaya, 2020; Anonymous, 2022; Zhao vd., 2024; Topkaya & Solmaz, 2019).

Bal peteği sandviç yapıların yorulma davranışı, yüzey levha kalınlığı, çekirdek geometrisi ve yapıştırıcı özellikleri gibi pek çok yapısal parametreden etkilenmektedir (Anonymous, 2022; Zhao vd., 2024). Tekrarlı eğilme yükleri altında hasar ilerlemesi, mikro çatlak oluşumu ve çekirdek deformasyonları gibi aşamalardan meydana gelmekte olup bu mekanizmalar üç nokta eğme yorulma deneyleri ile detaylı şekilde incelenmiştir (Anonymous, 2020; Anonymous, 2019). Sonlu elemanlar yöntemi, statik deneylerden elde edilen yük–yer değiştirme verilerinden yararlanarak gerilme yoğunlaşmalarını ve yorulma hasar bölgelerini sayısal olarak modellemek için etkin bir araç olarak kullanılmaktadır (Wu vd., 2019; Anonymous, 2019; Anonymous, 2024). Bu yaklaşımla elde edilen yorulma ömür tahminleri, deneysel verilerle karşılaştırıldığında yüksek bir uyum göstermektedir (Anonymous, 2020; Anonymous, 2019). Ayrıca uluslararası standartlar, yorulma testlerinde statik dayanım verilerinin referans alınmasını önermektedir (ASTM E466-15) (ASTM, 2017).

2.10. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), karmaşık geometriye sahip mühendislik problemlerinin sayısal olarak çözülebilmesini sağlayan en yaygın analiz yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde sürekli ortam, birbirine bağlı küçük elemanlara bölünerek her bir elemanın davranışı matematiksel olarak modellenir ve tüm sistemin cevabı bu elemanların birleşimiyle elde edilir. Özellikle gerilme, şekil değiştirme, sıcaklık dağılımı ve yorulma davranışı gibi mühendislik problemlerinin analizinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu eleman analizleri sayesinde

deneysel çalışmaların maliyeti ve süresi azaltılabilmekte, aynı zamanda tasarım aşamasında farklı yükleme ve sınır şartlarının etkileri detaylı olarak incelenebilmektedir (Logan, 2017).

Günümüzde sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yazılımlardan biri ANSYS paket programıdır. ANSYS, lineer ve lineer olmayan statik analizler, dinamik analizler, temas problemleri, termal analizler ve yorulma analizleri gibi çok sayıda mühendislik uygulamasına olanak sağlamaktadır. Program içerisinde oluşturulan geometrik model, uygun eleman tipleri seçilerek ağ (mesh) yapısına dönüştürülmekte ve malzeme özellikleri, yükleme koşulları ile sınır şartları tanımlandıktan sonra çözüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar sayesinde yapının gerilme dağılımı, deformasyon davranışı ve kritik bölgeleri ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir (ANSYS, 2023).

ANSYS tabanlı yorulma analizlerinde genellikle statik analiz sonucunda elde edilen gerilme değerleri kullanılarak yorulma ömrü tahminleri yapılmaktadır. Bu analizler sırasında S–N eğrileri, malzeme özellikleri ve yükleme türleri dikkate alınarak hasarın oluşabileceği bölgeler belirlenmekte ve tasarım güvenliği artırılmaktadır. Sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilen analizler, özellikle deneysel çalışmaların zor veya maliyetli olduğu durumlarda mühendislik tasarım süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır (Zienkiewicz vd., 2013). Ayrıca literatürde SEY tabanlı sayısal analizlerin, deneysel sonuçlarla yüksek uyum gösterdiği ve tasarım optimizasyonu çalışmalarında etkin biçimde kullanıldığı belirtilmektedir (Bathe, 1996; Cook vd., 2002)). Mesh yoğunluğu, eleman tipi seçimi ve yakınsama kriterleri analiz doğruluğunu doğrudan etkileyen parametreler arasında yer almakta olup bu nedenle ağ bağımsızlık analizlerinin yapılması önerilmektedir (Belytschko vd., 2000). ANSYS Workbench ortamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan temas analizleri ve yorulma tahminleri, özellikle kaynaklı bağlantılar ve ince cidarlı yapılar üzerinde güvenilir sonuçlar sağlamaktadır (Dovling, 2012). Bunun yanında çok eksenli gerilme durumlarının değerlendirilmesinde gelişmiş yorulma kriterlerinin kullanılması, hasar tahmin doğruluğunu artıran önemli bir yaklaşımdır (Stephens, 2001)

2.11. Literatür Taraması

Sun vd. (2017), AA5052 ve AA3003 alüminyum alaşımlarından üretilmiş bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin eğilme davranışı üzerinde çekirdek kalınlığının etkisini incelemiştir. Bu amaçla, çekirdek kalınlıkları 0,04 mm, 0,07 mm ve 0,10 mm olan farklı numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde üç nokta eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, ASTM C393 standardına uygun şekilde yürütülmüş olup, yüzey tabakalarında AA5052 alüminyum alaşımı, çekirdek yapıda ise AA3003 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deney sonuçları, çekirdek kalınlığındaki artışın sandviç kompozitlerin eğilme davranışı ve taşıma kapasitesi üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Yapılan değerlendirmelerde, çekirdek kalınlığının eğilme mukavemeti üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle çekirdek kalınlığının 0,04 mm'den 0,10 mm'ye yükseltilmesiyle, numunelerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin yaklaşık olarak iki katına çıktığı (1000 N'den 2000 N'ye) tespit edilmiştir. Bu bulgular, çekirdek kalınlığının sandviç yapıların mekanik performansında kritik bir parametre olduğunu ve taşıma kapasitesi ile güçlü bir ilişki içerisinde bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Paik vd. (1999), tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmada, alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç panellerin mekanik dayanım özellikleri, teorik analizler ve deneysel veriler birlikte ele alınarak incelenmiştir. Çalışmada özellikle çekirdek hücre geometrisini tanımlayan parametreler olan hücre yüksekliği ve hücre genişliğinin yapısal davranış üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları, hücre yüksekliğinin artırılması ve hücre genişliğinin azaltılması durumunda, sandviç panellerde plastik şekil değişiminin başlaması için gereken yük seviyesinin belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymuştur.

Gpoichand vd. (2013), yaptıkları çalışma kapsamında, bakır malzemeden imal edilen altıgen hücre yapısına sahip bal peteği yapıların mekanik özellikleri, üç nokta eğilme testi yöntemiyle deneysel olarak analiz edilmiş ve Sonlu Eleman Analizi (SEA) ile tamamlayıcı değerlendirmeler yapılmıştır. Araştırma sonuçları, hücre duvar kalınlığındaki artışın eğilme kuvvetlerinde anlamlı bir yükselişe yol açtığını göstermiştir. Bu durum, hücre duvar kalınlığının bal peteği yapıların rijitlik ve mukavemet performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Belouettar vd. (2009), Alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç yapıların mekanik davranışı, farklı çekirdek yoğunluklarına sahip numuneler üzerinde uygulanan dört nokta eğilme

deneyleri ile incelenmiştir. Numunelerin yüzey tabakalarında AA5754 alüminyum alaşımı kullanılırken, çekirdek yapılar 55 kg/m^3 ve 82 kg/m^3 yoğunluklarında alüminyum bal peteğinden oluşturulmuştur. Tüm numuneler aynı geometrik boyutlarda üretilmiştir. Deney sonuçları, çekirdek yoğunluğundaki artışın sandviç yapıların rijitliğini ve taşıma kapasitesini belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Özellikle 82 kg/m^3 yoğunluğa sahip çekirdek, daha düşük sehim ve daha yüksek maksimum yük değerleri sergileyerek en iyi mekanik performansı ortaya koymuştur. Buna karşılık, düşük yoğunluklu çekirdek yapılar daha erken deformasyon göstermiştir. Elde edilen bulgular, çekirdek yoğunluğunun sandviç yapıların tasarımında kritik bir parametre olduğunu doğrulamaktadır.

Jen vd. (2009), Alüminyum yüzey tabakası ile bal peteği çekirdek malzemeleri arasındaki yapıştırıcı miktarının eğilme yorulma performansı üzerindeki etkisi, sayısal modelleme ve deneysel karakterizasyon yöntemleri kullanılarak kapsamlı biçimde incelenmiştir. Yapıştırıcı dozajları $0,4$, $0,7$ ve 1 kg/m^2 seviyelerinde uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar yapıştırıcı miktarının artırılmasının yapısal rijitlik ve dayanım üzerinde belirgin iyileşmelere yol açtığını göstermiştir. Ayrıca, bal peteği çekirdek ile yüzey tabakası arasındaki adezyon kaybının kalıcı yorulma hasar mekanizmalarının oluşumunu tetiklediği tespit edilmiştir.

Boutar vd. (2018), alüminyum esaslı numuneler kullanılarak alüminyum–bakır alaşımı ile DINITROL 500 poliüretan yapıştırıcının yüzey pürüzlülüğünün yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, poliüretan yapıştırıcı kalınlığı $0,3 \text{ mm}$ ile 2 mm arasında değişen dört farklı seviyede uygulanmış; ayrıca yaklaşık $Ra \approx 0,6 \text{ } \mu\text{m}$ ile $Ra \approx 1,5 \text{ } \mu\text{m}$ aralığında dört farklı yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler dinamik yükleme koşulları altında test edilerek mekanik tepkileri değerlendirilmiş ve hasar mekanizmaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yaklaşık $Ra \approx 0,6 \text{ } \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü ve 1 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip numunelerin en yüksek yorulma ömrünü sergilediğini ortaya koymuştur.

Krenk vd. (1996), Alüminyum alaşımlı plakalar, epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak yüzey birleşimi sağlanmış ve yapışma bölgesinin mekanik performansı, statik yük taşıma kapasitesi ve yorulma mukavemeti, sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ve kapsamlı deneysel testler kapsamında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlıkları $0,1 \text{ mm}$ ve $0,3 \text{ mm}$ olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin mekanik davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Statik mekanik testler kapsamında, $0,3 \text{ mm}$ kalınlığındaki yapıştırıcı tabakasının, $0,1 \text{ mm}$ kalınlığa kıyasla daha yüksek maksimum kopma kuvvetleri ve bağlantı mukavemeti sağladığı

belirlenmiştir. Bu bulgu, daha kalın yapıştırıcı tabakasının yük dağılımını iyileştirerek gerilme konsantrasyonlarını azalttığını ve böylece yapısal mukavemeti artırdığını göstermektedir.

Jen vd. (2009), farklı yüzey levhası kalınlıklarına sahip bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin dört nokta eğilme yorulma davranışlarını deneysel testler ve sayısal analizler yardımıyla kapsamlı biçimde incelemişlerdir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yüzey tabakası kalınlığındaki artışın sandviç kompozitlerin eğilme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini artırdığı, buna bağlı olarak da yorulma hasarının daha geç olduğu ve yorulma ömrünün belirgin şekilde uzadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, yüzey malzemesi kalınlığının bal peteği sandviç yapıların yorulma performansını etkileyen temel tasarım parametrelerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Gaur vd. (2021), karbon fiberden imal edilen yüzey plakaları ile Nomex™ bal peteği çekirdeğe sahip kompozit sandviç panellerin mekanik davranışlarını değerlendirmektedir. Plaka olarak karbon fiber malzeme, çekirdek bileşeni olarak ise Nomex™ bal peteği tercih edilmiştir. Tüm panellerde çekirdek kalınlığı 8 mm olarak sabit tutulurken, yüzey katman kalınlıkları sırasıyla 0,4 mm, 0,8 mm ve 1,2 mm olacak şekilde değiştirilmiştir. Yüzey katman kalınlığındaki artışa paralel olarak, panellerin toplam kalınlıkları (8,4 mm, 8,8 mm ve 9,2 mm) ile basma mukavemetleri kayda değer biçimde yükselmiştir. Ayrıca, yapının eğilme deformasyonları yaklaşık 2 mm'den 3 mm'ye kadar artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey katmanının kalınlaşmasının hem basma mukavemetini hem de esneklik kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Xu vd. (2024), negatif Poisson oranına sahip auxetic kompozit bal peteği sandviç yapıların eğilme yükleri altındaki mekanik performansını analiz etmektedir. Farklı yüzey levhası kalınlıkları (1,2 mm, 1,5 mm, 1,8 mm ve 2,1 mm) kullanılarak gerçekleştirilen deneysel analizler sonucunda, yüzey katman kalınlığındaki artışın yapının eğilme direncini yükselttiği; ancak belirli bir kalınlıktan sonra enerji soğurma kapasitesinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, yüzey levhası kalınlığının optimum düzeyde belirlenmesinin, yapısal performans açısından kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

Krishna vd. (2022), metal yüzey levhalara ve GFRP (Cam Elyaf Takviyeli Polimer) çekirdeğe sahip bal peteği sandviç panellerin eğilme davranışlarını ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında analizler altı farklı konfigürasyon için

gerçekleştirilmiştir. İlk iki durumda hem yüzey levhalarında hem de çekirdek yapıda titanyum ve alüminyum malzemeler tercih edilmiştir. Devam eden analizlerde ise yüzey levhalarının malzemesi titanyum veya alüminyum olarak değiştirilirken, çekirdek yapı malzemesi GFRP olarak seçilmiştir. ANSYS tabanlı sonlu eleman analizleri sonucunda, yüzey levhalarının titanyumdan ve çekirdeğin GFRP'den oluştuğu sandviç panel konfigürasyonunda gerilme değerlerinin en yüksek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Zu vd. (2013), çelik yüzey levhaları ve alüminyum köpük çekirdekten oluşan sandviç yapıların statik üç noktalı eğilme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı panel kalınlıkları ve köpük dolgu kalınlıklarına sahip sandviç numunelerin deformasyon özellikleri ve kırılma mekanizmaları detaylı olarak araştırılmıştır. Numuneler, 240 mm uzunluk ve 80 mm genişlik ölçülerinde hazırlanmış; çelik levhaların iç yüzeyleri, panel ile çekirdek arasındaki temas alanını artırmak ve yüzey temizliği sağlamak amacıyla çelik fırça ile pürüzlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, hem çelik yüzey levhası kalınlığının hem de köpük çekirdek kalınlığının artmasıyla maksimum eğilme yükünün yükseldiği belirlenmiştir.

Karakaya ve Ekşi (2022), farklı oluklu çekirdek geometrilerine sahip sandviç panel yapıların, yarı statik eğilme yüklemesi altında sergiledikleri deformasyon davranışını sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirmiştir. Çalışmada kullanılan oluklu çekirdekler; dairesel, sinüzoidal, kare, trapez, üçgen ve bal peteği geometrilerinde olup, döküm poliamid (PA6) malzemeden üretilmiştir. Sandviç panellerin yüzey levhalarında Alüminyum 6063-T5 alaşımı tercih edilmiştir. Elde edilen analiz bulguları, trapez çekirdekli sandviç panelin en yüksek deformasyon direncine sahip olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, dairesel çekirdekli sandviç panel en düşük deformasyon direncini sergilemiştir. Ayrıca, özgül yük taşıma kapasitesi ve özgül enerji absorpsiyon yeteneği açısından en üstün performansın trapez çekirdekli sandviç panel tarafından sağlandığı belirlenmiştir.

Ercan vd. (2018), bal peteği, iskelet, kübik ve kafes olmak üzere dört farklı hücresel çekirdek tipinde sandviç panel yapılarını SolidWorks ortamında sayısal olarak tasarlamıştır. Numuneler üzerinde, ASTM C393/C393M standardına uygun olarak üç noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Aynı numune için uygun sınır koşulları tanımlanarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sayısal veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal bulguların birbiriyle tutarlı olduğunun görülmesinin ardından, farklı hücre tiplerine sahip sandviç panel modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin, hücresel geometriye bağlı olarak eğilme yüklemesi altındaki mekanik davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle

değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, aynı kütle ve temel boyutlara sahip sandviç paneller arasında bal peteği hücre yapılı çekirdekli sandviç panelin en yüksek eğilme mukavemeti gösterdiğini ortaya koymuştur.

Palomba vd. (2019), destekler arasındaki mesafenin numunelerin yorulma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla eğilme yorulma deneyleri gerçekleştirmiştir. Farklı destek açıklıkları altında meydana gelen hasar mekanizmaları sunulmuştur. 55–85 mm destek mesafesi aralığında test edilen numunelerde; yüzey tabakasında yerel ezilmeler, delaminasyon, çekirdek kayması ve çekirdek kırılması gibi hasar türleri belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Bu destek aralığında yüzey tabakası kırılması tespit edilmezken, 100–130 mm destek açıklığına sahip numunelerde yüzey tabakası kırılmasının meydana geldiği görülmüştür.

Tablo 2. Bal peteği çekirdekli sandviç yapılar üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmalarının karşılaştırılması

Yazar	İncelene Parametre	Test/Yöntem	Temel Bulgular
Paik vd. (1999)	Hücre yüksekliği ve hücre genişliği	Teorik ve deneysel	Hücre yüksekliğinin artması ve hücre genişliğinin azalması mukavemeti artırmıştır.
Belouettar vd. (2009)	Çekirdek yoğunluğu	Dört nokta eğilme	Çekirdek yoğunluğu arttıkça rijitlik ve maksimum yük artmıştır.
Sun vd. (2017)	Çekirdek kalınlığı	ASTM C393 üç nokta eğilme	Çekirdek kalınlığının artması maksimum yükü yaklaşık iki kat artırmıştır.
Gpoichand vd. (2013)	Hücre duvar kalınlığı	Üç nokta eğilme + SEA	Hücre duvar kalınlığının artması eğilme mukavemetini yükseltmiştir.
Jen vd. (2009)	Yapıştırıcı miktarı	Deneysel + Sayısal	Yapıştırıcı miktarının artması rijitlik ve yorulma performansını artırmıştır.
Krenk vd. (1996)	Yapıştırıcı kalınlığı	Deneysel + SEM	Kalın yapıştırıcı tabakası daha yüksek bağlantı mukavemeti sağlamıştır.
Boutar vd. (2018)	Yapıştırıcı kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğu	Yorulma testleri	Optimum yapıştırıcı kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğu yorulma ömrünü artırmıştır.
Jen vd. (2009)	Yüzey levhası kalınlığı	Dört nokta eğilme yorulması	Yüzey levhası kalınlığı arttıkça yorulma ömrü artmıştır.
Xu vd. (2024)	Yüzey levhası kalınlığı	Eğilme testleri	Kalınlığın artması eğilme mukavemetini artırmış, ancak enerji yutma kapasitesini azaltmıştır.
Ercan vd. (2018)	Hücre geometrisi	ASTM C393 + SEA	Bal peteği çekirdekli yapı en yüksek eğilme mukavemeti göstermiştir.
Palomba vd. (2019)	Destek açıklığı	Eğilme yorulması	Parametrelerin mukavemet, ağırlık ve maliyet üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmiştir.

Özetlenen çalışmalar ışığında, ağırlık ve maliyet açısından önemli avantajlar sunma potansiyeline sahip bal peteği sandviç kompozit panellerde yüzey levhası asimetrisinin kullanımının literatürde yeterli düzeyde ele alınmadığı ve bu alanda daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarında asimetrik yüzey levhalarının tercih edilmesi, özellikle ağırlık optimizasyonu

bakımından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, yapıların dış aerodinamik basınçlar veya tek taraflı farklı termal yükler gibi homojen olmayan yükleme koşullarına maruz kaldığı durumlarda daha da kritik hale gelmektedir. Böylece rijitlik ve dayanım özelliklerinin belirli bölgelere özgü olarak hassas biçimde uyarlanması mümkün olmakta ve tüm yapının gereksiz yere aşırı tasarlanmasının önüne geçilmektedir.

Bu bağlamda, yüzey levhası asimetrisinin etkisinin çekirdek kalınlığı, yapıştırıcı türü ve yapıştırıcı miktarı gibi parametrelerle birlikte kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla çok faktörlü bir çalışmanın gerçekleştirilmesi gerekli görülmektedir. Mevcut çalışmanın temel amacı da bu gerekliliği karşılamaktır. Bu doğrultuda yüzey levhalarında 5754-H22 alüminyum alaşımı, bal peteği çekirdek yapısında ise 3005-H19 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı yapıştırıcı türü (epoksi esaslı SDF 1210A83AB ve poliüretan esaslı Pur Plus 4/1), üç farklı çekirdek kalınlığı (10, 20 ve 30 mm), üç farklı yapıştırıcı miktarı (7,5; 15 ve 22,5 g) ve üç farklı yüzey levhası kalınlığı (1, 1,5 ve 2 mm) kullanılarak çeşitli numune konfigürasyonları üretilmiştir.

Üretilen numuneler öncelikle statik yük altında üç noktalı eğme testine tabi tutulmuş ve bu deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda yorulma yükleme parametreleri belirlenerek yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra, elde edilen sonuçların doğrulanması ve yapısal davranışın daha kapsamlı biçimde incelenebilmesi amacıyla numuneler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Son olarak elde edilen bulgular maksimum yük taşıma kapasitesi, yorulma performansı, ağırlık ve maliyet kriterleri açısından detaylı şekilde analiz edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Geometrik Detaylar ve Malzeme Özellikleri

Bal peteği kompozit panellerin geometrik tasarımı, mekanik performansın incelenebilmesine olanak sağlayacak şekilde ASTM C393 (ASTM, 2020) standartına göre belirlenmiştir. Bu kapsamda panellerin boyutları 200 mm uzunluk ve 75 mm genişlik olacak şekilde belirlenmiştir. Çekirdek (core) yapı, farklı kalınlıkların yapısal davranış üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla 10 mm, 20 mm ve 30 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta seçilmiştir. Bal peteği geometrisine ait hücresel yapı parametreleri sabit olup, tek bir hücrenin genişliği 6,78 mm, hücre duvar kalınlığı ise 0,06 mm' dir. Bu geometrik parametreler, hafiflik–mukavemet dengesini optimize etmek ve yük aktarım mekanizmalarının karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesini sağlamak amacıyla seçilmiştir.

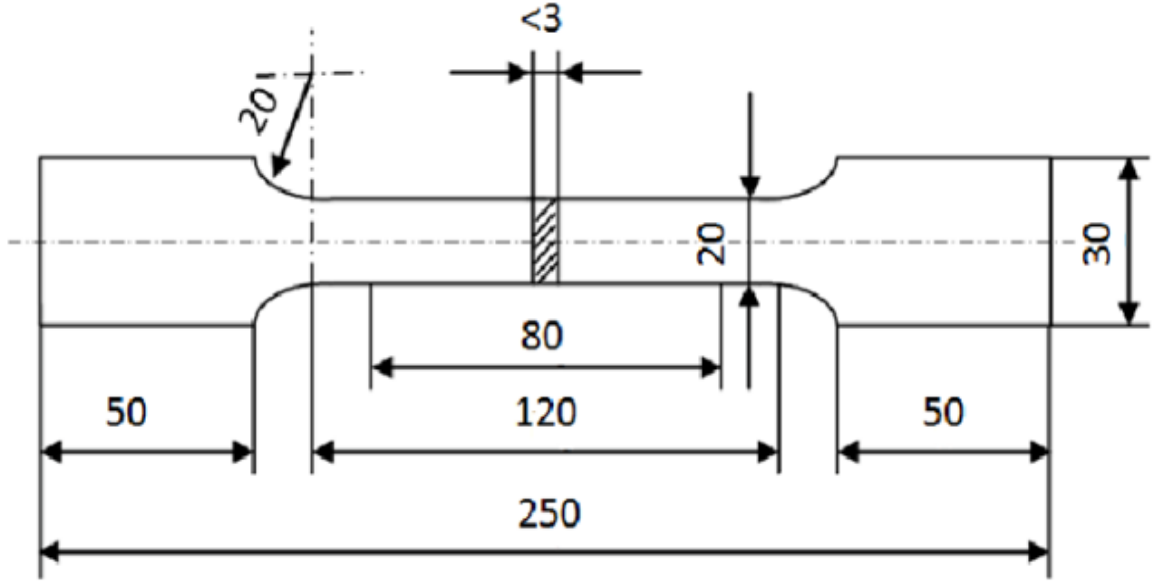
Panelin üst ve alt yüzey levhaları, yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerin incelenebilmesi amacıyla 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta seçilmiştir. Yüzey levhalarında, yüksek özgül dayanım, iyi şekillendirilebilirlik ve üstün korozyon direnci özellikleri dikkate alınarak 5754-H22 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Bal peteği çekirdek yapısında ise, özellikle ince levha formunda iyi mekanik performans sergilemesi ve hücresel yapılarda yaygın kullanım potansiyeli nedeniyle 3005-H19 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Üst ve alt yüzey levhalarının çekirdek yapıya bağlanmasında iki farklı yapıştırıcı türü kullanılarak bağ dayanımının panel davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla epoksi esaslı 1210A83AB (SDF, İstanbul, Türkiye) ve poliüretan esaslı Pur Plus 4/1 (Altıgen, Konya, Türkiye) yapıştırıcılar tercih edilmiştir.

3.2. Çekme Deneyine Tabi Tutulacak Numunelerin Hazırlanması ve Test Prosedürleri

Bu çalışmada çekme deneyleri, AA 5754 H-22 alüminyum alaşımı kullanılan yapıştırıcı malzemeler için mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ISO 6892 ve ASTM D638 (ISO, 2019; ASTM, 2020) standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Standartta uygun olarak hazırlanan numuneler, belirlenen geometrik ölçülere ve yüzey kalitesine sahip olacak şekilde üretilmiş ve kontrollü çekme hızında test edilmiştir. Deney sırasında elde edilen gerilme-şekil

değiştirme eğrileri kullanılarak malzemenin akma gerilmesi, maksimum çekme dayanımı ve elastik modülü gibi mekanik özellikleri güvenilir ve karşılaştırılabilir bir biçimde belirlenmiştir.



Şekil 16. ISO 6892 standardına göre çekme deneyi numune boyutları (Moeni vs. 2017)

Alüminyum yüzey plakaları, Şekil 16’da gösterilen standartlara uygun olarak istenilen formda seçilmiş ve üç adet 1 mm kalınlığında ile üç adet 2 mm kalınlığında yüzey levhasından numuneler hazırlanarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Instron 8801 mekanik test cihazında 1 mm/dakika çekme hızıyla test edilmiştir.



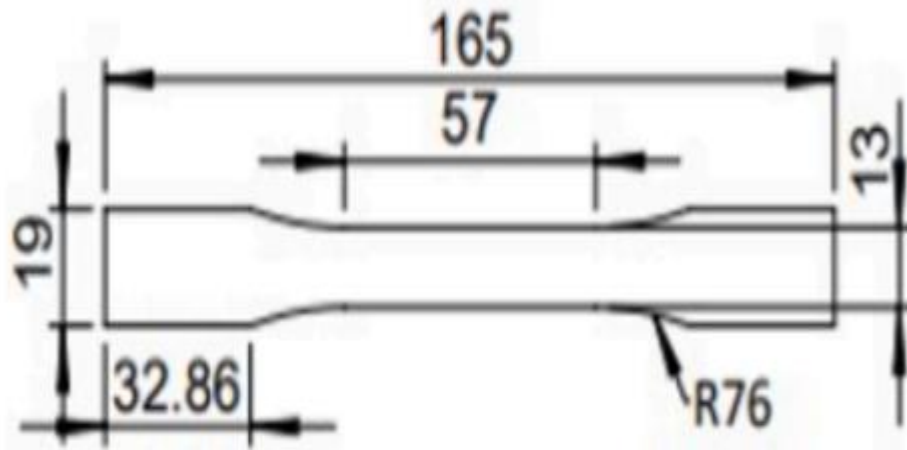
Şekil 17. ISO 6892 standardına göre hazırlanan örnek çekme numunesi

Şekil 17’de, ISO 6892 çekme testi standardına uygun boyutlarda seçilmiş alüminyum yüzey plakalarından elde edilen numunenin, çekme deneyine tabi tutulmadan önceki durumu detaylı

bir şekilde gösterilmektedir. Şekil 18’de ise aynı numunenin çekme testi sırasında maruz kaldığı deformasyonun gözlemlenebildiği aşama sunulmakta olup, malzemenin elastik ve plastik davranışının yanı sıra çatlama ve boyuna uzama gibi mekanik davranışları görsel olarak incelenebilmektedir. Tablo 2’de deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 18. Testler için kullanılan İnstron test cihazı



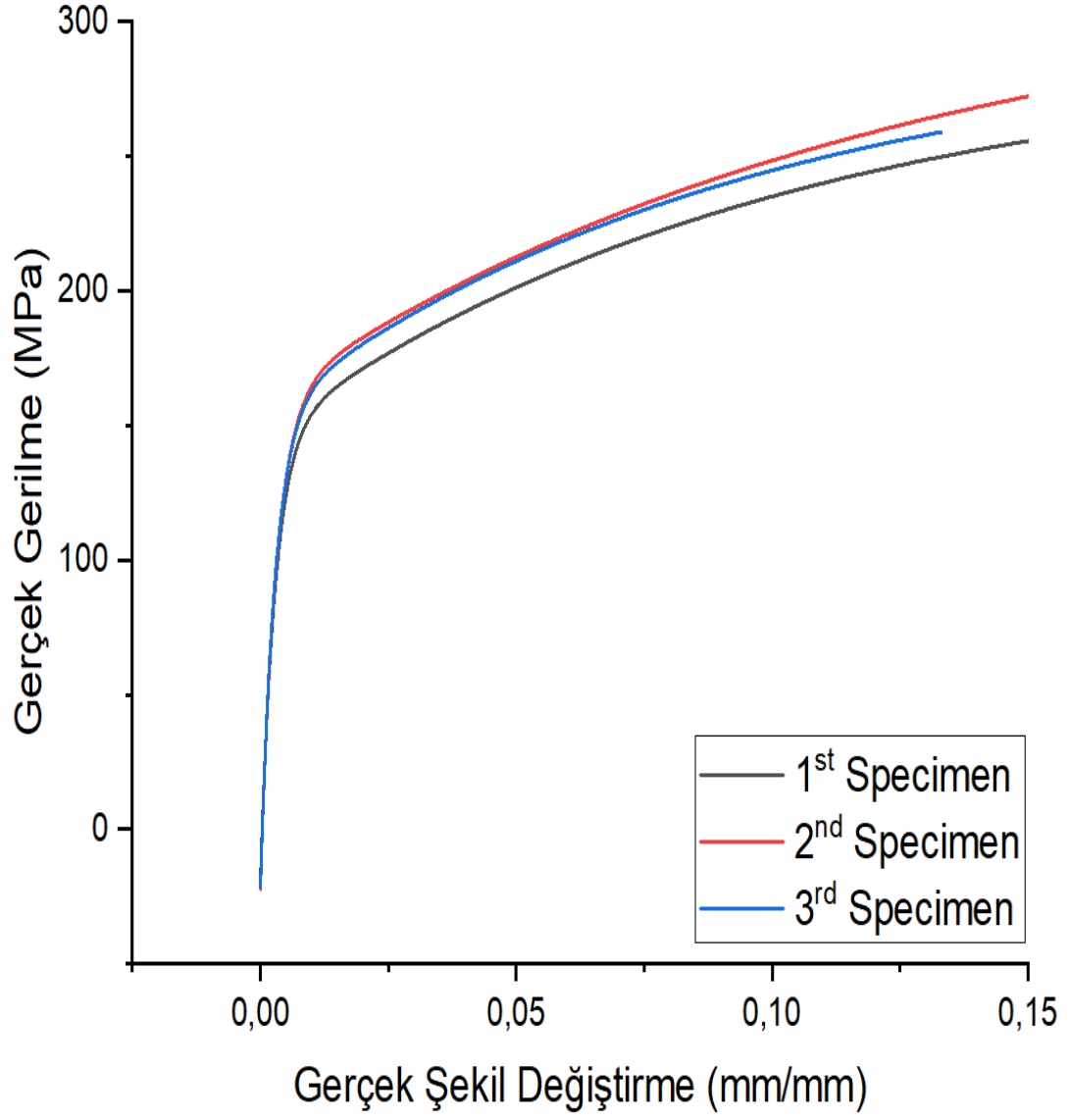
Şekil 19. ASTM D638 standardına göre çekme deneyi numune boyutları (Mannino vs. 2025)

Yapıştırıcı numuneleri, Şekil 19’da ASTM D638 standartlarında belirtilen geometrik ölçülere ve şekle uygun olarak üretilmiş ve 3 adet numune hazırlanarak çekme deneyleri için hazır hale getirilmiştir. Deneyler, yapıştırıcının mekanik davranışını doğru bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, Shimadzu / EHF-LV005K2-010 mekanik test cihazında 1 mm/dakika sabit uzama hızıyla gerçekleştirilmiş ve numunelerin elastik ile plastik bölgelerdeki tepkileri ayrıntılı biçimde kaydedilmiştir.

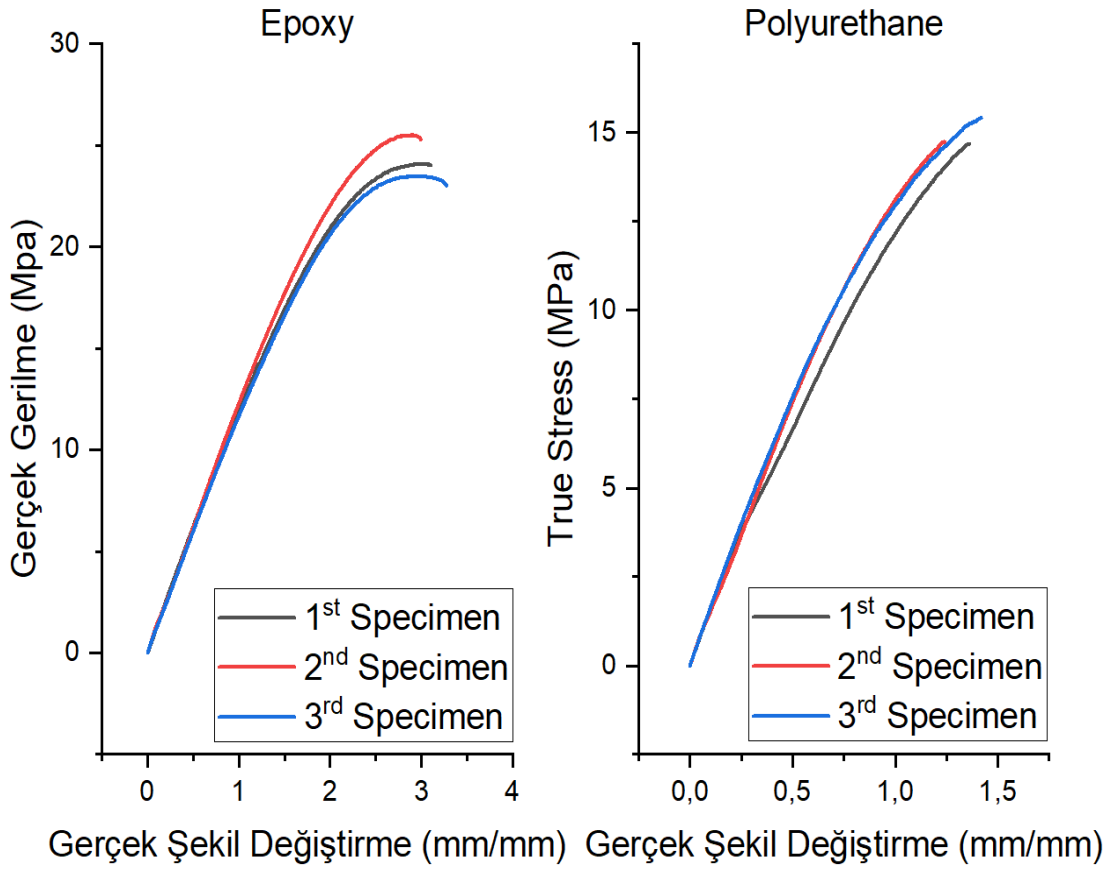
Standartlara uygun olarak gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda, hem AA 5754-H22 alüminyum alaşımı hem de kullanılan yapıştırıcı malzemelerin mekanik davranışları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve malzemelerin elastik, akma ve plastik deformasyon özelliklerini temsil eden gerçek gerilme–gerçek şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir; elde edilen bu deneysel veriler Şekil 20 ve Şekil 21’de grafiksel olarak sunulmuş olup, malzemelerin gerilme ile şekil değiştirme ilişkisini açık bir biçimde göstermektedir.

