

**T.C.  
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EĞRİ SANDVIÇ PANELLERİN TİTREŞİM VE DARBE  
DAVRANIŞINA DELAMİNASYONUN ETKİSİ**

**Melis YURDDAŞKAL**

**Danışman  
Doç. Dr. Buket OKUTAN BABA**



**MANİSA-2015**

**TEZ ONAYI**

Melis YURDDAŞKAL tarafından hazırlanan "EĞRİ SANDVIÇ PANELLERİN TİTREŞİM VE DARBE DAVRANIŞINA DELAMİNASYONUN ETKİSİ" adlı tez çalışması 04/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman Doç. Dr. Buket OKUTAN BABA**  
Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi Doç. Dr. Binnur GÖREN KIRAL**  
Dokuz Eylül Üniversitesi



**Jüri Üyesi Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN**  
Dokuz Eylül Üniversitesi



**Enstitü Müdürü Prof.Dr. Kenan DOST** .....

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Melis YURDDAŞKAL**



# İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER .....	I
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ .....	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET .....	X
ABSTRACT.....	XI
1.GİRİŞ .....	1
2.GENEL BİLGİLER .....	1
2.1. Kompozit Malzemeler .....	1
2.1.1. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri.....	8
2.1.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması .....	8
2.2. Sandviç Kompozitler .....	9
2.2.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları .....	11
2.2.2. Sandviç Kompozitlerin Dezavantajları.....	11
2.2.3. Sandviç Kompozitlerin Kullanım Alanları .....	12
2.2.4. Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması .....	12
2.3.Darbe .....	18
2.3.1. Darbe Test Teknikleri .....	20
2.3.2. Darbede Oluşan Hasar Tipleri .....	22
2.4.Titreşim .....	23
2.4.1. Doğal Frekans.....	23
2.4.2. Titreşimin Ölçülmesi .....	26
2.4.3. FFT (Fast Fourier Transform) Diyagramları .....	28
3.MALZEME VE METOD .....	29
3.1. Problemin Tanımı.....	29
3.2. Sandviç Panellerin Üretimi .....	31
3.2.1. Üretimde Kullanılan Kalıpların İmalatı.....	31
3.2.2. Darbe Testlerinde Kullanılan Tutucuların Üretimi .....	32
3.2.3. Sandviç Kompozit Numunelerin İmalatı .....	34
3.3. Deneysel Çalışmalar .....	46

3.3.1. Darbe Deneyinin Yapılışı .....	46
3.3.2. Titreşim Deneyinin Yapılışı .....	49
3.4. Sonlu Elemanlar Analizi .....	52
4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	60
4.1. Darbe Testi Sonuçları .....	60
4.1.1. Düz ve Delaminasyon İçermeyen Sandviç Panellerin Darbe Cevabı.....	60
4.1.2. Delaminasyon Varlığının ve Boyutunun Darbe Cevabına Etkisi.....	64
4.1.3. Delaminasyon Konumunun Darbe Cevabına Etkisi.....	70
4.1.4. Eğriliğin Darbe Cevabına Etkisi .....	76
4.1.5. Enerji Seviyesinin Darbe Cevabına Etkisi .....	81
4.1.6. Hasar Modları .....	86
4.2. Titreşim Analizi Sonuçları .....	97
4.2.1. Sınır Şartlarının Titreşim Cevabına Etkisi .....	100
4.2.2. Delaminasyon Boyutunun Titreşim Cevabına Etkisi .....	121
4.2.3. Delaminasyon Konumunun Titreşim Cevabına Etkisi .....	123
4.2.4. Eğriliğin Titreşim Cevabına Etkisi .....	125
5.SONUÇ VE ÖNERİLER .....	127
5.1. Darbe Testleri Sonuçları .....	127
5.2. Titreşim Testi Sonuçları .....	128
5.3. Öneriler .....	129
KAYNAKLAR .....	130
ÖZGEÇMİŞ .....	138

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Takviye fazlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.2. Sandviç kompozitin yapısı.....	9
Şekil 2.3. Yük altındaki sandviç kompozite etki eden gerilmeler.....	10
Şekil 2.4. Çekirdek rijitliğinin ağırlıkla değişimi.....	10
Şekil 2.5. Elyaf çeşitleri (a)cam elyaf (b)aramid elyaf (c)karbon elyaf.....	13
Şekil 2.6. Çekirdek malzemeleri (a)balpeteği çekirdek, (b)ahşap çekirdek, (c)köpük çekirdek.....	14
Şekil 2.7. Charpy ve düşen ağırlık test cihazları.....	21
Şekil 2.8. Basit mesnetlenmiş sandviç plakanın birinci derece mod şekilleri .....	24
Şekil 2.9. Mekanik titreşimin işlenme basamakları .....	27
Şekil 3.1. Temsili düz ve eğri numuneler .....	29
Şekil 3.2. Sandviç panellerin üretimde kullanılan kalıplar .....	32
Şekil 3.3. Tutucu kalıplar .....	32
Şekil 3.4. Tutucunun teknik resmi .....	33
Şekil 3.5. Kesilmiş PVC köpük malzeme .....	35
Şekil 3.6. Numunelerin yerleşimi .....	35
Şekil 3.7. Köpük malzemenin delinmesi .....	36
Şekil 3.8. Eğri forma getirilmiş köpük malzeme .....	36
Şekil 3.9. Kesilmiş cam elyaf kumaş, soyma kumaşı ve vakum torbası.....	37
Şekil 3.10. Kullanılacak boru vana bağlantısı ve spiral hortumlar .....	37
Şekil 3.11. 10 ve 25 mm çaplı teflon filmler .....	38
Şekil 3.12. Üretimde malzeme diziliminin şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.13. Kalıba macun çekilmesi.....	39
Şekil 3.14. Spiral hortumların yerleşimi .....	39
Şekil 3.15. Kumaşın kalıba yerleştirilmesi .....	40
Şekil 3.16. Delaminasyonun yerleştirilmesi.....	40
Şekil 3.17. Köpüğün kalıba yerleştirilmesi .....	41
Şekil 3.18. Üst kumaşın kalıba yerleştirilmesi.....	41
Şekil 3.19. Soyma kumaşı ve dağıtıcı filenin kalıba yerleştirilmesi .....	42

Şekil 3.20. Vakum ortamına alınmış kalıp.....	43
Şekil 3.21. Düz plakaların üretiminde kumaş yerleşimi .....	43
Şekil 3.22. Düz plakaların üretiminde köpük yerleşimi.....	44
Şekil 3.23. Düz plakaların üretimi .....	44
Şekil 3.24. Kalıptan çıkarılan kompozit plakalar.....	45
Şekil 3.25. Su soğutmalı kesme tezgahı.....	45
Şekil 3.26. Darbe ve titreşim testleri için hazırlanmış numuneler .....	46
Şekil 3.27. Darbe test cihazı.....	47
Şekil 3.28. Numunenin eğri tutucular arasına yerleştirilmesi .....	47
Şekil 3.29. Numunenin sınır şartları .....	48
Şekil 3.30. Eğri tutucunun ve numunenin test cihazındaki yerleşimi .....	48
Şekil 3.31. Titreşim deney düzeneği (temsili) .....	49
Şekil 3.32. Titreşim test numunelerinin asıldığı düzenek .....	50
Şekil 3.33. Numunenin ip ile asılmış gösterimi ve ivmemetrelerin numaralandırılması .....	51
Şekil 3.34. a) Bilgisayarda titreşim verisi kayıt arayüzü, b) Titreşimin anlık görüntülenmesi.....	51
Şekil 3.35. Ansys Workbench proje şemasının hazırlanması .....	53
Şekil 3.36. Ansys Workbench de malzemelerin seçilmesi .....	54
Şekil 3.37. Ansys Workbench de köpük malzeme özelliklerinin girilmesi .....	54
Şekil 3.38. Ansys Workbench de kabuk malzeme özelliklerinin girilmesi .....	54
Şekil 3.39. Ansys Workbench de modelin görüntüsü .....	55
Şekil 3.40. Ansys Workbench de elemanların birleştirilmesi .....	55
Şekil 3.41. (a) Ansys Workbench de yapının elemanlara bölünmesi (b) Optimum mesh sayısının belirlenmesi .....	56
Şekil 3.42. Ansys Workbench de çakışan düğümlerin birleştirilmesi .....	57
Şekil 3.43. Ansys Workbench de modelin görüntüsü .....	57
Şekil 3.44. Ansys Workbench de alt tabakaların oluşturulması.....	58
Şekil 3.45. Ansys Workbench de tabakaların kontrol edilmesi .....	58
Şekil 3.46. Ansys Workbench de analiz seçeneklerinin belirlenmesi.....	59
Şekil 3.47. Ansys Workbench de çözümün yapılması.....	59

Şekil 4.1. Düz ve delaminasyon içermeyen numunelerde temas kuvveti ve çökmenin zamana bağlı değişimi.....	61
Şekil 4.2. Düz ve delaminasyon içermeyen panellerde enerji profil eğrisi.....	63
Şekil 4.3. 5 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	66
Şekil 4.4. 30 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	67
Şekil 4.5. 50 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	68
Şekil 4.6. 80 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	69
Şekil 4.7. 5 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	72
Şekil 4.8. 30 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	73
Şekil 4.9. 50 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	74
Şekil 4.10. 80 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi.....	75
Şekil 4.11. 5 J darbe enerjisinde delaminasyon içeren ve içermeyen numuneler için panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi.....	77
Şekil 4.12. 30 J darbe enerjisinde delaminasyon içeren ve içermeyen numuneler için panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi.....	78
Şekil 4.13. 50 J darbe enerjisinde delaminasyon içeren ve içermeyen numuneler için panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi.....	79
Şekil 4.14. 80 J darbe enerjisinde delaminasyon içeren ve içermeyen numuneler için panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi.....	80
Şekil 4.15. Düz delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi.....	82
Şekil 4.16. R160 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi.....	83

Şekil 4.17. R125 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi .....	84
Şekil 4.18. R100 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi .....	85
Şekil 4.19. Düz panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi.....	88
Şekil 4.20. Düz panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi (kesit görüntüsü) .....	89
Şekil 4.21. Eğri panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi.....	90
Şekil 4.22. R100 numunelerde delaminasyon konumunun hasar moduna etkisi.....	92
Şekil 4.23. R100 numunelerde delaminasyon konumunun hasar moduna etkisi (kesit görüntüsü) .....	93
Şekil 4.24. Düz ve R100 panellerde darbe enerji seviyesine göre hasar modları .....	94
Şekil 4.25. DA25 sandviç panellerde eğriliğin hasar moduna etkisi .....	96
Şekil 4.26. DÜZ – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	98
Şekil 4.27. R160 – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	99
Şekil 4.28. R125 – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	100
Şekil 4.29. R100 – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	101
Şekil 4.30. R0DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.31. R0DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.32. R160DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.33. R160DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.34. R160DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	106

Şekil 4.35. R160DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	107
Şekil 4.36. R125DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	108
Şekil 4.37. R125DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	109
Şekil 4.38. R125DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	110
Şekil 4.39. R125DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	111
Şekil 4.40 R100DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	112
Şekil 4.41. R100DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	113
Şekil 4.42. R100DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.43. R100DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	115
Şekil 4.44. Düz ve delaminasyon içermeyen numunelerin farklı sınır şartlarındaki doğal frekansları (Hz) ve mod şekilleri.....	119
Şekil 4.45. Sınır şartlarının, 10 mm çaplı delaminasyon içeren ve içermeyen düz panellerde doğal frekansa etkisi.....	120
Şekil 4.46. Dört kenarından ankastre mesnetlenmiş düz numunelerde delaminasyon boyutunun titreşim cevabına etkisi .....	122
Şekil 4.47. Ankastre tutturulmuş R160 numunelerde delaminasyon konumunun titreşim frekansına etkisi .....	124
Şekil 4.48. Ankastre tutturulmuş delaminasyon içermeyen numunelerde eğriliğin titreşim cevabına etkisi.....	125
Şekil 4.49. Eğriliğin titreşim cevabına etkisi .....	126

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1. Airex C70.55 köpük malzemesinin mekanik özellikleri .....	29
Tablo 3.2. Tek yönlü E-cam/epoksi kabuk malzemesinin mekanik özellikleri .....	30
Tablo 3.3. Çalışma kapsamında incelenen sandviç paneller ve kodlamaları.....	30
Tablo 4.1. Titreşim testlerinden bulunan serbest titreşim frekanslarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması .....	116
Tablo 4.2. Ankastre mesnetli R100 numunelerinde delaminasyon boyutunun titreşim frekansına etkisi .....	121
Tablo 4.3. Ankastre mesnetli R125 numunelerde delaminasyon konumunun titreşim frekansına etkisi .....	123

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli zamanlarını bana ayırarak, bilgi, tecrübe ve katkılarıyla beni yönlendiren sevgili danışman hocam Doç. Dr. Buket Okutan Baba'ya çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarında ve numunelerin üretiminde engin bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak çalışmalarına yardımcı olan Dokuz Eylül Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Bülent Murat İçten'e, üretim ve test aşamasında benden yardımlarını hiçbir şekilde esirgemeyen arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Uğur Özmen'e ve Makine Yüksek Mühendisi Erdem Yalkın' a da ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimin titreşim deneylerine katkı ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Zeki Kırıl'a ve Doç. Dr. Hasan Öztürk' e de teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen bütün Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Ayrıca tüm üniversite hayatım boyunca her zaman desteğini yanımda hissettiğim, bana bir hocanın verebileceğinden çok daha fazlasını veren ve bugünlere gelmemde büyük etkisi olan çok değerli hocam Doç. Dr. Binnur Gören Kırıl' a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak tezimin yoğun çalışma temposunda her zaman yanımda olan, beni motive eden ve bana her konuda destek veren sevgili eşim Metin Yurddaşkal' a anlayışından ve yardımlarından dolayı sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Arş. Gör. Melis YURDDAŞKAL

Manisa, 2015

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

### Eğri Sandviç Panellerin Titreşim ve Darbe Davranışına Delaminasyonun Etkisi

Melis YURDDAŞKAL

Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Buket OKUTAN BABA

Sandviç kompozit malzemeler ağırlıklarına oranla yüksek mukavemet ve rijitlik göstermeleri nedeniyle birçok alanda kullanılırlar. Ancak darbeye karşı hassas olmaları, bu malzemelerin kullanımındaki en büyük dezavantajdır. Bu nedenle sandviç kompozitlerin darbe cevaplarının bilinmesi, tasarımlarında büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, delaminasyonun sandviç kompozitlerin darbe cevabı ve doğal frekansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sandviç panellerin kabuk malzemesi dört tabakalı  $0^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$  dizilimine sahip E camı/epoksi tabakalı kompozit, çekirdek malzemesi ise PVC köpüktür. Köpük ve kabuk arasında delaminasyon oluşturmak için 10 ve 25 mm çapında kesilen ve numunenin alt ve üst kabuk-çekirdek ara yüzeyinin tam ortasına yerleştirilen teflon film kullanılmıştır. Titreşim ve farklı enerji seviyelerinde düşen ağırlık testleri uygulanmadan önce numuneler 100 mm x 100 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır.

Delaminasyon çapı ve konumu, eğrilik ve darbe enerji seviyesi gibi parametrelerin darbe cevabı ve hasar modları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Temas kuvveti ve çökme ilişkisine bakılarak, sandviç kompozit numunelerin hasar sürecine dair durum ortaya konmuştur. Deneysel sonuçlar delaminasyon bulunan yüzeydeki temas kuvvetinin delaminasyon çapı arttıkça arttığını göstermektedir. Panel eğriligi arttıkça numunelerin üst kabuğundaki temas kuvvetlerinde artış, alt kabuğundaki temas kuvvetlerinde ise düşüş görülür.

Titreşim test ve analizlerine bakıldığında, serbest, basit ve ankastre mesnetlenmiş numunelerin doğal frekansının artan eğrilikle birlikte arttığı, delaminasyonla ise azaldığı görülmüştür. Delaminasyon çapındaki artış ve delaminasyon konumunun alt kabuk/köpük ara yüzeyinde olması doğal frekansı düşürmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sandviç kompozitler, düşük hızlı darbe, delaminasyon, eğri panel, doğal frekans

**2015, 137 sayfa**

## **ABSTRACT**

### **M.Sc Thesis**

#### **Delamination Effect on Vibration and Impact Behavior of the Curved Sandwich Panels**

**Melis YURDDAŞKAL**

**Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA**

Sandwich composite materials are used in many areas due to their high strength and stiffness to weight ratio. However, sandwich composites are susceptible to impact is the biggest drawback in the use of these materials. Therefore knowledge of the impact response of these materials is of great importance in the design of structures. Present study deals with the delamination effect on impact response and natural frequency of sandwich composite panels. The face sheets of the sandwich panel were E-glass/epoxy laminates made of four plies oriented  $0^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}$  and the core was PVC foam. Teflon film was used for the creation of delamination between foam and face sheet and cut in 10 and 25 millimeters in diameter and placed on the center of upper and lower surface of specimen face sheet-foam interface. The specimens were prepared by cutting out 100 mm x100 mm in dimension before vibration drop-weight impact tests were performed under different impact energy levels.

The effects of parameters like delamination diameter, delamination location, curvature and energy level on impact response and failure modes were investigated. Looking at the relationship between contact force and deflection, information on the failure process were obtained for the sandwich composites specimens. When the curvature of panels increases, the contact force of the upper face sheet of the specimen increases and the contact force in the lower face sheet decreases.

Considering the results of vibration test and analyses, natural frequency has increased with the increase of curvature for free, cantilever and fixed support while reducing with delamination. While the increases of delamination in diameter and the position of the delamination in lower face sheet-foam interface reduces the natural frequency.

**Keywords:** Sandwich composites, low velocity impact, delamination, curved panel, natural frequency  
**2015, 137 pages**

## 1. GİRİŞ

Teknolojide ve endüstride meydana gelen gelişmeler ile birlikte, mühendislerin yeni yapısal malzeme arayışları ve malzeme kalitesini arttırmaya yönelik çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmalar neticesinde son yıllarda özellikle havacılık ve uzay endüstrisinin ihtiyaç duyduğu, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özelliklerine sahip kompozit malzemelerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Kompozit malzemelerin, korozyona karşı dayanıklı olmaları, yüksek dayanım ve ağırlık oranından ötürü, havacılık ve uzay sanayisi başta olmak üzere askeri ve savunma sanayi, otomotiv, inşaat ve spor sektörleri gibi birçok alandaki ihtiyaca cevap vermesi bu malzemelerin kullanımını artırmıştır.

Kompozit malzemeler de diğer tüm malzemeler gibi kullanım süreleri boyunca dış etkilere, çarpışmalara ve basınç altında gerilmelere maruz kalarak deformasyonlara uğrayabilmektedirler. Bu etkiler tabakalı yapıda bulunan kompozit malzemelerde tabakalar arasındaki katmanların açılmasına ve delaminasyon bölgelerinin oluşmasına neden olabilir. Kompozit malzemelerde açığa çıkan delaminasyonlar yalnızca maruz kalınan dış etkilerden değil, ayrıca imalat hataları sonucunda da oluşabilir. Delaminasyonların varlığı yapının yük taşıma kapasitesini etkileyerek rijitliğini ve mukavemetini düşürür. Oluşan delaminasyonlar, malzemenin beklenenden daha düşük kuvvette hasara uğramasına neden olabilir. Bu sebeple kompozit malzeme kullanımı düşünülen yerlerde yapının mekanik özelliklerinin bilinmesi için delaminasyonları bulmak, tespit etmek ve yarattığı etkileri incelemek gereklidir.

Kompozit malzemelerin doğal yapıları gereği mekanik davranışlarını incelemek karmaşık bir durumdur. Bunun için tasarımlarda teorik çalışmaların yanında, deneysel ve analiz çalışmalarına da yer verilmesi gerekmektedir.

Kompozit yapılarda darbe davranışlarını ve darbe hasarını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Vurucu kütlesi, geometrisi, boyutu ve hızı, numune geometrisi, malzemesi, tabaka sıralanışı ve sınır şartları bu parametrelerden bazılarıdır. Abrate [1] ve Cantwell [2], 90lı yıllara kadar olan tabakalı kompozitlerin darbe davranışlarını içeren çalışmaları makalelerinde özetlemişlerdir. Tabakalı kompozitlerde lamina kalınlığı, fiber malzemesi ve oryantasyon açısı kompozitlerin düşük hızlı darbe cevabını ve enerji absorbe kapasitelerini etkilemektedir [3-4]. Plaka boyutlarının ve vurucu kütesinin temas kuvveti, maksimum darbe kuvveti ve hasarlı alan üzerindeki etkisi hem nümerik hem de deneysel çalışmalarla incelenmiştir [5-6]. Aynı enerji seviyesinde darbeye maruz numunelerde, vurucu geometrisinin değişmesinden ötürü hasar modlarının farklı olduğu, tahribatlı ve tahribatsız muayenelerle ortaya koyulmuştur [7-8]. Darbe hızının temas kuvveti, geri sekme hızı ve çökme miktarları üzerindeki etkisi de bir başka çalışmada incelenmiştir [9].

Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı darbe hasarını etkileyen parametrelerin tabakalı kompozitlerin darbe davranışlarını nasıl etkilediklerine yöneliktir. Eğriselliği olan tabakalı kompozitlerin darbe cevabını araştıran çalışmaların sayısı oldukça azdır. [10-22]. Ambur [15], plaka eğrilik yarıçapı ve kalınlığının, darbe etkisi altındaki plağın darbe cevabını etkileyen önemli parametreler arasında olduğunu belirterek, darbeye maruz eğrisel plakalar için temas kuvvetinin, plaka eğrilik yarıçapı ve plaka kalınlığının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Kumar'ın [19] grafit/epoksi malzemedan yapılmış silindirik kabuklar üzerinde yaptığı çalışmalarda, artan eğrilik yarıçapıyla darbe temas kuvvetinin azaldığı ve darbe etkisiyle ortaya çıkan çökme miktarı ve temas süresinin arttığı görülmektedir. Benzer sonuçlar Leylek'in [17] ve Kim'in [18] yaptığı çalışmalarda da görülmekte olup bu sonuçlar sonlu elemanlar analizleriyle de doğrulanmıştır. Ayrıca Kim, eğrilik artışıyla delaminasyonlu alanda görülen artışa da dikkat çekmiştir. Kistler ve Waas [20] silindirik eğriselliğe sahip numunelerde vurucu hızının, panel eğriliğinin ve kalınlığının hem düzlem içi hem de düzlem dışı sınır şartlarında darbe kuvveti ve panel deplasmanı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları boyunca düz panellerde eğri panellere göre düşük deplasmanların ve kontakt sürelerinin yanı sıra daha yüksek pik kuvvetlerinin oluştuğunu

gözlemlemiştir. Saghafi ve ark. [21] eğri laminalarda ön yüklemenin darbe cevabı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numunelerin alt ve üst yüzeylerine basınç uygulayarak ön gerilme oluşturdıkları bu çalışmanın sonucunda maksimum yük, maksimum deplasman, hasar alanı ve absorbe edilen enerji gibi darbe parametrelerinin tamamının büyük ölçüde etkilendiğini gözlemlemiştir.

Delaminasyon üzerine yapılan araştırmaların çoğu tabakalı kompozitler üzerine yapılmış çalışmaları kapsamaktadır. Bu çalışmalarda delaminasyon eşik kuvveti, eşik hızı ve delaminasyonun ölçülmesi incelenmiştir [22-24]. Olsson [22], yüksek hızlı dinamik darbeye yarı statik darbenin delaminasyon eşik kuvveti üzerindeki önemli etkisini ortaya koymuştur. Yüksek hızlı darbeye delaminasyon eşik kuvvetinin yarı statik göre %20 yüksek ve delaminasyon büyümesinin oldukça hızlı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca delaminasyonun oluşumunda tabaka kalınlığı ve temas rijitliğinin de önemli parametrelerden olduğunu gözlemlemiştir. Chakrabarty, fiber takviyeli tabakalı plastik kompozitlerdeki delaminasyonun çoklu silindirik darbe karşısındaki cevabı için bir sonlu eleman kodu geliştirerek ara yüzeydeki delaminasyonu ölçmeyi hedeflemiştir. Geliştirdiği kod ile numunelerin temas kuvveti, hız ve çökme verilerine ulaşmıştır [24]. Amaro, Reis ve ark. [25] tabakalı cam/epoksi kompozitlerde var olan delik ya da deliklerin düşük hızlı darbeye delaminasyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında deliğin, kuvvet-çökme ve kuvvet-zaman eğrileri üzerinde etkisi olmadığı ancak oluşan hasar modunu önemli ölçüde değiştirdiği ve enerji absorpsiyonunu arttırdığı görülmüştür. Zabala, Aretxabaleta ve ark. [26] enerji seviyesini düşük hızda ve sabit tutarak darbe hızının delaminasyon üzerindeki etkisini incelemişler ve darbe hızının artmasıyla hasar alanında önemli ölçüde artış olduğunu ortaya koymuşlardır. Delaminasyon varlığının sandviç yapılarıdaki etkisi üzerine yapılmış bir çalışmada ise çeşitli eğrilikte ve delaminasyon içeren sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe cevabı üzerinde durulmuştur. Bu çalışmaya göre delaminasyon içermeyen numunelerde temas kuvveti eğrilik açısı arttıkça artarken, delaminasyonlu numunelerde eğrilik açısının artması temas kuvvetinin düşmesine neden olmuştur [27].

Tabakalı kompozitlerin darbe cevabı üzerine yapılan kapsamlı çalışmalara kıyasla sandviç kompozitler için yapılan çalışmalar çok fazla değildir. Sandviç malzemelerin darbe davranışlarıyla ilgili olan çalışmalar eğriselliği olan panellerden çok düz panellerin darbe davranışlarına ilişkindir. Düz sandviç panellerle ilgili yapılan son dönem çalışmalarda [28-35], düşen ağırlık testleri yapılarak farklı enerji seviyelerindeki darbe yüklerine maruz sandviç panellerin darbe davranışları incelenmiş ve ortaya çıkan hasar mekanizmaları üzerinde durulmuştur. Nasirzadeh ve Sabet [36] yüksek hızlardaki darbe yüklemelerinin farklı yoğunlukta köpük çekirdek içeren sandviç paneller üzerindeki etkisini araştırmış ve belli bir yoğunluk aralığında köpüğün yoğunluğunun arttıkça kırılma dayanımının da arttığını; dolayısıyla darbe dayanımının azaldığını ortaya koymuşlardır. Rajaneesh ve ark. [37] ise maksimum yükün kabuk malzemesinin türünden etkilendiğini ve çekirdek kalınlığından etkilenmediğini, ancak absorbe edilen enerjinin her ikisinden de etkilendiğini tespit etmişlerdir. Wang ve arkadaşları [38] da düşük hızlardaki darbe davranışının köpük çekirdekli sandviç paneller üzerindeki etkisini incelemiş ve darbe cevabının köpük kalınlığından bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır. Maksimum yük, absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine oranı ve temas süresinin artan darbe enerjisiyle birlikte arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, darbe vurucu boyutu, temas süresi ve kabuk kalınlığındaki azalmanın maksimum yükü arttırdığını bulmuşlardır. Darbe hızının çok fazla arttığı durumlar için yapılan bir başka çalışmada da [39] darbe enerjisinin çoğunun kabuk malzemesinde absorbe edildiği ve köpük çekirdek üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu ortaya konmuştur. Schubel ve ark. [40] dokuma karbon/epoksi kabuğa ve PVC çekirdeğe sahip sandviç panellerin merkezlerinden darbe ve yarı statik yük uygulayarak bu yüklemeler karşısındaki cevaplarını karşılaştırmışlardır. Özellikle uçak endüstrisinde kullanılan sandviç panellerin incelendiği bir başka çalışmada da kabuk malzemesi kalınlığının yanı sıra köpük kalınlığının, yoğunluğunun ve tipinin de darbe cevabında önemli etkisi olduğu savunulmuştur [41]. Srivastava [42], sandviç yapılar üzerinde Izod, Charpy ve düşen ağırlık gibi farklı darbe testleri uygulamıştır. Düşen ağırlık testinde dinamik kırılma tokluğu daha düşükken enerji absorbe etme yeteneğinin oldukça yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Akil Hazizan ve Cantwell [43] köpük bazlı sandviç yapıların darbe cevabını tahmin edebilmek için köpük özelliklerinin yanı sıra düşen ağırlığın

değişen darbe enerjisiyle bir enerji dengesi modeli geliştirmişlerdir. Foo ve ark. [44] sandviç kompozitlerin sonlu eleman modelini oluşturarak düşük hızlı darbe cevabının bulunmasına yönelik çalışmışlardır. Bu çalışmalardan bazıları sadece deneysel sonuçları içerirken bazıları sandviç panellerin darbe hasarlarına dair nümerik simülasyonları içermektedir.

Eğri sandviç panellerin darbe cevaplarının incelendiği deneysel bir çalışmayı yakın zamanda Shen ve arkadaşları [45] yapmıştır. Shen ve arkadaşları, tüm kenarlarından ankastre olarak tutturulmuş alüminyum kabuk ve köpük malzemesinin kullanıldığı eğri sandviç panelleri inceleyerek, darbe sonrası ortaya çıkan hasar modlarını analiz edip panel eğriliğinin hasar modunu nasıl değiştirebileceğini deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Sandviç panellerdeki eğriliğin eğilme ağırlıklı deformasyonlarda deformasyon ve eğilme modunu geniş ölçüde değiştirerek düz katı ya da düz sandviç plakalara göre performanslarının arttığını gözlemlemişlerdir. Hause ve Librescu [46] çift eğrilikli anizotropik sandviç panellerin darbe yüklemesindeki dinamik cevabını araştırmış, literatürde mevcut olan bazı deneysel çalışmaları nümerik çözümleriyle desteklemiştir. Gao ve arkadaşları [47] eğri kompozit sandviç panellerde kabuğun darbe burkulmasını incelemişlerdir. Parametrik çalışmalarında yerel kabuk burkulmasının ince ve eğri sandviç panellerdeki kabuk kırılmalarından daha yüksek olasılıkla gerçekleşeceğini ve yerel kabuk burkulma direncini arttırmak için kabuk tabakaların düzeninin değiştirilebileceğini göstermişlerdir. Yapıştırılarak birleştirilmiş delaminasyon içeren kavisli CFRP panelleri üzerinde yapılan bir araştırmada[48], delaminasyon yeri ve panel eğriliğinin etkisi farklı boyutta delaminasyonlarla birlikte hesaplamalı olarak incelenmiştir. Delaminasyonun, numune uzunluğu boyunca bulunduğu yerin önemli bir etkiye sahip olduğu ve aynı delaminasyon boyutunda, artan panel eğriliğinin burkulma yükünü azalttığı görülmüştür.

Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi kompozit malzemelerde de gerek tasarım aşamasında gerekse tahribatsız muayenede faydalanılmak üzere titreşim ve rezonans durumu dikkate alınır. Tasarımlarda sistemin doğal frekansı ile zorlayıcının frekansının çakışması ve bunun sonucunda kabul edilemeyecek genliklerin oluşması

anlamına gelen rezonanstan kaçınmanın ilk adımı, ilgili sistemin doğal frekansının yani titreşim cevabının bilinmesidir. Baba ve arkadaşları [49] eğriselliğin ve delaminasyonun kirişlerin serbest titreşimi üzerindeki etkilerini incelemiş, hatasız eğri kirişlerde eğrilik açısının arttıkça ilk modlardaki doğal frekansların da arttığını, ancak yüksek modlarda eğriselliğin önemini yitirdiğini göstermişlerdir. Ayrıca delaminasyonun eğriselliğe sahip kirişlerin serbest titreşim cevabında düz kirişlere göre önemli ölçüde etkileyici bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır. Wang ve Yang [50], ankastre tutturulmuş sandviç kirişlerdeki bal peteği çekirdek hücreleri içine konan ve sönümleyici olarak kullanılan bilyelerin titreşim ve sönüm davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Khare ve ark. [51] kabukları kompozit levha olan bal peteği sandviç kompozitlerin çeşitli parametrelere göre serbest titreşim analizini sonlu elamanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Ercopur ve Kiral [52], delaminasyon içeren E-cam/epoksi kompozit plakaların serbest titreşim cevabı üzerinde çalışmalar yapmış, doğal frekansın delaminasyonun varlığıyla azaldığını ve bu azalmanın hatanın boyutuna, şekline ve yerine bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Maheri ve Adams [53] kararlı durum rezonans test metoduyla sandviç kirişlerin titreşim ve sönümlerini inceleyerek kabuk ve çekirdek malzemenin sönüm üzerinde ne kadar etkili olduğu göstermişlerdir. Aydınçak [54] bal peteği kompozit sandviç yapıların serbest titreşim analizini tasarım ve analiz parametrelerini kullanarak deneysel ve nümerik olarak ortaya koymuştur. Farklı konfigürasyonlarda üretilen sandviç kirişlerin serbest sınır şartlarındaki doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen titreşim biçimlerini belirlemişlerdir. Ooijevaar ve arkadaşları [55] kompozit T kiriş üzerinde çalışmalar yapmış, kirişin eğme ve burulma modunda titreşimini hata yerinin tespitinde kullanmışlardır. Dai ve Zhang [56] farklı geometride çekirdek malzemelere sahip sandviç malzemelerin titreşim cevaplarını incelemişlerdir. Kim ve Hwang [57] alt ve üst yüzey tabakaları ile çekirdek malzemesi arasında delaminasyon bulunan bal peteği sandviç kirişlerin titreşim karakteristiklerini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Kabuk ve köpük arasında delaminasyon büyümesinin kirişin eğilme rijitliğini azalttığı ve doğal frekansını da büyük ölçüde düşürdüğü ortaya konulmuştur. Li ve Crocker [58] çekirdek malzemesi bal peteği ve köpük olan sandviç kirişlerin sönüm özelliklerini,

alt ve üst kabuk kalınlıkları ve tabakalar arasındaki delaminasyon etkilerini göz önüne alarak incelemişlerdir.

Bu çalışmanın temel amacı, farklı boyutlarda delaminasyon içeren düz ve eğri sandviç panellerin darbe etkisi altındaki davranışlarını incelemek ve bu özelliklerin doğal frekansa etkisini ortaya koymaktır. Bu amaç için dış yüzeyinde cam elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin, çekirdek kısmında ise köpük malzemenin kullanıldığı farklı eğrilik yarıçaplarında ve alt kabuk/köpük, üst kabuk /köpük ortasında delaminasyonlu bölgeye sahip sandviç kompozitler hazırlanmıştır. Eğriliğin, kabuk ve çekirdek arasındaki yapışmayan bölgenin varlığının, boyutunun ve konumunun, sandviç panellerin darbe cevabı, hasar tipleri ve yapının doğal frekansı üzerindeki etkilerinin gözlemleneceği deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, pratik uygulamalarda geniş oranda kullanım alanı bulan eğriselliğe ve gerek üretim gerekse montaj aşamasında karşılaşılabilecek kabuk/çekirdek arasında yapışmayan yüzeye sahip sandviçlerin darbe yükü karşısında nasıl davranacakları ve doğal frekanslarında meydana gelebilecek değişiklikler ortaya konulmuştur.

## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1. Kompozit Malzemeler**

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerin veya fazların makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler, sürekli bir şekilde var olan bir matris malzemedен ve asıl yükü taşıyan takviye malzemesinden oluşur. Bu malzemeler günümüzde ev aletleri, elektrik ve elektronik sanayi, havacılık sanayi, otomotiv sanayi, iş makineleri, inşaat ve tarım sektörü gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

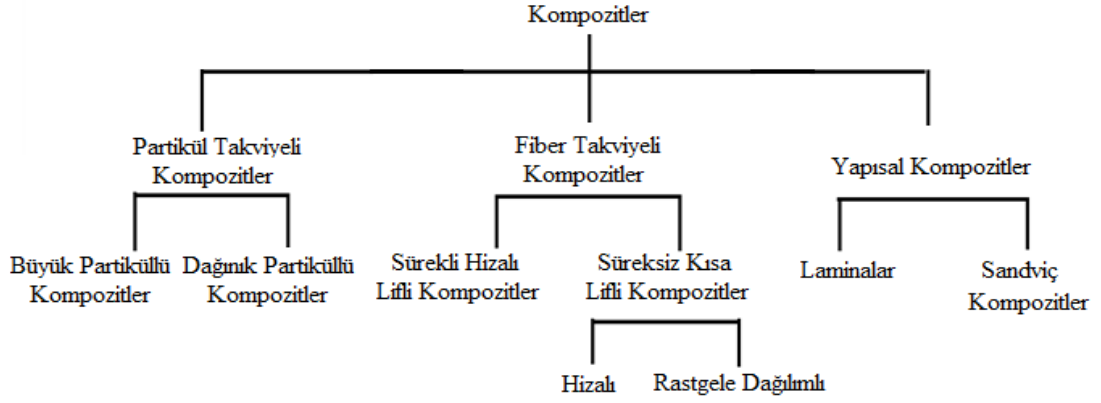
#### **2.1.1. Kompozit Malzemelerin Bileşenleri**

Kompozit malzemelerin üç ana bileşeni bulunmaktadır:

- Matris fazı: Sürekli ve ana fazdır. Takviye fazını bir arada tutar ve yükü paylaşır.
- Takviye fazı: Matris içindeki ikincil fazdır. Matrisin dayanım ve rijitliğini artırır.
- Ara yüzey: Matris ile takviye fazı arasındaki fazdır. Yapışmayı belirler [59].

#### **2.1.2. Kompozitlerin Sınıflandırılması**

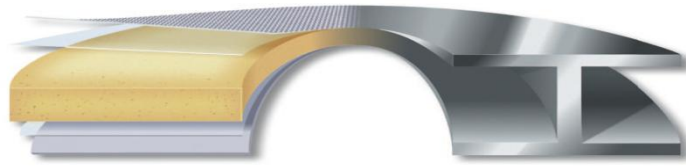
Kompozit malzemeler matris malzemesine göre metal, polimer ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üçe ayrılır. Takviye fazlarına göre sınıflandırma ise Şekil 2.1 de gösterildiği gibi yapılabilir.



Şekil 2.1. Takviye fazlarına göre kompozitlerin sınıflandırılması [60]

## 2.2. Sandviç Kompozitler

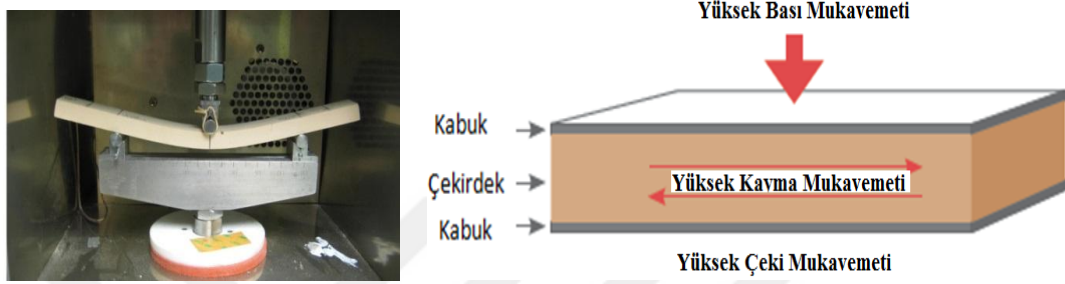
Sandviç kompozitler teknolojik kompozitlerin en önemli uygulamalarındandır. Bu malzemelerde farklı yapılar istenilen çeşitli mekanik özelliklerin sağlanması için birbirleri içinde çözünmeden birleştirilmektedir. Birleştirme işlemi yapıştırma ile sağlandığı için sandviç malzemeler yapıştırma bağlantılı kompozitler kavramı içinde de incelenebilir. Sandviç kompozitlerde dış yüzeyler (kabuklar) ince ancak mukavim bir yapıya sahipken çekirdek malzeme kalın, hafif ve daha düşük mukavemete sahiptir. Bu sayede mukavemeti yüksek bir eleman oluşturulduğu gibi konstrüktif açıdan da düşük ağırlıklı bir yapı elde edilmiş olur [61].



