T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI ÇEKİRDEK MALZEMESİNE SAHİP KOMPOZİT SANDVİÇ PANELLERİN DARBE VE DARBE SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hazırlayan
Emre LEKESİZCAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2022
KAYSERİ

T.C
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI ÇEKİRDEK MALZEMESİNE SAHİP KOMPOZİT SANDVİÇ PANELLERİN DARBE VE DARBE SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Emre LEKESİZCAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

Şubat 2022
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Emre LEKESİZCAN

“Farklı Çekirdek Malzemesine Sahip Kompozit Sandviç Panellerin Darbe Ve Darbe Sonrası Basma Davranışlarının İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Danışman**
Emre LEKESİZCAN	Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük katkıları olan, bana yol gösteren ve hiçbir konuda desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yüksek lisans ders dönemimde, bilgisinden ve tecrübesinden faydalandığım Sayın Doç.Dr. Munise Didem DEMİRBAŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan ,sabır ve anlayış gösteren eşim Büşra LEKESİZCAN'a teşekkür ederim.

Emre LEKESİZCAN

Kayseri, Şubat 2022

FARKLI ÇEKİRDEK MALZEMESİNE SAHİP KOMPOZİT SANDVİÇ PANELLERİN DARBE VE DARBE SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Emre LEKESİZCAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek lisans Tezi, Şubat 2022
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

ÖZET

Sandviç yapılar, yapıştırma tekniği ile birleştirilmiş plakalar ve çekirdek malzemelerden oluşur. Bir sandviç yapı, düşük mukavemetli ve yüksek enerji emme kabiliyetine sahip çekirdek malzeme, yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip üst ve alt ince metal levhalarla takviye edilir. Kompozit sandviç yapılar, yüksek düzlem içi ve eğilme rijitlikleri, iyi akustik ve ısı yalıtımı, iyi korozyon direnci, yüksek enerji absorpsiyon kabiliyeti özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrileri, deniz endüstrileri, otomotiv, inşaat mühendisliği ve ulaşım endüstrisi gibi yüksek performanslı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, farklı polimerik çekirdek yapılarından oluşan yüzey plakası karbon fiber takviyeli kompozit olan sandviç yapıların darbe ve darbe sonrası davranışları incelenmiştir. Özellikle mühendislik uygulamalarına yeni giren kapalı hücre yapısına sahip polipropilen köpük çekirdeğin uygulamadaki diğer polimerik çekirdek yapılarına karşı performansı araştırılmıştır. Üç farklı darbe enerjisine maruz bırakılan sandviç paneller, aldıkları hasar sonrası hasar toleranslarının ve yük taşıma kabiliyetlerinin belirlenmesi için darbe sonrası basma testlerine maruz bırakılmıştır. Darbe sonrası basma testleri sırasında hasar mekanizmasının, oluşumunun ve ilerlemesinin tam olarak anlaşılabilmesi için akustik ölçümler yapılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak, polipropilen köpük ve balpeteği, PVC ve XPS köpük kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sandviç Panel; Karbon Fiber Kompozitler; Darbe Davranışı; Darbe Sonrası Basma Davranışı; Polimer Esaslı Çekirdekler

LOW VELOCITY IMPACT AND AFTER IMPACT COMPRESSION BEHAVIOR OF COMPOSITE SANDWICH PANELS WITH DIFFERENT CORE MATERIALS

Emre LEKESİZCAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, February 2022
Supervisor: Assist. Prof. Umut ÇALIŞKAN

ABSTRACT

Sandwich structures consist of plates and core materials joined by bonding technique. A sandwich structure is reinforced with core material of low strength and high energy absorption ability, top and bottom thin metal sheets with high strength and ductility. Composite sandwich structures are widely used in high performance applications such as aerospace industries, marine industries, automotive, civil engineering and transportation industries due to their high in-plane and bending stiffness, good acoustic and thermal insulation, good corrosion resistance, high energy absorption ability.

In this study, impact and after-impact behavior of sandwich structures with surface plate carbon fiber reinforced composite consisting of different polymeric core structures were investigated. Especially, the performance of polypropylene foam core with closed cell structure, which is new to engineering applications, against other polymeric core structures in practice was investigated. Sandwich panels, which were exposed to three different impact energies, were subjected to post-impact compression tests in order to determine their damage tolerances and load-bearing capabilities. During the post-impact compression tests, acoustic measurements were made to fully understand the damage mechanism, formation and progression. Polypropylene foam and honeycomb, PVC and XPS foam were used as core material.

Keywords: Sandwich panel; Carbon Fiber Composites; Impact Behavior; After Impact Compression Behavior; Polymer Based Cores

İÇİNDEKİLER

FARKLI ÇEKİRDEK MALZEMESİNE SAHİP KOMPOZİT SANDVİÇ PANELLERİN DARBE VE DARBE SONRASI BASMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
GİRİŞ 1

1 BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1 Problemin Durumu 2
1.2 Araştırmanın Amacı 3
1.3 Kompozitler 3
1.3.1 Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitler 4
1.3.2 Vakum Destekli Reçine Kalıplama 5
1.3.3 Tabakalı Yapısal Kompozitler 7
1.3.3.1 Sandviç Yapılar 7
1.3.3.1.a Alt ve Üst Plakalar 7
1.3.3.1.b Çekirdek Malzemeler 8
1.3.3.1.c Yapıştırıcı Malzeme 9

1.3.4 Sandviç Yapıların Kullanım Yerleri 9
1.3.5 Sandviç Yapıların Avantaj ve Dezavantajları 10
1.4 Literatür Araştırması 11

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1 Kompozit Sandviç Panellerin Üretimi 16
2.2 Düşük Hızlı Darbe Testi 23
2.3 Darbe Sonrası Basma Testi 25

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1 Düşük Hızlı Darbe Davranışları 29
3.2 Darbe Sonrası Basma Davranışları 39

4. BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç ve Öneriler 58

KAYNAKLAR 62
ÖZGEÇMİŞ 67

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

Sembol	Anlamı
°	Derece
ASTM	American Society for Testing and Materials
AE	Akustik Emisyon
dB	Desibel
C	Karbon
CAI	Darbe sonrası basma mukavemeti
CFRP	Karbon fiber takviyeli plastik
GPa	Giga pascal
H	Hidrojen
HC	Honey Comb
J	Joule
Kg	Kilogram
Kcal	Kilokalori
kN	Kilo Newton
MPa	Mega Pascal
m	Metre
mm	Milimetre
ms	Mili Saniye
NDT	Tahribatsız muayene
PP	Polipropilen
PMI	Polimetakrilamid
PVC	Polivinil klorür
s	Saniye
XPS	Eksturde Edilmiş Polistiren Köpük

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı fiber malzemelerin mekanik özellikleri 5
Tablo 1.2. Bazı yüzey plakaların mekanik özellikleri 8
Tablo 2.1. Numunelerin isimlendirilmesi 24

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması 4
Şekil 1.2. Kompozitlerin matris elemanına göre sınıflandırılması 4
Şekil 1.3. Vakum infüzyon yöntemi 6
Şekil 1.4. Sandviç panel genel yapısı 7
Şekil 2.1. Sandviç kompozitin geometrik boyutları 16
Şekil 2.2. Çalışmalarda kullanılan çekirdek malzemeler 17
Şekil 2.3. Araldite 2015 epoksi tüpü ve Araldite 2000 epoksi tabancası 19
Şekil 2.4. Vakum infüzyon prosesi 20
Şekil 2.5. Karbon fiber yüzey plakaları,PP köpük ve yapıştırıcı uygulaması 21
Şekil 2.6. Parafin sürülmüş kalıp yüzeylerle sandviçin kapatılması 22
Şekil 2.7. Ceast Fractovis Plus darbe test cihazı 24
Şekil 2.8. Numunenin sabitlenmesi 25
Şekil 2.9. Universal çekme-basma test cihazı 26
Şekil 2.10. Darbe sonrası basma testleri ve akustik emisyon analizi 27
Şekil 2.11. Akustik ölçüm testlerinde kullanılan sensör-yükseltici 27
Şekil 3.1. Farklı çekirdek malzemelere sahip kompozit sandviç panellerin 25,50 ve75 j darbe enerjileri altındaki temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji - zaman grafikleri 31
Şekil 3.2. PP köpük ve bal peteği çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25,50 ve 75 j darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri 33
Şekil 3.3. PVC ve XPS köpük çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25,50 ve 75 j darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri 34
Şekil 3.4. Köpük kalınlığı 15 ve 30 mm olan PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin 25,50 ve 75 j darbe enerjileri için temas kuvveti ve kinetik enerji-zaman grafikleri 35
Şekil 3.5. 15 ve 30 mm köpük kalınlığına sahip PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin 25,50 ve 75 j darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri 38

Şekil 3.6. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25,50 ve 75 j darbe enerjisi için en yüksek temas kuvveti değerlerinin karşılaştırılması 39
Şekil 3.7. Darbe testi uygulanmamış,25,50 ve 75 j darbe enerjisine maruz kalmış farklı çekirdek yapılarına sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma davranışları - kuvvet-yer değiştirme eğrileri 40
Şekil 3.8. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma sonrası kritik yük değerlerinin karşılaştırılması 41
Şekil 3.9. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma sonrası kritik yük değerlerindeki azalışın karşılaştırılması 42
Şekil 3.10. Darbe testi uygulanmamış ,25,50 ve 75 j darbe enerjisine maruz kalmış 15 ve 30 mm çekirdek kalınlığa sahip PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma davranışları-kuvvet-yer değiştirme eğrileri 44
Şekil 3.11. PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t,yüzey plakasının ilk kırıldığı süre,d, yüzey plakasının ilk kırılma anındaki dikey formasyon) 46
Şekil 3.12. PP bal peteği çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t,yüzey plakasının ilk kırıldığı süre,d, yüzey plakasının ilk kırılma anındaki dikey formasyon) 48
Şekil 3.13. PVC köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t,yüzey plakasının ilk kırıldığı süre,d, yüzey plakasının ilk kırılma anındaki dikey formasyon) 50
Şekil 3.14. XPS köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t,yüzey plakasının ilk kırıldığı süre,d, yüzey plakasının ilk kırılma anındaki dikey formasyon) 52
Şekil 3.15. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan ve 75 j darbe enerjisi sonrası basma testlerinde kuvvet-yer

değiştirme ile akustik ölçümlerin karşılaştırılması ve yatay yer değiştirmeleri 54

Şekil 3.16. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan basma testi sırasında yapılan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırılması 56

Şekil 3.17. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin 75 j darbe sonrası basma testi sırasında yapılan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırılması 57

GİRİŞ

Her geçen gün farklı uygulama alanlarında kullanılan yeni bir kompozit malzeme ile karşılaşmaktayız. Kompozitlerin ilk örnekleri antik çağlara kadar uzanmaktadır. Antik çağlardan beri insanlar kırılgan malzemelerin içerisine hayvansal veya bitkisel kaynaklı lifler ekleyerek bu kırılgan malzemeleri güçlendirmeye çalışmışlardır. Bu ilk kompozitler çamur içine karıştırılan saman ve saplardan oluşan kerpiçtir.

Geçmişte olduğu gibi gelecekte de ihtiyaç duyulan ürün için en doğru malzemeyi üretme fikri devam edecektir. Kompozit malzemelerin birçoğu insanlık tarihi boyunca bilinmesine ve genellikle inşaat alanında ilkel olarak kullanılmasına rağmen ilk modern kompozit 1937'de Owens Corning Fiberglass adlı şirketin fiber takviyeli kompozit olan fiberglas satmasıyla başladı.

İkinci dünya savaşı sırasında uçaklarda hafifliği ve radyo frekanslarına karşın geçirgenliği sebebi ile kullanılan ilk kompozit plastik örnekleri ancak 1946 'dan sonra dünyada ticari boyuta gelebilmiştir.

Günümüzde kullanılan birçok araç gerecin kompozit malzeme olduğu görülmektedir. Havacılık, otomotiv, spor, elektronik gibi birçok alanda kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler çok hızlı gelişme göstermiş ve bu gelişmeyi hızla sürdürmeye devam etmektedir. Kompozitler çağdaş bir malzeme olma niteliği ile birlikte geleceğin malzemesi olma niteliğini de bulundurmaktadır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1 Problemin Durumu

Kompozit malzemeler de üretim yöntemi, matris ve takviye malzemeleri farklılıkları, sıralama şekilleri ve açıları gibi birçok farklı etkenlere bağlı olarak malzemenin mekanik davranışı değişmektedir. Kompozit malzemeler kullanılan malzemenin türüne göre metal, polimer, seramik olarak sınıflandırılırken takviye elemanının geometrik özelliklerine göre kısa, parçacıklı, sürekli ve sandviç olarak sınıflandırılır.

Bu tez çalışmasında kompozit malzeme sınıfında yer alan sandviç kompozitler araştırılmıştır ve bu yapılar ile ilgili farklı çekirdek malzemelerinin tesiri ve farklı çekirdek malzemesinin kalınlığı incelenmiştir.

Sandviç kompozitlerin temel yapısında ana çekirdek malzeme üzerine farklı bir malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Üst yüzey malzemesi olarak çalışma türüne göre kompozit levhalar kullanılabilmektedir. Çekirdek malzeme türü geliştirilerek farklı geometrik yapılar kullanılabilir. Bunlar malzeme türünde istenilen hafiflik, dayanım, darbe iletim yönü gibi çeşitli özelliklere göre tasarlanmaktadır. Bunun en iyi örneği bal peteği yapılı çekirdek malzemelerdir.

Literatür araştırmalarında sandviç kompozitlerin, çekirdek yapısı ve yüzey plaka malzemesine bağlı olarak mekanik özelliklerinde değişiklikler ifade edilmiştir. Bu çalışmada mühendislik çalışmalarına son zamanlarda giren Polipropilen köpük malzemesinin sandviç yapılardaki performansı farklı çekirdek malzemelerine karşı incelenmiştir. Diğer çekirdek malzemeleri hem kimyasal bileşenleri hem de geometrik şekilleri farklı olarak seçilmiştir. Bununla birlikte Polipropilen çekirdek malzemesinin kalınlık değişimi incelenmiştir.

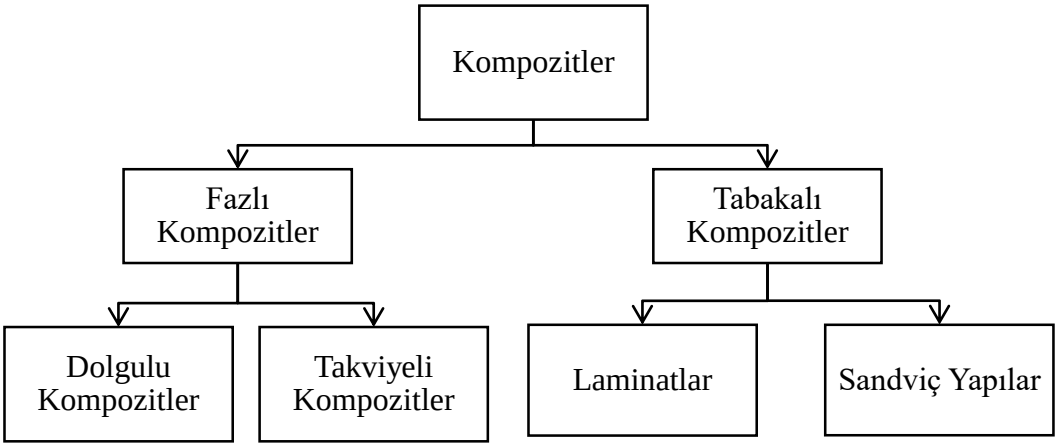
1.2 Araştırmanın Amacı

Bu çalışmada kompozit sandviç panellerin PP çekirdek malzemesinin farklı çekirdek malzemeleri karşısındaki darbe ve darbe sonrası davranışları incelenmiştir. Sandviç panellerin levhası karbon fiber/epoksi kompozit olarak seçilmiştir. Kompozit levhalar ile çekirdek malzemeleri yapıştırıcı olarak Araldite 2015 epoksi kullanılarak birleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bu sandviç yapı düşük hızlı darbe test cihazında farklı enerji yükleri için testlere tabi tutulmuştur. Daha sonra ise alınan darbe hasarının yük taşıma kabiliyetine nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Bu araştırma kapsamında malzemelerin burkulmasına izin verilecek şekilde basma testleri gerçekleştirilmiştir. Çekirdek malzemesi yüzeylerdeki hasar oluşumunda son derece etkilidir. Bu açıdan testler boyunca akustik ölçümler alınarak hasar davranışı da karakterize edilmeye çalışılmıştır. Farklı çekirdek malzemeleri aynı yoğunluğa sahip PVC ve XPS köpük yapı, PP bal peteği yapı olarak tercih edilmiştir. Mühendislik çalışmalarında yer alan bu dört farklı çekirdek malzemeli sandviç panellerin darbe ve darbe sonrası basma davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Genel anlamda amaç, çekirdek yapı farklılığının etkisini birçok açıdan incelemektir .

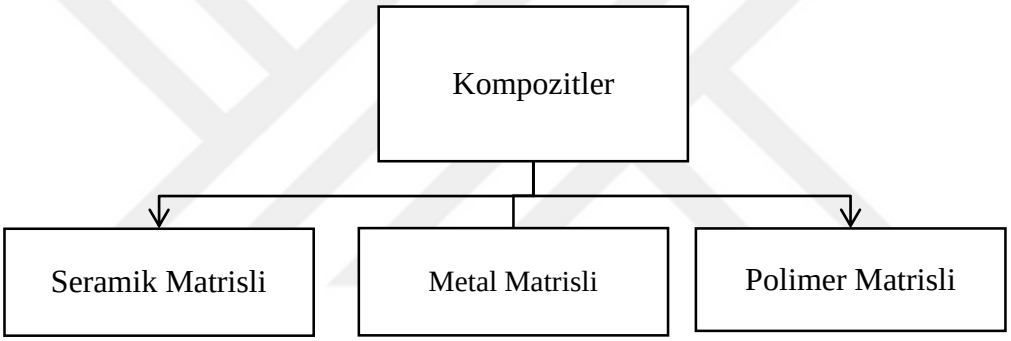
1.3 Kompozitler

Kompozit malzemeler, belirli bir amaca yönelik olarak en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Başka bir deyişle amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklerine sahip bir malzeme üretilmesi amaçlanmaktadır.[1]

Kompozit malzemelerin matris elemanına, takviye elemanına, üretim yöntemine mekanik özelliklerine ve kompozisyonlarına göre yapılan çok çeşitli sınıflandırmalar mevcut.[2]



Şekil 1.1. Kompozitlerin kompozisyonlarına göre sınıflandırılması [2]



Şekil 1.2. Kompozitlerin matris elemanına göre sınıflandırılması [2]

1.3.1 Fiber Takviyeli Polimer Matris Kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerin üretimi için gerekli olan sıcaklığın düşük olmasından ve polimerin kumaşlara kolaylıkla emdirilebilmesinden dolayı metal ve seramik matrisli kompozitlerin üretiminden daha kolaydır. Çeşitli polimer matris kompozit malzemeler fiber takviyelerin birbirlerine göre yerleşimi veya yönlendirilmesi, fiber yoğunluğu ve dağılımı, kompozitlerin mukavemeti ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu malzemelerin performansı, matris ve fiberlerin özellikleri ile sınırlı kalmayarak üretim parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterir [3].Tablo 1.1. bazı fiber malzemelerin mekanik özelliklerini belirtmektedir.[5]

Polimer matrisli kompozitlerin bazı üretim yöntemleri;

- Enjeksiyon kalıplama
- Sıkıştırma kalıplaması
- Reçine transfer kalıplama
- Vakum destekli reçine transfer kalıplama
- Sıkıştırma Reçine transfer kalıplama
- Polimer matris kompozitlerde pultruzyon işlemi
- Kompozitler için otoklavla üretim
- Polimer matris kompozitlerin otoklav dışı kürleşme süreci [4]

*Tablo 1.1.*Bazı fiber malzemelerin mekanik özellikleri.[5]

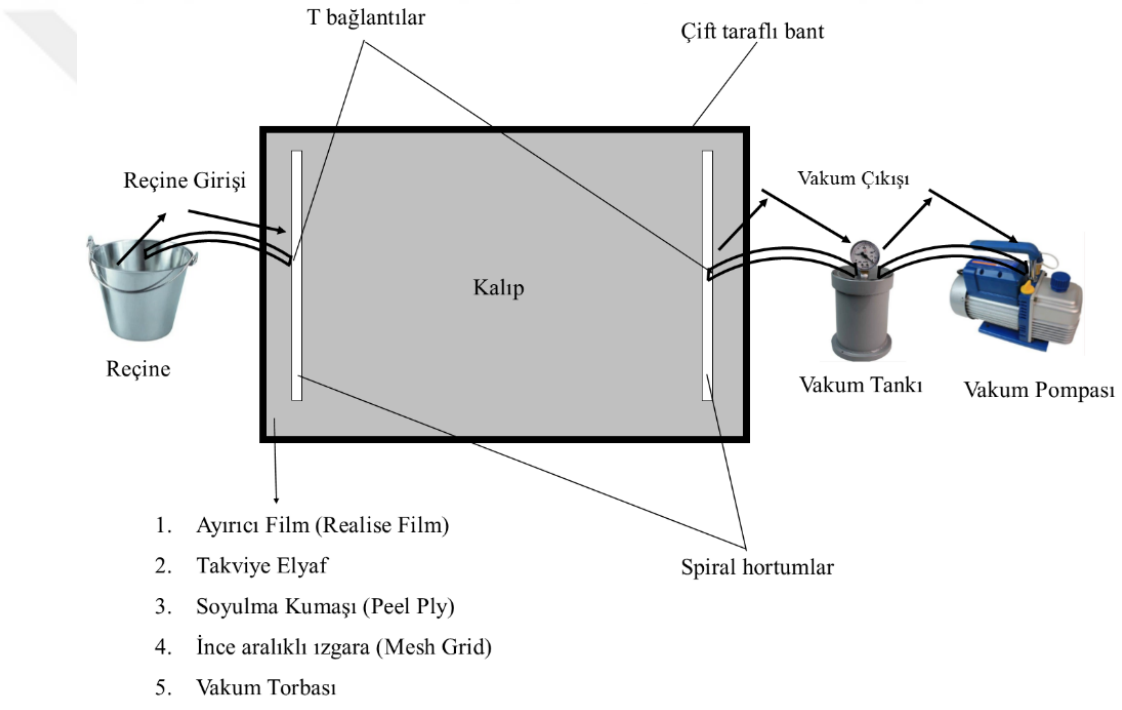
Malzeme	**Özgül Ağırlık**	**Çekme Dayanımı (GPa)**	**Özgül Mukavemet (GPa)**	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Özgül Modül (GPa)**
Fiberler					
Alüminyum Oksit	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8	0,7-2,7	228-724	106-407
E-Camı	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Boron	2,57	3,6	1,4	400	156
Silisyum Karbür	3	3,9	1,3	400	133
Metalik Teller					
Yüksek Mukavemetli Çelik	7,9	2,39	0,3	210	26,6
Molibden	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungsten	19,3	2,89	0,15	407	21,1

1.3.2 Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

Vakum destekli reçine transfer yöntemi, düşük maliyetle yüksek kalitede karmaşık kompozit ürünler üretmek için geliştirilmiştir. Özellikle fiber takviyeli polimer kompozit laminatların üretimi için yaygın olarak kullanılır.

Vakum destekli reçine transfer kalıplama sürecinin avantajları;

- Esnek kalıp tasarımına ve kalıp malzemesi seçimine olanak sağlar.
- Yüksek kalitede büyük ve karmaşık parçalar üretilebilir.
- Vakum destekli Reçine transfer kalıbı, farklı parça geometrileri için kolaylıkla modifiye edilebilir.
- Reçine ve katalizör ayrı ayrı saklanabilir ve infüzyondan hemen önce karıştırılabilir.
- Şeffaf vakum torbası sayesinde reçine infüzyon işlemi sırasında kuru kalan noktaya müdahale edilebilir.



Şekil 1.3. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum destekli reçine transfer kalıplama sürecinin dezavantajları;

- Vakum torbası, akış dağıtım filesi, soyma kumaşı, sızdırmazlık bandı ve reçine boruları tek kullanımlıktır.
- Hava sızıntısı olasılığı yüksektir ve bu durum üretimi yapanın tecrübesine, yeteneğine ve sarf malzemelerin kalitesine bağlıdır.
- Vakum destekli infüzyon kalıplaması işleminde reçinenin vakumlama basıncı, reçine transfer kalıplama işleminde uygulanan basınçtan çok azdır.[4]

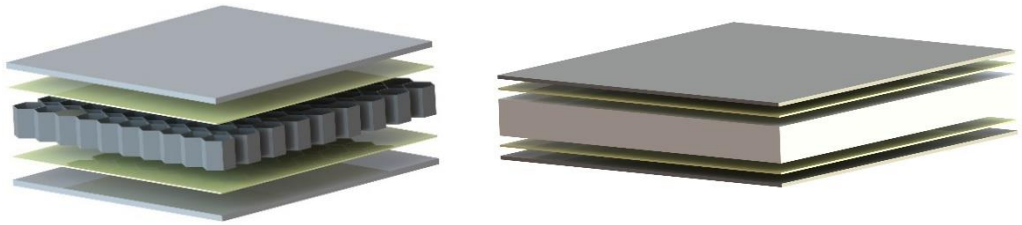
1.3.3 Tabakalı Yapısal Kompozitler

Aynı veya faklı doğrultuda fiber barındıran en az iki tabakanın üst üste konularak bir araya getirilmesi ile oluşur. Tabakalı kompozitlerin en yaygınları laminat ve sandviç yapılardır. Uygulamalarda sıkça karşılaşılan kompozit türüdür. Tabakalı kompozitlerin tercih edilmesindeki esas sebep bu kompozitlerin tasarlanabilmesidir. Yapısal malzemelerin özelliklerinin yanında geometrik dizayn da önemlidir. Geometrik dizayn fiberli kompozitlerde yönelme açısı sıralama türü gibi değerlere bağlıyken, sandviç yapılarda çekirdek tabakanın geometrik şekline bağlıdır. [1]

1.3.3.1 Sandviç Yapılar

Sandviç kompozit, her bir ayrı bileşenin bütün bir yapıda avantajlarına göre kullanılmak üzere birbirine bağlanmış farklı malzemelerin kombinasyonundan oluşan tabakalı kompozitin özel bir şeklidir. [6]

İki ince rijit ve güçlü dış plaka; kalın, hafif ve daha zayıf bir çekirdek malzeme ile ayrılır. (Şekil1.4). Dış plakalar, eğilme momentine göre etkili bir gerilme çifti oluşturur ve düzlem içi gerilmelere maruz kalır. Çekirdek tabaka, bu ince yüzey plakalarını birbirinden ayırmak ve sabitlemek suretiyle sandviç yapıyı burkulmaya karşı korur. Dış plakaları çekirdek tabakaya bağlayan yapıştırıcı, ara yüzeylerin yük transferini sağlaması gerekmektedir. Ara yüzeylerde oluşacak çekme ve kesme gerilmelerine dayanacak kadar güçlü olmalıdır. [6].