Tablo 3. Deneylerde kullanılan materyallerin mekanik özellikleri

	AA 5754-H22	AA 3005- H19 (Altıgen 2023)	1210A83AB	Pur Plus 4/1
E (GPa)	69.44±0.48	70.00	1.20±0.03	1.47±0.38
σ_y (MPa)	155.48±2.94	137.70	12.17±0.15	8.31±0.05
σ_u (MPa)	272.25±10.02	226.40	24.25±0.98	14.88±0.43



Şekil 20. AA 5754 H-22 için gerçek gerilme-gerinim grafiği



Şekil 21.1210A83AB ve Pur Plus 4/1 yapıştırıcılar için gerçek gerilim-gerinim grafiği

3.3. Deney Tasarımı

Deneyisel çalışma, araştırma sürecinin tekrarlanabilir bir çerçevede yürütülmesini sağlamak amacıyla deneysel parametrelerin etkilerinin kapsamlı bir biçimde incelenebilmesi için Deney Tasarımı (Design of Experiments, DOE) metodolojisi uygulanmıştır. Bu bağlamda, çalışmada toplam beş bağımsız parametre göz önünde bulundurulmuş ve her bir parametrenin deneysel sonuçlar üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesi için deney planı özenle oluşturulmuştur. Söz konusu parametreler şunlardır: yapıştırıcı tipi (SDF 1210A83AB ve Altıgen Pur Plus 4/1), çekirdek kalınlığı (10, 20 ve 30 mm), yapıştırıcı miktarı (7,5, 15 ve 22,5 g), üst yüzey levha kalınlığı (1, 1,5 ve 2 mm) ve alt yüzey levha kalınlığı (1, 1,5 ve 2 mm). Teorik olarak, tüm parametrelerin tam faktöriyel kombinasyonlarının değerlendirilmesi durumunda toplam 162 farklı deneysel konfigürasyon elde edilebilirdi. Bununla birlikte, her bir konfigürasyon için üçer tekrar deney yapılması gerekliliği, zaman ve maliyet açısından bu yaklaşımı pratik olmaktan uzak kılmakta ve kaynak verimliliğini düşürmektedir.

Bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve deneysel sürecin hem etkin hem de sistematik bir biçimde yürütülmesini sağlamak amacıyla, çalışmada Genelleştirilmiş Alt Küme Tasarımları (Generalized Subset Designs, GSD) (Surowiec vd., 2017) yöntemi benimsenmiştir. GSD yöntemi, özellikle çok seviyeli ve çok faktörlü deneylerde tam faktöriyel tasarımlara kıyasla daha az sayıda deney ile geniş kapsamlı ve güvenilir veri elde edilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım sayesinde deneysel parametrelerin ana etkileri ve etkileşimleri daha ayrıntılı ve güvenilir bir biçimde analiz edilebilmekte, böylece sistemin veya sürecin performansını etkileyen kritik faktörler kapsamlı bir şekilde ortaya konabilmektedir.

Elde edilen deneysel veriler, toplamda 54 farklı konfigürasyonu temsil eden Tablo 3’de sunulmuştur. Söz konusu tablo, yalnızca parametre kombinasyonlarını belgelemekle kalmayıp, aynı zamanda deneysel sonuçların karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine ve parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkilerinin görsel ve sayısal olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

Tablo 4. Deney tasarımı verileri

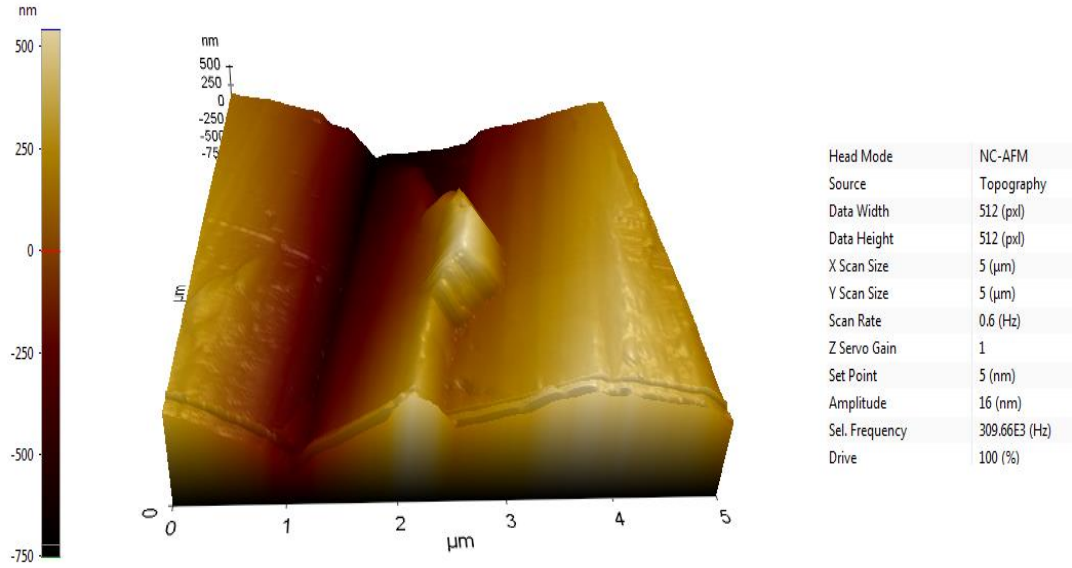
Konfigürasyon	Yapıştırıcı Türü	Çekirdek Kalınlığı (mm)	Yapıştırıcı Miktarı (g)	Üst Yüzey Plaka Kalınlığı (mm)	Alt Yüzey Plaka Kalınlığı (mm)
1	Epoksi	10	7,5	1	1
2	Epoksi	10	7,5	1,5	1,5
3	Epoksi	10	7,5	2	2
4	Epoksi	10	15	1	1,5
5	Epoksi	10	15	1,5	2
6	Epoksi	10	15	2	1
7	Epoksi	10	22,5	1	2
8	Epoksi	10	22,5	1,5	1
9	Epoksi	10	22,5	2	1,5
10	Epoksi	20	7,5	1	1,5
11	Epoksi	20	7,5	1,5	2
12	Epoksi	20	7,5	2	1
13	Epoksi	20	15	1	2
14	Epoksi	20	15	1,5	1
15	Epoksi	20	15	2	1,5
16	Epoksi	20	22,5	1	1
17	Epoksi	20	22,5	1,5	1,5
18	Epoksi	20	22,5	2	2
19	Epoksi	30	7,5	1	2
20	Epoksi	30	7,5	1,5	1
21	Epoksi	30	7,5	2	1,5
22	Epoksi	30	15	1	1
23	Epoksi	30	15	1,5	1,5
24	Epoksi	30	15	2	2
25	Epoksi	30	22,5	1	1,5
26	Epoksi	30	22,5	1,5	2
27	Epoksi	30	22,5	2	1
28	Poliüretan	10	7,5	1	1,5
29	Poliüretan	10	7,5	1,5	2
30	Poliüretan	10	7,5	2	1
31	Poliüretan	10	15	1	2
32	Poliüretan	10	15	1,5	1
33	Poliüretan	10	15	2	1,5
34	Poliüretan	10	22,5	1	1
35	Poliüretan	10	22,5	1,5	1,5
36	Poliüretan	10	22,5	2	2
37	Poliüretan	20	7,5	1	2
38	Poliüretan	20	7,5	1,5	1
39	Poliüretan	20	7,5	2	1,5
40	Poliüretan	20	15	1	1
41	Poliüretan	20	15	1,5	1,5
42	Poliüretan	20	15	2	2
43	Poliüretan	20	22,5	1	1,5
44	Poliüretan	20	22,5	1,5	2
45	Poliüretan	20	22,5	2	1
46	Poliüretan	30	7,5	1	1
47	Poliüretan	30	7,5	1,5	1,5
48	Poliüretan	30	7,5	2	2
49	Poliüretan	30	15	1	1,5
50	Poliüretan	30	15	1,5	2
51	Poliüretan	30	15	2	1
52	Poliüretan	30	22,5	1	2
53	Poliüretan	30	22,5	1,5	1
54	Poliüretan	30	22,5	2	1,5

3.4. Numunelerin Hazırlanması

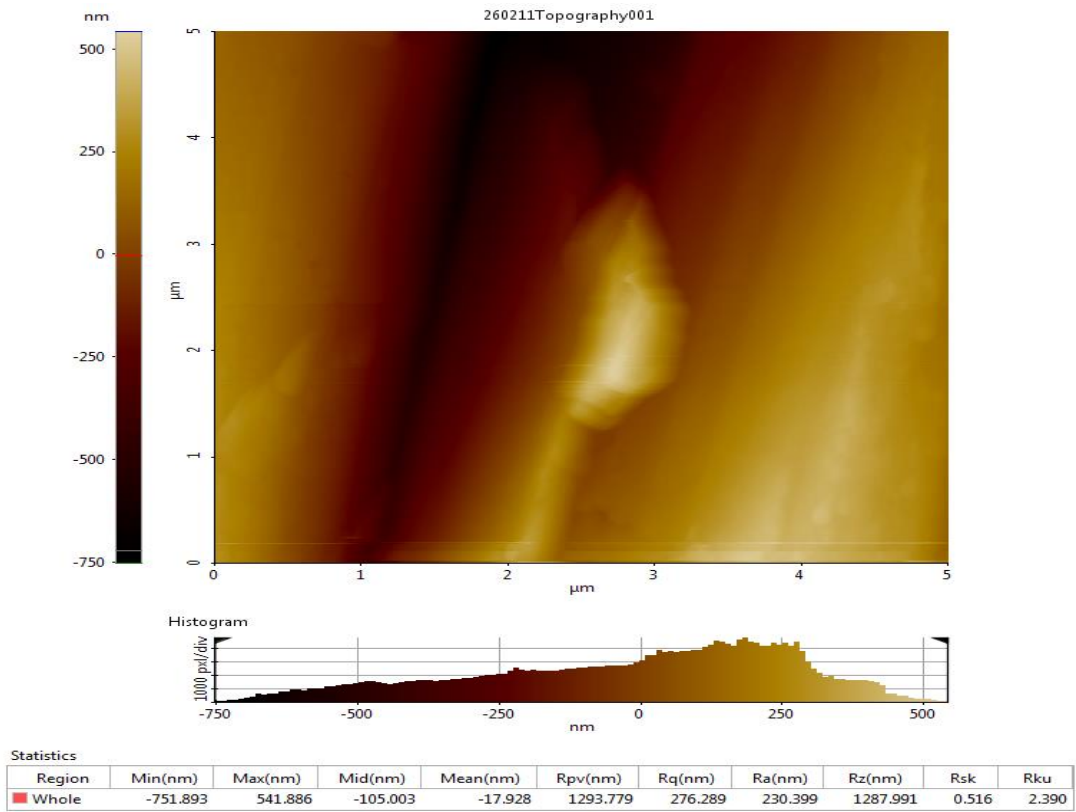
Üst yüzey levhası, bal peteği çekirdek yapı ve alt yüzey levhasının birleştirme işlemine başlanmadan önce, tüm bileşenler deney tasarımında belirlenen ölçülere uygun olacak şekilde hassas kesim işlemlerine tabi tutulmuş ve 200×75 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Yapıştırıcı–yüzey ara yüzey etkileşiminin iyileştirilmesi ve optimum mekanik mukavemetin elde edilmesi amacıyla, yüzey pürüzlülüğünün aderans performansı üzerindeki etkisini ortaya koymak için kapsamlı bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, çekirdek yapı ile temas edecek olan alt ve üst yüzey levhaları farklı yönelimlerde zımparalanarak çeşitli numune grupları oluşturulmuştur. Yüzeyler, 80, 400 ve 800 numara zımpara kâğıtları kullanılarak 0°, 45°, 90° ve çapraz yönlü 0°/90° açılarında mekanik yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur.

Gerçekleştirilen üç nokta eğme deneylerinden elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte kompozit sandviç panelin eğilme mukavemetinde belirgin bir iyileşme meydana geldiğini göstermiştir. Buna karşın, zımparalama açısının mekanik performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim oluşturmadığı belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular doğrultusunda, üretim sürecinde standart bir yüzey hazırlama yöntemi belirlenmiş ve çekirdek ile temas eden yüzey levhaları, yüksek aderans sağlamak amacıyla 80 numara zımpara kâğıdı kullanılarak 0° yönünde zımparalanmıştır.

Zımparalama işlemini takiben yüzey karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve oluşan mikro yapısal değişimler atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (Park Systems XE-100) ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEI Quanta FEG 450) kullanılarak detaylı biçimde incelenmiştir. NC-AFM çalışma modunda, 5×5 µm² tarama alanında gerçekleştirilen analizler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri 0,23 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 22 ve Şekil 23). Mikroyapısal incelemeler, yüzey üzerinde mikron boyutlarda belirgin çukur ve tepeciklerin oluştuğunu ortaya koymuş olup bu topografyanın yapıştırıcının yüzeye nüfuz etmesini kolaylaştırarak mekanik kilitlenme mekanizmasını güçlendirdiği değerlendirilmiştir.

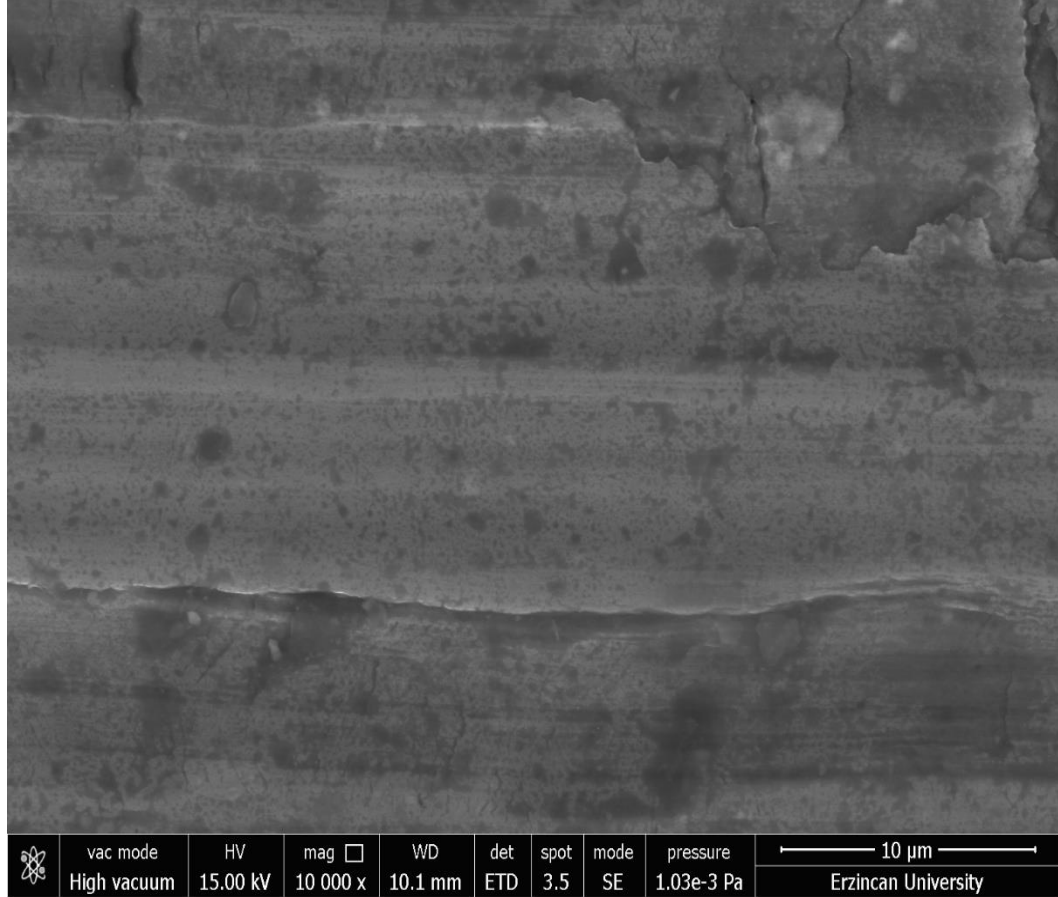


Şekil 22. 80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış plakanın AFM yüzey karakterizasyonu:
Tarama parametreleriyle topografik görüntü

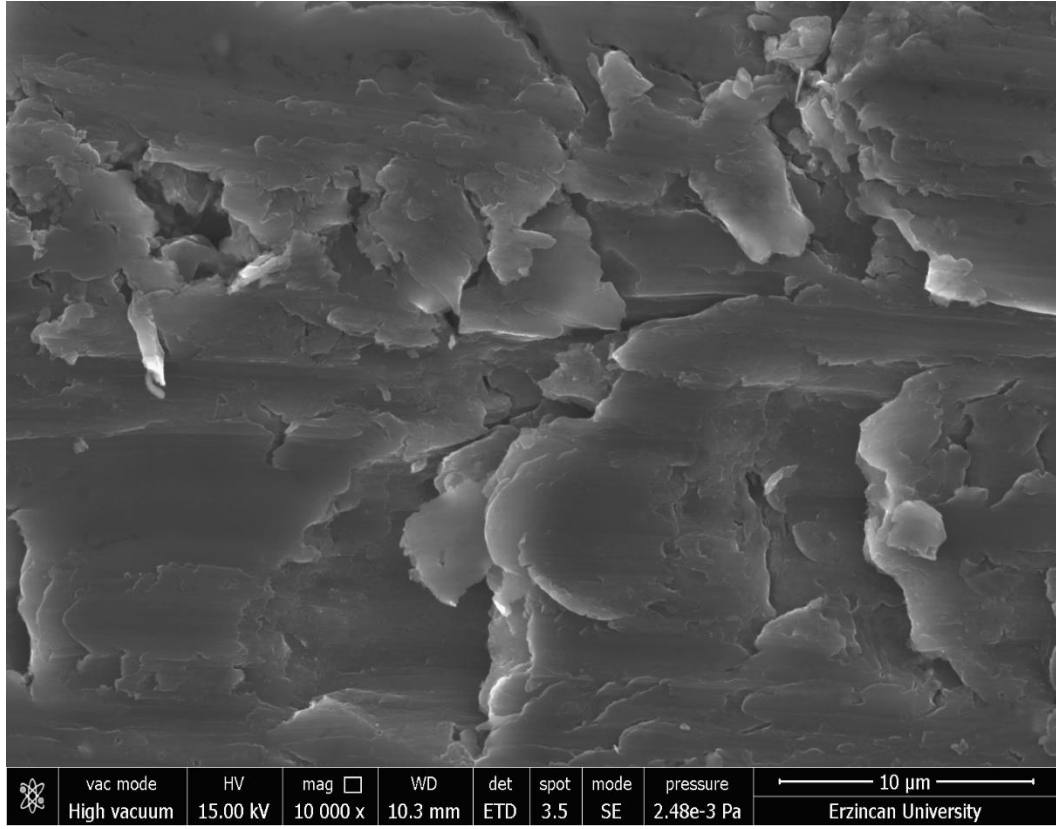


Şekil 23. 80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış plakanın AFM yüzey karakterizasyonu:
Yükseklik dağılım histogramı ve buna karşılık gelen yüzey pürüzlülüğü istatistikleri

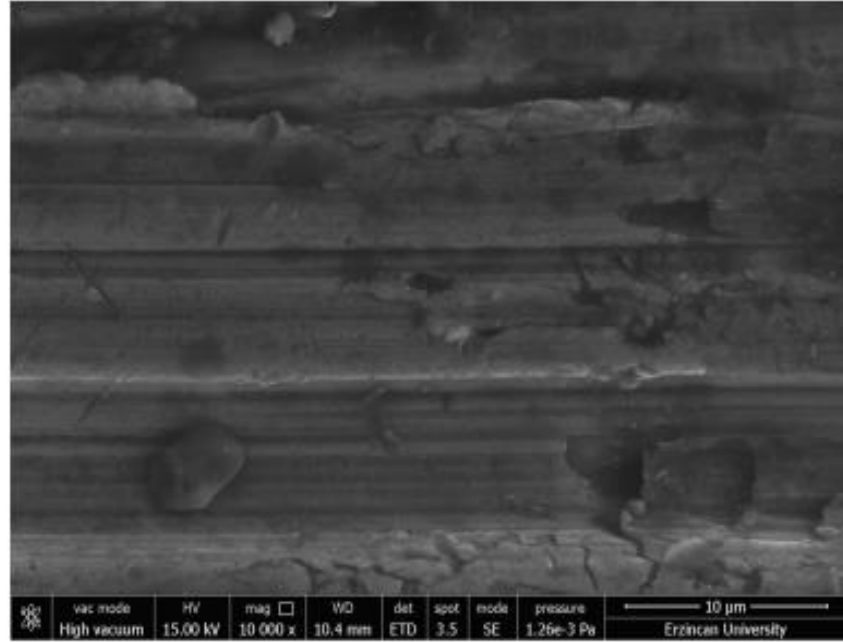
SEM görüntülerinde yüzey morfolojisi detaylı olarak gözlemlenmiş olup zımparalama işlemi sonrasında yüzey topografyasının belirgin şekilde değiştiği görülmüştür (Şekil 24). Zımparalanmamış yüzeye ait SEM görüntüsü Şekil A3'te sunulmuştur. Test sonrasında elde edilen SEM görüntülerinde yüzey üzerinde yapıştırıcı kalıntılarının bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 25).



Şekil 24. Zımparalanmamış yüzeyin SEM görüntüsü



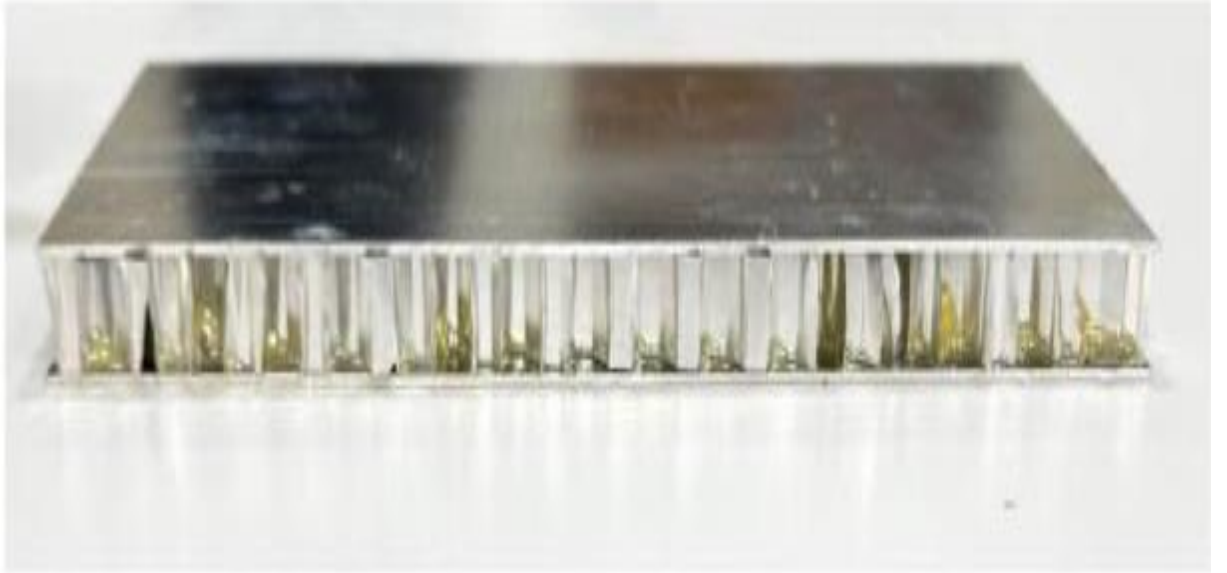
Şekil 25.80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış yüzeyin SEM görüntüsü



Şekil 26. 80'lik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış yüzeyin SEM görüntüsü; test sonrasında kalan yapıştırıcı kalıntısı

Yüzey işlemlerinin ardından numuneler, yüzey üzerinde kalabilecek yağ, kir, oksit tabakası ve zımparalama kaynaklı partikül kalıntılarının tamamen uzaklaştırılması amacıyla aseton ile dikkatlice temizlenmiş ve solventin tamamen buharlaşması için ortam koşullarında kurumaya bırakılmıştır. Epoksi esaslı yapıştırıcı sistemi, üretici teknik veri sayfasına uygun olarak yapıştırıcı ve sertleştirici bileşenleri ağırlıkça 1:1 oranında homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılarak hazırlanmıştır. İki bileşenli poliüretan esaslı yapıştırıcı ise üretici tavsiyeleri doğrultusunda 4:1 oranında hazırlanmış ve karışım süresi boyunca viskozite homojenliğinin sağlanmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan yapıştırıcılar, karıştırma işlemini takiben temizlenmiş yüzeylere kontrollü ve eşit kalınlıkta uygulanmıştır.

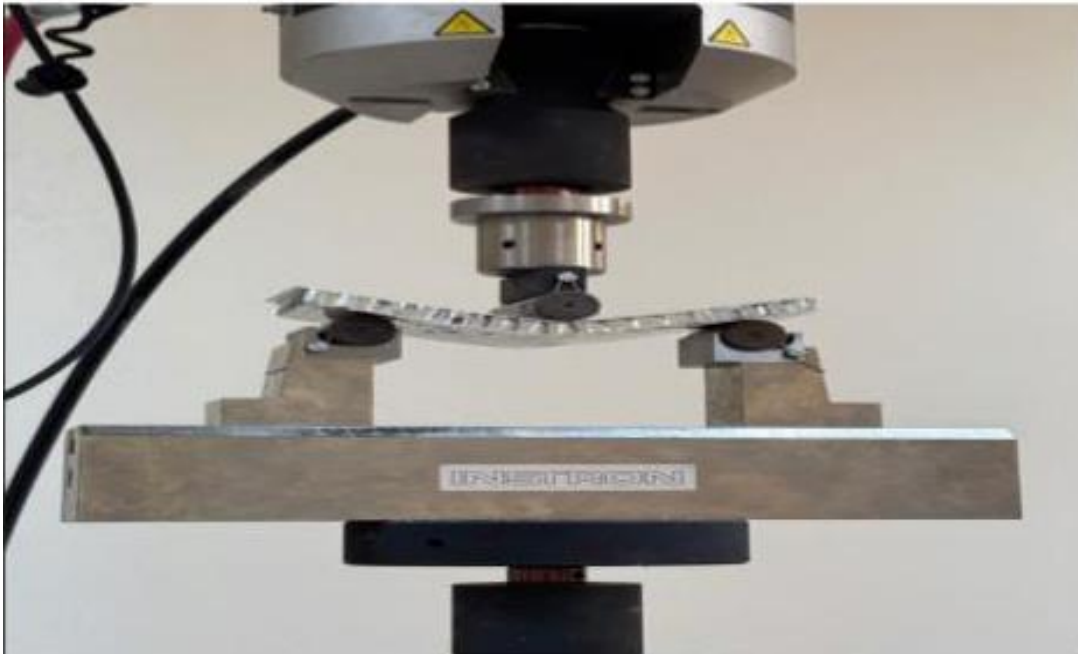
Yapıştırma işlemi, kürleşme kalitesini artırmak ve ara yüzey hatalarını minimize etmek amacıyla aşamalı bir üretim prosedürü izlenerek gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada üst veya alt yüzey levhası çekirdek yapı ile birleştirilmiş ve yeterli polimerizasyonun sağlanabilmesi için üç günlük bir kürleşme süresi uygulanmıştır. Bu sürenin tamamlanmasının ardından diğer yüzey levhası yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise yapıştırıcının tam kürleşmesini ve mekanik özelliklerinin stabil hale gelmesini sağlamak amacıyla üretilen tüm sandviç panel numuneleri eğme deneyleri öncesinde oda sıcaklığında ilave üç gün daha bekletilmiştir. Üretilen sandviç panel numunesinin genel görünümü Şekil 27’de sunulmaktadır.



Şekil 27. Üç nokta eğme deneyi için üretilmiş sandviç kompozit panel

3.5. Test Metodolojisi

Bu çalışmada kullanılan bal peteği sandviç yapılarının mekanik davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla eğilme deneyleri, ASTM International tarafından yayımlanan ASTM C-393 standardında belirtilen deney prosedürleri, numune yerleşimi ve yükleme koşulları esas alınarak gerçekleştirilmiştir (ASTM, 2020). Deneyler sırasında numunelerin yük altında gösterdiği deformasyon davranışı, maksimum eğilme dayanımı ve hasar gelişim mekanizmalarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla yüksek hassasiyetli ölçüm sistemlerine sahip Instron 8801 model servo-hidrolik test cihazı kullanılmıştır. Testler, standartta tanımlanan destek açıklığı ve yükleme hızına uygun olacak şekilde kontrollü deplasman modunda uygulanmış olup deney süresince yük ve yer değiştirme verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece sandviç kompozit panellerin eğilme performansı ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların standartlara uygunluğu sağlanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 28’de sunulmaktadır.



Şekil 28. Deney düzeneği

Destek açıklığı 150 mm olarak belirlenmiş ve tüm numuneler deneyler boyunca bu sabit destek mesafesi altında test edilmiştir. Destek ve yükleme noktalarında meydana gelebilecek yerel ezilmelerin ve gerilme yığılmalarının önüne geçilmesi, aynı zamanda deney sonuçlarının doğruluğunun artırılması amacıyla rijit silindirik makaralar kullanılmıştır. Kullanılan bu

makaralar, uygulanan yükün numune yüzeyine daha homojen bir biçimde aktarılmasını sağlayarak temas bölgelerinde oluşabilecek gerilme yoğunlaşmalarını minimize etmiş ve numune yüzeylerinde erken hasar oluşumunun engellenmesine katkı sağlamıştır. Deneyler kontrollü deplasman modunda gerçekleştirilmiş olup yükleme hızı 3 mm/dk olarak seçilmiştir. Bu yükleme hızı, sandviç yapıların elastik ve plastik deformasyon davranışlarının hassas bir şekilde gözlemlenmesine olanak tanırken aynı zamanda deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırmıştır. Her bir deney konfigürasyonu için üç adet numune test edilmiş ve deney süresince yük–yer değiştirme verileri sürekli olarak kayıt altına alınmıştır. Böylece numunelerin eğilme dayanımı, eğilme rijitliği ve hasar gelişim mekanizmaları ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Statik eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem epoksi esaslı yapıştırıcı hem de poliüretan esaslı yapıştırıcı kullanılan numune grupları arasında en yüksek taşıma kapasitesine ve eğilme dayanımına sahip konfigürasyonlar belirlenmiştir. Yorulma davranışının güvenilir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla çevrimsel yükleme deneyleri yalnızca bu optimum performans gösteren numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneylerinde uygulanacak yük seviyeleri, statik deneyler sonucunda elde edilen maksimum eğilme dayanımı yükü esas alınarak belirlenmiş ve yük seviyeleri maksimum yükün %80'i ile %60'ı arasında olacak şekilde kademeli olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde hem yüksek gerilme seviyelerinde hızlı hasar gelişimi hem de düşük gerilme seviyelerinde uzun çevrimli yorulma davranışı kapsamlı biçimde incelenebilmiştir.

Her bir yük seviyesi için beş adet numune test edilmiş ve deneyler boyunca çevrim sayısı, rijitlik değişimi, deformasyon birikimi ve nihai kırılma davranışı düzenli olarak izlenmiştir. Çevrimsel yükleme altında elde edilen deneysel veriler kullanılarak S–N (gerilme–çevrim sayısı) ilişkileri oluşturulmuş ve farklı yapıştırıcı türlerinin yorulma ömrü üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Deneysel çalışmaların yanı sıra, sandviç kompozit yapıların mekanik davranışının daha kapsamlı şekilde anlaşılabilmesi amacıyla sonlu elemanlar analizleri de gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemelerde yüzey levhaları, bal peteği çekirdek yapı ve yapıştırıcı ara yüzeyleri ayrı ayrı tanımlanmış; temas koşulları, malzeme özellikleri ve sınır şartları deneysel düzenek ile uyumlu olacak şekilde modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılarak model doğrulaması yapılmıştır.

4. BULGULAR

Elde edilen sonuçlar dört ana başlık altında sunulmuştur. İlk aşamada, kompozit sandviç panellerin deformasyon davranışı ile hasar oluşum ve ilerleme mekanizmalarına ilişkin bulgular ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda yük altında meydana gelen yer değiştirme karakteristikleri, hasar başlangıç bölgeleri ve kırılma modları değerlendirilerek yapıların mekanik tepkileri kapsamlı biçimde ortaya konulmuştur.

İkinci aşamada ise farklı tasarım parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan toplam 54 farklı deney konfigürasyonundan elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu karşılaştırmalar kapsamında eğilme dayanımı, rijitlik özellikleri ve hasar davranışları dikkate alınarak her bir konfigürasyonun performansı detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Üçüncü aşamada, yüzey levhası kalınlığı, çekirdek kalınlığı, yapıştırıcı türü ve yapıştırıcı miktarı gibi tüm tasarım parametrelerinin sandviç kompozit panel performansı üzerindeki etkileri hem bireysel olarak hem de birbirleriyle olan etkileşimleri açısından varyans analizi (ANOVA) yöntemi kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Böylece hangi parametrelerin mekanik performans üzerinde daha baskın rol oynadığı nicel olarak ortaya konulmuştur.

Son aşamada ise optimum tasarımın belirlenebilmesi amacıyla farklı senaryolar oluşturulmuş ve elde edilen deneysel ile istatistiksel bulgular birlikte değerlendirilerek en uygun tasarım konfigürasyonları analiz edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde sandviç kompozit paneller için performans-tasarım ilişkisi bütüncül bir bakış açısıyla ortaya konulmuştur.

4.1 Deformasyon Davranışı

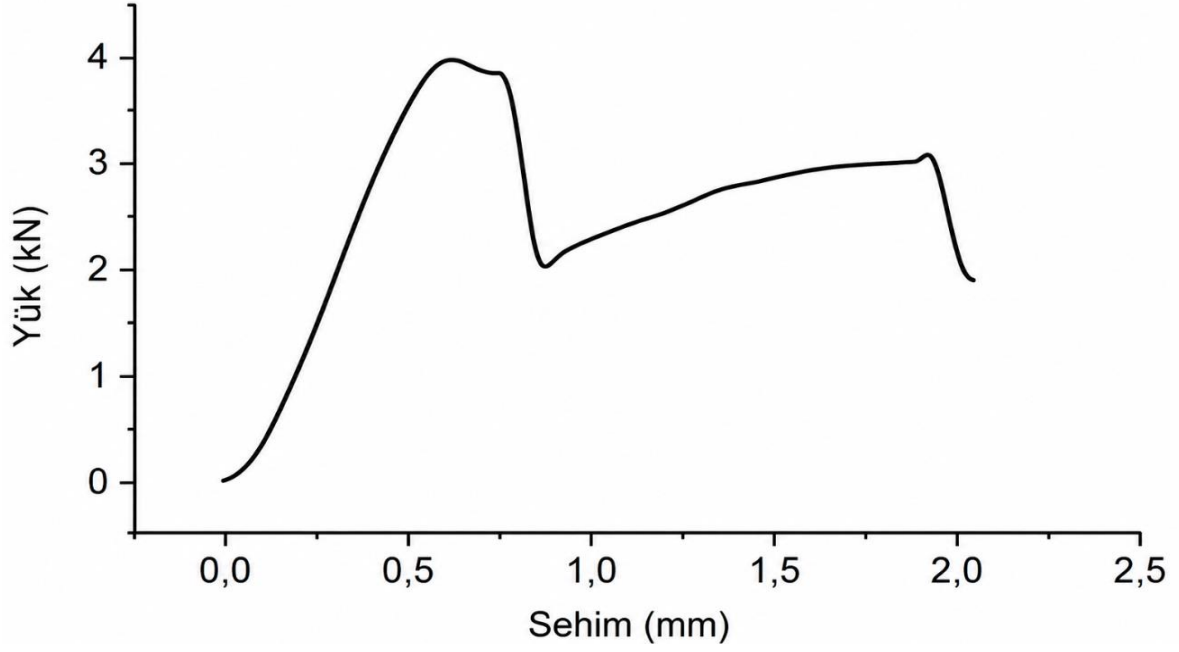
Çalışma kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar, kullanılan yapıştırıcı türünün sandviç kompozit yapıların mekanik performansı üzerindeki belirleyici etkisini daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek amacıyla epoksi ve poliüretan esaslı yapıştırıcılar olmak üzere iki ana kategori altında değerlendirilmiştir. Numunelerin bu şekilde sınıflandırılması, özellikle yük aktarım mekanizması, ara yüzey bağ dayanımı, deformasyon kapasitesi ve hasar ilerleme karakteristikleri arasındaki farklılıkların karşılaştırmalı bir yaklaşımla analiz edilmesine olanak

sağlamıştır. Yapıştırıcı türünün yalnızca maksimum taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda hasarın başlangıç noktası, ilerleme yönü ve kırılma şekli üzerinde de önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda epoksi ve poliüretan yapıştırıcıların rijitlik, enerji sönümleme kapasitesi ve ara yüzey bağ dayanımı açısından farklı davranış sergilediği belirlenmiştir.