Şekil 2.2. Sandviç kompozitin yapısı[62]

Sandviç kompozitlerin yapısı tek bir malzemedan üretilmiş I profil kirişe benzetilebilir. Şekil 2.2 de sandviç panelin kabuğu kirişin flanşlarını oluştururken çekirdek malzeme kirişin bağlantı bölümüne karşılık gelmektedir. Kabuğa etkiyen normal kuvvetin etkisinde sandviç panelin yüzeyleri eğilmeye maruz kalır ve

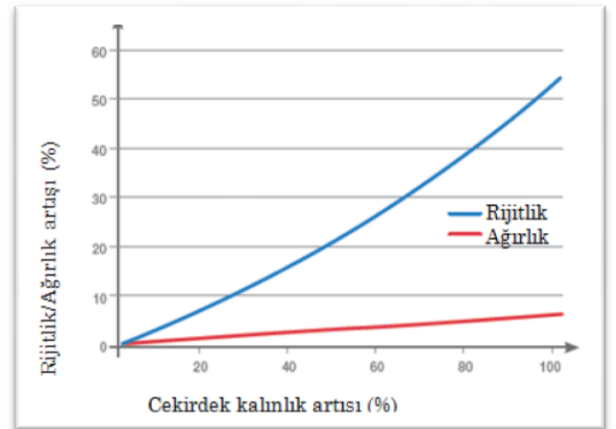
yüzeylerden biri bası kuvveti etkisinde iken diğeri çeki kuvvetiyle zorlanır (Şekil 2.3). Çekirdek malzeme kayma gerilmelerine direnç gösterirken aynı zamanda yüzeyler arasındaki mesafeyi koruyarak yapının rijitliğini artırır ve yüzeylere kesintisiz destek vererek düzenli, rijit bir sandviç panel oluşturur. Çekirdek, yüzey ve yapıştırma bağlantısı uniform bir konstrüksiyon oluşturarak tek bir birim olarak davranır. Böylece sandviç yapı yüksek burulma ve eğilme rijitliğine sahip olur.



Şekil 2.3. Yük altındaki sandviç kompozite etki eden gerilmeler

İçerideki çekirdek malzemenin temel görevi dış yüzeyler arasındaki mesafeyi muhafaza etmektir; çünkü bu mesafe sandviç malzemenin kesit alanına ait atalet momentinin ve eğilme rijitliğinin artmasını sağlamaktadır. Çekirdek kalınlığındaki artış yapının eğilme rijitliğini arttırırken, çekirdeğin hafifliği nedeniyle sandviç yapının ağırlığında büyük bir değişim olmaz (Şekil 2.4).

	Katı Malzeme	Çekirdek Kalınlığı $t$	Çekirdek Kalınlığı $3t$
Rijitlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme Mukavemeti	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06



Şekil 2.4. Çekirdek rijitliğinin ağırlıkla değişimi [62]

### 2.2.1. Sandviç Kompozitlerin Avantajları

Hafiflik, düşük maliyet ve yüksek dayanım, çağımızın en önemli rekabet unsurlarıdır ve bu üç unsur sandviç yapılarda uygun yüzey, çekirdek ve yapıştırıcı malzemesi seçmekle sağlanabilmektedir. Bu yapıları önemli kılan diğer özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Aynı ağırlıktaki geleneksel malzemelere oranla basma ve yorulma mukavemetlerinin yüksek olması
- Hafif malzemelerden oluşması
- Uygun malzeme kombinasyonu ile tasarım esnekliği sunmaları
- Düşük ısı geçirgenliği
- Ses yalıtım özelliği
- Korozyona karşı direnç
- Çekme dayanımlarının çelik ve alüminyuma göre 4-6 kat daha fazla olması
- Rijitliklerinin yoğunluklarına oranla, çelik ve alüminyumdan 3,5-5 kat daha fazla olması
- Yorulma mukavemetinin yüksek olması
- Darbe enerjisi absorpsiyonunun diğer malzemelere oranla önemli ölçüde yüksek olmasıdır.

### 2.2.2. Sandviç Kompozitlerin Dezavantajları

Sandviç kompozit yapıyı oluşturan her tür bileşenin olumsuz özellikleri sandviç malzemeye de yansımaktadır. Örneğin, çekirdek malzemesi olarak kullanılan malzemenin düşük mukavemette oluşu ya da yapıştırıcı olarak kullanılan reçinenin organik çözücülere karşı dayanıksızlığı sandviç yapıda istenmeyen özellikler oluşturur. Sandviç kompozitlerin en büyük dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- Katlar arasında görülen hava ve gazların varlığı
- Katlar arasında kalan yapışmamış bölgeleri inceleme zorluğu
- Sıcaklık farklılıklarına ve çevresel etkenlere duyarlılık

### **2.2.3. Sandviç Kompozitlerin Kullanım Alanları**

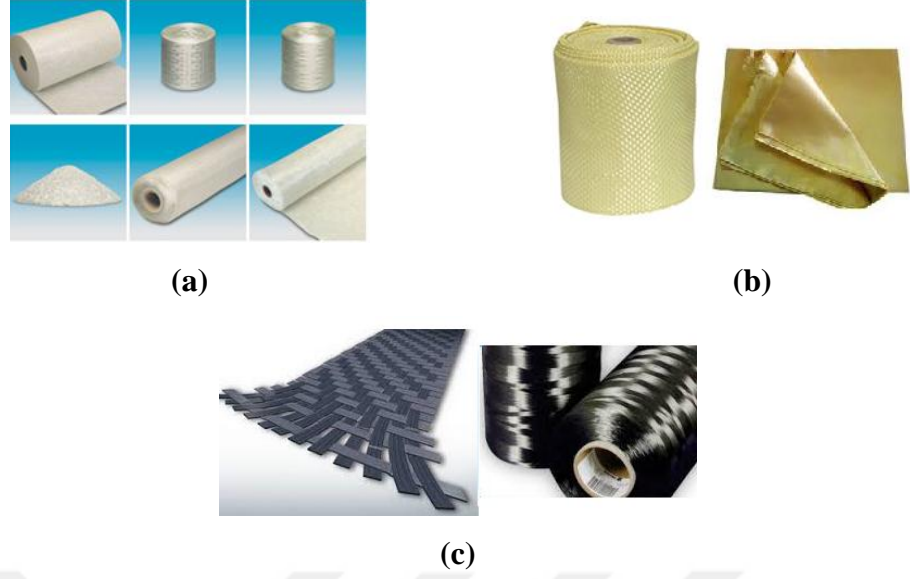
Sandviç kompozitlerin avantajlı oldukları özellikler ele alınarak bu yapıların kullanım alanları genel bir yaklaşım ile incelenebilir. Örneğin havacılık ve uzay sanayisine yönelik uygulamalarda, hafiflik ve rijitlik özellikleri önem taşımakta ve genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç konstrüksiyon tekniği ile üretilmektedir. Son yıllarda bir çok binek ve spor otomobillerin tavan, direk ve gövdesinin bir çok kısmında, spor aletlerinde (yarış bisikleti kaburgası), tekne, yat ve rüzgar türbini pervanesi gibi uygulamalarda sandviç yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca petekli çekirdek yapılar enerji sönümlenme, radyo dalgası kalkanı, uyduların güneş panelleri ve hava akımı doğrultucusu vb. olarak da yaygın bir kullanıma sahiptir.

### **2.2.4. Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması**

Sandviç kompozitler, kendilerini oluşturan elemanlara göre değişiklik gösterdiğinden bir bütün olarak sınıflandırmaya tabi tutmak zordur. Bu nedenle sandviç kompozitler kendilerini oluşturan üç temel elemanın cinsine göre sınıflandırılabilir.

#### **a) Kabuk Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler**

İnce levhalar halindeki hemen hemen tüm yapısal malzemeler sandviç kompozitin yüzeylerini oluşturmak için kullanılabilirler. Genellikle yüzey malzemesi olarak kullanılan materyaller metalik ve metal olmayan malzemeler olarak ikiye ayrılır. Metal malzemeler grubunda çelik, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları yer almaktadır. Metal olmayan malzemeler grubunda ise kontrplak, ahşap, takviyeli plastik ve fiber kompozitler gibi malzemeler yer almaktadır. Uygulamada en çok kullanılan kabuk malzemesi olan fiber kompozitlerdeki takviye malzemesi çeşitleri Şekil 2.5 de verilmiştir.



**Şekil 2.5.** Elyaf çeşitleri (a)cam elyaf (b)aramid elyaf (c)karbon elyaf

*i. Cam elyaf*

Günümüzde çeşitli mukavemet özelliklerine sahip E, S ve R tipi cam elyafları sandviç kompozitlerin kabuklarında takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Cam elyaflar, reçineyi oldukça iyi özümseyebilen iyi kimyasal direnç gösteren, işlenebilirlikleri yüksek ve kullanımı kolay elyaflardır [63]. Diğer elyaflara göre düşük maliyette olması kullanımını arttıran en önemli etkenlerden biridir.

*ii. Aramid elyaf*

1960'lı yılların sonlarında DuPont de Nemours tarafından piyasaya sürülen Kevlar, aramidlerin en bilinenidir. Son yıllarda çeşitli imalatçılar değişik ticari isimlerle piyasaya aramid elyaflar sürmüşlerdir. Aramid elyafın özgül çekme mukavemeti çelikten yaklaşık 5 kat daha fazladır. Bu nedenle aramid elyafların sahip olduğu üstün çekme mukavemeti bu malzemelerin balistik amaçlarla kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Sürtünme ve aşınmaya da çok dayanıklı olan bu tip elyaflar basmada aynı performansa sahip değildir. Ayrıca depolamada rutubet almaları ıslanmayı çok daha zor hale getirdiğinden yapısal bütünlük için bir tehlike oluşturur.

### *iii. Karbon elyaf*

Karbon elyaflar mukavemet olarak cam ve aramid elyaflarından çok daha üstün özellikler taşırlar. Darbelerin yutulması için ve çok düşük ağırlıkla rijitlik sağlamak amacıyla kullanılırlar. Plastik matris içerisinde ıslanabilme özellikleri oldukça iyidir.

### *iv. Boron elyaf*

Metal takviyeli kompozitlerde sıklıkla kullanılan boron elyaflar, gaz türbini kanatları gibi yüksek ısıda üstün mukavemet gerektiren yerlerde alüminyum oksit matris içerisinde kullanılırlar.

### *v. Diğer plastik elyaflar*

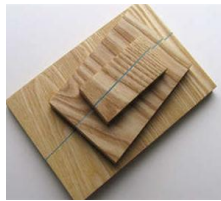
Kompozit yapılarda, az miktarda olsa da amaca uygun olarak naylon(Nomex) ve polietilen elyaflar da kullanılmaktadır.

## **b) Çekirdek Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler**

İki ince levha arasına yapıştırılan çekirdek malzemesi rijit ve düşük ağırlıklı bir yapı oluşturur. Çekirdek malzemesi yapıya büyük bir basma mukavemeti de sağlamaktadır. Sandviç bir yapıda çeşitli çekirdek formları kullanılmaktadır. Bunlar petek çekirdek, ahşap çekirdek ve köpük çekirdeklerdir. Şekil 2.6 da bazı çekirdek malzemeleri gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 2.6.** Çekirdek malzemeleri (a)bal peteği çekirdek, (b)ahşap çekirdek, (c)köpük çekirdek

*i. Bal peteği (Honeycomb) çekirdek*

Bu tip çekirdek yapısı doğal bal peteği biçimindedir ve çok yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Bu nedenle uçak ve helikopterlerin taban ve duvar panellerinde, kaplamalarında, karmaşık şekilli kontrol yüzeylerinde ve hatta bazı helikopterlerin rotor palalarında kullanılmaktadır. Petek yapı, kıvrılmış şeritlerden oluşan çekirdek malzemesinin birleştirilmesi ile oluşturulur ve kabuk malzemeye yapıştırılması oldukça zordur. Petek çekirdek, normalde kalınlık yönünde peteklere dikey yönde etki eden basma gerilmeleri etkisinde kalır. Bu nedenle dikey yönde yeterince dayanıklı olmalıdır. Petek çekirdek, genişlik doğrultusunda çok az mukavemete sahiptir.

*ii. Ahşap çekirdek*

*Balsa ağacı*; yapıya yüksek rijitlik sağlayan uzun yıllardan beri havacılık endüstrisinde kullanılan bir çekirdek türüdür. Ancak, kırılmaları ani ve büyük boyutlu olur ve tabii kaynaklı malzemenin standardizasyonu zordur.

*Tahta*; iyi ezilme mukavemeti beklenen yerlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılabilir ve balsaya göre standardizasyonu daha kolay kontrol edilebilir. Ancak ağırlığı önemli bir dezavantajdır.

*iii. Köpük çekirdek*

Uygulamalara bağlı olarak kullanılan birçok değişik tipte köpük bulunmaktadır. Son zamanlarda yüksek yoğunluklu ve yüksek kaliteli hücreli köpüklerin gelişmesi, sandviç yapıların kullanımında oldukça etkili olmuştur. Hücreli köpükler, petekler kadar yüksek sertlik ve mukavemet/ağırlık oranına sahip değillerdir. Köpük çekirdeklerin yüzey malzemesiyle birleştirilmesi, yüzey hazırlaması ve şekil verilmesi kolaydır. Bazı köpükler, yüksek termal izolasyon ve akustik izolasyon özelliklerine sahiptirler. Düşük maliyetli, düşük ağırlıklı, mükemmel termal izolasyonlu, yüksek basma dayanımlı, nem oluşumunu engelleme ve yüksek korozyon dirençli olmaları nedenleriyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılan köpük çeşitleri aşağıda verilmiştir.

*Poliüretan köpükler;* çok veya az açık hücreli olarak birçok değişik tipte üretilirler. Yoğunlukları 30-500 kg/m<sup>3</sup> arasında değişiklik gösterir.

*PVC köpükler;* hem polyester hem de epoksi reçineler ile kullanılabilir. Rutubet/su absorpsiyonu direnci oldukça iyidir.

*Suni köpük;* genel olarak atölye yapımı uçaklarda kullanılır ve sadece epoksi reçine ile birlikte kullanılır.

*Üretan köpükler;* hem epoksi hem de polyester reçine ile birlikte kullanılabilir.

*Metal köpükler;* sünger ve mercan gibi gözenekli yapıların bir türüdür. Doğada saf halde bulunan bir ürün değildir. Metal köpüklerin gözenekli yapıya sahip şekillerini alabilmeleri için çeşitli işlemlerden geçirilmeleri gerekmektedir.

### **c) Yapıştırıcı (Reçine) Malzemesine Göre Sandviç Kompozitler**

Kabuk ve köpük malzemeleri birleştirme işlemi için birçok yapıştırıcı çeşidi bulunmaktadır. Yapıştırıcılar, sandviçin yapısal gerekliliklerini karşılayacak malzemeler arasında iyi ve uygun birleştirici özelliğe sahip olmalıdır. Yorulma mukavemeti, ısı mukavemet ve sürünme mukavemeti yapıştırıcılar ile ilgili öncelikli olan özelliklerdir. Sıklıkla kullanılan bazı yapıştırıcılar şunlardır:

#### *i. Epoksi reçine*

Genelde 20-90 °C arasında kurlaşan düşük sıcaklık reçineleri ve 130-220 °C arasında kurlaşan yüksek sıcaklık reçineleri bulunmaktadır. Bunların çözücüsüz kullanılması ve buhar oluşturmadan kurlama gibi avantajları vardır. Bu da malzemede düşük bir hacim küçülmesi sağlar. Çözücülerin bulunmayışı epoksileri neredeyse tüm çekirdek malzemeleri ile kullanılabilir hale getirmektedir. İmalatta çalışma süresi oda sıcaklığında 15 saat civarında olabilir.

### *ii. Polyester reçine*

Polyester reçine, matrislerin bilinen en eskilerinden ve en çok kullanılanıdır. Islak yatırma için uygundur. Polyesterin saf halde korozif elementlere ve suya mukavemeti çok iyi değildir. İmalatta alışma suresi 30-40 dakika ile sınırlıdır. Bu sureyi uzatmak için çeşitli inhibitörler kullanılabilir.

### *iii. Vinylester reçine*

Polyesterlerden sonra bulunmuş bir matris tipidir. Vinylester reçine ıslak yatırma için uygundur. Vinylesterler su ve koroziflere karşı yüksek dirence sahiptirler. Polimerizasyon çeşitli ajanlar vasıtası ile 10-12 saate kadar uzatılabilir, bu sayede büyük yüzeylerde vakum tatbikatı yapılabilir. Bu reçinelerin en büyük problemlerinden biri, krleme sırasında meydana gelen hacim kmlerinin çok yüksek kesme gerilmesi meydana getirmesidir.

### *iv. Fenolik*

Mkemmел bir dayanıma, yüksek mekanik özelliklere ve srekliğe sahip olan fenoliklerin başlıca dezavantajları, krleme yaparken bir miktar su buharı ortaya ıkartmalarındır. Bu karakteristikler ve dışarıya gaz salınımı fenoliğin sandviç yapıların birleştirilmesinde kullanımını kısıtlamaktadır.

### *v. Poliüretan*

Sandviç yapıları birleştirmede kullanılan en yaygın yapıştırıcılardır. Bunun sebebi çoğu malzemeye mkemmел yapışma özelliklerindedir. Değişik viskozitelere katı veya sıvı olarak kullanılabilirler. Yangın geciktirici ve su geçirmezlik özelliklerine sahiptir. Poliüretanlar zc içermediğinden çevreye zararları yoktur ve diğer reçineler arasında zehir oranı en az olan yapıştırıcılardır.

### *vi. Akrilat*

Akrilatlar çok dayanıklıdır ve neredeyse krleme sırasında hiç hacim kmlmesi meydana getirmezler.

### 2.3. Darbe

Mühendislik uygulamalarında yapılan tasarımların dışarıdan gelecek darbelerle karşı nasıl tepki vereceğinin bilinmesi, istenmeyen ya da beklenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için oldukça önemlidir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre yapının maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir.

Metal ve metal alaşımlarında darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez. Çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler ve oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik değildir.

Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok az görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin neredeyse tamamı kırılmandır. Bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler. Diğer bir deyişle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit bir malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir [64].

Darbeler, genel olarak düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [65-68]. Düşük hızlı darbeye en basit örnek bakım sırasında yapının üzerine bir aletin düşmesi ya da uçağın kanadına bir kuşun çarpması şeklinde verilebilir. Cantwell ve Morton [67], kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi bilinen darbe deneylerini kullanmışlar ve düşük hızı 10 m/s 'ye kadar olan hızlar olarak sınıflandırmışlardır. Bununla birlikte Abrate, tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak belirlemiştir [68]. Darbe türünün, darbe hız sınırını belirleyerek tespit edilmeye çaba gösterildiği bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır.

Düşük hızlı darbeler çarpışma anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbeye, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir.

Yüksek hızlı darbe (balistik darbe olarak da bilinir) cevabı malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hakim olunur. Bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verecek zamana sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

### 2.3.1. Darbe Test Teknikleri

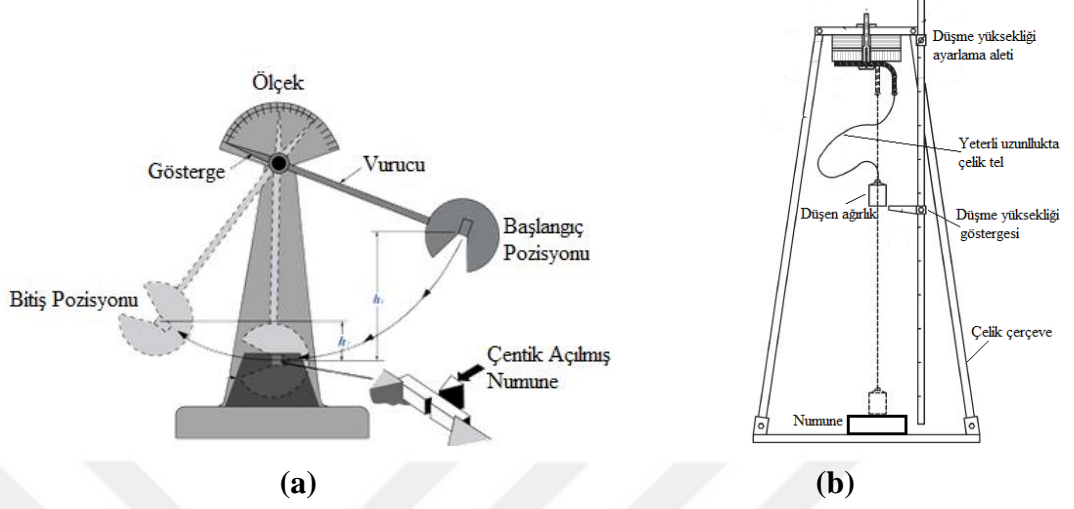
Darbe üretmek için birçok test tekniği kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılacağına, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler:

- Sarkaç testleri (Izod ve Charpy)
- Ağırlık düşürme testleri
- Hava veya Gaz silah testleri (balistik testler)

Izod ve Charpy darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi Şekil 2.7.a da gösterildiği gibi standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, absorbe edilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir.

Şekil 2.7.b de ağırlık düşürme deneyine dair basit bir düzenek verilmiştir. Kütleli bilinen bir ağırlık, istenen darbe enerjisi kazandırmak için ayarlanan yükseklikten numune üzerine bırakılır. Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha

geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesine imkân sağlaması ve sonuçların çok daha kolay analiz edilebilmesidir.



Şekil 2.7. Charpy ve düşen ağırlık test cihazları

Yüksek hızlı darbe test metotlarında ise düşük ağırlıklı ancak yüksek hızlı parçaların malzeme veya yapılar üzerine olan darbeleri simüle edilir. Bu darbe test metotları basınçlı hava ile darbe test metodu ve Split-Hopkinson basınçlı çubuk test metodudur. Basınçlı hava ile darbe testi, kütlesi 250 gramdan küçük ve hızı 100 m/s'den büyük vurucular için uygun bir metottur. Split-Hopkinson basınçlı çubuk testi ise malzemelerdeki yüksek şekil değiştirme-hız etkisini araştırmak ve malzemelerin çeşitli modlardaki dinamik davranışlarının incelenmesi için yaygın olarak kullanılan bir metottur [69].

Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin konfigürasyonu (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi v.b) etkilemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğu zaman tüm bu kriterlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [68].

### 2.3.2. Darbede Oluşan Hasar Tipleri

Fiber takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür).

- **Matris modu:** Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemede görülen ilk hasar modudur ve matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Matris çatlamları fiberlere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir. Darbeden sonra yapıda, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları bulunur. Hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve sonra bu çatlaklar tabakalar arası ayrılmaya (delaminasyon) neden olur.

- **Delaminasyon modu:** Kompozit yapıda katmanlar arasında yapışmanın azalmasıyla meydana gelen ve yapının mukavemetini önemli derecede düşüren hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik tabaka aynı elyaf yönlendirme açısına sahip ise bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon meydana gelmemektedir. Kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanlarda eğilme cevabı uyumsuzluğu ortaya çıkar. Bu uyumsuzluk, delaminasyonun oluşumundaki en önemli etkenlerden biridir.

- **Fiber modu:** Kompozit malzemede fiber modu elyaf kopması ve elyaf eğilmesi şeklinde oluşur. Elyaf kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf hasarı, çarpan cismin batması nedeniyle darbe yüzeyinde oluşacağı gibi yüksek eğilme gerilmeleri nedeniyle darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir.

- **Nüfuziyet:** Hasarın makroskobik bir modu olan nüfuziyet ve çarpan cismin malzeme üzerindeki dalma miktarını veya delme miktarını ifade eder.

Hasar modunun belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Hasar modları arasındaki etkileşimi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir [69].

## **2.4. Titreşim**

Titreşim, dinamik bir sistemin statik denge konumu etrafında yaptığı salınım hareketidir. Sistemlerdeki titreşimler, dış kuvvetler ve sistemin bu dış kuvvetlere cevap verme özelliğinden kaynaklanır. Bir titreşim sisteminin harekete (titreşime) geçirilmesi sisteme bir enerji girişi yapılarak gerçekleştirilebilir. Pratik olarak bu durum aşağıda sıralanan yöntemlerle olabilir:

- a. Deney düzeneğinde numuneye bir başlangıç yer değiştirmesi verildikten sonra serbest bırakarak; yani potansiyel enerji girişi yapılarak
- b. Deney düzeneğinde numuneye bir başlangıç hızı verilerek bir darbe (ani kuvvet) uygulayarak; yani kinetik enerji girişi yapılarak
- c. Bir zorlayıcı ile kuvvet uygulayarak

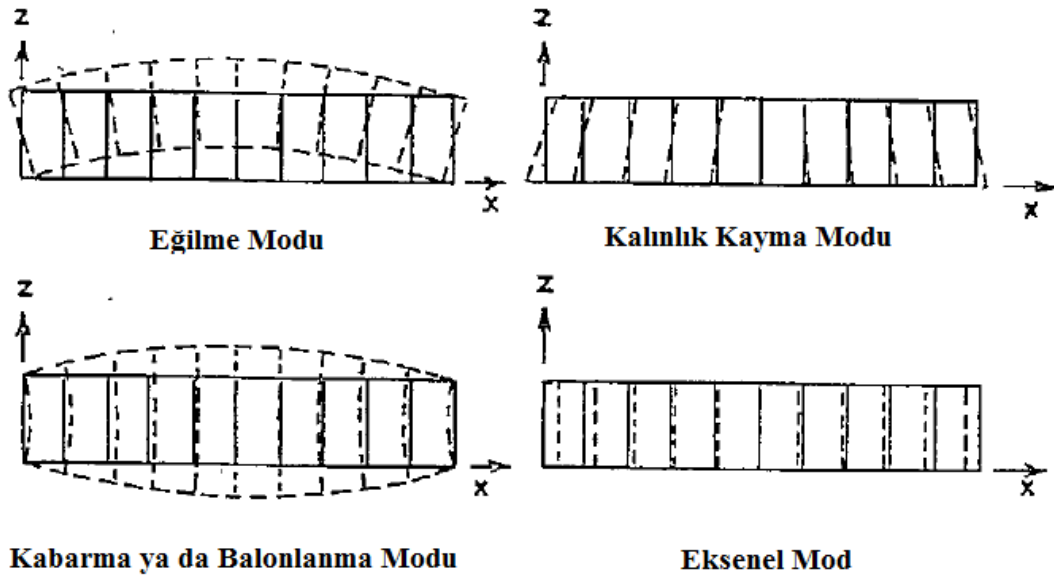
Yukarıda sıralanan yöntemlerden (a) ve (b) nin ayrı ayrı veya birlikte uygulanması durumunda sistemin yapacağı titreşim hareketi ‘serbest titreşim’ olarak adlandırılır. Bu durumda titreşim hareketi zamanla sönümlenerek sona erer. Yani sistem başlangıçtaki statik denge konumuna döner. Ancak (c) yönteminin uygulanması durumunda sistem kuvvet etki ettiği sürece titreşimine devam eder. Bu durumdaki titreşim hareketi ‘zorlanmış titreşim’ olarak adlandırılır [70].

### **2.4.1. Doğal Frekans**

Sistemin serbest titreşiminin bir saniyede yaptığı salınım sayısına doğal (tabii) frekans denir. Sistemin tabii frekansını tamamen sistemin kendi parametreleri belirler. Bir sistemin doğal frekansının bilinmesi yapılacak olan tasarım için büyük önem taşımaktadır. Tasarlanan sistemin çalışma şartlarında doğal frekansıyla

zorlanması yapıda rezonans durumunu oluşturur ve bu istenmeyen durum neticesinde sistem büyük hasara uğrar. Doğal frekansın bilinmesinin bir diğer önemi de tahribatsız muayenede rezonans yardımıyla yapıdaki hasarların belirlenebilmesidir. Doğal frekansı bilinen hasarsız yapı aynı frekansla zorlandığında, rezonans durumunun oluşması ya da oluşmaması, yapının güvenle kullanılabilirliği hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 2.8 de basit sınır şartlarıyla mesnetlenmiş düz dikdörtgen sandviç plakaların birinci derece mod şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Basit mesnetlenmiş sandviç plakanın birinci derece mod şekilleri [71]

Orta düzleme göre simetriye sahip düz bir sandviç panel için iki farklı titreşim modu vardır. Birincisi ve belki de en önemlisi anti-simetrik moddur. Bu modda panellerin ön yüzündeki yer değiştirmeler diğer yüzdeki ile eşit fakat zıt yönlere sahiptir. Bu nedenle panel orta düzlemi, anti simetri düzlemi adını alır. Panelin klasik eğilme modları anti simetrik modlara örnek olarak verilebilir. İkinci olarak simetrik modlardan bahsedilebilir. Burada plakaların bir yüzündeki yer değiştirmeler diğer yüzdekilere eşit ve aynı yöndedir. 3'er tane birinci dereceden anti simetrik ve simetrik mod vardır. Bununla birlikte anti simetrik moda sahip olanların iki tanesi simetrik moddakiler ile aynı tiptedir. Böylelikle 4 mod tanımlanır.

## a) Anti simetrik Modlar

### i. Eğilme modu

Bu modda plakanın orta düzlemine dik olan yer değiştirmeler (z eksenini) x ve y değerlerine bağlı olarak değişir. Ancak birçok durum için z ile değişmediği kabul edilebilir. Bu moda ait enerjiler plaka kalınlığının plakanın boyuna ve enine göre küçük olduğu durumlardaki enerjilerden daha düşüktür. Bu yüzden birinci derecede eğilme modu nispeten düşük frekanslı olacaktır.

### ii. Kalınlık-kayma modu

Yukarıda bahsedilen plakanın x ekseninde ve y ekseninde olmak üzere iki kalınlık-kayma modu vardır. Sıfırıncı dereceden kalınlık kayma modundaki yer değiştirmeler x ve y koordinatlarından bağımsız ve plaka düzlemine paraleldir. Plakaya dik yer değiştirmeler sıfırdır. Birinci kalınlık kayma modu yer değiştirmeleri de plaka düzlemine paraleldir. Ancak x ve y koordinatlarına bağlı olarak değişirler. Birçok durumda birinci kalınlık kayma modu u ve v nin normal z koordinatına göre lineer varyasyonu olarak kabul edilebilir. Bu kez de plaka yüzeyine dik bazı eğilme karakteristiğine benzer yer değiştirmeler oluşacaktır. Kalınlık-kayma modları burada ele alınan sandviç plakaların eğilme modlarına göre daha yüksek frekanslara sahiptir.

## b) Simetrik Modlar

Düz paneller için tanımlanan birinci dereceden simetrik modlar, herhangi bir şekilde birinci derecedeki anti simetrik modlarla eşleştirilmez.

### i. Kabarma ya da balonlanma modu

Bu modlarda oluşan hareket çekirdeğin z doğrultusunda çeki ya da bası gerilmesi oluşturur ve kabukların hareketi zıt yönlerde doğru olur. Şekil değiştirme enerjisinin çoğu çekirdektedir. Bu mod, muadili olan anti simetrik modlara göre daha yüksek frekanslardadır. Eğilme modu balonlanma modlarının frekansları büyük bir olasılıkla kalınlık-kayma modu ile aynı düzeydedir. Bu modun hafif sönümlü olması ve

yorulma söz konusu olduğunda yüksek doğal frekansına bağlı olarak önemli hale gelmesi muhtemeldir.

#### *ii. Aksel modlar*

Bu modlar kalınlık kayma modunun simetrik eşdeğeridir. Göz önüne alınan plakanın iki tane birinci dereceden modu vardır; biri ağırlıklı olarak x ekseni yönündeki hareketi, diğeri de y yönündeki hareketidir. Yalnızca ikinci dereceden yer değiştirmeler plaka düzlemine dik doğrultudadır ve bu yüzden diğeri tüm yer değiştirmeler plakanın orta düzlemine paralel olarak kabul edilebilir. Bu modda en üst ve en alt kabuk aynı yönde ve aynı miktarda yer değiştirirler. Birinci modda u ve v, x ve y' ye bağlı olarak değişirler. Bu modların doğal frekansları oldukça yüksektir [71].

#### **2.4.2. Titreşim Ölçümü**

Sistemde var olan titreşimin ölçülebilmesi sistemin doğal frekansına ulaşmada en önemli rolü oynar. Titreşim ölçümünde kullanılacak cihazdan beklenen en temel özellik titreşimi kayıt edebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda titreşim ölçümünde kullanılan cihazlar şöyle sıralanabilir:

- Deplasman ölçerler
- Hızölçerler
- İvmeölçerler
- Sinyal kuvvetlendiriciler
- Frekans çözümleyiciler
- Titreşim ölçüm ve analizörleri

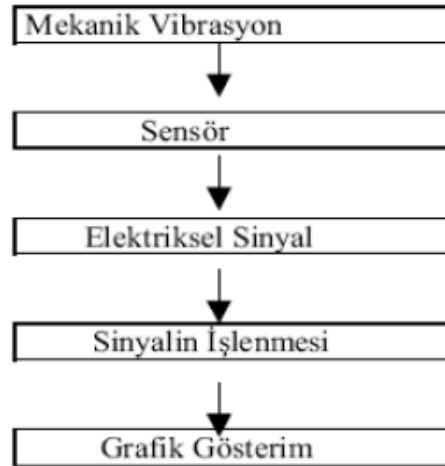
Bu çalışmada numunelerin titreşim ölçümleri ivmemetreler ile yapıldığı için yalnızca ivmemetreler üzerinde durulacaktır.

İvmeölçerler (ivmemetreler), bir kütlenin sahip olduğu ivmeyi ölçmek için kullanılan cihazlardır. Bunu yaparken içerisinde konumlandırılmış kütlenin, değişken

konumundan faydalanarak sonuç elde edilir. İvmeölçerler farklı yöntemlerle çalışmaktadır. Bunların en yaygın olarak kullanılanları piezoelektrik ivmeölçerlerdir. Piezoelektrik ivmeölçerler içerisindeki mikroskobik piezoelektrik kristaller herhangi bir kuvvet etkisi altında akım üretirler. Bir piezoelektrik ivmeölçerde; bir kütle piezo malzemeye bağlı olup, titreşim sonucu oluşan atalet kuvvetleri ( $F=ma$ ) piezo da titreşim hareketiyle orantılı akım üretilmesine sebep olur. Ön bir devre kullanılarak akım ( Pico-coulombs /g) çıkışı düşük empedanslı voltaj çıkışına (mV/g) çevrilebilir [72].

İvmemetreler çok geniş bir frekans aralığında kullanılabilirdiği gibi dinamik ölçüm bölgesinde mükemmel lineer özelliğe sahiptirler. İvme sinyali elektronik olarak kolayca integre edilerek hız ve deplasman bilgisine dönüştürülebilir. Çok farklı koşullarda mükemmel doğrulukta titreşim ölçümleri yapmak mümkündür. Hareketli kısımları olmadığı için son derece dayanıklıdır. Titreşimlere karşı son derece duyarlıdır ve (duyarlılık /kütle) oranı yüksektir.

İvmemetreden alınan mekanik titreşim Şekil 2.9 deki basamakları izler; elektriksel sinyale dönüştürülür ve bu sinyaller veri toplama düzeneğinde işlenerek grafiksel olarak gözlemlenebilir.



**Şekil 2.9.** Mekanik titreşimin işleme basamakları[72]

### 2.4.3.FFT (Fast Fourier Transform) Diyagramları

Gerçek hayatta, eğer bir zorlayıcı ile düzenli olarak oluşturulmuyorsa, düzgün salınımlı titreşimlere rastlamak mümkün değildir. Rastgele titreşimlerin harmonik salınımlar gibi belirli bir frekansı ve genliği yoktur. Dolayısıyla bu titreşimlere bakarak titreşime sebep olan kuvvet hakkında fikir yürütmek imkânsızdır. Bu çalışmada yapılan titreşim analizinde numunelere ait doğal frekansların elde edilebilmesi için bu titreşimlerin frekanslarının bilinmesi gerekmiştir. Bu nedenle veri toplama sisteminden alınan zaman-genlik diyagramları hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) ile karışık sinyallerden arındırılarak frekans-genlik diyagramlarına geçilmiştir. FFT diyagramlarında tekrarlanmayan sinyaller gözlemlenmediği için karışık sinyaller harmonik bileşenlerine ayrılmıştır ve hangi frekansta ne şiddette bir titreşim olduğunu gösterilmiştir.

### 3. MALZEME VE METOD

#### 3.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada delaminasyon içeren düz ve eğriselliğe sahip sandviç kompozit panellerin darbe ve titreşim cevabının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda düz ve eğrilik yarıçapları 100, 125 ve 160 mm olan 100x100 ebatlarında 16,5 mm kalınlığında sandviç numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin temsili gösterimi Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1. Temsili düz ve eğri numuneler

Sandviç panellerin alt ve üst kabuk malzemesi E-cam/epoksi kompozit olup kabuklar 0,75 mm kalınlığına sahiptir. Her kabuk 0°/90°/-45°/+45° fiber oryantasyonlu dört tabakadan ibarettir. Panellerin çekirdek kısmında ise kalınlığı 15 mm olan AIREX C70.55 PVC köpük yer almaktadır.

Tablo 3.1. Airex C70.55 köpük malzemesinin mekanik özellikleri

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Basma Mukavemeti (MPa)	Basma Modülü (MPa)	Düzlem Çekme Mukavemeti (MPa)	Düzlem Çekme Modülü (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kayma Modülü (MPa)
60	0.90	69	1.3	45	0.85	22

**Tablo 3.2.** Tek yönlü E-cam/epoksi kabuk malzemesinin mekanik özellikleri

$E_1$	$E_2$	$X_t$	$Y_t$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	$\rho$
Eksenel Elastisite Modülü	Enine Elastisite Modülü	Eksenel Çekme Mukavemeti	Enine Çekme Mukavemeti	Poisson Oranı	Kayma Modülü	Yoğunluk
(GPa)	(GPa)	(MPa)	(MPa)		(GPa)	(kg/m <sup>3</sup> )
31	12	706	122,5	0,3	3,2	1900

E-glass/epoksi kabuk malzemesine ve PVC köpüğe ait mekanik özellikler Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 de verilmiştir.

Sandviç panellerde üst kabuk/köpük ve alt kabuk/köpük arasında yapışmayan alan (delaminasyon) oluşturmak için 9,21 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip teflon film kullanılmıştır. 10 mm ve 25 mm çapında kesilen teflon filmler numunelerin alt veya üst kabuk-köpük ara yüzeyinin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir.

Çalışma kapsamında incelenen numunelerin çeşitleri ve adlandırılmaları Tablo 3.3 de verildiği gibidir.