Şekil 1.4. Sandviç panel genel yapısı (alt-üst plakalar, yapıştırıcı, çekirdek) [7]

1.3.3.1.a Alt ve Üst Plakalar

Alt ve üst plakalar, sandviç yapının ihtiyaç duyduğu eğilme gerilmesini ve düzlem içi kayma gerilmesini karşılamalıdır. Alt ve üst plakalar için genellikle ince ve rijit

malzemeler seçilmektedir.Tablo 1.2. bazı yüzey plakaların mekanik özelliklerini göstermektedir.[8] Yüzey plakaları için aşağıdaki malzemeler kullanılmaktadır. [7]

- Karbon/Epoksi
- Cam/Epoksi
- Alüminyum alaşımları
- Çelik
- Ahşap

Tablo 1.2. Bazı yüzey plakaların mekanik özellikleri [8]

Malzeme	**Yoğunluk ($kg/m3$)**	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**
Metaller			
Paslanmaz Çelik	7900	196	200
Alüminyum Alaşımı (2024)	2700	73	300
Titanyum Alaşımı	4500	108	980
Metal Dışı Malzemeler			
Karbon/Epoksi	1600	180	1500
Cam/Epoksi	1800	39	1060
Kevlar/Epoksi	1300	76	1400
Dokuma Cam/Polyester	1700	16	250
Kevlar/Polyester	1300	17,5	375

1.3.3.1.b Çekirdek Malzemeler

Çekirdek tabaka alt ve üst plakalar arasındaki mesafeyi korur ve burkulma dayanımını artırır. Çekirdek malzemeleri olarak çoğunlukla köpük ve ahşap kullanılmaktadır. Köpük malzemeler, polimer esaslı olup oldukça hafif malzemelerdir. Ahşap malzemeler ise basma dayanımının önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Çekirdek malzemeler geometrik yapılarına ve yapı içindeki kullandıkları malzeme türüne göre farklılıklar oluştururlar.[9]

Petek yapılı çekirdek malzemeler bal peteği şeklinde olup adını buradan malzemelerdir. Ahşap gibi malzemelerden üretilir. Hafif olması yoğunluğunun az olması ve basma mukavemetinin iyi olması bu yapıların önemli avantajlarındandır. Petek çekirdek malzemeler sıklıkla havacılık sektöründe kullanılan çekirdek malzemedir.[9]

Oluklu formdaki malzemeler; bu çekirdek malzemeleri, kullanılacakları çalışma ortamı, birlikte kullanılacakları yüzey plakaları gibi farklı parametreler göz önüne alınarak seçilmektedir.[9]

1.3.3.1.c Yapıştırıcı Malzeme

Sandviç yapının elemanlarını bir arada tutan madde yapıştırıcıdır. Sandviç yapının elemanları birleştirmeye uygun hale getirildikten sonra uygun bir yapıştırıcı ile birbirine bağlanır. Sonrasında sıcaklık ve basınç belli bir süre uygulandıktan sonra sandviç yapı soğumaya bırakılır. Yapıştırıcılar birçok fiziksel şekilde olabilir, yapının sürekliliğini kaybetmeden yük taşıyabilen yapıştırma işlemi yapısal yapıştırmadır. Sandviç yapı elemanlarını birbirine bağlamak için genellikle reçineler kullanılır. Kullanımı en yaygın kullanılır. Kullanımı.[10]

1.3.4 Sandviç Yapıların Kullanım Yerleri

Sandviç yapılı kompozitlerin en önemli özelliği yüksek rijitliği kavramı olup özellikleri sadece bununla sınırlı değildir. Endüstride pek çok alanda ihtiyaca cevap verecek nitelikte sandviç yapılar değildir. Endüstride maliyet ve yüksek dayanım çağımızın en önemli rekabet unsurlarıdır.

Havacılık ve uzay endüstrisinde sandviç yapılı kompozitlerin hafiflik ve rijitlik özellikleri en önemli konuma sahiptir. Bu endüstri kolunda sandviç yapılar genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi, uzay mekiği konisi gibi parçalarda kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde ise araçların kullanılmaktadır. Otomotiv ve gövdesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Enerji endüstrisinde; rüzgâr türbinleri pervanelerine, çeşitli eşanjörlerin yapımında kullanılmaktadır. Petekli yapılar enerji sönümleme, radyo dalgası kalkanı, uyduların güneş panelleri gibi pek çok uygulamada kullanılmaktadır. [11]

1.3.5 Sandviç Yapıların Avantaj ve Dezavantajları

Sandviç yapılı kompozitlerin diğer kompozitler ve konvansiyonel malzemelere karşı avantajları şu şekildedir.

- Aynı ağırlıktaki diğer malzemelere oranla basma ve yorulma mukavemetlerinin daha fazla olması
- Hafif olmaları
- Tasarım esnekliği sunmaları
- Düşük ısı geçirgenliği
- 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 enerjisini absorbe etme yeteneğinin diğer malzemelere göre yüksek olması

Sandviç yapılı kompozitlerin, üretim şartlarına ve bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak istenmeyen mekanik özellikler oluşabilir. Genel olarak dezavantajları şu şekildedir;

- Katlar arasında kalan hava ve gazlar malzemenin ömrünü azaltır.
- Ara katlar arasında kalan gizli yapışmaları incelemek zordur.
- Test yapma yöntemleri pahalıdır.
- Sıcaklık farklılıklarında bozulurlar.
- Sandviç yapılı kompoziti oluşturan her bir bileşenin olumlu-olumsuz tüm özelliklerinin ana yapıya yansımasıdır.[11]

1.4 Literatür Araştırması

Sandviç kompozitler, yapıları itibarı ile çeşitli yüzey plakaları ve çekirdek malzemeleri ile kombine edilmeleri neticesinde mekanik özelliklerinin geliştirilebilir olmasından dolayı birçok mühendislik çalışmalarında kullanılmıştır. Bu bölümde sandviç yapılı kompozitlerin mekanik performansları üzerinde yapılan çalışmaların genel içeriği özetlenmiştir.

Meo vd. [12] yaptıkları çalışmada çekirdek malzemesi bal peteği olan sandviç kompozitlerde darbe hasarını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Kompozit sandviçlerin düşük hızlarda darbe davranışlarını beş farklı enerji seviyesinde incelediler. Bu çalışmalarda darbe sonrası hasarın başlaması, ilerlemesi ve hasar mekanizmaları hakkında bilgi edinilmiştir. Sonuç olarak nümerik çalışmaların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüş.

Gustin vd. [13] yaptığı çalışmada kevlar ve karbon fiber kombinasyonlarına sahip sandviç kompozitlerin darbe ve darbe sonrası basma-çekme davranışlarını incelediler. Sandviç yapının alt yüzeyindeki plakayı yüksek esneklik sağlamasından dolayı karbon fiber kullandılar. Bu çalışmada, yüzey plakalarının karbon, kevlar veya hibrit plaka kullanılmasının yapının mekanik özelliklerinde nasıl iyileştirmeler sağladığını açıkladılar.

Lin vd. [14] çalışmalarında, çeşitli nano partikül eklenmiş polimer esaslı kompozitlerin düşük hızlarda darbe deneyleri yaptılar. Nano partiküllerin matris içerisine homojen bir şekilde dağılması kompozit yapının mukavemetini belirgin bir şekilde iyileştirdiği sonucuna vardılar.

Herup ve Palazotto [15] çalışmalarında, çekirdek malzemesi nomex bal peteği yüzey plakası grafit/epoksi kompozit olan sandviç yapının düşük hızlı darbe yükleri altında hasar başlangıçlarını incelediler. Yaptıkları çalışmada hem düşük hızlı darbe hem de statik basma deneyleri uyguladılar. Sandviç yapıda yüzey plakasının kalınlığının oluşan hasar karakterleri üzerindeki etkilerini incelediler. Statik basma ve darbe deneylerinde oluşan hasarların benzer olduğunu gözlemlediler. Yüzey plakasının kalınlığının artmasıyla statik basma ve darbe deneyleri arasındaki farkın artığı sonucuna vardılar.

Park vd. [16] çalışmalarında; çekirdek malzemesi olarak kalınlığı 10 mm ve 20 mm olan nomex bal peteği, yüzey plakası olarak iki farklı yapıda karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozit ile oluşturdukları sandviç yapının düşük hızlı darbe yükleri altında hasarlarını araştırdılar. Ağırlık düşürme cihazıyla oluşturulan bu hasarları incelemek için taramalı akustik mikroskop cihazını kullandılar. Darbe hasar bilgilerini, kuvvet ve enerjinin zamana göre değişimlerini baz alarak elde ettiler.

Hosseinzadeh vd. [17] yaptıkları çalışmada, farklı fiberlerle takviyelenmiş kompozit levhalara düşük hızlı darbe testi uygulamış ve sonrasında oluşan hasar durumunu incelemişler. Dört farklı kompozit levha ;ince cam elyaf, kalın cam elyaf, karbon elyaf ve cam/karbon elyaf üzerinde çalışmışlar. Hasar alanlarını ultrasonik tahribatsız muayene yöntemi ile incelemişlerdir. Düşük hızlı darbe testinde en iyi davranışı karbon elyaflı kompozit levhanın gösterdiğini, yüksek enerjili darbelerde ise karbon/cam hibrit levhanın daha az hasar aldığı sonucuna vardılar.

Mocian vd. [18] poliüretan ve polistiren çekirdek malzemeli, alüminyum yüzey plakalı sandviç panel ürettiler. Ürettikleri bu sandviç panele darbe testleri uyguladılar. Farklı hızlarda darbe testleri yaptıktan sonra üst plakada ve çekirdek malzemede oluşan delinmeleri incelediler. Alt plakaların delinmediğini fakat poliüretana göre daha çok eğilme gösterdiğini belirttiler. Çalışma sonucunda polistirenin enerji absorbe etme yeteneğinin daha fazla olduğu sonucuna vardılar.

Schubel vd. [19] çalışmalarında çekirdek malzemesi pvc köpük, yüzey plakası karbon/epoksi olan sandviç yapının düşük hızda darbe davranışını incelediler. Çalışmalarda yüzey plakalarının hasar oluşumlarının nasıl başladığını ortaya koydular. Ayrıca eşdeğer plakalara statik yükleme testleri de yaptılar. Bir başka çalışmalarında ise Schubel vd.[20] bu hasarlı sandviç yapılara basma deneyi uyguladılar. Çalışma sonucu hasarlı ve hasarsız numunelerin basma mukavemetlerini karşılaştırıp hasar toleransları için kullanılabilecek sonuçlar elde ettiler.

Aslan vd.[21] çalışmalarında çekirdek malzemesi olarak; vd.bal peteği ve poliüretan köpük kullandılar. Yüzey plakaları için 6-8-10 katmanlı karbon lifler kullanarak sandviç yapı oluşturdular. Bu sandviç panellere basma ve eğme testleri uyguladılar.8 katmanlı karbon fiber plakanın diğerlerinden daha iyi yüzey malzemesi olduğu sonucuna vardılar. Ayrıca basma ve eğme testlerinde alüminyumun yüksek mukavemetli olmasına

rağmen yüzey plakasına olan bağlantısının zayıf olmasından dolayı eğilme dayanımının düşük olduğunu belirttiler.

Demircioğlu vd. [22] çalışmalarında pvc köpük içeren sandviç kompozitlerde darbe sonrası oluşan basma dayanımlarını iyileştirmek amaçlı iki faklı ahşap malzemenin ara tabaka olarak kullanılmasının darbe sonrası basma dayanımı ve yapının ağırlık değerlerine etkisini araştırmışlar. Cam elyaf/vinilester yüzey tabakalı ve ara tabaka olarak ısıl işlem görmüş çam, diş budak malzemelerini kullanmışlar. Sonuç olarak çam ve diş budak tabakalı numuneler klasik yapılı sandviç kompozitlere göre 1.57 ve 1.86 kat daha ağır olduğunu belirtmişler. Buna karşın rijitik değeri düşük ve hafif olan ahşap çam ve diş budak tabakalar, darbe sırasında pvc köpük malzemelerde oluşan hasarın boyutlarının azalmasını sağlamış ve darbe sonrası basma yönünde mekanik performansını artırdığı sonucuna varmışlar. Ayrıca 60 joule darbe enerjisi sonrası yapılan basma testinde ahşap ara tabaka ve pvc köpük ayrılması şeklinde hasara uğradığını gözlemlediler.

Shipska vd. [23] çalışmalarında, köpük çekirdek malzemeli ve kompozit yüzey plakalı sandviç panelin darbe sonrası basma davranışını deneysel olarak incelediler. Sandviç panelin hasar parametresi ve morfolojisini karakterize etmek için sonlu elemanlar modelini kullandılar. Yüzey plaka cam fiber/vinilester, çekirdek malzemesi olarak polimetakrilamid (pmı) köpükten oluşan sandviç panele 10 değişik enerji yüklemesinde darbe testi yaptılar. Her bir test serisi sonrasında panelin kesiti incelenerek sonlu elemanlar modeli için gerekli olan geometrik parametreler aldılar. Genel olarak darbe ile birlikte geometrik hasar parametrelerinin de arttığını gözlemlediler. Darbe sonrası basma testinde elde edilen sonuç,10 joule ve 20 joule yük uygulanan panellerdeki değerler neredeyse hasarsız panellere eşit olduğu sonucuna vardılar. En büyük hasarı alan 60 joule yükleme yapılan panellerde ise hasarsız panellere göre dayanımın %25 azaldığı sonucuna vardılar.

Bai vd.[24] çalışmalarında, köpük çekirdekli sandviç kompozit panellere düşük hızda darbe testleri ve darbe sonrası mukavemeti incelemek amacıyla basma testleri gerçekleştirdiler. Çekirdek malzeme olarak polimetakrilamid (pmı)köpük, yüzey plakası olarak karbon fiber/epoksi kompozit kullandılar. 4 farklı enerji yüklemesinde darbe almış numuneler ile darbe almamış numunelere basma testi uyguladılar. Darbe

enerjisinin artmasıyla basma mukavemetindeki azalışı gözlemlediler. Diğer sandviç panellerin analizinde de kullanılabilecek sayısal modelleme yaptılar. Sayısal sonuçlar ile deneysel bulguların uyum içinde olduğu sonucuna vardılar.

Wan vd. [25] yaptıkları çalışmada, hibrit kompozit yüzey tabakalı köpük çekirdekli sandviç panel tasarımı yaptılar. Ürettikleri bu sandviç panele düşük hızlı darbe testleri, darbe sonrası basma testleri uyguladılar ve oluşan gerilim dağılımını incelediler. Tasarlanan hibrit kompozit yüzey tabakasının enerji emme kabiliyetini ve darbe sonrası basma mukavemetini önemli ölçüde artırdığı sonucuna vardılar.

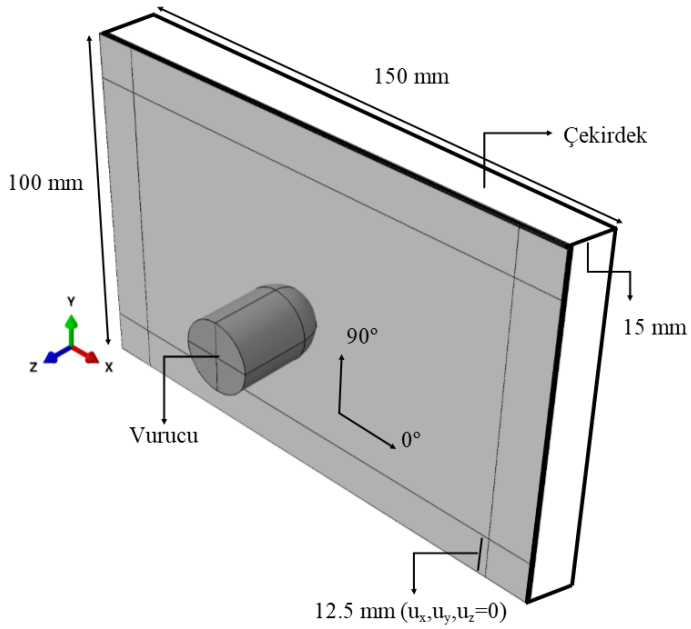
Wu ve Wan [26] yaptıkları çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer kompozit şekil hafızalı alaşım ekleyerek tasarladıkları yüzey plakalı ve köpük çekirdekli sandviç panele düşük hızlı darbe testi sonrasında basma testleri uyguladılar. Cam elyaf takviyeli polimer yüzey plakasına şekil hafızalı alaşım yerleştirildikten sonra darbe direncinin artığını ve darbe enerjisinin dağıldığını gözlemlediler. Darbe sonrası basma testlerinde delaminasyonun köpük ve yüzey plakası arasındaki darbe bölgesinde oluştuğu sonucuna vardılar.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

İki ince ve sert yüzey tabakası arasında düşük yoğunluklu bir çekirdekten oluşan sandviç yapılar, yüksek eğilme rijitliği, burkulma direnci ve enerji absorpsiyonu ve bükülme sertliği gerektiren uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüzey levha malzemeleri genellikle alüminyum veya fiber takviyeli kompozitlerdir, oysa çekirdek malzeme ahşap, genişletilmiş metaller, polimer ve metal köpükler ve polimerler ve metal peteklerdir. Köpük çekirdek, kenarlardaki sıkıştırma, burulma veya eğilme yükleri altında dış yüzey tabakalarını bir arada tutar ve burkulmaya karşı stabilize eder. Yüzey levhaları, düzlem içi yükler altında panellerin etkin atalet momentini arttırırken, çekirdek yüzey levhaları arasında kesme yüklerini aktarır. Yükler, yüzey levhaları ve çekirdek arasındaki yapışkan tabaka aracılığıyla aktarılır.

Sandviç yapıların geometrik tasarımı ve boyutlandırması Şekil 2.1'de verilmiştir. Sandviç panellerin çekirdek malzemesi tercih motivasyonu, mühendislik yapılarına son yıllarda girmiş olan Polipropilen köpük malzemesinin mekanik davranışının belirlenmesidir. Bu kapsamda PP köpük malzemesinin mühendislik çalışmalarında kullanılan diğer çekirdek yapıları ile karşılaştırılması sonucu darbe ve darbe sonrası dayanımları bu tez çalışmasında incelenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan diğer çekirdek malzemesi, PVC ve XPS köpük, PP bal peteğidir. Çekirdek yapıların hepsi polimer esaslı olup yoğunlukları 40 kg/m^3'tür. Köpük kalınlıkları 15 mm olup, PP köpüklü sandviç için köpük kalınlığı etkisi 15 ve 30 mm için de araştırılmıştır. Yüzey malzemesi olarak karbon fiber takviyeli polimer matris kompozit kullanılmıştır. Yüzey plakası kalınlığı 2 mm olup, 0/90^o fiber yönelimine sahip 200 kg/m^2 yoğunluklu fiber kumaştan 10 katman kullanılmıştır. Yüzey plakaları ve çekirdek malzemeleri ARALDITE 2015 ticari isimli çift fazlı endüstriyel yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır.



Şekil 2.1. Sandviç kompozitin geometrik boyutları (ASTM D7316)

Tez çalışmasında darbe testleri 25, 50 ve 75 J olarak 3 farklı darbe enerjisi altında gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri sonrası numunelerin hasar toleransı ve dayanımlarını ölçmek için numuneler darbe sonrası basma testlerine tabi tutulmuştur. Darbe sonrası basma testleri sırasında hasar oluşumlarının detaylı analizi için akustik ölçüm analizi de yapılmıştır. Bu akustik ölçümler ve basma testleri sırasında video kayıtlar alınarak deformasyon analizleri de yapılmıştır. Her darbe testi en az 2 kere tekrarlanmış olup hatalı testler için tekrar edilmiştir. Bu kapsam da toplam en az 30 darbe testi yapılmış 20 adet de basma testi yapılmıştır. Darbe testleri sonuçları için kinetik enerji-zaman ve temas kuvveti-zaman grafikleri yorumlanmıştır. Darbe sonrası hasar görüntüleri incelenmiştir. Bu bölümde, üretim aşamasında kullanılan malzeme özellikleri, üretim yöntemi ve deneysel yöntem hakkında bilgilere yer verilmiştir.

2.1 Kompozit Sandviç Panellerin Üretimi

Bu çalışmada, sandviç panel numunelerin yapısı; çekirdek malzeme, alt ve üst plakalar ve yapıştırıcıdan oluşmaktadır. Çekirdek malzeme olarak polimerik esaslı köpük yapılar ve bal peteği yapısı kullanılmıştır. Alt ve üst plakalar için polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır.

Numunelerin üretiminde kullanılan sandviç yapıların çekirdek malzemesinde, kapalı hücreli köpük ve bal peteği yapısı kullanılmıştır. Referans köpük malzemesi, PP köpük malzemesi seçilmiştir.

Esnek kapalı hücreli polipropilen köpük, neme ve kimyasallara dayanıklı olan ve çok çeşitli sıcaklıklarda kullanılabilen sert, esnek ve hafif bir köpüktür. Polipropilen köpük genellikle yastıklama, paketleme, otomotiv bileşenleri ve diğer birçok uygulama için kullanılır. PP köpük büyük sıkıştırma ve darbe direncine sahip kapalı hücreli bir köpüktür. Geniş yükleme aralığı, enerji emme kapasitesi ve yüksek servis sıcaklığı nedeniyle çok sayıda uygulama için ideal bir üründür.

Özellikler:

- Yüksek Basınç Dayanımı
- Üstün Enerji Emilimi
- Geniş Servis Sıcaklığı Aralığı
- İyi Isı Yalıtkanı
- Mükemmel Kimyasal Direnç
- Yangına Dayanıklı/Yanma Modifiyeli
- Düşük Su Emme/Buoyant

Diğer kapalı hücreli köpük yapılar ise PVC ve XPS kimyasal bileşenli malzemelerdir. Hücre yapısı ile karşılaştırıldığında ise PP bal peteği yapı kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan çekirdek malzemeler

Şekil 2.2'de tez çalışmasında kullanılan çekirdek malzemeler görülmektedir. Bu çekirdek malzemelerinden ilki olan, Polipropilen (C_3H_6); ziegler–natta katalizörleri olarak bilinen $TiCl_3$, DEAC (dietilalüminyumklorür) ya da bazı metalosen katalizörlerinin varlığında propilen monomerinin polimerleşmesiyle elde edilir.

Polivinil klorür köpük olarak da bilinen PVC köpük, dayanıklı, kapalı hücreli, serbest köpük PVC levha malzemesidir. Bu malzeme ile çalışmak kolaydır ve çok sayıda uygulamanın ihtiyaçlarını karşılamak için kolayca testereyle kesilebilir, kalıpla kesilebilir, delinebilir veya ciltlenebilir. PVC köpük, üstün darbe direnci, yüksek mukavemet, büyük dayanıklılık, düşük su emme, yüksek korozyon direnci ve yangına dayanıklılık gibi birçok avantaj sunar. Bu avantajlar, zorlu hava koşulları da dahil olmak üzere her türlü iç ve dış ortam koşullarına dayanacak mükemmel malzemeyi sağlar. PVC köpük, ahşap veya alüminyum gibi diğer malzemelere de harika bir alternatiftir ve genellikle 40 yıl boyunca herhangi bir hasar görmeden dayanabilir. Bu malzemenin fiyat aralığı bu geleneksel malzemelere göre değişiklik gösterecektir, ancak PVC Köpük malzemeyi optimum durumda tutmak için ekstra bakım gerektirmez. Çalışmada kullanılan PVC köpük AIREX C70 serisi köpüktür.