Şekil 29’da epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş kompozit sandviç panel numunesine ait tipik kuvvet–deformasyon davranışı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Eğilme yüklemesi altında epoksi yapıştırıcı kullanılan sandviç kompozit panellerde hasarın büyük ölçüde üst yüzey levhasından başladığı açıkça görülmektedir. Üç nokta eğme yüklemesi sırasında üst yüzey levhasında çekme gerilmelerinin yoğunlaşması sonucu ara yüzey bölgesinde gerilme birikimi oluşmakta ve bu durum ilk olarak levhanın sağ veya sol ucunda yerel ayrılma şeklinde kendini göstermektedir. Yük artmaya devam ettikçe ara yüzeyde oluşan çatlak ilerlemekte ve kısa bir süre sonra üst yüzey levhasının diğer ucunda da benzer bir ayrılma meydana gelmektedir. Bu hasar gelişim mekanizması Şekil 30’da ayrıntılı biçimde gösterilmektedir.

Kuvvet değeri maksimum seviyesine ulaştığında, üst yüzey levhasının bir ucunun bal peteği çekirdek yapıdan ayrılması ile birlikte kuvvet–deformasyon eğrisinde ani ve belirgin bir yük kaybı meydana gelmektedir. Epoksi yapıştırıcının yüksek rijitliğe sahip olmasına karşın sınırlı plastik deformasyon kapasitesi göstermesi nedeniyle bu ayrılma süreci oldukça hızlı gerçekleşmekte ve gevrek karakterli bir hasar davranışı ortaya çıkmaktadır. Ayrılmanın ardından sistemde kalan temas bölgeleri sayesinde sınırlı bir yük aktarımı devam edebilmekte ve bu nedenle kuvvette kısa süreli bir toparlanma veya artış gözlemlenmektedir. Ancak deformasyonun ilerlemesiyle birlikte üst yüzey levhasının diğer ucunun da çekirdek yapıdan ayrılması sonucu ikinci bir kuvvet düşüşü meydana gelmekte ve bu aşamada üst levhanın bal peteği çekirdekten tamamen ayrıldığı anlaşılmaktadır.

Kuvvet–deformasyon eğrisinde gözlenen iki ayrı tepe noktası, üst yüzey levhasının her iki ucunda meydana gelen bu ardışık ayrılma anlarını temsil etmektedir. Bu durum epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan sandviç yapılarda yük taşıma kapasitesinin ani hasar mekanizmaları tarafından kontrol edildiğini göstermekte olup, hasarın ilerleyişinin çoğunlukla ara yüzey aderansının kırılması ile gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu davranış, epoksi yapıştırıcının yüksek başlangıç rijitliği sağlamasına rağmen, maksimum yük sonrasında hızlı bir mukavemet kaybı meydana geldiğini ve yapının görece daha gevrek bir kırılma karakteristiği sergilediğini açıkça göstermektedir.



Şekil 29. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin tipik kuvvet–deformasyon davranışı



Şekil 30. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin deformasyon davranışı

Buna karşılık, poliüretan esaslı yapıştırıcı kullanılarak üretilen sandviç kompozit panellerde epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelere kıyasla belirgin biçimde farklı bir deformasyon ve hasar davranışı ortaya çıkmaktadır. Poliüretan kullanılan kompozit sandviç panellere ait tipik kuvvet–deformasyon eğrisi Şekil 31’de sunulmaktadır. Epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılan numunelerde gözlenen ara yüzey ayrılmalarının aksine, poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerde hem üst yüzey levhasında hem de alt yüzey levhasında herhangi bir ayrılma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu durum, poliüretan yapıştırıcının daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olması ve yük altında ara yüzey gerilmelerini daha etkin bir şekilde absorbe edebilmesi ile ilişkilendirilmektedir. Böylece yük aktarımı boyunca yüzey levhaları ile bal peteği çekirdek arasındaki bağ bütünlüğü korunmuş ve hasarın ara yüzey yerine çekirdek yapı içerisinde geliştiği gözlemlenmiştir.

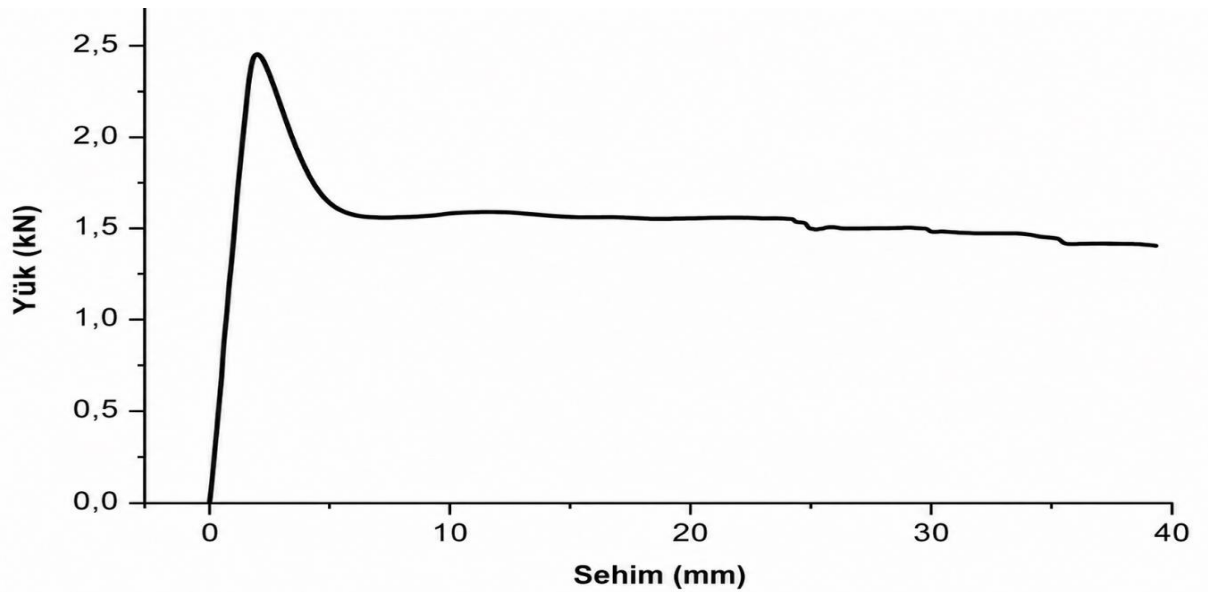
Eğilme yüklemesi altında meydana gelen hasarın temel olarak bal peteği çekirdek yapı kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Yük artışıyla birlikte çekirdek hücre duvarlarında yerel burkulmalar, ezilmeler ve hücre geometrisinin bozulmasına bağlı plastik deformasyonlar oluşmuş, bu durum hasarın kademeli ve kontrollü bir şekilde ilerlemesine neden olmuştur. Kuvvet maksimum değerine ulaştıktan sonra çekirdek bölgede meydana gelen bu hasar mekanizmalarına bağlı olarak kuvvette sınırlı ve kademeli bir azalma meydana gelmiştir. Ancak epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelerde gözlenen ani ve keskin yük düşüşlerinin aksine, poliüretan kullanılan numunelerde yük taşıma kapasitesinin büyük ölçüde korunarak devam ettiği görülmüştür. Bu davranış, poliüretan yapıştırıcının sünek karakteri sayesinde ara yüzeyde ani kırılmaların oluşmasını engelleyerek sistemin enerji sönmeme kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Yük–sehim eğrileri altında kalan alanlar enerji yutma kapasitesini temsil etmektedir. Epoksi yapıştırıcılı numune daha yüksek maksimum yük taşımasına rağmen yaklaşık 2 mm sehim seviyesinde göçme davranışı sergilemiştir. Poliüretan yapıştırıcılı numune ise maksimum yük değeri daha düşük olmasına rağmen yaklaşık 40 mm'ye kadar yük taşımaya devam etmiş ve daha kararlı bir deformasyon davranışı göstermiştir. Bu durum, poliüretan yapıştırıcının daha sünek bir davranış sergileyerek hasar sonrası yük taşıma kabiliyetini koruduğunu ve daha yüksek enerji yutma kapasitesi sağladığını göstermektedir. Epoksi yapıştırıcı mukavemet açısından avantaj sağlarken, poliüretan yapıştırıcı hasar toleransı ve enerji absorpsiyonu açısından daha üstün bir performans göstermiştir. Bu nedenle uygulamaya bağlı olarak yüksek taşıma kapasitesi gerektiren yapılarda epoksi, darbe mukavemeti ve enerji yutma kapasitesinin

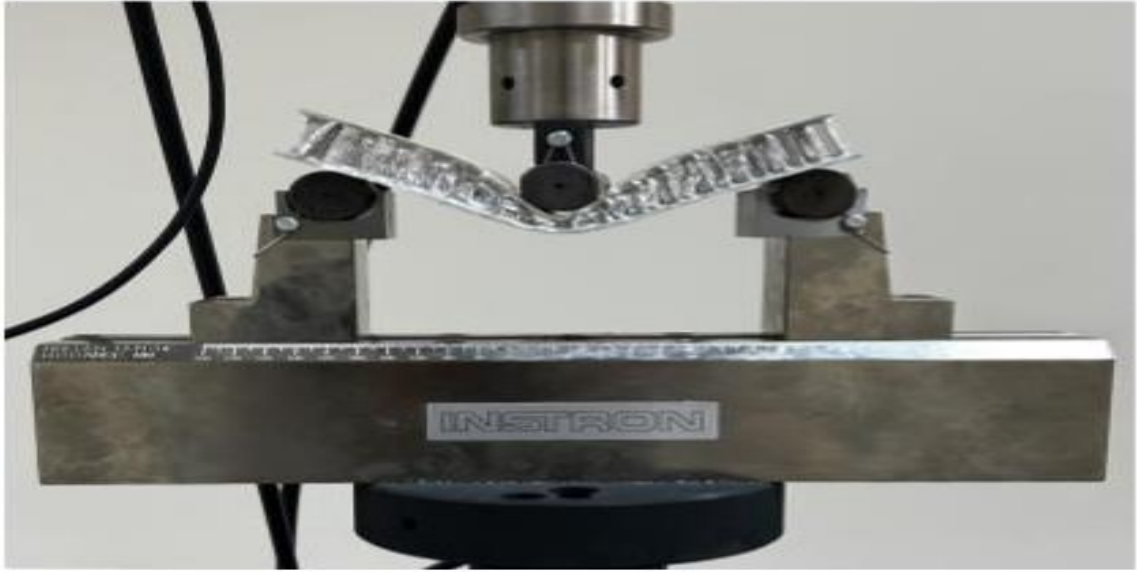
önemli olduğu uygulamalarda ise poliüretan yapıştırıcı daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Hasarın ilerleyen aşamalarında çekirdek yapıdaki ezilme ve yerel deformasyonlar artmasına rağmen kuvvet–deformasyon eğrisinin belirli bir seviyede devam ettiği ve yük taşıma kapasitesinin tamamen kaybolmadığı gözlemlenmiştir. Numune tamamen eğilerek destek makaralarından kayıncaya kadar yükte yaklaşık sabit bir eğilim korunmuş olup bu durum yapının ani kırılma yerine stabil bir deformasyon süreci geçirdiğini göstermektedir. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan panellerde gözlenen bu davranış, yapının yük altında daha uzun süre bütünlüğünü koruyabilmesine olanak sağlamıştır.

Sonuç olarak, epoksi ve poliüretan yapıştırıcı ile güçlendirilmiş kompozit sandviç panellerin deformasyon ve hasar davranışları birlikte değerlendirildiğinde, poliüretan esaslı yapıştırıcının panelin yapısal bütünlüğünün korunması açısından daha avantajlı bir seçenek olduğu belirlenmiştir. Poliüretan yapıştırıcının yüksek deformasyon kabiliyeti, enerji sönmeme kapasitesi ve ara yüzey gerilmelerini dağıtabilme yeteneği sayesinde hasarın ani ve gevrek kırılma şeklinde değil, kontrollü ve ilerleyici bir mekanizma ile gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu özellikler özellikle darbe yükleri, tekrarlı yüklemeler ve servis koşullarında güvenilirlik gerektiren uygulamalar açısından poliüretan esaslı sistemlerin daha sürdürülebilir bir mekanik performans sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 31. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin tipik kuvvet–deformasyon davranışı



Şekil 32. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş bir kompozit sandviç panelin deformasyon davranışı

4.2. Statik Deneyler Sonucu Elde Edilen Bulgular

Epoksi kullanılan numunelerde üst yüzey levhasının tamamen ayrılmasıyla ve poliüretan kullanılan numunelerde maksimum yükten sonra kuvvetin doğrusal bir eğilim göstermesiyle deneysel süreç sonlandırılmıştır. Deneylerin sonlandırılmasına esas teşkil eden bu kriterler belirlenirken numunelerde meydana gelen yük taşıma kapasitesindeki belirgin değişimler, deformasyon davranışının sürekliliği ve yük altındaki genel yapısal tepki dikkate alınmış, böylece farklı yapıştırıcı türlerinin eğilme yükü altındaki performanslarının güvenilir ve karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Üç nokta eğme testleri boyunca elde edilen yük–deformasyon verileri düzenli aralıklarla kaydedilmiş ve numunelerin maksimum yük değerine ulaşıncaya kadar sergilediği davranış ile maksimum yük sonrasında meydana gelen taşıma kapasitesi değişimleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Deney süresince özellikle yüzey levhası ayrılması ve ara yüzey boyunca ilerleyen ayrılma oluşumları gözlemlenmiş, bu hasar oluşumlarının yük–deformasyon eğrilerine yansıyan etkileri deneysel verilerle birlikte değerlendirilerek sonuçların daha sağlıklı yorumlanması sağlanmıştır.

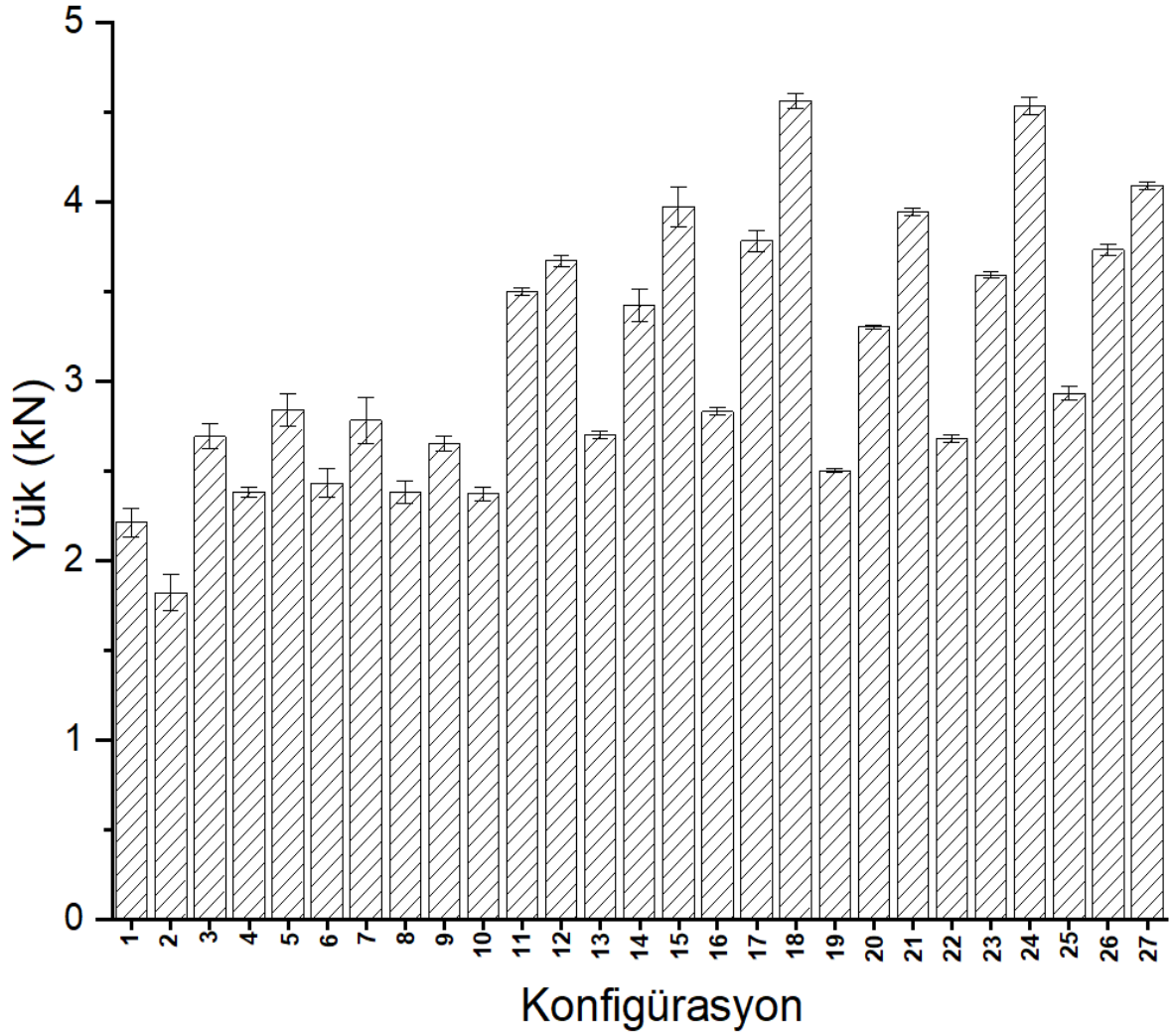
Bununla birlikte farklı numune konfigürasyonlarının eğilme yükü altında sergilediği deformasyon seviyeleri ve ulaşılan maksimum yük değerleri karşılaştırılarak üretim parametrelerinin deneysel sonuçlar üzerindeki etkileri ortaya konulmuş, elde edilen verilerin

tekrarlanabilirliği ve tutarlılığı kontrol edilmiştir. Deneyler sırasında ölçüm sistemlerinden elde edilen veriler deney sonrasında ayrıntılı bir veri işleme sürecinden geçirilmiş, olası ölçüm hatalarının minimize edilmesi ve sonuçların güvenilirliğinin artırılması amacıyla gerekli kontroller gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen tüm veriler numunelerin yük taşıma kapasitesindeki değişimler değerlendirmelerin yapılmasına olanak sağlanmıştır. Ayrıca maksimum yük taşıma kapasitesine ait sayısal sonuçlar yalnızca grafiksel eğriler üzerinden değil, daha açık ve anlaşılır bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla tablo formatında da düzenlenmiştir. Bu kapsamda numunelere ait maksimum yük değerleri, deney koşulları altında elde edilen ölçümler esas alınarak karşılaştırmalı biçimde sınıflandırılmış ve performans farklılıklarının nicel olarak ortaya konulabilmesi amacıyla Tablo 4'te ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

Tablo 4'te verilen maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri sayesinde farklı numunelerin eğilme yükü altındaki performansları doğrudan karşılaştırılabilmiş, elde edilen sayısal veriler grafiksel sonuçlarla birlikte değerlendirilerek deneysel bulguların yorumlana bilirliliği artırılmıştır. Böylece grafiksel sunumlar ile tablosal verilerin birbirini desteklemesi sağlanmış ve farklı yapıştırıcı türlerinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri daha açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak sunulması, deneysel çalışmanın bütünlüğünü güçlendirmiş ve farklı numune davranışlarını daha net bir şekilde değerlendirebilmesine imkân sağlamıştır. Epoksi kullanılarak üretilen kompozit sandviç plakaların üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen bulgular, karşılaştırmalı bir şekilde Şekil 33 ve Şekil 34'te sunulmaktadır.

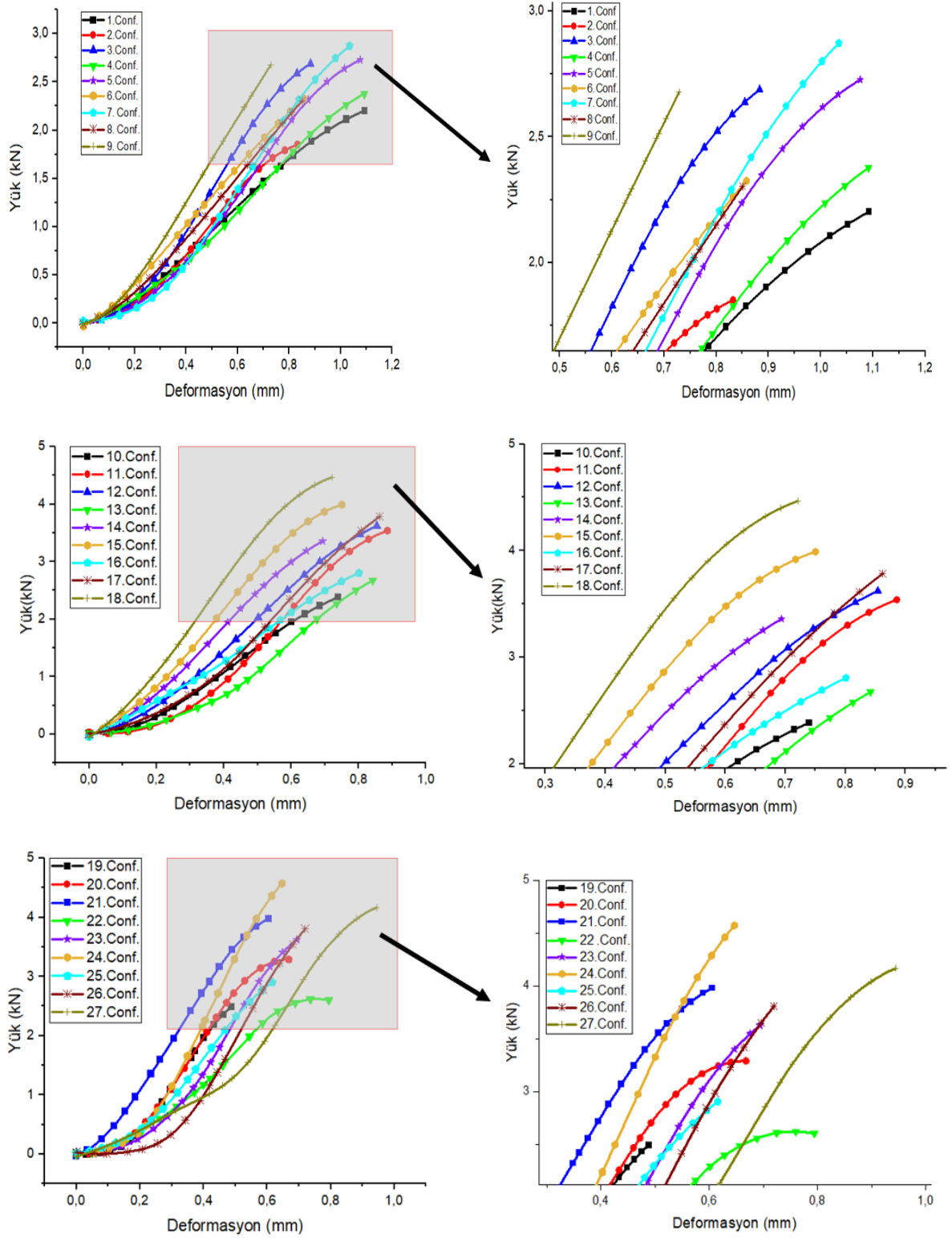
Tablo 5. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak üretilen kompozit sandviç panellerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri

Konfigürasyon	1.Numune (N)	2.Numune (N)	3.Numune (N)	Ort. Kuvvet (N)
1	2216	2309	2107	2210
2	1899	1883	1682	1821
3	2770	2608	2699	2692
4	2416	2363	2356	2378
5	2791	2763	2974	2842
6	2353	2515	2433	2434
7	2853	2883	2602	2779
8	2317	2443	2381	2380
9	2684	2612	2645	2648
10	2316	2406	2402	2374
11	3481	3525	3502	3502
12	3632	3698	3664	3665
13	2685	2725	2690	2700
14	3381	3332	3534	3415
15	4103	3828	3970	3967
16	2806	2820	2860	2828
17	3849	3712	3785	3782
18	4528	4522	4619	4556
19	2493	2522	2489	2501
20	3297	3313	3290	3300
21	3929	3959	3992	3944
22	2663	2668	2713	2681
23	3590	3575	3618	3594
24	4543	4460	4582	4528
25	2975	2912	2892	2926
26	3689	3754	3761	3734
27	4065	4106	4084	4085



Şekil 33. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelere ait maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması

Epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğme testleri sonucunda elde edilen deneysel verilere göre, incelenen konfigürasyonlar arasında maksimum yük taşıma kapasitesi bakımından farklı değerler kaydedilmiştir. Test sonuçları doğrultusunda konfigürasyon 18'in deney kapsamında elde edilen numuneler arasında en yüksek maksimum yük değerine ulaştığı, konfigürasyon 2'nin ise en düşük maksimum yük seviyesini gösterdiği belirlenmiştir. Çekirdek kalınlığı 20 mm, yapıştırıcı miktarı 22.5 g ve üst ile alt yüzey plaka kalınlığı 2 mm olan konfigürasyon 18, üç nokta eğme testi sonucunda 4,56 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Buna karşılık çekirdek kalınlığı 10 mm, yapıştırıcı miktarı 7.5 g ve üst ile alt yüzey plaka kalınlığı 1.5 mm olarak üretilen konfigürasyon 2'nin aynı test koşulları altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda 1.82 kN maksimum yük seviyesine ulaştığı kaydedilmiştir.

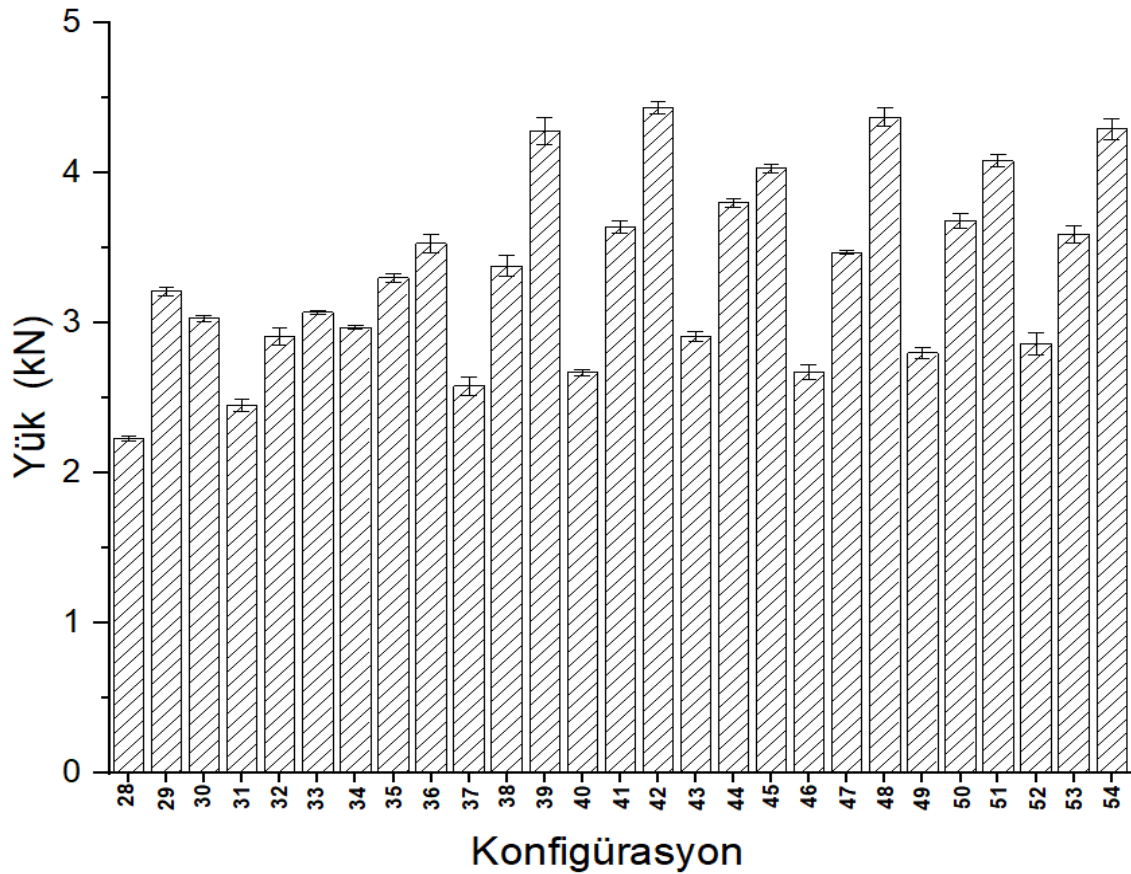


Şekil 34. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelere ait yük–deformasyon eğrileri

Şekil 35 ve Şekil 36, poliüretan kullanılan kompozit sandviç panellerin üç nokta eğme testleri sonucunda elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak sunulduğu sonuçları göstermektedir. Test sonuçları incelendiğinde, değerlendirilen numune konfigürasyonları arasında maksimum

yük taşıma kapasitesi bakımından belirgin farklılıklar olduğu görülmüştür. Elde edilen verilere göre konfigürasyon 42'nin incelenen numuneler arasında en yüksek maksimum yük değerine ulaştığı, konfigürasyon 28'in ise en düşük maksimum yük seviyesini gösterdiği belirlenmiştir.

Çekirdek kalınlığı 20 mm, yapıştırıcı miktarı 15 g ve üst ile alt yüzey plaka kalınlığı 2 mm olan konfigürasyon 42, üç nokta eğme testi sırasında 4.43 kN maksimum yük değerine ulaşmıştır. Buna karşılık çekirdek kalınlığı 10 mm, yapıştırıcı miktarı 7.5 g, üst yüzey plaka kalınlığı 1 mm ve alt yüzey plaka kalınlığı 1.5 mm olan konfigürasyon 28'in ise 2.23 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı kaydedilmiştir. Bununla birlikte farklı numune konfigürasyonlarına ait maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla sayısal olarak düzenlenmiş ve ilgili sonuçlar Tablo 5'te sunulmuştur.



Şekil 35. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelere ait maksimum yük değerlerinin karşılaştırılması

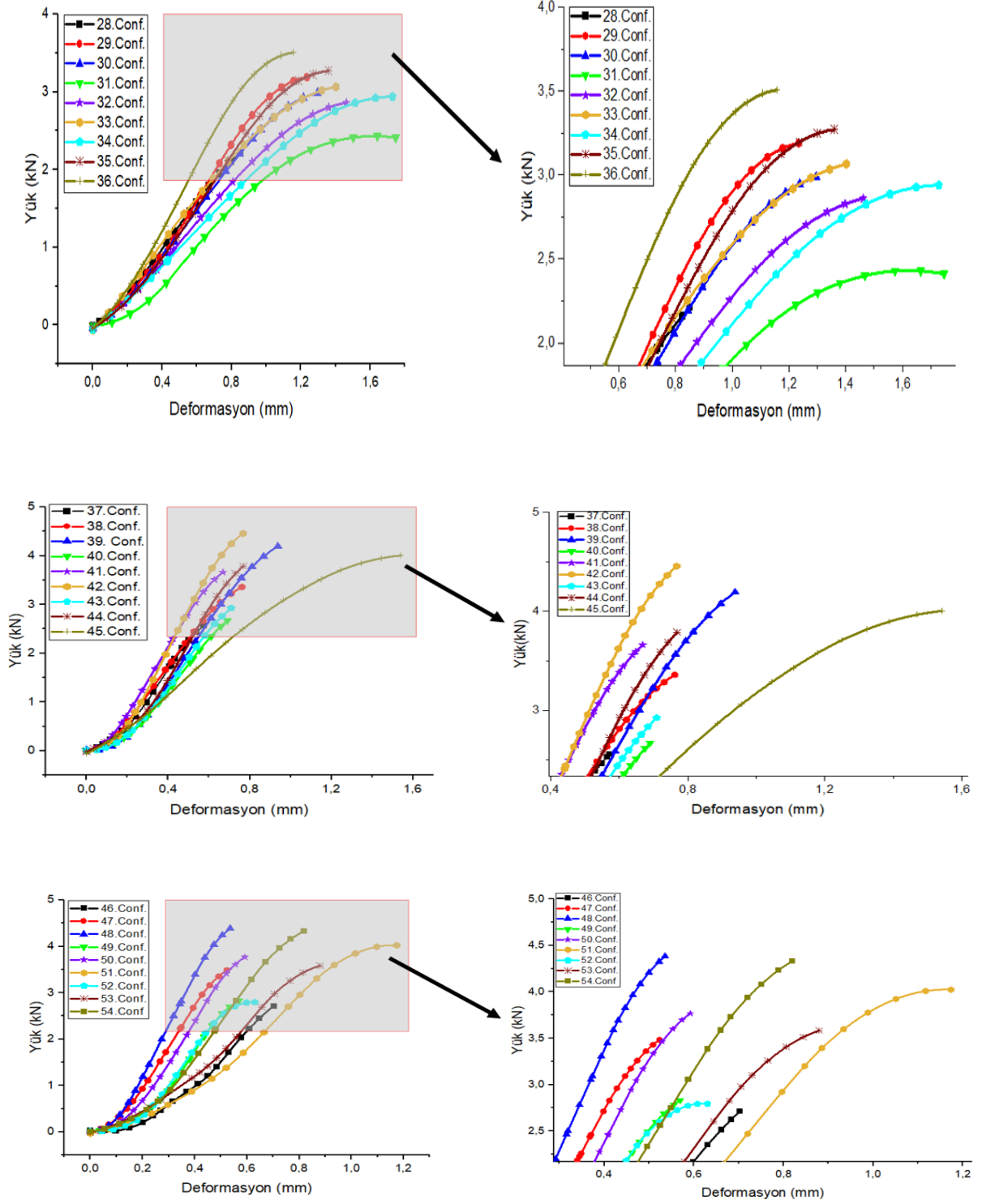
Epoksi ve poliüretan kullanılan numuneler birlikte değerlendirildiğinde ve her iki yapıştırıcı grubunda en iyi performansı sergileyen numuneler karşılaştırıldığında, epoksinin maksimum yük taşıma kapasitesi açısından daha avantajlı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Epoksi

reçine kullanılan numunelerin üç nokta eğme testleri sonucunda 4.56 kN maksimum yük değerine ulaştığı belirlenirken, poliüretan kullanılan numunelerde bu değer 4.43 kN seviyesinde kaldığı tespit edilmiştir. İki değer arasındaki fark oldukça sınırlı olmakla birlikte, poliüretan kullanımında maksimum kuvvet değerinin yaklaşık %2.85 oranında azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, her iki yapıştırıcının benzer yük seviyelerine ulaşabildiğini göstermekle birlikte, en yüksek performans açısından epoksinin daha yüksek bir maksimum yük değerine ulaştığını ortaya koymaktadır.

Buna karşılık en düşük performans gösteren numuneler karşılaştırıldığında poliüretanın daha avantajlı bir sonuç sunduğu görülmektedir. Epoksi kullanılan numunelerde elde edilen 1.82 kN maksimum yük değeri, poliüretan kullanılan numunelerde %22.5 oranında artış göstererek 2.23 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, en düşük maksimum yük değerleri dikkate alındığında poliüretan kullanılan numunelerin daha yüksek bir yük seviyesine ulaşabildiğini göstermektedir. Ancak söz konusu sonuçların yalnızca en iyi ve en kötü performans gösteren numuneler üzerinden doğrudan karşılaştırılması deney tasarımına bağlı kısıtlar ve parametre kombinasyonlarının birebir örtüşmemesi gibi nedenlerden dolayı yeterli bir değerlendirme yaklaşımı olarak kabul edilmemektedir.

Öncelikle, tüm deneylerin belirli bir deney tasarımı (DOE) çerçevesinde gerçekleştirildiğinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda her iki yapıştırıcı türü için aynı parametre kombinasyonlarının her zaman mevcut olmadığı görülmektedir. Nitekim epoksi kullanılan numunelerde en iyi sonucu veren konfigürasyonun (20 mm çekirdek kalınlığı, 22.5 g yapıştırıcı miktarı ve 2 mm üst ile alt yüzey plaka kalınlığı) poliüretan kullanılan numuneler arasında birebir karşılığı bulunmamaktadır. Benzer durum en düşük performans gösteren konfigürasyonlar açısından da geçerlidir. Dolayısıyla elde edilen maksimum yük değerlerinin yalnızca uç sonuçlar üzerinden yorumlanması, parametrelerin gerçek etkilerinin ortaya konulması açısından yeterli olmamaktadır.

Bu nedenle sonuçların daha kapsamlı ve bilimsel bir yaklaşımla değerlendirilebilmesi amacıyla her bir parametrenin bireysel etkisinin yanı sıra parametreler arasındaki etkileşimlerin de dikkate alındığı ayrıntılı bir istatistiksel analiz yapılması gerekmektedir. Böyle bir analiz yaklaşımı, yapıştırıcı türünün, çekirdek kalınlığının, yapıştırıcı miktarının ve yüzey plaka kalınlığının maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerinin daha net bir şekilde belirlenmesine olanak sağlayacaktır.