**Tablo 3.3.** Çalışma kapsamında incelenen sandviç paneller ve kodlamaları

	Delaminasyon içermeyen	Alt kabuk/köpük arasında 10 mm delaminasyon	Alt kabuk/köpük arasında 25 mm delaminasyon	Üst kabuk/köpük arasında 10 mm delaminasyon	Üst kabuk/köpük arasında 25 mm delaminasyon
Düz	DÜZ - DSZ	DÜZDA10	DÜZDA25	DÜZDÜ10	DÜZDÜ25
100 mm eğrilik yarıçapı	R100 - DSZ	R100DA10	R100DA25	R100DÜ10	R100DÜ25
125 mm eğrilik yarıçapı	R125 - DSZ	R125DA10	R125DA25	R125DÜ10	R125DÜ25
160 mm eğrilik yarıçapı	R160 - DSZ	R160DA10	R160DA25	R160DÜ10	R160DÜ25

Üretimi tamamlanan numuneler özel olarak tasarlanmış kalıplar arasına yerleştirilerek darbe cihazına bağlanmıştır. Tüm numunelere 5, 30, 50 ve 80 J enerjile darbe testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların güvenilirliğini arttırmak amacıyla her test 3 kez tekrarlanmıştır.

Titreşim testleri için ayrılan numunelere her biri 0,8 gr ağırlığında 4 adet minyatür PCB-352A24 ivmemetre balmumu yardımıyla tutturulmuştur. Titreşim test düzeneği yardımıyla numunelerden alınan titreşim sinyalleri bilgisayara aktarılmıştır.

Aşağıda sandviç panellerin üretimine dair ayrıntılar, darbe ve titreşim testlerinin yapılışına yönelik açıklamalar yer almaktadır.

## **3.2. Sandviç Panellerin Üretimi**

### **3.2.1. Üretimde Kullanılan Kalıpların İmalatı**

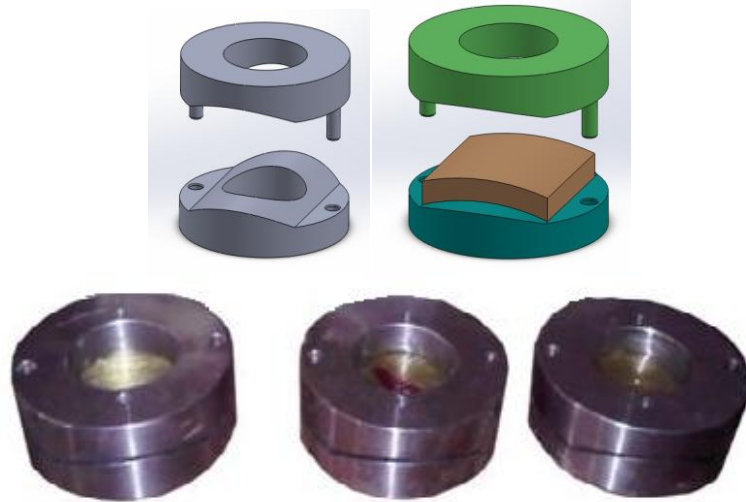
Üretimi yapılacak sandviç panellere istenilen eğri formu kazandırmak için özel kalıplar yaptırılmıştır. Eğriliğin doğru ve hassas bir şekilde eldesini sağlamak için alt kalıplar 100, 125 ve 160 mm, üst kalıplar ise numune kalınlığı göz önünde bulundurularak 116.5, 141.5 ve 176.5 mm eğrilik yarıçapında ve 450 mm genişliğinde üretilmiştir. Ölçülerdeki hassasiyetten dolayı kalıp üretiminde sac kıvrma yöntemi seçilmiştir. 5 mm kalınlığındaki demir sac, silindirik bükümden geçirilmiş ve soğuk şekil vermenin etkisiyle kalıba mukavemet kazandırılmıştır. Kalıpların düz zeminde durmasını veya taşınmasını sağlayan ayak ve kulplar da kaynak yardımıyla kalıba tutturulmuştur. Sandviç panellere eğri formun verilmesini sağlayan bu üretim kalıpları Şekil 3.2 de gösterilmiştir.



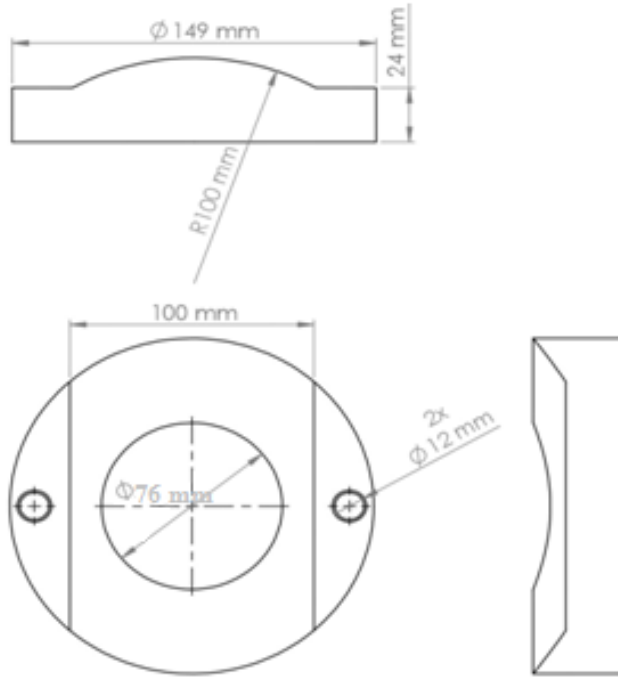
**Şekil 3.2.** Sandviç panellerin üretimde kullanılan kalıplar

### 3.2.2. Darbe Testlerinde Kullanılan Tutucuların Üretimi

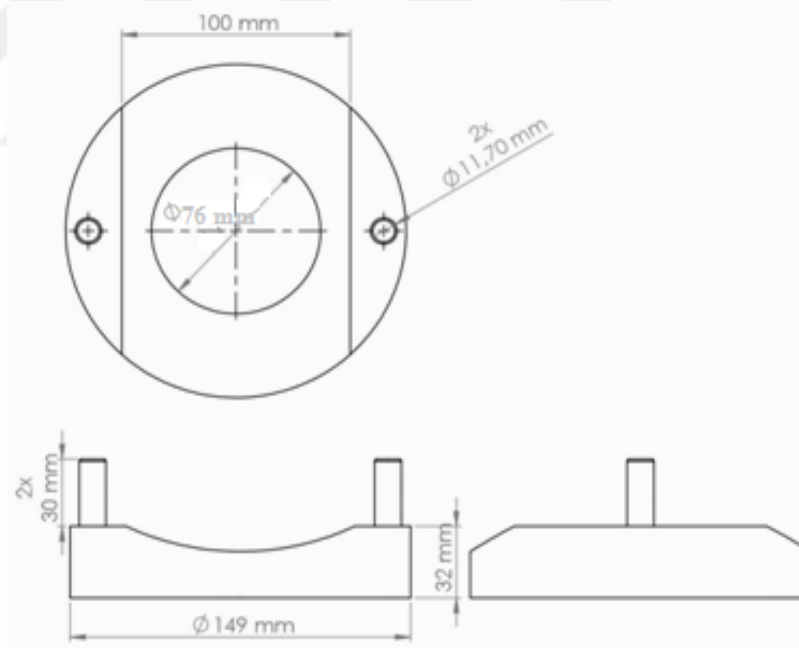
Üretimi yapılan numunelerin darbe test cihazında konumlandırılabilmesi ve uygun sınır koşullarının sağlanabilmesi amacıyla özel tutucu kalıpların üretilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaç doğrultusunda darbe test cihazına bağlanabilmesi mümkün olan ve eğri numunenin yüzeyine yerleştirildiğinde boşluksuz, tam ankastre sınır şartını gerçekleştirebilecek kalıplar SolidWorks programıyla modellenmiş ve ölçülerdeki hassasiyet nedeniyle CNC makinesinde üretimi yaptırılmıştır. Darbe cihazında kullanılacak tutucuların SolidWorks modeli ve üretim sonrası fotoğrafı Şekil 3.3 de verilmiştir. 100 mm eğrilik yarıçapına sahip tutucunun teknik resmi ise Şekil 3.4 de görülmektedir.



**Şekil 3.3.** Tutucu kalıplar



(a) Üst Tutucu



(b) Alt Tutucu

Parça Adı	TUTUCU
Ölçek	1:4

Şekil 3.4. Tutucunun teknik resmi

### 3.2.3. Sandviç Kompozit Numunelerin İmalatı

Tez kapsamında incelenen sandviç paneller vakum destekli reçine infüzyon metodu (VARIM) kullanılarak üretilmiştir. Bu metot, vakum ortamında reçine infüzyonu mantığına dayanan ve genel olarak epoksi, polyester ve vinylester reçineler kullanılan bir üretim metodudur.

Gerek uygulamayı yapan kişiden bağımsız olan yüksek kaliteli malzeme eldesi, gerekse hava boşluklarından arınmış olmanın verdiği üstün mukavemet özelliklerinden dolayı çalışmada reçine transferi, vakum destekli infüzyon düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin avantajları tek taraflı, mukavemetinin yüksek olmasına gerek olmayan bir kalıbın üretim için yeterli olması, büyük parçaların bu yöntemle üretilmesi ve hava kabarcıklarından arınmış yüksek mekanik özelliklere sahip ürün elde edilebilmesidir. Ancak üretim yöntemi kısmen komplekstir ve düşük viskoziteye sahip reçine gerektirmektedir. Ayrıca reçine ile ıslanmayan bölgelerin kalması, pahalı atık malzeme anlamına gelmektedir. Küçük tekne ve yatların gövdelerinde, tren ve kamyon gövdelerinde, rüzgar türbin kanatlarında ve diğer pek çok alanda bu üretim yöntemi kullanılmaktadır. Aşağıda bu üretim yöntemi kullanılarak sandviç panellerin nasıl üretildiğine dair işlem basamakları açıklanmıştır.

#### a) Köpük malzemesinin kesilmesi

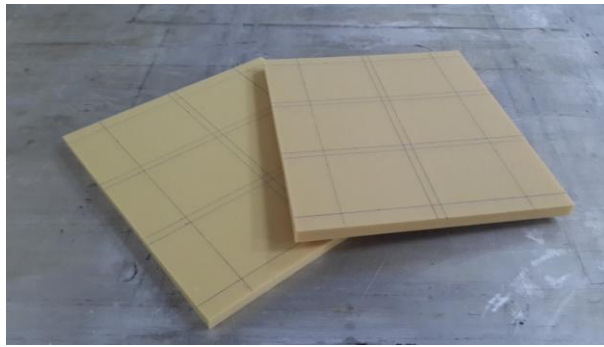
Tedarikçi firmadan alınan köpük malzemeler, numune boyutlarına kıyasla oldukça büyük ebatlarda olduklarından kesilmeleri gerekmiştir. Bu köpükler, kalıp boyutları dikkate alınarak 31x36, 40x36 ve 48x36 mm boyutlarında Şekil 3.5 deki gibi kesilmiştir.



**Şekil 3.5.** Kesilmiş PVC köpük malzeme

### **b) Köpük malzemesinin delinmesi**

Vakum destekli reçine transfer kalıplama yönteminde reçine vakum aracılığıyla kalıbın bir tarafına verilerek diğer tarafından çekilmektedir. Reçine transferi en üst tabakanın üstüne yerleştirilen dağıtıcı file yardımıyla hızla yapılmaktadır. Ancak kalıbın içine giren reçine alt tabakalara aynı hızla iletilememektedir. Reçinenin alt kabuk malzemesini aynı hızla ıslatabilmesi için köpük malzeme, numunenin çıkarılmayacağı yerlerden delinmiştir. Bunun için üretim öncesinde delinecek yerlerin belirlenmesi ve köpük üzerine işaretlenmesi gerekmiştir (Bkz Şekil 3.6).



**Şekil 3.6.** Numunelerin yerleşimi

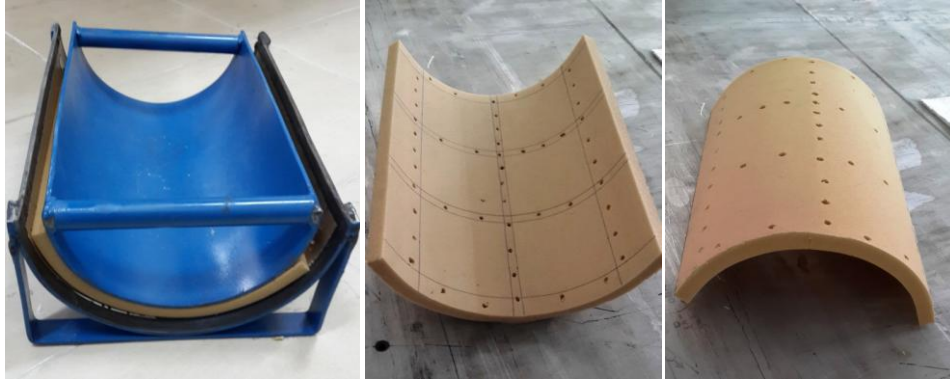
10x10 cm lik numuneleri elde edecek şekilde işaretleme yapıldıktan sonra, 2 veya 3 cm aralıklı delikler Şekil 3.7 de gösterildiği gibi delinmiştir.



**Şekil 3.7.** Köpük malzemenin delinmesi

### **c) Termoforming işlemi**

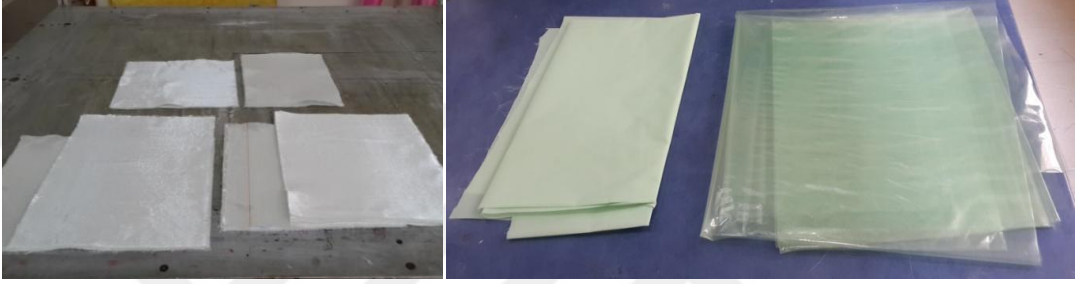
Çalışmadaki kompozit plakaların eğriselliğe sahip olması ve üretimde tek taraflı kalıp kullanılması çekirdek malzemesinin öncesinde istenen forma getirilmesini gerekli kılmıştır. Kullanılan PVC köpüğün oda koşullarında elastik olmamasından ötürü bu işlem fırında gerçekleştirilmiştir. Teknik katalogunda şekillendirilme sıcaklığı 125 °C gösterilen köpükler 20 dk fırında bekletildikten sonra eğri formu alması için alt ve üst kalıp arasında yerleştirilerek fırın içerisinde 10 dk daha bekletilmiştir. Termoforming olarak adlandırılan bu işlemin ardından yine kalıp içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Soğutmanın ardından elde edilen eğrisel köpükler Şekil 3.8 deki gibidir.



**Şekil 3.8.** Eğri forma getirilmiş köpük malzeme

#### d) Kumaş, vakum torbası ve soyma kumaşının kesilmesi

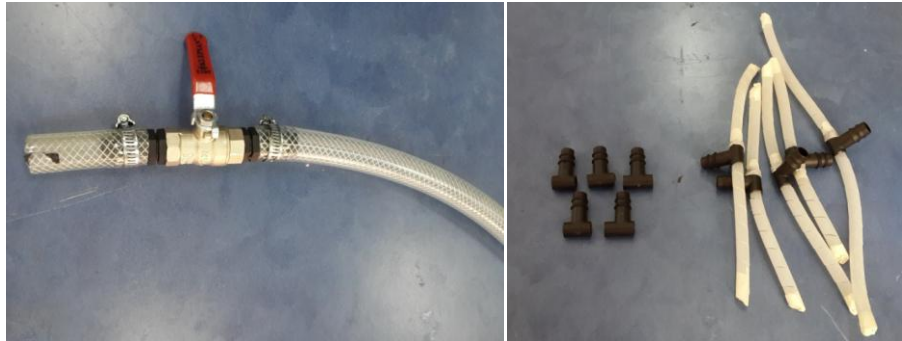
Sandviç kompozitin dış yüzeyini oluşturan kabuk malzemesi takviye elemanı sırasıyla  $0^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}$  elyaf yönlenmelerine sahip özellikleri daha önce verilen dört katmanlı cam elyaf kumaştır. Kumaşlar alt ve üst kabuk için plaka boyutlarında kesilmiştir. Üretimde kullanılacak vakum torbası ve soyma kumaşı (peel ply) da Şekil 3.9 daki gibi gerekli boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Kesilmiş cam elyaf kumaş, soyma kumaşı ve vakum torbası

#### e) Vana, boru ve spiral hortumların hazırlanışı

Reçinenin yapıda homojen ilerlemesi için spiral ve T borular resimdeki gibi uygun ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır. Reçinenin verileceği ve basınç düzeneğine bağlanacak vana ve borular da üretim için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kullanılacak boru vana bağlantısı ve spiral hortumlar

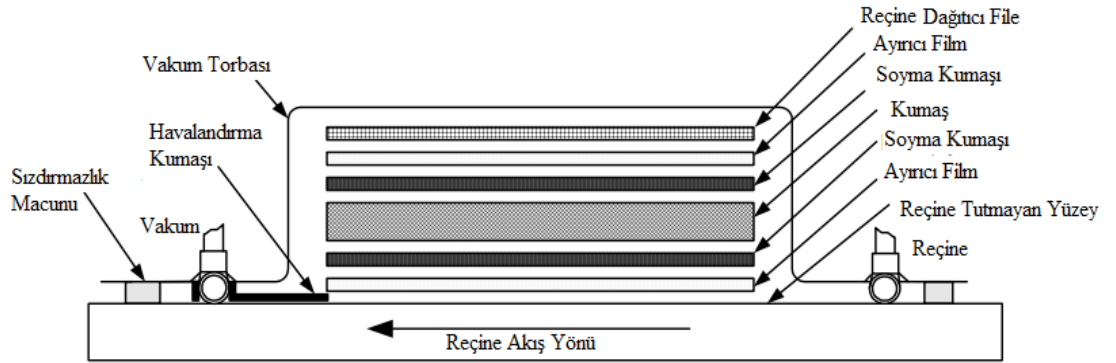
#### f) Delaminasyon için teflon filmlerin kesilmesi

Çalışmada delaminasyon varlığının, boyutunun ve konumunun etkisi araştırıldığı için üretilen numunelerde delaminasyonun oluşturulması gerekmiştir. Bunun için tek tarafı yapışkan teflon film kullanılmıştır. Teflon filmler, iki farklı delaminasyon büyüklüğünü incelemek için 10 ve 25 mm çapında kesilmişlerdir (Şekil 3.11).



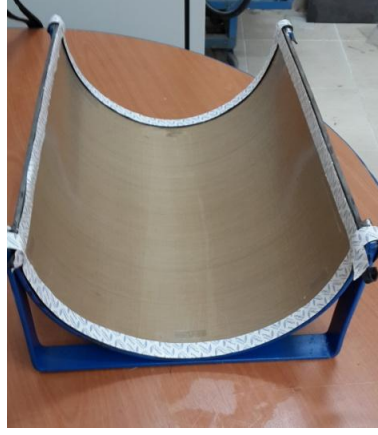
Şekil 3.11. 10 ve 25 mm çaplı teflon filmler

Kullanılacak malzemelerin hazırlanmasıyla birlikte üretim aşamasına geçilmiştir. Üretim aşamasındaki malzeme dizilimi şematik olarak Şekil 3.12 de verilmiştir.



Şekil 3.12. Üretimde malzeme diziliminin şematik gösterimi

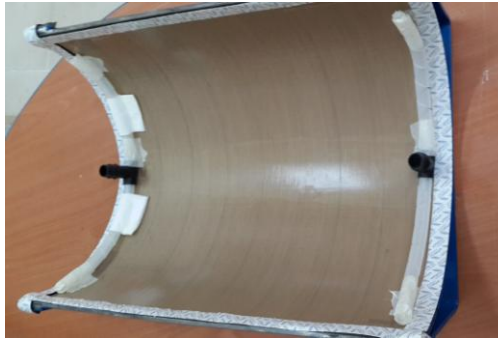
Numunenin kalıptan ayrılmasını kolaylaştırmak için teflon ile kaplanan kalıbın kenarlarına Şekil 3.13 de görüldüğü gibi macun çekme işlemi yapılmıştır.



**Şekil 3.13.** Kalıba macun çekilmesi

Kalıpta reçinenin uygun giriş ve çıkış yerleri belirlendikten sonra hazırlanan spiral borular kalıba tutturulmuştur. Boruların konumunun sabit kalması için tutturma sırasında kağıt banttan yararlanılmıştır (Şekil 3.14).

Burada dikkat edilen bir husus havanın çekildiği yerde çekişi kolaylaştırmak için havalandırma kumaşı (breather) kullanılmasıdır. Bu sayede reçinenin çekildiği yerin hava akışı kolaylaşmış ve reçine, giriş bölgesinden çıkış bölgesine daha rahat hareket etmiştir. Ayrıca bu bölgedeki havalandırma kumaşı, çıkış hattına ulaşan reçinenin doğrudan vanaya ilerlemesi yerine henüz reçine almamış bölgelerin ıslanmasını sağlayacak şekilde reçineyi tutmayı da sağlamıştır.



**Şekil 3.14.** Spiral hortumların yerleşimi

Daha öncede bahsedildiği gibi fiber oryantasyonu kompozitin mukavemet özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Rastgele dizilim ayrı kalıplardan çıkan numunelerin farklı mekanik özellikler göstermesine neden olacağı için bu çalışmada simetrik bir dizilim seçilmiştir ve tüm numuneler bu dizilimle üretilerek numuneler bu parametreden arındırılmıştır. Elyaf açılarına dikkat edilerek ilk dört katmanlı kumaş Şekil 3.15 deki gibi kalıba yerleştirilmiştir.



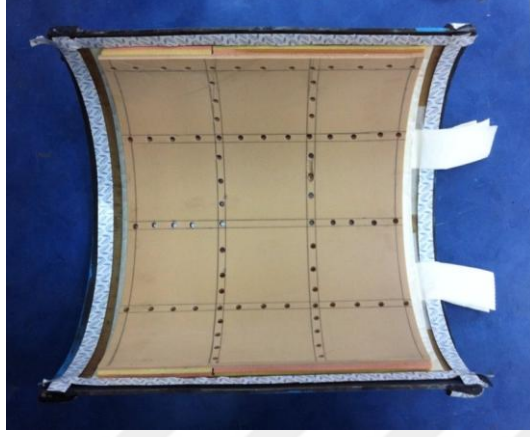
**Şekil 3.15.** Kumaşın kalıba yerleştirilmesi

Üst kabuk/köpük arasında delaminasyon istenen numuneler için daha önce hazırlanan dairesel kesitli teflon filmler her bir numunenin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.16).



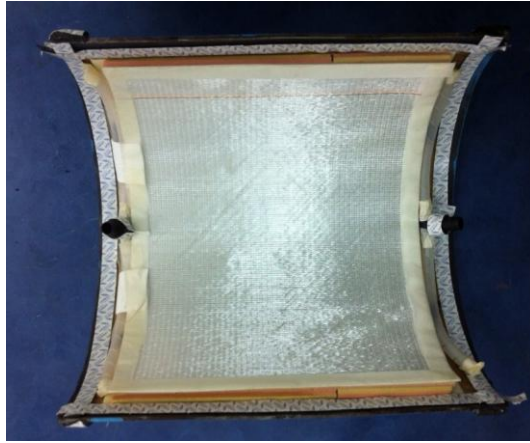
**Şekil 3.16.** Delaminasyonun yerleştirilmesi

Eğri form verilmiş köpük malzeme kalıptaki kumaş üzerine hassas bir şekilde yerleştirilmiştir (şekil 3.17).



**şekil 3.17.** Köpüğün kalıba yerleştirilmesi

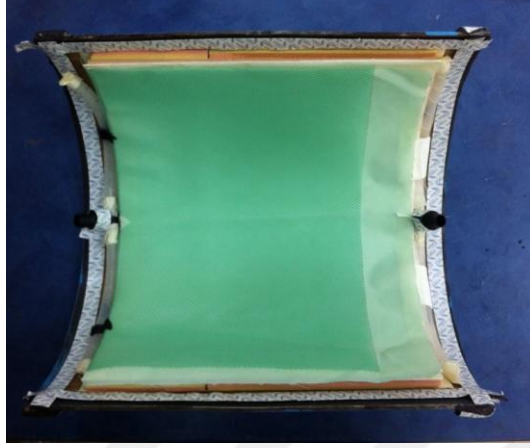
Köpük zerine yine açılarına dikkat ederek alt kabuğn kumaşı yerleştirilmiştir ( şekil 3.18).



**şekil 3.18.** st kumaşın kalıba yerleştirilmesi

Numunenin retim sonrasında vakum torbasından ayrılabilmesi için uygun boyutlarda kesilen soyma kumaşı en son yerleştirilen kumaşın üstüne serilmiştir. Ardından soyma kumaşının üstüne reçinenin ilerlemesini hızlandıran ve reçineyi

düzenli bir şekilde dağıtan dağıtıcı file, reçinenin verileceği tarafa yakın olacak şekilde Şekil 3.19 daki gibi yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.19.** Soyma kumaşı ve dağıtıcı filenin kalıba yerleştirilmesi

Delaminasyonun alt kabuk/köpük arasında olması istenen numuneler için alt kumaş ve köpük olduğu gibi yerleştirilmiştir. En üste serilen kumaşın köpüğe temas edecek yüzeyine teflon filmler yapıştırılmış ve diğer tüm işlem basamakları aynı sırayla uygulanmıştır.

Yerleştirilen tüm malzemeler vakum torbası ile dış ortamdan izole edilerek gerekli vana ve hortum bağlantıları yapılmış sonrasında vakum torbası içindeki tüm hava basınç pompasıyla çekilmiştir (Şekil 3.20). Kalıpta oluşacak en ufak hava kaçağının üretimi olumsuz etkilemesinden ötürü 2 saat beklenmiş ve kalıp içindeki basıncın değişmediği gözlemlendikten sonra reçine verme işlemine geçilmiştir.

Hava kaçağı bulunmadığına emin olunan düzeneğe, %74,63'ü Araldite LY 1564 epoksi, % 25,37'si Aradur 3486 sertleştirici olan reçine verilmiş ve ortam koşullarında kürleşmeye bırakılmıştır.



**Şekil 3.20.** Vakum ortamına alınmış kalıp

Çalışmada eğriselliğin etkisinin ortaya konulabilmesi için aynı malzemeler ve aynı yöntem kullanılarak düz plakalar da üretilmiştir. Ancak eğrisel formun verilebilmesi için köpüklere uygulanan ön şekillendirme işlemi uygulanmamış ve kalıplar yerine düz tezgah kullanılmıştır. Düz tezgaha macun çekildikten sonra sırasıyla kumaş ve köpük yerleşimi yapılmıştır (Şekil 3.21-3.23).



**Şekil 3.21.** Düz plakaların üretiminde kumaş yerleşimi



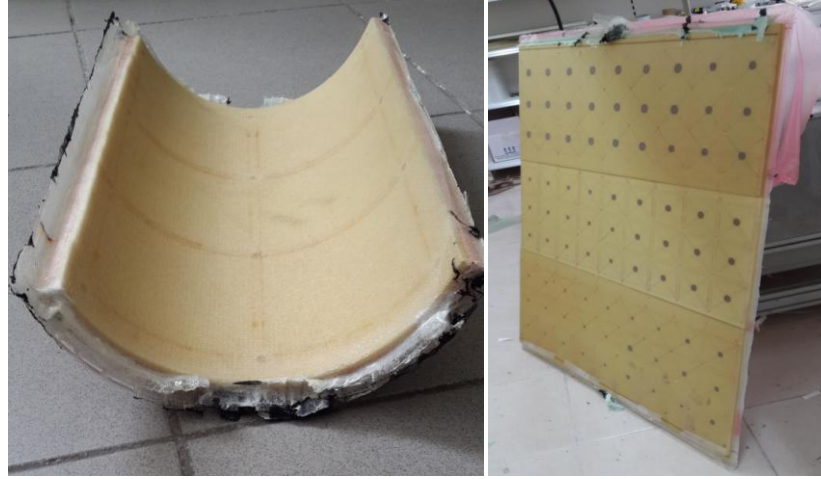
**Şekil 3.22.** Düz plakaların üretiminde köpük yerleşimi



**Şekil 3.23.** Düz plakaların üretimi

Çalışmada kullanılan epoksi oda koşullarında 24 saatte kurlenmektedir. 24 saat bekleyişin ardından kompozit panel, vakum torbası ve soyma kumaşı yırtılarak kalıptan ayrılmıştır (Şekil 3.24).

Üretimi tamamlanan tüm paneller mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla 80 °C de 8 saat süreyle fırında tutularak post-curing işlemine tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.24.** Kalıptan çıkarılan kompozit plakalar



**Şekil 3.25.** Su soğutmalı kesme tezgâhı

Post-curing işleminden geçirilen büyük plakalar daha önceden belirlenen sınırlardan, 100x100 mm boyutlarında kesilerek deney numuneleri elde edilmiştir (Şekil 3.26). Kesme işleminde kullanılan Rubi Diamant DS-300 1300 sulu kesme tezgâhı Şekil 3.25 de görülmektedir.



Şekil 3.26. Darbe ve titreşim testleri için hazırlanmış numuneler

### 3.3. Deneysel Çalışmalar

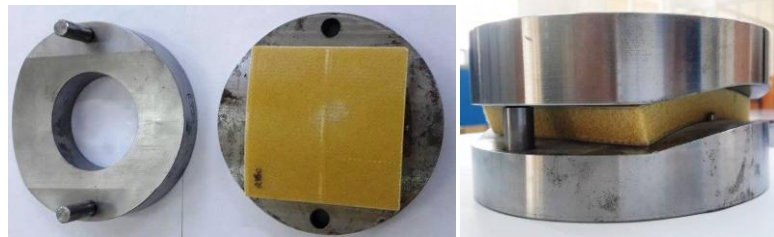
#### 3.3.1. Darbe Deneyinin Yapılışı

Darbe deneylerinde Şekil 3.27 de görülen CEAST 9350 (Fractovis Plus) darbe test cihazı kullanılmıştır. Çeşitli sıcaklıklarda düşük ve yüksek hızlı darbelerin uygulanabilmesi amacıyla tasarlanmış bu cihazın vurucu ucu yarı küresel yapıda olup 12,7 mm çapındadır. Vurucu, maksimum yük kapasitesi 22,4 kN olan bir yük dönüştürücüsüne bağlıdır. Toplam vurucu kütlesi kuvvet dönüştürücü ve başlığıyla birlikte 5,02 kg'dır.



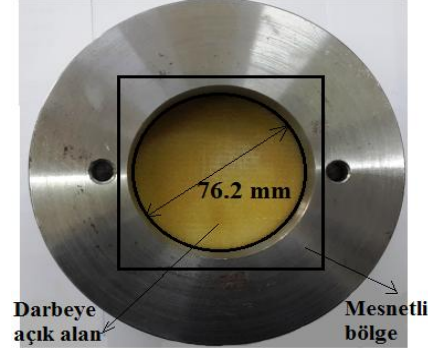
**Şekil 3.27.** Darbe test cihazı

Darbe deneyi yapılacak numunelerden düz formda olanlar cihazın kendi tutma aparatları arasına, eğri numuneler ise her eğrilik için özel olarak yaptırılan tutucular arasına Şekil 3.28 deki gibi yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.28.** Numunenin eğri tutucular arasına yerleştirilmesi

Şekil 3.28 de verilen iki parçalı tutucu arasına yerleştirilen numunenin üst kapağı kapandığında Şekil 3.29 da görüldüğü gibi 76,2 mm çaplı dairesel alan dışında kenarlarından ankastre olarak mesnetlenmiştir.



Şekil 3.29. Numunenin sınır şartları

Eğrisel tutucunun darbe cihazına yerleştirilmiş görüntüsü Şekil 3.30 da verilmiştir. Tutucuların cihaza bağlanmasının ardından her numuneye 5, 30, 50 ve 80 J enerji seviyelerinde darbe uygulanmıştır. Cihazın vurucu ucuna yerleştirilen piezoelektrik kuvvet sensörünün yüksek frekansta çalışması yardımıyla çok kısa zaman aralıkları için veri toplamak mümkün olmuştur. Zaman aralıklarında piezoelektrik kuvvet sensörüyle alınan kuvvet değerleri elektriksel sinyaller şeklinde cihazın yazılımına aktarılmıştır. Cihazın özel yazılımı sayesinde uygun test prosedürü gerçekleştirilmiş ve gerek sayısal gerekse grafiksel veriler elde edilmiştir. Böylece, kuvvet-zaman, kuvvet-çökme ve absorbe edilen enerji gibi verilere ulaşılmıştır. Deneylerin güvenilirliğini arttırmak amacıyla her test 3 kez tekrarlanmıştır.



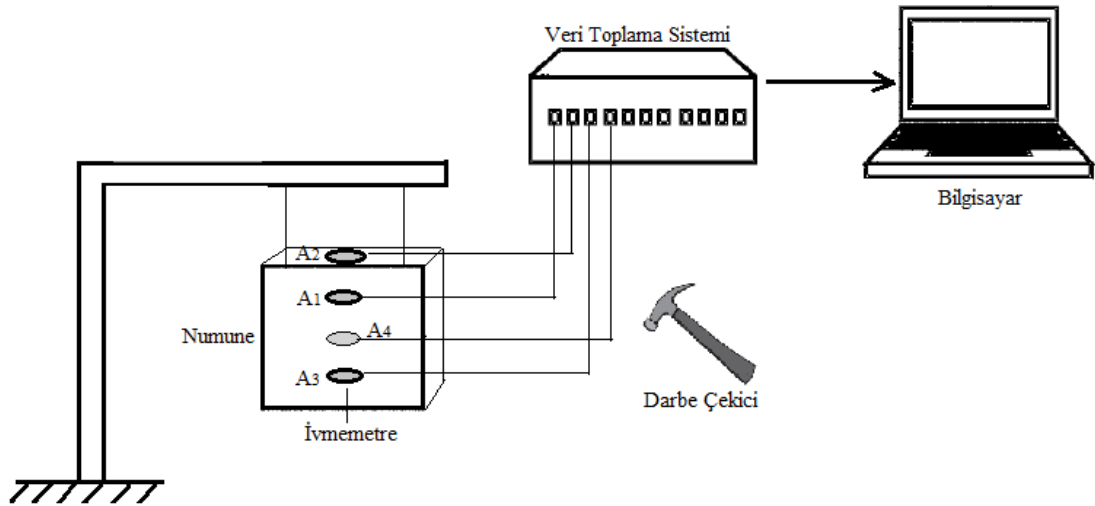
Şekil 3.30. Eğri tutucunun ve numunenin test cihazındaki yerleşimi

### 3.3.2. Titreşim Deneyinin Yapılışı

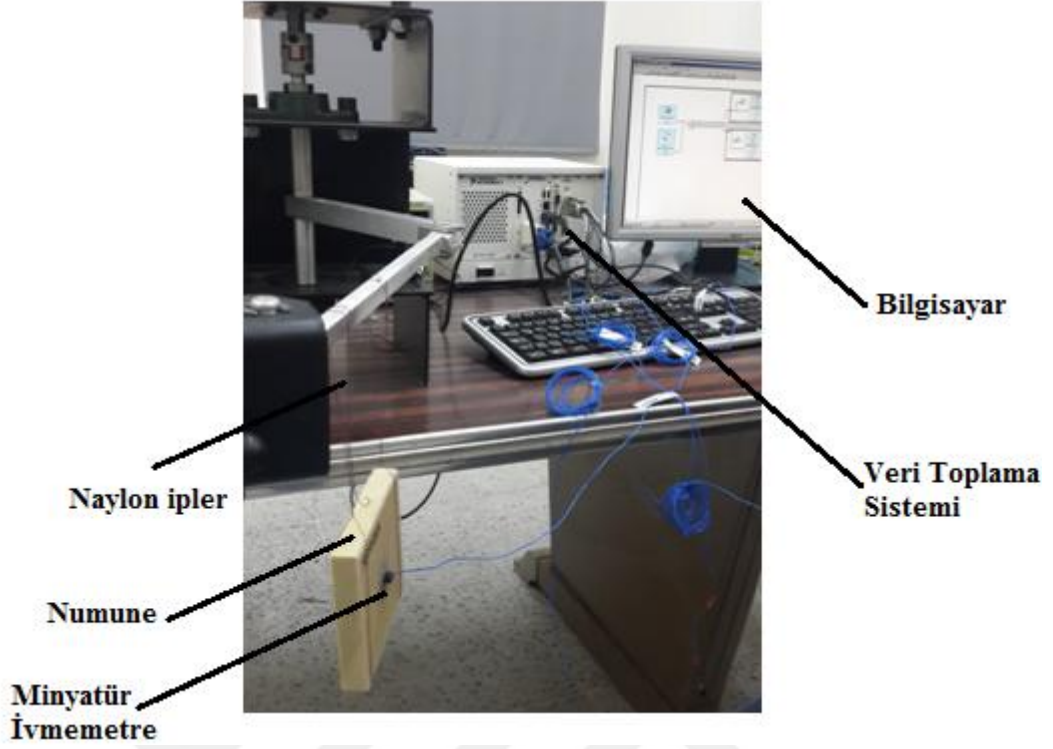
Tez kapsamında üretimi yapılmış sandviç panellere ait doğal frekansların bulunması amacıyla, numunelere ani darbe verilerek serbest titreşim hareketi yapması sağlanmıştır. Çünkü doğal frekans, serbest titreşimlerin frekansı olduğu için dış zorlama yoktur ve titreşim hareketinin frekansı numunelerin doğal frekansına eşittir.

Numunelerin titreşim ölçümlerinde ivmemetreler tercih edilmiştir. İvmetre kütlesinin büyük olması doğal frekansı düşüreceği için titreşim testinde 0.8 gr kütleli, yüksek hassasiyetli PCB-352A24 minyatür ivmemetreler kullanılmıştır.

Numunelerin serbest titreşim cevabının ölçülmesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.31 de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi bu düzenekte ivmemetrelerin yerleştirildiği numunenin bir darbe çekiciyle titreştirildiği, veri toplama sisteminde verilerin toplandığı ve bu veriler doğrultusunda transfer fonksiyonunun hesaplandığı bilgisayar (yazılım) birimleri bulunmaktadır.