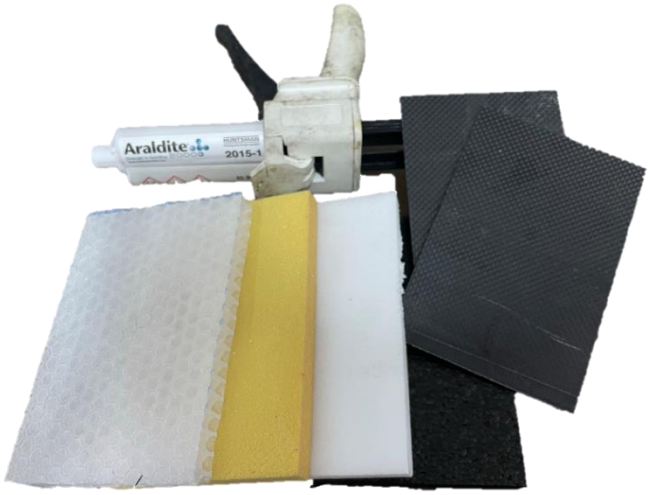
Diğer çekirdek malzememiz ise, Polistiren (C_8H_8) olup, ham maddesi petrol olan monomer yapıdaki stirenin polimerizasyonu ile üretilen bir polimerdir. Maksimum sıcaklık dayanımı 70 °C ve yoğunluğu 1,03-1,06 g/ml arasında değişir. Erime sıcaklığı 210-250 °C ve özgül ısısı 1,34 Kcal/Kg°C'dir. UV ışınlarına yüksek direnç gösterir, iyi darbe ve gerilme direnci ve işleme kolaylığı vardır. Alkali asit ve tuzlara karşı üstün bir direnç gösterir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan polistiren, yüksek sıcaklıklarda kalıplanarak ve soğutularak istenilen şekilde üretilebilir. Oldukça kırılgan, sert ve parlak yapıdadırlar. Saf halde bulunan katı polistiren şeffaftır, ancak pigmentler kullanılarak istenilen renkte malzeme üretilebilir. Rijit ve köpük yapıları çok farklı alanlarda tercih edilmesinde avantaj sağlamaktadır. Düşük erime noktasına sahip ve düşük maliyeti sayesinde yapıştırıcı olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca izolasyon malzemesi olarak soğutma kuleleri, kauçuk yapı malzemeleri, çeşitli aletler, otomobil parçaları, paneller ve elektronik aletlerin plastik aksamlarında yaygın olarak kullanılır [28].

Ekstrüde polistiren köpük veya XPS köpük, bir ekstrüzyon işlemiyle üretilir. Bu üretim süreci, plastik reçine ve diğer bileşenlerin birlikte eritilmesini içerir. Oluşan sıvı daha

sonra bir kalıptan sürekli olarak ekstrüde edilir ve soğutma işlemi sırasında genişler. Bu, kapalı hücreli sert bir yalıtım üretir.

Ekstrüde Polistiren (XPS) malzemeler ekstrüzyon işlemi ile elde edilen sıkıştırılmış polistiren malzemenin genel adıdır. Polistiren ekstrüzyon işlemi ile üretim hattı boyunca istenilen kalınlıkta çekilir. Bilgisayar kontrolünde yapılan bu imalat ile homojen görünümünde, kararlı bir hücre yapısı elde edilir. Hücreler bütün yüzlerinden birbirine bağlıdır. Hareketsiz kuru hava sayesinde bilinen en iyi ısı yalıtımı sağlanmaktadır. Hattan çıkan malzemenin yüzeyi, zırhlı veya pürüzlü yüzey olarak malzemenin kullanılacağı alana uygun olacak şekilde yapılandırılır. Bu yapı sayesinde XPS malzemeler bünyesine su almaz, nemden etkilenmezler [27].

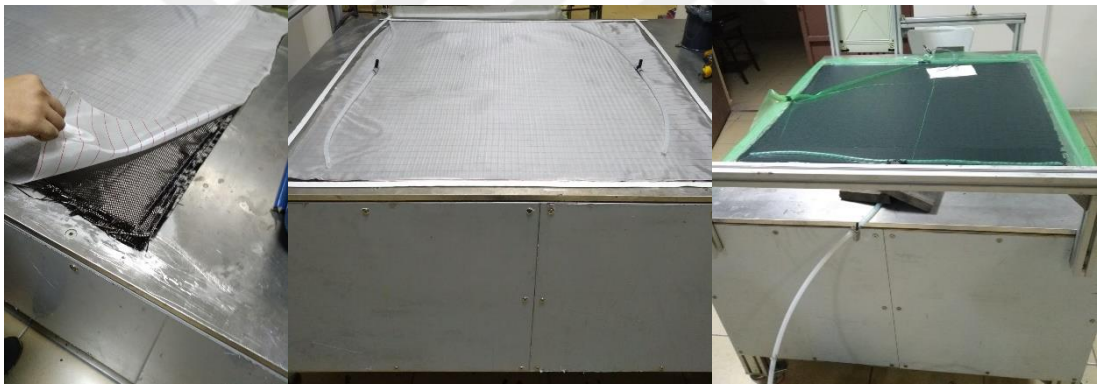
Plaka ve çekirdek malzemelerinin birleştirilmesinde, ‘Araldite 2015’ ticari isimli çift fazlı epoksi kullanılmıştır. Malzemeler Şekil 2.3’de verilmiştir. Ürün çalışma süresi 100 gr / 23 °C / 35 dk ve bu şartlar altında kürlenme süresi 6 saattir [29]. Bu tanım, 100 gr epoksiyi verimli kullanmak için oda sıcaklığında (23 °C) bekleme süresinin maksimum 35 dakika olması gerektiğini ifade eder. Bu sürenin aşılması veya sıcaklık değerinin değişmesi sonucunda epoksi erken donma meydana gelebilir ve istenilen mukavemet sağlanamayabilir. Bundan dolayı tam yapışma sağlanmadığı için bu hususlar dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.3. Araldite 2015 epoksi tüpü ve Araldite 2000 epoksi tabancası

Sandviç yapılı kompozit yapılarda çekirdek malzemesinin maruz kaldığı eksenel yüklemeler, plakalar tarafından absorbe edilmektedir. Yanal yüklemelerin etkisi ise doğrudan yapıştırıcının viskozitesiyle ilişkilidir. Her iki etken baz alınarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Darbe yükü altında malzemeler eksenel zorlanmaya maruz kalacağı için çekirdek malzemelerin korunmasında yüzey plakalar ve bu plakaların yapıştırıcı malzeme ile tutunabilirliği oldukça önemlidir.

Sandviç yapı üretiminde çekirdek malzemelerin alt ve üst yüzeylerinde karbon fiber/epoksi kompozit kullanılmıştır. 0/90^{o} fiber yönelimine sahip 200 gr/m^{2} yoğunluğa sahip fiber kumaşlardan 10 katman kullanılarak yaklaşık 2 mm kalınlıkta yüzey plakları kullanılmıştır. Kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Vakum infüzyon prosesi

Deney numunelerinin sayısı en az 30 adet olarak planlanmıştır. Karbon fiber kompozit plakalar PP, PVC ve XPS köpük çekirdeğe ve PP bal peteği çekirdeğe yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış sandviç yapılar üretilmiştir. Çeşitli çekirdek malzemesine sahip sandviç yapılar ASTM standardına göre 100x150 mm boyutlarında üretilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Karbon fiber yüzey plakaları, PP köpük ve yapıştırıcı uygulaması

Köpük ve bal peteği malzemeler istenilen ölçülerde kesildikten sonra kompozit plakalar mekanik laboratuvarında sandviç yapımına hazır duruma getirilmiştir. Gerekli önlemler alındıktan sonra etanol ile kompozit plakalar temizlenmiştir. Bu temizlemenin amacı, plaka üzerinde yabancı malzeme toz vb. kirliliklerin uzaklaştırılarak yapışmayı engelleyecek durumların ortadan kaldırılmasıdır.

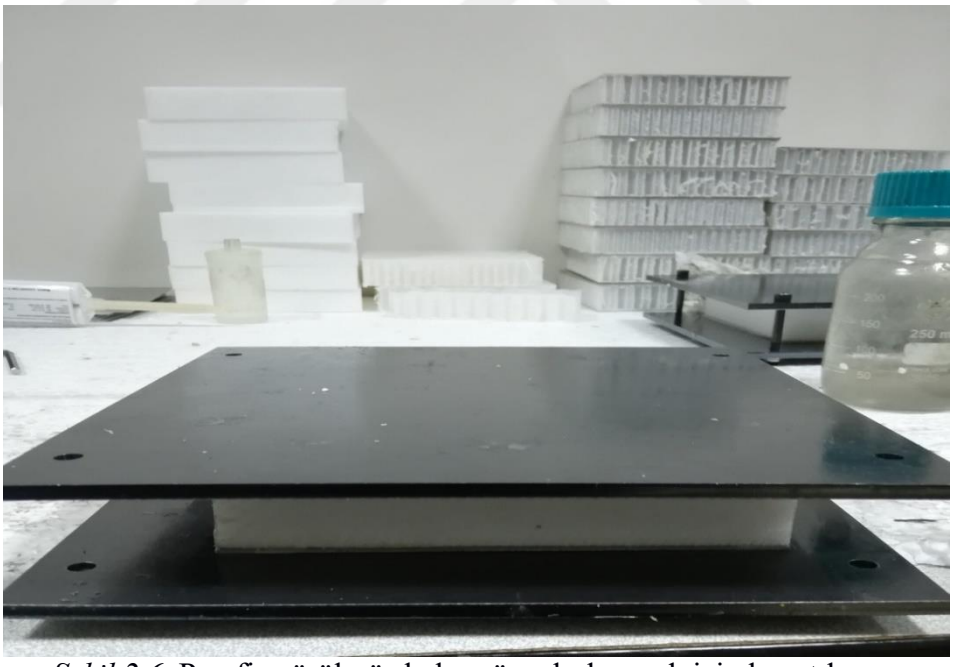
Kompozit plakaların yüzeyi etanol ile temizlendikten sonra, çekirdek malzemeler sırasıyla üst yüzeyleri fırça yardımıyla temizlenmiştir. Yüzeylere uygulanacak epoksi için, ilk önce Araldite 2015 epoksi tüpü, Araltide 2000 uygulama tabancasına yerleştirilmiştir ve çekirdek malzeme yüzeyine uygulanmıştır. Yüzeyin her bölgesinde eşit şekilde dağılmış olması önemlidir. Her bölgede eşit film tabaka kalınlığı oluşturmak için spatula yardımıyla sürülen epoksi üzerinden geçirilerek 0,25 mm kalınlığına ulaştırılarak film tabakası sağlanması amaçlanmıştır.

Çekirdek malzeme üzerinde oluşturulan epoksi tabakası, kompozit plakanın temizlenen yüzeyi ile aynı hassasiyette, üzerinde harici bir atık, leke, küçük çapta dahi olsa parça bulunmamasına dikkat edilmiştir.

Kompozit plaka, epoksi uygulanan yüzeyin tam üzerine gelecek şekilde yerleştirilerek baskı uygulanır. Bu baskı sonucu kenarlardan epoksi taşmasının gözlenmesi ile kenarlarda boşluk olmadığı anlaşılmaktadır. Kompozit plaka yerleştirilen bölge altta kalacak şekilde, diğer yüzeye de aynı hassasiyette epoksi uygulanır. Kontrol edildikten sonra kürleme için kalıp aşamasına geçilebilir.

Çekirdek malzemenin her iki yüzeyine de 0.25mm film kalınlığında Araldite 2015 epoksi uygulanarak karbon fiber plakalar yapıştırılması sonucu sandviç yapı oluşturulmuştur. Fakat epoksi için önerilen kürlenme süresini doldurmadığı takdirde tam bir birleşme olmayacaktır. Kalıp malzemesi çelik olup boyutları 200x200x5mm'dir. Birleştirme de köşe noktalarından M6 alyan başlı 60mm uzunluğunda cıvatalar kullanılır. Bu yapı sayesinde içerisine yerleştirilen numuneler tam olarak yerleştirilebilir ve istenilen durumda vidalanabilir.

Kalıp içerisine yerleştirilmeden önce özellikle kalıbın iç yüzeylerinde tortu, bir önceki çalışmadan kalan donmuş epoksi parçaları olmamasına dikkat edilerek temizlenir. Kürleme esnasında sandviç içinden epoksi akıp sandviç ile kalıbın birbirine yapışmasını engellemek için kalıbın temizlenen bölgesine parafin sürülerek tüm yüzeye uygulanır. Parafin sürülen yüzeyler sandviç panele tamamen temas edecek şekilde kapatılır ve alyan anahtarı ile kalıp, sandviç panel yüksekliğine göre sıkıştırılarak kürleme süresince bekletilir.



Şekil 2.6. Parafin sürülmüş kalıp yüzeylerle sandviçin kapatılması

Bu işlem tüm çekirdek yapıları için ayrı ayrı yapılır. Çalışma planlamasında olduğu üzere, farklı çekirdek malzemesi ve kalınlıkları için de bu işlemler uygulanarak kalıplar içerisinde kürlenme süresince bekletilir. Kürlenme süresi dolan sandviç paneller kalıptan çıkarmak için, ilk önce cıvatalar gevşetilerek panellerin hareket edebilirliği kontrol edilir. Aksi durumda cıvata gevşetildiği durumda panel hareket etmiyorsa büyük

olasılıkla panelden akan epoksi kalıba dökülmüş ve plaka ile kalıp yapışmıştır. Bu şekilde çıkartılmaya çalışılan panel, kalıpla birlikte genleşerek plaka ve çekirdek malzeme arasında tutunmaları azaltabilir. Bu da test sonrası alınacak sonucun doğruluğunu etkileyecektir. Eğer yoğun bir yapışma görünmüyorsa cıvatalar tamamen çıkartılarak kalıp içerisinden paneller alınır. Paneller bu hassasiyetle çıkarıldıktan sonra test edilmek üzere hazırdır.

2.2 Düşük Hızlı Darbe Testi

Düşük hızlı darbe testi Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarında bulunan Ceast Fractovis Plus ağırlık düşürme darbe deney cihazında yapılmıştır (Şekil 2.7). Cihaz statik enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesi esasına göre çalışmaktadır. Bu cihaz ile istenilen yükseklik ve istenilen ağırlık ile serbest düşme tesirinde enerjiyi numuneye aktarıp, numunedeki enerji değişimini ve sonrasındaki hasarı incelemek mümkündür.

Bu tez çalışmasında ise sabit ağrılık (kütlelerin toplamı 7.3kg) kullanılarak farklı hız tesirindeki numunelerin düşük hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada toplamda 24 adet numune kullanılmış, vurucu hızı olarak ise 1.85 m/sn, 3.7 m/sn ve 4,5 m/sn'lik vurucu hızlar sırasıyla 25 J, 50 J ve 75 J enerji seviyeleri için tercih edilmiştir.Her bir enerji seviyesi için aynı yapıdaki numunelerden 2'şer adet test yapılmıştır. Belirlenen vurucu hızları için düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin isimlendirilmesi XX-XXTXXEXX modeli kullanılmıştır. Burada XX ilk bölümünü köpük veya bal peteği için, XXTXX, çekirdek malzemesi ve köpük kalınlığı için EXX ise kinetik enerji seviyesi için kullanılmıştır. Örneğin: HC-PPT15E75- bal peteği (honey comb) çekirdek yapısında, polipropilen çekirdek malzemesine, 15 mm çekirdek malzemesi yüksekliğine sahip 75 J darbe enerjisi altındaki numune isimlendirmesidir. F-PVCT15E50- köpük çekirdek yapısına, PVC köpük malzemesine, 15 mm kalınlık çekirdek yüksekliğine sahip 50 J darbe enerjisi altındaki test numunesidir.



Şekil 2.7. Ceast Fractovis Plus darbe test cihazı

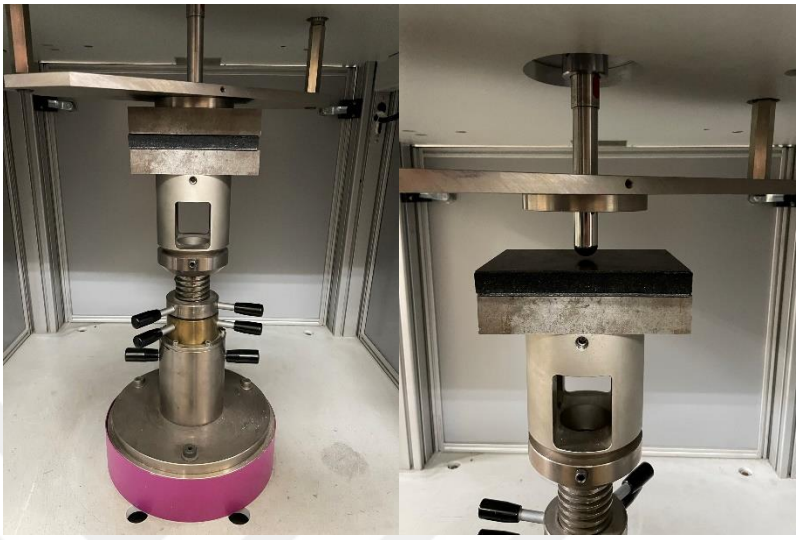
Tablo 2.1'de tez çalışmasında kullanılan numunelerin isimlendirmesi gösterilmektedir. Tez çalışmasındaki malzeme seçimi motivasyonu mühendislik çalışmalarına son yıllarda giren PP köpükler üzerinedir. Bu ölçüde, PP köpüğün hem hücre yapısı hem kalınlığı hem de farklı çekirdek malzemelerine göre kıyaslaması yapılmıştır.

Tablo 2.1. Numunelerin İsimlendirilmesi

Numune / Enerji	Köpük (F)				Bal peteği (HC)
	PP		PVC	XPS	PP
	15 mm	30 mm	15 mm	15 mm	15 mm
25 J	F-PPT15E25	F-PPT30E25	F-PVCT15E25	F-XPST15E25	HC-PPT15E25
50 J	F-PPT15E25	F-PPT30E50	F-PVCT15E50	F-XPST15E50	HC-PPT15E50
75 J	F-PPT15E25	F-PPT30E75	F-PVCT15E75	F-XPST15E75	HC-PPT15E75

Numuneler sırayla test cihazının alt kısmında bulunan sabitleme bölümüne yerleştirilmiştir (Şekil 2.8). Cihaza bağlı programdan gerekli enerji miktarı girildikten sonra ilgili yük parçaya düşürülerek numunenin darbe tesirindeki enerji değişimine ait durum grafiği elde edilmiştir. Darbe sırasında sekmenin önlenmesi için cihazda bulunan alt ve üst tabla ile numune sabitlenmiştir. Ayrıca vurucu uçun darbe sonrası sekmemesi

için ilk vuruştan sonra sekip malzemeye zarar vermesini önleyen bir sistem de deney cihazında mevcuttur.



Şekil 2.8. Numunenin sabitlenmesi

Sistem yük düşürme prensibine dayalı olduğundan dolayı, düştüğü yükseklikten numuneye temas edeceği ilk noktası arasındaki mesafe numuneye tesir eden enerji miktarını etkilemektedir. Bu yüzden numune cihaza yerleştirildikten sonra vurucu uç numuneye temas ettirilerek ilk nokta mesafesi belirlenir. Buna göre yük yükseltilerek düşürülür.

2.3 Darbe Sonrası Basma Testi

Yüksek özgül mukavemet ve sertlik açısından yüksek fiziksel ve mekanik özellikler nedeniyle, sandviç paneller, uçak, inşaat mühendisliği ve demiryolu endüstrileri gibi önde gelen uygulamalar da dahil olmak üzere mühendislik alanlarının çeşitli dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır [30–35]. Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) yüzey levhalı sandviç paneller, metal yüzey levhalı olanlara kıyasla daha düşük ağırlıkta daha iyi mekanik performans sergilemektedir [36-38]. Bununla birlikte, elyaf takviyeli plastik yüzey tabakalarının zayıf tokluğu nedeniyle, sandviç yapıların darbe yüklemesine karşı hassas olması nedeniyle yüzey tabakaları kolaylıkla delinebilir. Düşük enerji etkisinden sonra zar zor görünen hasar, yapısal yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalmaya yol açabilir. Sandviç yapının basınç dayanımı, bir darbe olayından sonra %50'ye kadar azaltılabilmektedir [39-41]. Darbe hasarı neredeyse görünmez olsa

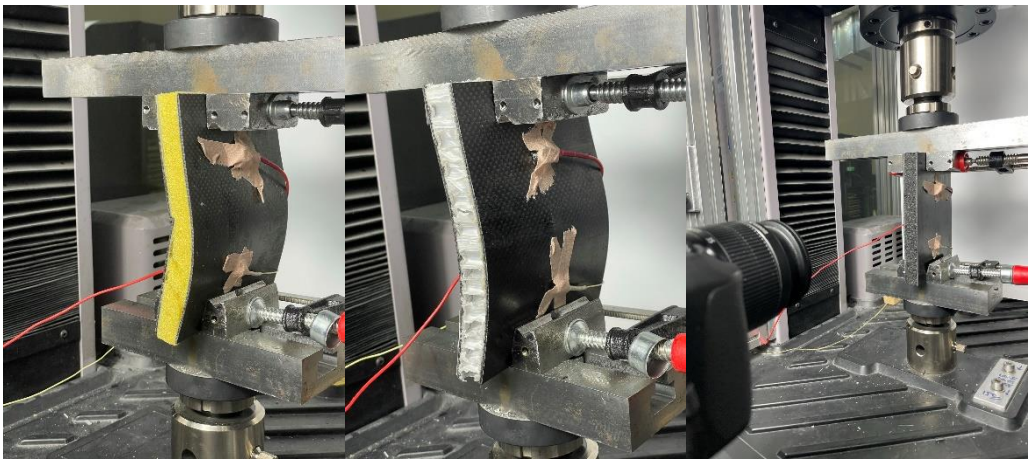
da bu tür hasar yapısal yük taşıma kapasitesinde keskin bir azalmaya neden olabilir ve muhtemelen sandviç yapının yüksek şekilde bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle, sandviç panellerin düşük hızlı darbe kırılma mekanizması ve darbe sonrası basma davranışı üzerine yapılan çalışma daha fazla ilgiyi hak etmektedir. Sandviç yapının hasar modunu kompozit yüzey levhaları ile incelemek ve sandviç kompozit panellerin darbe sonrası basma (CAI) davranışını araştırmak gereklidir.

Darbe olayından sonra kompozitlerin hasar direncini tanımlamak için darbe sonrası basma (Compression after impact, CAI) testi kullanılır. Kompozit lamina panel üzerindeki bir darbe, görünür bir dış hasara neden olmayabilir, ancak basınç dayanımında çarpıcı bir azalmaya neden olabilir. Şekil 2.9 darbe sonrası basma testlerinin gerçekleştirildiği cihazı göstermektedir. Sandviç panel geometrisine uygun aparatlar yapılmış, sandviç yapının elastikiyetini göstermesine uygun tasarlanmıştır.



Şekil 2.9. Universal çekme-basma test cihazı

Darbe testleri ile sandviç yapılarda hasarlar meydana gelmiştir. Ancak, hasar alan yapılar da mühendislik yapılarında yük taşımaya devam etmektedir. Bu kapsamda yapıların yük taşıma kapasitesinin tespiti ve sınırlarının araştırılması için darbe sonrası basma testleri her iki uçtan sabit mesnet olarak yapılmıştır.



Şekil 2.10. Darbe sonrası basma testleri ve akustik emisyon analizi

Tahribatsız Muayene (Non-destructive testing, NDT), malzemelerde kalite kontrolün en önemli bölüm olup, üretimimin tamamlayıcı kısmını oluşturmaktadır. Tahribatsız muayenede malzemenin bütünlüğüne herhangi bir zarar vermeden, iç ve dış oluşan bozuklukların tespiti amaçlanmaktadır. Şekil 2.10 darbe sonrası basma testi sırasında oluşan hasarların tahribatsız malzeme muayene yöntemi ile tespitini göstermektedir. Bu yöntem, akustik ölçüm-emisyon testidir.



Şekil 2.11. Akustik ölçüm testlerinde kullanılan sensor-yükseltici

Akustik Emisyon (AE), gerilme altındaki malzemelerde bir ya da daha çok yerel kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanır. Bütün katı malzemeler belli bir elastikliğe sahiptir; dış kuvvetler altında genleşirler veya sıkıştırılırlar, kuvvet ortadan kalktığında ise bir yay gibi geri gelirler. Kuvvet ve dolayısıyla elastik deformasyon ne kadar fazla

ise elastik enerji o kadar fazla olur. Eğer elastik limit aşılırsa kırılma veya çatlama olabilmektedir. Bu, gevrek malzemelerde hemen, diğer malzemelerde belli bir plastik deformasyon sonrası meydana gelir. Eğer elastik olarak genleşmiş malzemede boşluk, inkluzyon gibi bir hata varsa çatlamalar yüksek derecede streslenen bu noktalarda oluşarak hızlı bir dislokasyonla malzeme enerjisini atarak gevşer. İşte elastik enerjinin hızla serbest bırakılmasına Akustik Emisyon olayı denir. AE bir elastik dalga üretir, malzemede yayılan bu dalga uygun sensörlerle tespit edilebilir ve analiz edilebilir.