Şekil 36. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelere ait yük-deformasyon eğrileri

Tablo 6. Poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilen kompozit sandviç panellerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi değerleri

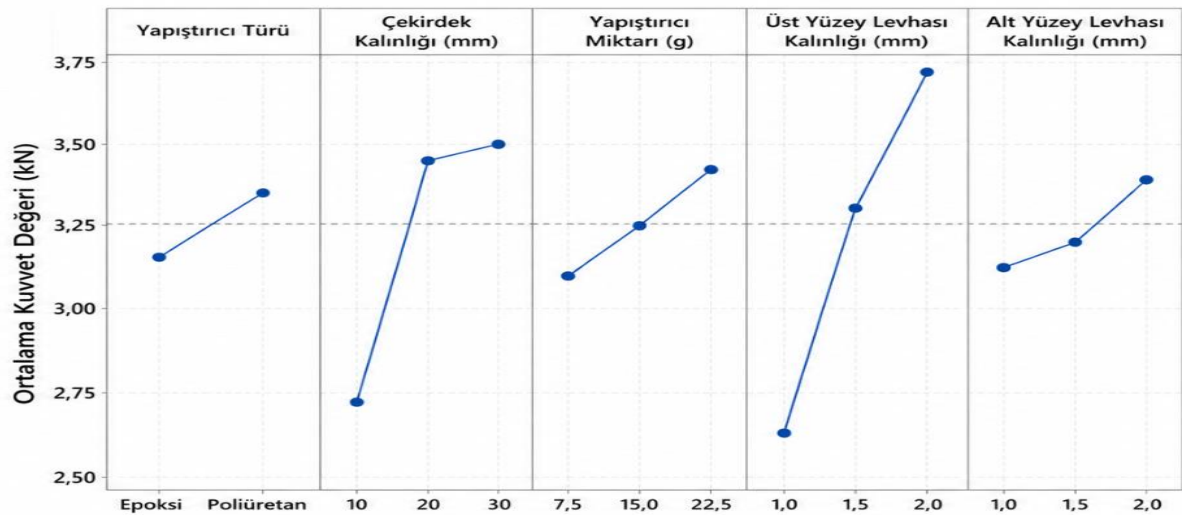
Konfigürasyon	1.Numune (N)	2.Numune (N)	3.Numune (N)	Ort. Kuvvet (N)
28	2240	2195	2243	2226
29	3226	3236	3174	3212
30	3052	3013	3031	3032
31	2486	2454	2403	2449
32	2850	2873	2992	2905
33	3059	3083	3070	3071
34	2959	2984	2972	2971
35	3289	3340	3260	3296
36	3461	3528	3599	3529
37	2560	2511	2666	2579
38	3306	3477	3361	3381
39	4367	4186	4276	4277
40	2659	2461	2698	2666
41	3624	3685	3599	3636
42	4451	4364	4460	4425
43	2921	2941	2878	2913
44	3840	3778	3768	3795
45	4012	4080	4003	4032
46	2627	2640	2730	2666
47	3469	3463	3480	3471
48	4446	4362	4294	4367
49	2805	2850	2746	2800
50	3727	3610	3714	3683
51	4044	4050	4142	4079
52	2842	2876	2956	2861
53	3524	3662	3577	3588
54	4201	4316	4367	4295

4.3. Varyans Analizi (ANOVA) ile Elde Edilen Deneysel Bulguların İncelenmesi

Bu çalışma kapsamında, bal peteği sandviç kompozit panellerin üç nokta eğme performansını etkileyebilecek beş bağımsız değişken belirlenmiştir. Söz konusu değişkenler şu şekildedir: yapıştırıcı türü (epoksi ve poliüretan), çekirdek kalınlığı (10, 20 ve 30 mm), yapıştırıcı miktarı (7.5, 15 ve 22.5 g), üst yüzey levhası kalınlığı (1, 1.5 ve 2 mm) ve alt yüzey levhası kalınlığı (1, 1.5 ve 2 mm). Ayrıca üç bağımlı değişken tanımlanmıştır: maksimum kuvvet, ağırlık ve maliyet. Deneysel bulgular daha sonra bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Minitab yazılımı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) testi ile analiz edilmiştir. İlk aşamada inceleme, tüm faktörlerin maksimum kuvvet üzerindeki etkisinin

değerlendirilmesi ile sınırlandırılmıştır. Takip eden bölümde ise bu faktörlerin maliyet, ağırlık ve maksimum kuvvet üzerindeki birleşik etkileri değerlendirilecektir.

Varyans analizi (ANOVA) testinde maksimum kuvvet bağımlı değişken olarak ele alındığında, R^2 ve R^2_{adj} değerleri sırasıyla %95.74 ve %93.36 olarak elde edilmiştir. Bu bulgu, oluşturulan test modelinin deneysel gözlemlerden elde edilen verileri yeterli düzeyde temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, R^2_{adj} değerlerinin R^2 değerlerine oldukça yakın olması, modellerde aşırı uyum (overfitting) bulunmadığını ve tasarım uzayı için yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduklarını göstermektedir. Bu aşamada her bir faktörün tekil etkisi (Şekil 32) ve ikili etkileşimleri (Şekil 37–39) değerlendirilmiş olup, p-değeri (istatistiksel anlamlılık değeri) 0.05’in altında olan faktörler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir. Buna göre başlangıç aşamasında toplam 15 faktör değerlendirmeye alınmıştır: bunların 5’i tekil faktörler, 10’u ise ikili faktör etkileşimlerinden oluşmaktadır. p-değerlerinin kapsamlı analizi sonucunda toplam sekiz faktörün istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Bu faktörlerin beşi tekil olarak, üçü ise ikili etkileşimler kapsamında istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Tekil olarak istatistiksel anlamlılığa sahip faktörler şunlardır: “Yapıştırıcı Türü”, “Çekirdek kalınlığı”, “Yapıştırıcı Miktarı”, “Üst Plaka kalınlığı” ve “Alt Plaka Kalınlığı”. İkili etkileşimler açısından istatistiksel olarak anlamlı bulunan faktörler ise “Yapıştırıcı türü*Çekirdek kalınlığı”, “Çekirdek kalınlığı*Üst Plaka kalınlığı” ve “Üst levha kalınlığı*Alt Plaka Kalınlığı”dır.



Şekil 37. Bireysel değişkenlere ait faktöriyel grafikleri

Görüldüğü üzere, deneyler kapsamında kullanılan yapıştırıcı türü, kompozit panelin mekanik performansı ve özellikle maksimum taşıma kapasitesi üzerinde oldukça belirgin bir etkiye

sahiptir. Yapılan ölçümler ve elde edilen veriler doğrultusunda, poliüretan esaslı yapıştırıcı kullanımı, ortalama maksimum kuvvet değerini 3.12 kN'dan 3.34 kN'a yükseltmiş ve bu durum yaklaşık olarak %7'lik bir artışa karşılık gelmiştir. Bu sonuç, kullanılan yapıştırıcı türünün, panelin taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen önemli bir değişken olduğunu göstermektedir ve deneysel bulgular, poliüretan yapıştırıcının bu bağlamda epoksiye kıyasla daha yüksek bir kuvvet iletimi sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca bu etkinin, özellikle çekirdek kalınlığının arttığı durumlarda daha belirgin bir şekilde gözlemlendiği saptanmıştır. Bu durum, deneyler sırasında farklı çekirdek kalınlıkları ile yapılan ölçümlerin karşılaştırılmasıyla açıkça ortaya çıkmıştır.

Çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye artırılması, ortalama maksimum kuvvette %28 oranında önemli bir artışa neden olmuş ve değer 2.72 kN'dan 3.47 kN'a yükselmiştir. Bununla birlikte, çekirdek kalınlığının her artışının panelin mukavemetini aynı oranda artırmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle çekirdek kalınlığının 20 mm'den 30 mm'ye çıkarıldığı durumlarda, maksimum kuvvetteki artış yalnızca %0.9 ile sınırlı kalmış ve önceki artış hızındaki yükselme kaybolmuştur. Bu durum, çekirdek kalınlığındaki değişimin maksimum kuvvet üzerindeki etkisinin belirli bir noktadan sonra önemli ölçüde azaldığını ve artışın neredeyse durağanlaştığını göstermektedir. Bunun nedeni, bal peteğinde oluşan kayma gerilmelerinin yüksekliğin artmasıyla birlikte daha fazla etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Deneysel bulgular, bu kalınlık artışları sırasında elde edilen ortalama değerler ve gözlemlenen trendler üzerinden değerlendirilmiştir.

Bunun yanı sıra, yapıştırıcı miktarındaki artışın da ortalama maksimum kuvveti artırdığı saptanmış, ancak bu artışın çekirdek kalınlığındaki değişimin etkisine kıyasla daha sınırlı bir düzeyde gerçekleştiği görülmüştür. 7.5 g yapıştırıcı kullanıldığında kompozit panelin ortalama maksimum kuvveti 3.07 kN olarak ölçülürken, yapıştırıcı miktarının 15 g'a çıkarılması durumunda bu değer 3.23 kN'a yükselmiş ve 22.5 g kullanıldığında ise 3.39 kN'a ulaşmıştır. Elde edilen veriler, yapıştırıcı miktarındaki artışın panelin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin genel olarak doğrusal bir eğilim sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte bu sonuçların yalnızca çalışmada kullanılan 7.5–22.5 g aralığı için geçerli olduğu vurgulanmalıdır ve bu aralık dışındaki değerler için aynı trendin geçerli olup olmayacağı bu çalışma kapsamında değildir.

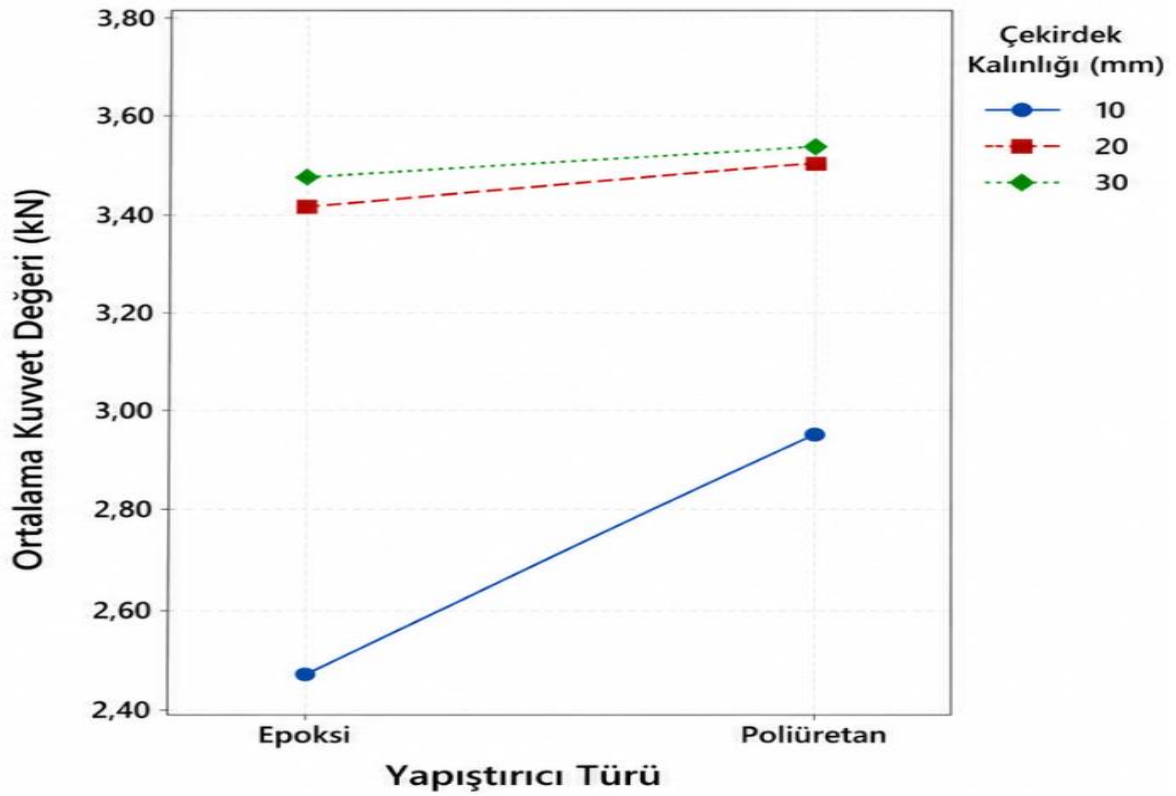
Faktörlerin tekil etkileri incelendiğinde, üst yüzey levhası kalınlığının panelin mukavemeti üzerinde en belirleyici değişken olarak öne çıktığı görülmektedir. Üst yüzey levhası kalınlığı 1

mm olarak seçildiğinde, istatistik programından elde edilen sonuçlara göre ortalama maksimum kuvvet 2.64 kN olarak kaydedilmiş ve bu değer temel referans olarak alınmıştır. Levha kalınlığının 1.5 mm'ye çıkarılmasıyla birlikte ortalama maksimum kuvvette yaklaşık %25 oranında önemli bir artış meydana gelmiş ve değer 3.29 kN'a yükselmiştir. Bu durum, üst yüzey levhası kalınlığındaki değişimin panelin genel maksimum kuvveti üzerinde oldukça etkili olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. Deneyler sırasında gözlenen bu artış, farklı kalınlıklarda yapılan ölçümlerin karşılaştırılmasıyla elde edilen ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir ve tüm veri seti bu gözlemi desteklemektedir.

Bu kuvvetteki artış, ilk aşamada çekirdek kalınlığında gözlemlenen eğilime benzer bir trend izlemiş olup, her iki durumda da artışın başlangıçta hızlı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte, çekirdek kalınlığının etkisinin aksine, bu artış ikinci aşamada da devam etmiş ve üst yüzey levhası kalınlığının artışının panel mukavemeti üzerindeki etkisinin daha geniş bir aralıkta gözlenmesine olanak sağlamıştır. Üst yüzey levhası kalınlığının 2 mm'ye çıkarılması, maksimum kuvvette %14'lük bir artışa yol açmış ve bu değer 3.76 kN'a ulaşmıştır; bu bulgu, çalışma sınırları içinde kalan 1–2 mm aralığında üst yüzey levhası kalınlığının, artış gösterdikçe sandviç kompozit plakanın mukavemeti da artırdığını açık bir şekilde göstermektedir. Bununla birlikte, artış trendinde gözlenen değişimin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır; zira ilk aşamada %25'luk bir artış oranı kaydedilmişken, ikinci aşamada bu oran %14'e düşmüştür. İlk aşamada üst plaka kalınlığı %50 oranında artarken, ikinci aşamada bu artış oranı %34'e düşmektedir. Artış oranındaki azalmanın temel nedeni budur. Bu durum, belirli bir noktadan sonra kalınlığın artışının panel dayanımı üzerindeki etkisinin azalabileceğini ve belirli bir eşik değerinden sonra artık belirleyici bir faktör olarak değerlendirilmeyebileceğini göstermektedir.

Son olarak, alt yüzey levhasının kalınlığı ele alındığında, alt levha kalınlığının panelin maksimum kuvveti üzerindeki etkisinin, üst yüzey levhası kalınlığı ile karşılaştırıldığında daha sınırlı ve daha az belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Alt yüzey levhası kalınlığı 1 mm olduğunda ortalama maksimum kuvvet 3.13 kN olarak ölçülmüş ve kalınlığın 1.5 mm'ye çıkarılmasıyla bu değer 3.19 kN'a yükselmiş, böylece %2'lik sınırlı bir artış gözlenmiştir. Alt levha kalınlığının 2 mm'ye çıkarılması durumunda ise maksimum kuvvette %6'lık bir artış meydana gelmiş ve kuvvet 3.21 kN'dan 3.37 kN'a yükselmiştir. Bu noktada dikkat çeken husus, diğer tüm parametrelerin aksine, alt yüzey levhası kalınlığındaki artışın ilk aşamada belirgin bir kuvvet artışına yol açmaması ve artış oranının ikinci aşamada yükselmesidir; bu durum, alt levha kalınlığının panel dayanımı üzerindeki etkisinin başlangıçta sınırlı olduğunu ancak ikinci

aşamada daha belirgin hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, alt plaka kalınlığındaki artışın kesitin toplam eğilme rijitliği ve atalet momentine katkısının yüksek kalınlıklarda daha belirgin hâle gelmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle 1,5 mm’den sonra alt plakanın yük taşıma kapasitesine katkısı artmış ve eğilme davranışı üzerinde daha etkin bir rol oynamıştır.”



Şekil 38. Ortalama maksimum yük için yapıştırıcı türü ve çekirdek kalınlığı etkileşim grafiği

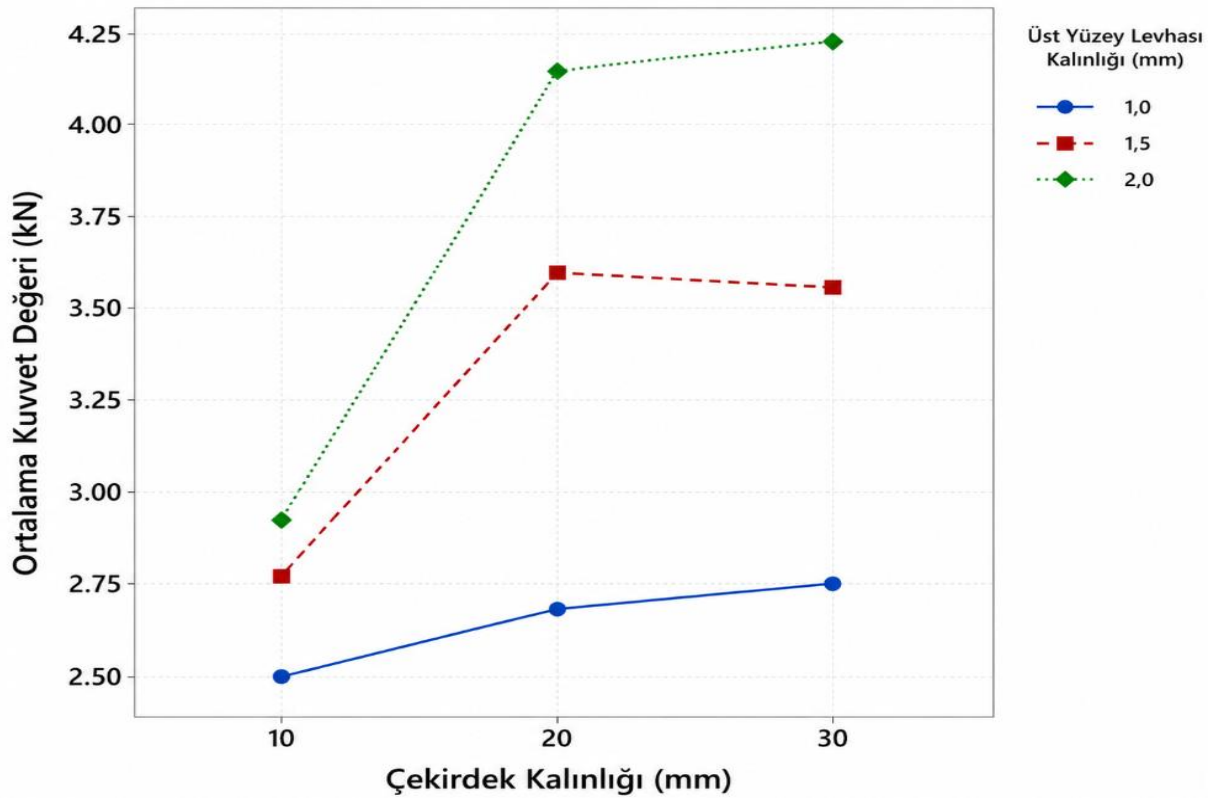
Her bir parametrenin etkisinin tek başına incelenmesi belirli ölçüde eğilimlerin anlaşılmasına katkı sağlayabilse de, çok değişkenli ve birbiriyle etkileşim hâlinde çalışan bütüncül bir sistem söz konusu olduğunda faktörlerin birbirinden bağımsız şekilde değerlendirilmesi yanıltıcı sonuçlara ulaşılmasına neden olabilmektedir. Özellikle sandviç kompozit yapılar gibi yük aktarım mekanizmasının yalnızca tek bir parametreye bağlı olmadığı sistemlerde, parametreler arası etkileşimlerin dikkate alınmaması durumunda elde edilen sonuçların gerçek davranışı tam anlamıyla temsil etmemesi kaçınılmazdır. Bu nedenle güvenilir ve doğru çıkarımlar yapılabilmesi amacıyla yalnızca bireysel etkilerin değil, aynı zamanda istatistiksel olarak anlamlı bulunan faktör etkileşimlerinin de kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yapıştırıcı türü ile çekirdek kalınlığının ortalama maksimum kuvvet üzerindeki birleşik etkisi ayrıntılı olarak ortaya konulmaktadır.

Grafik incelendiğinde ilk olarak dikkat çeken husus, tüm çekirdek kalınlığı seviyelerinde poliüretan yapıştırıcının epoksi yapıştırıcıya kıyasla daha yüksek performans göstermesidir. Bu üstünlük özellikle çekirdek kalınlığının 10 mm olduğu durumda oldukça belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Nitekim bu kalınlık seviyesinde epoksi yerine poliüretan tercih edilmesi, kompozit panel dayanımında yaklaşık %21 oranında önemli bir artış sağlamaktadır. Bununla birlikte çekirdek kalınlığının artmasıyla birlikte yapıştırıcı türünün sistem üzerindeki göreceli etkisinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir ve dayanımdaki artış oranı giderek düşmektedir. Çekirdek kalınlığı arttıkça sandviç panelin genel rijitliği yük taşıma kapasitesinin baskın belirleyicisi hâline gelmekte, bu durum da yapıştırıcının ara yüzey davranışından kaynaklanan katkının görece azalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak poliüretan ve epoksi yapıştırıcılar arasındaki performans farkı daha yüksek kalınlıklarda daralmakta ve sistem davranışında ara yüzey hassasiyetine bağlı hasar mekanizmalarından çekirdek kontrollü yapısal stabiliteye doğru bir geçiş gözlemlenmektedir.

Çekirdek kalınlığının 20 mm olduğu durumda poliüretan kullanımında ortalama maksimum dayanım artış oranının %3 seviyesine kadar düştüğü, çekirdek kalınlığının 30 mm'ye çıkarılması halinde ise bu farkın yalnızca %1.4 seviyesine gerilediği belirlenmiştir. Bu sonuç, çekirdek kalınlığı arttıkça yapıştırıcı türünün etkisinin giderek sınırlı hâle geldiğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. İkinci önemli gözlem ise yapıştırıcı türünden bağımsız olarak çekirdek kalınlığındaki artışın genel olarak panel dayanımını artırmasıdır. Ancak bu etkinin epoksi kullanımında daha belirgin olduğu görülmektedir. Çekirdek kalınlığı 10 mm olan epoksi kullanılan bir panelde kalınlığın 20 mm'ye çıkarılması ortalama maksimum kuvvette %39 gibi oldukça yüksek bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte 20 mm'den 30 mm'ye geçildiğinde artış devam etmiş olsa da yalnızca %1.75 seviyesinde kalmış ve önceki aşamadaki artış hızının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Poliüretan kullanımında ise başlangıç seviyesinde dahi epoksiye kıyasla daha yüksek performans elde edildiğinden, çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye çıkarılması durumunda dayanım yaklaşık %18.5 oranında artış göstermiştir. Ancak çekirdek kalınlığının 30 mm'ye yükseltilmesi neredeyse ihmal edilebilir düzeyde bir değişime yol açmış ve maksimum kuvvette anlamlı bir artış gözlenmemiştir. Bu durum, çekirdek kalınlığının belirli bir seviyeden sonra panel dayanımı üzerindeki katkısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Elde edilen tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, yapıştırıcı türünün özellikle düşük çekirdek kalınlıklarında sistem performansı üzerinde daha belirleyici olduğu, ancak çekirdek kalınlığı

arttıkça bu etkinin giderek azaldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla çekirdek kalınlığının düşük olduğu tasarım senaryolarında poliüretan kullanımının daha rasyonel ve avantajlı bir tercih olduğu söylenebilir. Buna karşılık çekirdek kalınlığının 20 mm'nin üzerine çıktığı durumlarda poliüretan tercih edilse dahi yalnızca çekirdek kalınlığındaki artışa bağlı olarak panel performansında belirgin bir iyileşme beklenmemesi gerektiği elde edilen deneysel sonuçlar tarafından açıkça ortaya konulmaktadır.



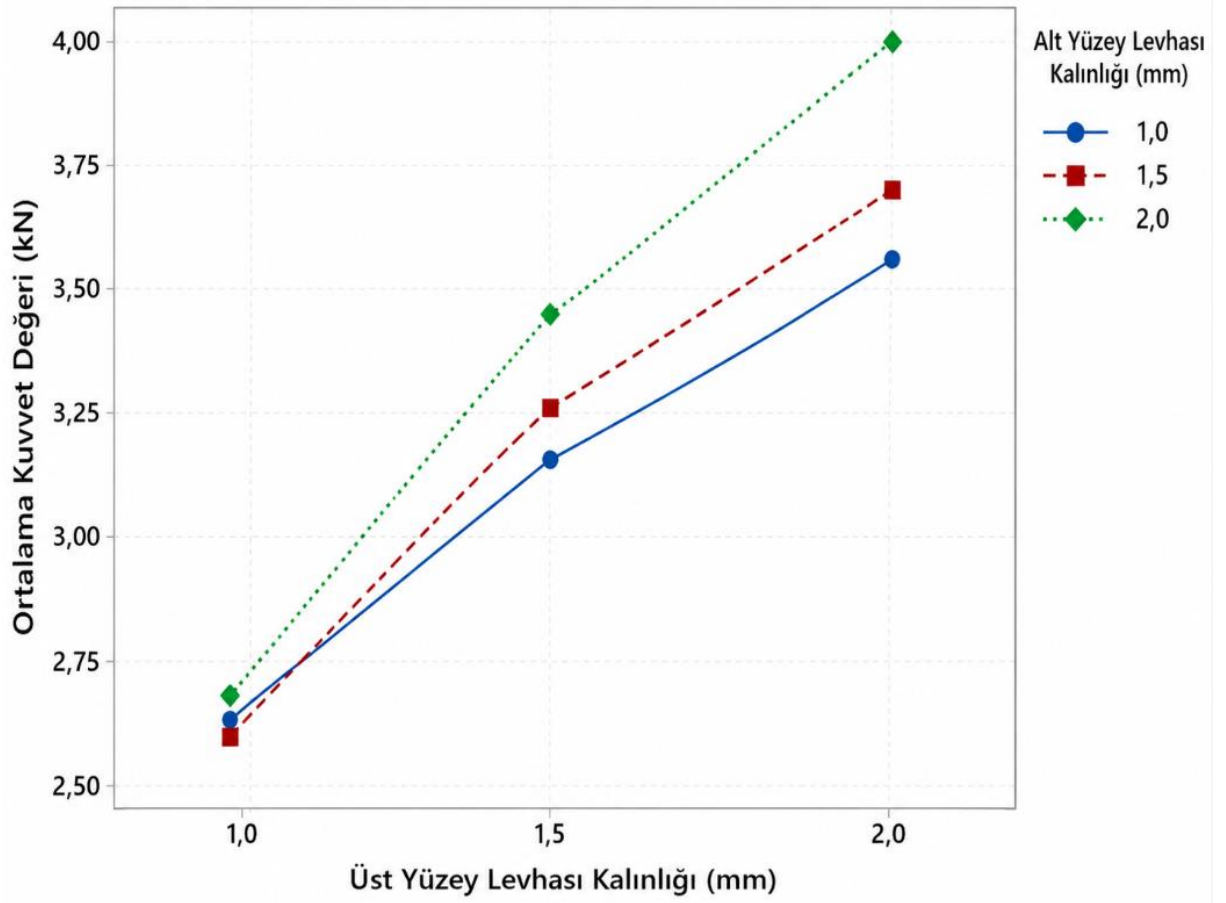
Şekil 39. Ortalama maksimum yük için çekirdek kalınlığı ve üst yüzey levhası kalınlığı etkileşim grafiği

Şekil 39'da çekirdek kalınlığı ile üst yüzey levhası kalınlığının ortalama maksimum kuvvet üzerindeki birleşik etkisi ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çekirdek kalınlığından bağımsız olarak üst yüzey levhası kalınlığındaki artışın panelin eğilme davranışı üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığı ve eğilme rijitliğinin doğrusal olmayan bir eğilimle artmasına bağlı olarak panelin taşıyabileceği ortalama maksimum yükün yükseldiği görülmektedir. Üst yüzey levhası kalınlığındaki değişimin yalnızca tek başına değil, aynı zamanda çekirdek kalınlığı ile birlikte değerlendirildiğinde daha belirgin sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu eğilim, çekirdek kalınlığının 10 mm olduğu durumda da

gözlemlenmekle birlikte, çekirdek kalınlığının artmasıyla birlikte üst yüzey levhası kalınlığının sistem performansı üzerindeki etkisinin daha açık ve belirgin hâle geldiği görülmektedir.

Üst yüzey levhası kalınlığı sabit tutulduğunda, çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye çıkarılmasıyla panelin taşıyabileceği ortalama maksimum yükte düzenli bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu artışın, üst yüzey levhası kalınlığının büyümesiyle birlikte daha belirgin bir karakter kazandığı dikkat çekmektedir. Nitekim üst yüzey levhası kalınlığının 1 mm olduğu durumda çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye çıkarılması kompozit panel dayanımında yalnızca %7.2 oranında sınırlı bir artış sağlamıştır. Aynı koşullar altında üst yüzey levhası kalınlığının 1.5 mm olarak kullanılması durumunda artış oranı önemli ölçüde yükselerek %31 seviyesine ulaşmış, üst yüzey levhası kalınlığının 2 mm olarak seçildiği durumda ise artış %43.4'e kadar çıkmıştır. Bu sonuçlar, çekirdek kalınlığı ile üst yüzey levhası kalınlığı arasındaki etkileşimin panelin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde güçlü bir rol oynadığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Buna karşılık çekirdek kalınlığının 20 mm'den 30 mm'ye çıkarılması durumunda farklı bir eğilim ortaya çıkmıştır. Üst yüzey levhası kalınlığının 1 mm ve 2 mm olduğu koşullarda panel dayanımında yalnızca sınırlı düzeyde artış gözlenmiş, önceki aşamada elde edilen yüksek artış oranlarının devam etmediği anlaşılmıştır. Üst yüzey levhası kalınlığının 1.5 mm olduğu durumda ise dayanımında hafif bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, çekirdek kalınlığındaki artışın belirli bir seviyeden sonra panel performansı üzerindeki katkısının azaldığını ve sistem davranışında bir doyum noktasına ulaşıldığını göstermektedir. Söz konusu doyum noktasının, panel davranışında sandviç eğilmesinin baskın olduğu mekanizmadan daha yerel hasar modlarının etkili hâle geldiği bir geçiş süreci ile ilişkilendirilebileceği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, çekirdek kalınlığı ve üst yüzey levhası kalınlığı arasındaki etkileşimin yalnızca artış yönünde değil, aynı zamanda belirli bir noktadan sonra sınırlayıcı bir karakter sergileyebileceği de elde edilen deneysel sonuçlar doğrultusunda açıkça ortaya konulmaktadır.



Şekil 40. Ortalama maksimum yük için üst yüzey levhası kalınlığı ve alt yüzey levhası kalınlığı etkileşim grafiği

Şekil 40, son ilişkili faktörler olarak belirlenen üst yüzey levhası kalınlığı ile alt yüzey levhası kalınlığının, kompozit panelin ortalama maksimum kuvveti üzerindeki etkisini ayrıntılı biçimde göstermektedir. İlk dikkat çekici gözlem, üst yüzey levhası kalınlığının minimum değer olan 1 mm olduğu durumlarda, alt yüzey levhası kalınlığının panelin dayanımı üzerinde hemen hemen ihmal edilebilir düzeyde bir etkisi olduğudur. Elde edilen sonuçlar, üst yüzey levhası kalınlığı 1 mm sabit tutulduğunda ve alt yüzey levhası kalınlığı 1, 1.5 ve 2 mm arasında değiştirildiğinde panel dayanımında kayda değer bir farklılık oluşmadığını ve değerlerin birbirine oldukça yakın olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum, alt levha kalınlığının yalnızca üst levha belirli bir kalınlık değerini aştığında panel davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, optimum sonuç, alt yüzey levhasının 1 mm olduğu konfigürasyonda elde edilmiş olup, üst levha inceyken alt levhanın katkısının sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, üst levha kalınlığı arttıkça panel dayanımı üzerindeki durum değişmekte ve alt levha kalınlığının etkisi giderek daha belirgin hâle gelmektedir. Özellikle üst levha kalınlığı yaklaşık olarak 1.3 mm ve üzeri olduğunda, alt levha kalınlığındaki artış panelin taşıyabileceği maksimum kuvveti de artırmakta

ve bu etki her iki levha kalınlığı kombinasyonunda açıkça gözlenmektedir. Bu bağlamda, çalışma verileri kapsamında üst levha ince olduğunda alt levha kalınlığının panel dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı, ancak üst levha kalınlığı arttıkça alt levha kalınlığının rolünün giderek önemli hâle geldiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Faktörlerin etkileri ve elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde değerlendirildiğinde, yalnızca panel dayanımı odaklı bir analiz yapıldığında, tüm faktörlerin maksimum değerlerinin kullanılması durumunda en yüksek performansın elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, bu aşamada optimum panel konfigürasyonu, poliüretan yapıştırıcı kullanımı, 30 mm çekirdek kalınlığı, 22.5 g yapıştırıcı miktarı ve hem alt hem de üst levha kalınlığının 2 mm olması ile belirlenmiştir. Bu konfigürasyonda yapının taşıyabileceği maksimum yük yaklaşık olarak 4.66 kN olarak tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, yalnızca dayanım odaklı bu yaklaşım gerçekçi bir tasarım stratejisi olarak değerlendirilemez. Özellikle havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu alanlarda, panel performansının yanı sıra maliyet ve ağırlık gibi parametreler de son derece önemlidir. Ayrıca, bu bölümde incelenen parametrelerin her birinde yapılan artışların panel performansında belirgin bir iyileşmeye yol açmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, sonraki bölümde bağımlı değişkenler maksimum kuvvet, ağırlık ve maliyet olarak tanımlanacak ve farklı kullanım senaryoları için optimum tasarımlar belirlenerek kapsamlı bir değerlendirme yapılacaktır.

4.4. Ortalama Yük, Ağırlık ve Maliyeti Dikkate Alarak Optimum Tasarım

Bu çalışmada, bal peteği sandviç panellerin toplam 54 farklı konfigürasyonu detaylı bir şekilde incelenmiş ve her bir panelin ağırlığı deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Tablo 6'de sunulmuş olup, panellerin ağırlıkları 102 g ile 207 g arasında değişim göstermektedir. Bu veriler, panelin çekirdek kalınlığı, üst ve alt yüzey levhası kalınlıkları ve yapıştırıcı miktarı gibi tasarım parametrelerine bağlı olarak ağırlıkta meydana gelen değişimleri açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Aynı konfigürasyonlar için panel maliyetleri hesaplanmış ve Tablo 7'de özetlenmiştir; maliyetler 1,02 \$ ile 2,76 \$ arasında değişmekte olup, farklı malzeme türleri ve levha kalınlıklarının ekonomik etkisi açıkça görülmektedir. Bu maliyetler, panelin tasarım parametreleri ile birlikte değerlendirilerek, optimum panel seçiminde ekonomik açıdan da karar verilebilecek bir temel oluşturmaktadır.

Panellerin maliyet analizinde, her bir bileşenin metrekare başına düşen maliyeti dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, Tablo 6’da her bir panel bileşeninin toplam maliyete katkısı ayrıntılı olarak gösterilmiş ve panelin toplam maliyetinin, kullanılan malzeme türü, miktarı ve konfigürasyonuna bağlı olarak nasıl değiştiği ortaya konmuştur. Bu analiz, yalnızca toplam maliyeti değil, her bir bileşenin maliyet üzerindeki etkisini de ortaya koyarak, panel tasarımında bilinçli malzeme seçimini desteklemektedir.

Elde edilen ağırlık ve maliyet verileri, optimum tasarım stratejisinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla optimum tasarımın yalnızca tek bir kriter üzerine dayandırılmayacağı; bunun yerine mekanik performans, ağırlık ve maliyet gibi çoklu kriterlerin bir arada değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Bu kapsamda, Tablo 6 ve Tablo 7’de sunulan veriler birlikte değerlendirilmiş ve panel tasarımında hem mekanik performans hem de ekonomik ve ağırlık kriterlerini dengeli şekilde göz önünde bulunduran optimum konfigürasyonlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarım parametrelerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinin önemini de ortaya koymaktadır; örneğin, çekirdek kalınlığı ve üst yüzey levhası kalınlığının birlikte değerlendirilmesi panelin ağırlık ve maliyet profilini doğrudan etkilemektedir. Benzer şekilde, alt yüzey levhası kalınlığı ile üst levha kalınlığı arasındaki kombinasyonlar, yalnızca panel dayanımı üzerinde değil, aynı zamanda maliyet açısından da belirleyici olmaktadır.