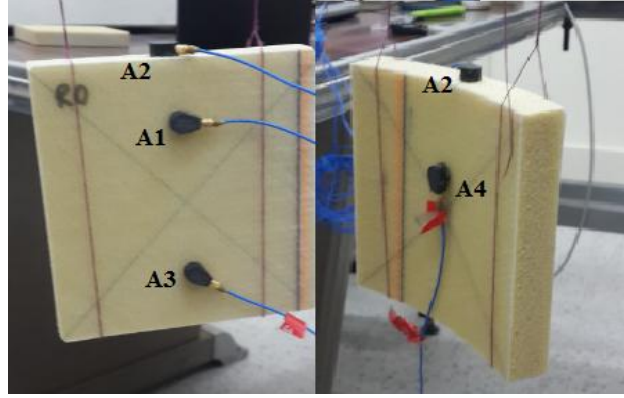


Şekil 3.31. Titreşim deney düzeneği (temsili)

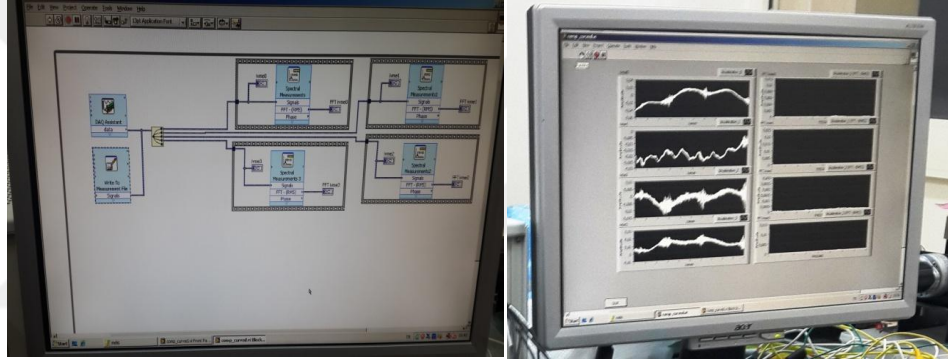


**Şekil 3.32.** Titreşim test numunelerinin asıldığı düzenek

Titreşim testi numuneleri ince ve hafif iki ip yardımıyla Şekil 3.32 de gösterildiği gibi asılmıştır. Asılan numunelerin Şekil 3.33 de gösterilen noktalarına (her numunede aynı konum) balmumu yardımıyla ivmemetreler yerleştirilmiştir. Daha sonra panel düzleminde yer alan belirli bir noktadan darbe çekiciyle dış kuvvet uygulanmıştır. Her ivmemetreden ayrı ayrı kanallar şeklinde alınan sinyaller bilgisayar destekli veri toplama sistemine kaydedilmiş (Şekil 3.34.a) ve anlık olarak monitörden izlenmiştir (Şekil 3.34.b). İvmemetrelerin sandviç numunelerin alt, üst ve yan yüzeyine balmumu ile tutturulması numunelerin farklı doğrultulardaki titreşim verilerine ulaşmayı mümkün kılmıştır. Böylece mod tiplerinin simetrik olup olmadığı sonucuna da ulaşılmıştır.



**Şekil 3.33.** Numunenin ip ile asılmış gösterimi ve ivmemetrelerin numaralandırılması



**Şekil 3.34.** a) Bilgisayarda titreşim verisi kayıt ara yüzü, b) Titreşimin anlık görüntülenmesi

Frekans aralığı belirlenirken yapının titreşim yapabilme kabiliyeti (esnekliği) önemlidir. Eğer yapı uzun süre titreşim yapıyorsa frekans aralığı küçük (0-50 Hz gibi), kısa süre titreşim yapıyorsa frekans aralığı büyük (0-1600 Hz gibi) anlamına gelmektedir. Yapı türüne bağlı olmakla birlikte, genellikle 0-400 Hz frekans aralığı yapıların ilk 3 ila 10 frekanslarını bu yöntemle elde etmek kolaydır, ancak sandviç kompozit panellerin yapısal ve geometrik olarak oldukça rijit olmalarının sonucunda doğal frekans değerleri yüksektir. Bu nedenle üst modlara çıkılamamıştır.

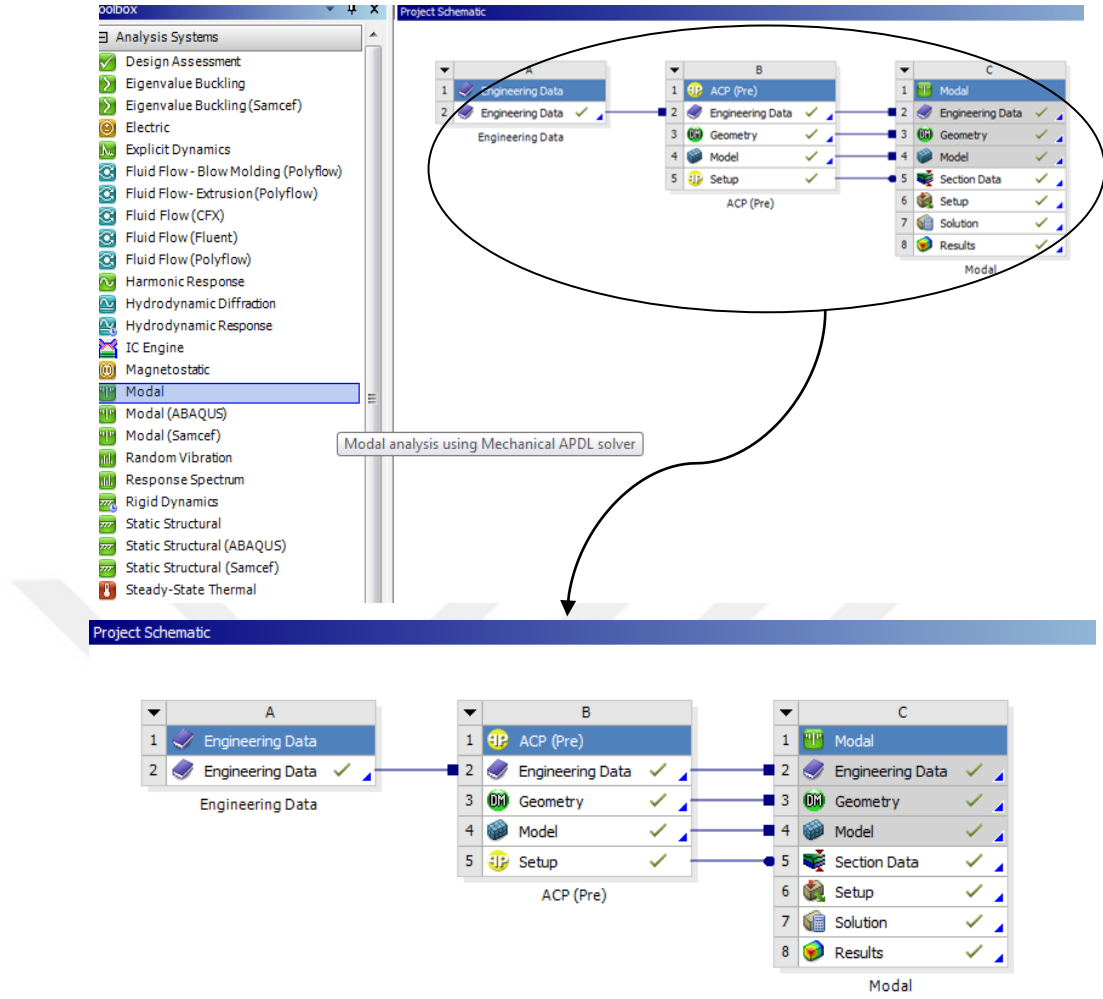
### 3.4. Sonlu Elemanlar Analizi

Bu bölümde titreşim analizi yapılan sandviç panellerin sonlu elemanlar analizinin yapılmasına yer verilmiştir. Analizler ANSYS Workbench 16.0 sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys Workbench yazılımı titreşim, mekanik, akışkanlar mekaniği gibi birçok alanda, mühendisler tasarladıkları yapıyı bilgisayar ortamında test edebilme imkânını sağlar. Böylelikle mühendislik problemlerinin nümerik çözümlenmesi yapılabilir, yapıların çalışma şartlarındaki davranışı simüle edilerek zayıf noktaları belirlenebilir ve prototip üretmeden iyileştirme çalışmalarına geçilebilir.

Sandviç kompozitlerin modal analizinin yapılmasında izlenen işlem basamakları aşağıda sırasıyla verilmiştir:

- **Analiz tipinin belirlenmesi:**

Sandviç kompozitlerin doğal frekans ve mod şekillerini bulmak için analiz türü olarak 'modal analiz' seçilmiştir. Şekil 3.35 deki gibi proje şeması hazırlanmış ve tabakalı kompozit malzeme özelliklerini tanımlamak için ANSYS ACP (Ansys Composite Prep Post) eklentisi kullanılmıştır.



Şekil 3.35. Ansys Workbench proje şemasının hazırlanması

- **Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması:**

Engineering data sekmesinden, kullanılacak malzemeler Şekil 3.36. daki gibi seçilir. Kullanılan PVC köpük C70.55 izotropik malzeme olarak tanımlanmış ve Şekil 3.37 de görüldüğü gibi malzeme özellikleri birimlerine dikkat edilerek (elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk) programa girilmiştir. Aynı işlem ortotropik cam elyaf/epoksi kabuk malzemesi için Şekil 3.38 deki gibi tekrarlanmıştır.

Outline of Schematic A2, B2, C2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	C70.55	<input type="checkbox"/>	C:\Users\Volka	
4	Epoxy_EGlass_UD	<input type="checkbox"/>	C:\Users\Volka	
*	<a href="#">Click here to add a new material</a>			

Şekil 3.36. Ansys Workbench de malzemelerin seçilmesi

Properties of Outline Row 3: C70.55				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	60	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
4	Derive from	Shear M...		
5	Young's Modulus	4,5E+07	Pa	<input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,022727		<input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	1,5714E+07	Pa	<input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	2,2E+07	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Field Variables			
10	Temperature	Yes		

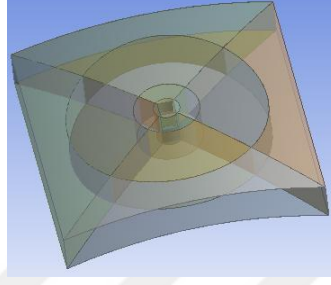
Şekil 3.37. Ansys Workbench de köpük malzeme özelliklerinin girilmesi

Properties of Outline Row 4: Epoxy_EGlass_UD				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1900	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
3	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
4	Young's Modulus X direction	3,1E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
5	Young's Modulus Y direction	1,2E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
6	Young's Modulus Z direction	1,2E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio XY	0,3		<input type="checkbox"/>
8	Poisson's Ratio YZ	0,3		<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio XZ	0,3		<input type="checkbox"/>
10	Shear Modulus XY	3,2E+09	Pa	<input type="checkbox"/>

Şekil 3.38. Ansys Workbench de kabuk malzeme özelliklerinin girilmesi

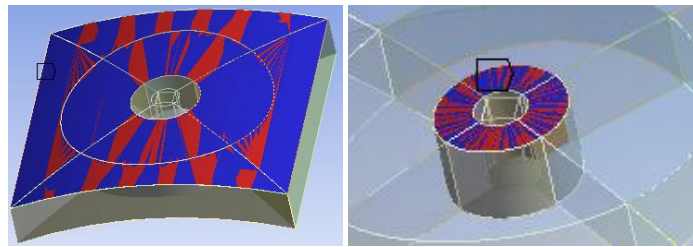
- **Modelin oluşturulması:**

Parçanın geometrisi, design modeler da Şekil 3.39 deki gibi çizilmiştir. Üst ve alt yüzeyler seçilerek, açılı lamina tanımlamak üzere ‘Surface from faces’ özelliği ile birer adet yüzey oluşturulmuştur.



**Şekil 3.39.** Ansys Workbench de modelin görüntüsü

Delaminasyon olmayan numune modeli için ortada kalan katı parçanın yüzeyleri temas halinde (contact) olarak bağlanmıştır (Şekil 3.40). Delaminasyon bulunan numunelerde ise, delaminasyon alanının dışında kalan alanlar katı parçanın yüzeyiyle contact olarak bağlanır. Böylece delaminasyon istenen bölgede kabuk/köpük arasında ayrılma modellenmiş olur.

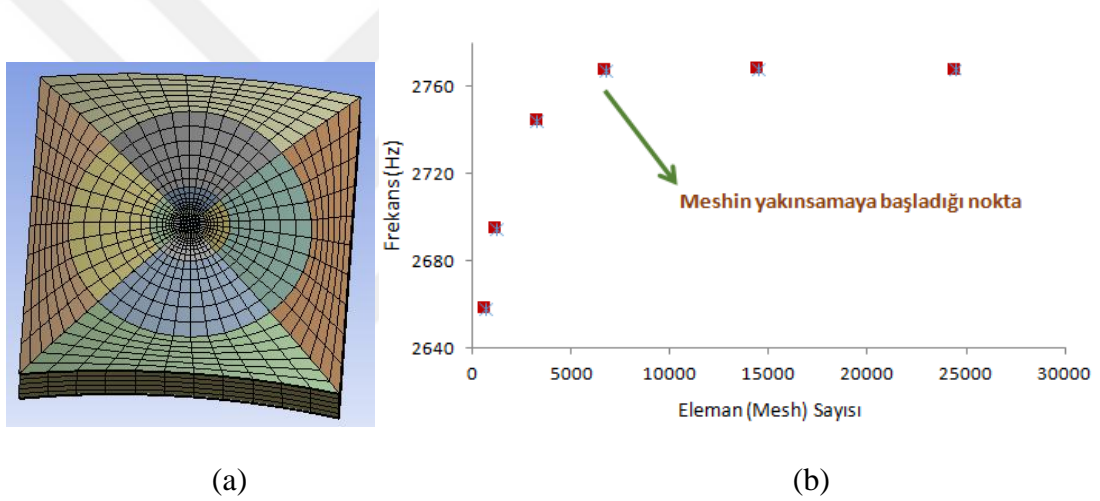


**Şekil 3.40.** Ansys Workbench de elemanların birleştirilmesi

- **Elemanlara ayırma (mesh) ve eleman seti oluşturma işlemi:**

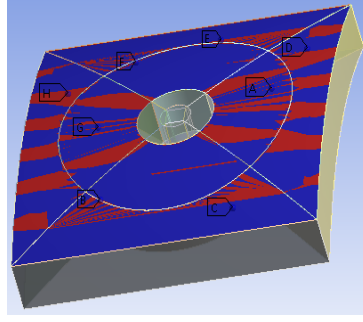
Modelde panelin tek parça çizilmemesinin nedeni, parçanın orta kısımlarını istenilen boyutta elemanlara bölerek hassas bir ağ yapısı oluşturmaktır. Modelin

elemanlara bölünerek ağ yapısı oluşturma işlemi (meshing), yapının belirli sayıdaki sonlu elemanlara bölünmesidir. Sonlu elemanlar çözümünde oluşturulan düzgün ağ yapısı (mapped mesh), gelişigüzel oluşturulan ağ yapısından (free mesh) daha çok tercih edilir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar daha hassas olduğu için modelde eleman boyutu girilerek düzgün ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapının küçük boyutta elemanlara bölünmesi daha iyi sonuçlar verirken analiz süresini uzatır. Bu nedenle tüm yapıyı çok sayıda (küçük boyutta) elemanlara bölmek yerine sadece delaminasyon bölgesi, küçük boyutta (fazla sayıda) elemanlara bölünmüştür (Şekil 3.41.a). Optimum mesh (eleman) sayısı Şekil 3.41.b de gösterildiği gibi mesh grafiğinin yakınsamasıyla belirlenmiştir. Oluşturulan modellerde 6680 elemanın kullanıldığı mesh işlemi gerçekleştirilmiştir.

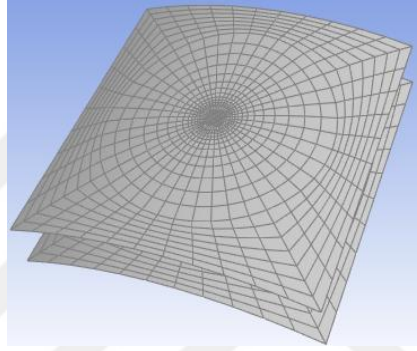


**Şekil 3.41. (a)** Ansys Workbench de yapının elemanlara bölünmesi **(b)** Optimum mesh sayısının belirlenmesi

Teması belirlenen yüzeylerde “Mesh edit” sekmesi kullanılarak, Şekil 3.42 daki gibi kabuk ve köpük arasındaki çakışan düğümlerin birleşmesi sağlanmıştır ve delaminasyon içermeyen modelde üst üste gelen iki düğümden biri kaldırılmıştır (Şekil 3.43). Delaminasyonlu modellerde ise delaminasyon alanını köpükten ayrı tutabilmek için delaminasyon alanına ait düğümlerden hiç biri kaldırılmamıştır.

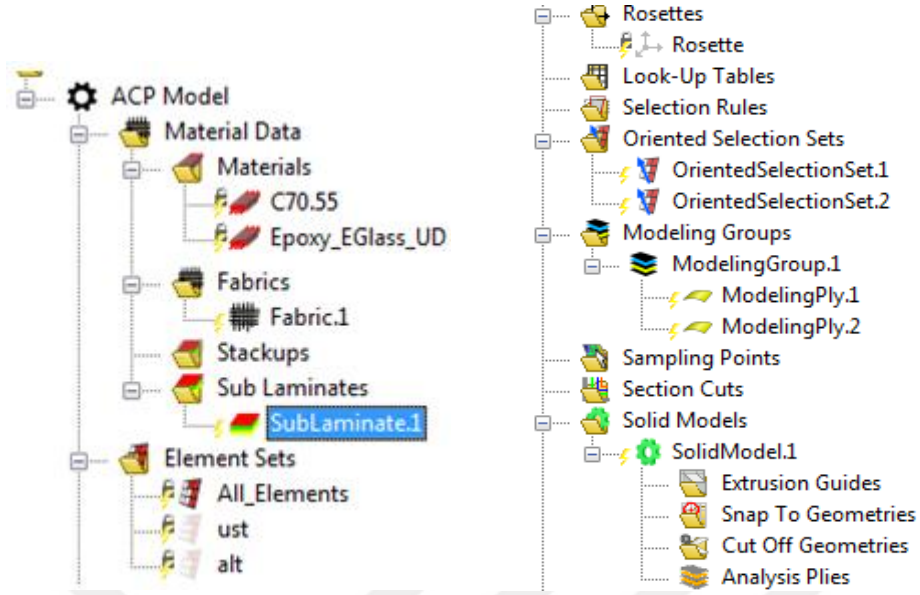


**Şekil 3.42.** Ansys Workbench de çakışan düğümlerin birleştirilmesi

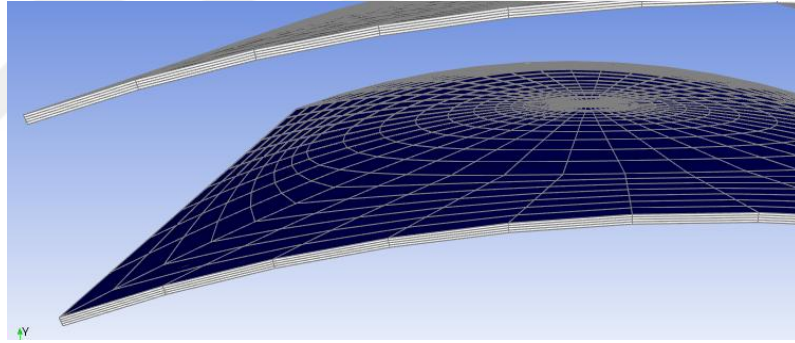


**Şekil 3.43.** Ansys Workbench de modelin görüntüsü

Model sayfası kapatılarak, Şekil 3.44 de görüldüğü gibi ACP eklentisine giriş yapılmıştır. ACP eklentisinde Şekil 3.44 de solda görüldüğü gibi materyallerle tanımlı önce bir kumaş, ardından tabaka dizisi (sublamine), sonrasında sağda görüldüğü gibi alt ve üst yüzeyler için ayrı ayrı yönlendirilmiş elemanlar seti (oriented selection set) oluşturulmuştur. Bu yönlendirilmiş eleman seti modeling groups içinden alt ve üst yüzeyler için ayarlanarak, tabakaların modelleri hazırlanmıştır. Bir katı model oluşturularak, Şekil 3.45 de görülebileceği gibi oluşan tabakaların doğruluğu kontrol edilmiştir.

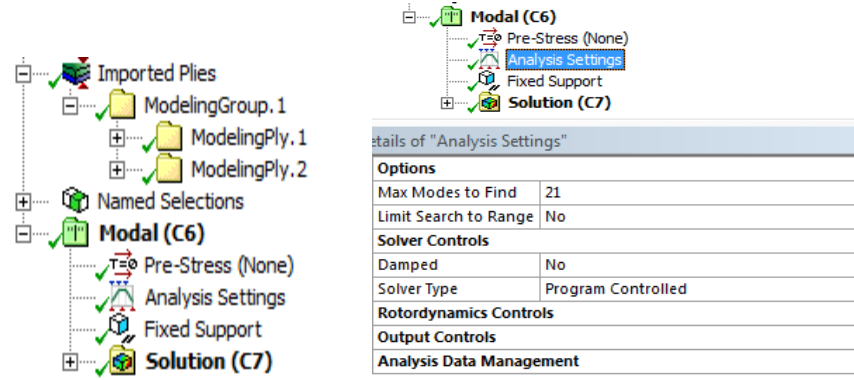


Şekil 3.44. Ansys Workbench de alt tabakaların oluşturulması



Şekil 3.45. Ansys Workbench de tabakaların kontrol edilmesi

Analiz için modal seçeneğinin altındaki veri kısmı (section data) bölmesine gelinip, Şekil 3.46 da solda görüldüğü gibi tabakaların verileri model içerisine yüklenmiştir. Şekil 3.46 da sağda gösterilen analiz seçeneklerinden (analysis settings) 21 mod bulunması istenmiştir.



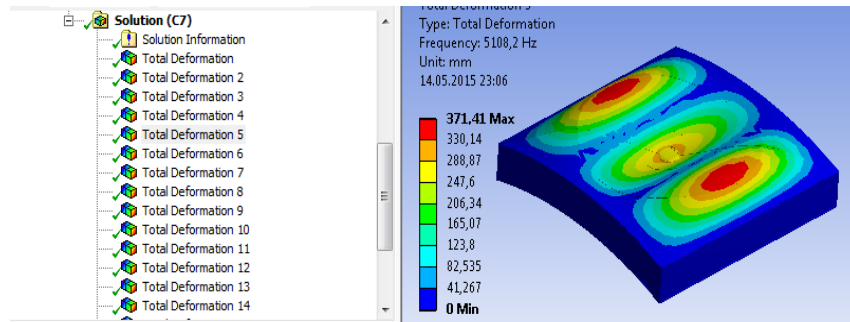
Şekil 3.46. Ansys Workbench de analiz seçeneklerinin belirlenmesi

- **Sınır şartlarının tanımlanması:**

Ankastre mesnetli (fixed support) katı modelin modal analizinin yapılabilmesi için modeli çevreleyen 4 kenar seçilerek bu kenarların x, y ve z koordinatlarındaki hareketi ve üç eksende dönmeleri engellenmiştir. Yapıdaki kabuk-köpük arasındaki düğüm noktaları birleştirildiği için kabuklara mesnet uygulanmasına gerek kalmamıştır. Basit mesnetli analiz için sandviç panellerin dört kenarına basit mesnet sınır şartları tanımlanmıştır.

- **Çözüm:**

Çözüm için 'solution' kısmından solve seçilerek çözümlenmiştir. Ardından, tüm sonuçların gösterilmesi istenmiş ve istenen modlara ait toplam deformasyon ve frekans değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. Ansys Workbench de çözümün yapılması

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Darbe Testi Sonuçları

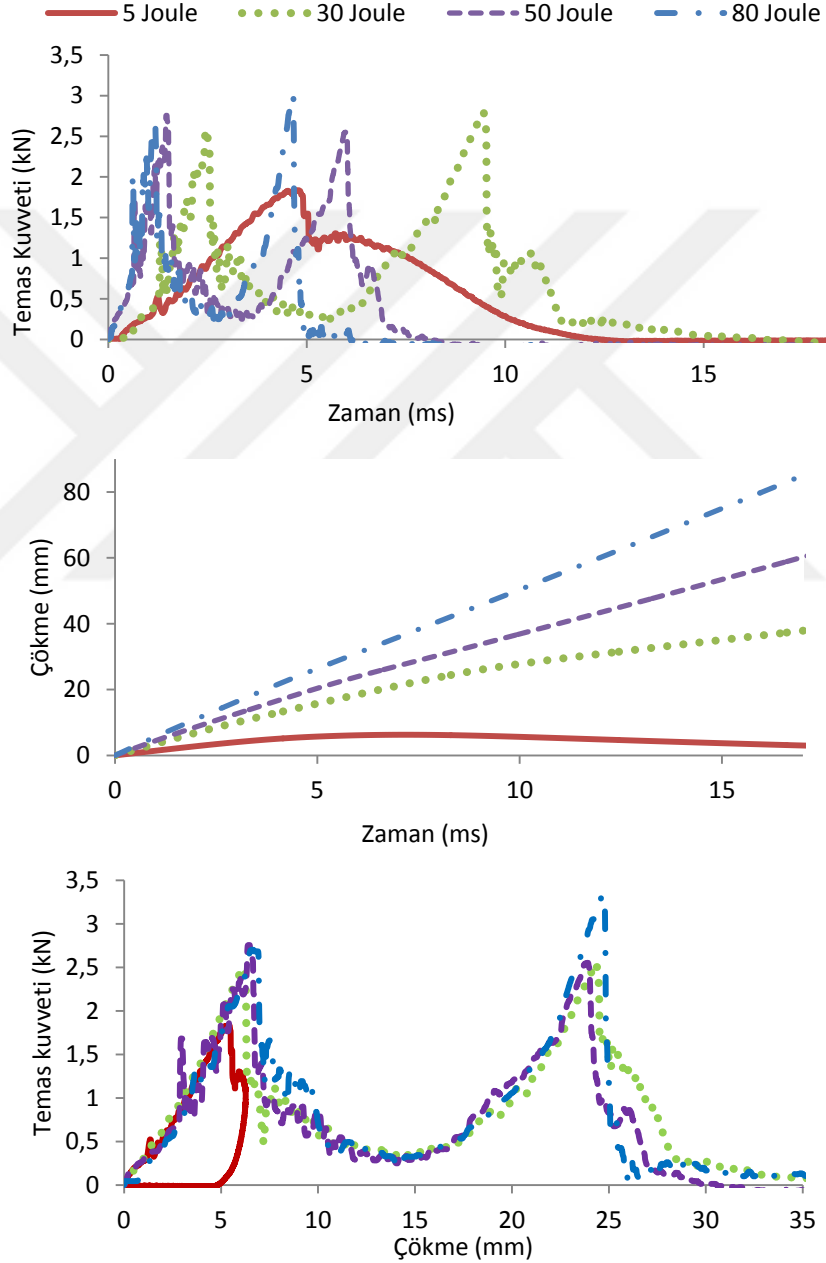
Bu çalışmada, sandviç yapıdaki alt kabuk/köpük ve üst kabuk/köpük arasında iki farklı boyutta yapışmamış dairesel bölgenin yer almasının, sandviç yapı eğriliğinin ve darbe enerji seviyelerindeki değişimin sandviç panellerin darbe davranışlarını nasıl etkileyeceği ortaya konmuştur. Bunun için darbe testlerinden bulunan kuvvet, yer değiştirme ve zamana ilişkin veriler analiz edilmiş, darbe sonrası görülen hasar modları incelenmiştir.

#### 4.1.1. Düz ve Delaminasyon İçermeyen Sandviç Panellerin Darbe Cevabı

Temas kuvveti-çökme grafiklerinin anlaşılabilirliğini arttırmak amacıyla, öncelikle düz ve delaminasyon içermeyen sandviç panellere ait temas kuvveti-zaman, orta nokta çökmesi-zaman ve temas kuvveti-çökme eğrileri açıklanmıştır. Şekil 4.1. de bu eğriler verilmiştir. Verilen eğriler 5, 30, 50 ve 80 J lük darbe yükleri içindir. Benzer eğrileri, farklı panel eğriliklerine ve delaminasyonlu bölgelere sahip numuneler için de görmek mümkündür.

Şekil 4.1a da verilmiş temas kuvveti-zaman eğrileri, vurucunun darbe uygulandığı andan itibaren numuneyle olan temasının zamana bağlı değişimini gösterir. Eğrilerden görüldüğü gibi, artan enerji seviyesiyle, kontak kuvvetleri artmakta ve vurucunun numuneyle temasta kaldığı süre kısalmaktadır. Uygulanan en düşük enerji seviyesi olan 5 J darbe enerjisine ait eğriye bakıldığında eğrinin ilk kısmında (yükleme kısmı) temas kuvvetinin zamanla nonlineer bir şekilde arttığı, maksimum değerine ulaşıldıktan sonraki ikinci kısmında (yüklemenin boşalması kısmı) ise ilk kısmına oranla daha az dalgalanma göstererek sifira ulaştığı görülmektedir. İkinci kısımda görülen kuvvetteki ani azalış, üst kabukta ortaya çıkan hasara işaret etmektedir. Artan enerji seviyesiyle temas kuvveti-zaman eğrilerinde iki pik açığa çıkmaktadır. İlk pik vurucunun yalnızca üst kabukla temasta olduğunu, ikinci pik ise vurucunun üst kabuğu delip alt kabuğa ulaştığını gösterir. Buradan 30

50 ve 80 J darbe uygulanması durumunda numunenin hem üst hem de alt yüzeyinde hasar oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, 80 J darbe enerjisinde 2. pike ulaşıldıktan sonra görülen kuvvetteki azalış çok keskindir. Oysaki 30 ve 50 J de, alt kabuğu oluşturan tabakalar arasında ortaya çıkan hasara bağlı olarak kuvvette iniş çıkışlar görülmektedir.



**Şekil 4.1.** Düz ve delaminasyon içermeyen numunelerde temas kuvveti ve çökmenin zamana bağlı değişimi

Şekil 4.1b de, hasar sürecine dair önemli bilgileri içeren çökme-zaman eğrileri görülmektedir. Bu eğriler, vurucu ve panel arasındaki temas süresince darbenin geldiği panel üst yüzeyinde görülen çökmeyi verir. Eğrilerde temas kuvveti-zaman eğrilerinde karşılaşılan ani iniş çıkışlar yoktur. Bu durum, vurucunun kinetik enerjisinin verimli bir şekilde panel deformasyonuna harcandığını gösterir. Çökme-zaman eğrilerindeki çökme değerinin bir maksimuma ulaştıktan sonra azalması, vurucunun geri sektiğini, yaklaşık aynı kalması, vurucunun numuneye nüfuz etmeye başladığını ve sürekli artması ise vurucunun numuneyi delip geçtiğini gösterir. Buna göre 5J enerjide vurucunun numunenin üst yüzeyinden geri sektiği, 30 J de vurucunun numuneye nüfuz ettiği, 50 ve 80 J lerde ise numunenin tamamen delindiği sonucu çıkmaktadır. Vurucunun geri sekmesi, nüfuz etmesi ve delip geçmesi halleri darbe deneylerinde karşılaşılan üç tipik durumdur. Bu durumların temas kuvveti-çökme eğrilerinin incelenmesi suretiyle de takibi mümkündür.

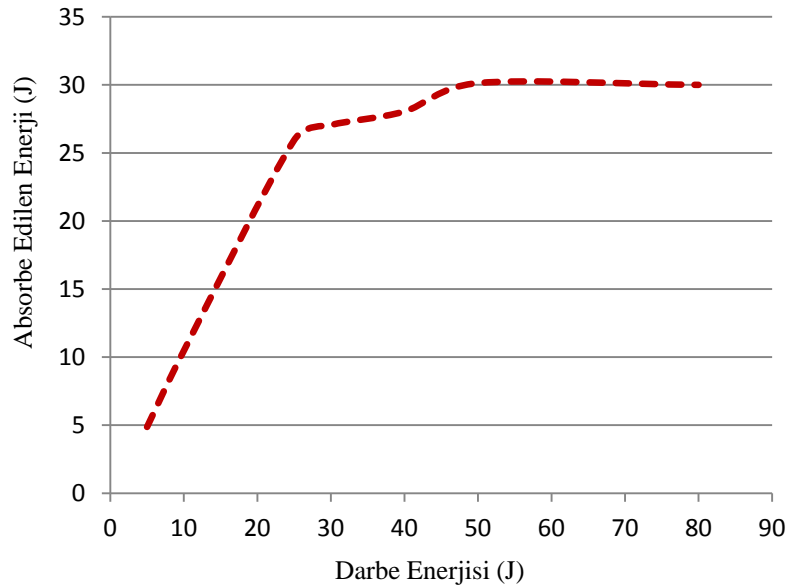
Örneğin, Şekil 4.1c deki temas kuvveti-çökme eğrisinde 5 J darbe enerjisi altında numunede eğri kapalı bir şekilde bitmiştir. 5 J eğrisinin kapanış biçiminden vurucunun numunenin üst yüzeyinden sektiği bilgisine ulaşılabılır. Sıçrama hareketi, eğrinin ikinci kısmındaki geri dönüşten de anlaşılabilir. Eğrinin ikinci kısmındaki artan çökme miktarından da üst kabuğun hasara uğradığı görülmektedir. 30 J eğrisinde delinme öncesi 2,5 kN olan maksimum temas kuvveti, 80 J darbe enerjisi durumunda 3,5 kN a çıkmıştır. Bu durum enerji seviyesindeki artışın numunenin vurucuya karşı gösterdiği direnci de arttırmasıyla açıklanır.

Darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji, kompozit yapıların darbe hasarlarının ölçülmesinde kullanılan temel iki ana unsurdur. Darbe enerjisi, darbeden hemen önce vurucunun sahip olduğu kinetik enerjidir. Darbeden sonra, darbe enerjisinin bir kısmı darbeye maruz cisim tarafından absorbe edilirken, bir kısmı vurucuda kinetik enerji olarak kalır.

Temas kuvveti- zaman ve çökme-zaman grafikleri aynı zaman diliminden elde edildiği için ortak bir paydada toplanabilir. Darbe cevabının araştırıldığı çalışmalarda genellikle temas kuvveti-çökme eğrilerine bakılarak yorumlar yapılır.

Temas kuvveti-çökme eğrisi aynı zamanda panellerin absorbe ettiği enerjilerin hesabında kullanılır. Absorbe edilen enerji, temas kuvveti-çökme eğrisi altında kalan alandan bulunabilir. Bu çalışmada da numunelerin darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti-çökme grafikleri kullanılacaktır.

Şekil 4.2 de ise düz ve delaminasyon içermeyen numuneler için enerji profil eğrisi verilmiştir. Bu eğriler, uygulanan darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak nüfuziyet ve delinme sınırlarının belirlenmesine yardımcı olurlar. Burada eğrinin ilk kısmındaki lineer artış numunede delinmenin gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu bölgede numuneye uygulanan enerjinin numune tarafından tamamen absorbe edilmesi, numunede hasar oluşmadığını ortaya koymaktadır. Lineer artışın sonlanması ile vurucunun numuneye nüfuz etmeye başladığı, eğrinin sabitleşmeye başladığı noktada ise numunede delinmenin meydana geldiği söylenebilir. Eğrinin sabit devam etmeye başladığı enerji seviyesi, numunede delinmeyi meydana getirecek enerji seviyesidir. Bu seviyenin üstüne çıkılması, numunenin absorbe edebileceği enerji miktarını değiştirmez.



Şekil 4.2. Düz ve delaminasyon içermeyen panellerde enerji profil eğrisi

#### 4.1.2. Delaminasyon Varlığının ve Boyutunun Darbe Cevabına Etkisi

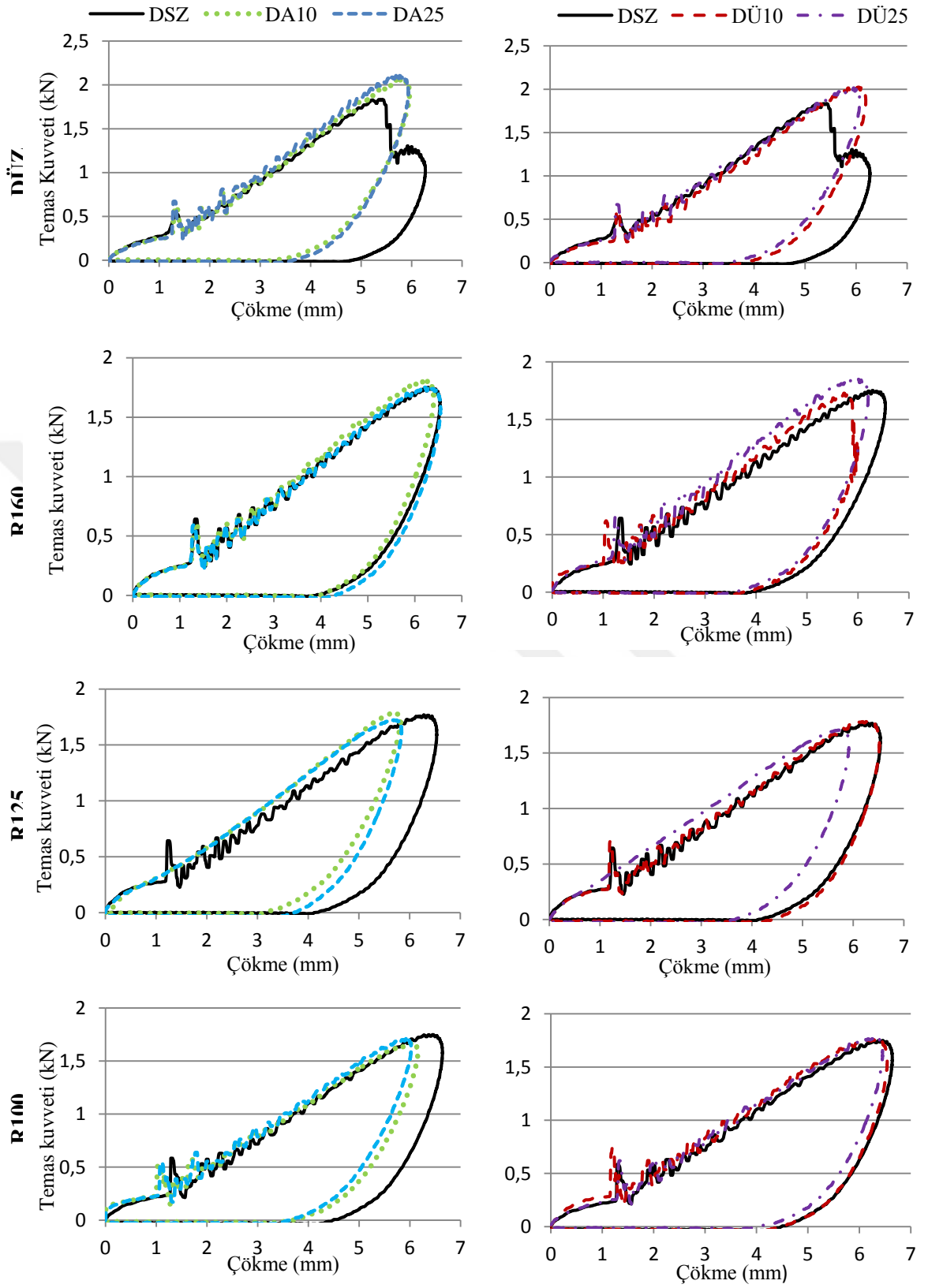
Delaminasyon varlığının ve boyutunun darbe davranışına etkisini görmek için panel üst kabuk/köpük arasında ve panel alt kabuk/köpük arasında 10 ve 25 mm çaplı delaminasyon içeren düz ve eğri numuneler incelenmiştir. Bu numunelere uygulanan 5J, 30J, 50J ve 80J darbe yüklerinin temas kuvveti-çökme eğrilerini nasıl değiştirdiği Şekil 4.3 - 4.6 da sunulmuştur.