3. BÖLÜM

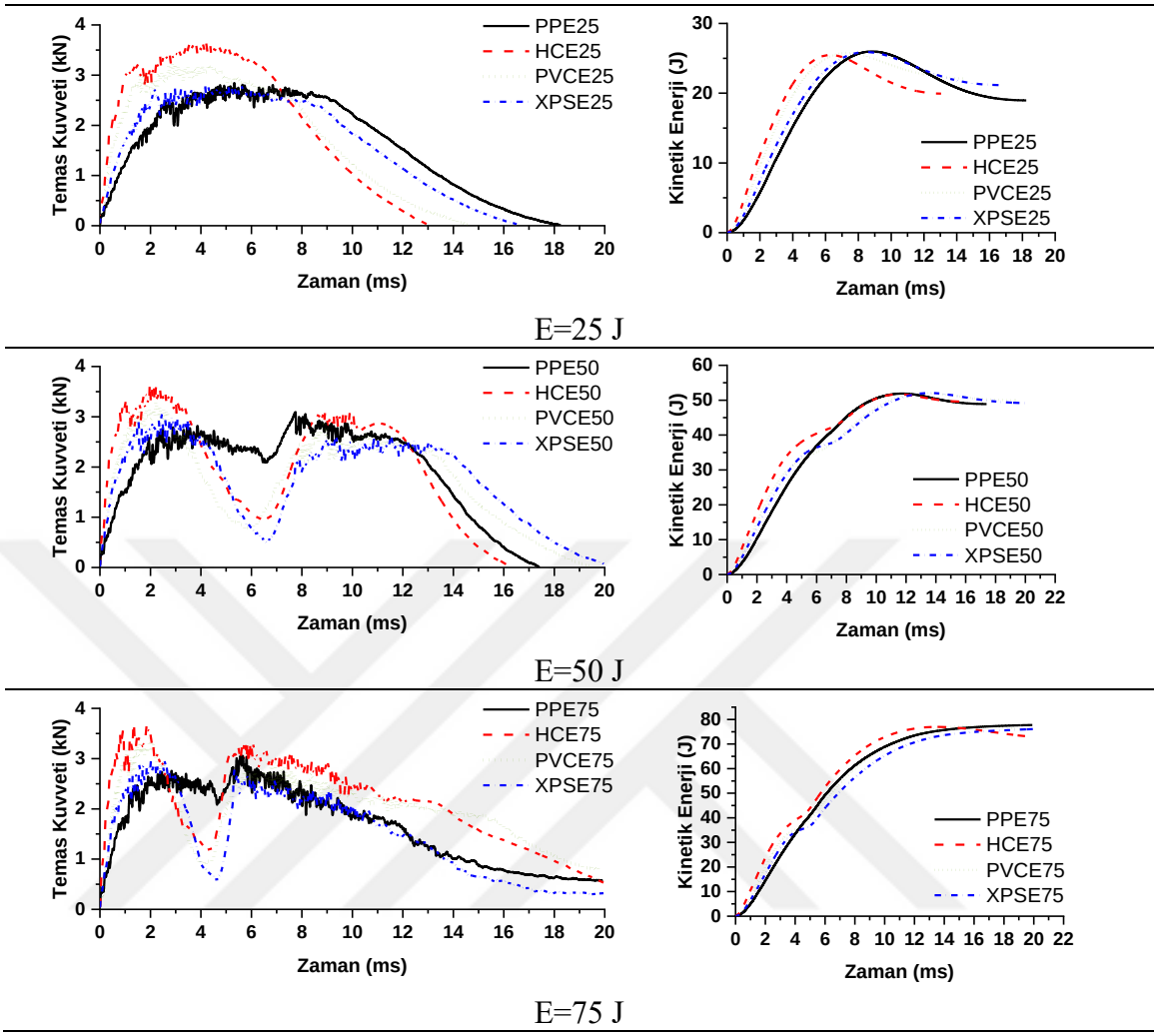
BULGULAR

Bu bölümde farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe ve darbe sonrası basma davranışları incelenmiştir. Düşük hızlı darbe davranışları temas kuvvet ve kinetik enerji değişimleri açısından araştırılmıştır. Darbe sonrası hasar görüntüleri farklı darbe enerjisi ve farklı çekirdek malzemeleri için verilmiştir. Darbe davranışının incelenmesindeki motivasyon mühendislik uygulamalarına son yıllarda girmeye başlayan PP köpük malzemesinin halihazırda kullanılan PVC, XPS köpük ve PP bal peteği çekirdek malzemelerine karşı göstereceği davranış olmuştur. Farklı çekirdek yapılarının etkisinden sonra PP köpük için farklı köpük kalınlıkları için de darbe davranışı araştırılmıştır. Farklı darbe enerjileri altındaki davranışları incelendikten sonra sandviç panellerin darbe sonrası dayanımlarını ve hasar toleranslarını ölçmek için basma testlerine maruz bırakılmıştır. Darbe sonrası basma testleri sırasında çift sensörlü akustik ölçümler yapılmıştır. Bu sayede hasar oluşumlarının konumları belirlenmiştir. Oluşan ses dalgaları sınıflandırılarak yükleme esnasında hangi zamanlarda delaminasyon, matris hasarı ve fiber kırılmaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Akustik ölçümler ile kuvvet-yer değiştirme eğrileri ilişkilendirilerek hasarlar esnasında alınan sinyaller ve kuvvet seviyeleri ilişkilendirilmiştir. Sinyal şiddetleri, o andaki sinyal sayısı ve sinyal konumları belirlenmiştir. Akustik ölçüm ile basma testleri aynı zamanda başlatılmıştır test boyunca kamera kaydı alınmıştır. Bu sayede panellerin ön ve arka yüzey plakalarının kırılmaları eş zamanlı olarak, video kayıt, akustik ölçüm ve kuvvet – yer değiştirme eğrileri ile yorumlanmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde davranışa en çok tesir eden köpük yapısı ile PP karşılaştırmaları yapılmış ve parametre yoğunluğu azaltılmıştır. Darbe testleri 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altında 2.6, 3.7 ve 4.5 m/s darbe hızları ile yapılmıştır.

3.1. Düşük Hızlı Darbe Davranışları

Kompozit sandviç panellerin darbe davranışını etkileyen önemli parametrelerden bir diğeri çekirdek malzemenin boyutları, mekanik ve fiziksel özellikleridir. Darbe enerjisinin en iyi şekilde sönümlenebilmesi için çekirdek malzemesinin belirtilen özelliklerinin en iyileştirilebilmesi ve performanslarını belirlemek için çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde kompozit sandviç panellerin köpük malzemelerinin farklı çeşitleri ve kalınlık değişimlerinin düşük hızlı darbe davranışına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. 40 kg/m^3 yoğunluklarında PP, PVC, XPS köpük ve PP bal peteği çekirdek yapıları için çalışmalar yapılmıştır. PP köpük için 15 ve 30 m olarak iki farklı köpük kalınlığı için testler yapılmıştır. 25, 50 ve 75 J darbe enerjilerinde temas kuvveti-zaman değişimleri, kinetik enerji-zaman değişimleri, darbe sonrası hasar görüntüleri ve kompozit tabakalarda meydana gelen fiber ve matrisin çekme altında ve tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarları ayrıntılı irdelenmiştir. Çekirdek yapıları değiştirilen sandviç panellerin dış plakaları 0/90^o fiber açısına yönelimine sahip olan karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeden üretilmiştir.

Şekil 3.1'de farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri gösterilmektedir. En yüksek temas kuvvetleri irdelendiğinde sırası ile PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli sandviç panellerin 25 J darbe enerjisi altında ortaya çıkan en yüksek temas kuvvetleri, 2.85, 3.64, 3.23 ve 2.80 kN, temas süreleri ise 18.2, 13.1, 14.6 ve 16.6 ms olarak ölçülmüştür. En yüksek temas kuvvetini ve en düşük temas süresini HC çekirdekli yapı verirken en düşük temas kuvvetini ve en yüksek temas süresini PP çekirdekli yapı vermiştir. 50 J darbe enerjisi için araştırıldığında ise yukarıdaki sıra ile 3.01, 3.66, 3.29 ve 3.07 kN olarak en yüksek temas kuvvetleri ve 17.4, 16.3, 19.5 ve 20 ms olarak toplam temas süreleri ölçülmüştür. Bu enerji seviyesinde sonuçlar benzerlik gösterse de birbirine yaklaşmıştır. PP ve XPS birbirine yaklaşmış ancak XPS daha fazla temas süresi göstermiştir. Enerji seviyesi artması ile HC ve PVC çekirdekli yapının en büyük temas kuvvetlerinde anlamlı bir değişiklik olmazken PP ve XPS çekirdekli yapılarda bir artış söz konusudur. Grafikteki kuvvet-zaman eğrisi trendi incelendiğinde ise PP çekirdekli yapının oldukça farklı bir davranış sergilediği gözükmektedir. Sandviç panellerde çekirdek malzemesi yüzey malzemelerine göre düşük dayanıma sahip olduğu için darbe hasarı sonucu ve darbe yönü plakası kırılması ile yük taşıma kabiliyetinde bir



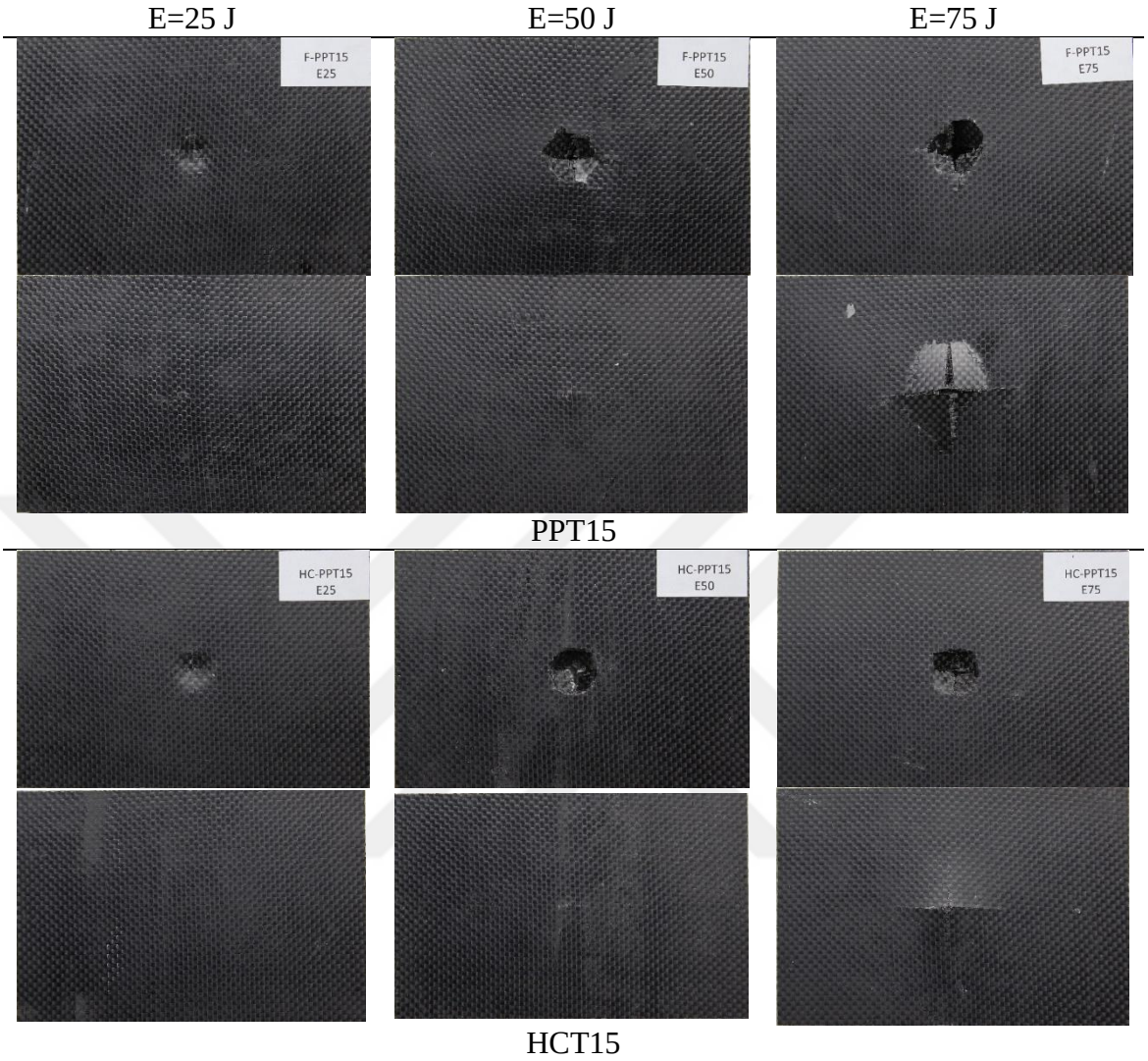
Şekil 3.1. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki temas kuvveti-zaman ve kinetik enerji-zaman grafikleri

azalış olur ve diğer yüzey plakasına darbe yükü ulaştığında tekrar yük taşıma kabiliyetinde bir artış olur. Bu durum HC, PVC ve XPS çekirdekli yapıda tam olarak bu şekilde olmasına rağmen PP çekirdekli yapıda darbe yönü plakası kırılmasına karşı yük taşıma kabiliyetinde çok az bir azalış meydana gelmiştir ve yapının yük taşıma sürekliliği devam etmiştir. Bu davranış PP çekirdeğin sandviç paneller açısından ne kadar önemli bir yere sahip olduğu göstermektedir. 75 J darbe enerjisi altında incelendiğinde ise en yüksek temas kuvveti (temas süreleri) verileri şu şekildedir: sırası ile PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli sandviç paneller için 3.05 (19.9), 3.72 (20.0), 3.41 (19.8) ve 2.96 (20.0) kN (ms) olarak ölçülmüştür. En yüksek darbe enerjisi seviyesinde XPS çekirdekli yapı en düşük temas kuvvetini sergilemiştir. Temas sürelerinde ise benzer bir durum vardır. Darbe enerjisi arttığında tüm temas kuvvetlerinde bir artış söz konusudur. 50 J darbe enerjisi altında anlatılan durum, PP çekirdekli yapı için burada da geçerlidir. Darbe yönü plakası hasara uğradıktan sonra yapıdaki yük taşıma

kabiliyetinde azalma olmamış ve diğer plakaya darbe yükü ulaşana kadar devam etmiştir.

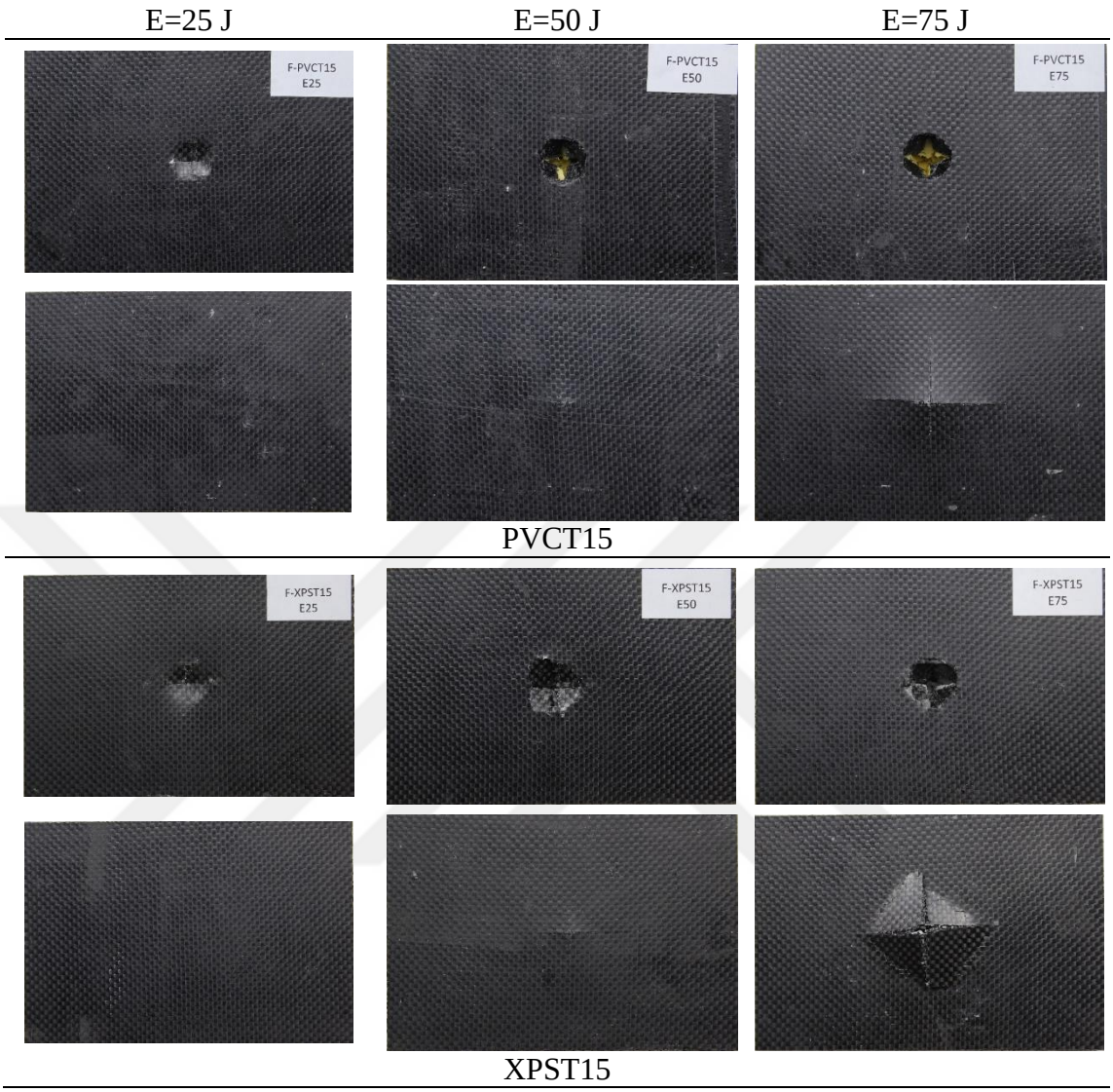
Şekil 3.1'deki kinetik enerji grafikleri dikkate alındığında sandviç panellerin enerji absorbe etme kabiliyeti araştırılmıştır. Genel davranış birbirine benzese de ufak farklılıklar mevcuttur. 25 J darbe enerjisi altında sandviç yapıların sönümlediği enerji seviyesi sırası ile PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli sandviç yapı için 18.97 (%75.88), 19.94(%79.76), 22.11 (%88.44) ve 21.16(%84.64) J olarak ölçülmüştür. En yüksek temas kuvveti HC çekirdekli yapıda ortaya çıkmasına rağmen en fazla enerji sönümleyen yapı ise PVC ve XPS çekirdekli yapı olmuştur. PP çekirdekli yapı ise en az enerji sönümleyen yapı olmuştur. Sünek yapılarda kinetik enerji elastik ve plastik deformasyon olarak sönümlenebilmektedir. Kompozit yapılarda plastik deformasyon olmadığı için malzeme hasara uğrayarak enerjiyi sönümleyebilmektedir. Sandviç yapılarda ise çekirdek yapı enerji sönümlemede daha önemli rol oynamaktadır. Çekirdek yapının tam olarak enerji sönümleme kabiliyeti için ise yüzey plakalarının deformasyonlarını incelemek gereklidir. 50 J darbe enerjisi altında yapıların enerji sönümleme kabiliyeti araştırıldığında ise sönümlenen enerji seviyeleri, PP-47.11(%94.2), HC- 47.91(%95.82), PVC-48.1(96.2) ve XPS-47.2(%94.4) olarak ölçülmüştür. Bu enerji seviyesinde neredeyse tüm yapılar enerjinin %95'ini sönümlemiştir. Yük taşıma kabiliyeti çekirdek malzemesinde ani bir azalış yaşayan yapıların ön ve arka plaka kırılmaları grafikler üzerinden bariz gözükmektedir. Benzer durum 75 J darbe enerjisi altında da geçerlidir. Enerjini tamamı sönümlenmiştir.

Şekil 3.2' de PP köpük ve bal peteği çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri verilmiştir. Darbe hasarı görüntüleri sandviç panellerin hem önden hem arkadan fotoğraflanması ile elde edilmiştir. 25 J darbe enerjisi için PP ve HC yapının ön plakalarında darbe hasarı meydana gelirken arka plakalarında herhangi bir hasar yoktur. Temas kuvveti değişimleri ile birlikte değerlendirildiğinde ise grafiklerin düzgün bir davranış göstermemesi veya ani düşüşlerin olmaması bu durumu göstermektedir. 50 J darbe enerjisinin için değerlendirildiğinde ise ön plakaların hasara uğradığı- kırıldığı, arka plakalarda ise çok küçük hasar aldığı görülmektedir. Buradaki farklı durum ise ön plakaların kırılma geometrisidir. PP köpük yapı daha köşeli bir hasar meydana getirirken HC yapı daha dairesel bir hasar geometrisi oluşturmuştur. Temas kuvveti



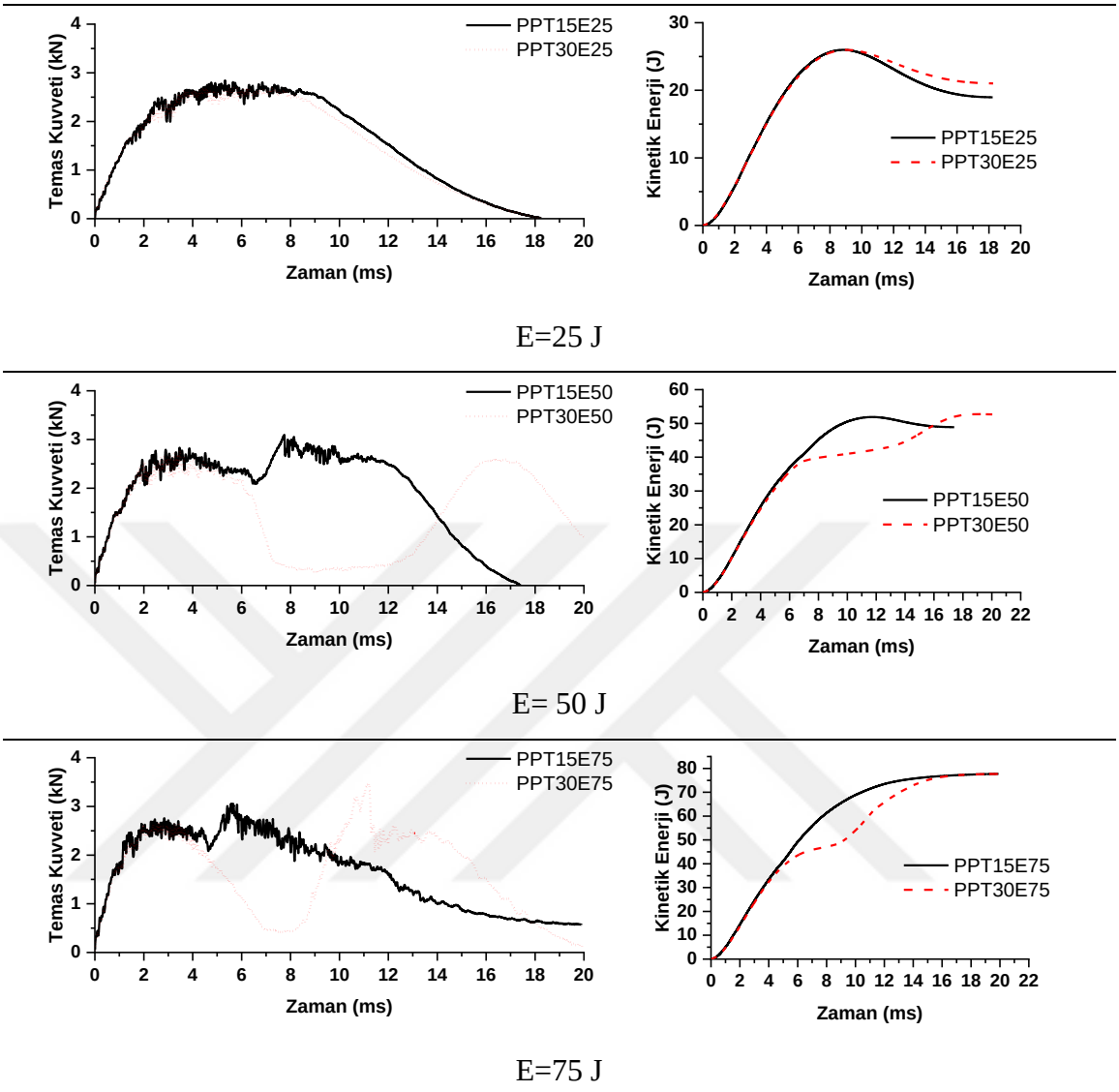
Şekil 3.2. PP köpük ve bal peteği çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri

grafikleri ile birlikte hasar görüntüleri irdelendiğinde, HC yapıda, vurucu ön plakayı deldikten sonra çekirdek malzemesinde bir yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmektedir. Arka plakaya geldiğinde ise yük taşıma kapasitesi veya temas kuvveti tekrar artmaktadır. Ancak bu durum PP yapıda bu şekilde olmamıştır. Çekirdek malzemesinde yük azalması çok azdır ve arka plakaya vurucu geldiğinde ön plakadan daha yüksek bir temas kuvveti göstermiştir. Darbe enerjisi vurucu yapı içerisinde ilerlerken azalmaktadır ancak bu yapıda enerji azalırken daha yüksek bir enerji ortaya çıkmaktadır. Bu durumun nedeni PP köpük çekirdeğin içyapısı ve darbe direnci ile ilgilidir. Yapı sıkışırken daha yüksek dayanım göstermektedir ve yük taşıma kabiliyetini kaybetmemektedir. Ön plaka delinene kadar çekirdek malzemesinde elastik sıkışma meydana gelerek bu davranışı sergilediği düşünülmektedir.



Şekil 3.3. PVC ve XPS köpük çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri

75 J darbe enerjisi için hasar görüntüleri irdelendiğinde ise ön ve arka plakalarda hasar meydana geldiği görülmektedir. Ön plakaların hasar geometrilerinde yine farklılıklar vardır. Arka plakalar ise her ikisinde de delinmiştir. PP çekirdekli yapıda arka plakanın daha fazla kırıldığı görülmektedir. HC çekirdekli yapıda ise fiberler tamamen birbirinden ayrılmamıştır. Temas kuvveti-zaman değişimleri ile birlikte değerlendirildiğinde PP çekirdekli yapının daha fazla kırılmış olması eğrilerdeki trendi değiştirmemiştir. Fiber oryantasyonu $0/90^{o}$ olduğu için yüzey plakalarının kırılması benzer yönelimde ve simetrik olarak meydana gelmiştir.