Sonuç olarak, bal peteği sandviç panellerin tasarımında ağırlık ve maliyet ölçümleri ile bileşen bazlı maliyet analizleri, yalnızca yapısal performansı değerlendirmekle kalmayıp, ekonomik verimliliği de kapsamlı biçimde incelemeye olanak sağlamaktadır.

Tablo 7. Ortalama yük, ağırlık ve maliyet değerlerine göre optimum tasarım karşılaştırma

Konfigürasyon	Ağırlık (g)	Maliyet (\$)
1	102	1,1325
2	141	1,3575
3	177	1,5825
4	138	1,5525
5	177	1,7775
6	157	1,665
7	170	1,9725
8	151	1,86
9	190	2,085
10	130	1,59
11	171	1,815
12	151	1,7025
13	163	2,01
14	145	1,8975
15	184	2,1225
16	139	2,0925
17	177	2,3175
18	217	2,5425
19	157	2,0325
20	141	1,92
21	181	2,145
22	132	2,115
23	174	2,34
24	210	2,565
25	165	2,535
26	205	2,76
27	186	2,6475
28	123	1,02
29	161	1,245
30	148	1,1325
31	155	1,215
32	139	1,1025
33	180	1,3275
34	131	1,0725
35	170	1,2975
36	207	1,5225
37	150	1,4775
38	138	1,365
39	178	1,59
40	125	1,335
41	165	1,56
42	202	1,785
43	158	1,53
44	197	1,755
45	179	1,6425
46	120	1,5825
47	158	1,8075
48	198	2,0325
49	155	1,7775
50	193	2,0025
51	173	1,89
52	186	1,9725
53	169	1,86
54	206	2,085

Tablo 8.Çalışmada kullanılan malzemelerin maliyetleri

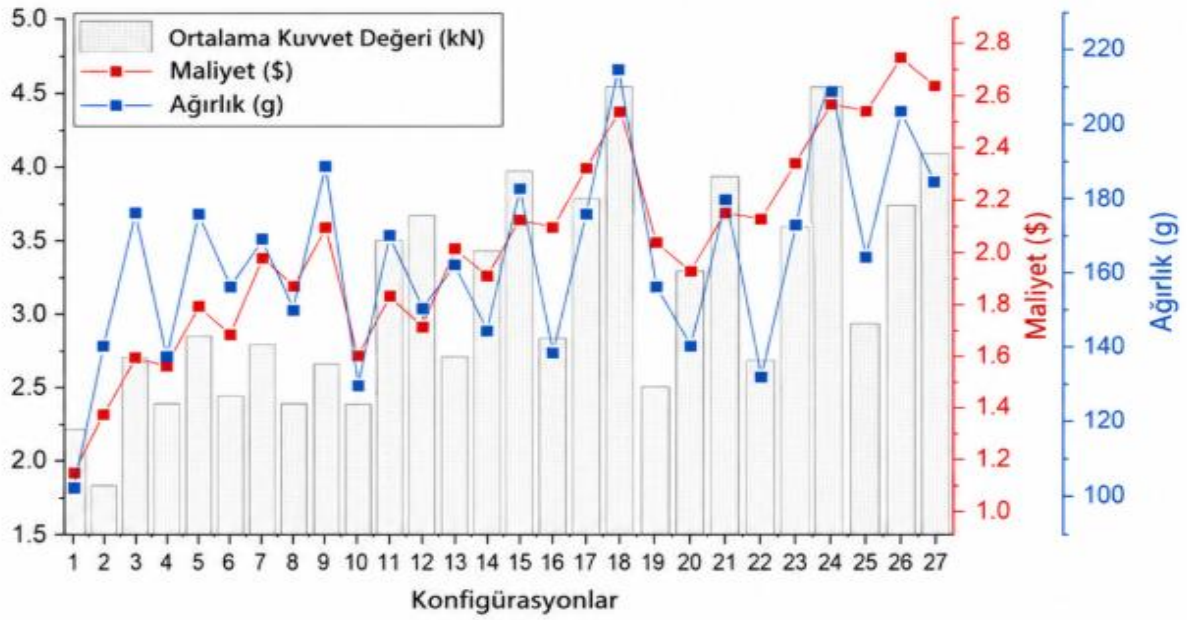
Plakalar (m ² Birim Fiyatı)	Bal Peteği Çekirdek (m ² Birim Fiyatı)	Poliüretan Yapıştırıcı (kg Birim Fiyatı)	Epoksi Yapıştırıcı (kg Birim Fiyatı)
1 mm=15\$	10 mm=25\$	20,50\$	5,5\$
1,5 mm =22,5\$	20 mm=48\$		
2 mm=30\$	30 mm=70\$		

Deneysel sonuçlar, her bir konfigürasyon için ortalama maksimum kuvvet, ağırlık ve maliyet değerlerini içerecek şekilde Şekil 41’de gösterilmiştir. Önceki bölümde de gösterildiği üzere, panel dayanımını en üst düzeye çıkarmak için tüm parametrelerin maksimum değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Ancak bu durum maliyet ve ağırlığın da artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, ağırlık ve maliyetin bağımlı değişkenler olarak dahil edilmesiyle problem çok amaçlı bir optimizasyon problemine dönüşmektedir. Uygulama türüne bağlı olarak dört farklı senaryo ele alınabilir: panelin taşıyabileceği maksimum yükün önceliklendirildiği durum, ağırlığın önceliklendirildiği durum, maliyetin önceliklendirildiği durum ve tüm bağımsız değişkenlere eşit önem verilen durum.

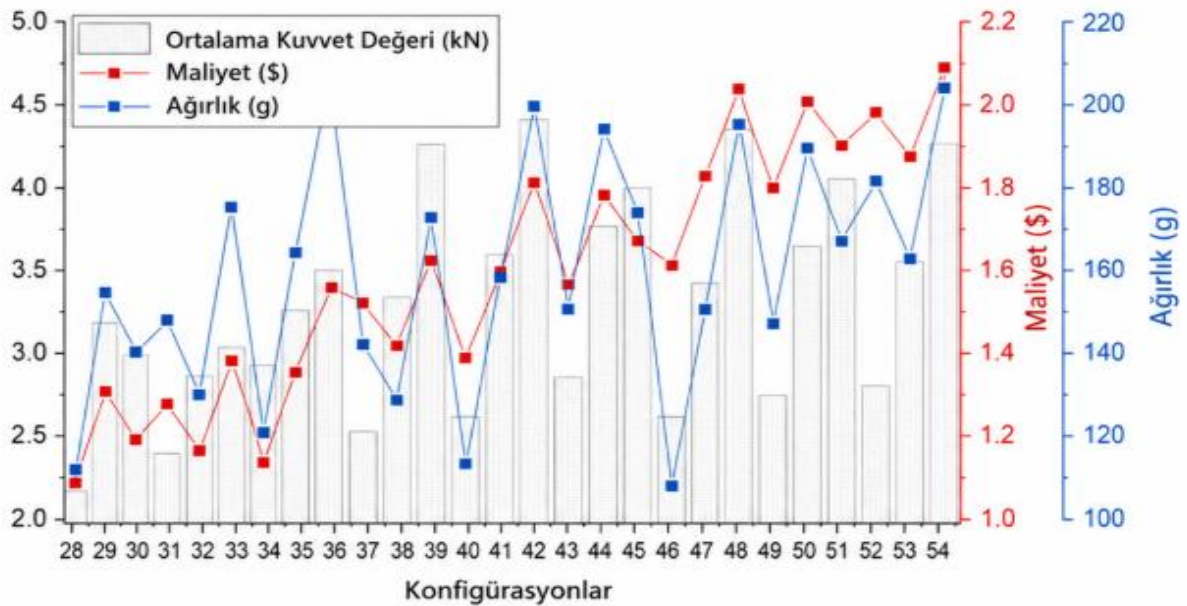
Yalnızca panelin taşıyabileceği maksimum yüke odaklanan ilk senaryo önceki bölümde ele alınmıştır. Ancak ağırlık ve maliyetin bağımsız değişkenler olarak dikkate alınmaması, optimum dayanımı elde etmek için tüm parametrelerin maksimum değerlerinin kullanılmasını gerektirmiştir. Ağırlık ve maliyet faktörleri dikkate alındığında, maksimum yüke odaklanan senaryoda optimum tasarımda küçük bir değişiklik gözlemlenmektedir. Bu durumda panelin optimum konfigürasyonu; poliüretan yapıştırıcı, 20 mm çekirdek kalınlığı, 15 g yapıştırıcı, 2 mm üst yüzey plaka kalınlığı ve 1 mm alt yüzey plaka kalınlığı olarak belirlenmiştir. Nesnenin ağırlığı yaklaşık 166.6 g, maliyeti 1.56 \$ ve maksimum taşıyabileceği yük 4.01 kN olarak hesaplanmıştır.

Ağırlığın önceliklendirildiği ikinci senaryoda, optimum kompozit panel konfigürasyonu şu şekilde elde edilmiştir: poliüretan yapıştırıcı, 10 mm çekirdek kalınlığı, 7.5 g yapıştırıcı miktarı, üst ve alt yüzey levhası kalınlığı 1 mm. Bu durumda ağırlık yaklaşık 103.9 g, maliyet 0.91 \$ ve panelin taşıyabileceği maksimum yük 2.62 kN olarak tahmin edilmiştir. Parametre değerlerindeki herhangi bir artışın ağırlığı ve dolayısıyla maliyeti artırması nedeniyle, bu sonuç maliyetin önceliklendirildiği üçüncü senaryo için de geçerlidir.

Tüm bağımsız değişkenlerin eşit derecede önemli olduğu dördüncü senaryoda ise optimum panel; poliüretan yapıştırıcı, 20 mm çekirdek kalınlığı, 7.5 g yapıştırıcı miktarı, 1.5 mm üst plaka kalınlığı ve 1 mm alt plaka kalınlığı ile elde edilmiştir. Bu tasarımın kütlesinin 134.7 g, maliyetinin 1.37 \$ ve maksimum taşıyabileceği yükün 3.34 kN olacağı öngörülmektedir.



(a)

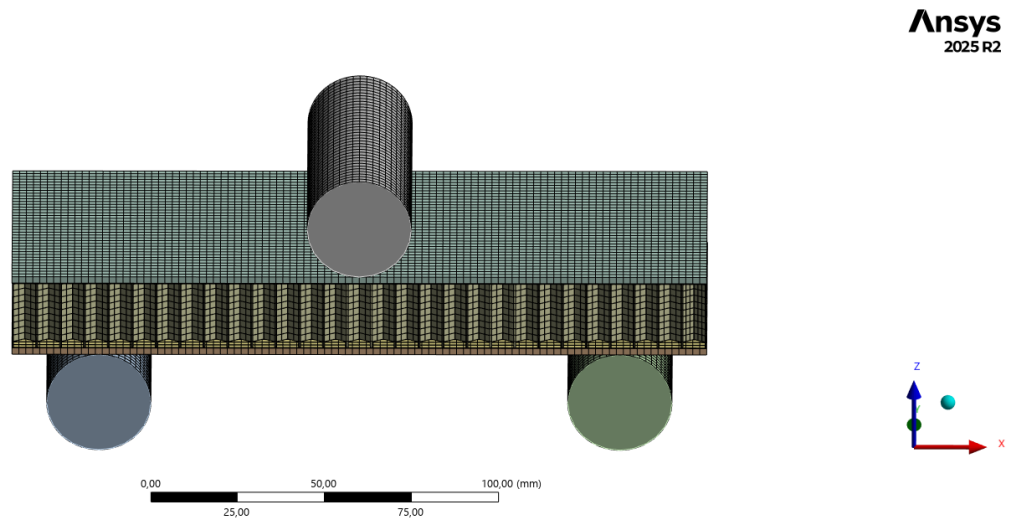


(b)

Şekil 41. DeneySEL sonuçlar, her bir konfigürasyon için ortalama maksimum kuvvet, ağırlık ve maliyet değerlerini içerecek şekilde sunulmuştur; (a) epoksi kullanılan numuneler, (b) poliüretan kullanılan numuneler

4.5. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Şekil 42’de sunulan sonlu eleman modeli, deneysel çalışmada kullanılan sandviç yapı konfigürasyonunu temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Deney sisteminde olduğu gibi model; üst ve alt yüzeylerde yer alan plakalar, bu plakalar arasında konumlandırılmış bal peteği çekirdek yapı ve bu bileşenler arasında bulunan yapıştırıcı tabakalardan meydana gelmektedir. Ayrıca, deney düzeneğinde uygulanan yükleme koşullarını temsil edecek şekilde üst yüzeye temas eden silindirik bir yükleyici ve alt kısımda destek görevi gören silindirik elemanlar modele dahil edilmiştir.



Şekil 42. Sandviç yapı modelinin sonlu elemanlar ağı (mesh) görünümü

Numune, alt yüzeyinde bulunan iki adet silindirik destek üzerine yerleştirilmiştir. Bu destekler, düşey yönde yer değiştirmeyi engelleyecek şekilde sabit mesnet (roller) olarak tanımlanmıştır. Yükleme, Z doğrultusunda negatif yönde uygulanacak şekilde tanımlanmıştır. Silindirik yükleyici ve destekler ile numune arasında temas (contact) tanımlanmıştır. Temas yüzeyleri sürtünmeli (frictional contact) olarak tanımlanmış olup, alüminyum–çelik temasını temsil edecek şekilde sürtünme katsayısı $\mu = 0,1$ olarak alınmış ve temas davranışı statik sürtünme yaklaşımı ile ifade edilmiştir. Alt silindirler rijit cisim olarak tanımlanmış olup X, Y ve Z doğrultularında yer değiştirmeleri tamamen kısıtlanmıştır. Destekler arasındaki açıklık (span uzunluğu) ASTM C393 (ASTM, 2020) standartlarına göre 150 mm olarak belirlenmiştir

Bu yaklaşım ile sayısal modelin, deneysel kurulumun geometrik ve mekanik özelliklerini yüksek doğrulukla temsil etmesi hedeflenmiştir. Özellikle yük uygulama ve mesnet koşullarının

birebir modellenmiş olması, deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırmakta ve model doğrulaması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bal peteği çekirdek yapı, deney numunesinde olduğu gibi doğrudan geometrik detaylarıyla modellenmiş olup, bu sayede hücresel yapıya bağlı yerel gerilme dağılımlarının ve deformasyon davranışlarının hassas bir şekilde incelenmesi mümkün hale gelmiştir. Üst ve alt plakalar ile çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakalar da deneysel numunedeki gerçek durumu yansıtacak şekilde modele dahil edilmiştir. Bu ara tabakalar, yük transfer mekanizmasında kritik rol oynadığından, özellikle ara yüzey gerilmeleri ve potansiyel hasar bölgelerinin belirlenmesinde önemli katkı sağlamaktadır.

Ağ yapısı incelendiğinde, model genelinde düzenli ve yapılandırılmış hegzagonal elemanların tercih edildiği görülmektedir. İnce yapıştırıcı tabakaların ve bal peteği hücre duvarlarının yeterli çözünürlükte modellenmiş olması, yüksek gerilme gradyanlarının doğru şekilde yakalanmasına olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak oluşturulan sonlu eleman modeli, doğrudan deneysel sistemin geometrik ve sınır şartlarını yansıtan bir yapıya sahiptir. Bu durum, elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle güvenilir bir şekilde karşılaştırılabilmesine olanak tanımaktadır.

İlk aşamada, üst ve alt plakaların 2 mm, bal peteği çekirdek yapının ise 20 mm kalınlığa sahip olduğu referans konfigürasyon seçilmiştir. Üst silindir aracılığıyla uygulanan 1500 N'luk yük altında, bu konfigürasyon üzerinden gerçekleştirilen analizlerde, yapıyı oluşturan tüm bileşenler için eşdeğer (von Mises) gerilme, normal gerilme ve kayma gerilmesi dağılımları detaylı olarak incelenmiştir.

Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, en düşük yük taşıma kapasitesine sahip konfigürasyonun taşıdığı yükün %60'ı esas alınarak diğer konfigürasyonlar için analizler gerçekleştirilmiştir; bu değer 1500 N'luk yüke karşılık gelmektedir. Bu sayede farklı yapıların gerilme davranışları ortak bir referans üzerinden karşılaştırılmıştır.

Aşağıda sunulan gerilme analizleri, bal peteği çekirdekli sandviç panellerde gerilme dağılımlarının yapısını ortaya koymak amacıyla verilmiştir. Çok eksenli gerilme durumu söz konusu olduğundan, tüm elemanlara ait gerilme dağılımlarının birlikte değerlendirilebilmesi

hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçların, Bölüm 2.7’de teorik olarak ifade edilen gerilme durumuna kıyasla daha karmaşık bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir.

Ayrıca, poliüretan yapıştırıcı kullanılan konfigürasyon ile epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonun gerilme dağılımlarının benzerlik göstermesi nedeniyle, yalnızca epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyona ait gerilme dağılımları sunulmuştur. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırılması ise tüm elemanlar için elde edilen eşdeğer gerilme değerlerini içeren tablolar üzerinden gerçekleştirilecektir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak toplam 18 farklı konfigürasyonun analizi gerçekleştirilmiştir.

σ_z gerilmeleri, uygulanan yükten dolayı oluşan basma gerilmeleridir. σ_x gerilmeleri ise eğilme etkisi sonucu meydana gelmektedir. Eğilme momentinin orta noktada maksimum değere ulaşması nedeniyle, bu bölgede gerilmeler daha yüksek olup özellikle basma bölgesinde maksimum değerler görülmektedir. Bal peteği çekirdek yapıda gerilmeler ağırlıklı olarak kesme etkisinden kaynaklanmakta olup, bu gerilmeler τ_{xz} kayma gerilmeleri ile ifade edilmektedir ve kayma gerilmeleri içerisinde en büyük bileşenin τ_{xz} olduğu görülmektedir. Diğer gerilme bileşenleri ise sistemin denge koşullarını sağlaması sonucu oluşan gerilmelerdir.

4.5.1. Sandviç yapı bileşenlerinin normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımları

4.5.1.1. Üst plakada meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımlarının incelenmesi

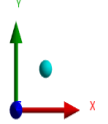
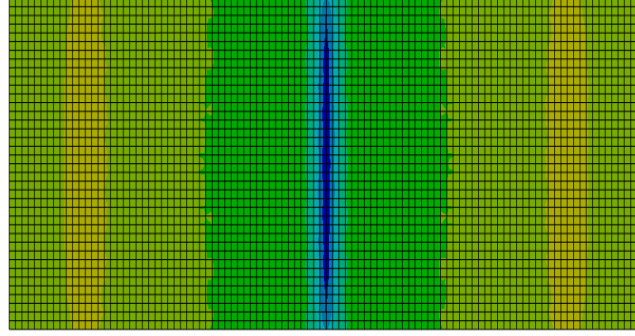
Üst plakanın ön ve arka yüzeylerine ait X, Y ve Z doğrultularındaki normal gerilme (σ_x , σ_y , σ_z) dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, yapının yük altında çok eksenli bir gerilme durumu sergilediği, ancak bu durumun temel olarak Z doğrultusunda uygulanan yükten kaynaklandığı görülmektedir. Z doğrultusunda uygulanan yük, sandviç yapı boyunca kalınlık doğrultusunda taşınmakta olup, bu doğrultu yapının ana yük taşıma eksenini oluşturmaktadır.

Ön ve arka yüzeyler arasında gerilme işaretinin değişmesi, bu doğrultularda klasik eğilme davranışının gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ön yüzeyde basma gerilmeleri hâkimken arka yüzeyde çekme gerilmelerinin oluşması, plakanın nötr eksen etrafında büküldüğünü göstermektedir.

A: Static Structural
Normal Stress 4
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:17:41

Ansyst
2025 R2

46,857 Max
32,92
18,984
5,0467
-8,89
-22,827
-36,764
-50,7
-64,637
-78,574 Min

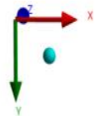
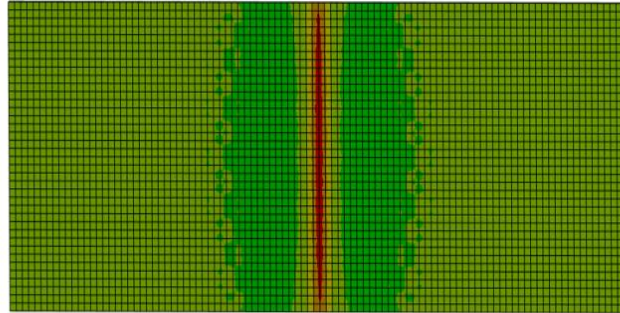


Şekil 43. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_x normal gerilme dağılımı

A: Static Structural
Normal Stress 4
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:19:09

Ansyst
2025 R2

46,857 Max
32,92
18,984
5,0467
-8,89
-22,827
-36,764
-50,7
-64,637
-78,574 Min



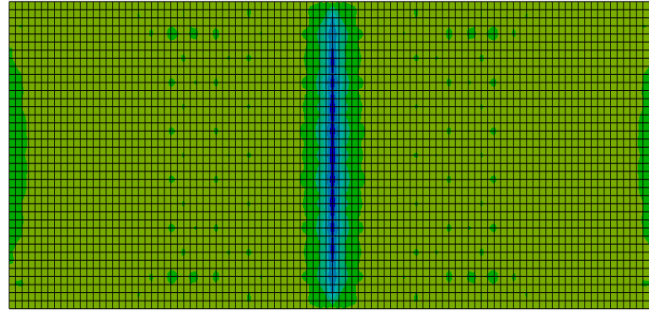
Şekil 44. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_x normal gerilme dağılımı

Y doğrultusundaki normal gerilmeler yapının genel davranışında ikincil bir rol oynamaktadır. Bu doğrultudaki gerilmeler, yük aktarımı sırasında oluşan yan etkiler ve geometrik süreksizlikler ile ilişkilidir. Bu durum, sandviç yapıların karakteristik davranışı ile uyumlu olup, elde edilen sonuçların fiziksel gerçekliği yansıttığını ortaya koymaktadır.

A: Static Structural
Normal Stress 5
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:22:33

Ansys
2025 R2

20,48 Max
15,278
10,076
4,8736
-0,3285
-5,5306
-10,733
-15,935
-21,137
-26,339 Min



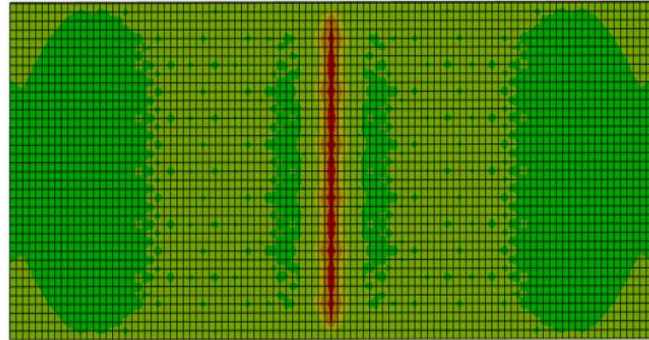
0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (mm)

Şekil 45. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı

A: Static Structural
Normal Stress 5
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:22:33

Ansys
2025 R2

20,48 Max
15,278
10,076
4,8736
-0,3285
-5,5306
-10,733
-15,935
-21,137
-26,339 Min



0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (mm)

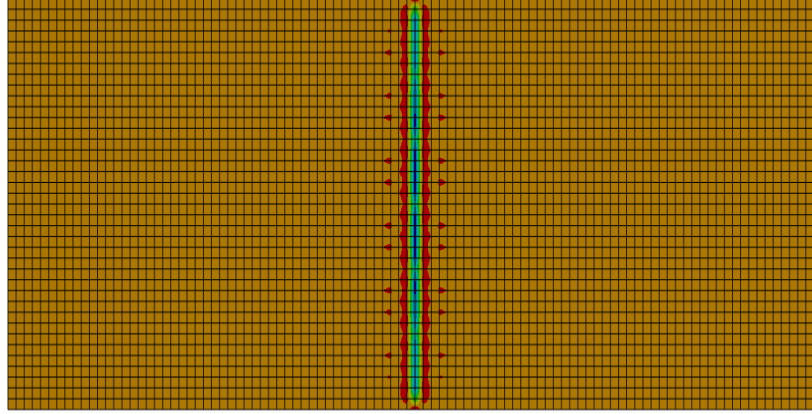
Şekil 46. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı

Z doğrultusundaki normal gerilmeler incelendiğinde, gerilme yoğunlaşmalarının özellikle yükün uygulandığı orta bölgede belirgin hale geldiği, ancak bu gerilmelerin büyük ölçüde bal peteği çekirdek yapı tarafından taşındığı ve üst plaka üzerinde sınırlı seviyelerde kaldığı görülmektedir. Ön ve arka yüzeylerde benzer gerilme dağılım karakterinin gözlemlenmesi, bu doğrultuda belirgin bir eğilme davranışının oluşmadığını, aksine yükün doğrudan kalınlık boyunca iletilildiğini göstermektedir.

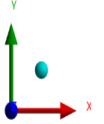
A: Static Structural
Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:23:19

Ansys
2025 R2

1,8699 Max
0,15892
-1,5521
-3,263
-4,974
-6,685
-8,3959
-10,107
-11,818
-13,529 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

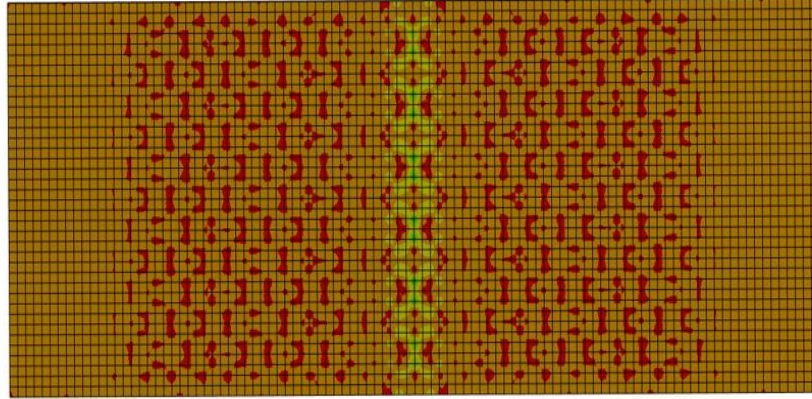


Şekil 47. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı

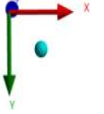
A: Static Structural
Normal Stress 6
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:23:19

Ansys
2025 R2

1,8699 Max
0,15892
-1,5521
-3,263
-4,974
-6,685
-8,3959
-10,107
-11,818
-13,529 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)



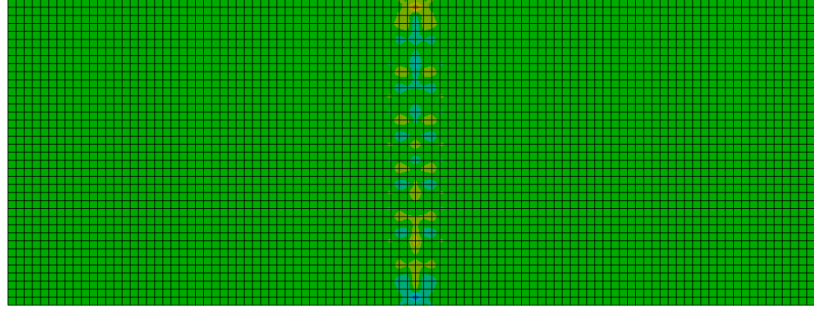
Şekil 48. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı

τ_{yz} bileşeninde gerilme dağılımı incelendiğinde, gerilmelerin homojen bir şekilde dağıldığı, ancak yükün uygulandığı orta bölgede lokal gerilme artışlarının meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu bölgede görülen gerilme yoğunlaşmaları, bal peteği çekirdeğin hücresel geometrisinin üst plakaya yansıması sonucu oluşmaktadır. Maksimum gerilme değerinin yaklaşık 2,75 MPa seviyesinde kalması, YZ düzlemindeki kayma etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

A: Static Structural
Shear Stress 5
Type: Shear Stress(VZ Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:25:11

Ansys
2025 R2

2,7456 Max
2,1355
1,5253
0,91522
0,30508
-0,30505
-0,91518
-1,5253
-2,1354
-2,7456 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

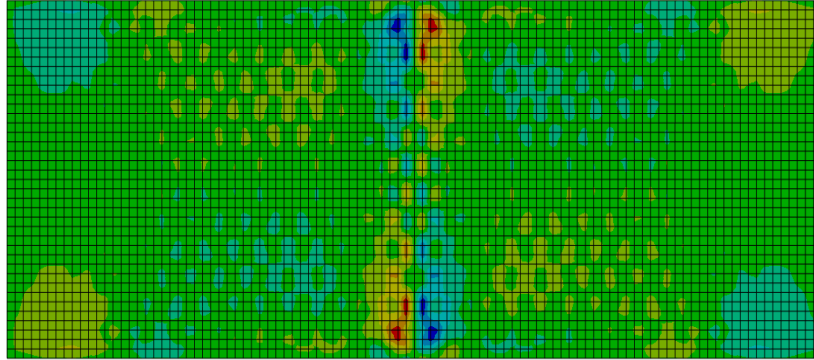
Şekil 49. Üst plakanın τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı

τ_{xy} bileşeninde gerilme dağılımı düzensiz ve lokal karakterli olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle orta bölgede, çekirdek ile etkileşim sonucu oluşan yük aktarımı nedeniyle hem pozitif hem negatif yönlü kayma gerilmeleri birlikte görülmektedir. Bu durum, üst plakanın sadece tek yönlü bir kesme etkisine değil, aynı zamanda çok eksenli gerilme durumuna maruz kaldığını göstermektedir.

A: Static Structural
Shear Stress 4
Type: Shear Stress(XY Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:25:43

Ansys
2025 R2

1,7776 Max
1,3826
0,98754
0,59251
0,19747
-0,19756
-0,59259
-0,98762
-1,3827
-1,7777 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

Şekil 50. Üst plakanın τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı

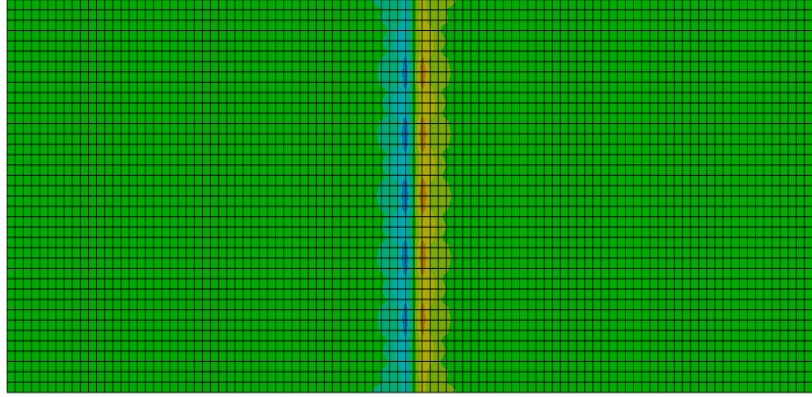
τ_{xz} bileşeninde, özellikle yükün uygulandığı orta bölgede, keskin bir gerilme gradyanı olduğu ve bu bölgede kayma gerilmesinin yoğunlaştığı görülmektedir.

Maksimum gerilme değerinin yaklaşık 6,55 MPa seviyesine ulaşması, Z doğrultusunda uygulanan yükün X doğrultusunda önemli bir kesme etkisi oluşturduğunu göstermektedir.

A: Static Structural
Shear Stress 6
Type: Shear Stress(XZ Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:26:09

Ansyz
2025 R2

6,5536 Max
5,097
3,6404
2,1838
0,72715
-0,72945
-2,1861
-3,6427
-5,0993
-6,5559 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

Şekil 51. Üst plakanın τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı

Üst plaka üzerindeki kayma gerilmesi dağılımları incelendiğinde, gerilme alanının orta eksene göre simetrik bir karakter sergilediği görülmektedir. Bu durum, yüklemenin Z doğrultusunda ve geometrik merkeze yakın bir bölgeden uygulanması ile birlikte sınır şartlarının büyük ölçüde dengeli olmasından kaynaklanmaktadır. Sağ ve sol bölgelerde benzer gerilme dağılımlarının oluşması, sistemin simetrik bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

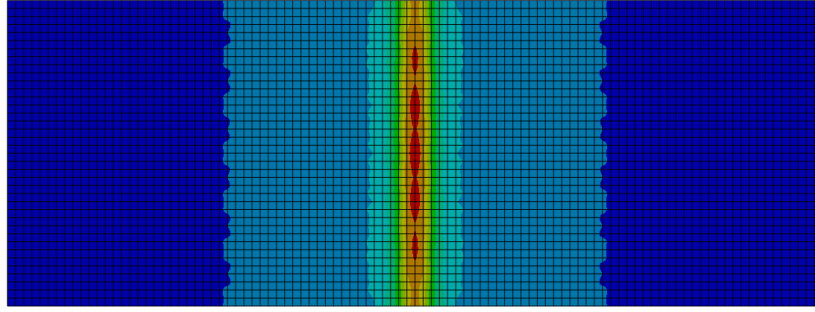
Analiz sonuçlarına göre maksimum von-Mises eşdeğer gerilme değerinin yaklaşık 61,60 MPa olduğu ve bu gerilmenin yükün uygulandığı bölgeye karşılık gelen orta eksen boyunca yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 47). Ön yüzey ile benzer şekilde, gerilme değerleri yük uygulama hattından uzaklaştıkça kademeli olarak azalmakta ve kenar bölgelerde minimum seviyelere inmektedir.

Arka yüzeyde elde edilen gerilme dağılımının, ön yüzey ile büyük ölçüde uyumlu olduğu ve plaka boyunca simetrik bir gerilme yayılımının olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, yükün üst silindir aracılığıyla uygulanması sonucu plaka içerisinde oluşan eğilme etkisinin her iki yüzeyde de benzer karakterde gerilme dağılımlarına yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, yerel olarak gözlemlenen küçük gerilme dalgalanmaları, çekirdek yapı ile olan etkileşim ve mesh yapısından kaynaklanan lokal etkiler olarak değerlendirilebilir.