5 J darbe enerjisine maruz panellere ait temas kuvveti-çökme eğrilerinde görüldüğü gibi vurucu, numunelerin üst yüzeyinden geri sekmiştir (Şekil 4.3). Bu durumda numunelerin hiçbirinde üst tabakada delinme olmamıştır. Düz numunelerin delaminasyon içermemesi ve iki farklı boyutta delaminasyon içermesi durumunda elde edilen temas kuvveti- çökme grafiklerine bakıldığında, delaminasyon çapındaki değişimin düz numunelerin darbe cevabında önemli değişikliğe neden olmadığı görülmektedir. Ancak düz numunelerdeki gerek üst kabuk/köpük gerekse alt kabuk/köpük arasında yer alan delaminasyonun temas kuvvetini ve temas kuvvetinin maksimum değerinde ortaya çıkan çökme miktarını arttırdığı ortadadır. Delaminasyonlu panellerdeki maksimum temas kuvveti 2 kN, çökme miktarı 6 mm iken, delaminasyonsuz panellerde görülen maksimum temas kuvveti 1.8 kN, çökme miktarı ise 5.2 mm dir. Delaminasyon içermeyen düz numunelerin kuvvet- çökme eğrilerinde görülen ani kuvvet düşüşü üst kabuklardaki hasarın göstergesidir. Eğri paneller için bulunan kuvvet-çökme eğrilerine bakıldığında panel eğriliği arttıkça delaminasyonlu ve delaminasyonsuz paneller için bulunan maksimum temas kuvveti çökme eğrileri arasında fark belirginleşmiştir. Ancak delaminasyon varlığının etkisi, alt kabuk/köpük arasında delaminasyon bulunan panellerde üst kabuk/köpük arasında delaminasyon bulunan panellere göre daha fazladır.

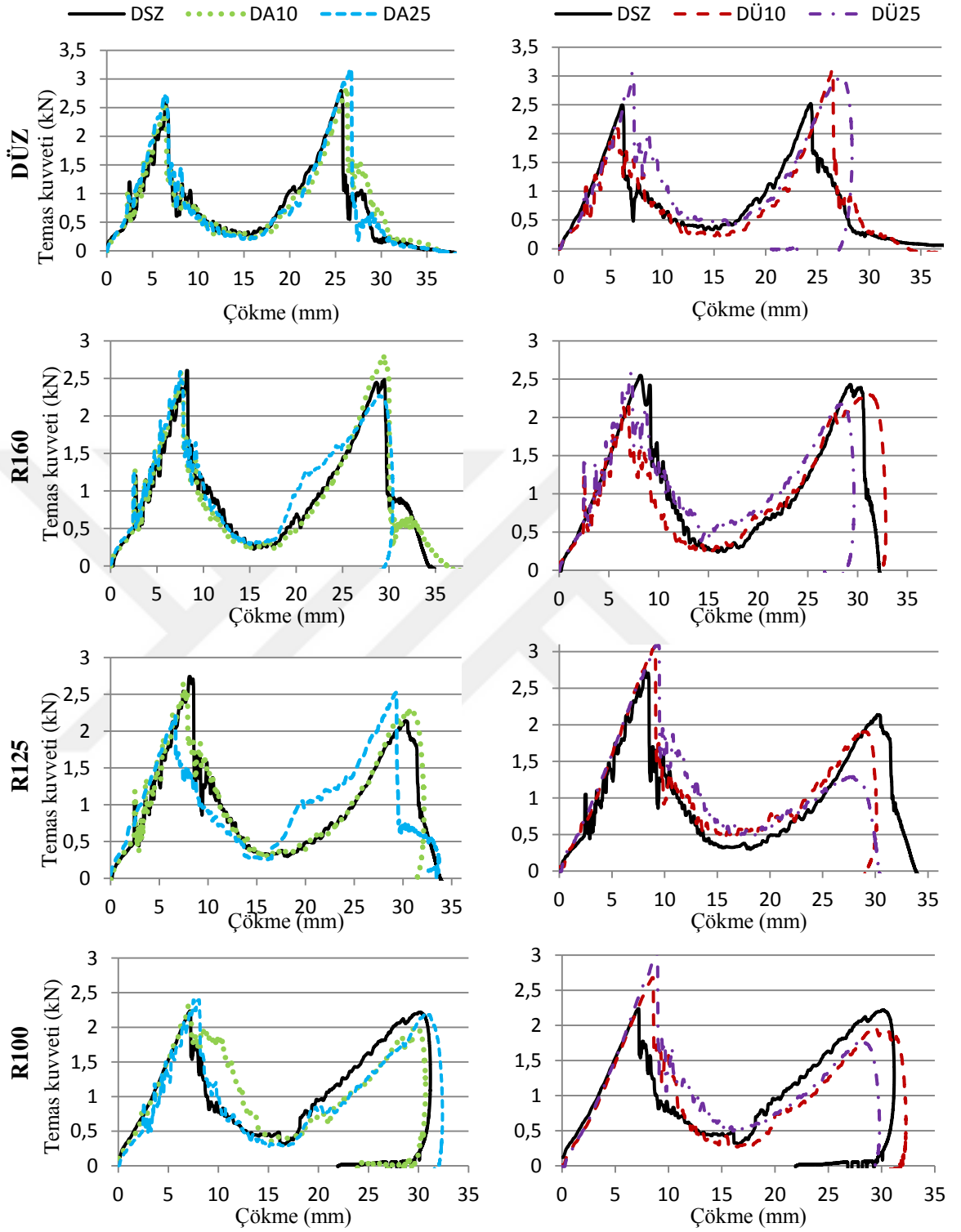
30 J darbe enerjisine maruz panellerin deney sonucundan elde edilen temas kuvveti-çökme grafiklerinin tamamında iki pikin meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.4 de sunulan bu grafiklerden çıkarılan genel sonuç, 30 J darbe enerjisinde vurucunun panellerin üst tabakasını geçip alt tabakasına ulaştığıdır. Düz numunelerin alt kabuk/köpük ara yüzeyinde bulunan delaminasyon boyutu arttıkça o bölgede

takviye etkisi oluşmuştur. Bu takviyenin çapının artması ikinci pikin temas kuvvetinin artmasıyla sonuçlanmıştır. Üst kabuk/köpük arasında bulunan delaminasyon üst kabuğun delinmeye karşı direncini arttırmıştır ve diğer panellerin delinmesine karşılık, üstte 25 mm delaminasyonun bulunduğu panellerde vurucu alt yüzeyden geri sekmiştir, yani delinme gerçekleşmemiştir. Eğriliği en az olan R160 numuneleri incelendiğinde, delaminasyonsuz ve alt kabukta 10 mm delaminasyon içeren paneller delinme eşiğindeyken, diğer R160 numunelerde delinme olmamıştır. R125 numunelerde de delaminasyonsuz plakalar delinme eşiğindeyken, delaminasyonun alt ve üstte bulunduğu numunelerde alt yüzeyde hasar oluşmamıştır. Delaminasyon hangi yüzeydeyse o yüzeyin temas kuvveti delaminasyon boyutunun artmasıyla arttıkça artmıştır. Toplam darbe enerjisi tüm numunelerde sabit olduğu için panelin delaminasyon bulunan yüzeyinin temas kuvveti artarken diğer yüzeyinin temas kuvveti düşmüştür. Eğrilik yarıçapı 100 mm (R100) olan panellerin üst kabuk/köpük arasında delaminasyon içermesi üst kabuğa ait maksimum temas kuvvetini arttırmıştır.

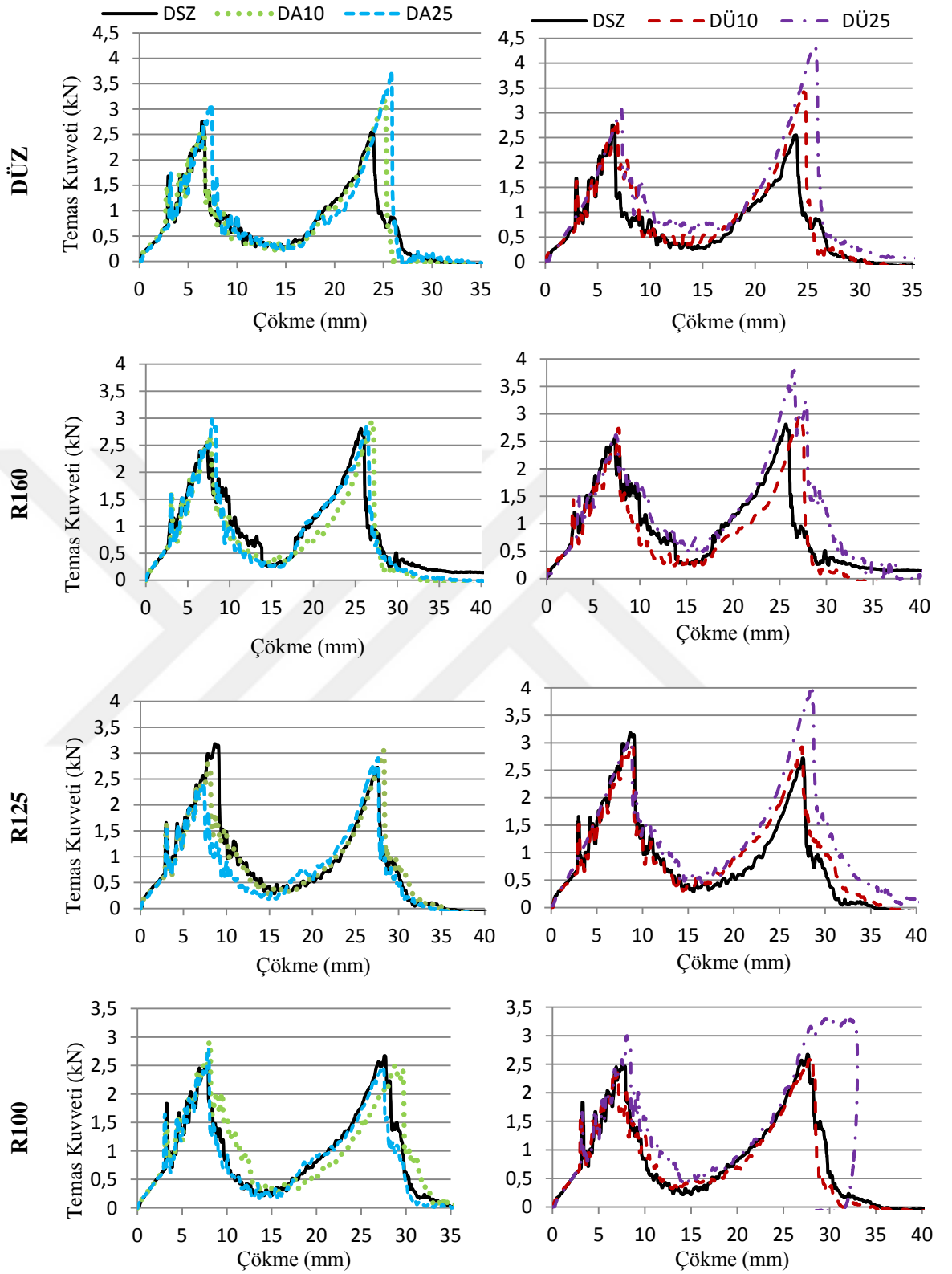
50 J darbe enerjisine maruz panellerin Şekil 4.5 de verilen grafiklerine bakıldığında ise tüm numunelerin delindiği görülmektedir. Grafiklerin tamamında delaminasyonun bulunduğu yüzeyin temas kuvveti delaminasyon boyutunun artmasıyla birlikte artış göstermiştir. İkinci pikten sonra maksimum temas kuvveti sifira inmiş ancak çökme miktarı artmaya devam etmiştir. Bu durumda vurucu, numunenin alt tabakasına ulaştıktan sonra numuneye temasını kesmiş, ancak ilerlemesine devam etmiştir, yani numuneyi delmiştir. Delaminasyonun bulunduğu yüzeyin temas kuvvetinin artmasındaki eğilim ve panellerdeki delinme durumu 80 J darbe enerjisiyle uygulanan numunelerde de tutarlı sonuçlarla desteklenmiştir (Şekil4.6).



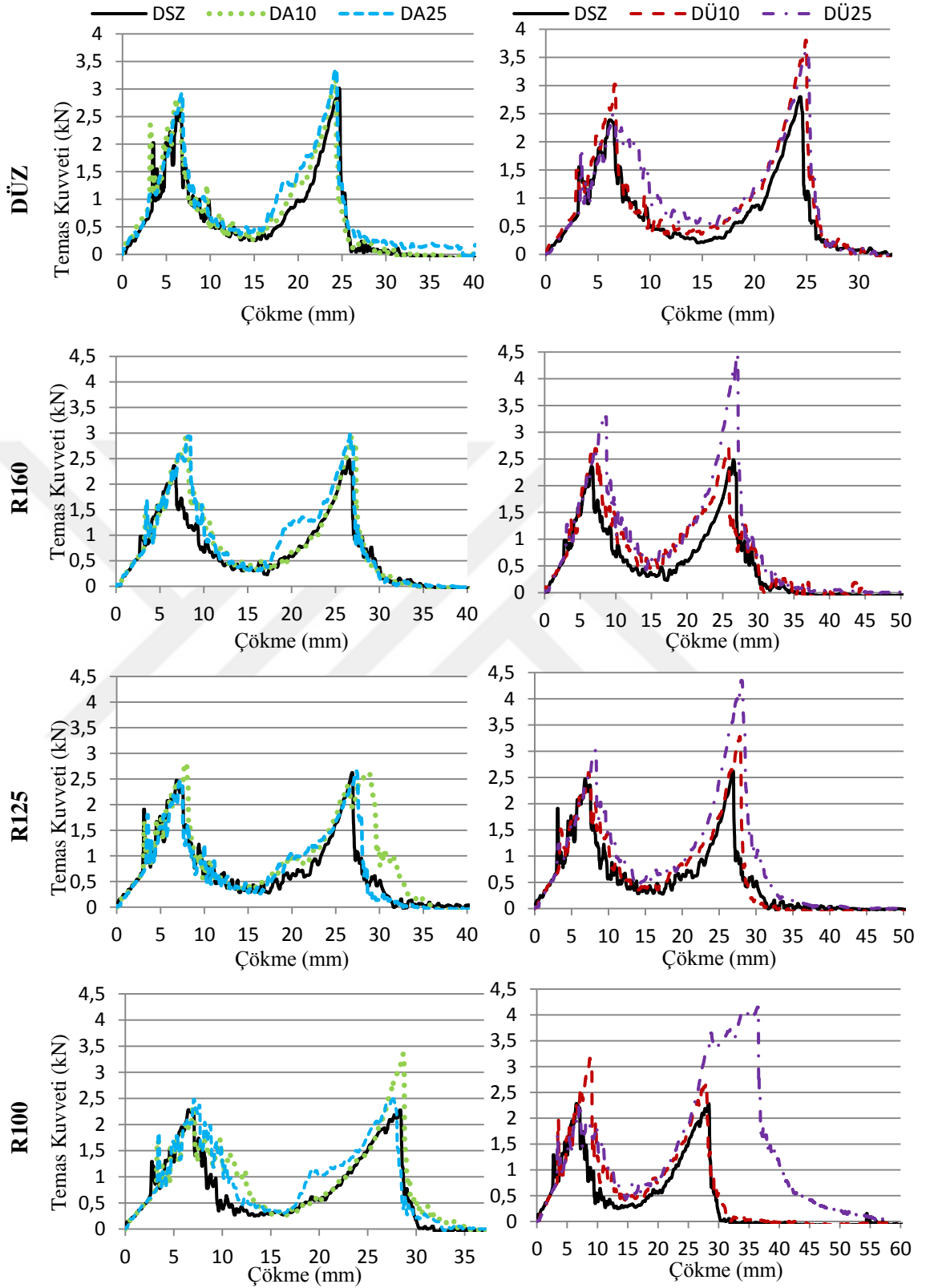
**Şekil 4.3.** 5 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.4.** 30 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.5.** 50 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.6.** 80 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon varlığı ve boyutunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi

### 4.1.3. Delaminasyon Konumunun Darbe Cevabına Etkisi

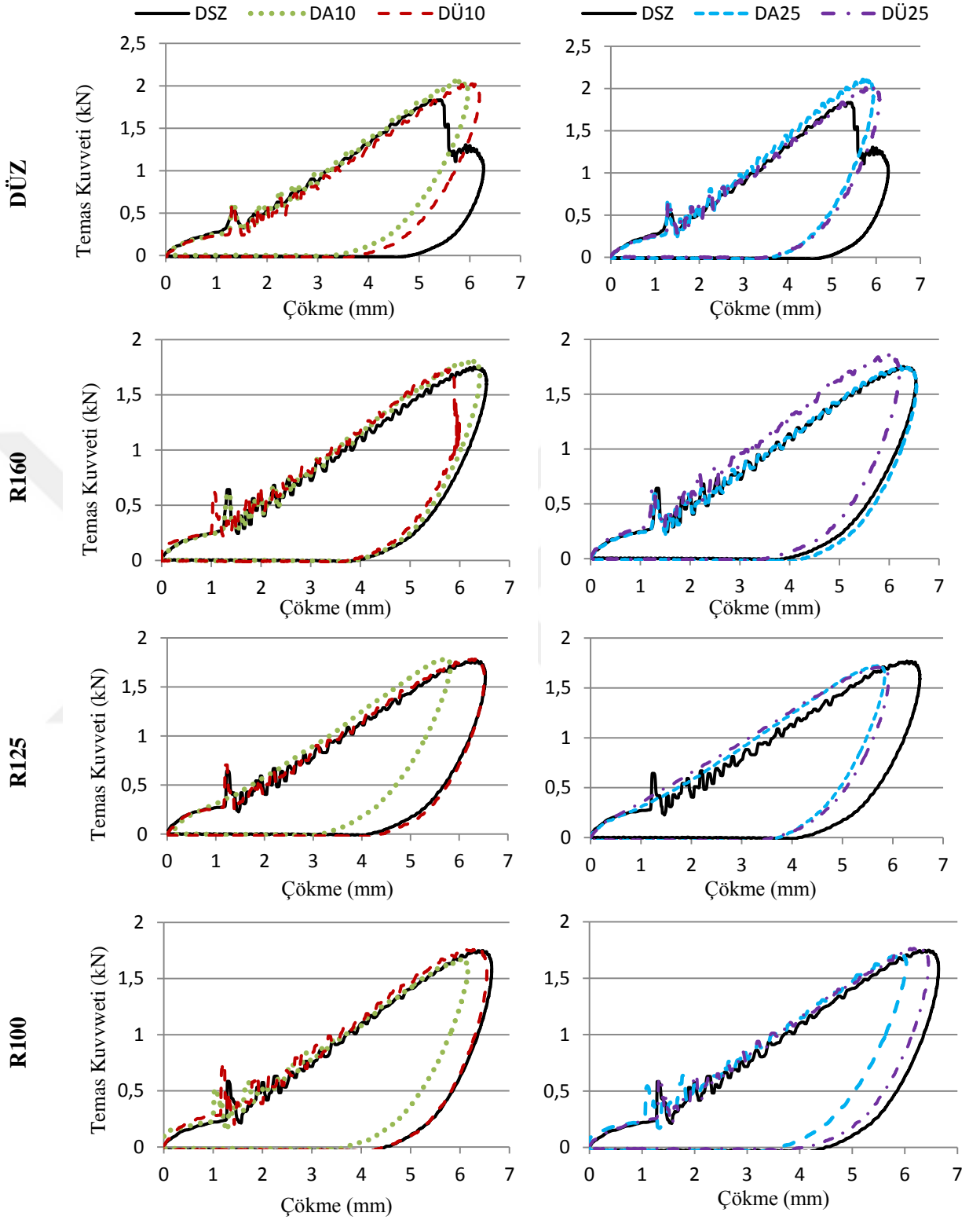
Delaminasyon konumunun darbe cevabına etkisinin sunulacağı bu bölümde düz ve aynı eğriliğe sahip numunelerde delaminasyon boyutu ve enerji seviyesi sabit tutularak delaminasyonun konumu değiştirilmiştir. Delaminasyonsuz numuneler karşılaştırma amacıyla verilmiştir (Şekil 4.7-4.10).

Şekil 4.7 de düz paneller için 5 J darbe enerjisinde, 10 mm delaminasyonun bulunduğu yerin maksimum temas kuvvetine etkisi olmadığı görülmüştür. Aynı panellerde delaminasyonun 25 mm olması durumunda delaminasyonun alt kabuk/köpük arasında olması, üst yüzeyde olmasına göre temas kuvvetini bir miktar arttırmıştır. Eğriselliğin söz konusu olmasıyla birlikte, R160 numunelerde 10 mm çapındaki delaminasyonun alt kabuk/köpük arasında yer alması delaminasyonsuz numuneye göre farklılık oluşturmazken, üst kabuk/köpük arasında yer alması maksimum temas kuvvetini ve bu noktadaki çökme değerini düşürmüştür. 25 mm delaminasyonun yer aldığı numunelerde delaminasyonun üst tarafta olması, temas kuvvetini arttırmıştır. R125 numunelerde 10 mm delaminasyonun alt tarafta olması üst tarafta olmasına göre numunenin maksimum temas kuvvetine karşılık gelen çökme miktarını azaltmıştır. Bu numunelerde delaminasyon çapının 25 mm olmasıyla birlikte delaminasyon konumundaki değişimin etkisi büyük ölçüde önemini yitirmiştir. R100 numunelerine bakılırsa delaminasyonun üst kabuk/köpük ara yüzeyinde olmasıyla elde edilen temas kuvveti ve çökme miktarı delaminasyonsuz panellerle yaklaşık olarak aynıyken, delaminasyonun alt tarafta bulunması temas kuvvetini ve çökme miktarını düşürmüştür.

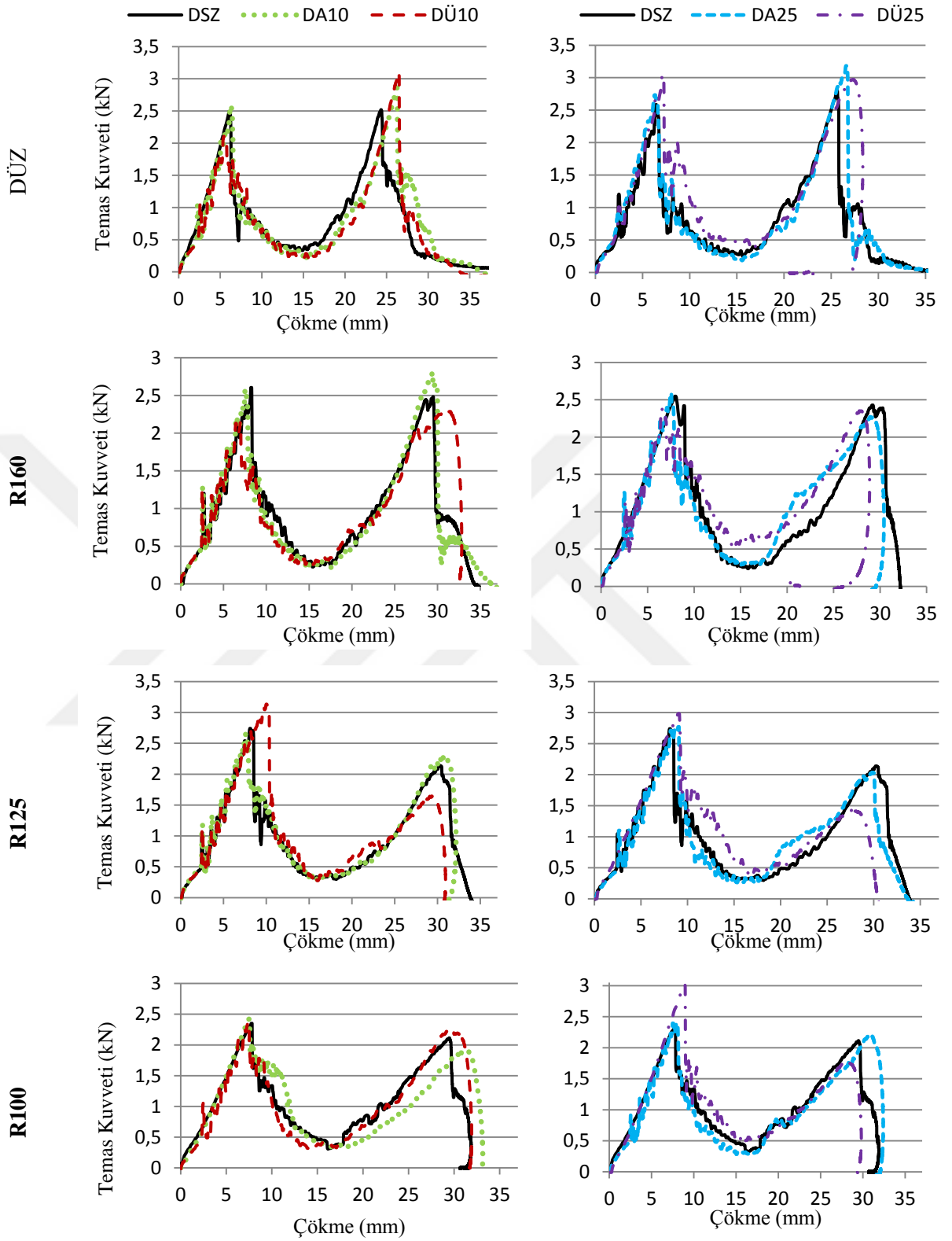
30 J darbenin düz ve eğri panellere uygulanmasıyla elde edilen temas kuvveti-çökme eğrileri Şekil 4.8 de verilmiştir. Düz panellerde 10 mm delaminasyonun üstte olması, alt kabuğun temas kuvvetini arttırırken, üst kabuğun temas kuvvetini düşürmüştür. Delaminasyon boyutunun 25 mm olmasıyla birlikte delaminasyonun üst tarafta konumlanması, panelin direncini oldukça arttırmış; üst yüzeyin temas kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Üst kabuğun delinmesiyle birlikte vurucu, delaminasyon oluşturmada kullanılan teflon filmi ve köpüğü numune

içinde ilerletmiş ve alt yüzeyin önünde sıkılaştan köpük-teflon film ikilisinden ötürü geri sekmiştir. 25 mm çaplı delaminasyonun alt tarafta olması, düz numunelerde delinmeyi engellememiştir. Alt tarafta bulunan 25 mm çaplı delaminasyon, numunenin alt yüzeyine ait temas kuvvetini arttırırken, açılmaya müsait konumda bulunması ve numunenin alt yüzeyinin çeki kuvvetine zorlanmasından dolayı delinmiştir. Eğri paneller için özellikle delaminasyon çapının 25 mm olması durumunda delaminasyonun bulunduğu yüzeyin direnci yani temas kuvveti artmıştır.

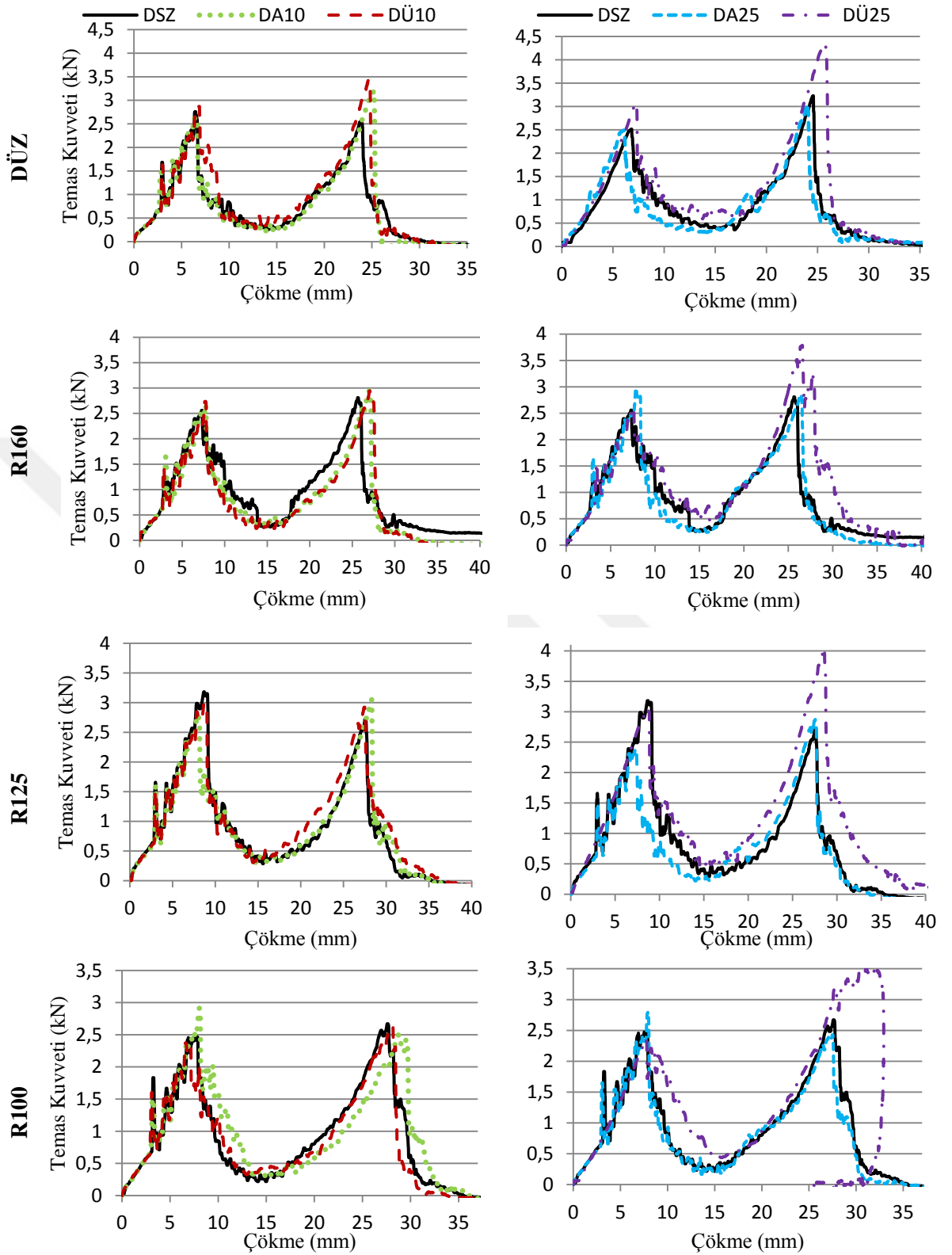
Darbe enerjisinin 50 J ile etki etmesi sonucunda delaminasyonun üst yüzeyde olduğu numunelerin tümünde numuneye uygulanan enerji miktarı arttırıldığı için temas kuvvetleri de artmıştır (Şekil 4.9). Delaminasyonu üst tarafta olan numunelere ait temas kuvvetleri, delaminasyonun alt tarafta konumlanmasına göre oldukça artmıştır. 80 J darbe enerjisinden elde edilen grafiklerde de benzer sonuçları görmek mümkündür (Şekil 4.10).



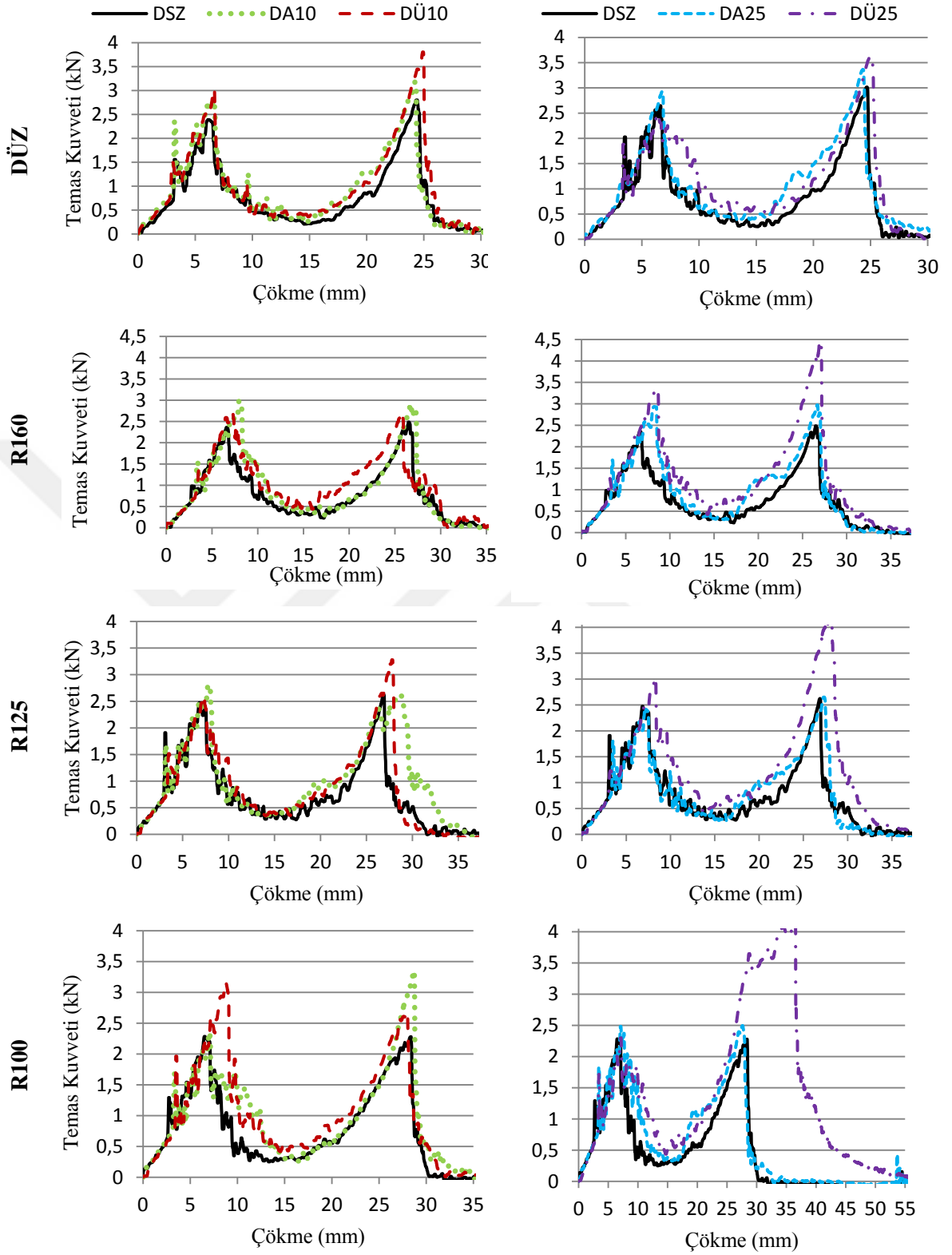
**Şekil 4.7.** 5 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.8.** 30 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.9.** 50 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi



**Şekil 4.10.** 80 J darbe enerjisine maruz düz ve eğri panellerde delaminasyon konumunun temas kuvveti- çökme grafiklerine etkisi

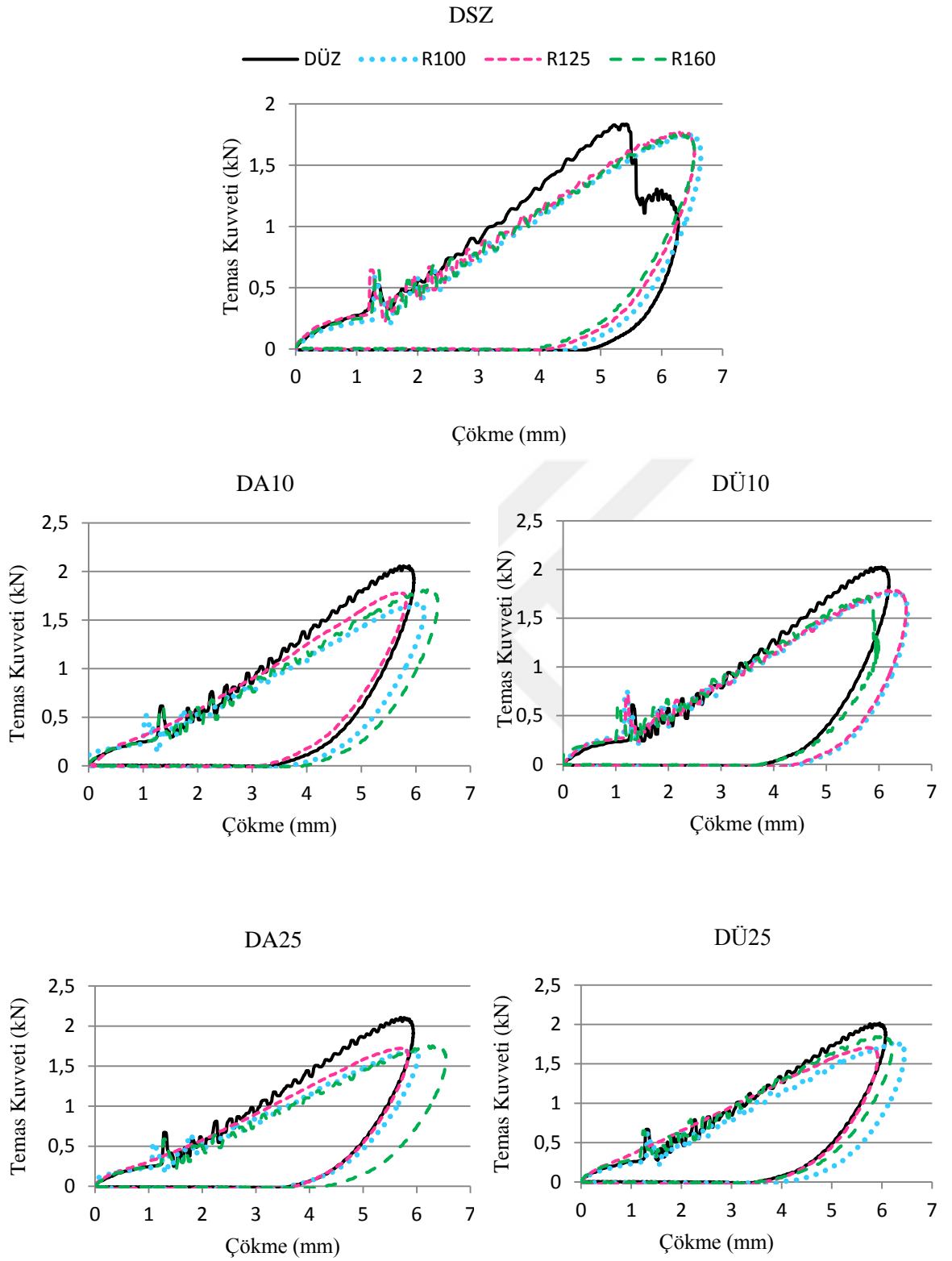
#### 4.1.4. Eğriliğin Darbe Cevabına Etkisi

Aynı özellikteki panellerin düz, R160, R125 ve R100 eğriliklerinden elde edilen temas kuvveti-zaman grafikleri Şekil 4.11-4.14 de verilmiştir.

Delaminasyon içermeyen numunelerde, 5 J darbe etkisinde eğriliğin temas kuvvetini düşürdüğü görülmektedir. Alt tarafta 10 ve 25 mm çapında delaminasyon içeren numunelerde ise eğriliğin artmasıyla (eğrilik yarıçapının azalmasıyla) birlikte maksimum temas kuvveti azalmış, maksimum temas kuvvetinde meydana gelen çökme miktarı artmıştır. Delaminasyonun numunelerin üst tarafında bulunmasıyla birlikte temas kuvvetlerinde düz panellere göre azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.11).