Şekil 3.4. Köpük kalınlığı 15 ve 30 mm olan PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için temas kuvveti ve kinetik enerji-zaman grafikleri

Karbon fiber kompozit plakaların ön ve arka yüzeydeki kırılmaların farklı olması çekme ve basma yükleri altındaki davranışlarının farklı olması nedeni iledir. Sandviç yapının üst yüzü basma yükleri altında iken alt yüzey plakaları çekme yükleri altındadır. Şekil 3.3 PVC ve XPS köpük çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri göstermektedir. 25 J darbe enerjisi altındaki PVC ve XPS yapılı sandviçler dikkate alındığında ön plakaların hasara uğradığını ancak arka plakaların hasara uğramadığı görülmektedir. Kompozit plakaların kırılma şekilleri diğer yapıların karşılaştırılmasında olduğu gibi burada da farklıdır. Ancak bu farklılık 50 J darbe enerjileri dikkate alındığında daha bariz ortaya çıkmıştır. PVC çekirdekli yapı üst plakalarında meydana gelen hasar dairesel şekilde olurken,

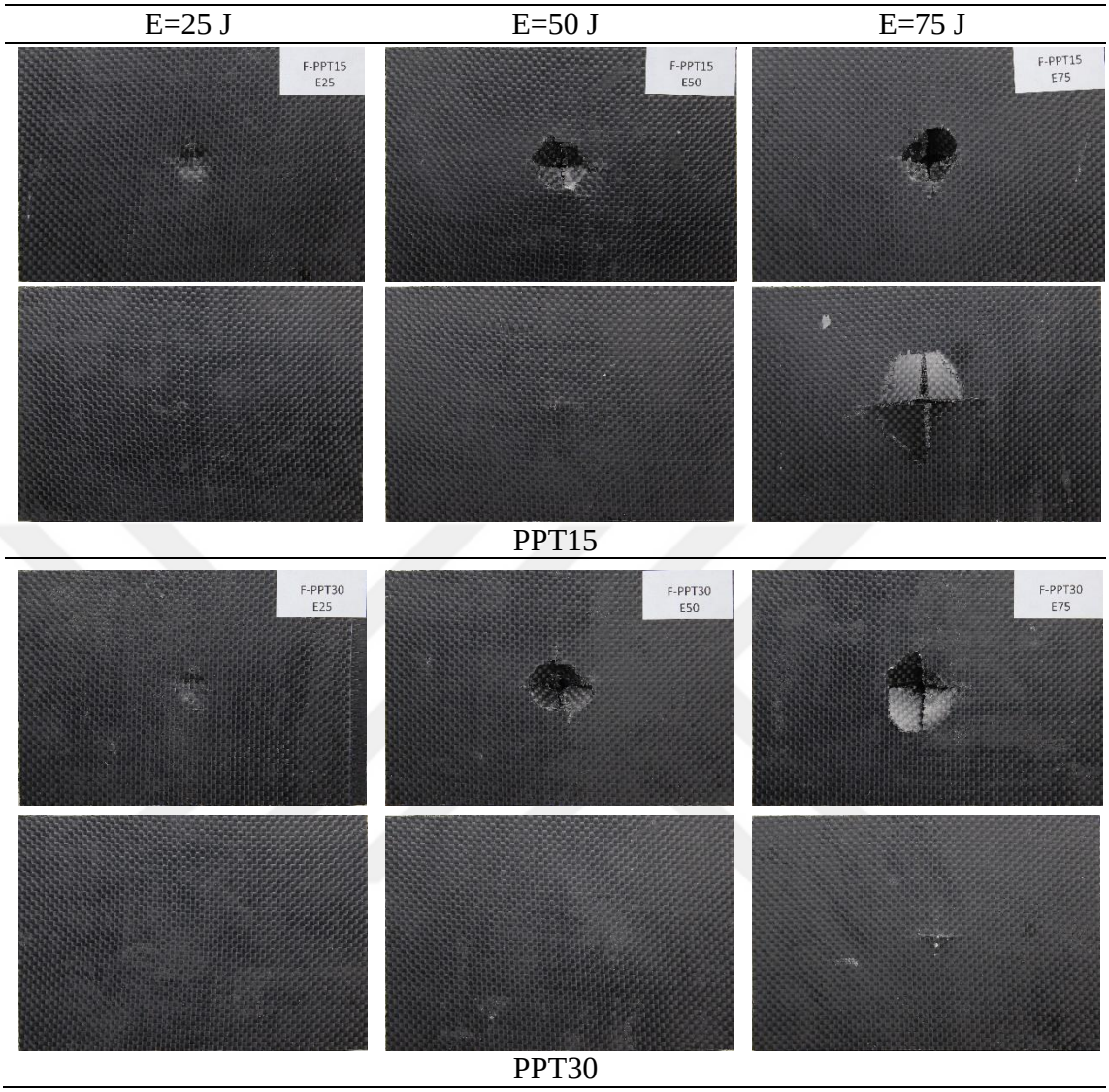
XPS çekirdekli yapıda daha köşeli bir şekilde meydana gelmiştir. Arka plakalarda ise tespit edilmesi zor olsa da hasar meydana geldiği görülmektedir. Kuvvet-zaman grafikleri dikkate alındığında ise kuvvet azalış ve artışları farklı zaman aralıklarında görülmektedir. Grafikten vurucunun alt plakaya temas ettiği anlaşılmaktadır. Alt plakaların hasara başladığı anda darbe enerjisinin bittiğini anlaşılmaktadır. 75 J darbe enerjisi altındaki numuneler incelendiğinde ise XPS çekirdekli yapıda daha fazla hasar meydana geldiği ve plakaların daha fazla kırıldığı görülmektedir. Benzer durum PP ve HC çekirdekli yapılarda da görülmektedir. PP ve XPS çekirdekli yapılar benzer davranışı gösterirken HC ve PVC çekirdekli yapılar benzer hasar davranışı göstermişlerdir.

Şekil 3.3'de PVC ve XPS köpük çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri verilmiştir. Darbe hasarı görüntüleri sandviç panellerin hem önden hem arkadan fotoğraflanması ile elde edilmiştir. 25 J darbe enerjisi için PVC ve XPS çekirdekli yapının ön plakalarında darbe hasarı meydana gelirken arka plakalarında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Temas kuvveti değişimlerinden de anlaşılacağı gibi grafiklerin düzgün bir eğrisel trend göstermemesi veya ani düşüşlerin olmaması bu durumu göstermektedir. 50 J darbe enerjisinde arka plakalarda vurucunun az da olsa temas ettiği görülürken, 75 J darbe enerjisi altında ön ve arka plakalarda hasar meydana gelmiştir. PVC çekirdekli yapıların darbe yönündeki plaka meydana gelen hasar-kırılmalar vurucu geometrisine bağlı olarak daha dairesel bir şekilde meydana gelirken, XPS çekirdekli yapılarsa ise köşeli kırılmalar meydana gelmiştir. 75 J darbe enerjisi altında arka plakadaki kırılma şekilleri çekirdek malzemesinin etkisinin anlaşılması için fikir vermektedir. XPS köpük çekirdekli panelin arka plakası daha fazla hasara uğrayarak kırılmıştır. Ancak PVC çekirdekli yapının arka plakasında ise fiber kopmaları tam olarak meydana gelmemiştir. Daha az bir hasar ve kırılma meydana gelmiştir. Bu açıdan PVC çekirdek davranışı PP bal peteği davranışa benzerlik göstermektedir. XPS ise PP köpük yapıya benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik temas kuvveti grafiklerinden de anlaşılmaktadır. Temas kuvvetlerindeki temel farklılık PP köpük panelde görülmektedir. Alt ve üst plaka geçişinde yük taşıma kabiliyetinde bir azalma görülmemektedir.

Şekil 3.4. köpük kalınlığı 15 ve 30 mm olan PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için temas kuvveti ve kinetik enerji-zaman

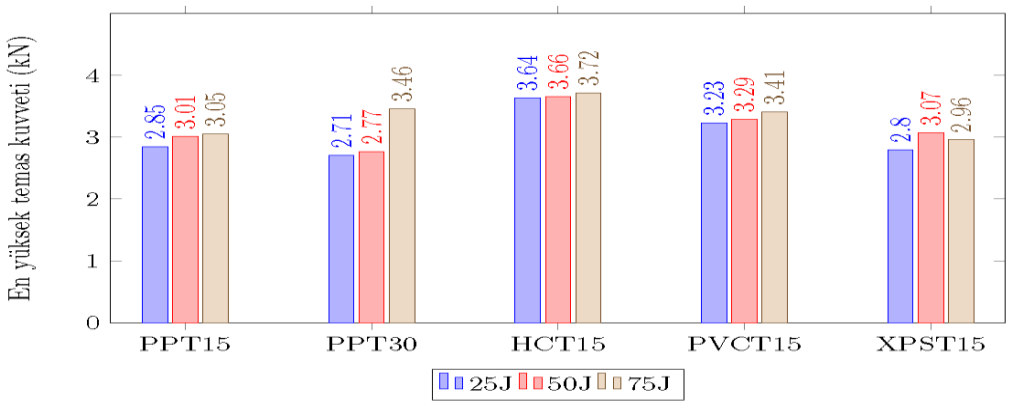
grafiklerini göstermektedir. PP köpük malzemesinin mühendislik çalışmalarındaki davranışlarının tespiti üzerine kurulan tez motivasyonu kapsamında bu malzemenin kalınlık değişiminin (15 ve 30 mm) darbe ve darbe sonrası basma davranışı araştırılmıştır. Darbe davranışları temas kuvveti-zaman, kinetik enerji-zaman ve darbe sonrası hasar görüntülerinin verilmesi ile irdelenmiştir. 25 J darbe enerjisi altında 15 ve 30 mm kalınlıklı panellerin temas kuvveti değişimleri benzerlik göstermiştir. Paneller, yaklaşık 3 kN en büyük temas kuvveti değeri ve 18 ms toplam temas süresi sonucu vermişlerdir. 50 J darbe enerjisi altında darbe yönündeki plaka kırılana kadar temas kuvveti eğrileri benzerlik göstermiştir. Ancak vurucu, köpük yapısına geçtiğinde daha kalın olan çekirdekli yapıda ani bir yük taşıma kabiliyeti azalışı mevcuttur. Kalın çekirdekli panelde vurucu, alttaki plakaya temas edene kadar ölçülen temas kuvveti neredeyse sıfırlanmıştır. Daha ince çekirdekli panelde temas tamamen bittiği anda neredeyse daha kalın çekirdekli panelde ikinci temas kuvveti tepe noktası oluşmaktadır. Vurucu alttaki plaka temas etmiş ve en büyük kuvveti vermiştir. Daha kalın çekirdekli panelde birinci ve ikinci temas kuvveti tepe noktaları benzer büyüklükte olup yaklaşık 2.5 kN olarak ölçülmüştür. Temas süresi ise 20 ms'den fazla sürmüştür. 30 mm çekirdek kalınlıklı panelin alt ve üst plakalarına vurucu teması ile oluşan kuvvet eğrisi neredeyse simetriktir. Alt plakanın tam olarak delinmemesi eğrideki bu davranışı açıklamaktadır. 15 mm çekirdek kalınlığına sahip panelin darbe testinin yaklaşık 8 ms'sinde eğride ani bir pik görülmektedir. Bu ani yükseliş alttaki plakaya teması ifade etmektedir. 75 J darbe enerjisinde ise üst plakaya temastaki kuvvet ve eğri trendi benzerdir ve yaklaşık 2.5 kN'dur. 15 mm çekirdek kalınlıklı panelde vurucu alttaki plakaya temas edip, hasara uğratıp kırarak devam etmiştir ve eğri lineer olarak azalan bir formda devam etmiştir. 30 mm kalınlığa sahip panelde ise alltaki plaka temas süresi kısalmış ve ikinci tepe noktası diğer enerji seviyelerine göre artarak 3.5 kN seviyelerine gelmiştir ve alt plakadaki temas eğrisinde ani düşüşler görülmektedir. Toplam temas süresi 20 ms civarındadır.

Kinetik enerji – zaman değişimleri irdelendiğinde ise alt ve üst plakaların hasara uğradığı 15 mm çekirdek kalınlığa sahip panel için belirgin değilken, 30 mm çekirdek kalınlığına sahip panelde oldukça belirgindir. 25 J enerji seviyesi altında daha kalın çekirdekli yapı az daha olsa daha fazla enerji absorbe etmiştir. 50 J darbe enerjisi altında her iki yapıda enerjinin tamamını neredeyse sönümlemiştir. Darbe yönündeki kompozit plakanın delinme enerjisi yaklaşık 40 J civarındadır. 30 mm çekirdek kalınlığına sahip



Şekil 3.5. 15 ve 30 mm köpük kalınlığına sahip PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri altındaki darbe sonrası görüntüleri

numunede vurucu çekirdek malzemesine gömülerek tüm enerjisini tüketmiştir. Ancak 15 mm çekirdek kalınlığına sahip numunede ise vurucunun tüm enerjisini tüketmediği grafikten anlaşılmaktadır. 75 J darbe enerjisinde her iki çekirdek kalınlıklı yapının da tüm darbe enerjisini sönümlediği görülmektedir. PP köpük kalınlığı artışı etkisi, geleneksel köpük malzemelerindeki kalınlık artışı etkisine kıyasla anlamlı bir şekilde etki etmemiştir. PP köpük malzemesindeki bu davranışını sebebi yüksek esnekliğe sahip olmasıdır. Bu sayede vurucu plakalar arasında ilerlerken yük taşıma kabiliyetinde bir azalış meydana gelmemiştir. Şekil 3.5'te farklı köpük kalınlıklarına sahip panelleri darbe sonrası ön ve arka plakalarındaki hasar görüntüleri verilmiştir. 25 J enerji seviyesi ve her iki köpük kalınlığına sahip paneller için arka plakalarda hasar oluşmazken 15 mm çekirdek kalınlığına sahip panelin 50 J darbe enerjisi altında arka plakasında çok

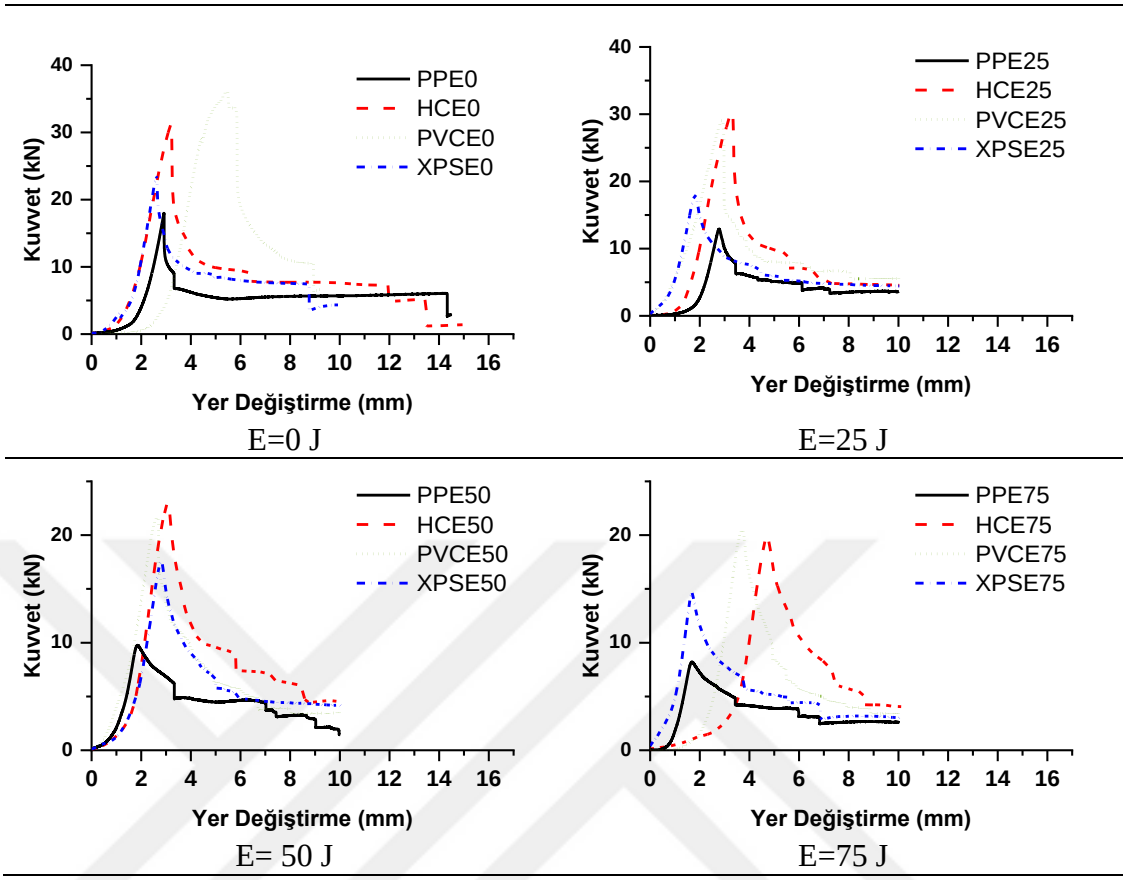


Şekil 3.6. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjisi için en yüksek temas kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

azda olsa hasar meydana geldiği görülmektedir. 75 J darbe enerjisi altında ise çekirdek kalınlığı etkisi tam olarak anlaşılmaktadır ve daha ince çekirdek kalınlıklı yapı tamamen delinmiştir ancak daha kalın çekirdekli yapının arka plakasında çok küçük bir hasar noktası meydana gelmiştir. Ön plakalarda oluşan hasar ise tamamen birbirinden farklı olmakla birlikte daha kalın çekirdekli yapıda daha geniş ve fazla hasar alanı oluşturarak kırıldığı görülmektedir. Şekil 3.6'de farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin 25, 50 ve 75 J darbe enerjisi için en yüksek temas kuvveti değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Bu grafik sayesinde panellerin sergilediği en yüksek temas kuvveti değerlerinin grafiksel olarak yorumlamak mümkündür. Enerji değişimlerinin en yüksek temas kuvvetlerini anlamlı bir şekilde etkilemediği görülmektedir. HC çekirdekli yapının ise en yüksek temas kuvvetleri ortaya çıkardığı görülmektedir.

3.2. Darbe Sonrası Basma Davranışları

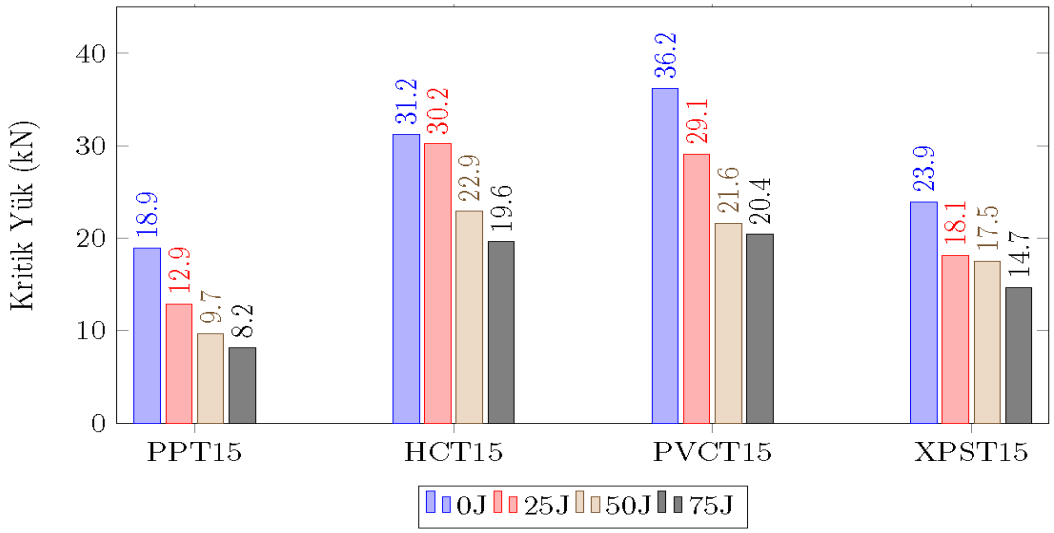
Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin düşük hızlı darbe testlerinin ardından hasar toleranslarını ve darbe sonrası dayanımlarını tespit etmek için basma testlerine maruz bırakılmıştır. Kompozit sandviç panellerin darbeye maruz kalmadan ve kaldıktan sonra eksenel olarak yük taşıma kapasitesi tespit edilmiştir. Basma testleri esnasından akustik ölçüm sistemi mikrofonları numunelerin üzerine yerleştirilmiş ve hasar mekanizmalarının tespiti için ölçümler yapılmıştır. Akustik ölümler sonucunda meydana gelen, kompozit panellerin yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyon, matris ve fiber kırılmalarının verdiği datalar sınıflandırılarak analizler yapılmıştır. Bu kapsamda ses seviyesi şiddeti, zamanı, ölçüm alınan ses dalgası sayısı ve konuma göre



Şekil 3.7. Darbe testi uygulanmamış, 25, 50 ve 75 J darbe enerjisine maruz kalmış farklı çekirdek yapılarına sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma davranışları-kuvvet-yer değiştirme eğrileri

ses dalgalarının yerleri tespit edilmiştir. Bu sayede zaman bilgisi ile de birleştirildiğinde hasarın öncelikle hangi bölgelerde başladığı ve ilerlediği anlaşılabilmektedir. Basma testleri 1 mm/dk basma hızı altında yapılmıştır. Kompozit plakaların darbe sonrası basma test standartları, kırılma olmadan yük taşıma kabiliyetinin tespiti üzerinedir. Ancak sandviç yapılarda ise çekirdek malzemenin elastik özelliklerinin de tespit edilmesi adına yatay eksende de yer değiştirmeye izin verilerek basma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu açıdan genel davranış incelendiğinde yapıların yük taşıma kabiliyeti açısından taşıyabildikleri en yüksek kuvvet kritik yük olarak ifade edilmiştir.

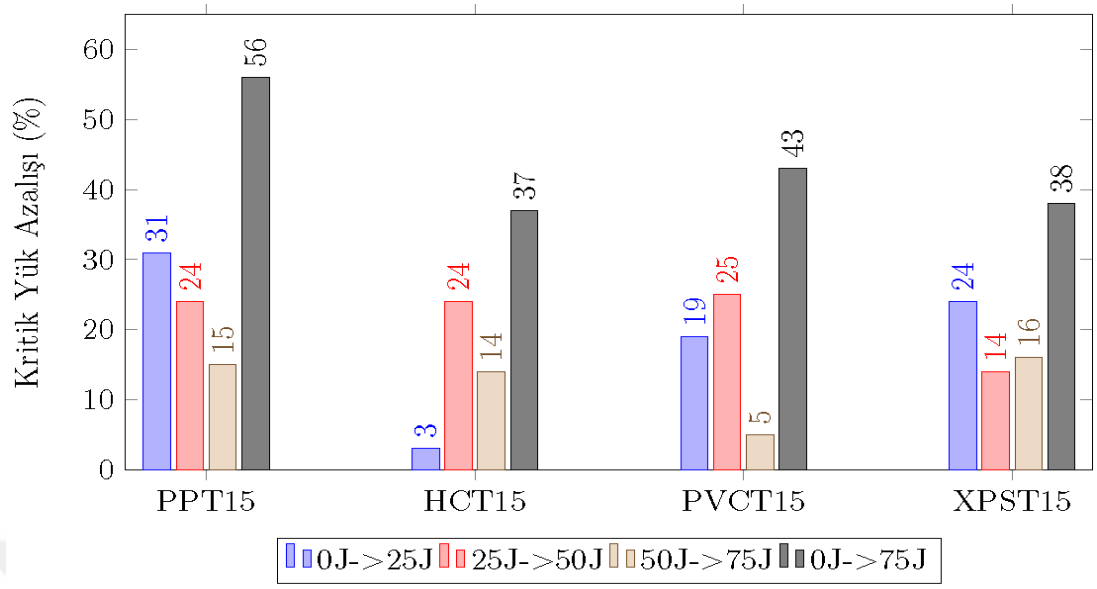
Şekil 3.7 farklı çekirdek malzemelerine sahip darbe testi uygulanmış ve uygulanmamış kompozit sandviç panellerin basma testi sonucu kuvvet-yer değiştirme grafiklerini 0, 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için göstermektedir. Basma testleri esnasındaki genel trend panellerin stabilitesini kaybetmeme üzerinedir. Bu durum burkulma testlerinde de görülmektedir. Ancak malzemelerin en-boy oranları burkulma test standartlarına uymadığı için basma testi olarak nitelendirilmiştir. PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli



Şekil 3.8. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma sonrası kritik yük değerlerinin karşılaştırılması

sandviç panellerin çekirdek malzemesi kalınlığı 15 mm ve yüzey plakaları karbon fiberdir. Testler genel olarak ön ve arka plakaların kırılmasına kadar devam ettirilmiştir ancak darbe testi sonrası numunelerde standardın yakalanması adına 10 mm düşey yer değiştirme olana kadar testler devam ettirilmiştir.