A: Static Structural
Equivalent Stress 3
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 21:26:33

Ansys
2025 R2

61,596 Max
54,757
47,918
41,079
34,24
27,401
20,561
13,722
6,8834
0,044336 Min



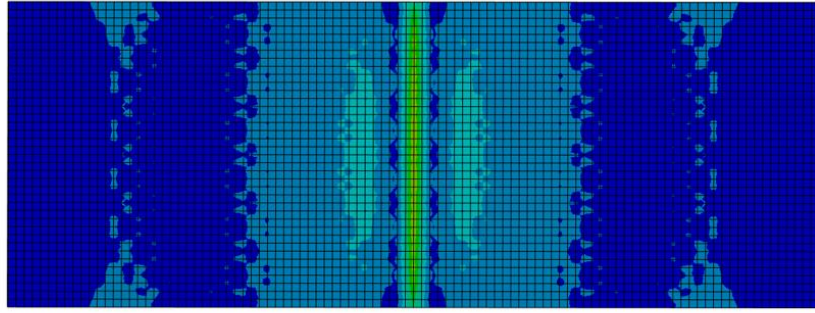
0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

Şekil 52. Sandviç yapının üst plakasının ön yüzeyine ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

A: Static Structural
Equivalent Stress 3
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 21:26:33

Ansys
2025 R2

61,596 Max
54,757
47,918
41,079
34,24
27,401
20,561
13,722
6,8834
0,044336 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

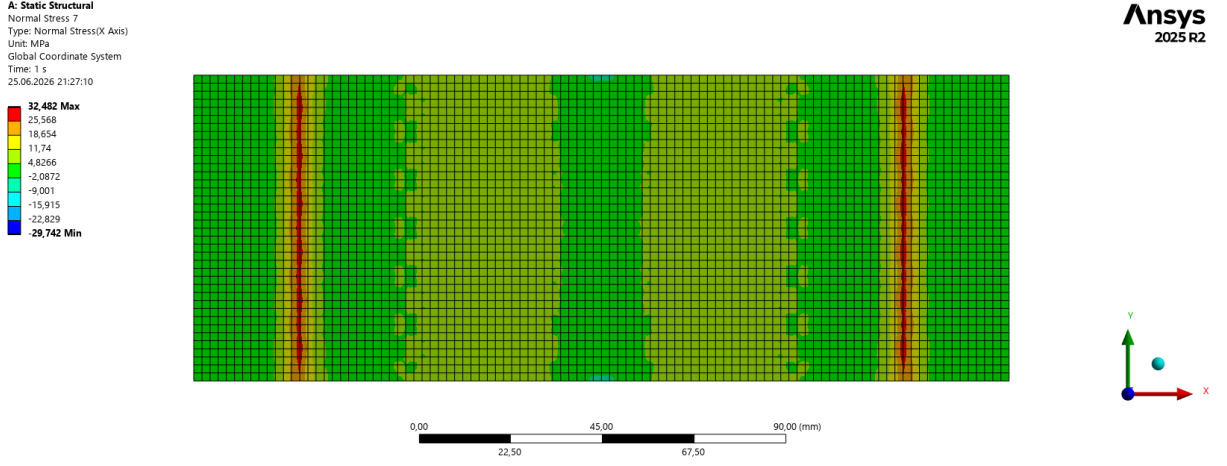
Şekil 53. Sandviç yapının üst plakasının arka yüzeyine ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

4.5.1.2. Alt plakada meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımlarının incelenmesi

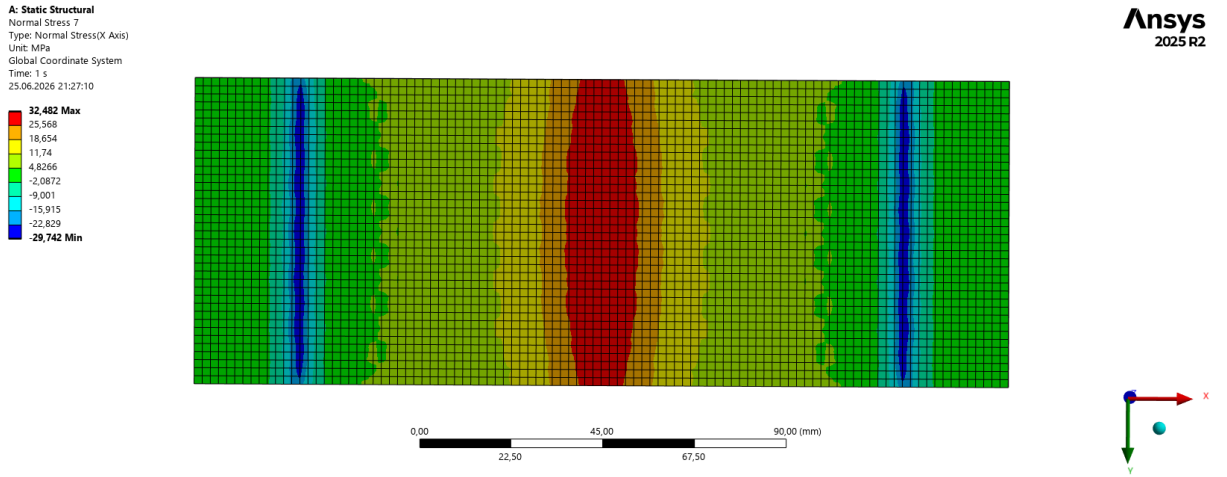
Alt plakanın ön ve arka yüzeylerine ait X, Y ve Z doğrultularındaki normal gerilme (σ_x , σ_y , σ_z) dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, yapının yük altında çok eksenli bir gerilme durumu sergilediği görülmektedir. Z doğrultusunda üst plakaya uygulanan yük, bal peteği çekirdek yapı aracılığıyla alt plakaya iletilmekte ve bu yük alt plaka tarafından büyük ölçüde mesnet reaksiyonları ile karşılanmaktadır. Bu nedenle alt plaka davranışı, doğrudan yük etkisinden ziyade çekirdekten gelen yük aktarımı ve destek koşulları tarafından belirlenmektedir.

X doğrultusunda normal gerilmeler incelendiğinde, özellikle alt silindir destek bölgelerinde belirgin gerilme yoğunlaşmalarının olduğu görülmektedir. Ön yüzeyde çekme gerilmeleri hâkimken, arka yüzeyde basma gerilmelerinin olduğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde Y

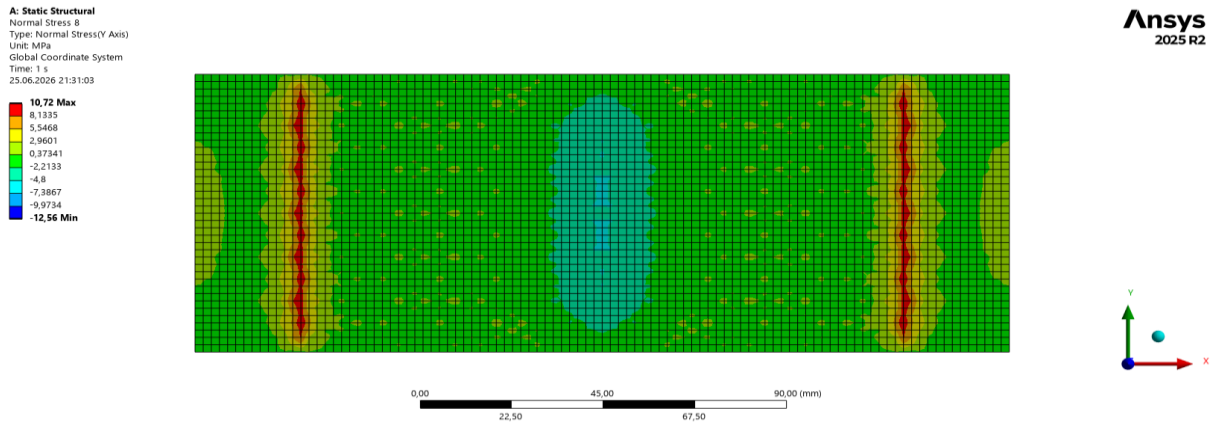
doğrultusundaki normal gerilmeler de aynı bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Orta bölgede gözlemlenen gerilme artışı, alt plakanın yalnızca mesnet bölgelerinde değil, aynı zamanda yük aktarım hattı boyunca da aktif olarak gerilme taşıdığını göstermektedir.



Şekil 54. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzüne ait σ_x normal gerilme dağılımı



Şekil 55. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzüne σ_x normal gerilme dağılımı

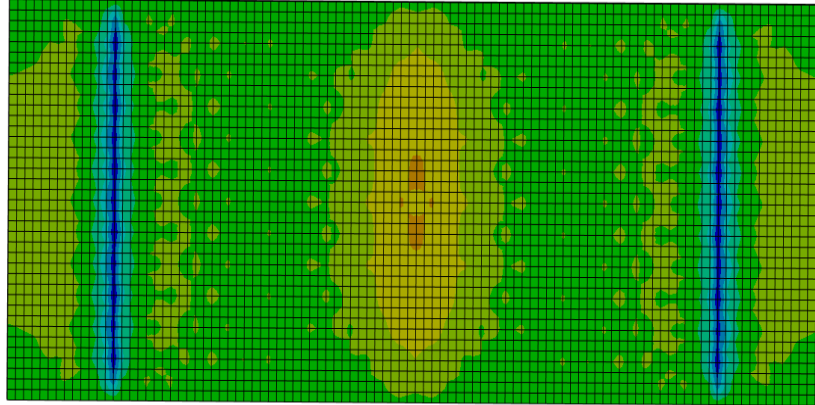


Şekil 56. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzüne ait σ_y normal gerilme dağılımı

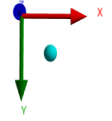
A: Static Structural
Normal Stress 8
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:31:03

Ansyst
2025 R2

10,72 Max
8,1335
5,5468
2,9601
0,37341
-2,2133
-4,8
-7,3867
-9,9734
-12,56 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)



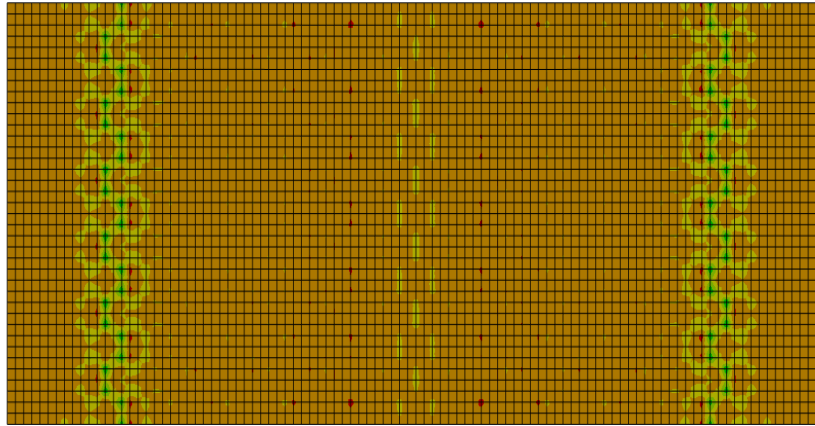
Şekil 57. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait σ_y normal gerilme dağılımı

Z doğrultusundaki normal gerilmeler değerlendirildiğinde ise, gerilme dağılımı plaka genelinde büyük ölçüde homojen olup, yalnızca çekirdek ile temas bölgeleri ve alt silindir destek hatlarında lokal artışlar gözlemlenmektedir.

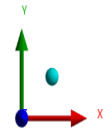
A: Static Structural
Normal Stress 9
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:32:33

Ansyst
2025 R2

1,366 Max
0,48078
-0,40446
-1,2897
-2,1749
-3,0602
-3,9454
-4,8306
-5,7159
-6,6011 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

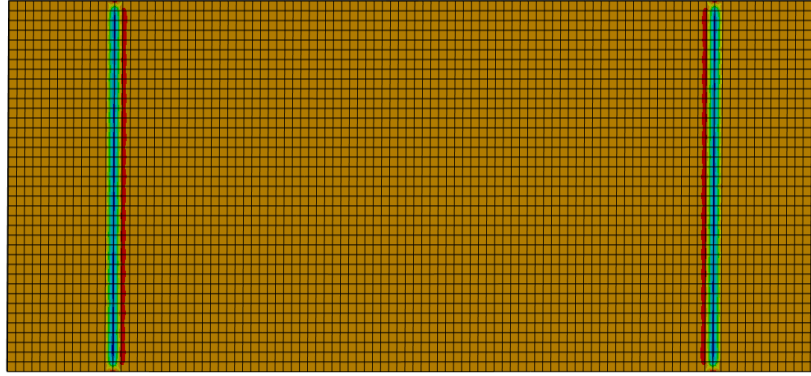


Şekil 58. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı

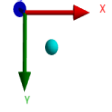
A: Static Structural
Normal Stress 9
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:32:33

Ansys
2025 R2

1,366 Max
0,48078
-0,40446
-1,2897
-2,1749
-3,0602
-3,9454
-4,8306
-5,7159
-6,6011 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)



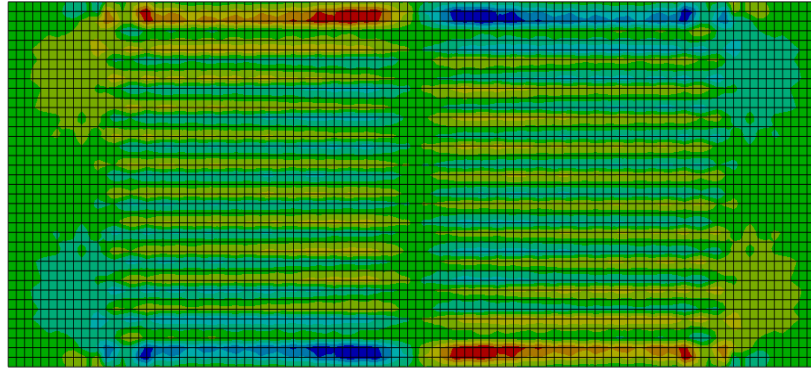
Şekil 59. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait σ_z normal gerilme dağılımı

τ_{xy} bileşeninde gerilme dağılımının plaka boyunca yatay bantlar halinde geliştiği ve özellikle üst ve alt bölgelerde zıt işaretli gerilmelerin oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca bu bileşende gerilme dağılımının genel anlamda simetrik bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir.

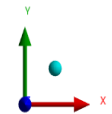
A: Static Structural
Shear Stress 7
Type: Shear Stress(XY Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:33:45

Ansys
2025 R2

1,5556 Max
1,2097
0,86378
0,51786
0,17194
-0,17398
-0,5199
-0,86582
-1,2117
-1,5577 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)



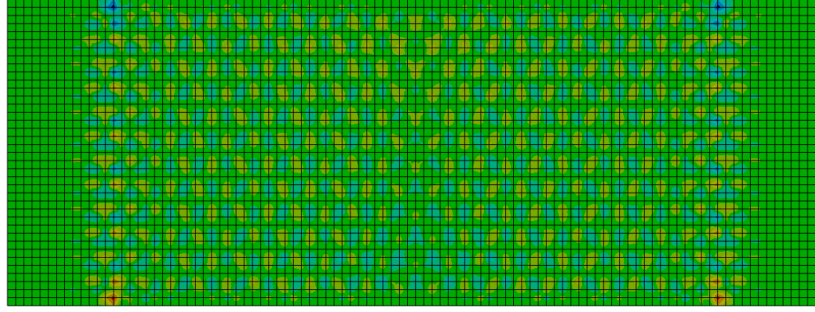
Şekil 60. Alt plakanın τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı

τ_{yz} bileşeninde dağılımın büyük ölçüde homojen kaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda oluşan gerilmeler, doğrudan yük taşıyan bir bileşen olmaktan ziyade, çekirdek yapı ile plakalar arasındaki etkileşimden kaynaklanan ikincil etkileri temsil etmektedir.

A: Static Structural
Shear Stress 8
Type: Shear Stress(YZ Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:34:35

Ansys
2025 R2

1,2008 Max
0,9339
0,66703
0,40015
0,13328
-0,13359
-0,40046
-0,66734
-0,93421
-1,2011 Min



0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

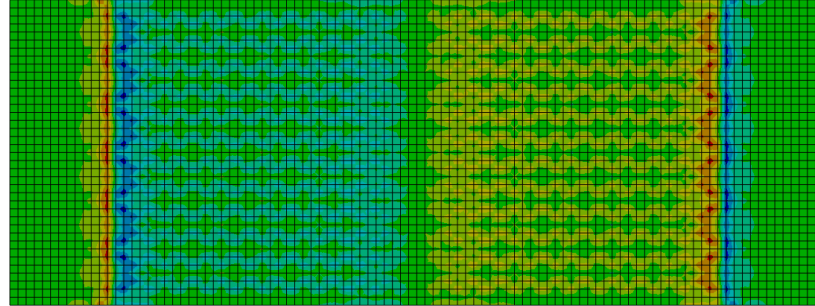
Şekil 61. Alt plakanın τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı

τ_{xz} bileşeni ise alt plaka açısından en kritik kayma gerilmesi olarak öne çıkmaktadır. Z doğrultusunda uygulanan yükün alt plakada X doğrultusunda önemli bir kesme etkisi oluşturduğunu ve yük aktarımının büyük ölçüde bu bileşen üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca τ_{xz} dağılımında, plakanın orta eksenine göre genel bir simetri eğilimi gözlenmektedir.

A: Static Structural
Shear Stress 9
Type: Shear Stress(XZ Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:35:03

Ansys
2025 R2

3,1095 Max
2,4185
1,7275
1,0365
0,34552
-0,34549
-1,0365
-1,7275
-2,4185
-3,1095 Min

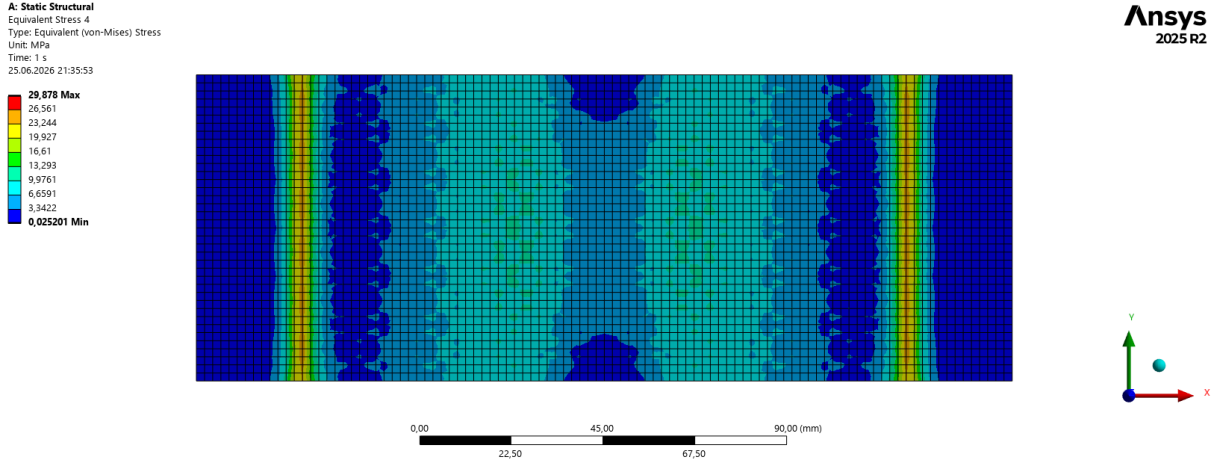


0,00 22,50 45,00 67,50 90,00 (mm)

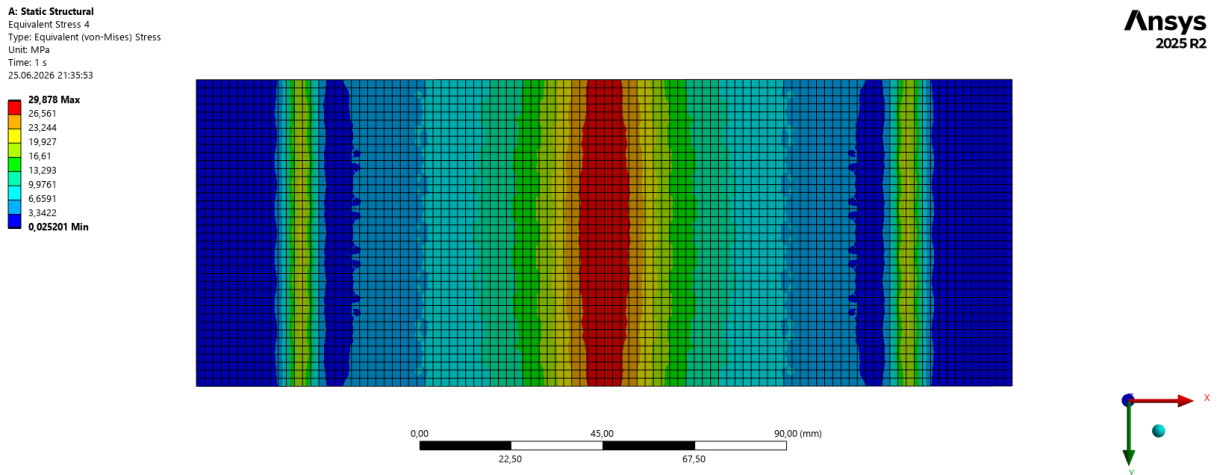
Şekil 62. Alt plakanın τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı

Eşdeğer (von Misses) gerilme dağılımları incelendiğinde, her iki yüzeyde de maksimum gerilme değerinin yaklaşık 29,88 MPa seviyesinde olduğu görülmektedir. Gerilme dağılımları incelendiğinde, yükün üst silindir aracılığıyla uygulanmasına bağlı olarak gerilmelerin yapı içerisinde çekirdek üzerinden iletilerek alt plakada daha yayılı ve düşük seviyeli bir dağılım oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte hem ön hem de arka yüzeyde alt silindirler ile temas bölgelerinde belirgin gerilme artışları gözlemlenmektedir. Bu artışlar, destek noktalarında oluşan reaksiyon kuvvetlerinin lokal olarak yoğunlaşması ile ilişkilidir. Ayrıca

çekirdek yapı ile temas bölgelerinde gerilme geçişlerine bağlı yerel dalgalanmalar da dikkat çekmektedir. Ön ve arka yüzey gerilme dağılımlarının genel olarak benzer karakter sergilemesi, alt plakanın yük altında simetrik bir eğilme davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Alt yüzeyin orta noktasında yüksek gerilme oluşması, alt plakanın yük altında eğilmesi sonucu bu bölgede çekme etkilerinin maksimum seviyeye ulaşması ile ilişkilidir.



Şekil 63. Sandviç yapının alt plakasının ön yüzeyine ait eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımı

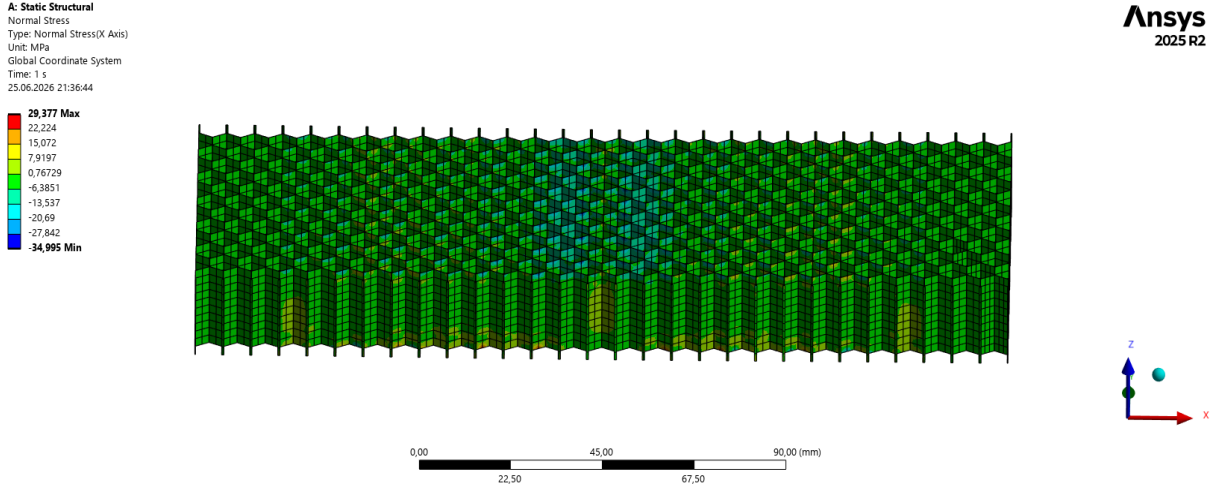


Şekil 64. Sandviç yapının alt plakasının arka yüzeyine ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

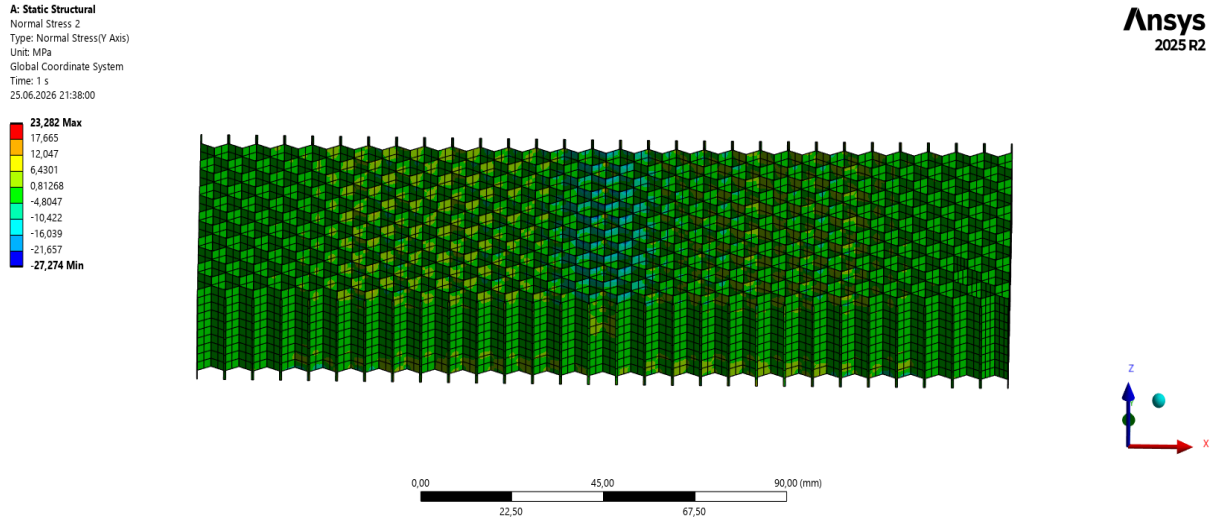
4.5.1.3. Bal peteği çekirdek yapısında meydana gelen normal, kayma ve eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımlarının incelenmesi

Bal peteği çekirdeğin farklı doğrultulardaki normal gerilme dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, gerilme bileşenlerinin yönlerle bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiği

görülmektedir. X ve Y doğrultularındaki normal gerilmeler incelendiğinde, bu bileşenlerin hücresel geometriye bağlı olarak periyodik ve lokal dalgalanmalar sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, söz konusu doğrultuların doğrudan yükleme yönü olmaması ve gerilmelerin daha çok ikincil etkiler sonucu oluşması ile ilişkilidir.



Şekil 65. Bal peteği çekirdeğin σ_x normal gerilmesi

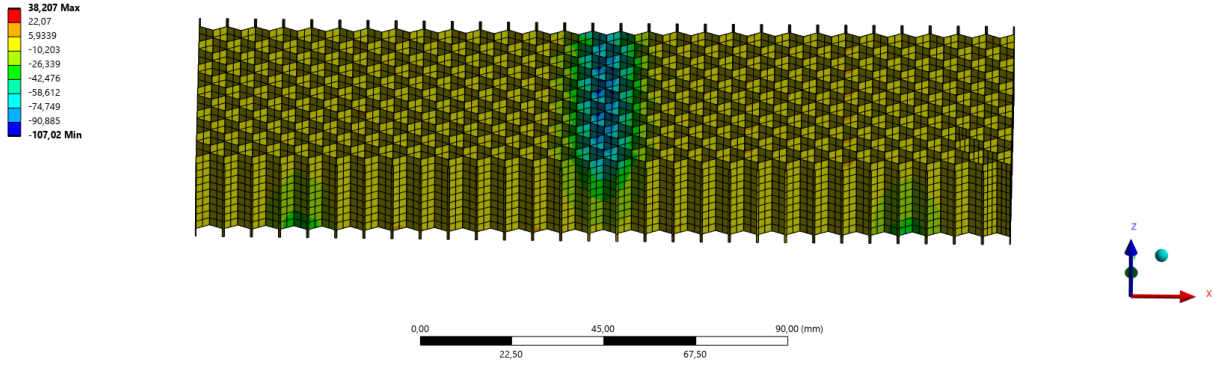


Şekil 66. Bal peteği çekirdeğin σ_y yönünde oluşan normal gerilmesi

Z doğrultusundaki normal gerilme bileşeninin, özellikle negatif (basma) gerilmelerin büyüklüğü, yükün üst silindir aracılığıyla doğrudan bu doğrultuda iletilmesinden kaynaklanmaktadır. Çekirdek yapı boyunca yük aktarım hattı üzerinde yoğunlaşan bu gerilmeler, sandviç yapının kalınlık yönünde taşıma mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir.

A: Static Structural
Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:38:27

Ansyes
2025 R2



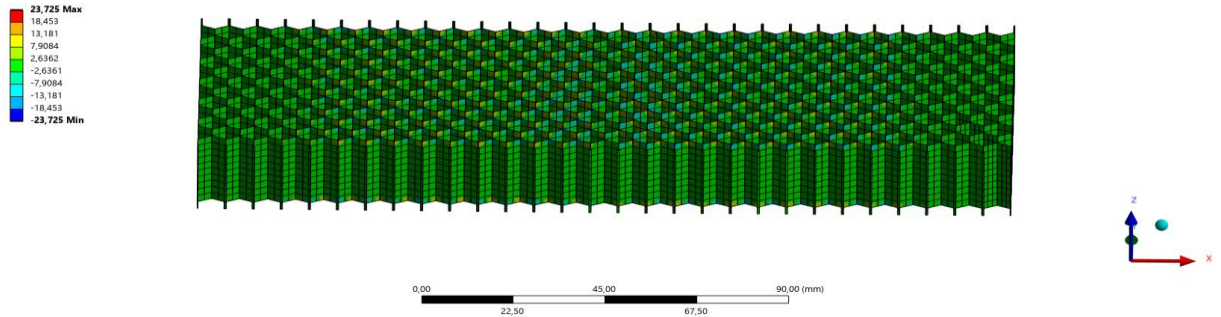
Şekil 67. Bal peteği çekirdeğin σ_z normal gerilmesi

Elde edilen bu sayısal bulgular, deneysel gözlemler ile de uyum göstermektedir. Deneysel çalışmalarda da yükleme doğrultusu boyunca, özellikle kalınlık yönünde, daha yüksek gerilme ve deformasyon etkilerinin oluştuğu ve çekirdek yapının bu doğrultuda baskın bir şekilde çalıştığı tespit edilmiştir. Bu durum, sonlu eleman analizlerinin deneysel sonuçları başarıyla temsil ettiğini ve modelin doğruluğunu desteklediğini ortaya koymaktadır.

Bal peteği çekirdek yapıya ait kayma gerilmeleri (τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz}) birlikte değerlendirildiğinde, yapının yük altında belirgin şekilde kayma deformasyonlarına maruz kaldığı ve bu davranışın sandviç yapıların karakteristik yük taşıma mekanizması ile uyumlu olduğu görülmektedir. τ_{xy} bileşeni incelendiğinde, gerilmelerin homojen dağıldığı, yalnızca hücre geometrisine bağlı olarak lokal ve periyodik değişimlerin oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu durum, XY düzlemindeki kayma etkilerinin sınırlı olduğunu ve bu bileşenin yapının genel davranışında ikincil bir rol oynadığını göstermektedir.

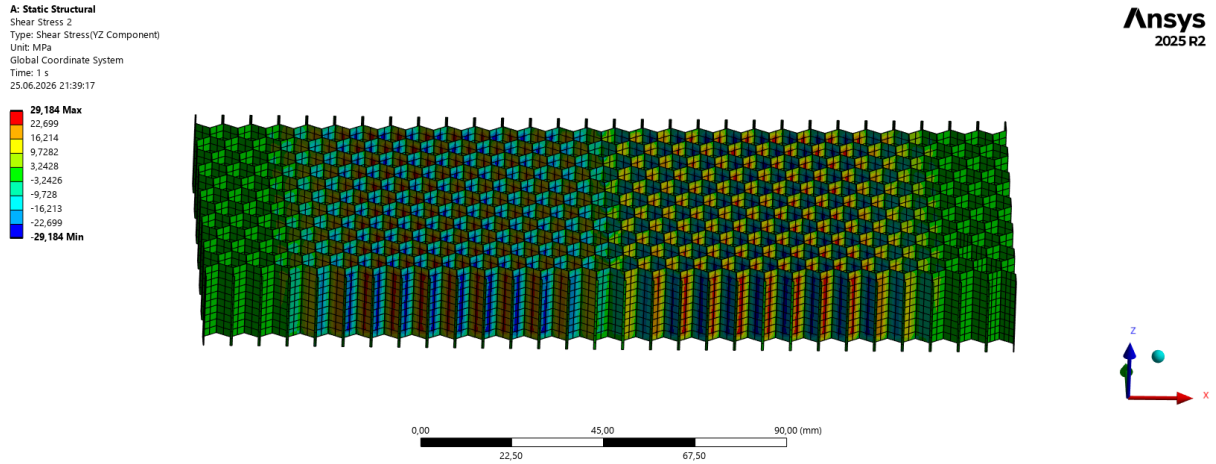
A: Static Structural
Shear Stress
Type: Shear Stress(XY Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 21:38:49

Ansyes
2025 R2



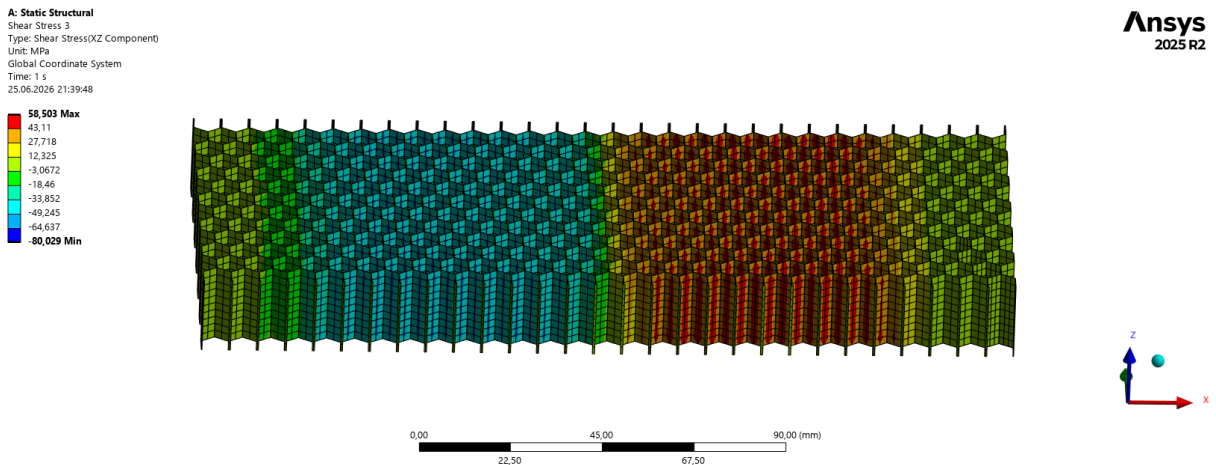
Şekil 68. Bal peteği çekirdeğin τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımı

τ_{yz} bileşeninde gerilmelerin yük aktarım bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu doğrultudaki kayma gerilmeleri, Z doğrultusunda uygulanan yükün çekirdek yapı içerisinde yan doğrultulara aktarılması sırasında ortaya çıkmakta olup, hücre duvarları boyunca yönlü bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Gerilme yoğunlaşmalarının hücresel geometriye paralel olarak düzenli bir biçimde dağıldığı gözlemlenmekte ve bu durum çekirdek yapının yükü taşıma ve dağıtma mekanizmasını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 69. Bal peteği çekirdeğin τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımı

τ_{xz} bileşeninde özellikle yapı boyunca bir bölgeden diğerine geçişte belirgin gerilme gradyanları ve yoğunlaşmaları oluşmakta olup, bu durum Z doğrultusunda uygulanan yükün X doğrultusunda aktarılması sırasında oluşan kesme etkileri ile ilişkilidir. τ_{xz} bileşenindeki yüksek gerilme seviyeleri, çekirdek yapının yük aktarımında kritik rol oynadığını göstermektedir.

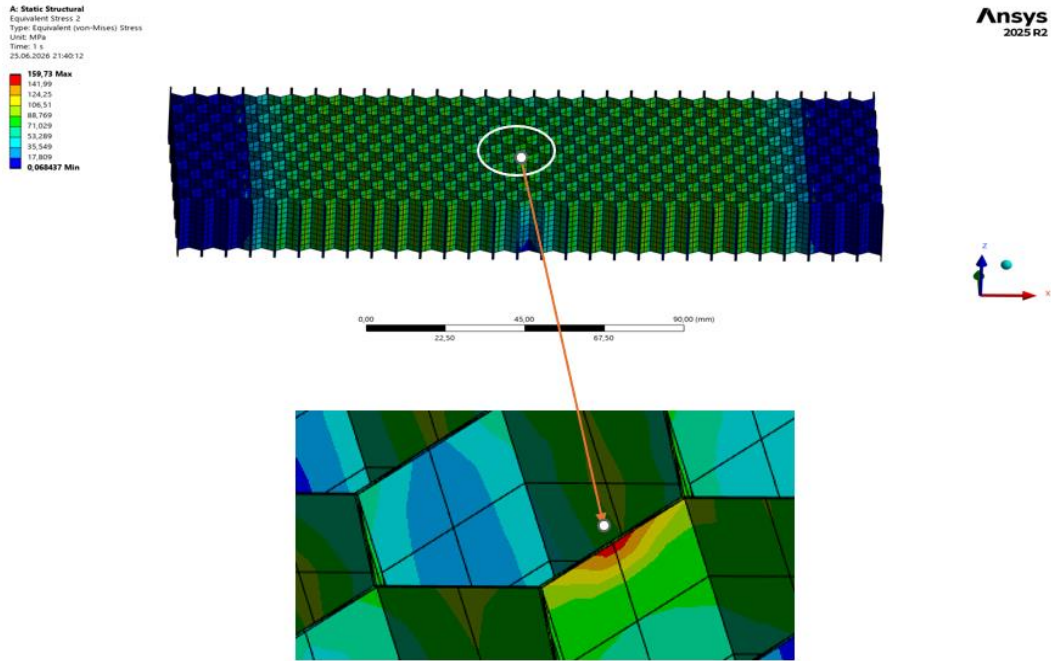


Şekil 70. Bal peteği çekirdeğin τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımı

Analiz sonuçlarına göre modelde maksimum eşdeğer gerilme değeri yaklaşık 159,73 MPa olarak belirlenmiş olup, minimum gerilme değeri ise ihmal edilebilir seviyede kalmaktadır.

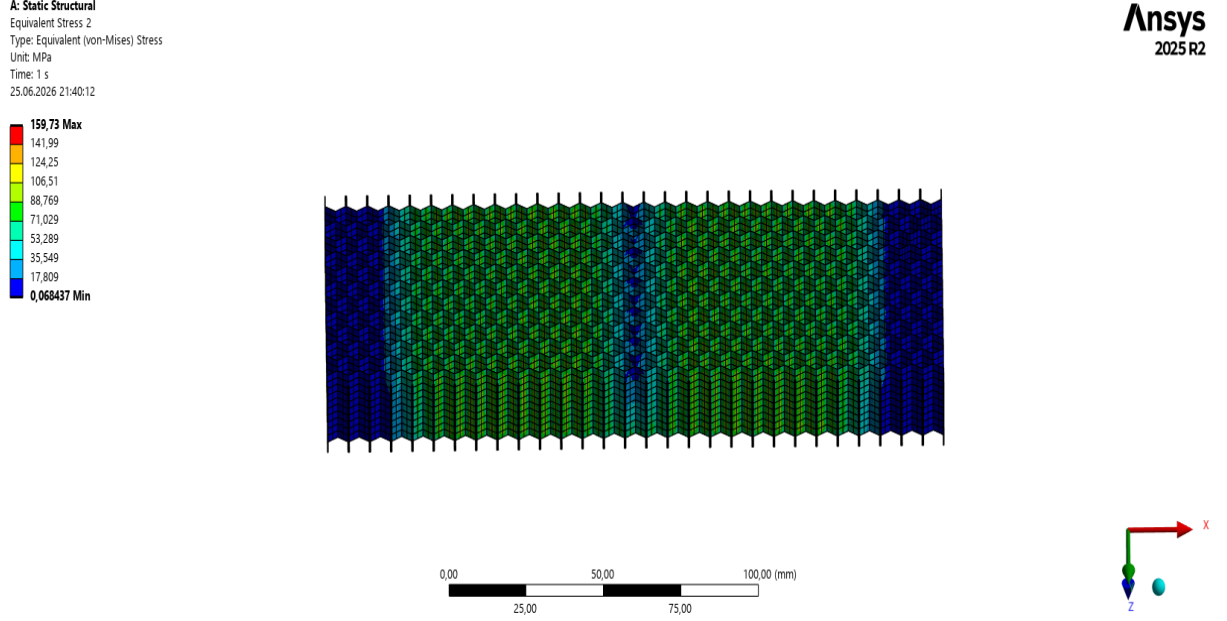
Gerilme dağılımı incelendiğinde, bal peteği çekirdek yapının orta bölgelerinde gerilme seviyelerinin daha yüksek olduğu, kenar bölgelerine doğru ise belirgin bir azalma gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu durum, uygulanan yükün yapı içerisinde merkezden çevreye doğru dağıldığını ve sınır şartlarının etkisiyle kenar bölgelerde gerilme seviyelerinin düştüğünü göstermektedir. Özellikle destek noktalarına yakın bölgelerde düşük gerilme değerlerinin elde edilmesi, bu bölgelerde kısıtlanmış deplasman koşullarının etkili olduğunu ve yük aktarımının büyük ölçüde çekirdek yapı üzerinden gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Hücre duvarları boyunca oluşan gerilme yoğunlaşmaları, yük transferinin esas olarak bu ince duvarlar üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir. Özellikle hücre duvarlarının birleşim noktalarında (node bölgeleri) lokal gerilme artışları gözlemlenmektedir. Yükün üst yüzeyden çekirdeğe aktarılması sürecinde, temas bölgesinde başlayan gerilme yoğunlaşmaları, hücresel yapı boyunca dağılarak ilerlemekte ve bu da merkez bölgelerde maksimum gerilme oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 71. Bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von Mises) gerilme dağılımının ön yüzey görünümü

Ayrıca bal peteği çekirdek yapının enerji sönümleyici ve yük dağıtıcı özelliği, alt plakaya ulaşan gerilme seviyelerinin azalmasında etkili olmaktadır.

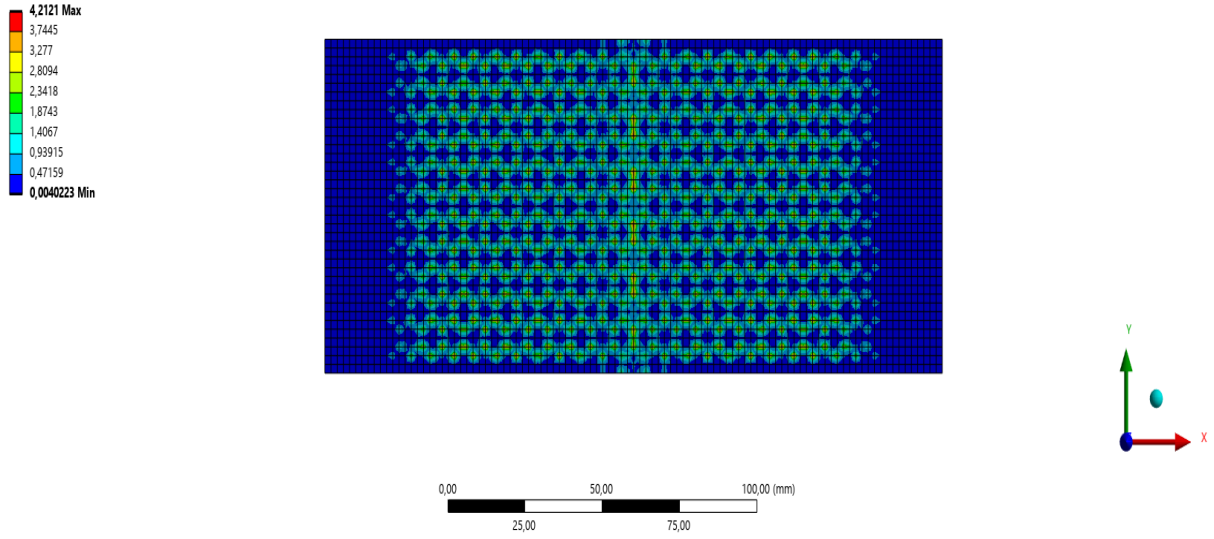


Şekil 72. Bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı arka yüzey görünümü

4.5.1.4. Üst plaka–bal peteği çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı

Analiz sonuçlarına göre yapıştırıcı tabakada maksimum gerilme değerinin yaklaşık 4,21 MPa olduğu görülmektedir. Gerilme dağılımı incelendiğinde, değerlerin genel olarak düşük seviyelerde kaldığı, ancak bal peteği hücre geometrisine bağlı olarak yerel ve periyodik gerilme yoğunlaşmalarının olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle hücre duvarlarının üst plaka ile temas ettiği bölgelerde gerilme artışlarının meydana geldiği görülmektedir. Gerilme dağılımının hücresel yapıyı takip eden bir karakter sergilemesi, yük transferinin doğrudan hücre duvarları üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, yapıştırıcı tabakada elde edilen gerilme seviyelerinin diğer yapısal bileşenlere kıyasla oldukça düşük olması, ara yüzeyin yük aktarımını etkin bir şekilde gerçekleştirdiğini ve yapının bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir.

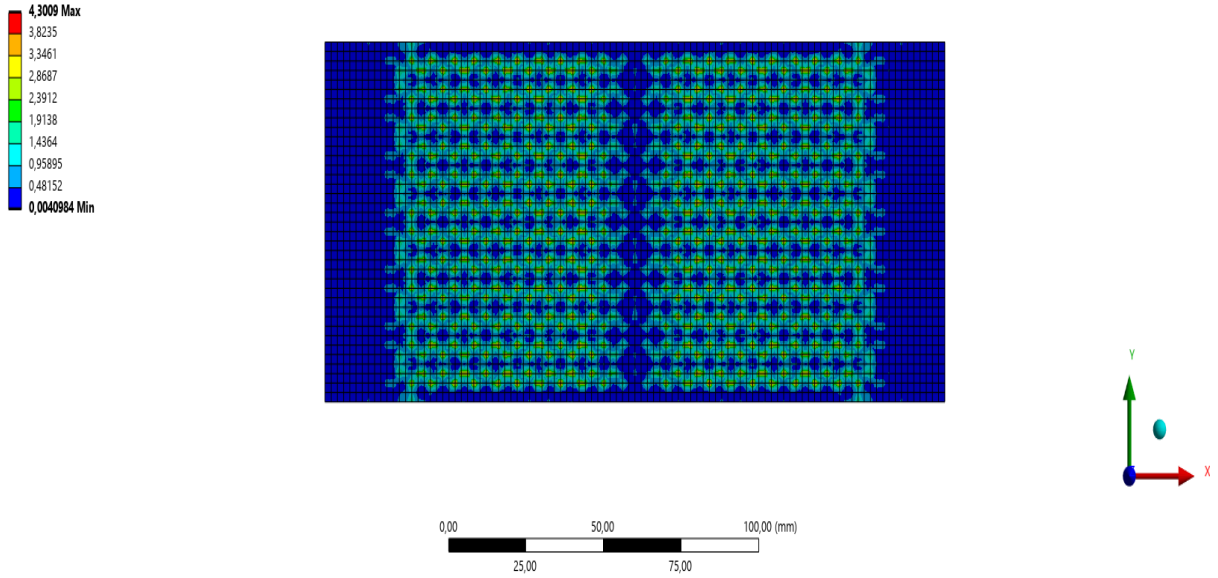


Şekil 73. Üst plaka–çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı

4.5.1.5. Alt plaka–bal peteği çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, yapıştırıcı tabakada maksimum gerilme değerinin yaklaşık 4,30 MPa seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Gerilme dağılımı detaylı olarak incelendiğinde, genel gerilme seviyelerinin düşük kaldığı, ancak bal peteği çekirdek yapının hücresel topolojisine bağlı olarak ara yüzey boyunca periyodik ve lokal gerilme yoğunlaşmalarının meydana geldiği görülmektedir.

Alt yapıştırıcı tabakada orta bölgede belirgin bir gerilme yoğunlaşmasının oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, yükün üst silindir aracılığıyla öncelikle üst plakaya uygulanması ve çekirdek yapı boyunca dağıtılarak alt plakaya daha yayılı bir şekilde iletilmesi ile açıklanabilir. Dolayısıyla alt yapıştırıcı tabakada yük aktarımı merkezi bölgede yüksek gerilme yığılması oluşmamaktadır.



Şekil 74. Alt plaka–çekirdek arasındaki yapıştırıcı tabakanın eşdeğer gerilme dağılımı

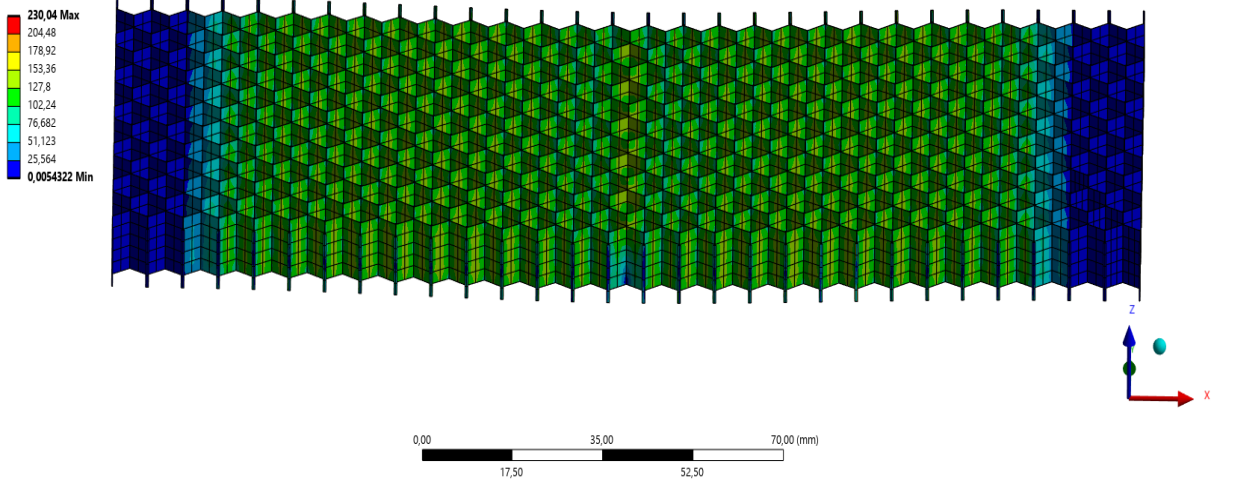
4.5.2. Plastik deformasyonun meydana geldiği konfigürasyonlarda bal peteği çekirdeğin eşdeğer (von-mises) gerilme ve plastik şekil değiştirme analizi

Plastik deformasyonun meydana geldiği konfigürasyonlar incelendiğinde, bal peteği çekirdekte oluşan eşdeğer plastik gerilme (Equivalent Stress) ve eşdeğer plastik şekil değiştirme (Equivalent Plastic Strain) dağılımlarının yük aktarım mekanizmasına doğrudan bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Analizler yalnızca plastik davranışın olduğu beş konfigürasyon için gerçekleştirilmiştir.

İlk konfigürasyonda (üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm, çekirdek 10 mm), bal peteği çekirdekte maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 230 MPa, maksimum plastik strain ise yaklaşık 0,017857 mm/mm olarak elde edilmiştir. Gerilme ve plastik deformasyon özellikle yük uygulama bölgesine yakın hücre duvarlarında yoğunlaşmış, alt bölgelerde ise belirgin plastikleşme gözlenmiştir. İnce üst plaka nedeniyle yük doğrudan çekirdeğe aktarılmış ve bu durum plastik deformasyonu artırmıştır.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 22:21:33

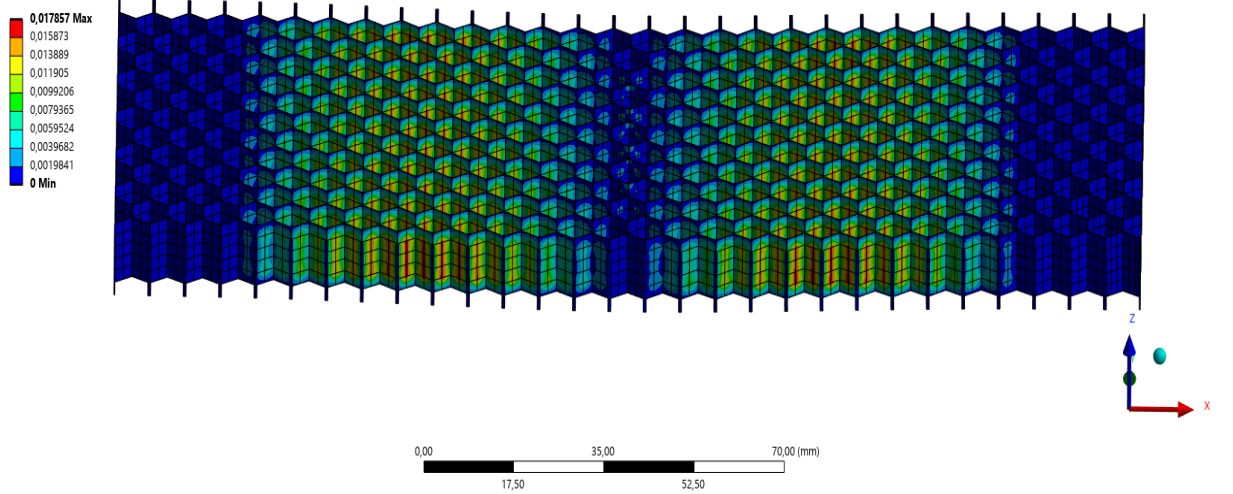
Ansyst
2025 R2



Şekil 75. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

A: Static Structural
Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1 s
25.06.2026 22:23:14

Ansyst
2025 R2

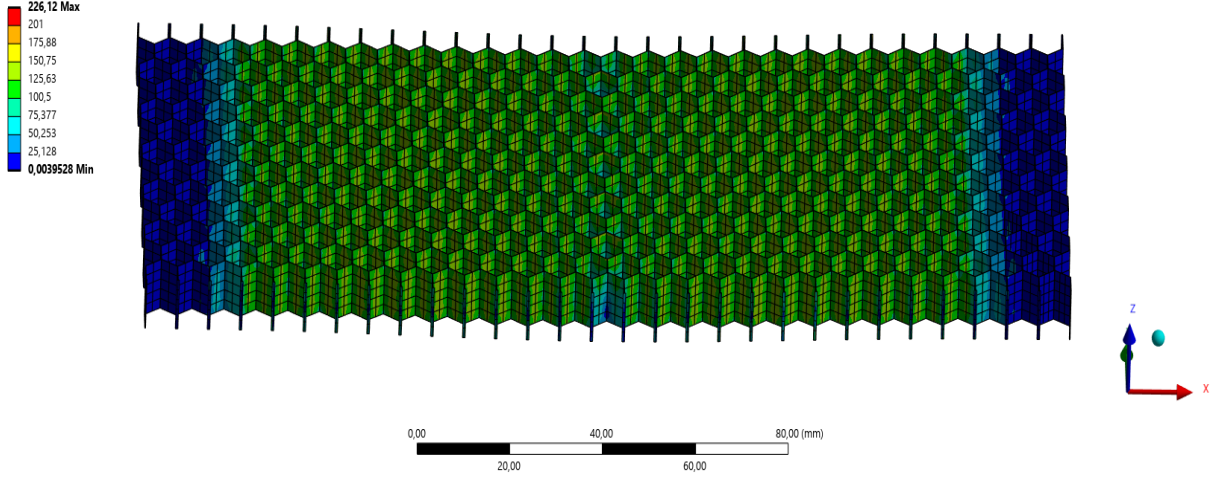


Şekil 76. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı

İkinci konfigürasyonda (üst plaka 2 mm, alt plaka 1 mm, çekirdek 10 mm), maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 226 MPa, maksimum plastik strain ise 0,018061 mm/mm seviyesine ulaşmıştır. Kalın üst plaka yükü daha geniş alana yaymasına rağmen ince alt plaka nedeniyle çekirdek içerisindeki plastikleşme devam etmiş ve özellikle alt hücre cidarlarında lokal yoğunlaşmalar oluşmuştur.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 22:27:36

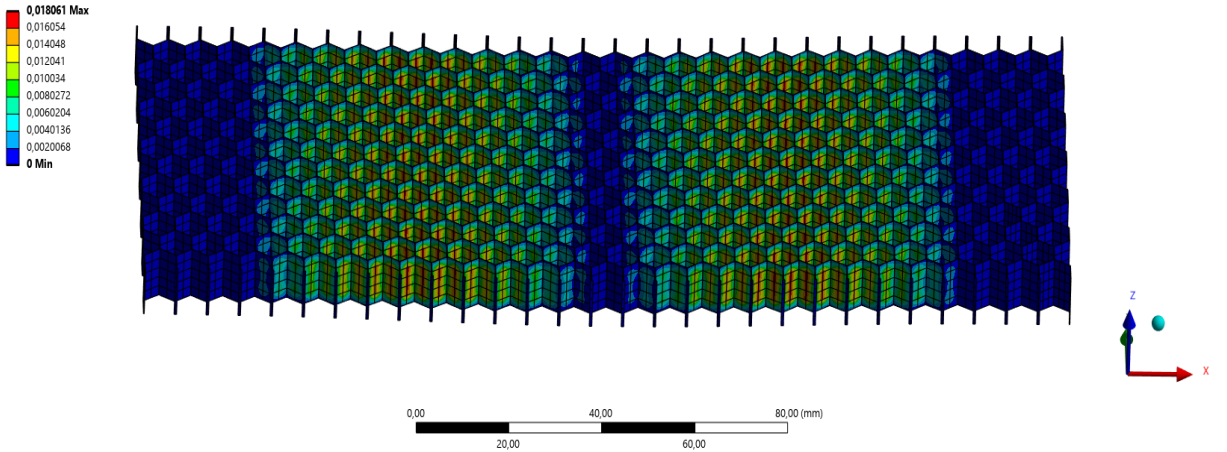
Ansyst
2025 R2



Şekil 77. Üst plaka 2 mm, alt plaka 1 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

A: Static Structural
Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1 s
25.06.2026 22:28:43

Ansyst
2025 R2

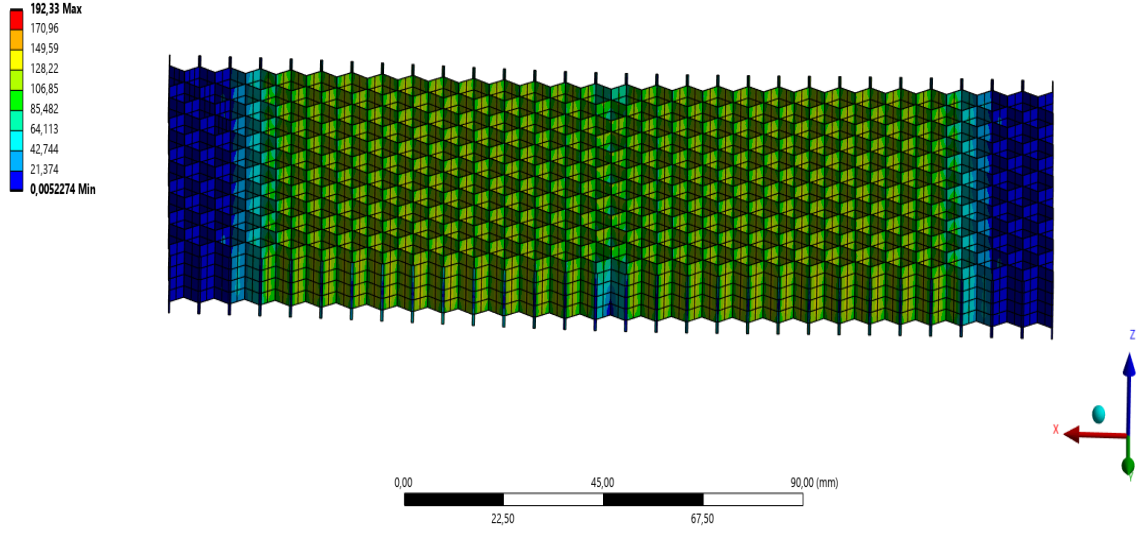


Şekil 78. Üst plaka 2 mm, alt plaka 1 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı

Üçüncü konfigürasyonda (üst ve alt plaka 2 mm, çekirdek 10 mm), maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 192 MPa, maksimum plastik strain ise yalnızca 0,009833 mm/mm olarak belirlenmiştir. Her iki yüzey levhasının kalın olması yük dağılımını iyileştirmiş, bal peteği çekirdeğe aktarılan lokal gerilmeleri azaltmış ve plastik deformasyon seviyesini önemli ölçüde düşürmüştür.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 22:31:25

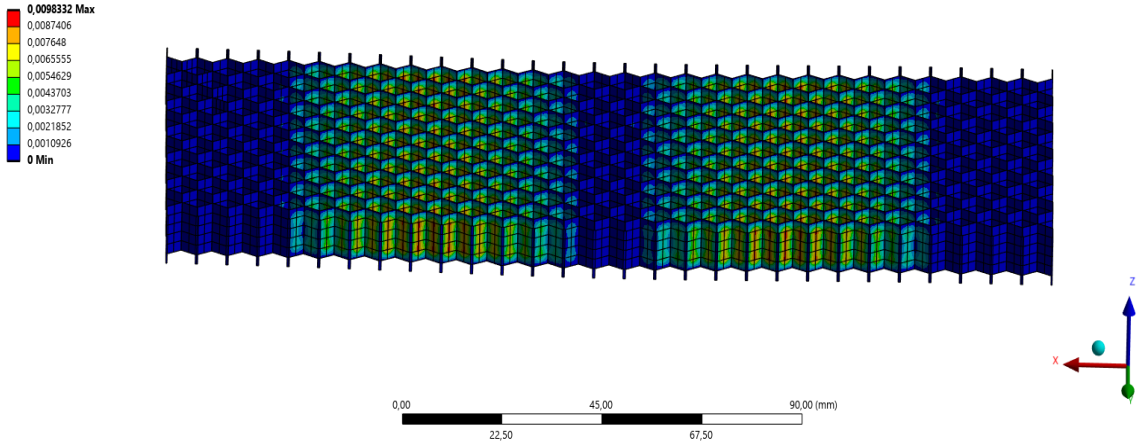
Ansys
2025 R2



Şekil 79. Üst ve alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

A: Static Structural
Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1 s
25.06.2026 22:32:03

Ansys
2025 R2

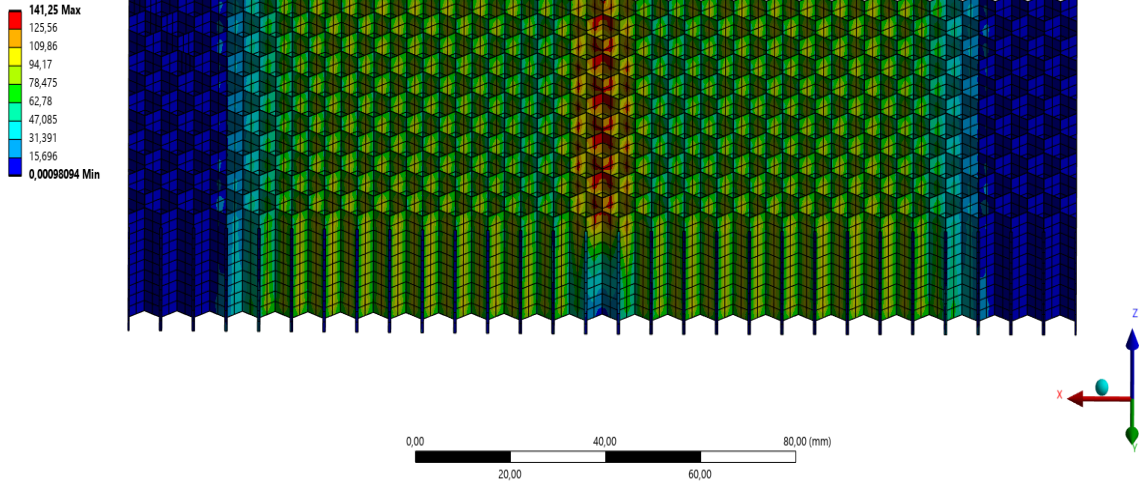


Şekil 80. Üst ve alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek yüksekliği 10 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı

Dördüncü konfigürasyonda (üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm, çekirdek 20 mm), maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 141 MPa, maksimum plastik strain ise 0,0017829 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Çekirdek kalınlığının artması rijitliği artırmış ve yük daha geniş hacimde dağıtılmıştır. Bu nedenle plastik deformasyon yalnızca yük merkezine yakın sınırlı hücrelerde görülmüştür.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
25.06.2026 22:34:02

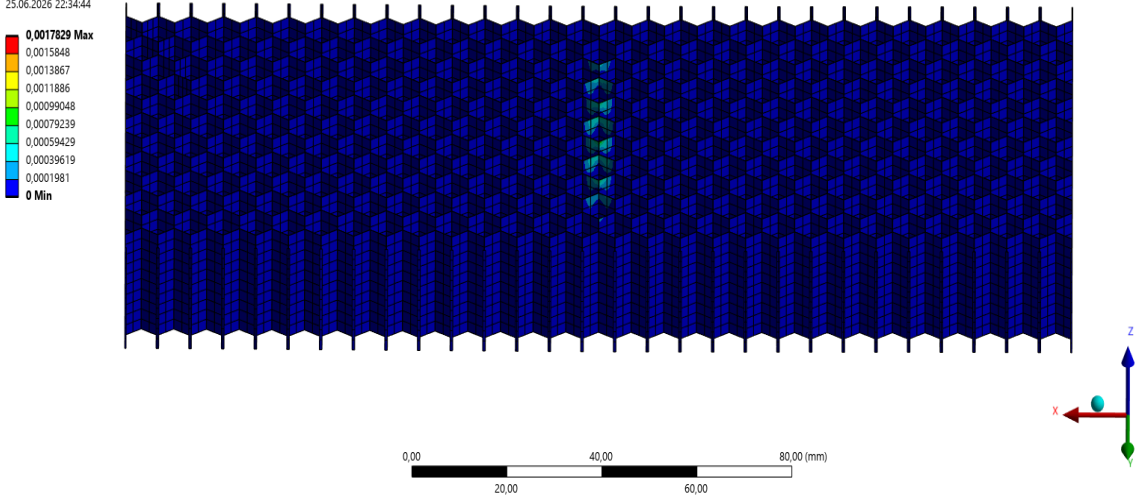
Ansys
2025 R2



Şekil 81. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 20 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı

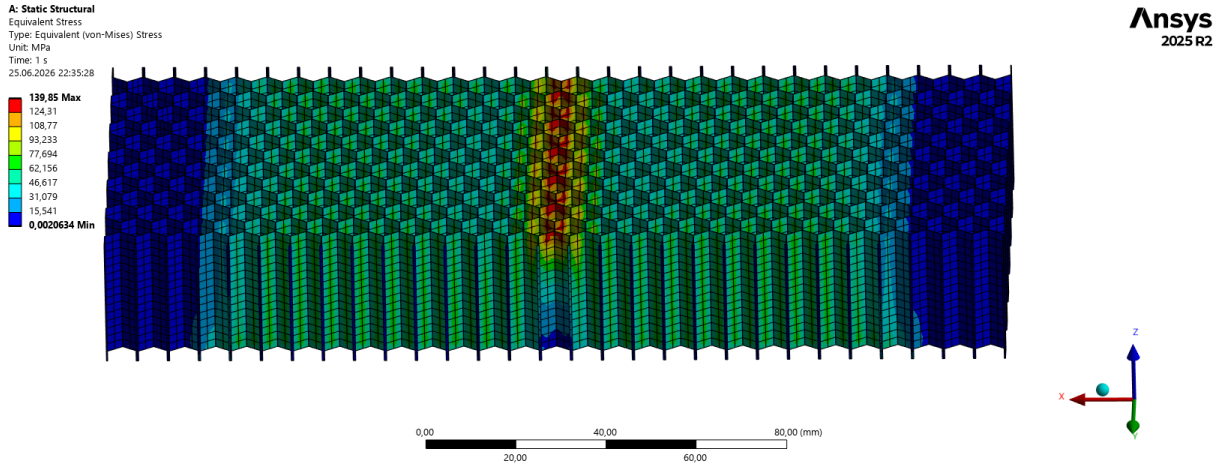
A: Static Structural
Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1 s
25.06.2026 22:34:44

Ansys
2025 R2

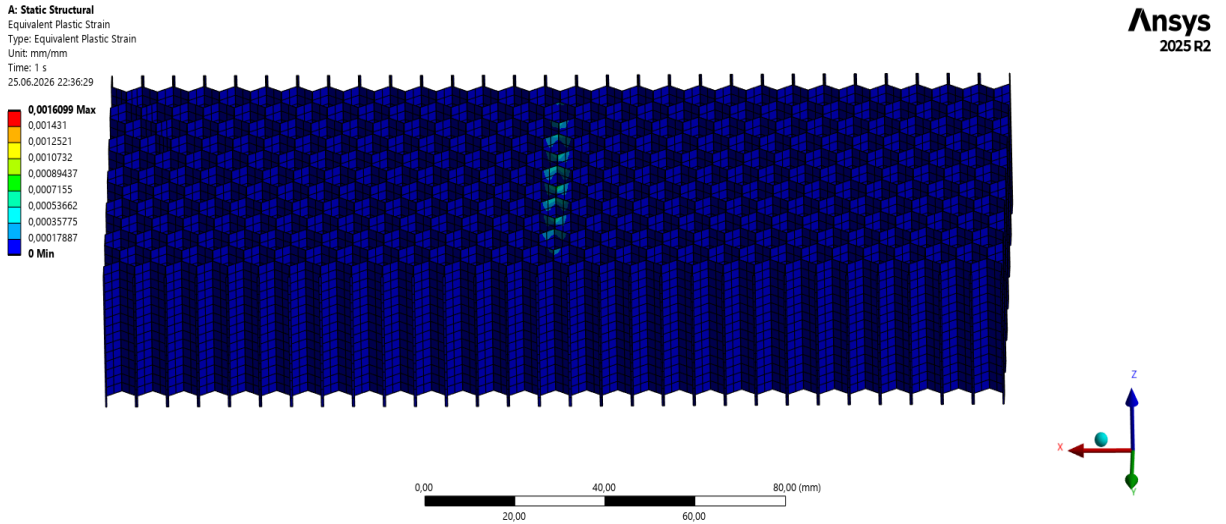


Şekil 82. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 20 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı

Beşinci konfigürasyonda (üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm, çekirdek 30 mm), maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 139 MPa, maksimum plastik strain ise 0,0016099 mm/mm seviyesine kadar düşmüştür. En düşük plastik deformasyon bu konfigürasyonda elde edilmiş olup, artan çekirdek kalınlığının bal peteği yapının yük taşıma kapasitesini belirgin şekilde artırdığı görülmüştür.



Şekil 83. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 30 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer (von-Mises) gerilme dağılımı



Şekil 84. Üst plaka 1 mm, alt plaka 2 mm ve bal peteği çekirdek yüksekliği 30 mm olan sandviç yapıda bal peteği çekirdeğe ait eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı

4.5.3. Epoksi ve poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panel konfigürasyonlarının gerilme ve plastik şekil değiştirme davranışlarının karşılaştırmalı analizi

Epoksi ve poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panellerin eşdeğer (von Mises) gerilme ve eşdeğer plastik şekil değiştirme sonuçları birlikte incelendiğinde, her iki yapıştırıcı türünde de benzer mekanik davranış eğilimleri gözlenmiştir. Ancak bazı konfigürasyonlarda yapıştırıcı tipinin özellikle çekirdek bölgesindeki gerilme dağılımı ve plastik deformasyon başlangıcı üzerinde belirgin etkileri olduğu görülmektedir.

Eşdeğer (von-Mises) gerilme sonuçlarına göre en yüksek gerilme değerleri her iki yapıştırıcı türünde de 10 mm çekirdek kalınlığına sahip ve üst plakanın ince (1 mm), alt plakanın kalın (2 mm) olduğu konfigürasyonda meydana gelmiştir. Epoksi yapıştırıcıda bal peteği çekirdekte 230,04 MPa, poliüretan yapıştırıcıda ise 231,06 MPa değerine ulaşılmıştır. Bu durum, ince üst plakanın eğilme altında daha yüksek gerilme oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Aynı konfigürasyonda üst plakada meydana gelen gerilmeler de en yüksek seviyededir. Üst plaka kalınlığının 2 mm'ye çıkarılması ile hem yüzey levhalarında hem de çekirdekte gerilme değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Elde edilen bu bulgular, deneysel çalışmalarda gözlenen yük taşıma kapasitesi eğilimleri ile uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur. Levha kalınlığının artmasıyla yapının eğilme rijitliği yükselmekte, buna bağlı olarak gerilme seviyeleri azalmakta ve maksimum yük taşıma kapasitesi artmaktadır.

Çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm ve 30 mm'ye artırılması, tüm konfigürasyonlarda gerilme seviyelerini düşürmüştür. Özellikle üst plaka ve alt plaka gerilmelerinde belirgin azalma görülmüştür. Bu durum, artan çekirdek kalınlığının eğilme rijitliğini artırarak yük taşıma kapasitesini daha homojen dağıtmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte 20 mm'den sonra gerilme azalmasının sınırlı hale geldiği ve sistemin belirli bir rijitliğe ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum deneysel sonuçlarla uyumludur. Sonlu elemanlar modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olması, sayısal analizlerin deneysel bulguları desteklediğini göstermektedir.

Bal peteği çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye artırılması, sandviç yapının eğilme rijitliğini önemli ölçüde artırmış ve buna bağlı olarak çekirdek ile yüzey levhalarında oluşan gerilmelerin belirgin şekilde azalmasını sağlamıştır. Ancak çekirdek kalınlığının 20 mm'den 30 mm'ye çıkarılması durumunda gerilme değerlerindeki azalma oldukça sınırlı kalmıştır. Bu durum, çekirdek kalınlığındaki artışın eğilme rijitliğine olan katkısının belirli bir değerden sonra azalmasıyla açıklanabilir. Başka bir ifadeyle, 20 mm çekirdek kalınlığına ulaşıldıktan sonra yapı yeterli eğilme rijitliğine sahip olmakta ve ilave kalınlık artışları gerilme seviyelerinde yalnızca marjinal iyileşmeler sağlamaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, deneysel çalışmalarda gözlenen yük taşıma kapasitesi eğilimleri ile benzerlik göstermekte olup, çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye artırılmasıyla önemli performans artışı sağlanırken, 20 mm'den 30 mm'ye geçişte iyileşme miktarının sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

Tablo 9. Epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer (von- Mises) gerilmeler

Konfigürasyon	Üst Plaka (MPa)	Alt Plaka (MPa)	Üst Yapıştırıcı (MPa)	Alt Yapıştırıcı (MPa)	Bal Peteği Çekirdek (MPa)
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	183,38	116	10,838	7,5728	230,04
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 10 mm	135,33	98,158	7,406	6,7474	226,12
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	99,232	71,795	6,4971	6,3754	192,33
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	125,59	34,516	7,9492	4,4236	141,25
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 20 mm	64,809	46,45	4,367	4,9787	159,97
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	61,596	29,878	4,2121	4,3009	159,73
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	111,37	25,329	7,7764	3,0656	139,85
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 30 mm	54,697	44,895	4,1349	4,2717	159,53
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	53,23	25,044	4,0847	3,0269	158,58

Tablo 10. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer (von- Mises) gerilmeler

Konfigürasyon	Üst Plaka (MPa)	Alt Plaka (MPa)	Üst Yapıştırıcı (MPa)	Alt Yapıştırıcı (MPa)	Bal Peteği Çekirdek (MPa)
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	182,75	115,67	11,499	7,8299	231,06
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 10 mm	135,05	98,046	7,5229	6,8326	227,17
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	98,936	71,671	6,5699	6,4392	187,64
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	125,59	34,516	7,9492	4,4236	141,25
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 20 mm	64,598	46,275	4,404	5,0272	155,84
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	61,39	29,807	4,325	4,323	155,58
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	101,91	25,21	8,1754	3,0823	139,92
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 30 mm	54,522	44,563	4,3207	4,3209	155,37
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	53,057	24,925	4,2666	3,0434	154,44

Plastik şekil değiştirme sonuçları incelendiğinde, plastik deformasyonun yalnızca bal peteği çekirdek bölgesinde olduğu, yüzey levhaları ve yapıştırıcı tabakalarında ise plastik deformasyon meydana gelmediği görülmektedir. Bu durum, yapısal hasarın ilk olarak çekirdek malzemede başladığını göstermektedir. En yüksek plastik şekil değiştirme yine 10 mm çekirdek kalınlığına sahip konfigürasyonlarda görülmüştür. Epoksi yapıştırıcıda maksimum değer 0,018061 mm/mm, poliüretan yapıştırıcıda ise 0,017960 mm/mm olarak belirlenmiştir.

20 mm ve 30 mm çekirdek kalınlığına sahip bazı simetrik veya rijit konfigürasyonlarda plastik deformasyonun tamamen ortadan kalktığı görülmektedir. Özellikle üst ve alt plakanın 2 mm olduğu durumlarda plastik şekil değiştirme sıfır olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, kalın yüzey levhaları ile birlikte artan çekirdek yüksekliğinin sistem rijitliğini ciddi şekilde artırdığını göstermektedir.

Tablo 11. Epoksi yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme

Konfigürasyon	Üst Plaka (mm/mm)	Alt Plaka (mm/mm)	Üst Yapıştırıcı (mm/mm)	Alt Yapıştırıcı (mm/mm)	Bal Peteği Çekirdek (mm/mm)
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,017857
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,018061
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,009833
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0,0017829
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0,0016099
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0

Tablo 12. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan konfigürasyonlarda sandviç panel bileşenlerinde oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme

Konfigürasyon	Üst Plaka (mm/mm)	Alt Plaka (mm/mm)	Üst Yapıştırıcı (mm/mm)	Alt Yapıştırıcı (mm/mm)	Bal Peteği Çekirdek (mm/mm)
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,017758
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,017960
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 10 mm	0	0	0	0	0,009770
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0,0017829
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 20 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 1 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0,0014736
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 1 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0
Üst Plaka 2 mm Alt Plaka 2 mm Çekirdek 30 mm	0	0	0	0	0

Yapıştırıcı türleri karşılaştırıldığında epoksi ve poliüretan arasında genel gerilme dağılımı açısından büyük fark bulunmamakla birlikte, poliüretan yapıştırıcının bazı konfigürasyonlarda çekirdek gerilmesini çok az artırdığı, epoksi yapıştırıcının ise plastik deformasyonu bir miktar daha sınırladığı görülmektedir. Bu nedenle yüksek rijitlik ve plastik deformasyon kontrolü açısından epoksi yapıştırıcı daha avantajlı değerlendirilebilir. Buna karşılık iki yapıştırıcı

arasındaki farkın oldukça düşük olması, tasarım kararında maliyet, üretim kolaylığı ve servis koşullarının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

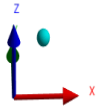
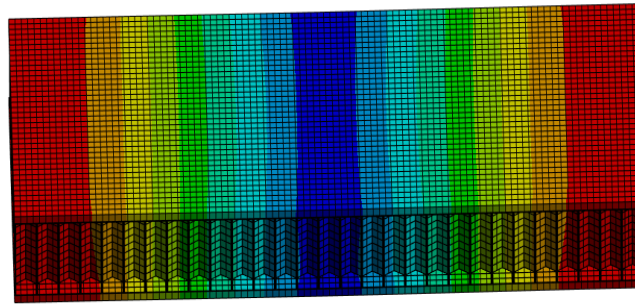
4.5.4. Yer değiştirme analizleri

Yönlü deformasyon sonuçları incelendiğinde, üç nokta eğme yüklemesi altında sandviç panelde en belirgin yer değiştirme Z eksenini doğrultusunda meydana gelmiştir. Z doğrultusundaki deformasyon değerleri maksimum 0,0097762 mm, minimum ise -0,21161 mm olarak elde edilmiştir. Minimum değer mutlak olarak daha yüksek olması, panelin yükleme doğrultusunda aşağı yönde sehim yaptığını göstermektedir. Deformasyon dağılımının özellikle orta bölgede yoğunlaşması, üç nokta eğme deneyinde beklenen eğilme davranışı ile uyumludur.

A: Static Structural
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 22:40:53

Ansyes
2025 R2

0,0097762 Max
-0,014822
-0,03942
-0,064018
-0,088616
-0,11321
-0,13781
-0,16241
-0,18701
-0,21161 Min



0,00 50,00 100,00 (mm)
25,00 75,00

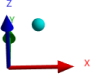
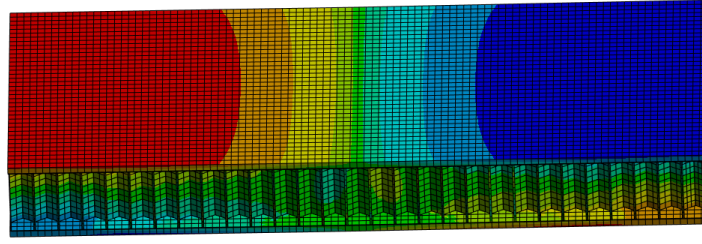
Şekil 85. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki Z eksenini doğrultusundaki yönlü deformasyonu

X doğrultusundaki deformasyon değerleri maksimum 0,011313 mm, minimum ise -0,011403 mm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, eğilme etkisi altında panel boyunca çekme ve basma bölgelerinin oluştuğunu göstermektedir. X doğrultusundaki deformasyon dağılımının panel uzunluğu boyunca zıt işaretli olarak değişmesi, numunenin eğilme sırasında boyuna doğrultuda uzama ve kısalma davranışı sergilediğini ifade etmektedir.

A: Static Structural
Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 22:42:12

Ansyes
2025 R2

0,011313 Max
0,0087888
0,0062649
0,0037409
0,0012169
-0,001307
-0,003831
-0,006355
-0,0088789
-0,011403 Min



0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (mm)

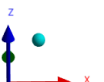
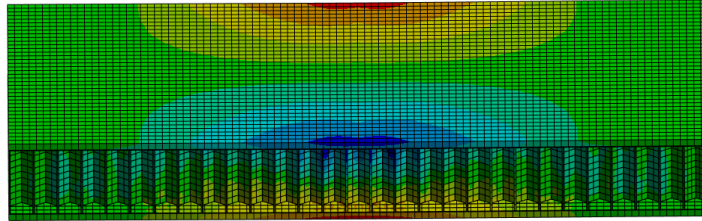
Şekil 86. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki X eksenli doğrultusundaki yönlü deformasyonu

Y eksenli doğrultusundaki deformasyon değerleri ise maksimum 0,0032447 mm, minimum -0,0032442 mm olarak elde edilmiştir. Y doğrultusundaki deformasyon değerleri, yapının enine doğrultuda önemli bir kararsızlık göstermediğini ortaya koymaktadır.

A: Static Structural
Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
25.06.2026 22:42:56

Ansyes
2025 R2

0,0032447 Max
0,0025237
0,0018027
0,0010817
0,00036075
-0,00036024
-0,0010812
-0,0018022
-0,0025232
-0,0032442 Min



0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (mm)

Şekil 87. Sandviç panelin üç nokta eğme yüklemesi altındaki Y eksenli doğrultusundaki yönlü deformasyonu

4.6. Yorulma Deneyleri Test Sonuçları

Farklı geometrik ve malzeme parametrelerine sahip toplam 54 farklı sandviç panel konfigürasyonu statik yükleme altında deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan statik deneyler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, belirli konfigürasyonlar arasından yapısal performans açısından öne çıkan iki referans numunenin yorulma davranışlarının detaylı olarak

incelenmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda, alt ve üst yüzey tabakası kalınlığı 2 mm, çekirdek kalınlığı 20 mm olan ve 15 gr epoksi yapıştırıcı ile üretilen 18. konfigürasyon ile 22,5 gr poliüretan yapıştırıcı kullanılan 42. konfigürasyon seçilmiştir.

Yorulma deneyleri ASTM C393 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 10 Hz frekansta sinüzoidal yükleme uygulanmıştır. Yük oranı (R), minimum yükün maksimum yüke oranı olarak tanımlanmış olup tüm deneylerde R=0 olarak seçilmiştir. Bu nedenle yükleme çevrimi boyunca minimum yük sıfır kabul edilmiş ve numuneler yalnızca tek yönlü yükleme altında test edilmiştir.

Deneylerde uygulanan yorulma yükü, maksimum statik yük kapasitesine oranlanarak belirlenmiştir.

$$\frac{F}{F_{max}}$$

Burada;

- F : Uygulanan yorulma yükü (N)
- F_{max} : Statik deneyde elde edilen maksimum yük (N)

Aynı yük seviyesinde gerçekleştirilen tekrar deneylerinden elde edilen çevrim sayılarının ortalaması aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Liu vd., 2023).

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}$$

Burada;

- $\bar{N}$: Ortalama çevrim sayısı
- N_i : Her bir numunenin kırılma çevrim sayısı
- n : Numune sayısı

Bu çalışmada her yük seviyesi için 5 adet numune test edilmiştir.

Yorulma deneyleri, sandviç yapıların çevrimsel yükleme koşulları altında değişen mekanik davranışlarını ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel yaklaşım, yapıların yalnızca ani yükler altındaki davranışını değil, aynı zamanda tekrarlı yükler altında maruz kaldıkları hasar birikimi sürecini de değerlendirmeye imkân sağlamaktadır. Bu nedenle deneyler, kontrollü laboratuvar koşulları altında ve tekrarlanabilir bir yükleme düzeni kullanılarak yürütülmüştür.

Deneyleer üç nokta eğme yükleme düzeneği kullanılarak gerçekteştirilmiş olup, yükleme sistemi sandviç kiriş davranışını temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. Numuneler, basit mesnetli kiriş koşullarına uygun olarak yerleştirilmiş ve yük uygulaması numunenin orta noktasından olacak şekilde uygulanmıştır. Bu sayede, eğilme etkisi altında çekirdek ve yüzey tabakalarının birlikte çalıştığı bir gerilme durumu elde edilmiştir. Tüm deneyleer ASTM C393 standardında belirtilen geometrik ve yükleme prensipleri dikkate alınarak yürütölmüştür.

Her bir numune için uygulanan yükleme sinüzoidal karakterde olup, çevrimsel yükleme boyunca yük seviyesinin sabit kalması sağlanmıştır. Deneyleer, numunede tam hasar meydana gelene kadar devam ettirilmiş ve bu süreç boyunca uygulanan çevrim sayısı sürekli olarak kayıt altına alınmıştır.

Deneysel program kapsamında farklı yük seviyeleri için testler ayrı ayrı tekrarlanmış ve böylece her bir yükleme durumu için bağımsız veri setleri elde edilmiştir. Bu yaklaşım, deneysel sonuçların sistematik bir şekilde karşılaştırılmasına imkân sağlamış ve her bir numunenin farklı yük koşulları altındaki davranışının ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Tüm deneyleer aynı test düzeneği kullanılarak, aynı sınır şartları altında ve aynı yükleme yöntemi ile gerçekteştirilmiştir. Bu sayede, deney sonuçlarının yalnızca numunelerin geometrik ve malzeme özelliklerinden kaynaklanan farklılıkları yansıtması hedeflenmiştir. Deney sürecinde elde edilen tüm veriler, her bir numune için ayrı ayrı kayıt altına alınmış ve sonraki analiz aşamalarında değerlendirilmek üzere düzenlenmiştir.

4.6.1. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelerin yorulma davranışı (18. Konfigürasyon)

Gerçekteştirilen statik deneyleer sonucunda, bal peteği sandviç panel yapıları arasında en yüksek yük taşıma kapasitesini sağlayan epoksi yapıştırıcı kullanılan numune 18. konfigürasyon olarak belirlenmiştir. Bu konfigürasyonda üst plaka kalınlığı 2 mm, alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek kalınlığı 20 mm olup, bağlayıcı malzeme olarak toplam 22,5 gram epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Statik performans bakımından öne çıkan bu konfigürasyon, yorulma davranışının detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla seçilmiş ve deneyleer bu numune üzerinden yürütölmüştür. Yapılan statik yükleme deneyleerinde bu konfigürasyonun 4,556 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir.

Yorulma deneyleri, ilgili standart gereklilikleri doğrultusunda ASTM C393 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yük seviyeleri, numunenin statik taşıma kapasitesi referans alınarak belirlenmiş ve %80, %70 ve %65 olmak üzere üç farklı seviyede uygulanmıştır. Bu yaklaşım ile malzemenin farklı gerilme seviyeleri altında gösterdiği çevrimsel davranışın karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

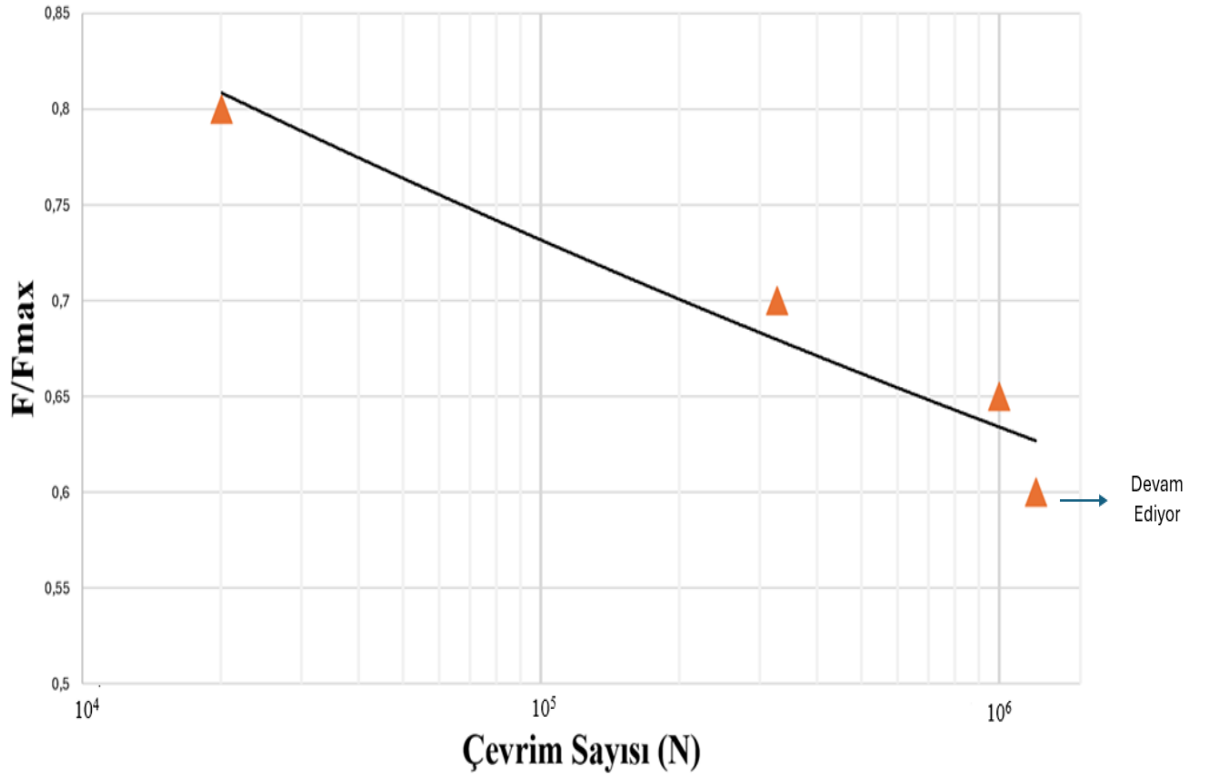
Yük seviyelerinin seçiminde temel amaç, sandviç yapıların farklı yorulma bölgelerindeki davranışlarını gözlemleyebilmektir. Çok yüksek yük seviyelerinde uygulanan çevrimsel yükler, numunelerde kısa sürede hasar oluşmasına neden olmakta ve yüksek çevrim yorulma davranışının incelenmesini zorlaştırmaktadır. Buna karşılık çok düşük yük seviyelerinde deney süreleri önemli ölçüde uzamakta ve numuneler belirlenen çevrim sınırına ulaşmasına rağmen kırılmayabilmektedir. Bu nedenle yük seviyeleri, hem deney süresini makul düzeyde tutacak hem de yorulma ömründeki değişimi ortaya koyabilecek şekilde seçilmiştir.

Tablo 13. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler için yük oranı-çevrim sayısı değerleri

Yük Oranı	Test No	Çevrim Sayısı
0,8	1	12.970
	2	20.910
	3	19.910
	4	26.970
	5	19.870
0,7	1	313.370
	2	306.750
	3	307.610
	4	305.620
	5	299.970
0,65	1	1.000.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)
	2	1.000.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)
	3	1.000.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)
0,6	1	1.200.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)
	2	1.200.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)
	3	1.200.000 (numune kırılmadan test sonlandırıldı)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yük seviyesinin azalmasına bağlı olarak numunelerin taşıyabildiği çevrim sayısında belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Yük seviyesinin yüksek olduğu %80 seviyesinde daha düşük çevrim sayıları elde edilirken, yük seviyesinin %70 ve özellikle %65 seviyelerine düşürülmesiyle birlikte yorulma ömrünün önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, epoksi yapıştırıcı kullanılan sandviç panellerin yorulma performansının doğrudan uygulanan yük seviyesi ile ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca farklı yük seviyelerinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması, epoksi yapıştırıcı kullanılan sistemlerin yüksek yük seviyelerinde daha sınırlı çevrim ömrü sunmasına karşın, yük seviyesinin düşürülmesi durumunda oldukça kararlı ve tekrar edilebilir bir yorulma davranışı sergilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, 18. konfigürasyon epoksi yapıştırıcı kullanılan sandviç panelin hem yüksek taşıma kapasitesi hem de belirli yük seviyelerinde sağladığı çevrim ömrü ile dengeli bir performans sunduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 88. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numuneler için yorulma grafikleri

4.6.2. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerin yorulma davranışı (42. Konfigürasyon)

Poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panel numuneleri arasında yapılan statik deneyler sonucunda en yüksek performans 42. konfigürasyonda elde edilmiştir. Bu konfigürasyonda üst plaka kalınlığı 2 mm, alt plaka kalınlığı 2 mm, bal peteği çekirdek kalınlığı 20 mm olup, bağlayıcı malzeme olarak 15 mm kalınlığında poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Statik sonuçlara göre öne çıkan bu yapı, yorulma performansının incelenmesi amacıyla seçilmiş ve deneyler bu numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan statik yükleme deneylerinde bu konfigürasyonun 4,425 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı belirlenmiştir.

Yorulma deneyleri yine ASTM C393 standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Ancak poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerde yük seviyesi seçimi epoksi numunelerden farklı olarak belirlenmiştir. Yapılan ön deneyler ve değerlendirmeler sonucunda, poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panelin %90 yük seviyesi altında dahi yüksek çevrim sayısına ulaşabildiği ve 1 milyon çevrim ömrünü sağlayabildiği tespit edilmiştir. Bu nedenle deneyler yalnızca bu kritik yük seviyesi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, poliüretan yapıştırıcı kullanılan sistemin yüksek yük seviyelerinde dahi önemli bir çevrim ömrü sunabildiğini göstermektedir. Özellikle %90 gibi yüksek bir yük oranında 1 milyon çevrime ulaşılması, bu konfigürasyonun yorulma dayanımı oldukça dikkat çekici bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panellerin yüksek yük altında uzun süreli çalışmalarda kullanılabilirliğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, 42. konfigürasyon poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panelin, yüksek yük seviyesinde dahi uzun çevrim ömrü sağlayabilmesi açısından başarılı bir performans ortaya koyduğu ve yorulma dayanımı bakımından güçlü bir alternatif oluşturduğu değerlendirilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapıştırıcı türü, yapıştırıcı miktarı, çekirdek kalınlığı ve alt ile üst yüzey plakaları arasındaki kalınlık farkından kaynaklanan yüzey plaka asimetrisinin kompozit plakanın üç noktalı eğilme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma, bir dizi deneysel çalışma ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar istatistiksel yöntemlerle ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, oluşturulan sonlu elemanlar modeli kullanılarak deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçlarının uyumluluğu incelenmiştir. Statik performans açısından en iyi sonuç veren iki konfigürasyon üzerinde ise yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Yapıştırıcı türü kompozit panelin dayanımını etkilemektedir. Poliüretan yapıştırıcı, epoksiye göre %7 daha iyi performans göstermektedir.
2. Yapıştırıcı miktarının artırılması, maksimum kuvveti neredeyse doğrusal olarak verilen değerler için artırmaktadır.
3. Çekirdek kalınlığının 10 mm'den 20 mm'ye artırılması, ortalama maksimum kuvveti %28 artırmıştır. Ancak 20 mm'den 30 mm'ye çıkarıldığında bu artış ivmesi kaybolmuş ve yalnızca %0,9'luk bir artış gözlenmiştir.
4. Üst yüzey levhası kalınlığının artmasıyla kompozit panelin dayanımı artmaktadır: 1 mm kalınlıkta ortalama maksimum kuvvet istatistik programından elde edilen sonuçlara göre 2,64 kN iken, 1,5 mm'de %25 ve 2 mm'de %14 daha fazla artış görülmüştür.
5. Alt yüzey levhası kalınlığı, üst yüzey levhasına göre daha az önemlidir. 1 mm kalınlıkta ortalama maksimum kuvvet istatistik programından elde edilen sonuçlara göre 3,13 kN iken, 1,5 mm'de %2 ve 2 mm'de %6 artış meydana gelmiştir.
6. Yapıştırıcı türü, çekirdek kalınlığı düşük olduğunda etkili olmaktadır; ancak çekirdek kalınlığı arttığında yapıştırıcı türünün anlamlı bir etkisi kalmamaktadır.
7. Çekirdek kalınlığından bağımsız olarak, üst yüzey levhası kalınlığı arttıkça panelin dayanımı artmaktadır. Üst yüzey levhası kalınlığının etkisi, çekirdek kalınlığı arttıkça daha belirgin hale gelmektedir.
8. Üst yüzey levhası kalınlığı düşük olduğunda alt yüzey levhası kalınlığı çok etkili olmamaktadır. Ancak üst yüzey levhası kalınlığı arttıkça alt yüzey levhası daha önemli hale gelmektedir.
9. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, deneysel sistem ile yüksek uyum göstermiş ve oluşturulan modelin güvenilir olduğunu ortaya koymuştur.

10. Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerin %90 gibi yüksek bir yük seviyesinde dahi 1.000.000 ve daha fazla çevrime ulaşması, bu yapıştırıcının yorulma dayanımı açısından oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.
11. Genel olarak değerlendirildiğinde, poliüretan yapıştırıcı kullanılan sandviç panellerin yüksek yük seviyelerinde daha üstün yorulma performansı sergilediği, epoksi yapıştırıcı kullanılan sistemlerin ise dengeli statik ve yorulma davranışı sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA

- Altigen Panel Üst Yapı San. Tic. ve Tic. A.Ş. (2023). *Altigen teknik ürün kataloğu*. Konya, Türkiye: ve Tic. A.Ş. Erişim adresi: <https://www.6genpanel.com.tr/assets/files/altigen-katalog2023.pdf>
- ANSYS Inc. (2023). ANSYS Mechanical user's guide (Release 2023 R1). Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc.
- ASTM C393. (2020) Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D638. (2022) Standard test method for tensile properties of plastics ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM E466. (2017) Standard practice for conducting force controlled fatigue tests of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Abrate, S. (1997). Localized impact on sandwich structures with laminated facings. *Applied Mechanics Reviews*, 50(2), 69–82
- Allen, H. G. (1969). *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Alsubari, S., Zuhri, M. Y. M., Sapuan, S. M., Ishak, M. R., Ilyas, R. A., & Asyraf, M. R. M. (2021). Potential of natural fiber reinforced polymer composites in sandwich structures: A review on its mechanical properties. *Polymers*, 13(3), 423.
- Anonymous. (2019). Numerical simulation of fatigue behavior of honeycomb sandwich panels. *Key Engineering Materials*, 525-526, 113-120.
- Anonymous. (2020). Fatigue behavior of composite sandwich panels under three point bending load. *Polymer Testing*, 91, 106795.
- Anonymous. (2022). Fatigue of composite honeycomb sandwich panels under random vibration load. *Composite Structures*, 286, 115296.
- Anonymous. (2024). Bending fatigue life prediction of honeycomb sandwich structures. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 15(6), 224-234.
- Aydıncak, İ. (2007). *Investigation of design and analyses principles of honeycomb structures* Master's thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Türkiye.
- B Group. (2007). DIAB sandwich handbook. Retrieved October, 2007, from http://www.diabgroup.com/americas/u_literature/

- Balaskó, M., Sváb, E., Molnár, G., & Veres, I. (2005). Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 542(1-3), 45–51.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite element procedures*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall.
- Belouettar, S., Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R., & Frères, P. (2009). Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Structures*, 87(3), 265–273.
- Belytschko, T., Liu, W. K., & Moran, B. (2000). *Nonlinear finite elements for continua and structures*. New York, NY, USA: Wiley.
- Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221-240.
- Bitzer, T. (1997). *Honeycomb technology*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Bitzer, T. N. (1997). *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media
- Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M., & Ben Sik Ali, M. (2018). Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 143–152.
- Brocca, M., Bažant, Z. P., & Daniel, I. M. (2001). Microplane model for stiff foams and finite element analysis of sandwich failure by core indentation. *International Journal of Solids and Structures*, 38(44-45), 8111–8132.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's mechanical engineering design (9th ed.)*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis (4th ed.)*. New York, NY, USA: Wiley.
- Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B., & Sevim, İ. (2017, 06–08 Nisan). Alüminyum ve alaşımlarının asker araçlarda kullanımı. *II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu*, Kırıkkale, Türkiye.
- Da Silva, L. F. M., Öchsner, A., & Adams, R. D. (2011). *Handbook of Adhesion Technology*. Heidelberg, Germany: Springer.
- Davis, J. R. (Ed.). (1993). *Aluminum and Aluminum alloys (ASM Specialty Handbook)*. Materials Park, OH, USA: ASM International.

- Demirci, A. H. (2004). Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi. *Alfa Basım Yayım Dağıtım*, İstanbul, Türkiye.
- Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747–1769.
- Dowling, N. E. (2012). *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture and fatigue (4th ed.)*. Boston, MA, USA: Pearson.
- Ercan, N., Kanber, B., & Yunus, D. E. (2018, November 30). 3B eklemeli üretilmiş farklı hücresel yapıları sandviç panellerin sonlu elemanlar yöntemiyle eğilme davranışının incelenmesi. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS 2018-Winter)*, Samsun, Turkey, 232–235.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., & Wadley, H. N. G. (2001). The mechanical performance of metallic honeycombs. *Progress in Materials Science*, 46(3–4), 309–327.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., & Wadley, H. N. G. (2001). The topological design of multifunctional cellular metals. *Progress in Materials Science*, 46(3–4), 309–327.
- Fan, M., Zeng, T., Wu, R., Cui, Y., Xu, G., Wang, X., Cheng, S., & Zhao, J. (2023). Microstructure design and mechanical properties of 3D printed graded lattice sandwich structures. *Composite Structures*, 321, 117323.
- Fuller, C. B., Krause, A. R., Dunand, D. C., & Seidman, D. N. (2002). Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions. *Materials Science and Engineering: A*, 338(1–2), 8–16.
- Gaur, A. K., Kumar, A., & Aggarwal, A. (2021). Effects of varying face sheet thickness and panel shape on flexural strength of a composite sandwich structure. *Materials Today: Proceedings*, 38, 218–222.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies (3rd ed.)*. Springer.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular solids: Structure and properties (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Gpoichand, A., Mohanrao, R., Sankar, N. V. S., Rama Balaji, G., & Sandeep Kumar, P. (2013). Design and analysis of copper bal peteği sandwich structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(4), 635–638.

- Gunston, B., & Badrocke, M. (1998). *Lockheed aircraft: The history of Lockheed Martin*. London, UK: Osprey Publishing.
- Gülşan, A. O. (2024). *Oluklu sandviç kompozitlerin çekirdek yapısının elastik sabitler açısından incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., & Li, W. (2008). Crashworthiness design of energy absorbing structures. *Thin-Walled Structures*, 46(11), 1232–1246.
- International Organisation for Standardisation. (2019). *Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature* (ISO 6892-1:2019)
- Irving, P. E. (2019). *Polymer composites in the aerospace industry (1st ed.)*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing
- Jen, Y. M., Ko, C. W., & Lin, H. B. (2009). Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams. *International Journal of Fatigue*, 31(3), 455–462
- Jen, Y. M., & Chang, L. Y. (2009). Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1282–1293.
- Karakaya, Ç., & Ekşi, S. (2022). Simulation study on deformation behavior of sandwich panels with corrugated cores. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 9(2), 843–852.
- Khalid, A. A., Abdulla, F. A., & Al-Sharify, M. (2023). Experimental investigation on the fatigue behavior on honeycomb sandwich composite panels. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 30(2), 77-84
- Krenk, S., Jönsson, J., & Hansen, L. P. (1996). Fatigue analysis and testing of adhesive joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 53(6), 859–872.
- Krishna, S. P., Vemula, A. M., Ahamed, U. P., & Jani, S. P. (2022). Bending analysis of honeycomb sandwich panels with metallic face sheets and GFRP core. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1537–1547.
- Kumar, A., Angra, S., & Chanda, A. K. (2020). Analysis of the effects of varying core thicknesses of Kevlar honeycomb sandwich structures under different regimes of testing. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1615–1623.
- Logan, D. L. (2017). *A first course in the finite element method (6th ed.)*. Stamford, CT, USA: Cengage Learning.
- Liu, S., Sun, W., Wang, C.(2023). Fatigue of an Aluminum Foam Sandwich Formed by Adhesive Method and Powder Metallurgy Method. *Materials*, 16(3), 1226.

- Manalo, A. C., Aravinthan, T., & Karunasena, W. (2013). Mechanical properties characterization of the skin and core of a novel composite sandwich structure. *Journal of Composite Materials*, 47(14), 1785–1800.
- Mannino, F., Srinivasan, D. V., Fanteria, D., & Vassilopoulos, A. P. (2025). Standard specimen geometries do not always lead to consistent fatigue results for epoxy adhesives. *International Journal of Fatigue*, 190, 108600.
- Marshall, A. (1982). Sandwich construction. In G. Lubin (Ed.), *Handbook of Composites*, 557–601. New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold Company.
- Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2018). Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*, 16, 24–29.
- David B. Miracle, S. L. Donaldson, S. D. Henry, C. Moosbrugger, G. J. Anton, B. R. Sanders, & W. W. Scott Jr. (2001). Mechanical properties of metallic foams. In J. R. Davis (Ed.), *ASM handbook* (1st ed. 107–119). Materials Park, OH: ASM International.
- Moeini, G., Ramazani, A., Myslicki, S., Sundararaghavan, V., & Könke, C. (2017). Low cycle fatigue behaviour of DP steels: Micromechanical modelling vs. validation. *Metals*, 7(7), 265.
- Mooy, D. C., Rioja, R. J., Sawtell, R. R., Bovard, F. S., Venema, G. B., & Linde, D. A. (2015). *5XXX aluminum alloys and wrought aluminum alloy products made therefrom* (U.S. Patent No. 9,217,622 B2). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Niu, M. C. Y. (1998). *Airframe stress analysis and sizing*. Granada Hills, CA, USA: Adaso/Adastra Engineering Center.
- Njuguna, J. (Ed.). (2016). *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*. Oxford, UK: Woodhead Publishing.
- Omurtag, M. H. (2011). Mukavemet-II. *Birsen Yayınevi*. İstanbul, Türkiye.
- Özmen, D. (2007). *Yarı otomatik av tüfeği mekanizmasının yorulma dayanımının analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K., & Kim, G. S. (1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 35(3), 205–231.
- Palomba, G., Crupi, V., & Epasto, G. (2019). Collapse modes of aluminium honeycomb sandwich structures under fatigue bending loading. *Thin-Walled Structures*, 145, 106363.
- Petras A. (1999). *Design of sandwich structures*, Doctoral Dissertation, Robinson College, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- Petrie, E. M. (2007). *Handbook of Adhesives and Sealants*. New York, NY: McGraw-Hill.

- Rupani, S. V., Jani, S. S., & Acharya, G. D. (2017). Design, modelling and manufacturing aspects of honeycomb sandwich structures: A review. *International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR)*, 2(4), 526–532
- Schütz, W. (1996). A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54, 263–300.
- Schütz, W. (2002). Fatigue of sandwich structures. *International Journal of Fatigue*, 24(2–4), 207–221.
- Shields, J. (1984). *Adhesives handbook (3rd ed.)*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Solmaz, M. Y., & Topkaya, T. (2020). The flexural fatigue behavior of honeycomb sandwich composites following low velocity impacts. *Applied Sciences*, 10(20), 7262
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal fatigue in engineering (2nd ed.)*. New York, NY: Wiley.
- Subramanian, C. (2010). Wear properties of aluminium-based alloys. In H. Dong (Ed.), *Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium and titanium alloys* pp. 40–57, Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Sun, G., Huo, X., Chen, D., & Li, Q. (2017). Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. *Materials & Design*, 133, 154–168.
- Surowiec, I., Vikström, L., Hector, G., Johansson, E., Vikström, C., & Trygg, J. (2017). Generalized subset designs in analytical chemistry. *Analytical Chemistry*, 89(12), 6491–6497.
- Topkaya, H. (2013). *Dental implant uygulamalarında yorulmanın sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Topkaya, T., & Solmaz, M. Y. (2019). Bal peteği sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı sonrası yorulma davranışlarının incelenmesi. *IMSTEC 2019*.
- Vinson, J. R. (1999). *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. Lancaster, PA, USA: Technomic Publishing Company.
- Wang, Y. L., Yu, Y., Wang, C. Y., Zhou, G., Karamoozian, A., & Zhao, W. Z. (2020). On the out-of-plane ballistic performances of hexagonal, reentrant, square, triangular and circular honeycomb panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 173, 105402.
- Wu, X., Yu, H., Guo, L., Zhang, L., Sun, X., & Chai, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composite honeycomb sandwich structure. *Composite Structures*, 213, 165–172.

- Xu, H. H., Zhang, X. G., Han, D., Jiang, W., Zhang, Y., Luo, Y. M., Ni, X. H., Teng, X. C., Xie, Y. M., & Ren, X. (2024). Mechanical characteristics of auxetic composite honeycomb sandwich structure under bending. *AI in Civil Engineering*, 3(1), 8.
- Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Cradley Heath, UK: EMAS Publishing.
- Zhao, M., Jin, H., Yun, Z., Meng, Z., & Zhang, W. (2024). Investigation of the mechanical properties of composite honeycomb sandwich panels after fatigue. *Polymers*, 16(17), 2497.
- J. Zhou & R. Mayer (2005). Mechanical behavior of metallic sandwich panels. *Materials Science and Engineering A*, 394(1–2), 231–239.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: Its basis and fundamentals (7th ed.)*. Oxford, UK: Elsevier.
- Zu, G., Lu, R., Li, X., Zhang, Z., Ma, X., He, M., & Yang, G. (2013). Three-point bending behavior of aluminum foam sandwich with steel panel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 2491–2495.