30 J darbe enerjisinde panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi Şekil 4.12 deki grafiklerde gösterilmiştir. Bu enerji seviyesinde delaminasyon bulunmayan panellerde eğrilik arttıkça numunenin geometrik rijitliğindeki artış numunenin delinmesine engel olmuştur. Ayrıca eğrilik arttıkça panellere ait üst kabuk temas kuvveti artış, alt kabuktaki temas kuvveti ise azalış göstermiştir. Alt kabuk/köpük arasında 10 ve 25 mm çapında delaminasyona sahip panellerde eğrilik arttıkça alt kabuktaki temas kuvveti düşmüş, maksimum temas kuvvetine karşılık gelen çökme miktarları da artmıştır. Eğriliğin 125 mm ve 100 mm olmasıyla numunelerde delinme meydana gelmemiştir. Üst kabuk/köpük ara yüzeyinde delaminasyon içeren panellerde eğrilik arttıkça üst kabuktaki temas kuvveti artmış, alt kabuğun temas kuvveti ise azalmıştır. Bunun nedeni vurucunun enerjisinin büyük bir kısmını üst kabukta harcamasıdır.

50 J enerji etkisinde numunelerin tümü delinmiş ve alt kabuğa ait orta nokta çökme miktarı eğriliğin artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Ayrıca tüm numunelerde alt kabuğun temas kuvveti eğrilik arttıkça azalmıştır (Şekil 4.13). 80 J enerji seviyesinde uygulanan testlerden elde edilen ve Şekil 4.14 de verilen grafikler 50 J da yapılan yorumları desteklemiştir.



**Şekil 4.11.** 5 J darbe enerjisinde delaminasyon içeren ve içermeyen numuneler için panel eğriliğinin darbe cevabına etkisi





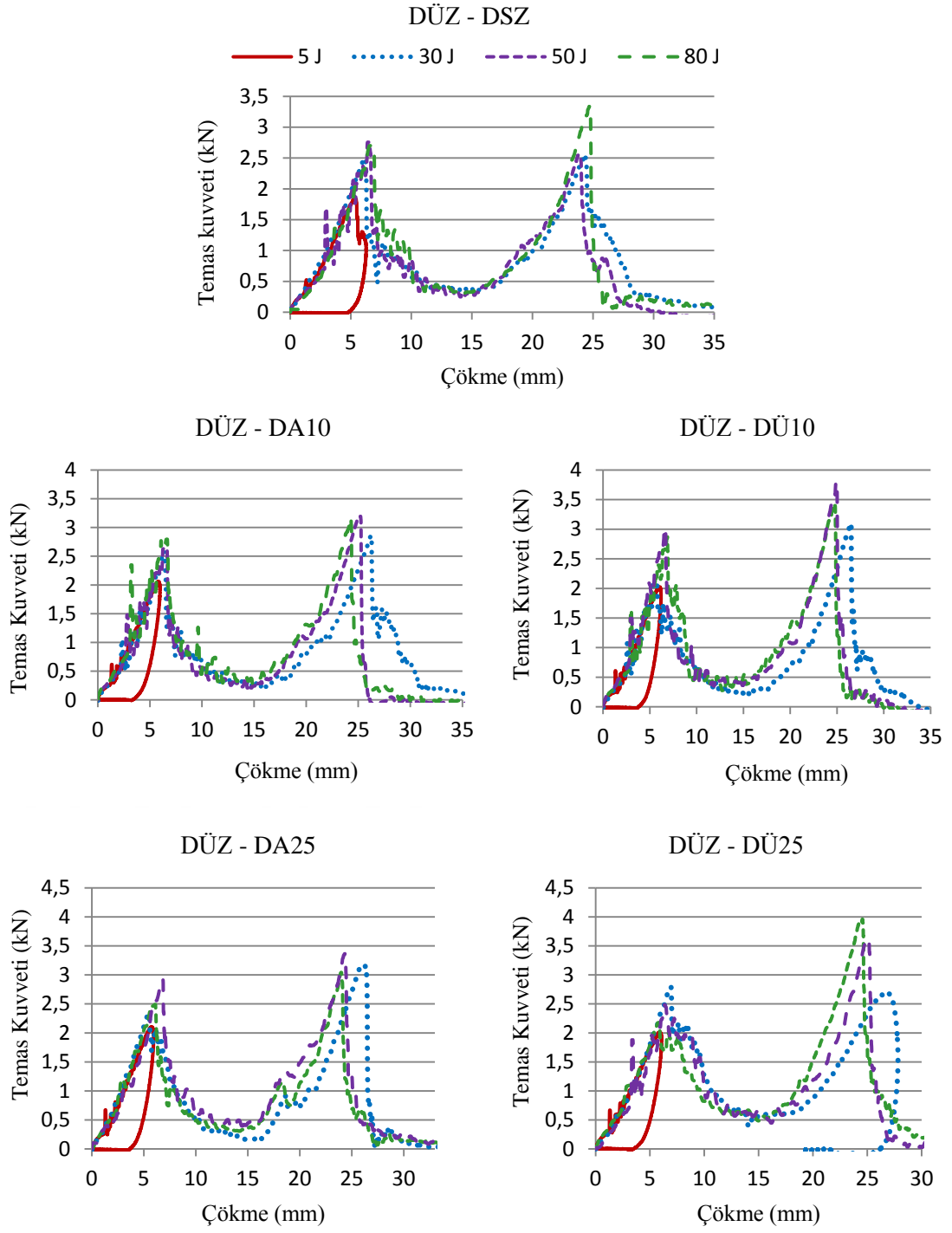


#### 4.1.5. Enerji Seviyesinin Darbe Cevabına Etkisi

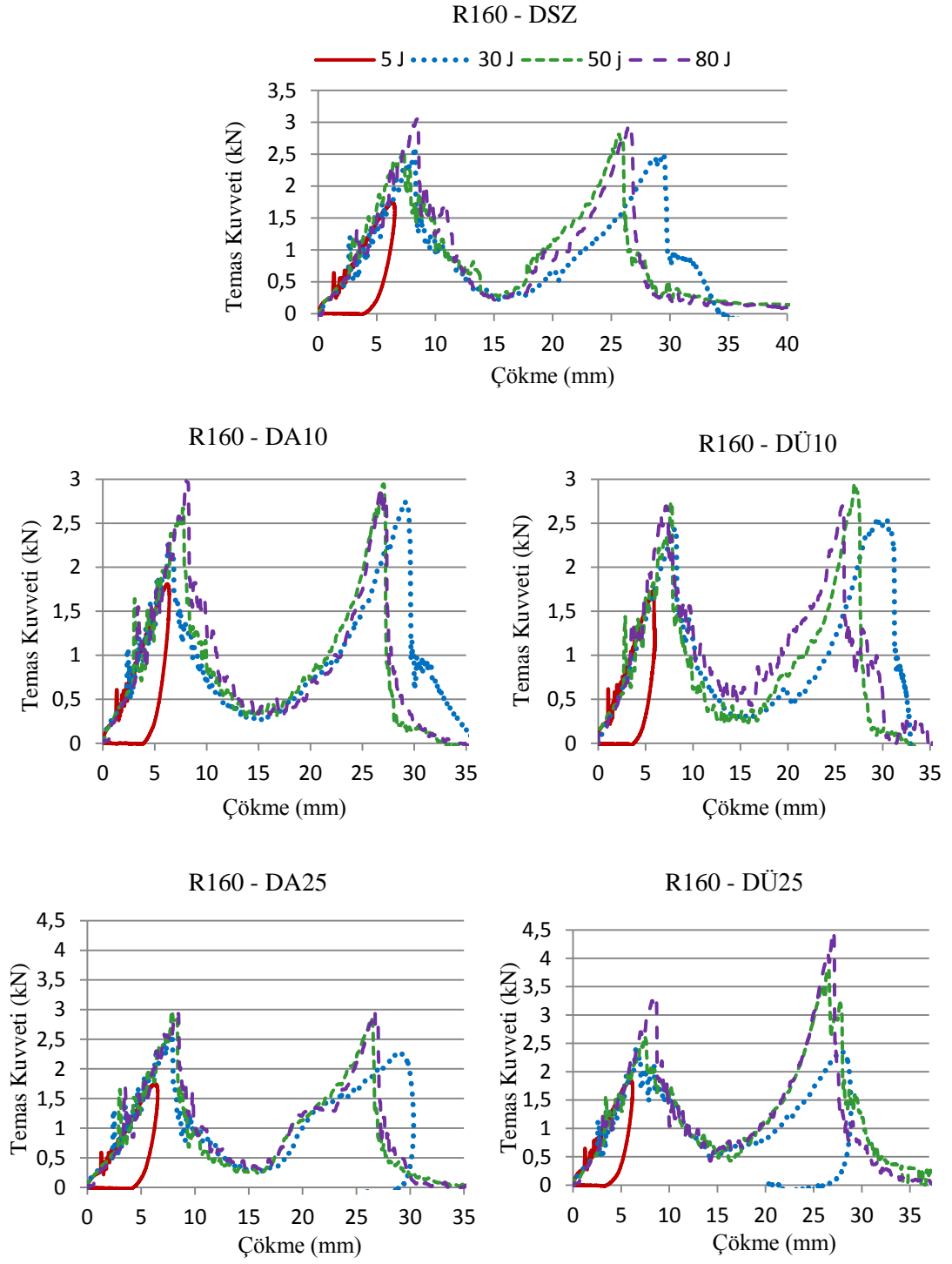
Değişen enerji seviyelerinin darbe cevabına etkisinin ortaya konulabilmesi amacıyla numunelerin 5 J, 30 J, 50 J ve 80 J maruz kalması ile elde edilen temas kuvveti-çökme grafikleri Şekil 4.15-4.18 de verilmiştir.

Şekil 4.15 de 5 J enerji seviyesinde vurucu tüm düz numunelerin üst yüzeyinden geri sekmiştir. Bu numuneler için verilen grafiklerden çıkarılabilecek nihai sonuç enerji seviyesinin artmasıyla birlikte temas kuvvetinin de arttığıdır. Ancak delaminasyon içeren düz numunelerde enerji seviyesinin 50 ve 80 J olması durumunda çökme 30 J enerjideki çökmeye göre daha az olmuştur. Bunun nedeni numunenin yüksek enerji seviyelerine karşı koyamaması ve hasarın düşük enerji seviyesine göre aniden gerçekleşmesidir.

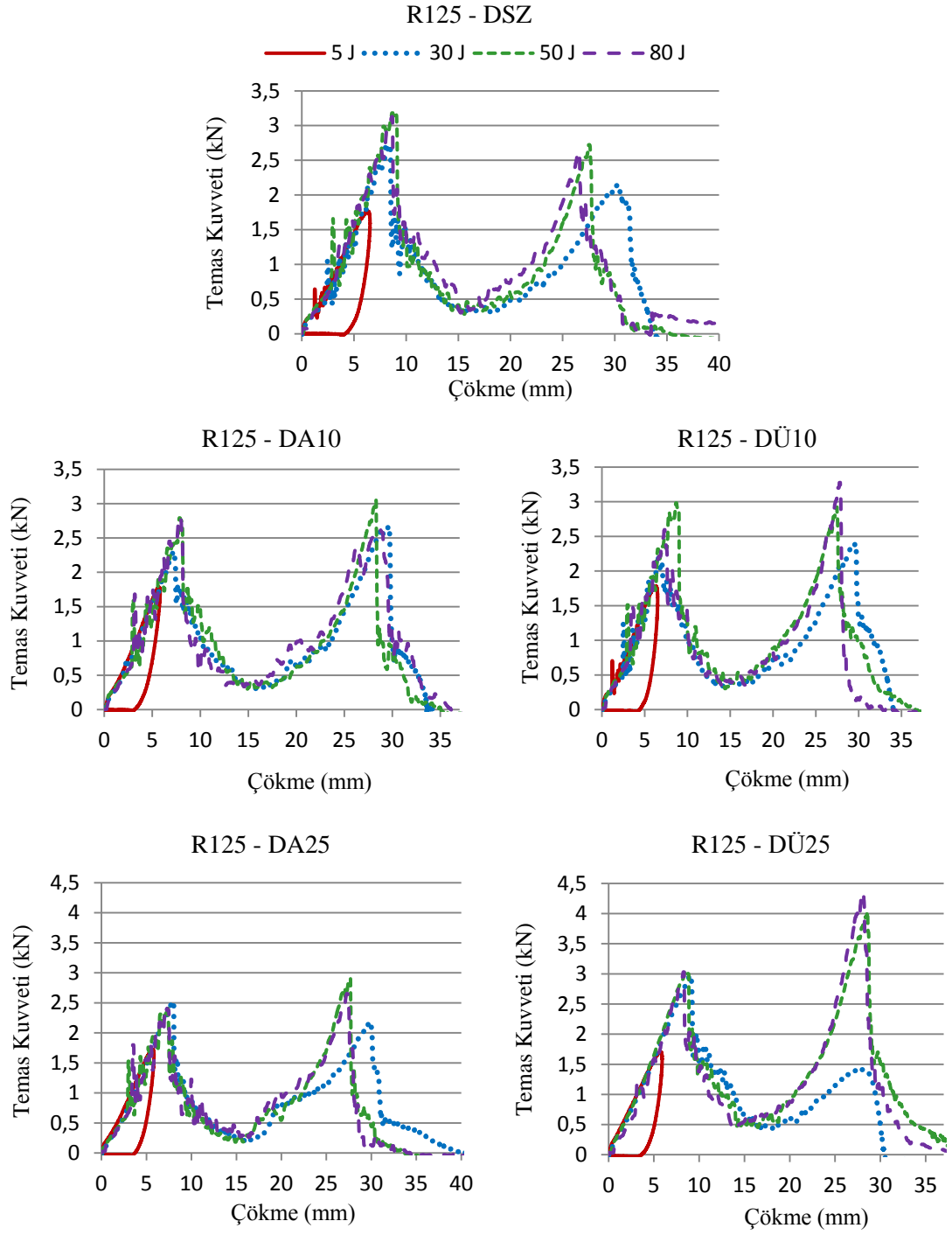
Eğriliğe sahip numunelerde üst kabuk/köpük arasında 25 mm delaminasyon içeren panellerin alt kabuğuna ait temas kuvvetinde önemli ölçüde artış olmuştur (Şekil 4.16-4.18).



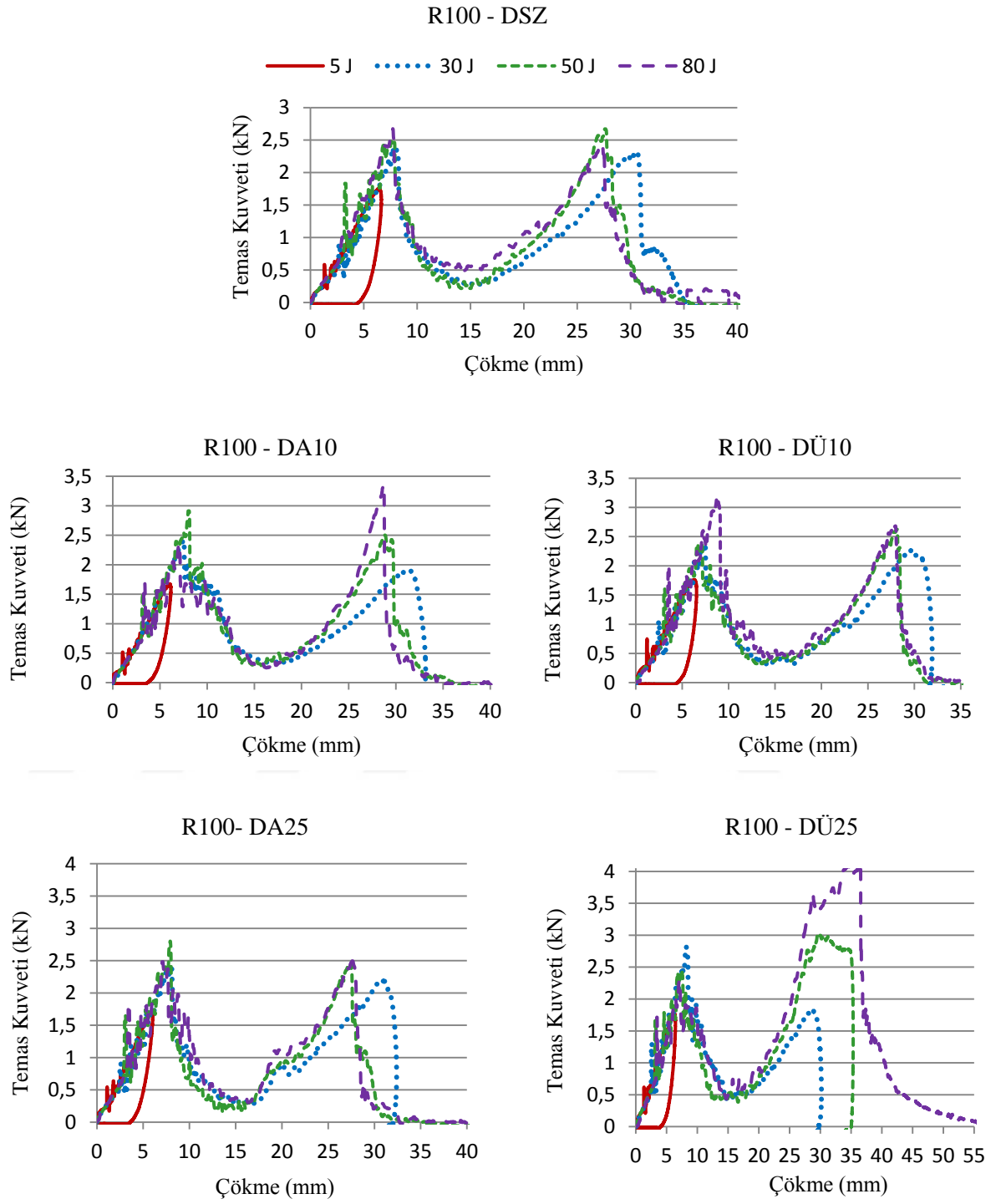
**Şekil 4.15.** Düz delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi



**Şekil 4.16.** R160 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi



Şekil 4.17. R125 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi



**Şekil 4.18.** R100 delaminasyon içeren ve içermeyen numunelerde darbe enerjisinin darbe cevabına etkisi

#### 4.1.6. Hasar Modları

Çalışmada incelenen sandviç panellere ait darbe cevabı hakkında bilgi edinmek ve yapının mukavemeti hakkında yorum yapabilmek amacıyla numunelere ait hasar modları Şekil 4.19-4.26 da verilmiştir.

##### a) Delaminasyon Boyutunun Darbe Hasar Moduna Etkisi:

Şekil 4.19 da düz numunelerin delaminasyonsuz ve farklı boyutlarda delaminasyon içermesi durumunda oluşan hasar modları, uygulanan enerji seviyeleriyle birlikte verilmiştir. Düşük enerjili darbe testlerinde delaminasyon boyutunun artması ile yüzeyde oluşan hasar miktarı azalmıştır. Enerji seviyesinin 30 J veya daha fazla olması durumunda, üst kabuk köpük arasındaki delaminasyon boyutunun artması o yüzeyde hasarın daha geniş bir alana yayılmasına neden olmuştur. Delaminasyonsuz ve üst kabuk/köpük arasında 10 mm delaminasyon bulunan panellerin üst yüzey hasarları 90° fiber doğrultusunda gerçekleşirken, delaminasyonun 25 mm olmasıyla üst yüzey hasarı yer fıstığı şeklinde meydana gelmiştir. Hasarın yer fıstığı şeklini alması üst yüzeyde -45/+45 ° doğrultusunda oluştuğunu gösterir. Şekil 4.20 de ise aynı numunelerin kesit görüntülerine yer verilmiştir. 5 J darbe enerjisi düz ve delaminasyonsuz numunenin yüzeyinde çok az çökme oluştururken delaminasyonlu panellerin üst kabuğunda çökme oluşmamıştır.








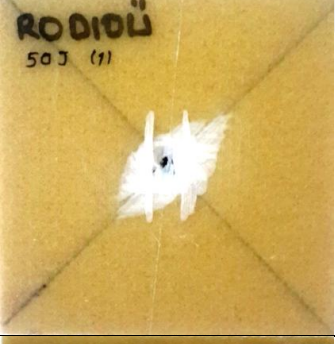
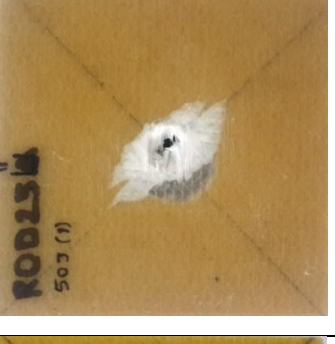
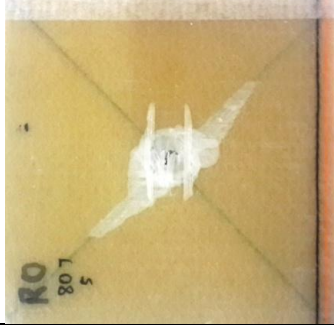


30 J enerjide delaminasyonun 10 mm ve üstte konumlanmasıyla numunede delinme gerçekleşmiştir. Çünkü delaminasyon boyutunun küçük ve konumunun üstte olması, vurucunun kinetik enerjisini numune içinde kaybetmeden numuneyi delmesine neden olmuştur. Alt yüzeye ulaşan vurucu burada herhangi bir delaminasyonlu bölgeyle karşılaşmayınca delinme oluşmuştur. Üst kabuk/köpük ara yüzeyinde delaminasyon boyutunun artması ile vurucu, üst köpükte enerjisinin çoğunu harcamıştır. Vurucunun delaminasyonu ve köpüğü sıkıştırması alt kabuğun önündeki bölgenin güçlenmesine neden olmuştur ve burada delinme gerçekleşmemiştir.

50 ve 80 J enerji durumunda ise vurucu numunenin alt kabuğuna da hasar vermiştir ancak delaminasyon boyutunun 10 mm olması vurucunun köpük içerisinde silindirik bir hasar bölgesi meydana getirmesiyle sonuçlanmıştır. Delaminasyon boyutunun artması ile vurucu köpük içerisinde 45° lik çatlama oluşturmuştur ve oluşan hasarın kesit alanı konikleşmiştir.








Delaminasyon boyutundaki değişimin eğri numunelerin darbe hasarına etkisi Şekil 4.21 de gösterilmiştir. İncelemede eğriliğin etkisinin en fazla gözlemlendiği R100 numuneleri ele alınmıştır. Benzer hasar modları diğer eğri panellerde de gözlemlenmiştir. Delaminasyon boyutunun artması ile eğri numunelerin üst yüzeyinde meydana gelen hasar azalırken, alt yüzeydeki hasar alanlarında artış olmuştur. Bunun sebebi artan delaminasyon çapının delinmeyi engellemeye çalışmasıdır.

#### **b)Delaminasyon Konumunun Darbe Hasar Moduna Etkisi:**


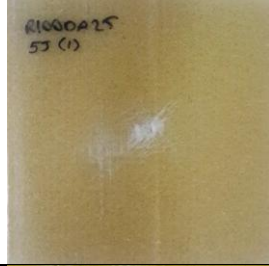

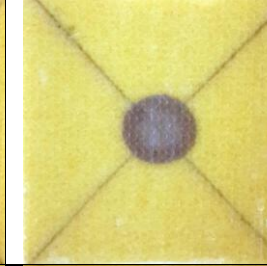
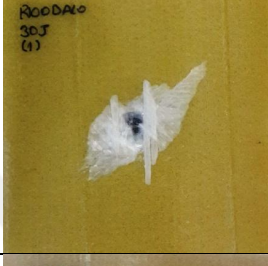











Şekil 4.22-4.23 de delaminasyonun alt kabuk/köpük arasında ya da üst kabuk/köpük arasında olmasının darbe hasar moduna etkisi, en fazla eğriliğe sahip R100 numuneleri incelenerek ortaya konulmuştur. Alt kabuk/köpük arasında yer alan delaminasyon ile birlikte üst yüzeyde meydana gelen hasar alanı uygulanan darbe enerjilerinin tamamında genişlemiş ve yer fıstığı formunu almıştır. 10 mm çapındaki delaminasyonun üst yüzeyde olması delaminasyonsuz numunelere göre önemli bir farklılık oluşturmamıştır (Şekil 4.22). Delaminasyon çapının 25 mm olması ile konumun darbe hasar modu üzerindeki etkisi artmıştır (Şekil 4.23). 30 J enerjide delaminasyonun altta konumlanması ile vurucu enerjisinin büyük bir kısmını koruyarak alt kabuğa ulaşmıştır. Ancak mevcut enerjisi alt kabuğu delmesine yetmemiştir. 25 mm delaminasyonun üstte konumlanması vurucunun bu yüzeyde cam elyaf/epoksi tabakalı kompozitin yanı sıra delaminasyon ile temasa geçmesine neden olmuştur ve vurucu enerjisinin büyük bir kısmını üst kabuğu delmek için kullanmıştır. İçeri doğru sıkışan köpük ve delaminasyon vurucunun köpük içerisinde ilerlemesine ve alt yüzeyin delinmesine engel olmuştur.

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		
	DÜZ	DÜZDÜ10	DÜZDÜ25
5 J			
30 J			
50 J			
80 J			

Şekil 4.19. Düz panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi

Enerji	Kesit		
	DÜZ	DÜZDÜ10	DÜZDÜ25
5 J			
30 J			
50 J			
80 J			

**Şekil 4.20.** Düz panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi (kesit görüntüsü)

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		Alt yüzey	
	R100DA10	R100DA25	R100DA10	R100DA25
5 J				
30 J				
50 J				
80 J				

Şekil 4.21. Eğri panellerde delaminasyon boyutunun hasar moduna etkisi

### c) Panel Eğriliğinin Darbe Hasar Moduna Etkisi:

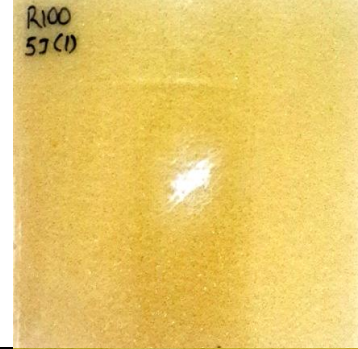

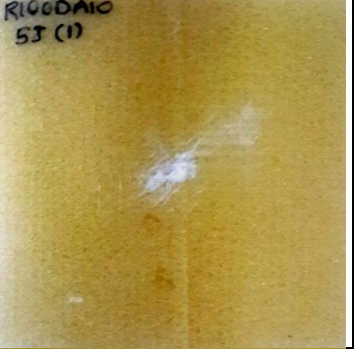
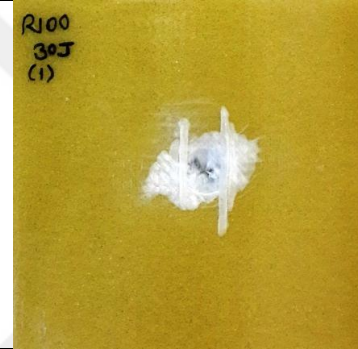





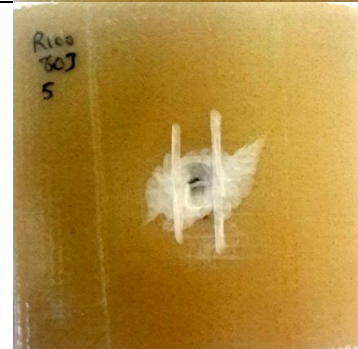


Şekil 4.24 de panel eğriliğinin darbe hasar moduna etkisinin ortaya konulabilmesi için düz ve eğriliği en fazla olan panellerin alt ve üst yüzeyleriyle kesitlerinde oluşan hasarlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Delaminasyon içermeyen düz ve R100 sandviç panellerin darbe uygulanan yüzeylerinin ve

kesitlerinin görüntülerine yer verilmiştir. 5 J darbe enerjisinde numunelerin alt yüzeyinde hasar meydana gelmezken, üst yüzeyin şekilde görüldüğü gibi hasar oluşmuş, bu bölgede matris fiber ara yüzeyinde ayrılmalar gerçekleşmiştir. 5 J darbe enerjisi düz panelin üst yüzeyinde bir miktar çökme oluştururken, eğriliğin verdiği rijitlikten ötürü R100 panelin üst kabuğunda düze göre daha az çökme oluşmuştur. Aynı numunelerin alt (darbe uygulanmayan) yüzey görüntülerine bakıldığında 5 J enerjinin numunelerin alt yüzeylerinde hasar oluşturmadığı açıkça görülmektedir. Enerji seviyesi arttıkça eğri numunelerin alt yüzeylerinde meydana gelen tabakalar arası ayrışma düz numunelere kıyasla artmıştır. Darbe yükünün uygulanmasıyla birlikte, numunelerin alt yüzeylerinde oluşan yüksek çeki gerilmesi düz numunelerde hemen delinmeyle sonuçlanmıştır. Eğri numunelerde çeki gerilmesi eğriliği açmaya yönelik çalışmıştır. Ancak yapının rijitliği nedeniyle delinme sırasında alt kabuk katmanları arasında ayrılmaya sebebiyet vermiştir.



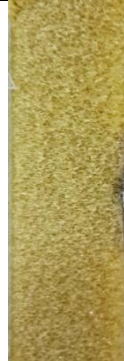









Darbe enerjisinin 30 J olmasıyla numunenin üst yüzeyinde fiberler kırılmış, vurucu numuneye nüfuz edip alt yüzeye ulaşarak fiber hasarına neden olmuştur. Alt yüzeyde fiberler ve matris arasında ayrışmalar olmuştur. Düz numunenin delinme noktasında oluşan hasar eğri numuneye göre konik şekilde meydana gelmiştir. Artan enerji seviyesiyle birlikte vurucu alt ve üst yüzeydeki tüm fiberleri kırmıştır ve darbe uygulanan yüzeyde oluşan tabakalar arası ayrışma alanı eğri numunelere kıyasla gittikçe artmıştır. Bunun nedeni, numune geometrisinin tabakalar arasında oluşturduğu uyumsuzluğun, numuneleri hasara uğratan enerji seviyelerinde kendini göstermesidir.

Alt yüzeylerinde 25 mm delaminasyon içeren düz ve R100 numunelerinin ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen hasarın yakın görüntüleri Şekil 4.26 deki gibidir. Numunelerde 5 J enerjide üst tabakadaki matrisin kırılması dışında başka bir hasar görülmemiştir. 30 J darbe enerjisinin uygulanması ile vurucu alt tabakaya ulaşmış ancak yalnızca düz numunelerde delinme gerçekleşmiştir. Eğri numunelerdeki geometrik rijitlik delaminasyonsuz numunelerdeki hasar tipleriyle aynı doğrultuda sonuç alınmasına neden olmuştur. Numunelerin alt kabuk/ köpük





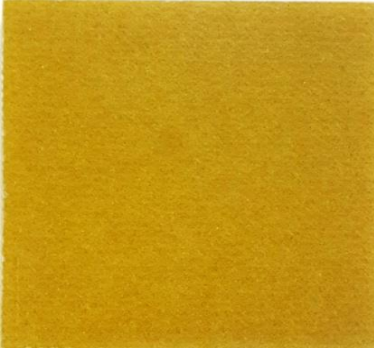


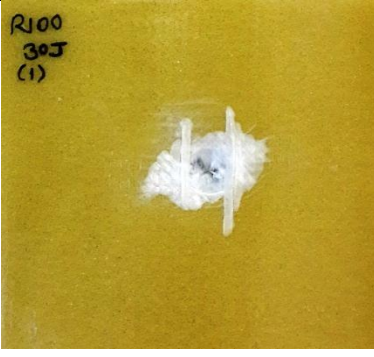




arasında delaminasyon içermesi nedeniyle o bölgede hasar delaminasyon içermeyen numunelere göre daha az oluşmuştur.

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		
	R100	R100DÜ10	R100DA10
5 J	 R100 5J (1)	 R100DÜ10 5J (1)	 R100DA10 5J (1)
30 J	 R100 30J (1)	 R100DÜ10 30J (1)	 R100DA10 30J (1)
50 J	 R100 50J (1)	 R100DÜ10 50J (1)	 R100DA10 50J (1)
80 J	 R100 80J 5	 R100DÜ10 80J (1)	 R100DA10 80J (1)





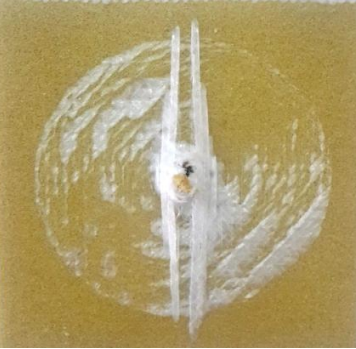

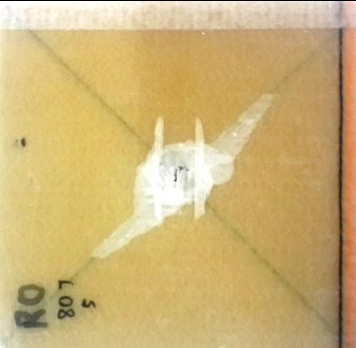
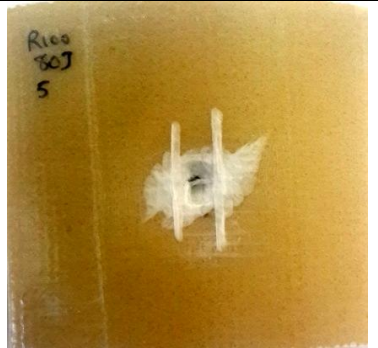
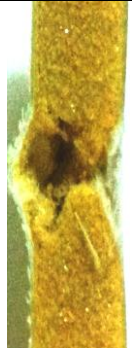
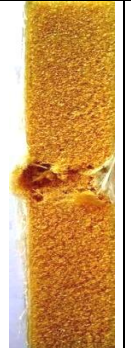


Şekil 4.22. R100 numunelerde delaminasyon konumunun hasar moduna etkisi

Enerji	Kesit Görüntüleri		
	R100	R100DA25	R100DÜ25
5 J			
30 J			
50 J			
80 J			






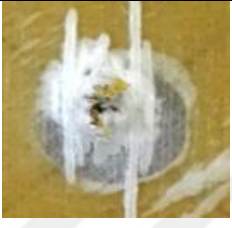




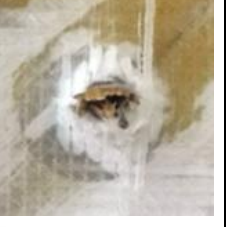




Şekil 4.23. R100 numunelerde delaminasyon konumunun hasar moduna etkisi (kesit görüntüsü)

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		Kesit		Alt yüzey	
	DÜZ	R100	DÜZ	R100	DÜZ	R100
5 J						
30 J						

Şekil 4.24. Düz ve R100 panellerde darbe enerji seviyesine göre hasar modları

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		Kesit		Alt yüzey	
	DÜZ	R100	DÜZ	R100	DÜZ	R100
50 J	 70 50J (1)	 R100 50J (1)				
80 J	 RO 80J 5	 R100 80J 5				

Şekil 4.24. Düz ve R100 panellerde darbe enerji seviyesine göre hasar modları (devamı)

Enerji	Darbe uygulanan (üst) yüzey		Alt yüzey	
	DÜZDA25	R100DA25	DÜZDA25	R100DA25
5 J				
30 J				
50 J				
80 J				

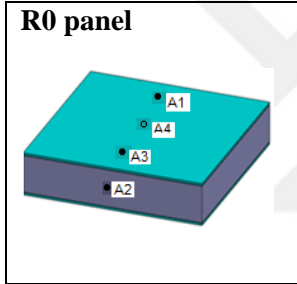
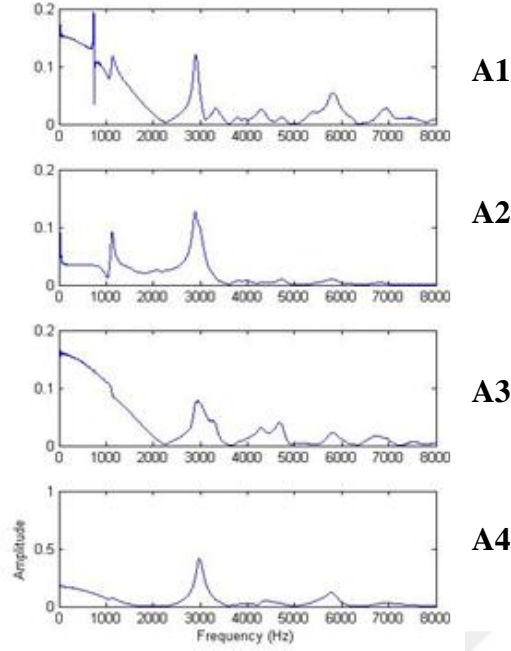
Şekil 4.25. DA25 sandviç panellerde eğriliğin hasar moduna etkisi

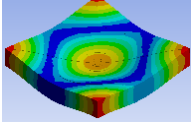
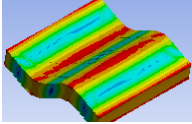
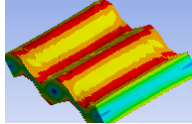
## 4.2. Titreşim Analizi Sonuçları

Bu bölümde, sandviç kompozit panellerin serbest titreşim davranışları incelenip farklı sınır şartlarının, panel eğriliğinin, paneldeki delaminasyon boyutu ve yerinin modal frekansları nasıl değiştirdiği ortaya konmuştur. Bunun için sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı ANSYS paket programından faydalanılmıştır. Oluşturulan modellerin ve analiz sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için serbest sınır şartlarındaki numunelerin frekansları tespit edilmiş ve analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sandviç kompozit panellerin serbest titreşim davranışlarının deneysel olarak belirlenmesi amacıyla Bölüm 3.3.2 de açıklandığı şekilde titreşim ölçümleri yapılmış ve çizdirilen FFT diyagramlarından frekans değerlerine ulaşılmıştır. FFT diyagramları, Bölüm 3.3.2 de belirtilmiş noktalara yerleştirilen dört ayrı ivmemetreden alınan sinyaller kullanılarak elde edilmiştir. Dört ivmemetreden alınan her bir diyagramdaki maksimum şiddette titreşimin olduğu yerlere ait frekanslar belirlenip bunlardan değerleri birbirine yakın ya da aynı olanlar tespit edilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarını elde etmek için ise Bölüm 3.4 de açıklandığı şekilde analizler yapılmış, deneysel sonuçlardan bulunan frekansların hangi mod şekline karşılık geldiği ve titreşim test sonuçları ile nümerik analiz sonuçları arasındaki hata yüzdesi belirlenmiştir.

Tüm numunelere ait titreşim testlerinden bulunan FFT grafikleri ve bu grafiklerden okunan pik değerlerinin yer aldığı tablolar aşağıda (Şekil 4.26-4.43) verilmiştir. Tablolarda bu numunelere ait ANSYS modal analizlerinden bulunmuş frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekilleri de yer almaktadır. Ayrıca Tablo 4.1 de, Şekil 4.26-4.43 de sunulan tüm numunelerin deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve bu sonuçlar arasındaki % fark sunulmuştur. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, delaminasyon içermeyen numunelerde maksimum %6.83 iken delaminasyon içeren numunelerde bu değer %10.68 e çıkmıştır. Eğrilikteki ve delaminasyon çapındaki artış, hata yüzdelerinde artışa sebep olmuştur.

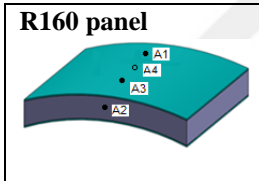
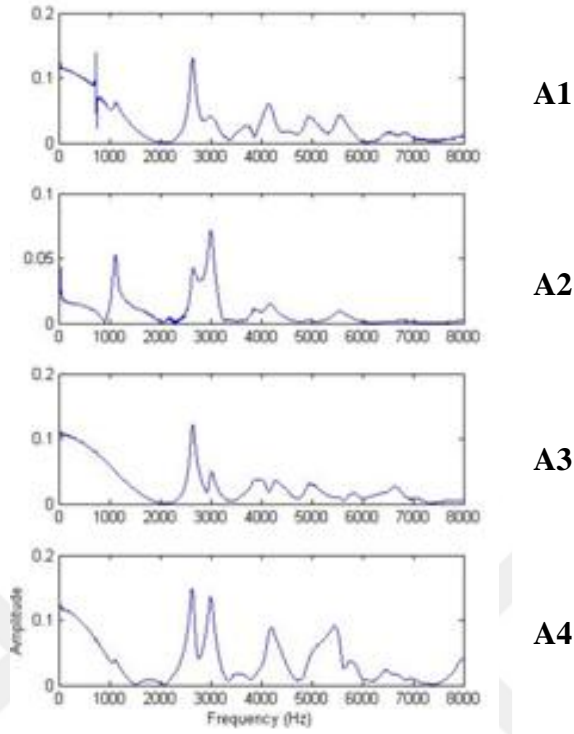
## DÜZ – DSZ Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

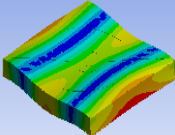
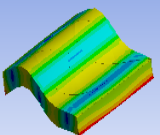
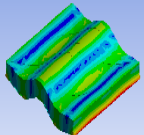
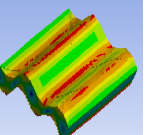


MODLAR		1	2	3	4	5
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1143	2900	4300	5813	6919
	A2	1132	2898			
	A3		2920	4662	5815	6764
	A4		2981	4352	5787	
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri						
			2929.7	4246.5		6656.6

Şekil 4.26. DÜZ – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

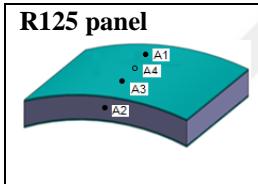
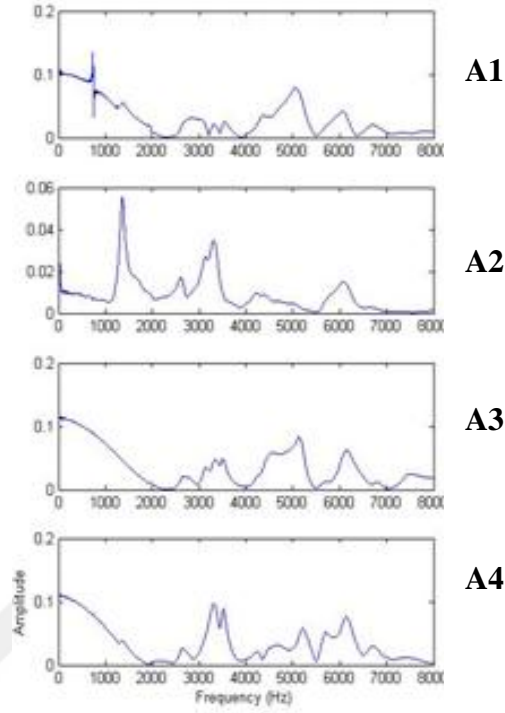
## R160 – DSZ Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

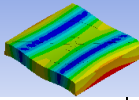
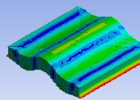
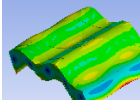


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1124	2643		4154		4964	5559	
	A2	1121	2656	3001	4159			5548	
	A3		2645	3031	3912	4309	4977		6663
	A4		2623	3007	4193			5453	6484
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri									
			2769.9		4116.8			5924.1	6569.3

Şekil 4.27. R160– DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

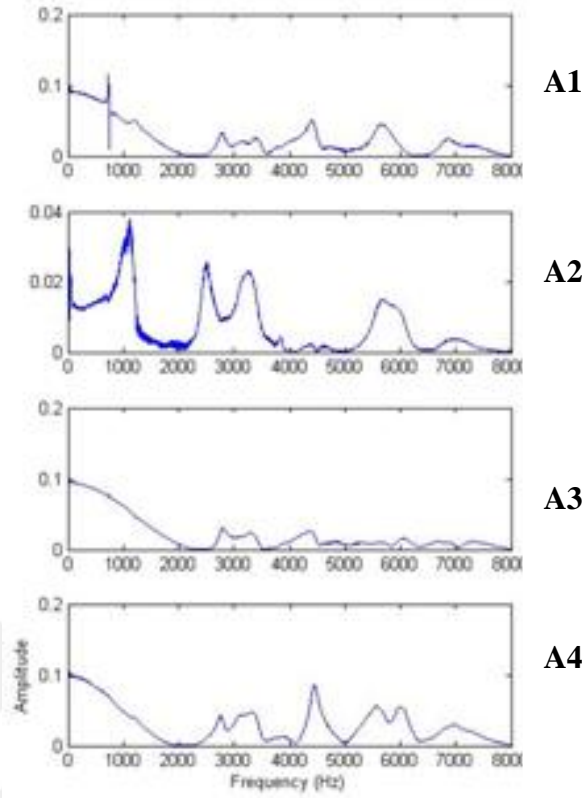
## R125 – DSZ Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



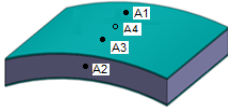
MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8	9
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1367	2869	3314	3548		5048		6086	6752
	A2	1361	2607	3316		4223			6104	
	A3		2680	3338				5130	6147	
	A4		2665	3317	3522			5188	5680	6139
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2703.1				 5789.8			 6505.2

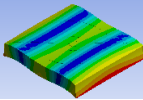
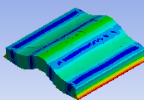
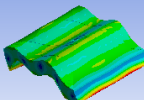
Şekil 4.28. R125 – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

## R100 – DSZ Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



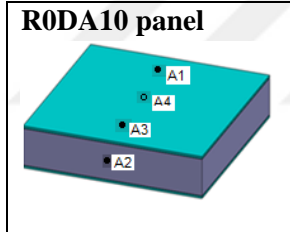
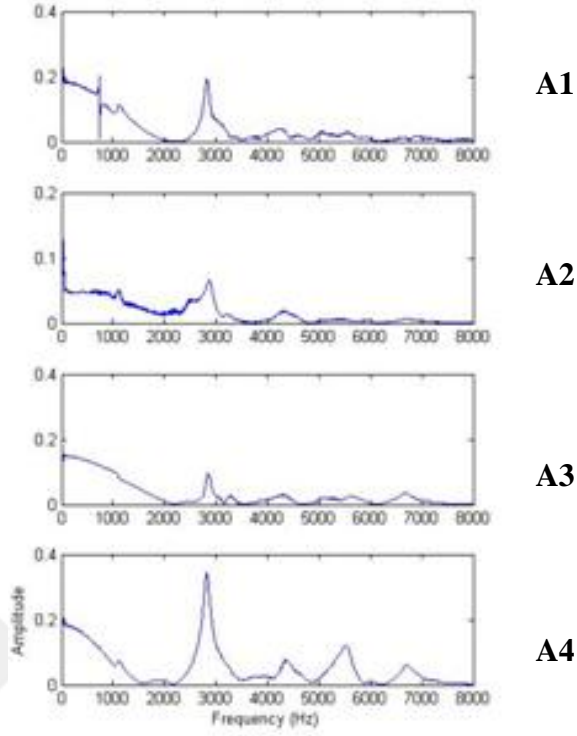
R100 panel

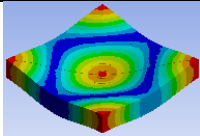
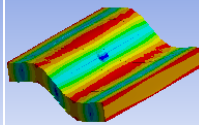
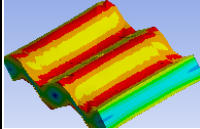


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1205	2773		4409	5648		6855
	A2	1112	2502	3239		5667		6975
	A3		2809	3322	4387			
	A4		2754	3313	4446	5561	5985	6975
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2606.3			 5580.4		 6386.9

Şekil 4.29. R100 – DSZ numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

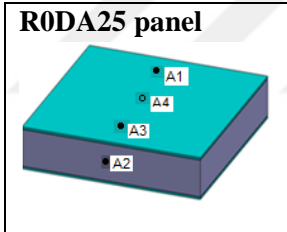
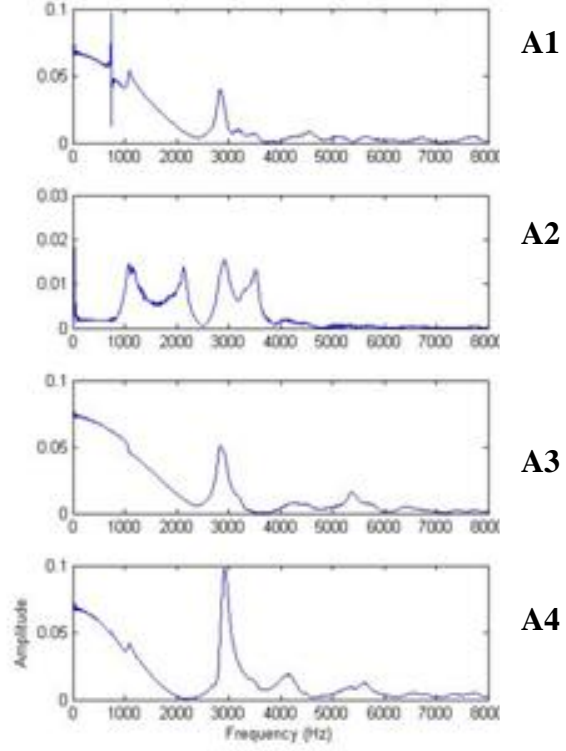
### R0DA10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

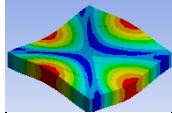


MODLAR		1	2	3	4	5
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1120	2833	4244		
	A2	1120	2880	4291		
	A3		2861	4278		6694
	A4		2827	4371	5536	6736
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2929	 4240		 6656.6

Şekil 4.30. R0DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

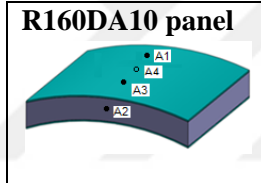
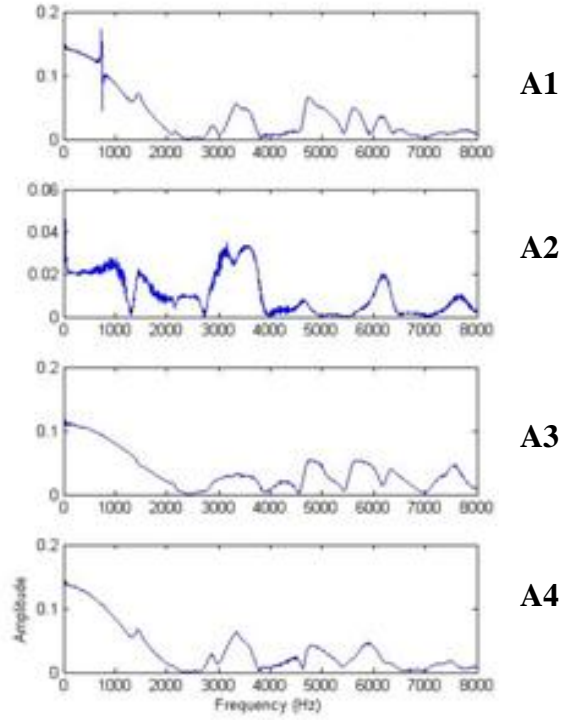
### R0DA25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

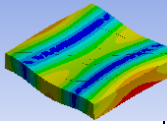
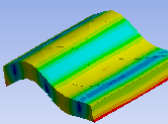
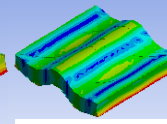
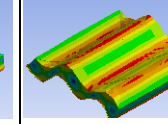


MODLAR		1	2	3	4	5	6
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1104		2840			
	A2	1087	2135	2919	3536		
	A3			2859			5383
	A4	1098		2914		4128	5605
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri				 2822.2			

Şekil 4.31. R0DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

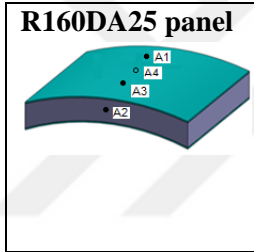
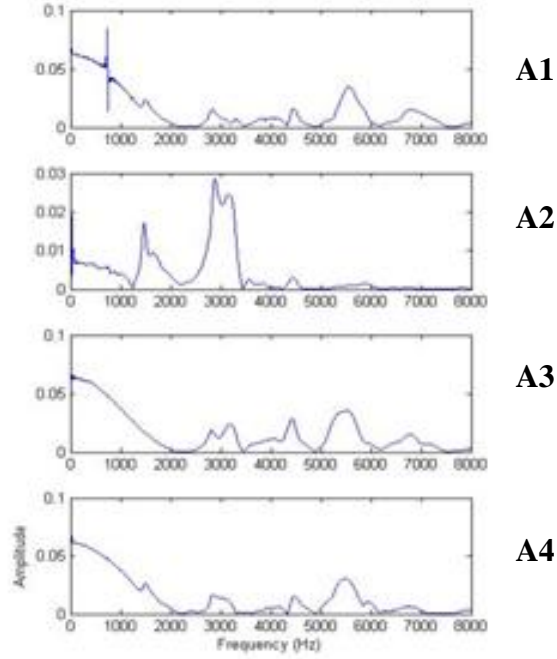
### R160DA10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

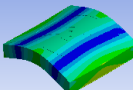
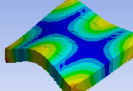
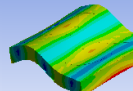
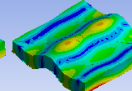
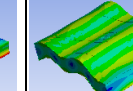


MODLAR		1	2	3	4	5
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1120	2833	4244		
	A2	1120	2880	4291		
	A3		2861	4278		6694
	A4		2827	4371	5536	6736
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2769.1	 4109.7	 5921.6	 6569.2

Şekil 4.32. R160DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

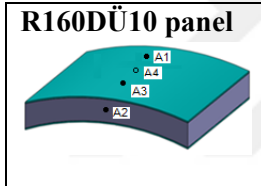
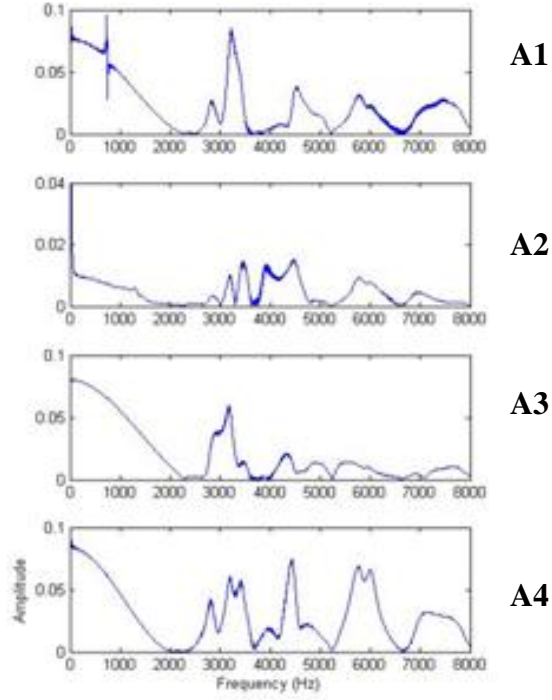
### R160DA25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

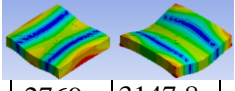
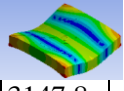
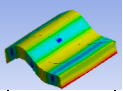
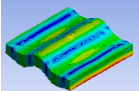
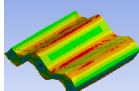


MODLAR		1	2	3	4	5	6
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1484	2831		4459	5566	6785
	A2	1472	2863	3171	4454		
	A3		2812	3184	4425	5490	6777
	A4		2852		4507	5458	
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2725.6	 3164.3	 4005.2	 5969	 6549

Şekil 4.33. R160DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

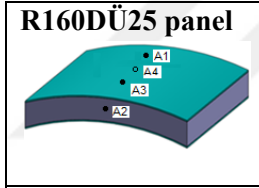
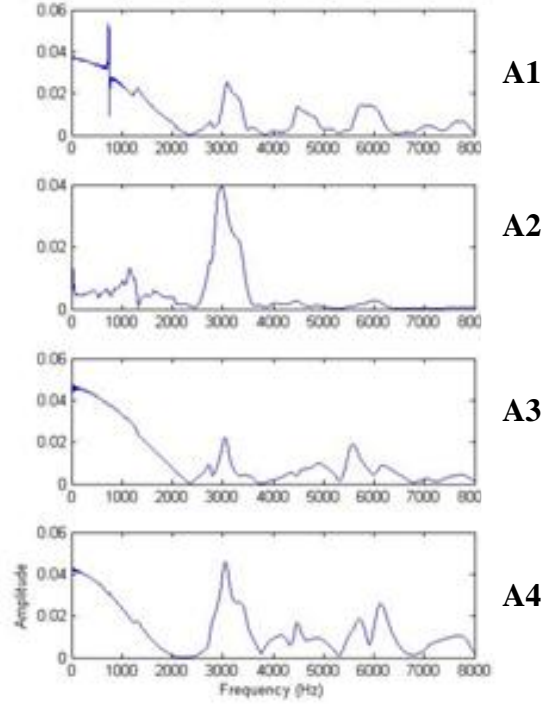
## R160DÜ10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

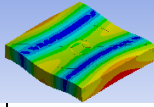
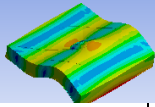
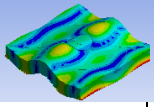
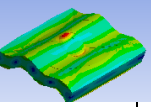


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8	9
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	2815	3225			4519		5771		
	A2	2854	3201	3448	3917	4456		5773		6941
	A3		3182			4314	4915	5514		
	A4	2793	3199	3406		4443		5770	6029	7173
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri		 2769.	 3147.8			 4111.		 5920.7		 6569.2

Şekil 4.34. R160DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

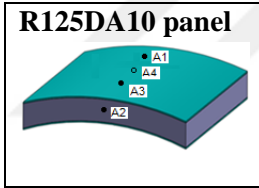
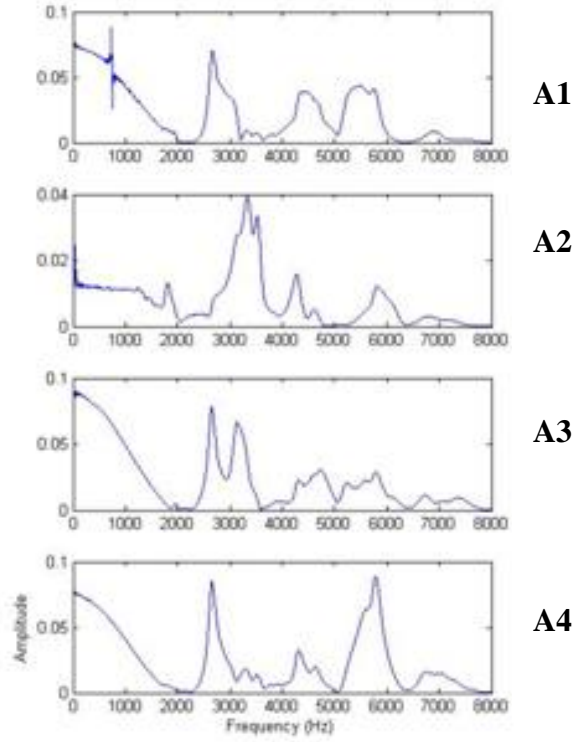
## R160DÜ25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

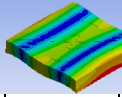
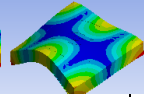
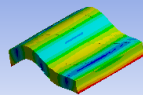
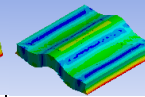
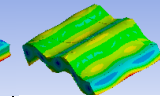


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1330	3086	4505		5793		
	A2	1153	2921					
	A3		3053		4892	5564	6152	
	A4		3053	4489		5695	6133	7628
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2766.4	 4030.3		 6004.8	 6549.8	

Şekil 4.35. R160DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

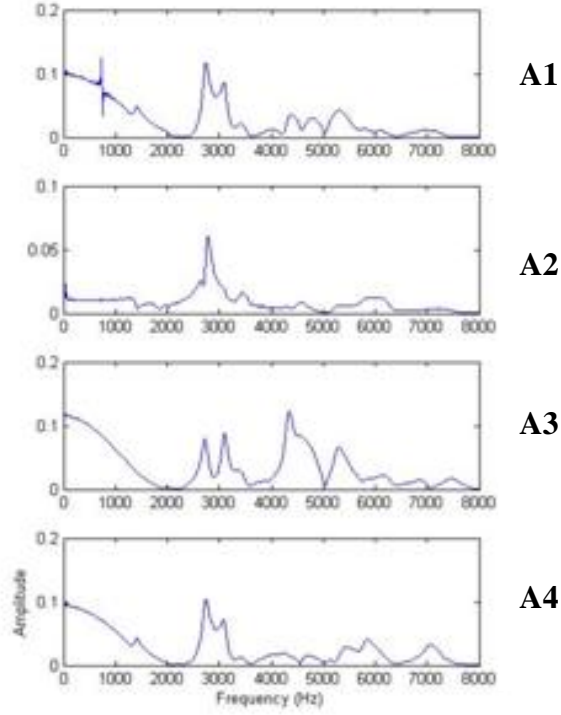
### R125DA10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



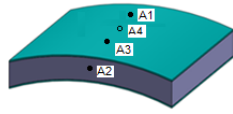
MODLAR		1	2	3	4	5	6	7
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1		2673			4376	5472	6881
	A2	1814		3352	3525	4301	5816	
	A3		2651	3146		4643	5790	6703
	A4		2654			4327	5800	6771
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri								
			2702	3109.8		4030.1	5787.5	6505

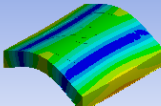
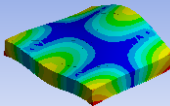
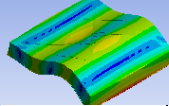
Şekil 4.36. R125DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

## R125DA25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



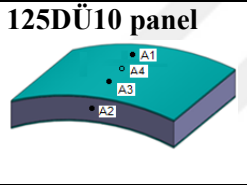
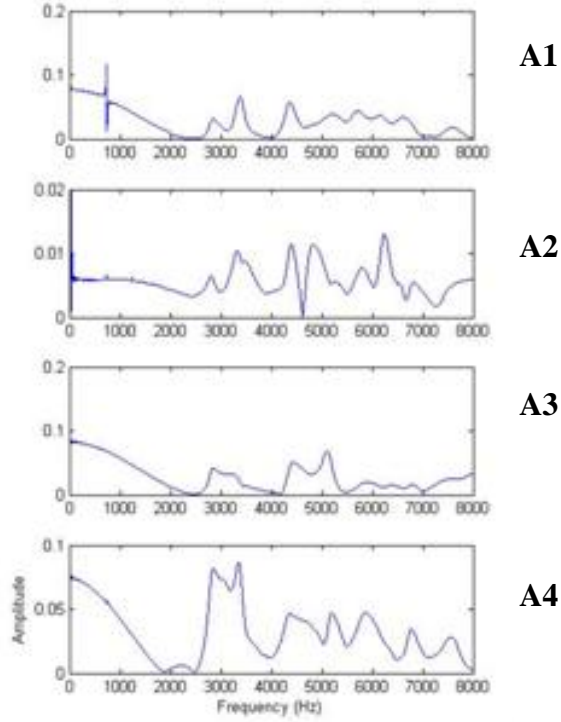
R125DA25 panel

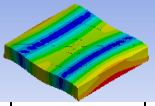
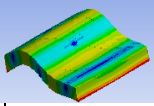
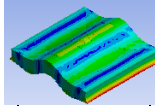
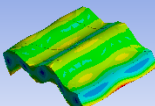


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	2740	3083	4389	4768	5309		
	A2	2777						
	A3	2738	3102	4337		5309		
	A4	2729	3085		4724		5842	7068
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri		 2675.3	 3098.8	 3951.5				

Şekil 4.37. R125DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

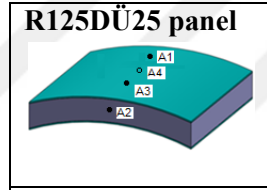
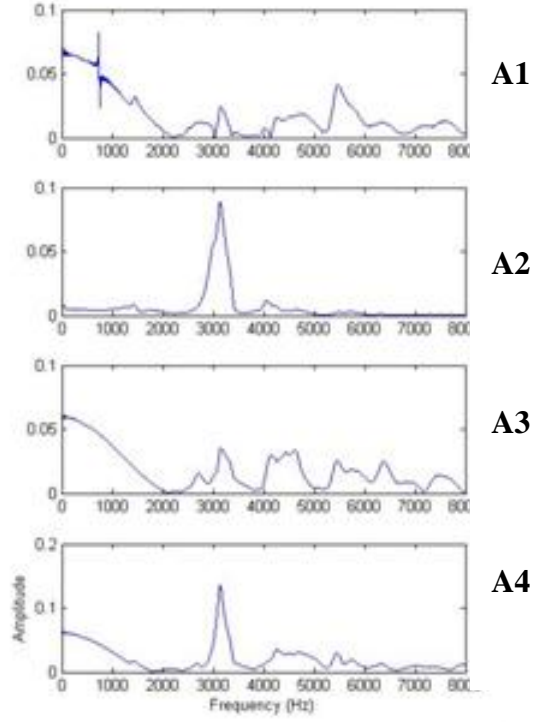
## R125DÜ10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	2848	3374	4372					
	A2	2814	3329	4393	4805	5803	6240	6831	
	A3	2836		4433	5111				
	A4	2833	3361	4353	5178	5872		6813	7559
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri		 2703	 4032.7	 5786.6	 6505				

Şekil 4.38. R125DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

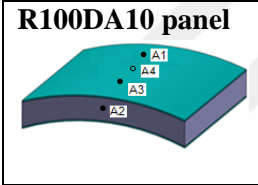
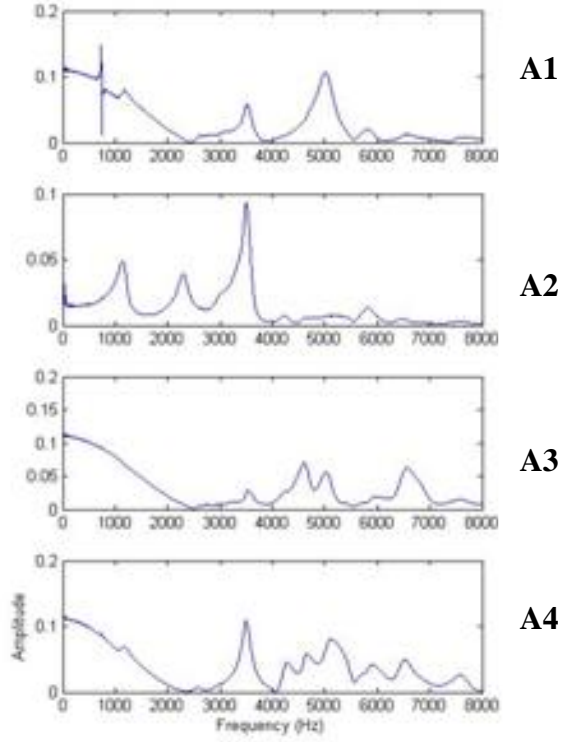
## R125DÜ25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

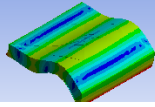
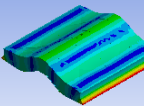
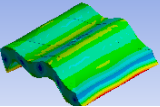


MODLAR		1	2	3	4	5	6
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	3158		4692	5467		7572
	A2	3141	4059				
	A3	3170		4461	5445	6367	7470
	A4	3130	4290		5454		
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri							

Şekil 4.39. R125DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

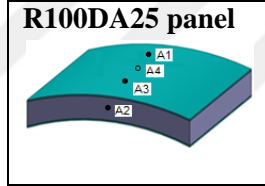
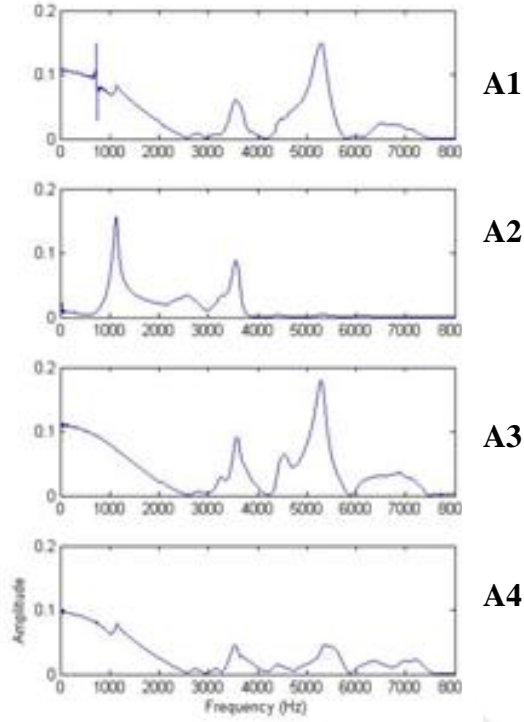
### R100DA10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

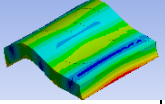
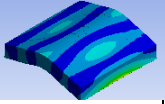
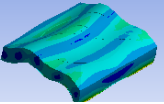


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1188		3516			5015	5814	
	A2	1137	2286	3514				5813	
	A3			3535	4596		5011		6557
	A4			3500	4277	4654	5156	5929	6537
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 3912.7				 5578.6	 6386.2	

Şekil 4.40 R100DA10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

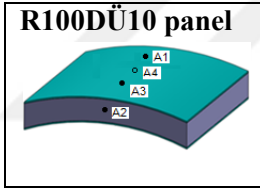
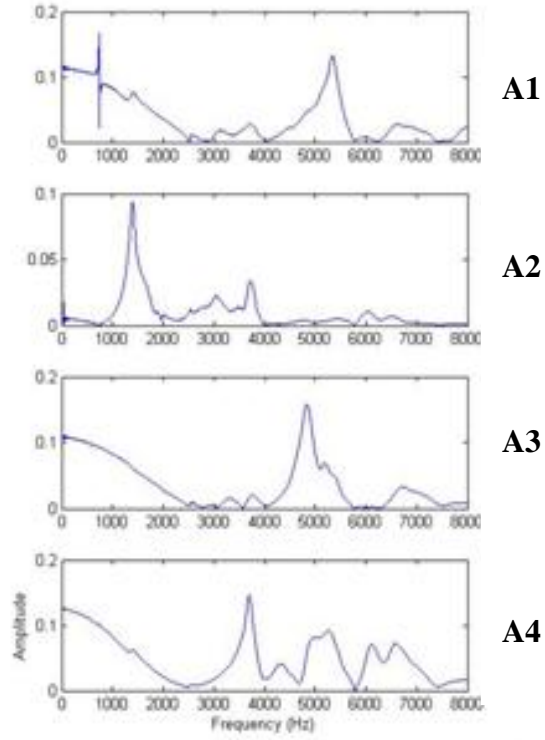
### R100DA25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



MODLAR		1	2	3	4	5
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1174	3557		5292	6801
	A2	1135	3560			
	A3		3571	4527	5284	6868
	A4	1146	3544		5337	6359
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 3839.8		 5482	 6370.2

Şekil 4.41. R100DA25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

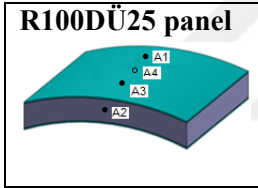
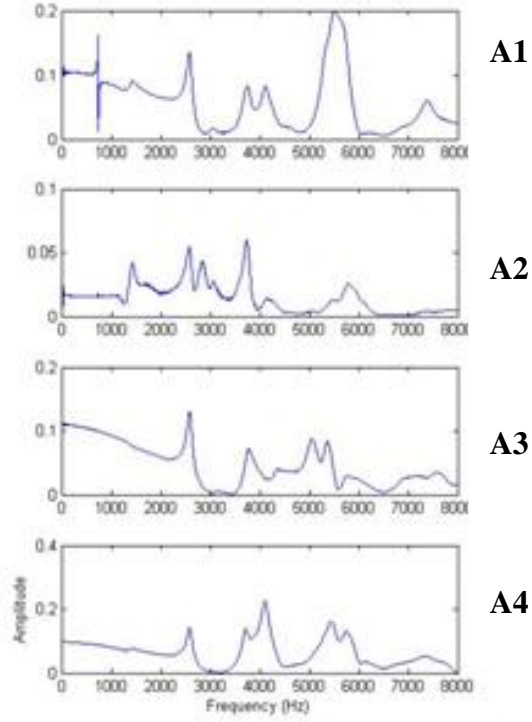
### R100DÜ10 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları

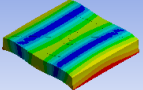
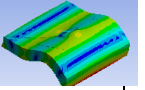
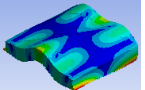


MODLAR		1	2	3	4	5	6	7
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1414	3102	3713		5342		6672
	A2	1401	3049	3719				
	A3		3322	3764	4836			6704
	A4			3700	4382	5257	6137	6579
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri				 3915.4	 4346.6	 5577.7		 6386.4

Şekil 4.42. R100DÜ10 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

## R100DÜ25 Numunelerde Serbest Titreşim Frekansları



MODLAR		1	2	3	4	5	6	7	8	9
İvme metreler kullanılarak bulunan frekanslar (Hz)	A1	1439	2586		3758	4123		5555		7398
	A2	1432	2589	2848	3736				5796	
	A3		2586		3783		5059	5376	5774	7490
	A4		2587		3719	4111		5489	5783	7333
ANSYS modal analiz sonucunda bulunan frekanslar ve mod şekilleri			 2605		 3849.6				 5761.5	

Şekil 4.43. R100DÜ25 numuneler için titreşim testi sonuçlarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

**Tablo 4.1.** Titreşim testlerinden bulunan serbest titreşim frekanslarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

Numune Adı	Mod	DeneySEL Sonuçlar (Hz)	ANSYS Sonuçları (Hz)	Fark %
R0-DSZ	2	2920	2929.7	0.33
	3	4300	4246.5	-1.24
	5	6764	6656.6	-1.59
R160-DSZ	2	2656	2769.9	4.29
	4	4154	4116.8	-0.90
	7	5559	5924.1	6.57
	8	6484	6569.3	1.32
R125-DSZ	2	2680	2703.1	0.86
	6	5188	5789.8	11.6
	9	6704	6505.2	-2.97
R100-DSZ	2	2502	2606.3	4.17
	5	5561	5580.4	0.35
	7	6855	6386.9	-6.83
R0DA10	2	2880	2929	1.7
	3	4244	4240	-0.09
	5	6694	6656.6	-0.56
R0DA25	3	2840	2822.2	-0.63
R160DA10	2	2833	2769.1	-2.26
	3	4244	4109.7	-3.16
	4	5536	5921.6	6.97
	5	6694	6569.2	-1.86
R160DA25	2	2812	2725.6	-3.07
	3	3171	3164.3	-0.21
	4	4425	4005.2	-9.49
	5	5566	5969	7.24
	6	6777	6549	-3.36
R160DÜ10	1	2793	2769.8	-0.83
	2	3182	3147.8	-1.07
	5	4314	4111.7	-4.69
	7	5771	5920.7	2.59
	9	6941	6569.2	-5.36
R160DÜ25	2	2921	2766.4	-5.29
	3	4489	4030.3	-10.22
	5	5793	6004.8	3.66
	6	6152	6549.8	6.47

**Tablo 4.1.** (Devamı) Titreşim testlerinden bulunan serbest titreşim frekanslarının ANSYS analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

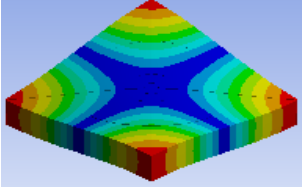
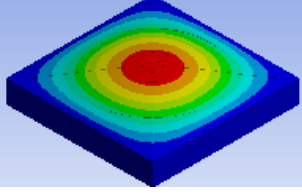
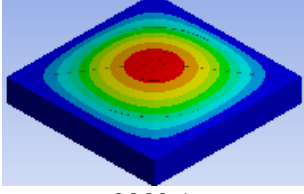
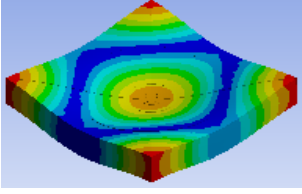
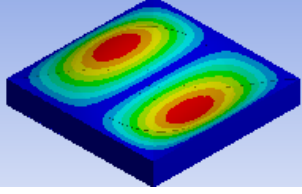
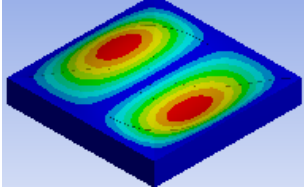
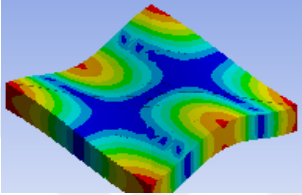
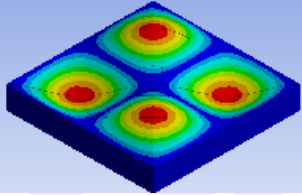
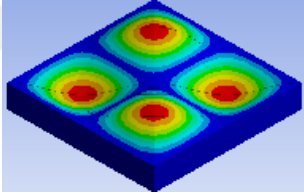
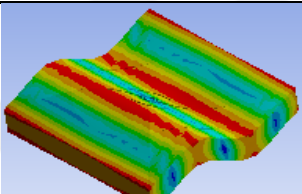
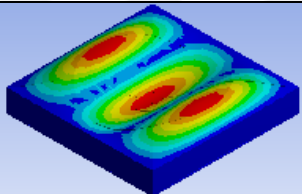
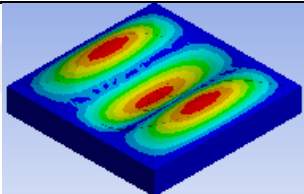
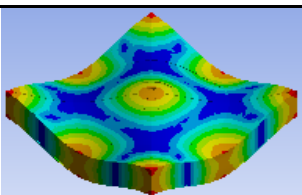
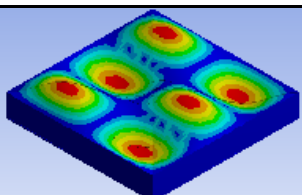
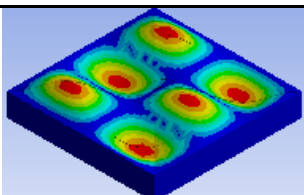
Numune Adı	Mod	Deneysel Sonuçlar (Hz)	ANSYS Sonuçları (Hz)	Fark %
R125DA10	2	2673	2702	1.08
	3	3146	3109.8	-1.15
	5	4301	4030.1	-6.30
	6	5790	5787.5	-0.04
	7	6703	6505	-2.95
R125DA25	1	2729	2675.3	-1.97
	2	3102	3098.8	0.10
	3	4337	3951.5	-8.89
R125DÜ10	1	2814	2703	-3.94
	3	4353	4032.7	-7.36
	5	5803	5786.6	-0.28
	7	6813	6505	-4.52
R125DÜ25	1	3170	3279.8	3.46
	2	4059	3958.9	-2.47
R100DA10	3	3535	3912.7	10.68
	7	5813	5578.6	-4.03
	8	6537	6386.2	-2.31
R100DA25	2	3571	3839.8	7.53
	4	5337	5482	2.72
	5	6359	6370.2	0.18
R100DÜ10	3	3764	3915.4	4.02
	4	4382	4346.6	-0.81
	5	5342	5577.7	4.41
	7	6579	6386.4	-2.93
R100DÜ25	2	2589	2605	0.62
	4	3783	3849.6	1.76
	8	5774	5761.5	-0.22

#### 4.2.1.Sınır Şartlarının Titreşim Cevabına Etkisi

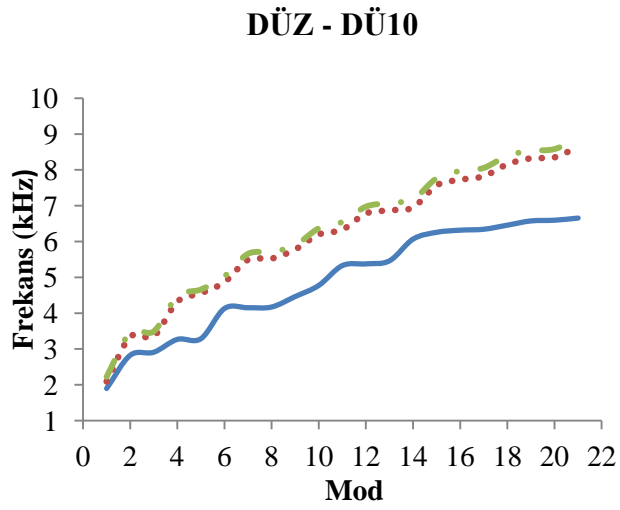
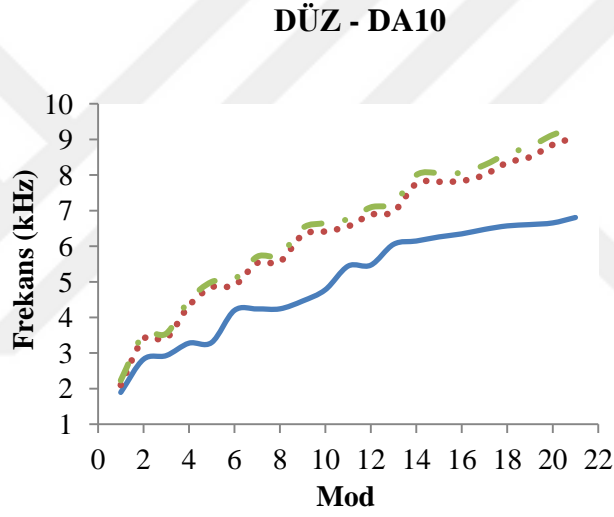
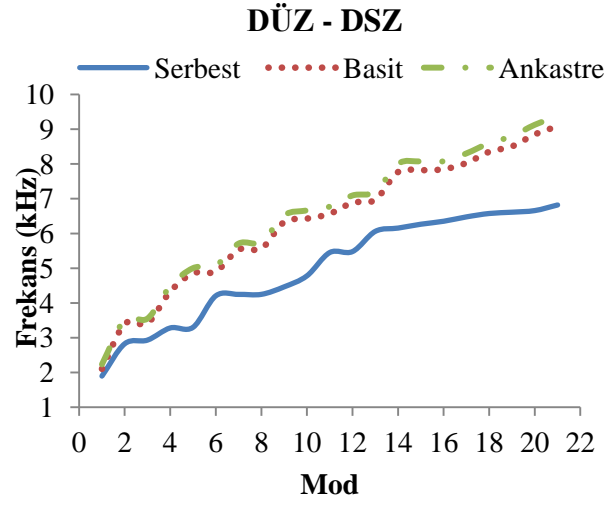
Şekil 4.44 de üç farklı sınır şartı için (tüm kenarlar serbest, tüm kenarlar basit mesnetli ve tüm kenarlar ankastre) düz ve delaminasyon içermeyen numunelerin doğal frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda ankastre ve basit mesnet şartını tüm numunelere eşit şekilde uygulayabilmenin getireceği zorluklar nedeniyle serbest sınır şartı ile çalışılmıştır. Ancak mevcut yapılarda serbest sınır şartı altında çalışma koşulu oluşturulamayabilir. İncelenen yapının bir bütünün parçası olma olasılığı o yapıyı serbest sınır şartından uzaklaştırır. Bu durumda basit ya da ankastre sınır şartı yaklaşımı daha gerçekçi olmaktadır. Şekil 4.44 de numunelerin sınır şartları değiştikçe doğal frekanslarının da değiştiği görülmektedir. Numunenin hareketi kısıtlandıkça yani serbestten basit mesnete, basit mesnetten ankastre mesnete geçişlerde doğal frekansı da artmıştır.

Mod tiplerine bakıldığında, serbest sınır şartlarında numune sonsuz serbestliğe sahip olduğu için mod yapıları beklenildiği gibi basit ya da ankastre mesnete göre oldukça farklıdır. Basit ve ankastre mesnet arasındaki mod şekillerinin aynı olması, numunelerin geometrik rijitliklerinden kaynaklanmaktadır

Şekil 4.45 da sınır şartlarındaki farklılığın, her farklı moddaki frekans değerlerini nasıl etkilediğini göstermek amacıyla delaminasyon içermeyen numuneler ile alt kabuk/köpük arasında 10 mm çaplı delaminasyon içeren düz numuneler için grafikler çizdirilmiştir. Temsili seçilen bu numunelerin ve diğer tüm numunelerin daha rijit tutturulmasıyla birlikte frekans değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

Mod	Sınır Şartları		
	Serbest	Basit Mesnetli	Ankastre Mesnetli
1	 1894.3	 2102.4	 2232.1
2	 2929.7	 3416.5	 3551.2
2	 3279.8	 4330.9	 4483.7
4	 4205	 4904.2	 5079.7
5	 4244.8	 5535.2	 5709.5

Şekil 4.44. Düz ve delaminasyon içermeyen numunelerin farklı sınır şartlarındaki doğal frekansları (Hz) ve mod şekilleri



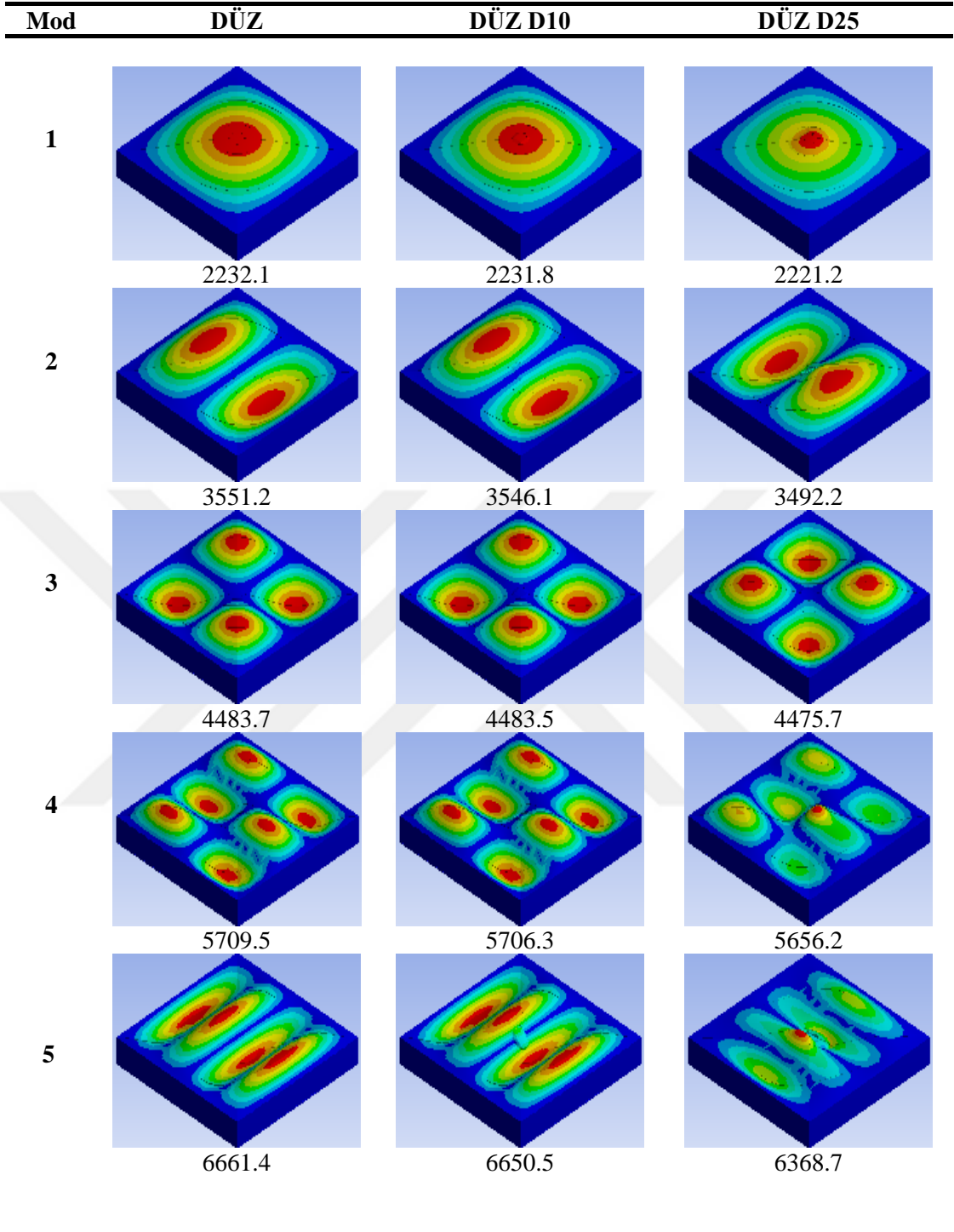
**Şekil 4.45.** Sınır şartlarının, 10 mm çaplı delaminasyon içeren ve içermeyen düz panellerde doğal frekansa etkisi

#### 4.2.2. Delaminasyon Boyutunun Titreşim Cevabına Etkisi

Şekil 4.46 da ankastre mesnetli düz numunelerde delaminasyon boyutunun titreşim cevabına etkisi görülmektedir. Delaminasyon içeren numunelerin doğal frekansları delaminasyonsuz numunelere göre düşük çıkmıştır ancak fark oldukça azdır. Delaminasyon boyutunun artmasıyla birlikte frekans değerlerinde önemli düşüşler görülmüştür. Tablo 4.2 de eğriselliği en fazla olan R100 numuneleri için delaminasyon boyutunun etkisi ortaya konulmuştur. Tablodan görüldüğü gibi, eğrisel numunelerde delaminasyon çapındaki artış doğal frekansı düşürmeye yönelik etkili olmuştur. 25 mm çaplı delaminasyonun varlığı delaminasyonsuz numunelere göre frekansı R100 numunelerinde maksimum %3.7, düz numunelerde ise maksimum %4.5 düşürmüştür.

**Tablo 4.2.** Ankastre mesnetli R100 numunelerinde delaminasyon boyutunun titreşim frekansına etkisi

Mod	R100	R100DA10	R100DA25
1	3773.1	3767.5	3710.5
2	3979.6	3978.5	3947.1
3	4939.2	4933.8	4879.2
4	5106.6	5106.4	5097
5	5300.7	5295.7	5103.4
6	6015.8	6014.3	5992.2



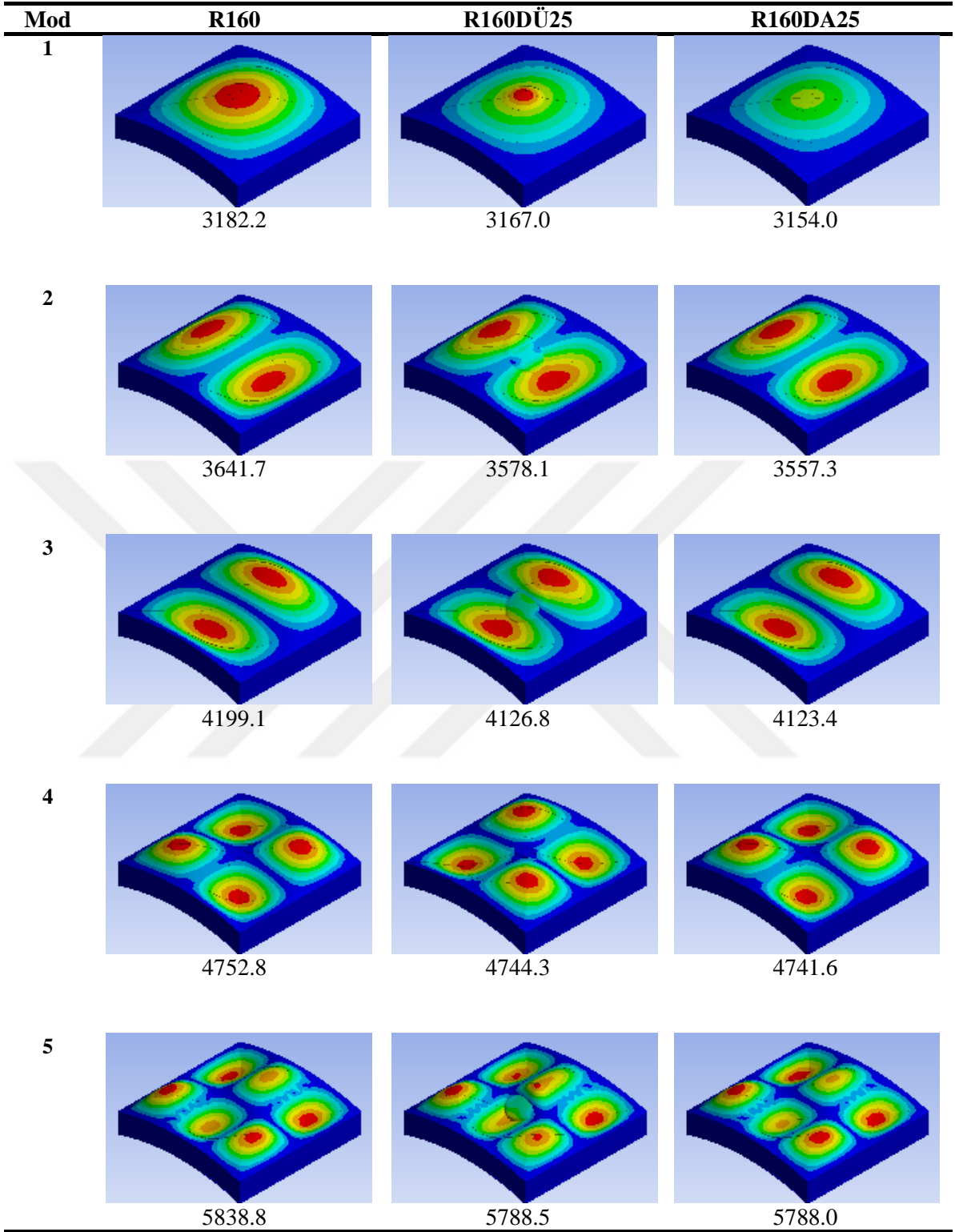
Şekil 4.46. Dört kenarından ankastre mesnetlenmiş düz numunelerde delaminasyon boyutunun titreşim cevabına etkisi

### 4.2.3. Delaminasyon Konumunun Titreşim Frekansına Etkisi

Delaminasyon çapındaki değişimin doğal frekansa etkisinin en fazla görüldüğü 25 mm çaplı R160 eğrilikli panel ele alınarak delaminasyon konumunun titreşim frekansına etkisi Şekil 4.47 de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, delaminasyonun altta olması, delaminasyonun olmadığı ve üstte olduğu durumlara kıyasla frekanslarda azalma meydana getirmiştir. Ayrıca R125 eğrilikli numunelerinin ele alındığı Tablo 4.3 deki sonuçlar da bu sonucu doğrular niteliktedir. Diğer numunelerde de aynı eğilim söz konusudur.

**Tablo 4.3.** Ankastre mesnetli R125 numunelerde delaminasyon konumunun titreşim frekansına etkisi

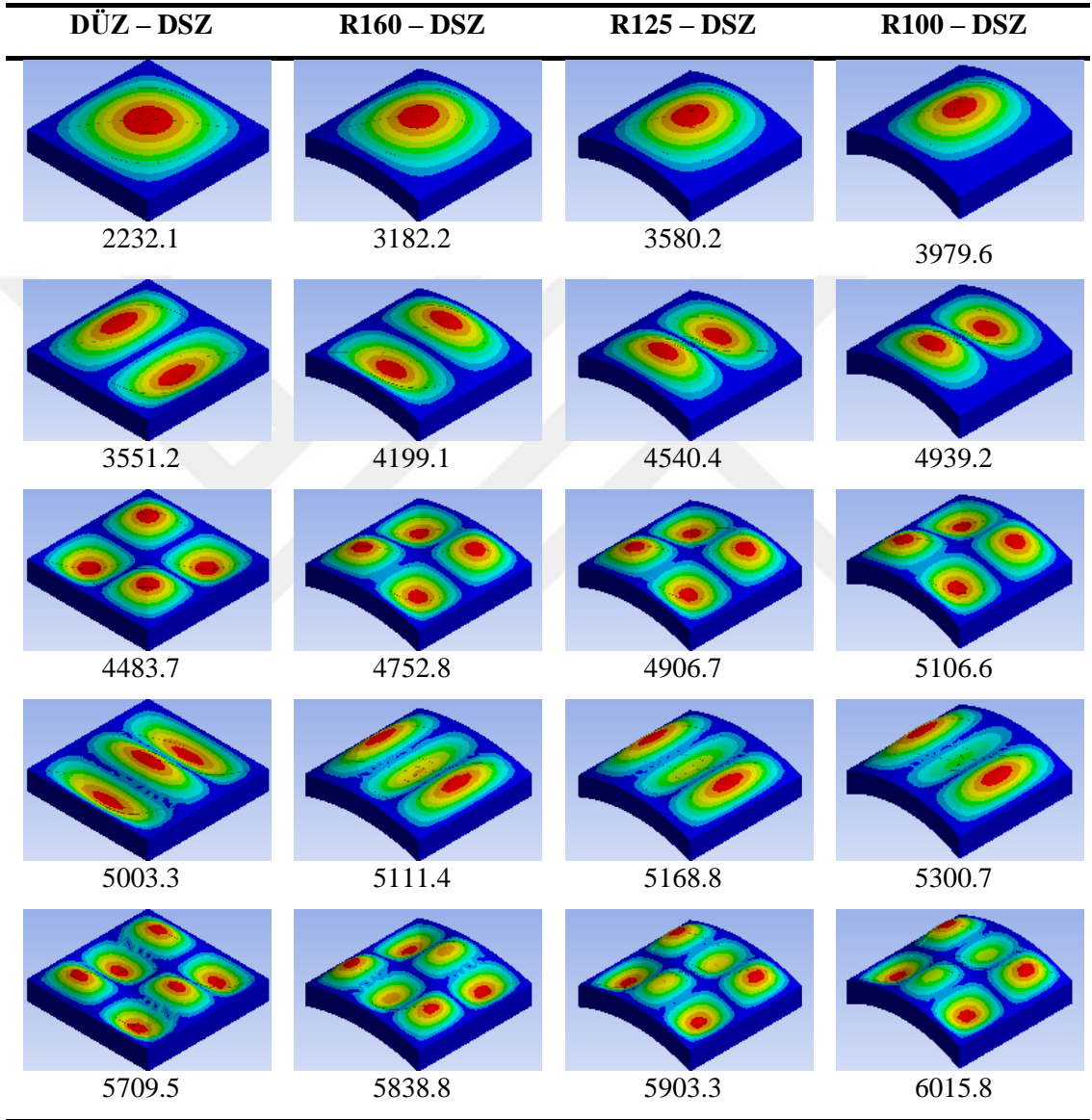
Mod	R125	R125DÜ25	R125DA25
1	3580.2	3561.7	3560.6
2	3697.7	3639.9	3632.3
3	4540.4	4468.4	4482.2
4	4906.7	4898.7	4897.2
5	5903.3	5863.1	5869.9



Şekil 4.47. Ankastre tutturulmuş R160 numunelerde delaminasyon konumunun titreşim frekansına etkisi

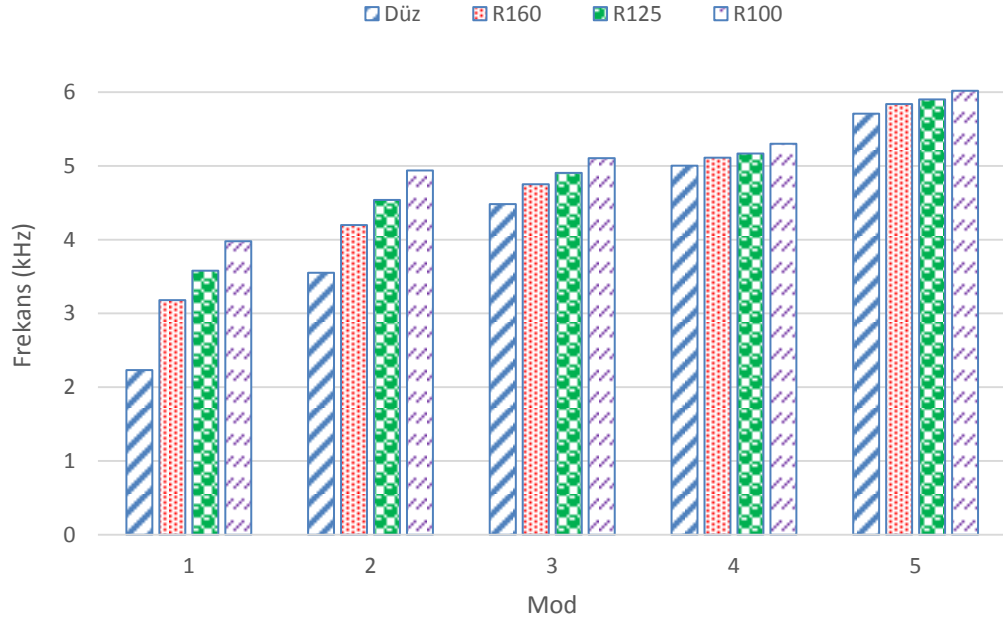
#### 4.2.4. Eğriliğin Titreşim Cevabına Etkisi

Şekil 4.48 de delaminasyon içermeyen numunelerde eğriliğin artmasının titreşim cevabına etkisi ortaya konulmuştur.



Şekil 4.48. Ankastrе tutturulmuş delaminasyon içermeyen numunelerde eğriliğin titreşim cevabına etkisi

Şekil 4.48 de görüldüğü gibi, eğriliğin artışıyla numunelerin rijitliğinin artması numunelerin doğal frekans değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu artış Şekil 4.49 da görülmektedir. Delaminasyonsuz numunelerdeki bu artış eğilimi delaminasyonlu numunelerde de gözlemlenmektedir.



Şekil 4.49. Eğriliğin titreşim cevabına etkisi

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı delaminasyonun sandviç plakaların darbe ve titreşim cevabına etkisini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda düz ve farklı eğriliklerde sandviç paneller üretilmiştir. Bu panellerin merkezinde alt kabuk/köpük ve üst kabuk/köpük ara yüzeyinde yapışmayan bölgeler teflon film kullanılarak oluşturulmuştur. Değişen enerji seviyelerinde darbe yükleri uygulanmıştır. Darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti-çökme eğrilerine bakılarak eğri ve düz, delaminasyon içeren ve içermeyen sandviç kompozit panellerin darbe cevabı belirlenmiştir. Eğri numuneler düz numunelerle, delaminasyon içermeyen numuneler ise delaminasyonlu numunelerle karşılaştırılmış ve hasar modları ortaya konmuştur.

Panellerin serbest titreşim frekanslarına ulaşmak için ivmemetrelerin kullanıldığı titreşim testleri yapılmıştır. Ansys Workbench 16.5 de serbest, tüm kenarlarından ankastre ve basit mesnetli tutturulmuş numunelerin modal analizleri gerçekleştirilmiş bulunan sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmadan darbe ve titreşim cevabına yönelik çıkarılabilecek temel sonuçlar iki başlık altında aşağıdaki gibi özetlenebilir.

### 5.1. Darbe Testi Sonuçları

- Düşük darbe enerjisinde (5 J) numunelerin hiçbirinde üst tabakada delinme meydana gelmemektedir.
- Düşük darbe enerjisine maruz düz numunelerde delaminasyon çapındaki değişim düz numunelerin darbe cevabında önemli değişikliğe neden olmamaktadır. Ancak düz numunelerde üst kabuk/köpük ve alt kabuk/köpük arasında yer alan delaminasyon temas kuvvetini ve temas kuvvetinin maksimum değerinde ortaya çıkan çökme miktarını artırır.

- Düşük darbe enerjisine maruz eğri panellerde panel eğriliği arttıkça delaminasyon içeren ve içermeyen paneller için bulunan maksimum temas kuvveti çökme eğrileri arasında fark belirgin ölçüdedir.
- Yüksek darbe enerjisinde vurucu tüm numunelerin üst kabuğunu delerek alt kabuğuna ulaşmıştır.
- Yüksek enerji seviyelerinde delaminasyon (teflon film) hangi yüzeydeyse o yüzeyin temas kuvveti delaminasyon boyutuyla birlikte artış gösterir.
- Düşük enerjili darbe durumunda eğri numunelerde delaminasyonun alt tarafta bulunması temas kuvvetini ve çökme miktarını üst kabuk/köpük ara yüzeyinde olmasına göre azaltır.
- Yüksek darbe enerji seviyelerinde üst kabukta bulunan delaminasyonun boyutu arttıkça üst yüzeyin temas kuvvetinde artış meydana gelir.
- Panellerde eğrilik arttıkça panellerin üst kabuğundaki temas kuvvetlerinde artış, alt kabuğundaki temas kuvvetlerinde ise düşüş görülür.
- Panel eğriliğindeki artış numunelerin maksimum temastaki orta nokta çökmesini ve delinme direncini arttırır.
- Temas kuvveti ve çökme değerleri, darbe enerjisinin artmasıyla birlikte artış gösterir.
- Delaminasyonun alt tarafta konumlandığı panellerde delaminasyon boyutunun artması ile üst yüzeyde meydana gelen hasar azalırken alt yüzeydeki hasar alanlarında artış meydana gelir. Delaminasyonun üst kabuk köpük ara yüzeyinde olması durumunda ise delaminasyon boyutu arttıkça alt kabuğun delinmeye olan direnci artar.

## **5.2. Titreşim Testi Sonuçları**

- Delaminasyonun varlığı, ankastre ve basit mesnetli tüm numunelerin titreşim frekansını düşürür.
- Tüm numunelerde delaminasyonun altta olması, delaminasyonun olmadığı ve üstte olduğu durumlara göre doğal frekansı azaltır.
- Numunelerin daha rijit tutturulmasıyla birlikte frekans değerlerinde artış olduğu görülür.

- Eğriliğin artışıyla birlikte delaminasyon içeren ve içermeyen tüm numunelerde rijitlik artışı meydana gelir. Bu rijitlik artışı ise numunelerin doğal frekansını arttırır.
- Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, delaminasyon içermeyen numunelerde maksimum %6.83 iken delaminasyon içeren numunelerde bu değer %10.68 e çıkmıştır.

### 5.3. Öneriler

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde ileride yapılacak çalışmalar için aşağıda sıralanan önerilerde bulunulmuştur.

- Değişen köpük ve kabuk kalınlığının ve malzeme özelliklerindeki değişimin darbe cevabını nasıl etkileyeceği incelenebilir.
- Eğri ve delaminasyonlu numuneler için daha fazla sayıda enerji seviyesinde darbenin uygulanacağı deneyler yapılarak enerji profil diyagramları çıkarılabilir.
- Darbe öncesi ve sonrası yapılacak deneylerle panel rijitlikleri ortaya konarak darbe cevabıyla ilişkilendirilebilir.
- Projede incelen parametrelerin farklı sıcaklıklardaki değişime bakılabilir.
- Vurucu geometrisi ve panel sınır şartlarındaki değişimin darbe cevabına etkisi incelenebilir.
- Bulunan darbe testi sonuçları, nümerik ya da analitik çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Abrate, S. Impact on laminated composite materials. *Applied Mechanics Review*. 1991, 44, 155-190.
2. Cantwell, W.J., Morton J. The impact response of composite materials. *Composites*. 1991, 22, 347-362.
3. Belingardi, G., Vadori, R. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2002, 27, 213-229.
4. Belingardi, G., Vadori, R. Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate. *Composite Structures*. 2003, 61, 27-38.
5. Aslan Z., Karakuzu, R., Okutan, B. The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composite Structures*. 2003, 59, 119-127.
6. Uyaner, M., Kara, M., Ataberk, N. Size Effect on Low Velocity Impact Behavior of Laminated E-Glass Composite. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, 7-9 Kasım, 2007, İstanbul, (Bildiriler Kitabı, 361-368).
7. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B. The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates”, *Composite Structures*. 2005, 67, 139-148.
8. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R. The influence of impactor shape on the damage to composite laminates. *Composite Structures*. 2006, 76, 116-122.
9. Yapıcı, İ., Yapıcı, A. An investigation of low velocity impact behavior of e-glass/epoxy laminated composites using finite element method. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2012, 1(2), 48-60.
10. Lin, H.J., Lee, Y.J. Impact induced fracture in laminated plates and shells. *Journal of Composite Materials*. 1990, 24, 1179-1199.

11. Palazotto, A., Perry, R., Sandhu, R. Impact response of graphite–epoxy cylindrical panels. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1992, 30(7), 1827–1832.
12. Kistler, L.S. Experimental Investigation of the Impact Response of Cylindrically Curved Laminated Composite Panels. 35. Yapılar, Yapı Dinamiği ve Malzemeleri Konferansı. 1994, A.B.D. (Bildiriler Kitabı, 1604).
13. Wardle, B.L., Lagace, P.A. Importance of instability in the impact response of composite shells. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1997, 35(2), 389-396.
14. Kim, S.J., Goo, N.S., Kim, T.W. The effect of curvature on the dynamic response and impact induced damage in composite laminates. *Composite Science and Technology*, 1997, 57, 763–773.
15. Ambur, D.R., Starnes, J.H. Effect of Curvature on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates. 39. Yapılar, Yapı Dinamiği ve Malzemeleri Konferansı. 1998, A.B.D. (Bildiriler Kitabı, 1881).
16. Kistler, L.S., Waas, A.M. Experiment and analysis on the response of curved laminated composite panels subjected to low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(9), 711-736.
17. Leylek, Z., Scott, M.L., Georgiadis, S., Thomson, R.S. Computer modeling of impact on curved fibre composite panels. *Composite Structures*, 1999, 47, 789–796.
18. Kim, Y.N., Yang, I.Y. Impact response and damage of composite shell with various curvatures. *Key Engineering Materials*, 2004, 270, 1911-1916.
19. Kumar, S., Rao, B.N., Pradhan B. Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007, 26(13), 1273-1290.

20. Kistler, L.S., Waas, A.M. On the response of curved laminated panels subjected to transverse impact loads. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36, 1311-1327.
21. Saghafi, H., Minak, G., Zucchelli, A. Effect of preload on the impact response of curved composite panels. *Composites: Part B*, 2014, 60, 74–81.
22. Olsson R., Donadon M.V., Falzon B.G. Delamination threshold load for dynamic impact on plates. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43, 3124–3141.
23. Zheng D., Binienda W.K. Effect of permanent indentation on the delamination threshold for small mass impact on plates. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44, 8143–8158.
24. Chakraborty D. Delamination of laminated fiber reinforced plastic composites under multiple cylindrical impact. *Materials and Design*, 2007, 28, 1142–1153.
25. Amaro A.M., Reis P.N.B., Moura M.F.S.F., Neto M.A. Influence of open holes on composites delamination induced by low velocity impact loads. *Composite Structures*, 2013, 97, 239–244.
26. Zabala H., Aretxabaleta L., Castillo G., Urien J. ve Aurrekoetxea J. Impact velocity effect on the delamination of woven carbon–epoxy plates subjected to low-velocity equienergetic impact loads. *Composites Science and Technology*, 2014, 94, 48–53.
27. Baba, B.O. Impact response of sandwich beams with various curvatures and debonds. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2013,15(2),137-155.
28. Palazotto, A.N., Herup, E.J., ve Gummadi, L.N.B. Finite element analysis of low-velocity impact on composite sandwich plates. *Composite Structures*, 2000, 49(2), 209-227.

29. Meo, M., Vignjevic, R., Marengo, G. The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005, 47(9), 1301-1325.
30. Kiratisaevee, H., Cantwell, W.J. Low-velocity impact response of high-performance aluminum foam sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2005, 24(10), 1057-1072.
31. Lee, J.H., Cheong, S.K., Shin, K.H. Impact characteristics of a honeycomb sandwich panel. *Key Engineering Materials*, 2006, 326-328, 1761-1764.
32. Gordon, S., Boukhili, R. Low velocity impact characterization of a foam core composite sandwich with an E-glass fabric/vinyl ester laminates skins. *Design, Manufacturing and Applications of Composites*. 2008, Japonya, (Bildiriler Kitabı, 171-178).
33. Vaidya, A.S., Vaidya, U.K., Uddin, N. Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, 472(1-2), 52-58.
34. Wang, D.M. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 2009, 36(1), 110-114.
35. Atas, C., Sevim C. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. *Composite Structures*. 2010, 93(1), 40-48.
36. Nasirzadeh, R., Sabet, A.R. Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2013, 63, 129-139.
37. Rajaneesh, A., Sridhar, I., Rajendran, S. Impact modeling of foam cored sandwich plates with ductile or brittle faceplates. *Composite Structures*. 2012, 94, 1745–1754.

38. Wang, J., Waas, A.M., Wang, H. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Composite Structures*. 2013, 96, 298–311.
39. Ivañez, I., Santiuste, C., Barbero, E., Sanchez-Saez, S. Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact. *Composite Structures*. 2011, 93, 2392–2399.
40. Schubel, P.M., Luo, J.J., Daniel, I.M. Impact and post impact behavior of composite sandwich panels. *Composites: Part A*. 2007, 38, 1051–1057.
41. Leijten, J., Bersee, H.E.N., Bergsma, O.K., Beukers, A. Experimental study of the low-velocity impact behaviour of primary sandwich structures in aircraft. *Composites: Part A*. 2009, 40, 164–175.
42. Srivastava, V.K. Impact behaviour of sandwich GFRP-foam-GFRP composites. *International Journal of Composite Materials*. 2012, 2(4), 63-66.
43. Hazizan, A., Cantwell, W.J. The low velocity impact response of foam-based sandwich structures. *Composites: Part B*. 2002, 33, 193-204.
44. Foo, C.C., Chai, G.B., Seah, L.K. A model to predict low-velocity impact response and damage in sandwich composites. *Composites Science and Technology*. 2008, 68, 1348–1356.
45. Shen, J., Lu, Gu., Wang, Z., Zhao, L. Experiments on curved sandwich panels under blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2010, 37, 960-970.
46. Hause T., Librescu L. Dynamic response of doubly-curved anisotropic sandwich panels impacted by blast loadings. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44, 6678–6700.
47. Gao Y., Fatt M.S.H. Local facesheet pulse buckling in a curved, composite sandwich panel. *Composite Structures*, 2013, 104, 249–260.
48. Senthil K., Arockiarajan A., Palaninathan R., Santhosh B. ve Usha K.M. Investigations on adhesively bonded curved CFRP panels with closed

- debonds subjected to compressive load. *Thin-Walled Structures*, 2014, 85, 367–376.
49. Baba, B.O., Thoppul, S., Gibson, R.F. Experimental and numerical investigation of free vibrations of composite sandwich beams with curvature and debonds. *Experimental Mechanics*. 2011, 51, 857–868.
50. Wang, B., Yang, M. Damping of honeycomb sandwich beams. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, 105, 67-72.
51. Khare, R.K., Kant, T., Garg, A.A. Free vibration of composite and sandwich laminates with a higher-order facet shell element. *Composite Structures*. 2004, 65, 405–418.
52. Ercopur, T., Kiral, B.G. Investigation of free vibration response of E-glass/epoxy delaminated composite plates. *Advance Composite Letters*. 2012, 21(1):5-15.
53. Maheri, M.R., Adams, R.D. Steady state flexural vibration damping of honeycomb sandwich beams. *Composite Science and Technology*. 1994, 52, 333-347.
54. Aydınçak, I. Investigation of Design and Analyses Principles of Honeycomb Structures. ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2007, 177s. (Yüksek Lisans Tezi).
55. Ooijevaar, T.H., Loendersloot, R., Warnet, L.L., Boer, A., Akkerman, R. Vibration based Structural Health Monitoring of a composite T-beam. *Composite Structures*. 2010, 92, 2007–2015.
56. Dai, G., Zhang, W. Cell size effects for vibration analysis and design of sandwich beams. *Acta Mechanical Science*. 2009, 25, 353-365.
57. Kim, H.Y., Hwang, W. Effect of debonding on natural frequencies and frequency response functions of honeycomb sandwich beams. *Composite Structures*. 2002, 55, 51-61.

58. Li, Z., Crocker, M.J. Effects of thickness and delamination on the damping in honeycomb-foam sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, 294, 473-485.
59. Ataş C. Kompozit Üretim Teknikleri Ders Notları. Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir, 2015.
60. <http://symbiosisonlinepublishing.com/nanoscience-technology/nano-science-technology04.php>, 20 Mayıs 2015.
61. Tortoç A. Balsa / Pvc sandviç yapılarda kırılma tokluğu etkisinin nümerik çalışması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı, İzmir, 2009, 55s. (Yüksek Lisans Tezi).
62. DIAB Guide to Core and Sandwich Rev.1, 2012 Aralık, [www.diabgroup.com](http://www.diabgroup.com)
63. Kolat, K. Farklı Ortamların Sandviç Kompozitlerin Kırılma Tokluğu üzerindeki Etkisi. . Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı, İzmir, 2005, 70s. (Yüksek Lisans Tezi).
64. Ceyhun V., Turan M. Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 2003, 44(516) , 35-41.
65. Sjoblem, P.O., Hartness, J.T. ve Cordell, T.M. On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1988, 22, 30-52.
66. Shivakumar, K.N., Elber, W. Ve Illg, W. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, *AIAA Journal*, 1988, 23(3), 442-449.
67. Cntwell, W.J. ve Morton, J. Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP. *Composite Structures* 1989, 12, 39-59.

68. Abrate, S. Impact on laminated composite materials. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4), 155-190.
69. Kara, M. Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2012, 141s. (Doktora Tezi)
70. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mekanik Titreşimler Deneysel Notları ([http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14\\_03\\_00\\_0cdce.pdf](http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_03_00_0cdce.pdf))
71. Mead D. J. ve Pretlov A. J. On the Vibrations of Cylindrically Curved Elastic Sandwich Plates. Her Majesty's Stationery Office, London, UK, 1964, 52 s.
72. Demir C. Yıldız Teknik Üniversitesi Mekanik Titreşimler Ders Notları
73. Gatzwiller, K., Herlufsen, H., Application Notes, Brüel&Kjaer, Denmark.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Melis YURDDAŞKAL

Doğum Yeri ve Yılı : Üsküdar, 1988

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : melis.badir@cbu.edu.tr

### Eğitim Durumu

Lise : Hayrullah Kefoğlu Anadolu Lisesi, 2006

Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 2012

Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

### Mesleki Deneyim

Arş. Gör. Celal Bayar Üniversitesi 2012 - (halen)