Darbe testi yapılmamış PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli sandviç panellerin basma testi sonucu taşıyabildikleri en yüksek kuvvet değerleri sırası ile 18.9, 31.2, 36.2 ve 23.9 kN olarak ölçülmüştür. PP çekirdek malzemeli yapı en yüksek elastikliğe sahip olan panel olarak grafikten anlaşılmaktadır. Grafikteki ani düşüşler kompozit plakaların kırılmalarını ifade etmektedir. Ani düşünün en geç meydana geldiği köpük malzeme PP köpüktür. Yaklaşık 14 mm düşey deformasyon meydana gelmiştir. En rijit panel ise PVC ve XPS çekirdekli yapı olduğu görülmektedir ve yaklaşık 9 mm'dir. PVC içeriği gereği rijit bir malzemedir ancak XPS dayanımı oldukça düşük malzemedir. En fazla yük taşıma kabiliyeti olan yapı PVC köpük çekirdekli panel olurken en düşük yük taşıyan yapı ise PP çekirdekli paneldir. Bu davranıştaki diğer önemli husus ise malzemelerin en yüksek kuvveti taşıdıkları andaki yer değiştirme kabiliyetleridir. PP, HC ve XPS çekirdekli yapılar pik kuvvete uğraştıkları anda 3 mm olarak benzer düşey yer değiştirme göstermişlerdir. Ancak PVC çekirdekli panel pik değere ulaştığı anda yaklaşık 6 mm olarak en yüksek düşey yer değiştirme kabiliyeti göstermiştir. 25 J darbe enerjisi ile test yapılan numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrası basma testi sonuçlarında ölçülen en

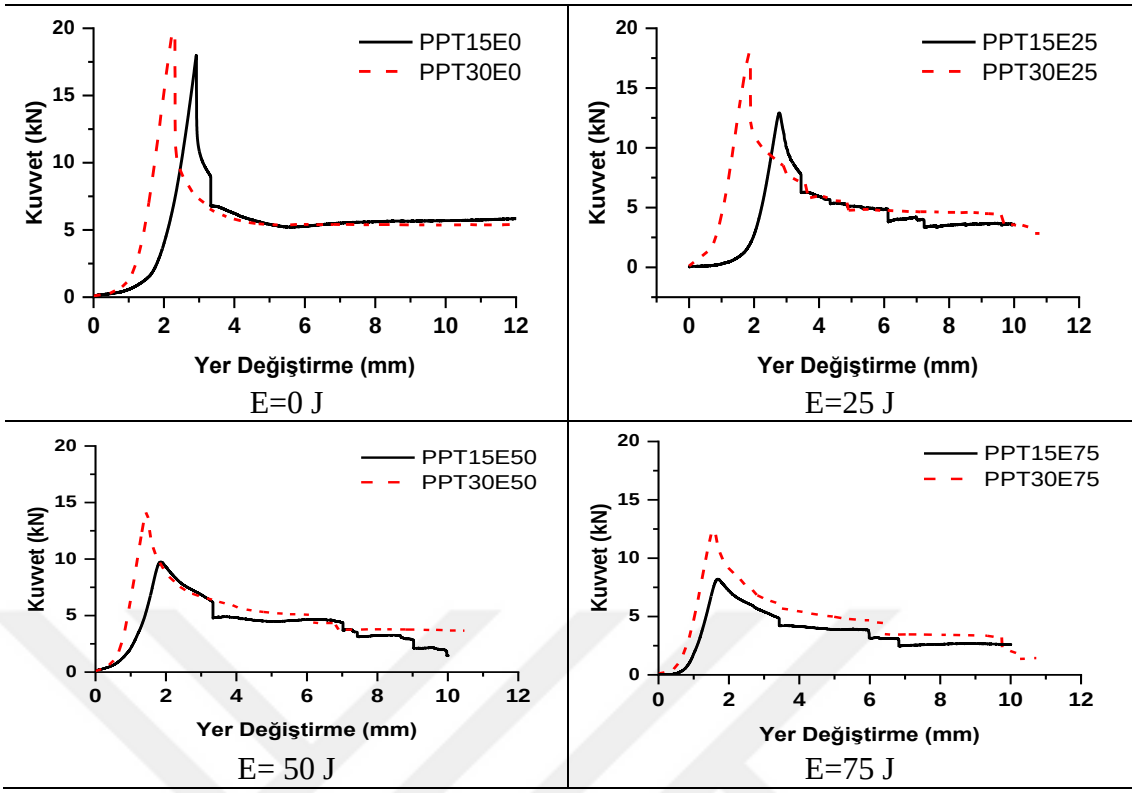


Şekil 3.9. Farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma sonrası kritik yük değerlerindeki azalışın karşılaştırılması

yüksek kuvvet değerleri sırası ile PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli paneller için 12.9, 30.2, 29.1 ve 18.1 kN olarak ölçülmüştür. Panellerin yüzey plakalarının kırılmaları darbe hasarından dolayı daha detaylı irdelenmesi gerekmektedir ve ileriki bölümlerde kırılma süreleri ile karşılaştırılarak incelenmiştir. HC ve PVC köpük çekirdekli panel üzerinden benzer kuvvetler ölçülmüştür. En düşük kuvvet PP köpükte meydana gelmiştir. Darbe hasarı almayan numuneler ile karşılaştırıldığında HC köpüklü yapıda yük değişme kabiliyeti değişmemiştir. Bu çok önemli bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer yapılarda ortalama 6 kN'luk kuvvet azalışı vardır. Yük azalışları veya artışlar tüm enerji seviyeleri için irdelendikten sonra farklı grafikler ile verilmiştir. Yer değiştirmelerin karşılaştırabilmesi adına darbe sonrası tüm testler düşey olarak 10 mm yer değiştirme olacak şekilde yapılmıştır. En büyük kuvvetlerin meydana geldiği yer değiştirme değeri XPS çekirdekli yapıda azalarak 2 mm altına düşmüştür. Diğer çekirdekli panellerde ise benzer yer değiştirme ortaya çıkmıştır ve 3-4 mm aralığında ölçülmüştür. 50 J darbe enerjisine maruz panellerin basma testleri sonucu ölçülen en yüksek kuvvet değerleri 9.7, 22.9, 21.6 ve 17.5 kN olarak PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli paneller için sırası ile ölçülmüştür. HC ve PVC çekirdekli paneller benzer yükleri taşıyabilmiştir ve PP çekirdekli yapı en az yük taşıyan yapı olmuştur. Bu yükü, 2 mm olarak en az düşey yer değiştirme ile taşıyabilmiştir. Diğer yapıların en yüksek kuvvetleri taşıyabildiği yer değiştirme mesafeleri benzerdir. 75 J darbe enerjisine maruz PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli paneller için sırası ile basma testleri sonuçları ölçülen

en yüksek kuvvet değerleri 8.2, 19.6, 20.4 ve 14.7 kN olarak ölçülmüştür. PVC ve HC çekirdekli paneller benzer yükleri 75 J darbe enerjisi sonrası da taşıyabilmişlerdir. Yine en az yükü PP çekirdekli yapı taşıyabilmiştir. PVC ve HC çekirdekli yapı daha fazla yer değiştirmeye maruz kaldığında en yüksek yükleri taşıyabilmiştir. PP ve XPS çekirdekli panel ise benzer yer değiştirme karşılığında en yüksek yükleri taşıyabilmiştir. Darbe testi yapılmayan panellerin enerji seviyeleri 0 J olarak ifade edilmiştir. 0-75 J darbe testlerine maruz kalan panellerin taşıyabildikleri yük değerleri karşılaştırıldığında, PP çekirdekli kompozit panelin 0 J'den 25 J darbe enerjili panele geçildiğinde panelin yük taşıma kabiliyetinde %31 azalış olmuştur. 25 J'den 50 J enerjili panel için %24 ve 50 J'den 75 J darbe enerjisi panel için %15 yük taşıma kabiliyeti azalmıştır. 0 J'den 75 J darbe enerjisine geçildiğinde ise %56 yük taşıma kabiliyeti azalmıştır. Yapı 75 J darbe enerjisine maruz kaldığında yük taşıma kabiliyetini yarı yarıya kaybetmiştir. HC çekirdekli yapı için karşılaştırma yapıldığında, 0 J'den 25 J'e %3, 25 J'den 50 J'e %24 ve 50 J'den 75 J'e %14 yük taşıma kabiliyeti azalmıştır. Özellikle 25 J darbe testine maruz bırakılan yapıda önemli bir yük taşıma kabiliyeti azalışı meydana gelmemiştir. Bu özellik HC çekirdek performansını ön plana çıkarmaktadır. Darbe yapılmamış panele 75 J darbe testi yapıldığında taşıyabileceği yük seviyesinde %37 azalış meydana gelmiştir. PP çekirdek ile karşılaştırıldığında aldığı darbe enerjisine göre daha iyi davranış sergilemiştir.

Şekil 3.8 farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma sonrası kritik yük değerlerinin karşılaştırılmasını grafik olarak göstermektedir. Darbe enerjisi arttıkça darbe sonrası basma testi kritik yük değerlerinde azalış olduğu görülmektedir. En düşük kritik yük değerleri PP çekirdekli panellerde en yüksek kritik yük değerleri ise HC ve PVC çekirdekli panellerde ortaya çıkmıştır. PP çekirdekli panel için 75 J enerji ile darbe sonrası basma testinde kritik yük azalışı 10.7 kN olurken, HC çekirdekli yapı için 11.6 kN, PVC çekirdekli yapı için 15.8 kN ve XPS çekirdekli yapı için ise 9.2 kN olarak ölçülmüştür. En fazla yük azalışı PVC çekirdekli yapıda meydana gelmiştir. Şekil 3.9'da ise bu kritik yük azalışlarının yüzde olarak ifade edildiği grafik verilmiştir. Bu sayede yapılardaki yük azalışları daha anlamlı olarak ifade edilmiştir. Kritik yük azalışları grafiklerde her bir enerji seviyelerine geçiş olarak ifade edilmiştir. 0 J'den 25 J'e geçildiğinde kritik yük değerindeki en az azalış HC çekirdekli yapıda en fazla azalış ise PP çekirdekli yapıda meydana gelmiştir. 25 J'den 50 J'e geçildiğinde ise en az azalış, XPS çekirdekli yapıda, en fazla azalış ise PVC çekirdekli yapıda meydana



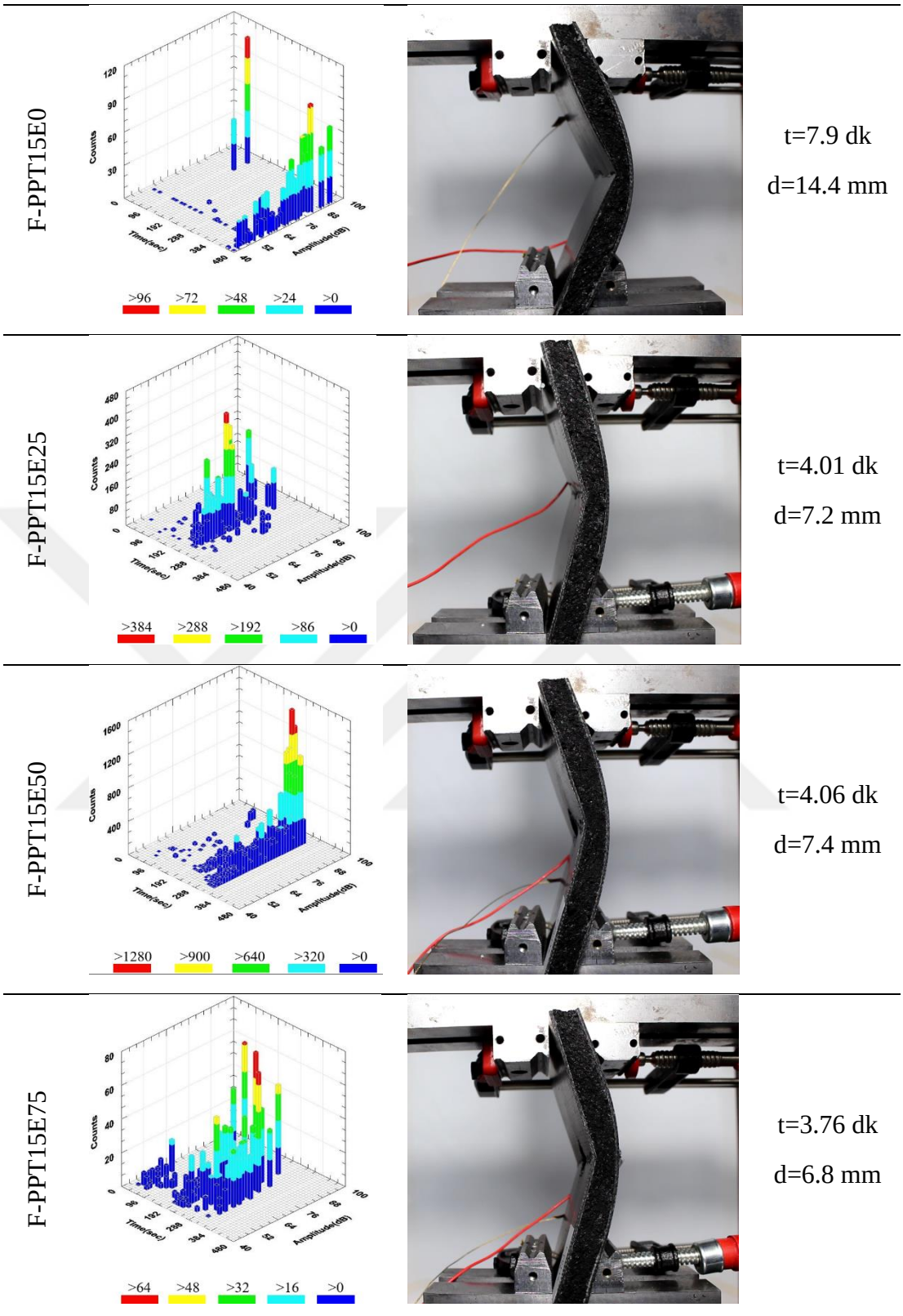
Şekil 3.10. Darbe testi uygulanmamış, 25, 50 ve 75 J darbe enerjisine maruz kalmış 15 ve 30 mm çekirdek kalınlığına sahip PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası basma davranışları-kuvvet- yer değiştirme eğrileri

gelmiştir. 50 J'den 75 J'e geçildiğinde ise en az azalış PVC çekirdekli yapıda, en fazla azalış ise XPS çekirdekli yapıda meydana gelmiştir. 0 J'den 75 J'e geçildiğinde ise ki bu yaklaşım darbe yapılmış ve darbe yapılmamış numunelerin kritik yük karşılaştırmaları anlamına gelmektedir, en az azalış HC çekirdekli yapıda ve en fazla azalış PP çekirdekli panelde meydana gelmiştir. Bu sonuçlar spesifik olarak bir çekirdek malzemesinin özelliğini olumlu veya olumsuz anlamda ön plana çıkarmamaktadır. Burada önemli husus çekirdek malzemesinin elastiklik ve rijitlik davranışlarıdır. PVC çekirdek rijit bir yapıya sahiptir, PP ise elastik, HC-bal peteği yapı ise hem rijitlik hem elastiklik özellikleri sergilemiştir. XPS çekirdek ise dayanımı düşük olan ancak rijit davranışa da sahip olan bir köpük malzeme olarak ön plana çıkmaktadır.

Şekil 3.10'da darbe testi uygulanmamış (0 J), 25, 50 ve 75 J darbe enerjisine maruz kalmış 15 ve 30 mm çekirdek kalınlığına sahip PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası kuvvet- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Darbe yapılmamış numunelerin kritik yük değerleri sırasıyla 15 ve 30 mm kalınlıklı panel için 18.9 ve 20.7 kN olarak ölçülmüştür. 25 J darbe enerjisi sonrası basma testlerinde kritik yük değerleri sırası ile 12.9 ve 17.9 kN olurken 50 J için 9.7 ve 14.2 kN ve 75 J için 8.2 ve 12.5 kN olarak ölçülmüştür. Köpük kalınlığı arttıkça kritik yük değerinde bir artış olmuştur.

Ancak darbe yapılmamış numune için kritik yük değerleri oldukça benzer çıkmıştır. Bu durum köpük malzemesinin yüksek elastikliğe ve esnekliğe sahip olmasından dolayıdır. Ancak köpük kalınlığının artması ile ve darbe hasarı aldıkça 25, 50 ve 75 J için kritik yük değerlerinde sırası ile %64, %46 ve %52.4 artış olmuştur. Köpük kalınlığını daha düşük olan paneller daha yüksek esnekliğe sahiptir ve kritik yük değerine ulaştığında yapı daha yüksek bir düşey yer değiştirmeye mevcuttur. Darbe hasarı aldıkça yüksek köpük kalınlıklı yapının kritik yük değerlerindeki düşüş köpük kalınlığı küçük olan yapıya göre daha düşüktür.

Bu bölümden sonraki değerlendirmelerde darbe sonrası basma testleri akustik ölçümlerle birlikte yorumlanmış ve değerlendirilmiştir. Şekil 3.11'de PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri 0, 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için verilmektedir. Şekillerde t, yüzey plakasının ilk kırıldığı süre, d, yüzey plakasının ilk kırılması anındaki düşey deformasyonu ifade etmektedir. Akustik ölçümler sonucunda oldukça fazla veri elde edilmektedir. Ancak bu verilerin sınıflandırılması ve birbirleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Grafikteki akustik ölçümler 3 boyutlu olarak, ses genliği (amplitude, dB), ses sayısı (counts) ve süre (sn) olarak verilmiştir. Ölçümde alınan ses dalgası sayısı renklendirilerek her renk aralığı her grafikte tekrar verilmiştir. Bu sayede yüksek genlikli kaç tane ses dalgası hangi sürelerde alınmış yorumlanabilecektir. Akustik ölçüm süresi test süresi ile aynı anda başlatılmıştır. Ses genliği veya şiddeti birimi desibel olarak ifade edilmiştir. Daha yüksek şiddetli ses dalgaları genel olarak fiber kırılması olarak yorumlanmaktadır. Daha düşük olan ses şiddetleri ise delaminasyon ve matris hasarı olarak ifade edilmiştir. Alınan ölçümlerdeki ses sayısı ile ne kadar fazla hasar oluştuğu anlamına gelmektedir. Bu ölçümde sandviç yapının karakteristiğini ifade etmektedir. Darbe hasarı olmayan numune dikkate alındığında, ilk plaka, yapının 14.4 mm düşey yer değiştirmesi ve 7.92 dk (475 sn) süresi sonunda kırılmıştır. Akustik ölçümler dikkate alındığında testin başında yüksek şiddette ve yüksek sayıda sinyal alınmıştır. Bu testteki yüksek şiddet 90 dB civarında olup, en yüksek alınan sinyal sayısı ise 96'dır. Bu şiddet ve sayının düşük olması yapıda çok fazla hasar meydana gelmemesinden dolayıdır. Ancak 470-480 sn civarında sinyallerin çoğaldığı görülmektedir. Şiddet arttıkça sinyal sayısı da artmaktadır. Test esnasında video kayıt da alındığı için bu sürede ilk plakanın kırıldığı ana denk gelmektedir. Bu anda hem matris hem de fiber hasarları mevcuttur.

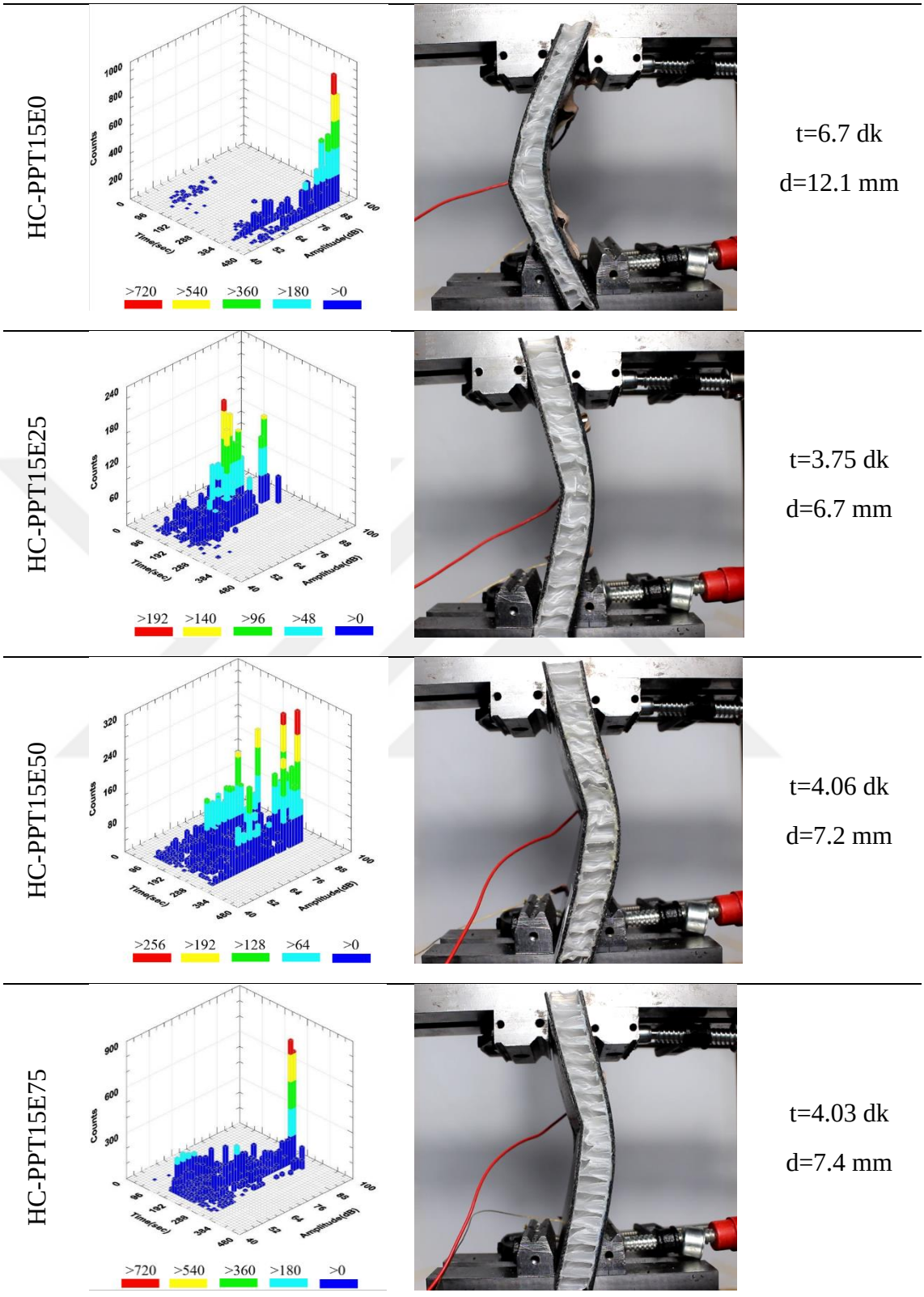


Şekil 3.11. PP köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t, yüzey plakasının ilk kırıldığı süre, d, yüzey plakasının ilk kırılması anındaki düşey deformasyon)

25 J darbe testi sonrası yapılan testlerde 4.01 dk (241 sn) sonra ve 7.2 mm düşey yer değiştirme anında ilk planın kırıldığı görülmektedir.

Darbe yapılmayan numuneye göre ilk plakanın kırılma süresi ve düşey deformasyonu yarı yarıya azalmıştır. Akustik ölçümler ise bu durumu doğrulmaktadır. Ses sinyalleri 240 sn civarında toplanmıştır. Fiber kırılmasının verdiği ses şiddeti benzer seviye göstermektedir ancak bir ses şiddetinde alınan toplam sinyal sayısı oldukça artmıştır ve 384 mertebesine çıkmıştır. Bu durum daha fazla kırılma veya hasar seslerinin oluştuğunu göstermektedir. Yapı darbe hasarı aldığı için kırılmalar artmıştır. Ancak darbe enerjisi düşük olması nedeni ile ses şiddetleri yüksek seviyelere çıkmamıştır. 50 J darbe enerjisi sonrası basma testlerinde, ilk plaka 4.06 dk (244 sn) sonrasında ve 7.4 mm düşey yer değiştirme seviyesinde kırılmıştır. 25 J darbe enerjili numune ile benzer özellik göstermiştir. Ancak akustik ölçümler tamamen farklıdır. En yüksek sinyal sayıları en yüksek ses şiddetlerinde oluşmuş ve 1280 seviyesine kadar bir ses şiddetinde ses sayısı ölçülmüştür. Ses sinyalleri 250-300 arasına yayılmıştır. Kırılmaların daha uzun süre aldığı anlaşılmaktadır. Bu durum enerji seviyesi artması ile oluşmuştur. 50 J seviyesinde darbe hasarı her iki plakaya da ulaşmıştır. Bu durum hasarların genel olarak ön ve arka plakalarda oluşabileceği anlamına gelmektedir. Ancak arka plaka tam olarak kırılmadığı için darbe hasarında ve darbe sonrası basma hasarında bu durum ilerlediği için arka plakanın kırılması ile daha yüksek sayıda sinyaller oluşmuştur. Bu durumun nedeni 75 J darbe enerjili numunede daha açık görülmektedir. Bu numune de en yüksek ses sayısı 64 olarak ölçülmüştür. Ancak sinyaller neredeyse tüm test süresince alınmıştır. Hemen hemen her sürede yüksek ve düşük ses şiddetli sinyaller alınmıştır. İlk plaka kırılması 3.76 dk (226 sn) ve 6.8 mm düşey yer değiştirme sonucunda meydana gelmiştir. Darbe enerjisi arttıkça plaka kırılması daha düşük düşey yer değiştirmeler ve süreler sonucunda meydana gelmiştir.

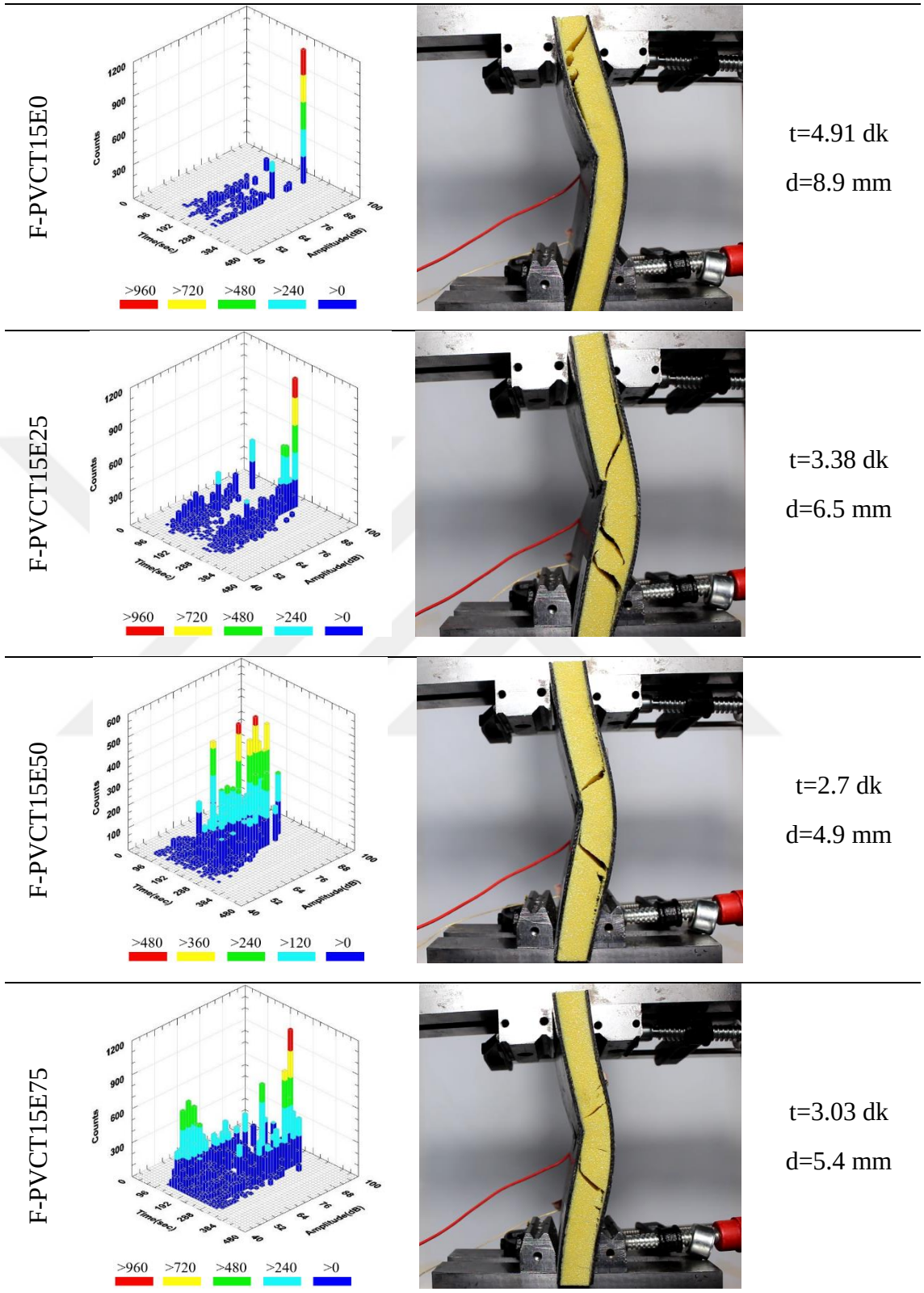
Şekil 3.12'de PP bal peteği çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri verilmiştir. Darbe testi yapılmayan numune dikkate alındığında, ilk plaka 6.7 dk (402 sn) süre sonunda 12.1 mm düşey yer değiştirmesi ile kırılmıştır. PP çekirdek ile karşılaştırıldığında, HC çekirdek daha önce ve düşük yer değiştirme sonunda kırılmıştır. Bu durum PP çekirdeğin yüksek esnekliğe sahip olmasından dolayı meydana gelmiştir. Akustik ölçümler dikkate alındığında ise 720 seviyesine kadar ses ölçümü sayısı alınmıştır. Ses sinyalleri genel olarak ilk plakanın kırıldığı süre civarlarında meydana gelmiş olup En yüksek ses



Şekil 3.12. PP bal peteği çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t, yüzey plakasının ilk kırıldığı süre, d, yüzey plakasının ilk kırılması anındaki dikey deformasyon)

şiddetlerinde yüksek ses sinyali sayıları ölçülmüştür. Bu durum fiber kırılmalarını ifade etmektedir. PP çekirdekte ise ölçülen en yüksek ses sayıları 96 civarındadır. Hasarı

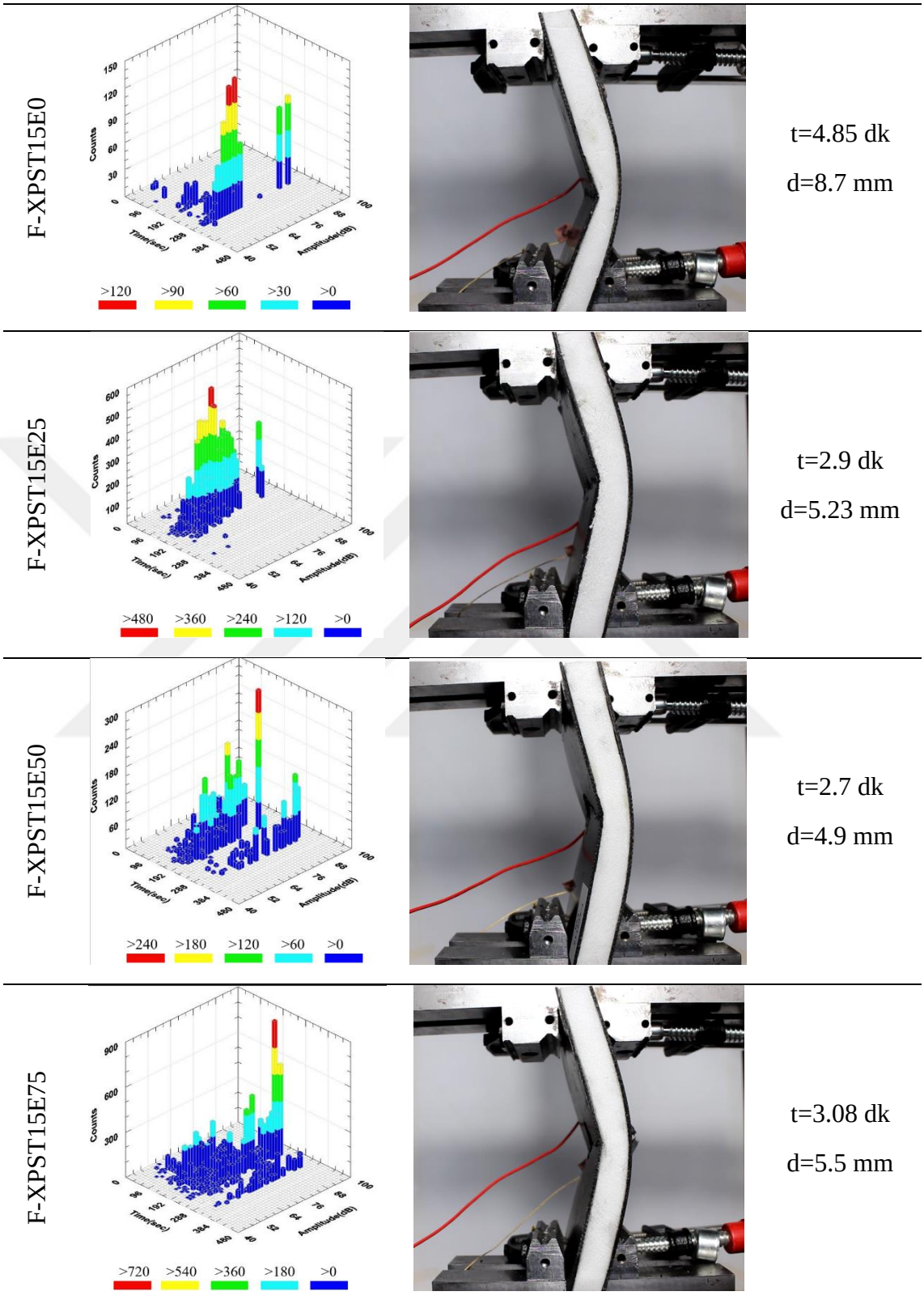
azaltmakta da başarılıdır PP çekirdek. 25 J darbe enerjili numune incelendiğinde, 3.75 dk (225 sn) sonucunda ve 6.7 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında ilk plaka kırılmıştır. Bu numunede de darbe hasarı alması ile süre ve yer değiştirme neredeyse yarı yarıya azalmıştır. Akustik ölçümler ile ses sinyalleri genel olarak plakanın kırıldığı sinyal civarlarında oluşmuştur. En yüksek ses sinyali sayısı 192 mertebesinde olurken, plaka da hasar bulunmasından dolayı kırılma kolaylaşmış ve sinyal adedindeki artış azalmıştır. 50 J darbe enerjili numunede 4.06 dk (242 sn) ve 7.2 mm sonucunda plaka kırılması meydana gelmiştir. Genel davranış PP çekirdekli panele benzerlik göstermektedir. Hasar alındıktan sonra yük genel olarak plakalar üzerindedir. Ancak akustik ölçümler yine tamamen farklıdır. Ses sinyalleri 100-350 saniye aralığında alınmıştır ve neredeyse test boyunca devam etmiştir. En yüksek ses sinyali sayısı 90 dB olarak en yüksek şiddet ve 256 adet olarak ölçülmüştür. Yapı darbe hasarı alması ile plakalarda kırılmalar mevcut olduğu için basma testleri ile delaminasyon ve matris hasarları oluşumu kolaylaşmaktadır. Mavi renkteki sinyal sayıları 0-64 arasını ifade etmektedir. Yani düşük sinyal sayılı hasarlar oldukça yüksektir. Bu da hasarların daha kolay ilerleyebildiğini ifade etmektedir. 75 J darbe enerjili numunede ise bu durum çok daha açıktır. Tüm sinyaller nerede ise 0-180 sayılı seviyelerdedir. En yüksek ses şiddetinde yüksek adette sinyal 1-2 kere alınabilmiştir. İlk plaka kırılması 7.4 mm sonucunda ve 4.03 dk (242 sn) sonucunda meydana gelmiştir. Darbe enerjisinin artması ile ilk plakanın kırılma süresinde ve yapının düşey yer değiştirme miktarlarında anlamlı bir değişkenlik olmamıştır.Yapının darbe hasarı alması genel davranışı belirlemeden yeterli olarak yorumlanmıştır. Şekil 3.13'de PVC köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri verilmektedir. PVC köpük çekirdek diğer çekirdek malzemelerine göre yüksek rijitliğe sahip çekirdek malzemedir. Genel olarak basma testlerinde çekirdek malzemesinde kırılmalar meydana geldiği görülmektedir. Diğer çekirdek malzemelerinde bu şekilde bir durum meydana gelmemiştir. 25 J darbe enerjili numunede ilk plakanın kırılma süresi 4.91 dk (294 sn) olurken 8.9 mm düşey yer değiştirme ile meydana gelmiştir. Akustik ölçümlerde çok az sinyal alındığı görülmektedir. Bunları çoğu düşük şiddette ve sayıdadır. Bir adet sinyaller 90 dB seviyelerinde 960 kez alınmıştır. Plakanın kırıldığı süreye tekabül etmektedir. PP



Şekil 3.13. PVC köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t, yüzey plakasının ilk kırıldığı süre, d, yüzey plakasının ilk kırılması anındaki dikey deformasyon)

ve HC çekirdekli malzeme ile kıyaslandığında ise Daha düşük süre ve yer değiştirmede ilk plakanın kırıldığı görülmektedir. 25 J darbe enerjili numune irdelendiğinde ise ilk plaka 3.38 dk (202 sn) sonunda ve 6.5 mm düşey yer değiştirme sonucunda kırılmıştır. Darbe yapılmamış numuneye göre yarı yarıya bir azalış söz konusu değildir. Çekirdek malzemesi rijitliği yüzünden kırılma daha önce meydana gelmiştir. Akustik ölçümlerde ses sinyalleri genel olarak iki grupta toplanmıştır. Bu durumun nedeni deney esnasında alınan video kayıttan da görülmüştür ki, plaka kırılması bir uçtan başlamış devam etmiş, plaka ortasında darbe hasarına ulaşınca durmuş daha sonra karşı tarafa geçerek devam etmiştir. En yüksek seviyede ses şiddeti ve sinyal sayısı yine oldukça azdır. Diğer çekirdek malzemeleri ile karşılaştırıldığında yine aynı ses şiddetinde alınan sinyal seviyesinde azalma mevcuttur. 50 J darbe enerjisi incelendiğinde ise 2.7 dk (162 sn) sonra ve 4.9 mm düşey yer değiştirme sonucunda ilk plaka kırılmıştır. Sürede ve yer değiştirmede diğer numunelere göre oldukça düşüş vardır. Ses sinyalleri incelendiğinde ise sinyal şiddetlerinde ve sayılarında ciddi artışlar görülmektedir. Test süresince sinyal alınmıştır. Yüksek şiddette ses sinyalleri daha fazla alınmıştır. En yüksek seviyede sinyal sayısı yalnızca iki kere alınmıştır. Düşük ses şiddetinde test süresince oldukça fazla sinyal alınmış olup tabakalar arası ayrılmalara tekabül ettiği görülmektedir. 75 J darbe enerjisi seviyesinde ise sinyal dağılımında oldukça farklılık vardır. Bu durum diğer numunelerde de görülmüştür. Darbe hasarı artık arka tarafa geçtiği için her iki plakada da hasar mevcuttur ve basma testi ile bitlikte hasarın ilerlemesi daha da kolaylaşmıştır. Sinyal sayısında artış ciddi miktarda artmıştır. Neredeyse tüm sinyal şiddetlerinde ölçüm yapılmıştır. Çekirdek malzemesinde darbe enerjisi arttıkça hasar azalmıştır. Plakalarda hasar çoğaldığı için kırılmalar daha önce meydana gelmiştir. Bu durumda çekirdek hasarını önlemiştir. İlk plakanın kırılması 5.4 mm yer değiştirme sonucunda ve 3.03 dk (182 sn) sonunda meydana gelmiştir.

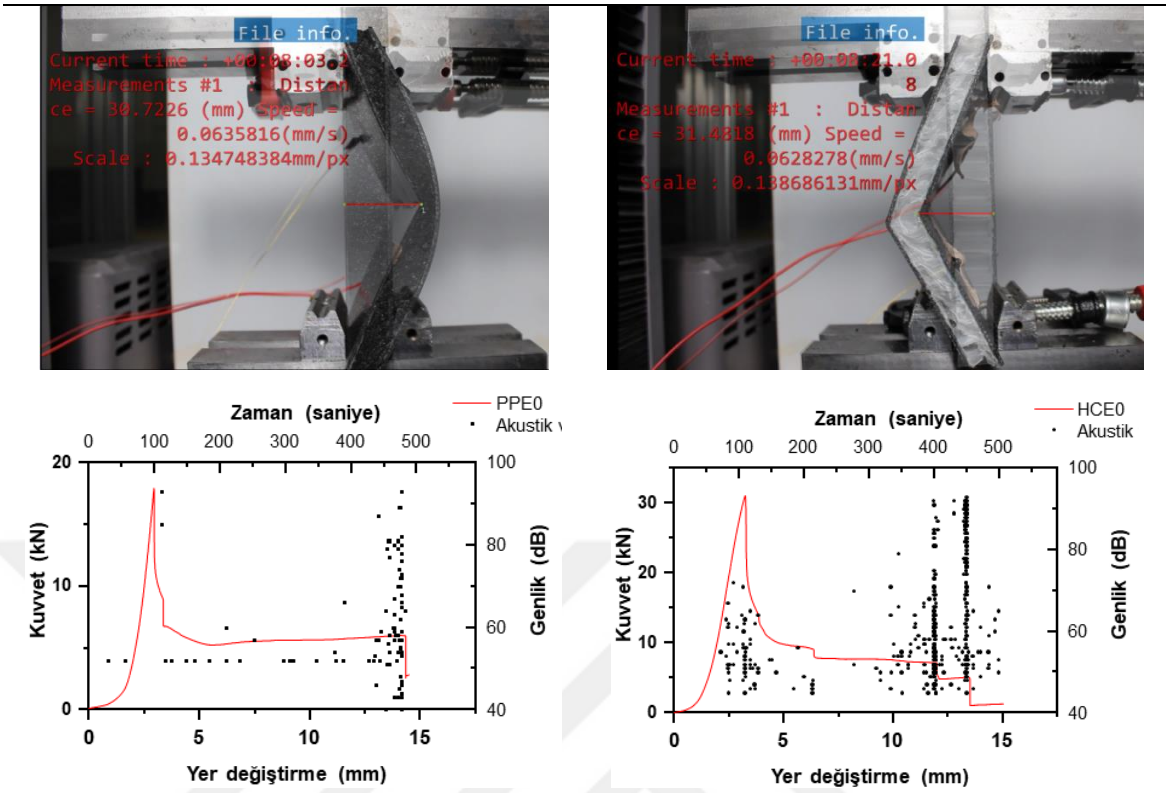
Şekil 3.14'de XPS köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri gösterilmektedir. Testler sonrasında çekirdek malzemede hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. XPS çekirdek düşük ağırlığa, esnekliğe ve dayanıma sahip bir çekirdek malzemesidir. Darbe yapılmamış XPS çekirdekli kompozit panelde ilk plakanın kırılma süresi 4.85 dk (291 sn) ve düşey yer değiştirmesi 8.7 mm olarak ölçülmüştür. XPS çekirdeğin bu davranışı PVC çekirdekli panele benzerlik gösterirken PP ve HC yapıdan daha düşük olarak görülmüştür. Akustik ölçümlerde ise PVC çekirdekli panelden farklılık



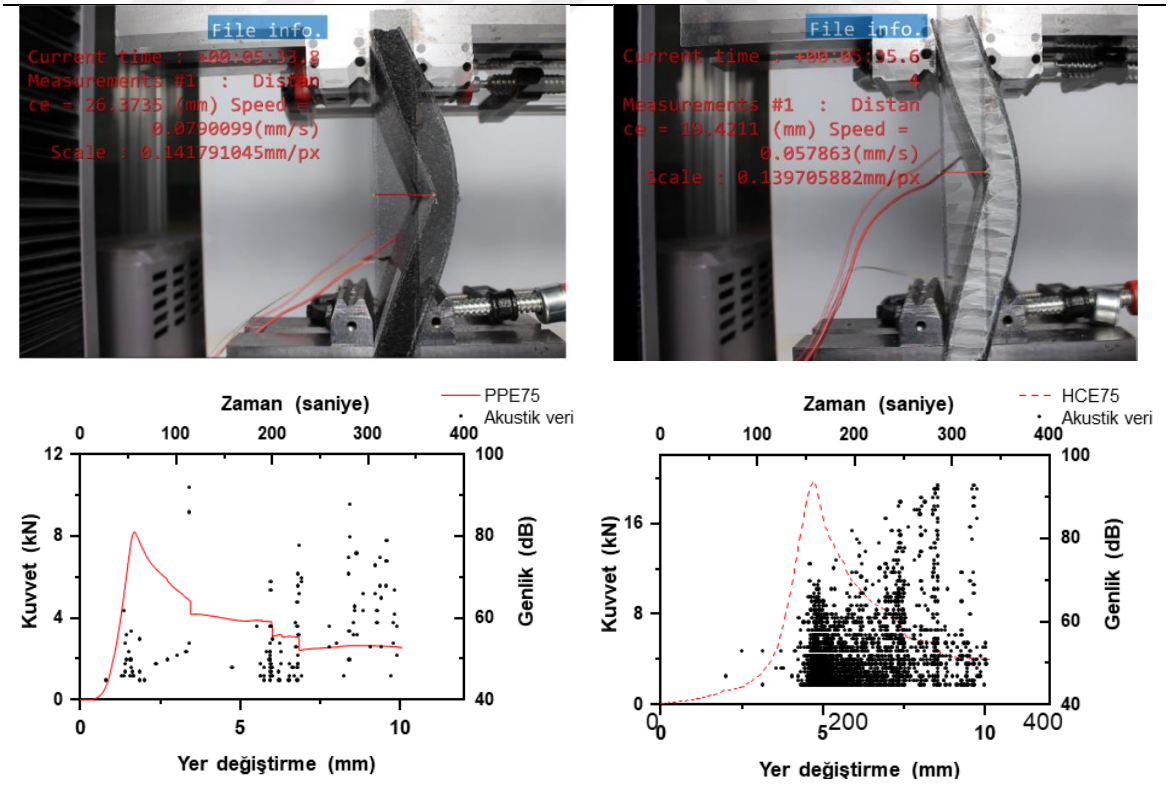
Şekil 3.14. XPS köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri (t, yüzey plakasının ilk kırıldığı süre, d, yüzey plakasının ilk kırılması anındaki dikey deformasyon)

göstermektedir. PVC çekirdekli yapıda ses şiddetleri düşük olurken az sayıda sinyal tespit edilmişti. XPS çekirdekli yapıda ise yüksek ses şiddetinde sinyal yalnızca iki adet tespit edilirken daha düşük seviyelerde ses şiddeti sinyalleri test boyunca tespit edilmiştir. En yüksek sayıda sinyal sayısı ise plakanın kırıldığı süreye tekabül etmektedir. 25 J darbe enerjisi ile sinyal sayılarında ciddi değişiklikler olup, sinyaller bir bölgede yoğunlaşmaktadır. İlk plakanın kırılması 2.9 dk (174 sn) süresinde ve 5.23 mm'de meydana gelmiştir. Bahsedilen yoğunluk, ilk plakanın kırılana kadar hasar oluşumunu karakterize etmektedir. Yüksek sayıda sinyal sayılar farklı ses şiddetlerinde tespit edilmiştir. 50 J darbe enerjili numunede ise test süresince sinyal oluşumu meydana gelmiştir. Yüksek ses şiddetli sinyaller test sonuna doğru daha fazla artmaktadır. Bu enerji seviyesinde alınan sinyal sayısında azalma vardır. Bu durumun nedeni tekrar plakada darbe hasarının fazla olmasından dolayıdır. İlk plaka kırılması ise 2.7 dk (162 sn) sonunda ve 4.9 mm yer değiştirme sonucunda meydana gelmiştir. Darbe enerjisi arttıkça ilk plaka kırılmaları daha önce düşük yer değiştirmelerde meydana gelmektedir. 75 J darbe enerjisi sonrası basma testi yapılan XPS çekirdekli panelin ilk plakası test başladıktan 3.08 dk (184 sn) sonrasında ve 5.5 mm düşey yer değiştirme sonrasında meydana gelmiştir. Akustik ölçümler irdelendiğinde ise beklendiği gibi ses sinyali sayıları benzer ses şiddetleri için artmıştır. Test boyunca hasar meydana gelmiştir. En yüksek ses şiddeti değerlerinde en fazla sinyal sayılarına ulaşılmıştır. Yine PVC ile benzer özelliklerde davranış sergilemiştir.

Akustik ölçümlerin diğer bir hasar toleranslarını anlamda yardımcı grafik ise kuvvet-yer değiştirme-zaman eğrileri ile birlikte yorumlanmasıdır. Bu sayede hangi sürede, hangi yer değiştirme seviyelerinde hangi akustik ölçümlerin hangi kuvvet seviyelerinde meydana geldiğinin görülmesi panellerin birçok davranışını anlamamıza yardımcı olmaktadır. Ancak çalışmada kullanılan parametrelerin fazla olması ve sonuca ulaşmakta detayların azaltılması gereği tez çalışmasındaki tüm parametreler dikkate alınarak bazı seçimler yapılmıştır. Temel motivasyonumuz PP çekirdeği karakterize etmek olduğu için PP çekirdek köpük ile gerek darbe davranışı gerekse darbe sonrası davranışları ile en iyi performansı sergilen HC çekirdek yapısı seçilmiştir. Darbe yapılmamış ve en yüksek darbe enerjisi altındaki panellerin kuvvet-yer değiştirme-zaman-ses dalgası şiddetleri ile hasar görüntüleri irdelenmiştir. Hasar görüntülerinin video kayıtları görüntü işleme yazılımı ile test sonrasındaki yatay yer değiştirmeleri de görüntü işleme ile hesaplanarak karşılaştırılmıştır.



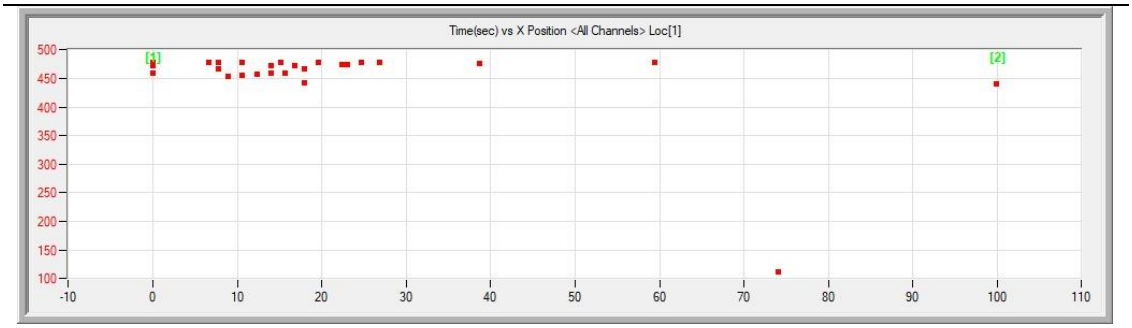
E=0 J



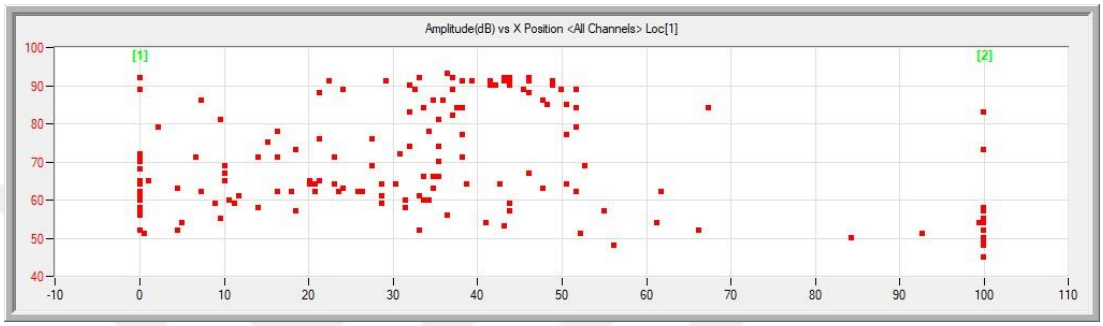
E= 75 J

Şekil 3.15. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan ve 75 J darbe enerjisi sonrası basma testlerinde kevvet-yer değiştirme ile akustik ölçümlerin karşılaştırılması ve yatay yer değiştirmeleri

Şekil 3.15'de PP köpük ve bal peteği (HC) çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan ve 75 J darbe enerjisi sonrası basma testlerinde kevvet-yer değiştirme-zaman ile akustik ölçümlerin karşılaştırılması ve yatay yer değiştirmeleri verilmiştir. Darbe testi yapılmamış PP çekirdekli yapı incelendiğinde, ses sinyalleri ani kuvvet düşüşün olduğu zamanda artmaktadır. Burası plakanın kırıldığı zamana denk gelmektedir. Test süresince alınan ses sinyalleri kuvvet eğrisinin altında kalan düşük ses şiddetlerine tekabül etmektedir. Bu hasar oluşumları genel olarak tabakar arası ayrılmalar olarak yorumlanabilir. Test bittiğinde numunenin kırılan tam orta noktasının yatay ter değiştirmesi 30.7 mm olarak ölçülmüştür. Darbe enerjisi 75 J olduğunda, ses sinyallerinde az da olsa artış söz konusudur. Test başlangıcında oluşan düşük şiddetli sinyaller tabakalar arası ayrılmalar olarak yorumlanmaktadır. Ani kuvvet düşüşlerinde sinyaller ve şiddetleri artmaktadır. Ani kuvvet düşüşleri ciddi fiber kırılmaları anlamına gelmektedir. Bu açıdan hasar sürekli devam etmekte ve sinyal alınmaya devam etmektedir. PP yapının 75 J darbe enerjisi sonrası basma testinnde yatay yer değiştirmesi 26.3 mm'dir. Ancak plaka kırılmalarını görebilmek adına darbe testine maruz kalmamış numunelere 15 mm düşey yer değiştirme olacak şekilde test yapılmıştır. Diğer darbe sonrası basma testi uygulunan numunelere ise 10 mm düşey yer değiştirme uygulanmıştır. Bu açıdan benzer enerji seviyelreinde test yapılan numuneleri karşılaştırmak daha anlamlıdır. Sinyal dağılımları HC yapı ile karşılaştırıldığında daha fazla anlam kazanmaktadır. Darbe yapılmamış HC çekirdekli panel irdelendiğinde alınan sinyal verileri 75 J altındaki PP yapıdan daha fazladır. PP yapının yüksek esnekliği ile hasarı önlemedeki başarısı burada belli olmaktadır. Burada da başlangıçtaki hasar oluşumları yine kuvvet eğrisinin altında kalmaktadır. Bu bölgede oluşan hasarların matris hasarı ve tabakalar arası ayrılmalar olduğu yorumlanmaktadır. Sinyal seviyelerindeki artış ani kuvvet düşüşlerinde meydana gelmiştir. Bu böglelerde oluşan plaka kırılmaları yüksek ses şiddetli sinyallere sebep olmaktadır. Test bittiğinde numunenin yatay yer değiştirmesi 31.4 mm olarak ölçülmüştür. Ön plaka kırılması HC yapıda daha önce olduğu için HC yapının yatay yer değiştirmesi daha fazladır. HC çekirdekli panel 75 J darbe enerjisi sonrası basma testine maruz kaldığında, yatay yer değiştirme 19 mm olmuştur. PP'de ise 26 mm'dir. Burada tam tersi bir davranış vardır. İlk önce PP yapıda plaka kırılmış ve daha fazla yatay yer değiştirme performansı sergilemiştir. Kuvvet-zaman-yer değiştirme ve ses şiddeti (genlik) grafikleri



F-PPT15E0

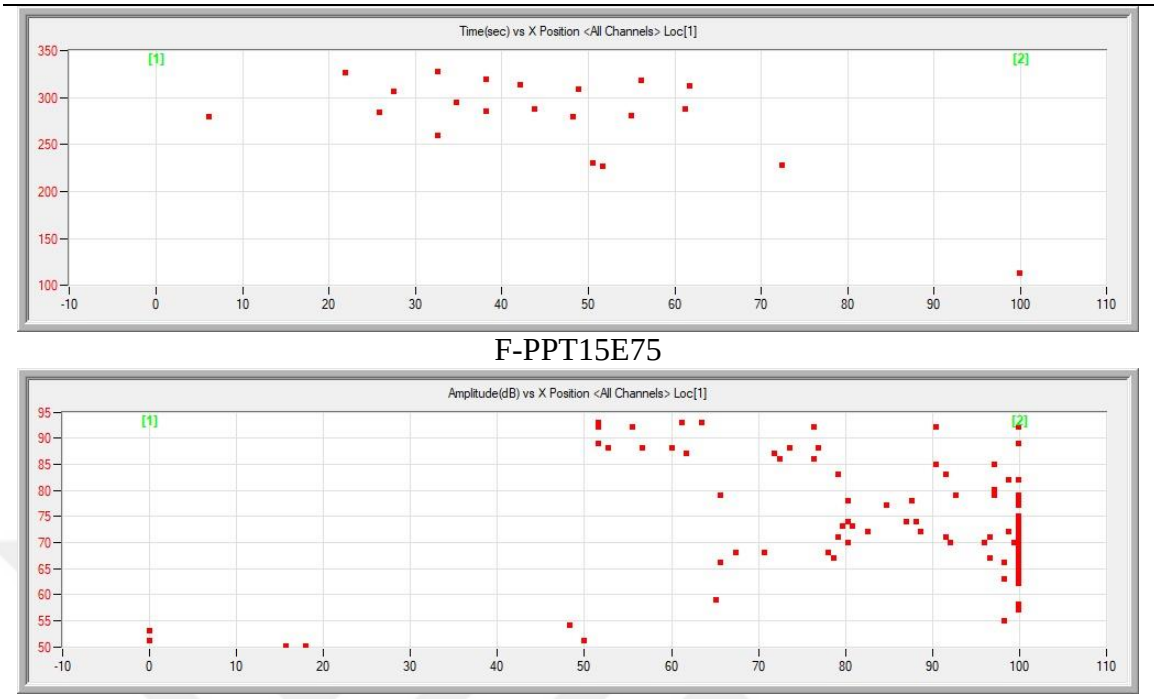


HC-PPT15E0

Şekil 3.16. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan basma testi sırasında yapılan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırılması

irdelendiğinde ise en farklı davranış burada meydana gelmektedir. Yine ses sinyalleri kuvvet eğrisinin altında kalmıştır. Kuvvet eğrisinin üzerine çıktığı bölgelerde yüksek ses şiddetleri görülmektedir. Özellikle 5 mm civarlarında yani kritik yük değerinden sonra ses sinyallerinde ciddi bir artış vardır. En fazla ses şiddeti 60-70 dB seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu bölgelerde fiber kırılmaların az olmakla birlikte tüm hasarların meydana geldiği görülmektedir. PP çekirdekli yapının hasarı önlemede ki başarısı tekrar görülmektedir. En yüksek ses şiddeti sinyalleri 250 saniye sonrasında ve 7 mm düşey yerdeğiştirmeden sonra meydana gelmektedir. Bu sonuç plakalaların kırılmalarını ifade etmetkedir.

Şekil 3.16 PP köpük ve bal peteği (HC) çekirdekli sandviç panellerin darbe yükü olmadan basma testi sırasında yapılan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırılmasını göstermetkedir. Yaptığımız akustik ölçümlerin en önemli bölümlerinden birtanesi iki sensör (mikrofon) kullanarak ölçümleri yapmamızdır. Sensörler bütün numunelerin üzerinde ölçüm yapılarak belirli noktalara yerleştirilmiştir. Numunelerin boyu 150 cm eni ise 100 cm'dir. Mikrofonlar numunlerin 150 cm'lik boyu üzerinden 25'şer cm sağdan ve soldan gelerek 100 cm'lik orta bölge kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Kullanılan yazılım gereği ses sinyali her iki mikrofon (sensör) tarafından duyulması ile oluşan sinyalin yeri belirlenebilmekedir. Verilen görselde



F-PPT15E75

HC-PPT15E75

Şekil 3.17. PP köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin 75 J darbe sonrası basma testi sırasında yapılan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırılması

konum ve ses şiddeti grafikleri bulunmaktadır. Bu sayede konuma göre hangi hasarın oluştuğu yorumlanabilmektedir. Darbe yapılmamış PP çekirdeki panel dikkate alındığında diğer akustik verilerin olduğu grafiklerde olduğu gibi burada da oldukça az sayıda sinyal mevcuttur. Bu grafiklerde sinyal oluşabilmesi için gerekli şart ses sinyalinin her iki sensör tarafından da algılanabilmesidir. Numunelerin üst sensörü 0 olarak yazılmıştır. Bu açıdan PPT15E0'da sinyaller daha çok üst sinyale yakın olarak tespit edilmiştir. HC çekirdekli yapıda ise sinyal sayısı oldukça fazladır. Konumlar genel olarak yukarıdaki sensöre yakındır. En yüksek şiddetli sinyaller orta noktaya doğru çoğalmaktadır. Ama genel trend benzerdir. Şekil 3.17'de ise 75 J darbe testi sonrası PP ve HC çekirdekli yapıların basma testlerinde alınan akustik ölçümlerin konuma göre karşılaştırmaları verilmiştir. Yine PP çekirdekli yapıda sinyal sayısı azdır. HC çekirdekli yapıda ise sinyaller alt taraftaki sensöre yakındır. En yüksek şiddetli sinyaller orta noktalarda meydana gelmiştir.

4. BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında farklı çekirdek malzemelerine sahip kompozit sandviç panellerin darbe ve darbe sonrası davranışları incelenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak Polipropilen, Polistren ve Polivinil klorür kimyasal yapıya sahip kapalı hücreli köpük yapılar ve polipropilen bal peteği yapıya sahip malzemeler kullanılmıştır. Kompozit plakalar olarak karbon fiber /epoksi malzeme kullanılmıştır. Mühendislik yapılarına son yıllarda girmeye başlayan PP köpük yapının bilinen diğer yapılara karşı performansı irdelenmiştir. Bu açıdan üretilen numunelere düşük hızlı darbe testi yapılarak yapıların darbe dirençleri araştırılmıştır. Yapıların hasar aldıktan sonra dayanımları ölçmek için de darbe sonrası basma testleri yapılarak, kritik yük değerleri, hasar toleransları, hasar davranışları, kritik yük karışışındaki yer değiştirmeleri irdelenmiştir. Bu araştırmalar yapılırken numuneler üzerinden akustik veriler alınmış, sınıflandırılmış ve yorumlanmıştır.

Darbe enerjileri 25, 50 ve 75 J olarak, hasar mekanizması oluşum şekillerine göre karar verilmiştir. Darbe davranışları, kuvvet-zaman, kinetik enerji-zaman grafikleri ve hasar görüntüleri ile incelenmiştir. Darbe sonrası testler de darbe yapılmamış numunelerde kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Darbe sonrası basma testleri malzemeleri uzun yönleri tarafından burkulmaya da izin verilecek şekilde yapılmıştır. Sandviç yapının performansını tam olarak gösterebilmesi için bu şekilde ayarlanmıştır. Basma testleri boyunca video kayıt alınarak ve akustik ölçüm sistemi kullanılarak davranışlar karakterize edilmiştir. Akustik ölçümler malzemelerin üzerlerine akustik sensörler bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerde hasar oluşumları sırasında çıkardıkları sesler sınıflandırılarak yorumlanmıştır. Çıktı olarak ses şiddeti (genlik), aynı şiddetteki sinyal sayıları, zaman ve konum verileri alınmıştır. Basma cihazı düşey yer değiştirme

ölçmektedir ancak yatay yer değiştirmeler de davranışları belirlemek açısından ciddi fikirler vermektedir. Bu açıdan testler boyunca alınan video kayıtlar görüntü işleme yöntemi ile yatay yer değiştirmeler ölçülmüştür.

Darbe enerji seviyesi artması ile HC ve PVC çekirdekli yapının en büyük temas kuvvetlerinde anlamlı bir değişiklik olmazken PP ve XPS çekirdekli yapılarda bir artış olmuştur. HC, PVC ve XPS çekirdek yapılı sandviçlerde darbe hasarı sonucu ve darbe yönü plakası kırılması ile yük taşıma kabiliyetinde büyük bir azalış olmuştur ve diğer yüzey plakasına darbe yükü ulaştığında tekrar yük taşıma kabiliyetinde bir artış olmuştur. PP çekirdekli yapıda ise darbe yönü plakası kırılmasına karşı yük taşıma kabiliyetinde çok az bir azalış meydana gelmiştir ve yapının yük taşıma sürekliliği devam etmiştir.

25 J darbe enerjisi altında PP çekirdekli yapı en az enerji sönümleyen yapı olmuştur.50 J darbe enerjisi altında yapıların enerji sönümleme kabiliyeti araştırıldığında neredeyse tüm yapılar enerjinin %95'ini sönümlemiştir.75 j darbe enerjisinde ise enerjinin tamamı sönümlenmiştir.

25 J enerji seviyesi için darbe hasar görüntüleri incelendiğinde tüm yapılarda ön plakada darbe hasarı meydana gelirken arka plakalarda herhangi bir hasar oluşmamıştır.50 J enerji seviyesi için arka plakaların küçük hasarlar aldığı gözlemlendi.75 J enerji seviyesinde PP çekirdek yapının arka plakasının daha fazla kırıldığı, HC çekirdekli yapıda ise fiberlerin tamamen birbirinden ayrılmadığı görüldü. PP köpük yapı daha köşeli bir hasar meydana getirirken HC yapıda daha dairesel bir hasar geometrisi oluşmuştur.

PP köpük kalınlığı artışı etkisi, geleneksel köpük malzemelerindeki kalınlık artışı etkisine kıyasla anlamlı bir şekilde etki etmemiştir. Vurucu uç, köpük yapısına geçtiğinde daha kalın olan çekirdekli yapıda ani bir yük taşıma kabiliyeti azalışı mevcuttur.

Darbe testi yapılmamış PP, HC, PVC ve XPS çekirdekli sandviç panellerin basma testi sonucu, en fazla yük taşıma kabiliyeti olan yapı PVC köpük çekirdekli panel olurken en düşük yük taşıyan yapı ise PP çekirdekli paneldir. 25 J darbe enerjisi ile test yapılan numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrası basma testi sonuçlarında en düşük kuvvet

PP köpükte meydana gelmiştir. Darbe hasarı almayan numuneler ile karşılaştırıldığında HC köpüklü yapıda yük değişme kabiliyeti değişmemiştir. 50 J ve 75 J darbe enerjisine maruz kalan panellerin basma testleri sonucu HC ve PVC çekirdekli paneller benzer yükleri taşıyabilmiştir ve PP çekirdekli yapı en az yük taşıyan yapı olmuştur.

Darbe enerjisi arttıkça darbe sonrası basma testi kritik yük değerlerinde azalış olduğu görülmektedir. En düşük kritik yük değerleri PP çekirdekli panellerde en yüksek kritik yük değerleri ise HC ve PVC çekirdekli panellerde ortaya çıkmıştır.

15 ve 30 mm kalınlıklı PP paneller için köpük kalınlığı arttıkça kritik yük değerinde bir artış olmuştur. Ancak darbe yapılmamış numune için kritik yük değerleri oldukça benzer çıkmıştır. Darbe hasarı aldıkça yüksek köpük kalınlıklı yapının kritik yük değerlerindeki düşüş, köpük kalınlığı küçük olan yapıya göre daha düşüktür.

Akustik ölçümler ile ses sinyalleri genel olarak plakanın kırıldığı sinyal civarlarında çıkmıştır. Darbe köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sırasında ölçüm yapılan akustik verileri ve deformasyon görüntüleri incelendiğinde 25 J enerjiye maruz bırakılan panel, darbe yapılmayan numuneye göre ilk plakanın kırılma süresi ve düşey deformasyonu yarı yarıya azalmıştır. Darbe enerjisi arttıkça plaka kırılması, daha düşük düşey yer değiştirmeler ve süreler sonucunda meydana gelmiştir.

PP çekirdek ile karşılaştırıldığında, HC çekirdek daha önce ve düşük yer değiştirme sonunda kırılmıştır. Bu durum PP çekirdeğin yüksek esnekliğe sahip olmasından dolayı meydana gelmiştir.

PVC köpük çekirdek diğer çekirdek malzemelerine göre yüksek rijitliğe sahip çekirdek malzeme olasından dolayı genel olarak basma testlerinde çekirdek malzemesinde kırılmalar meydana geldiği görülmektedir. Çekirdek malzemesi rijitliği yüzünden kırılma daha önce meydana gelmiştir.

XPS köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin darbe sonrası testleri sonrasında çekirdek malzemede hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. XPS köpük çekirdekli yapının ilk kırılma süresi ve yer değiştirmesi PVC panelle benzerlik göstermiştir.

Basma testlerinde kevvet-yer değiştirme-zaman ile akustik ölçümlerin karşılaştırılması ve yatay yer değiştirmeleri incelendiğinde darbe yapılmamış HC çekirdekli panelden

alınan sinyal verileri 75 J altındaki PP yapıdan daha fazladır. PP yapının yüksek esnekliği ile hasarı önlemedeki başarısı burada belli olmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Barbeo, E.J. 2017. Introduction to Composites Materials Design. CRC Press.

2. Beşergil, B. 2016. Kompozitler Temel İlkeler Test Metodları. Gazi Kitabevi, Ankara.

3. Mazumdar, S.2001 .Composites Manufacturing;Materials,Product and Process Engineering. CRC Press.

4. Advani, S.G, Hsiano, K.T. 2012. Manufacturing Tecniques for Polymer Matrix Composites. Woodhead Publishing Limited.

5. Callister, W.D. 2006. Materials Science and Engineering Introduction.Chapter 16 Composites 7th Ed.,596.

6. Ayrılmış, N., Ulay, G., Bağlı E., Özkan, İ. 2015. Ahşap sandviç kompozit levhaların yapısı ve mobilya endüstrisinde kullanımı. **Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 15**(1):37-48.

7. Kaw, A.K. 2005. Mechanics of Composite Materials. CRC Press.

8. Zenkert, D. 1995. Introduction to Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd.

9. Alioğlu, M. 2020. Karbon-fiber-epoksi, balsa sandviç malzemesinin imalatı, modellemesi ve davranışlarının incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

10. Karlsson, K.F. and Astrom, B.T. 1997. Manufacturing and aplications of structural sandwich components. Composite Part A., **Aplied Science and Manufacturing, 28** (2):97-111.

11. Kolat, K. 2005. Farklı ortamların sandviç kompozitlerin kırılma tokluğu üzerindeki etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

12. Meo, M., Vignjeviç, R., Marengo,.G. 2005. The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading. **International Journal of Mechanical Science, 47**: 1301-1325.

13. Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., Stone., J. 2005. Low velocity impact of combination kevler / karbon fiber sandwich composites. **Composite Structures, 69**:396-406.

14. Lin,. J. C., Chang, L. C., Nien, M. H., Ho. H.L. 2006. Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low velocity impact. **Composite Structures, 74**:30-36.

15. Herup, E.J., Palazotto, A.N. 1997. Low-velocity impact damage initiation in grafhite/epoxy/nomex honeycomb-sandwich plates. **Composites Science and Technology, 57**:1581-1598.

16. Park, J.H., Ha, S.K., Kang, K.W., Kim, C.W., Kim, H.S. 2008. Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact. **Journal of Materials Processing Technology, 201**:425-430.

17. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M., Lessard, L. 2006. Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impact. **Composites Science of Technology, 66**(1):61-68.

18. Mocian, O., Contantinescu, D. M., Sandu, M., Sorohan, Ş. J. 2017. İmpact respense of polyurethane and polystyrene sandwich panels. 635-658 **2nd Internatinal Conferance on Structural Integrity**, 4-7, Maderia, Portugal.

19. Shubel, P., M., Luo, J. J., Daniel, I. M. 2005. Low velocity impact behavior of composite sandwich panels. **Composites, Part A, 36**:1389-1396.

20. Shubel, P., M., Luo, J. J., Daniel, I. M. 2005. Low velocity impact behavior of composite sandwich panels. **Composites, Part A, 38**:1051-1057.

21. Aslan, M., Güler, O., Çava, K., Alver, Ü., Yüceloğlu, E. 2017. Sandviç panel kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine bir çalışma. **602-610, Uluslararası 2.Savunma Sanayi Sempozyumu, 6-8 Nisan**, Kırıkkale.

22. Demircioğlu, T. K., Balıkoğlu, F., Arslan, N., Özey, F. 2016. Sandviç kompozitlerin darbe sonrası basma dayanım testleri : Ara tabaka etkisi. **16th International Materials Symposium,12-14 Ekim**, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

23. Shipska, A., Zenkert, D. 2005. Compression-after-impact strength of sandwich panels with core crushing damage . **Applied Composite Materials, 12**: 149-164.

24. Bai, R., Guo, J., Lei, Z., Liu, D., Ma, Y., Yan, C. 2019. Compression after impact behavior of composite foam-core sandwich panels. **Composite Structures, 225**:111181.

25. Wan, Y., Yang, B., Jin, P., Zheng, Z., Huang, Y. 2021. Impact and compression-after-impact behavior of sandwich panels comprised of foam core and wire nets/glass fiber reinforced epoxy hybrid facesheets. **Journal of Sandwich Structures & Materials, 23** (6):2614-2637.

26. Wu, Y., Wan, Y. 2019. The low -velocity impact and compression after impact (CAI) behavior of foam core sandwich panels with shape memory alloy hybrid face-sheets. **Sci Eng Compos Mater, 26** :517-530.

27. XPS Türkiye. (2018). XPS nedir? (Web sayfası: **http://www.XPSturkiye.org/-sayfa.asp?ID=129**), (Erişim Tarihi: Kasım 2020).

28. Sunay, M. S. 2012. Polimer-polimer ve polimer-metaloksit kompozit sistemlerde film oluşum davranışlarının incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 178.

29. Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti. Kompozit Shop, 2019. (Web sayfası: **https://www.kompozitshop.com/araldite-2015-epoksi-yapistirici-200ml**). (Erişim tarihi: Kasım 2020)

30. Mangalgiri, P.D. 1999. Composite materials for aerospace applications. . **B. Mater. Sci., 22**:657-664.

31. Schneider, C., Kazemahvazi ,S., Russell, B.P., Zenkert, D., Deshpande ,V.S. 2016. Impact response of ductile self-reinforced composite corrugated sandwich beams. **Composites Part B: Engineering., 99**: 121-131.

32.Ascione, F. 2014. Influence of initial geometric imperfections in the lateral buckling problem of thin walled pultruded GFRP I-profiles. **Compos. Struct. , 112**:85-99.

33. Liu, L., Feng, H., Tang, H., Guan, Z. 2016. Impact resistance of Nomex honeycomb sandwich structures with thin fibre reinforced polymer facesheets. **J. Sandw. Struct. Mater., 20**: 531-552.

34.Zhou, J., Liu, J., Zhang, X., vd. 2019. Experimental and numerical investigation of high velocity soft impact loading on aircraft materials. **Aerosp. Sci. Technol., 90**: 44-58.

35. Yazdani Sarvestani,H., Mirkhalaf, M., Akbarzadeh, A.H., Backman, D., Genest, M., Ashrafi,B.(2019).Multilayered architectured ceramic panels with weak interfaces: energy absorption and multi-hit capabilities. **Mater. Design, 167**: 107627.

36. Abrate, S. 1997. Localized impact on sandwich structures with laminated facings. **Applied Mechanics Reviews, 50**: 69-82.

37. Xiao, D., Chen, X., Li, Y., Wu, W., Fang, D. 2019. The structure response of sandwich beams with metallic auxetic honeycomb cores under localized impulsive loading-experiments and finite element analysis. **Mater. Design, 176**:107840.

38. Gao, Q., Ge, C., Zhuang, W., Wang, L., Ma, Z. 2019. Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading. **Mater. Design, 161**: 22-34.

39. Yang, B., Wang, Z., Zhou, L., Zhang, J., Tong, L., Liang, W. 2015. Study on the low-velocity impact response and CAI behavior of foam-filled sandwich panels with hybrid facesheet. **Compos. Struct., 132**:1129-1140.

40. Ji, G., Ouyang, Z., Li, G. 2013. Debonding and impact tolerant sandwich panel with hybrid foam core. **Compos. Struct., 103**: 143-150.

41. Sun, X.C., Hallett, S.R. 2018. Failure mechanisms and damage evolution of laminated composites under compression after impact (CAI): Experimental and numerical study. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 104**:41-59.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı:	Emre LEKESİZCAN
Uyruğu:	Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	**Kurum**	**Mezuniyet Tarihi**
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2014
Lise	Kayseri Anadolu Lisesi, Kayseri	2009

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2016-Halen	Asansör Kontrol Muayene Tic. Ltd. Şti.	Makine Mühendisi
2014-2016	İntertek Mühendislik Asansör Sistemleri	Makine Mühendisi
2013-2014	Yapı-Fen Mühendislik Isı Paylaşım Sistemleri	Makine Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce