

**BALPETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DARBE
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Zafer Bülent ENGİN

**Y.Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR
2011**

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BALPETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DARBE
ANALİZİNİN İNCELENMESİ**

Zafer Bülent ENGİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2011

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Yrd. Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR'ın danışmanlığında, Zafer Bülent ENGİN tarafından hazırlanan bu çalışma 16/09/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Şemsettin TEMİZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Cesim ATAŞ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR

İmza :

(imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum
Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

Bu çalışma TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 108N1144

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BALPETEĞİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Zafer Bülent ENGİN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd.Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR

Mühendislik yapılarında özellikle imalat, montaj ve kullanım aşamasında dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunu engellemek için malzemenin bu tip etkiler karşısında davranışının nasıl olacağını bilmesi istenir. Yapılan darbe testleri ile bu tepkiler tahmin edilebilir. Bu çalışmada sandviç yapıların darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Darbe deneyleri alt ve üst yüzey levhaları alüminyum, çekirdek kısmı ise nomex olan numuneler için farklı enerji değerlerinde yapılmıştır. Deneylerde 4 farklı sandviç yapı kullanılmıştır. Bu sandviç yapılarda kullanılan alt ve üst levha kalınlıkları (t_1) 0,5-0,7-1 ve 1,2 mm, çekirdek malzeme kalınlığı (t_2) ise 5 mm'dir. Çekirdek (ara) malzeme alt ve üst levhalara özel bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Sözü edilen numunelerin, çeşitli darbe enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri ve bunlara karşılık gelen numune (darbeye uğramış) fotoğraflarına yer verilmiştir. Bu grafik ve fotoğraflar birlikte göz önüne alınarak darbeye uğramış numunelerin hasar mekanizmalarına ilişkin değerlendirme ve yorumlar yapılmıştır.

2011, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sandviç yapı, balpeteği, düşük hızlı darbe

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOR OF HONEYCOMB SANDWICH STRUCTURES

Zafer Bülent ENGIN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Gürkan ŞAKAR

In the engineering applications appear to against unexpected results especially in manufacturing, assembling and any stroke of outside effects at the time of using. To prevent this circumstances should be requested to know and how the material behavior against this effects. Consequently, the experimental impact tests can be predicted for reactions effects. In this study, impact behaviors of sandwich structures have been examined experimentally. The impact tests were conducted at different impact energy levels for samples consisting of aluminum face sheets and nomex cores. Four different sandwich structures were used in the tests. The thicknesses of the face sheets were 0,5-0,7-1 and 1,2 mm, while that of the core was 5 mm. The core material was affixed with a special kind of glue to the upper and lower face sheets. Load time, load-deflection and energy-time curves of the mentioned samples along with the corresponding images of damage for various impact energy values are given. They are used in evaluation and discussion of the damage mechanisms of the samples.

2011, 80 pages

Keywords: Sandwich structure, honeycomb, low velocity impact

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalıőmalarımın başından sonuna kadar ve bu tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Yrd.Doç.Dr.Gürkan ŞAKAR bey'e, aileme teşekkür ederim.

Bu tez 108M544 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleşmiştir, desteklerinden dolayı TÜBİTAK yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri.....	4
1.1.1. Kompozit malzeme kullanımının önemi.....	7
1.1.2. Kompozit malzeme kullanım alanları.....	8
1.1.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	9
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Sandviç Yapı Teknolojisi.....	11
2.2. Petek Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	16
2.3. Bal Peteği Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Metodları.....	18
2.3.1. Sıcak pres metodu.....	19
2.3.2. Vakum metodu.....	20
2.3.3. Kalıp metodu ile şekil verme.....	21
2.4. Sandviç Petek Yapıların Temel Kullanım Alanları.....	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	29
3.1. Çentik Darbe Testleri.....	29
3.1.1. Charpy darbe testi.....	31
3.1.2. İzod Darbe Testi.....	32
3.2. Ağırlık Düşürme Testleri.....	32
3.2.1. Düşük hızlı darbe.....	32
3.2.2. Yüksek hızlı darbe.....	34
3.3. Darbe Test Hesaplamaları.....	34
3.3.1. $F(t)$, Ölçülen kuvvet.....	35
3.3.2. $E(t)$, Absorbe edilen enerji.....	35

3.3.3. $\delta(t)$ Çarpma ile oluşan yer değiştirme.....	36
3.4. Deneysel Çalışmalar.....	39
3.4.1. Materyal.....	39
3.4.2. Darbe Test Düzenegi.....	40
4. ARAşTIRMA BULGULARI ve TARTIşMA.....	43
5. SONUÇ.....	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİş.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzeme.....	5
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.1. Farklı çekirdek malzemelere sahip sandviç yapılar.....	11
Şekil 2.2. Sandviç yapısı.....	12
Şekil 2.3. Alt ve üst yapıyı oluşturan malzemeler.....	13
Şekil 2.4. Farklı çekirdek yapısı.....	14
Şekil 2.5. I kirişi ile sandviç panelin kıyaslanması.....	15
Şekil 2.6. Uzatarak şekil verme yöntemi.....	16
Şekil 2.7. Kıvrırma metodu ile şekil verme.....	16
Şekil 2.8. Farklı tip petek yapılar.....	17
Şekil 2.9. Petek yapısı geometrisi.....	17
Şekil 2.10. Sıcak pres metodu ile sandviç kompozit üretimi.....	19
Şekil 2.11. Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş sandviç yapısı.....	20
Şekil 2.12. Vakum yöntemi ile sandviç yapısı üretimi.....	20
Şekil 2.13. Vakum yöntemi ile üretilmiş sandviç yapısı.....	21
Şekil 2.14. Kalıp metodu ile sandviç kompozit üretimi.....	22
Şekil 2.15. Kalıp metodu ile üretilmiş sandviç kompozit yapısı.....	22
Şekil 2.16. Ticari bir uçak.....	23
Şekil 2.17. Petek yapısının kullanıldığı bir örnek.....	24
Şekil 2.18. Tren vagonunda kompozit sandviç kullanılan bölgeler.....	25
Şekil 2.19. Teknede kompozit sandviç kullanım bölgeleri.....	25
Şekil 2.20. Bir jet motorunda kompozit sandviç yapısı kullanım alanları.....	26
Şekil 2.21. F/A-18 E/F uçağının görünümü (The Flight Group 2005).....	26
Şekil 2.22. Spor araçlarında kullanılan bazı kompozit malzemeler.....	27
Şekil 2.23. Otomotiv sanayide kompozit malzeme kullanımı.....	27
Şekil 2.24. Bazı müzik aletlerinde kullanılan kompozit malzemeler.....	28
Şekil 3.1. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi.....	30
Şekil 3.2. Charpy deneyinde numune ve çekiş konum şeması.....	31

Şekil 3.3. İzod deneyinde numune ve çekiç konum şeması.....	32
Şekil 3.4. Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.5. Gaz tabancası deney düzeneği şeması	34
Şekil 3.6. Kirişin dinamik yerdeğiştirmesi.....	37
Şekil 3.7. Sandviç yapıyı oluşturan elemanlar.....	39
Şekil 3.8. Sandviç yapı.....	40
Şekil 3.9. CEAST-Fractovis Plus test cihazının ana parçaları.....	41
Şekil 4.1. Bir darbe olayında karşılaşılan eğri tipleri	43
Şekil 4.2. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	46
Şekil 4.3. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	47
Şekil 4.4. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	48
Şekil 4.5. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	49
Şekil 4.6. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	50
Şekil 4.7. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	51
Şekil 4.8. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 20 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	52

Şekil 4.9. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	53
Şekil 4.10. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	54
Şekil 4.11. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimle.....	55
Şekil 4.12. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 25 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	56
Şekil 4.13. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 35 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	57
Şekil 4.14. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	58
Şekil 4.15. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	59
Şekil 4.16. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	60
Şekil 4.17. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 20 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	61
Şekil 4.18. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 25 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri	62

- Şekil 4.19.** Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 35 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri 63
- Şekil 4.20.** Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 45 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri 64
- Şekil 4.21.** Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 60 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri 65
- Şekil 4.22.** Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-deplasman,kuvvet-zaman,enerji-zaman grafikleri..... 66
- Şekil 4.23.** Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-deplasman,kuvvet-zaman,enerji-zaman grafikleri..... 67
- Şekil 4.24.** Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-deplasman,kuvvet-zaman,enerji-zaman grafikleri.....68
- Şekil 4.25.** Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-deplasman,kuvvet-zaman,enerji-zaman grafikleri..... 69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Balpeteği sandviç yapının avantajları.....	12
Çizelge 4.1. Tüm levha kalınlıklarının tüm enerji seviyelerindeki temas kuvveti ve temas süresi çizelgesi.....	45

1. GİRİŞ

Günümüzde, insanların ihtiyaçları teknolojinin gelişimi ile beraber artmaktadır. Yeni malzeme üretimi, bu ihtiyaçların başında gelmektedir. Tabiatta sınırlı sayıda bulunan ana malzemelerin ve bu malzemelerin özelliklerinin teknolojinin gelişmesiyle, yetersiz kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla hem ekonomik hem mukavemetli hem de çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece, değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle, elde edilen kompozit malzemeler günümüzde büyük önem kazanmıştır.

Sandviç kompozitler, kompozit malzemelerin özel bir çeşidi olup, iki tane ince ve rijit alt ve üst yüzey tabaka arasına kalın ama oldukça hafif çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle elde edilir. Sandviç kompozitler, özellikle klasik malzemelere oranla sahip oldukları hafiflik, yüksek “dayanım/ağırlık” oranı, dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayinden, denizcilik, otomotiv ve yapı endüstrisine kadar değişen pek çok sahada geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sandviç malzemelerin, çeşitli uygulamalar için alt ve üst yüzey tabakaları ile çekirdeğinin farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilerek optimal dizaynların elde edilebilmesi en büyük avantajları arasındadır.

Dinamik yükler mühendislik yapıları üzerinde zamana bağlı değişken genlikli gerilmeler ve titreşimler oluşturmakta ve yapının faydalı ömrünü azaltmaktadır. Yukarıda bahsi geçen yüklemelerin mühendislik malzemelerinin yanı sıra sandviç kompozit yapılar üzerinde de önemli etkileri olmaktadır. Sandviç kompozitler sahip oldukları mekanik özelliklerinden dolayı günümüzde yukarıda bahsedilen birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadırlar. Darbe testleri genellikle günlük yaşamda karşılaştığımız çivi çakmak, çekiçle dövmek, otomobil çarpışmaları, araçların küçük tampon darbeleri, hareket halinde araca sıçrayan taş, yoldaki çukura hızla ve aniden düşen bir araba tekerleği ve sandviç kompozit bir kanat yapı üzerine bakım esnasında

düşürülen bir aletin darbe etkileri gibi gerçek olaylarla bir benzeşim yapılarak oluşturulmaktadır.

Günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip olan sandviç kompozit malzemelerde, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalan ve/veya kalmayan bölgede de genellikle gözle görülemeyen veya çok zayıf şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Bu tür hasarlar daha sonra malzemenin dinamik yük etkisi altında çalışma durumunda büyüyerek daha geniş çaplı hasarlara meydan verebilir. Bu sebeple sandviç kompozit bir yapıda darbe etkisinin oluşturacağı hasarı önceden tahmin etmek üretim, tasarım ve kullanım açısından büyük önem arz etmektedir.

Konunun önemi nedeniyle, bu konularda literatürde yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda değişik sandviç yapılar için mekanik ve dinamik davranışlar incelenmiştir. Çalışmalarda sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey tabakalarının ve çekirdek malzemesinin geometrik ve malzeme özelliklerinin değişiminin, çeşitli sınır şartlarının, farklı sandviç yapı modellerinin dinamik özelliklere olan etkisi, farklı nümerik yöntemlerle ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

Meo *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada bal peteği sandviç panellerde çarpma hasarlarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Deney için kullanılan kompozit paneller uçak kapı malzemelerinden seçilmiştir. Kompozit sandviç panellerin düşük hızlarda darbe cevabı beş farklı enerji seviyesi için yapılmıştır. Yapılan çalışma ile hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve hasar mekanizmaları hakkında bilgi edinilmiştir. Araştırmalar sonucunda nümerik çalışmalarla, deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu da araştırmacılara nümerik analizler sayesinde çok fazla deneysel çalışma yapmadan darbe dayanımı en yüksek yapının elde edilmesini sağlamıştır. Hazizan and Cantvel (2003) çalışmalarında alüminyum bal peteği kompozit yapıların düşük hızlı darbe cevaplarını, yutulan enerjinin, kayma ve temas etkilerinin dikkate alındığı basit enerji-denge modelini kullanarak incelemiştir. Enerji-denge modeli ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumun özellikle düşük enerji seviyelerinde iyi

olduğunu görmüşlerdir. Kullanılan model ile çarpma esnasında ortaya çıkan enerjinin bulunabileceği, ayrıca yutulan enerjinin sandviç yapının geometrisi ve konfigürasyonuna bağlı olduğu görülmüştür. Herup and Palazotto (1997) çalışmalarında 4-48 tabakadan oluşan alt ve üst yüzey tabakaları grafit/epoksi ve çekirdek malzemesi Nomex bal peteğinden oluşan sandviç yapının düşük hızlı darbe ve statik çentik deneylerini yapmışlardır. Darbe deneyleri ile kompozitte hasarın başladığı enerji değişimleri verilmiştir. Araştırmalarında statik çentik deneyleri ile elde edilen hasarların düşük hızda elde edilen hasarla benzer olduğunu bulmuşlardır. Qiao and Yang (2007) fiber takviyeli tabakalı alt ve üst yüzey elamanlarına ve sinüzoidal geometriye sahip bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlerin çeşitli değişkenler için (farklı çekirdek malzemesi ve tabaka malzemeleri gibi) titreşim ve darbe davranışlarını teorik olarak hesaplamışlardır. Bu analizler yapılırken yüksek dereceli kiriş teorisi kullanılmış, buradan elde edilen sonuçlar Abaqus ve Ls-dyna yazılımları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Griskevicius *et al.* (2010) çekirdeği plastik esaslı malzemeden oluşan sandviç yapıların quasi-statik ve dinamik yükleme durumlarındaki darbe davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Simonetta and Giuseppe (2008) bir yarış arabasının alüminyum sandviç malzemeden yapılmış çarpışma bölgelerinin enerji yutma yeteneklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Yapılan darbe deneyleri düşük hızlarda gerçekleştirilmiştir. Palazotto *et al.* (2007) kompozit sandviç bir plağın düşük hızlı darbe davranışını plak eğilmelerini kullanarak sonlu elamanlar metoduyla teorik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada sandviç yapının alt ve üst yüzleri kompozit malzeme, çekirdek ise nomex malzemeden oluşmaktadır. Park *et al.* (2008) çekirdeği nomex bal peteğinden alt ve üst tabakası ise karbon/epoksi, cam/epoksi kompozitlerden oluşan sandviç yapıların hasar direncini belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmalarının sonucunda sandviç yapının darbe direncinin yapıyı oluşturan çekirdek ve yüzey tabakalarından fazlaca etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Foo *et al.* (2008) alüminyum bal peteği sandviç yapıların düşük hızlı darbeye maruz kalması durumunda yüzeyde ne tür hasarlar oluştuğunu incelemişlerdir. İncelemelerini Abaqus programını kullanarak yapmışlardır. Buitrago *et al.* (2010) yüksek hızlı darbeye maruz sandviç yapıların hasar analizini (delinme) yapmışlardır. Çalışmalarında alt ve üst yüzey tabakası olarak karbon/epoksi kompozit malzeme, çekirdek olarak da alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Analizleri Abaqus programıyla

yapmışlar ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle doğrulamışlardır. Bitzer (1997) bal peteği kompozitlerin ne tür malzemelerden yapıldığını, nasıl dizayn edildiklerini, ne tür üretim metotlarının kullanıldığını, uygulama alanlarını ve bu malzemelere uygulanan testleri detaylı bir şekilde anlatmıştır. Ercan (2006) bal peteği sandviç yapı teknolojileri, üretim yöntemleri hakkında bilgiler vermiştir. Ayrıca bal peteği sandviç yapıların tahribatsız muayene yöntemleri, sandviç yapıların tamir yöntemleri ve teknikleri hakkında detaylı bilgiler sunmuştur.

Bu çalışmada alt ve üst tabakası alüminyum, çekirdek malzemesi nomex olan düzgün altıgen şeklindeki bal peteğinden oluşan sandviç yapıların düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce alt ve üst tabakası farklı kalınlıklarda sandviç malzemeler üretilmiş. Daha sonra farklı enerji seviyelerinde bu sandviç yapıların darbe davranışları belirlenmeye çalışılmıştır.

1.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

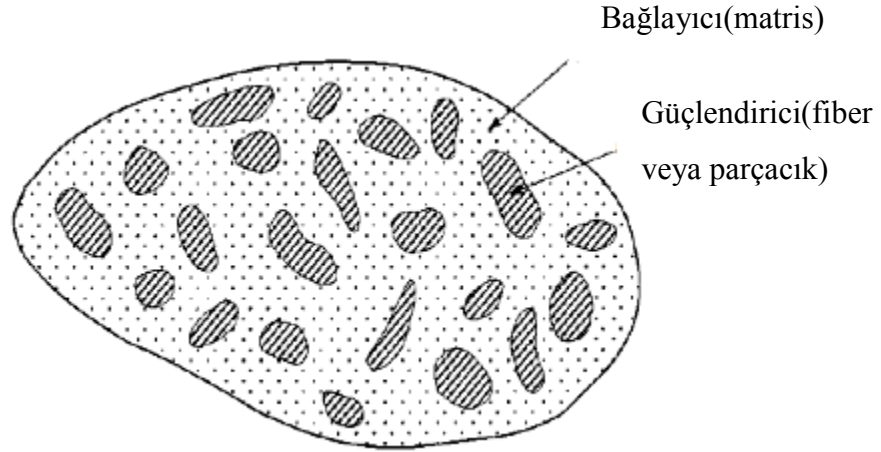
Belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, en iyi özelliklerini bir araya toplayarak, farklı özelliklerde yeni bir malzeme elde etmek amacıyla, bunların makro seviyede birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzeme denir.

Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar pek çok alanda yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemelerin üretimi son yıllara mal edilse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır.

Kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başlarında gerçekleşmiştir.

İnsanoğlu ilk çağlardan beri kırılğan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılğanlık özelliğinin giderilmesine çalışmıştır. Bu konuda en iyi örnek kerpiçtir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve

lifler, kerpicin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır. Özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar üst üste konularak yapılan ok yayları bir başka örnek olarak verilebilir. Ahşap, kemik gibi malzemeler, tabii kompozit malzemelerdir.



Şekil 1.1. Kompozit malzeme (Ercan 2006)

Öte yandan, günümüzde kompozitlerin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın çok yeni olmadığı araştırmalardan da anlaşılmaktadır. Örneğin cam liflerinin üretimi, eski Mısır'a kadar dayanmaktadır.

Dahası M.Ö. 1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin yapımının bilindiği, XVIII. Hanedan devrinden kalan, farklı renkte cam lifleri kullanılmış çeşitli eşyalardan anlaşılmaktadır.

Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt 1877 tarihlidir.

Hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaların üretim yöntemi hakkında 19. yy başlarında alınmış patentlere rastlanmaktadır.

Asbest lifleriyle takviye edilmiş kompozitler ile cam lifleriyle takviye edilmiş polyester kompozitler yaygın bir şekilde kullanılan takviyeli kompozit malzemelerdir.

İlk kez ince levha yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllar boyu önemini koruyarak bu gün hala kullanılan bir malzeme olma özelliğini sürdürmektedir.

Öte yandan, liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubunu "cam elyaf takviyeli polyester" oluşturmaktadır. Ülkemizde "fiber-glass" diye tanınan bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye'de sıvı tankları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan Anadol'un kaportası bu malzemedен üretilmiştir.

Plastikler; İlk modern sentetik plastiklerin 1900' lerin başlarında geliştirilmiştir. 1930'larda plastik malzemelerin bazı özellikleri, diğer geleneksel malzemeler ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır.

- Kolay biçim verilebilmesi,
- Yoğunluklarının düşük olması,
- Üstün yüzey kalitesi,
- Korozyona karşı dayanım

gibi özellikler plastiklerin yükselmesindeki en önemli faktörlerdir.

Bir çok üstün özelliklerine rağmen ;

- Düşük sertlik
- Düşük dayanım (Mukavemet)

gibi olumsuz özelliklerinin olması, plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur.

Bu eksikliklerinin giderilmesi amacıyla 1950' lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir.

Elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitlerin üretimiyle birlikte

- Yüksek mukavemet,
- Termal kararlılık,
- Sertlik,
- Aşınmaya karşı dayanım gibi pek çok üstün özellikler elde edilebilmektedir.

1.1.1. Kompozit malzeme kullanımının önemi

Taşıdığı karakteristik özellikleri ile diğer malzemelere göre birçok avantajları bulunan kompozit malzemeler uzun ömürleri, hafiflikleri, yüksek kimyasal ve mekanik dayanımları gibi özelliklerinden dolayı tercih edilirler.

Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır.

- Mukavemet (Dayanım)
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Termal özellikler
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenlik
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Hafiflik

- Ekonomiklik
- Estetiklik

1.1.2. Kompozit malzeme kullanım alanları

Kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

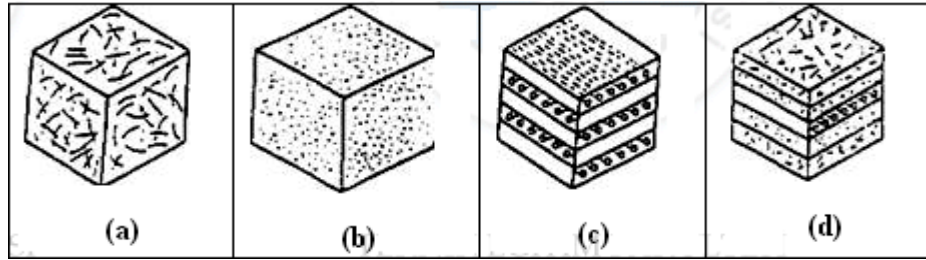
Kompozitler, farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat yardımcı ekipmanları olarak da kullanılırlar.

Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler ve bu sektörlerde kullanılan ürün tipleri aşağıda kısaca özetlenmektedir:

- Hava ve uzay endüstrisi,
- Denizcilik,
- Spor malzemeleri (yüksek atlama sııkları, tenis raketleri, sörf, yarış tekneleri, kayak)
- Tıbbi cihazlar,
- Robot yapımı,
- Kimya sanayi,
- Otomotiv sanayi
- Elektrik-Elektroteknik,
- Müzik aletleri

1.1.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür. Bu sınıflama şekli aşağıda verilmektedir.



Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

- a) Elyafli kompozitler
- b) Parçacıklı kompozitler
- c) Tabakalı kompozitler
- d) Karma kompozitler

a) Elyafli kompozitler: Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyafarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

b) Parçacıklı kompozitler: Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

c) Tabakalı kompozitler: Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

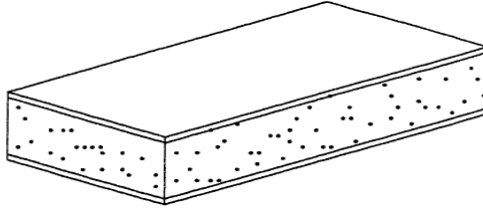
Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşıyarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

d) Karma (Hibrid) kompozitler: Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitden daha yüksek olmaktadır.

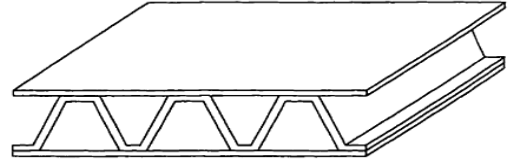
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Sandviç Yapı Teknolojisi

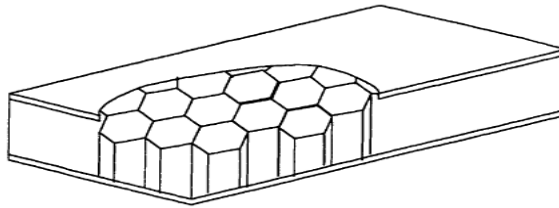
Sandviç yapılar, iki tane ince ve rijit alt ve üst yüzey tabaka arasına kalın ama oldukça hafif çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle elde edilir. Sandviç malzemeler, özellikle klasik malzemelere oranla sahip oldukları hafiflik, yüksek “eğilme rijitliği/ağırlık” oranı, dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayinden, denizcilik, otomotiv ve yapı endüstrisine kadar değişen pek çok sahada geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sandviç malzemelerin, çeşitli uygulamalar için alt ve üst yüzey tabakaları ile çekirdeğinin farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilerek en uygun tasarımların elde edilebilmesi, en büyük avantajları arasındadır. Farklı çekirdek yapılarına sahip sandviç malzemeler vardır Şekil 2.1.



a) Köpük çekirdek



b) Oluklu çekirdek

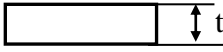
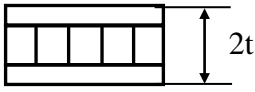
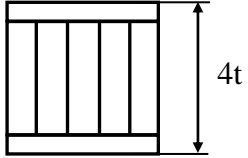


c) Bal peteği çekirdek

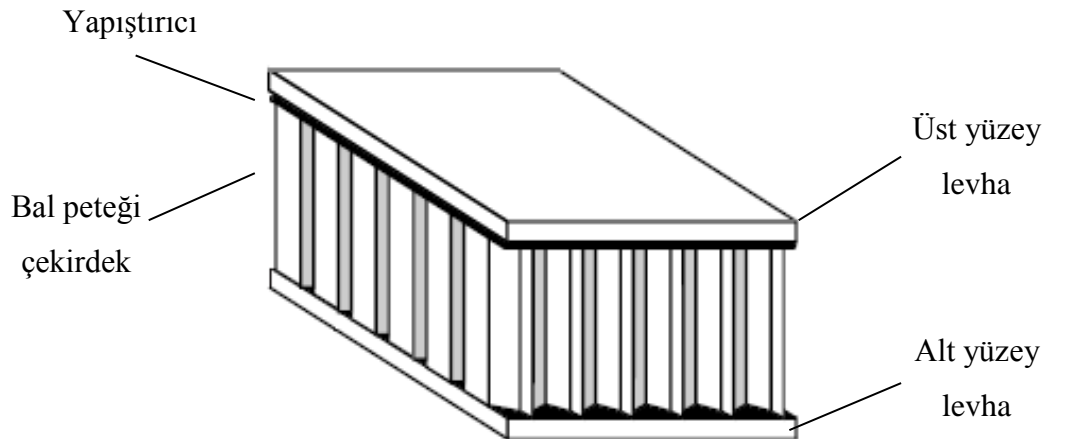
Şekil 2.1. Farklı çekirdek malzemelere sahip sandviç yapılar (Bitzer 1997)

Bal peteği hücreler genellikle düzgün altıgen şekillidir. Fakat üçgen, kare veya rombik şekilli de olabilir. Bal peteği sandviç yapılar 20. yüzyılın başından beri yoğun olarak kullanılmaktadır. Ticari olarak bal peteği sandviç yapıların kullanımı çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeye yapıştırma işleminin mükemmelleşmesiyle yaygın bir hale gelmiştir.

Çizelge 2.1. Bal peteği sandviç yapının avantajları (Hexcel 2000)

	Katı malzeme (Tek parça)	Petek kalınlığı t	Petek kalınlığı 3t
			
Eğilme Rijitliği	1	7	37
Dayanım	1	3,5	9,2
Ağırlık	1	1,03	1,06

Sandviç yapıların yukarıda da belirtildiği gibi birçok avantajları vardır. Bu avantajlar Çizelge 2.1’de özet olarak verilmiştir.



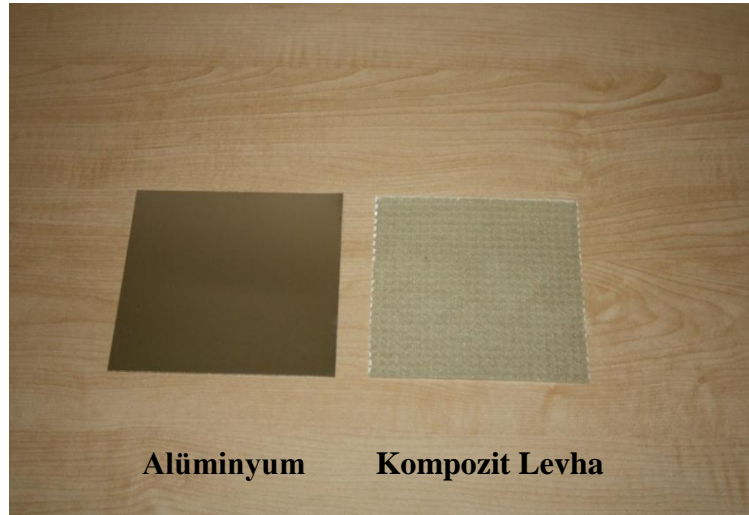
Şekil 2.2. Sandviç yapı (Şakar 2010)

Sandviç yapılar Şekil 2.2’de görülen üç temel elemandan oluşur;

- Yüzey levhaları
- Çekirdek
- Yapıştırıcı

Yüzey levhalarının temel görevi gerekli olan eğilme ve düzlem içi kayma gerilmelerini karşılamaktır. Yüzey levhaları olarak farklı malzemeler kullanılabilir. Bunlar;

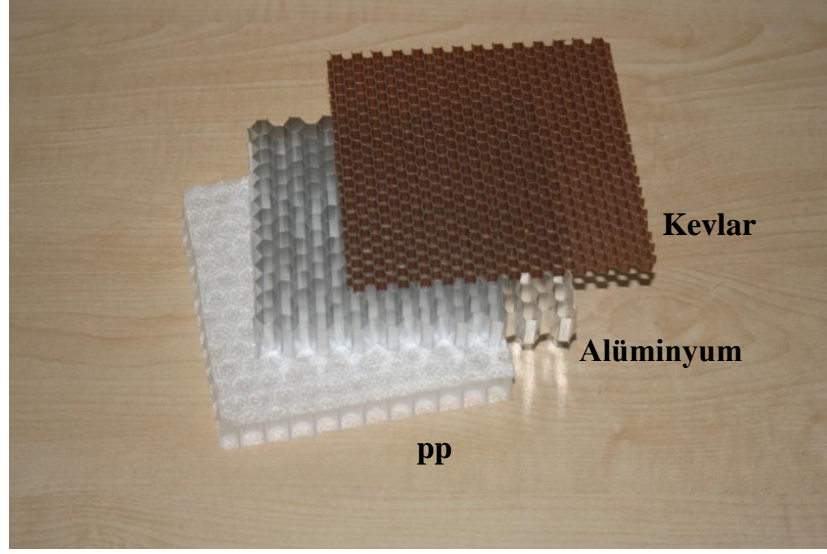
- Alüminyum
- Çelik/Paslanmaz Çelik
- Karbon/Epoksi
- Fiberglas/Epoksi
- Ahşap



Şekil 2.3. Alt ve üst yapıyı oluşturan malzemeler

Sandviç yapıda genellikle alt ve üst yüzey levhaların aynı malzemedен seçilmesi istenir. Fakat farklı malzemelerin kullanıldığı durumlar da vardır.

Çekirdek malzeme genellikle sandviç yapıya dik olarak etki eden yüklere dayanabilecek rijitlikte olmalıdır. Ayrıca alt üst yüzey levhalarının birbiri üzerinde kaymalarını önleyecek kayma rijitliğine de sahip olmalıdır. Genellikle hücresel, oluklu ve bal peteği çekirdek olmak üzere üç gruba ayrılır.



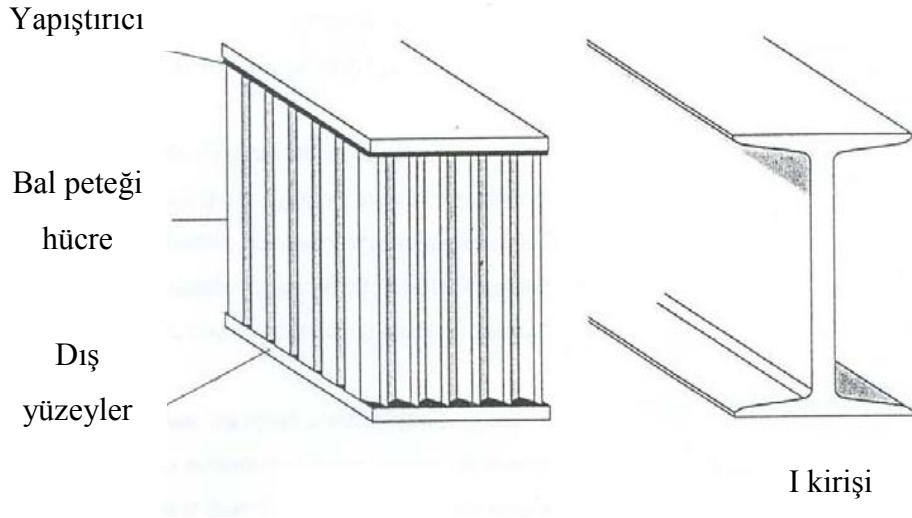
Şekil 2.4. Farklı çekirdek yapı

Yapıştırıcılar genelde ticari olarak kullanmaya hazır halde piyasaya sürülürler. Kısa bir süre içerisinde ısı ve basınç desteği ile kuvvetli bağlantı oluştururlar. Tabaka şeklindeki film yapıştırıcılar geniş bölgelerin bağlanmasının yanı sıra, özellikle sandviç yapıların petek malzemeyle birleştirilmesinde çok önemli görev üstlenirler. Farklı tip yapıştırıcılar vardır;

- Nitril Fenolik
- Vinil Fenolik
- Epoksi
- Polimid
- Poliamid

Sandviç yapılarda kullanılacak olan yapıştırıcı madde yüzeye düzgün şekilde uygulanabilmeli ve çekirdek malzeme ile alt üst yüzey levhaları arasında ince bir film oluşturabilecek şekilde uygun yapıştırıcının seçilmesi gerekmektedir.

Bal peteği sandviç yapısı kompozit endüstrisinin en değerli yapısal mühendislik buluşlarından biridir. Havacılık ve diğer endüstri dallarında yoğunlukla kullanılmakta olup, diğer malzemelere göre çok düşük ağırlık, dayanım ve üretim maliyetlerinin azaltılması yönlerinde üstünlük gösterir.



Şekil 2.5. I kirişi ile sandviç panelin kıyaslanması (Ciba 1995)

Şekil 2.5’de gösterilen sandviç panel, temelde I kirişi modeli ile benzeşim yapılarak geliştirilmiştir. I kirişine kuvvet uygulandığında bir yüzey basma gerilmesi, diğer yüzey çekme gerilmesi altındadır. Aynı şekilde bal peteği hücreleri de I kirişinin gövdesi gibi davranır. Petek hücresi yüzeylerin dışında kesme kuvvetlerine karşı koyar ve yapının sağlamlığını I kirişine nazaran daha fazla artırır. Petek hücreleri sandviç panel yüzeylerine düzenli ve kuvvetlendirilmiş destek verir. Petek-yüzey tabakalar arası kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanı kuvvetli bir şekilde bağlayarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlar. Sonuçta yüksek burulma ve eğilme dayancı oluşur.

2.2. Petek Malzemenin Üretim Yöntemleri

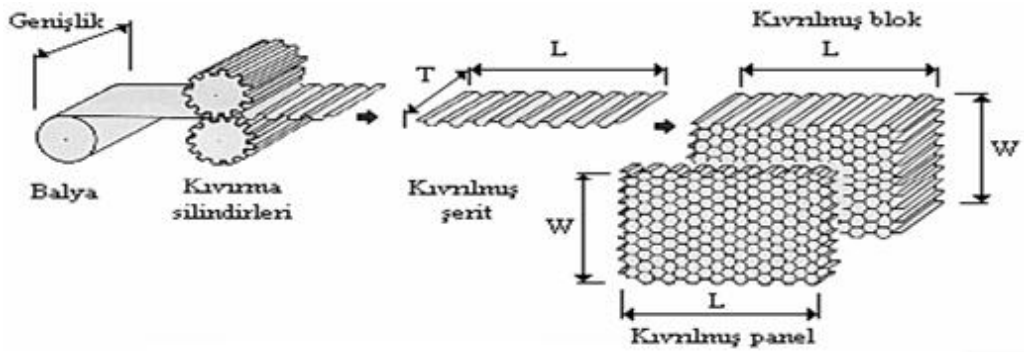
Petekli yapıların üretiminde uzatma ve kıvrılarak şekil verme olmak üzere genellikle iki temel teknik kullanılır. Diğer teknikler yaygın olarak kullanılmadığından burada söz edilmemiştir. Uzatarak şekil verme yöntemi şematik olarak Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Uzatarak şekil verme yöntemi

Bu yöntem metal ve metal olmayan hücre imalatında kullanılır. Genel olarak; şerit halinde levhaların kesilmesi ve yapıştırıcının sürülmesi, levhaların üst üste dizilmesi ve petekli yapı bloğunun seçilen sıcaklıkta pres içerisinde işlenmesi aşamalarını içerir.

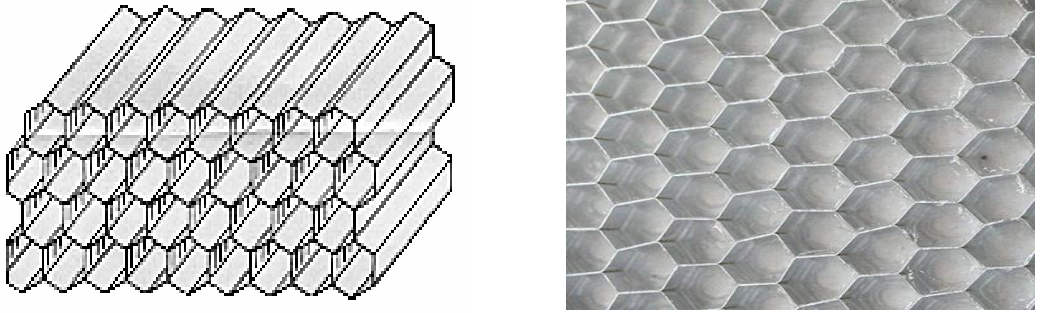
Petekli yapıların imalatında oldukça yaygın olarak tercih edilen diğer bir yöntem kıvrma metodudur. Bu yöntem yüksek sıcaklık altında çalışan, et kalınlığı ve yoğunluğu oldukça fazla olan petekli yapıların imalatında tercih edilir. Bu yöntemde şerit levhalar istenilen biçimde kıvrılarak düğüm noktalarına yapıştırıcı tatbik edilir.



Şekil 2.7. Kıvrma metodu ile şekil verme

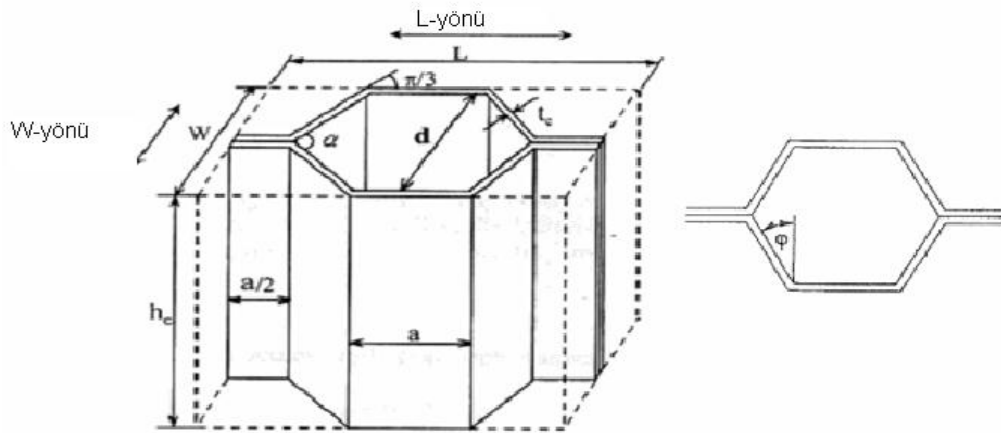
Ardından şekil verilmiş şerit levhalar üst üste konur ve kıvrılmış blok seçilen sıcaklıkta bekletilir. İstenilen kalınlıkta dilimler bloktan kesilerek elde edilir. Yine bu çalışmada kullanılan alüminyum ve bakır hücrelerin üretimi bu yöntem yardımı ile yapılmıştır.

Yukarıda verilen yöntemler kullanılarak, üretimi gerçekleştirilen petekli yapılar kullanılacak yerin özellikleri de dikkate alınarak; temizleme (kenar tıraşlama), kesme ve gerekirse şekil verme ve ekleme işlemlerine de maruz bırakılırlar.



Şekil 2.8. Farklı tip petek yapılar

Petek yapıların nümerik analizleri ve sonlu elemanlar metodu için modellenmesinde genellikle aşağıdaki geometri ve koordinat sistemleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. Petek yapı geometrisi

Şekil 2.9'da petek yapının temel parametreleri görülmektedir. Burada d hücre çapını, a kenar uzunluğunu, t_c folyo kalınlığını, L hücre uzunluğunu, W hücre genişliğini, h_c ise hücre yüksekliğini göstermektedir. Düzgün şekilli bir bal peteği hücre için aşağıdaki bağlantılar sağlanmalıdır.

$$\Phi = \frac{\alpha}{4} \quad \text{veya} \quad \varphi = \frac{\pi}{6}$$

$$a = d \tan(\varphi)$$

$$L = 2(a + a \sin(\varphi))$$

$$W = d + 2t_c$$

Petek geometrilerinde eksenleri her zaman yarı yatay ve açıklıkları yatay düzendedir. Yüzeyin altıgenlerden oluşması, en küçük yüzey alanda en geniş kaplamayı elde etmemizi sağlar. Bu sayede altıgen yapıyla, istenen değerlerde kafes yapımı için en az malzeme kullanımı sağlanmış olur. Bal peteği hücrelerinin kapalı kısımları da yer yer geometrik etkiyi gösterebilir. Bu kısımlar üç yüzeyle piramit şeklindedir. Bitişik yüzeylerin iki düzlem arası açıları istenen değer için yüzey alanını maksimumda tutar.

2.3. Bal Peteği Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretim Metodları

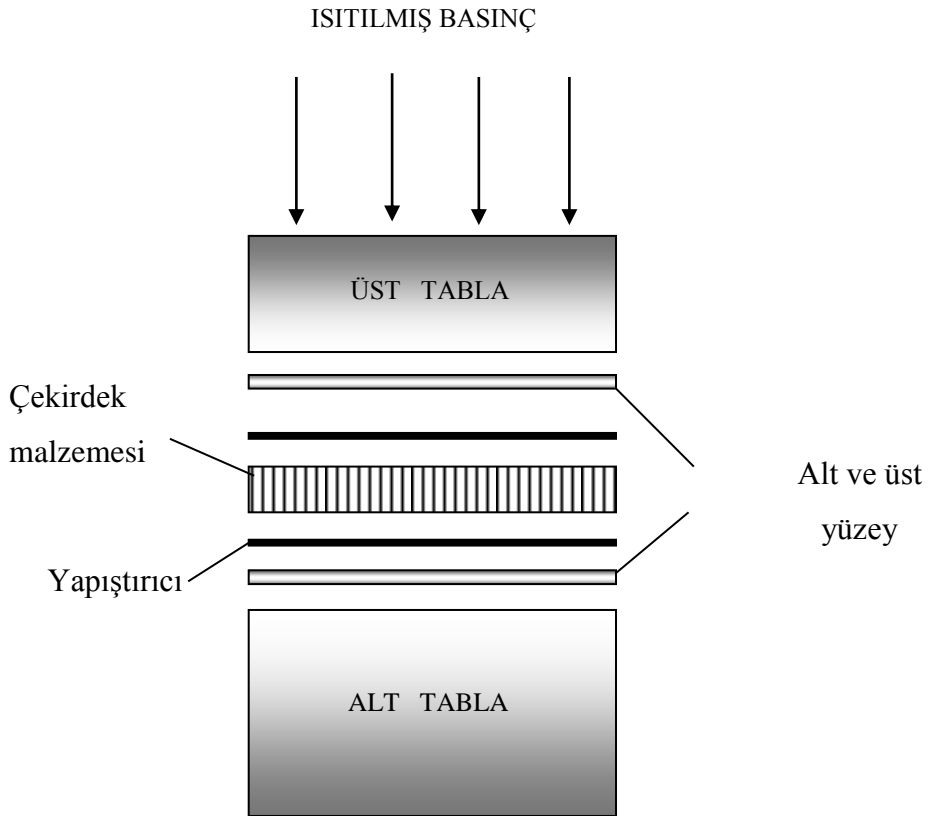
Bal peteği sandviç kompozit malzemeleri üretmede;

- Sıcak pres metodu
- Vakum metodu
- Kalıp yöntemiyle üretim metodu

üç alternatif üretim metodu mevcuttur.

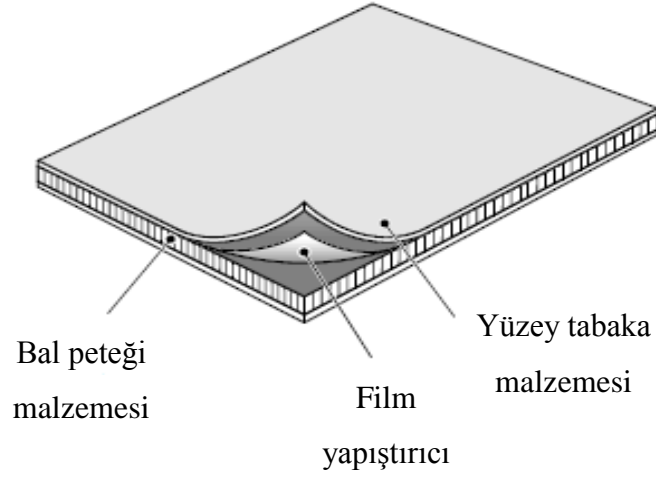
2.3.1. Sıcak pres metodu

Genellikle düzgün yüzeyli plakaların etek yapı ile birleştirilmesinde kullanılır. Genelde üretilmiş parça tek seferde netice alınacak şekilde hazırlanır. Bu metot metal ve prepreg yüzeylerde yaygın olarak kullanılır.



Şekil 2.10. Sıcak pres metodu ile sandviç kompozit üretimi (Hexcell 2003)

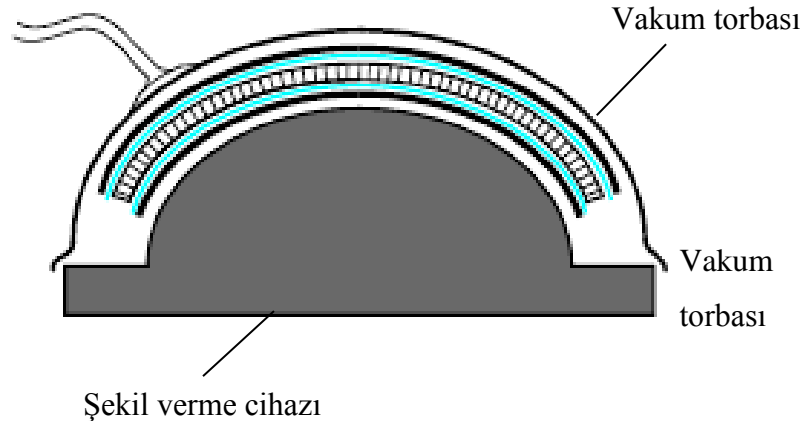
Bu metotla yapılan üretimde diğer bir seçenek de, prepreg (önceden reçine emdirilmiş malzeme) yüzey tabakaları basınç altında önceden ısıtılarak yapıştırıcı ile birleştirilmesidir. Yöntemin uygulama esası Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş sandviç yapı (Hexcell 2003)

2.3.2. Vakum metodu

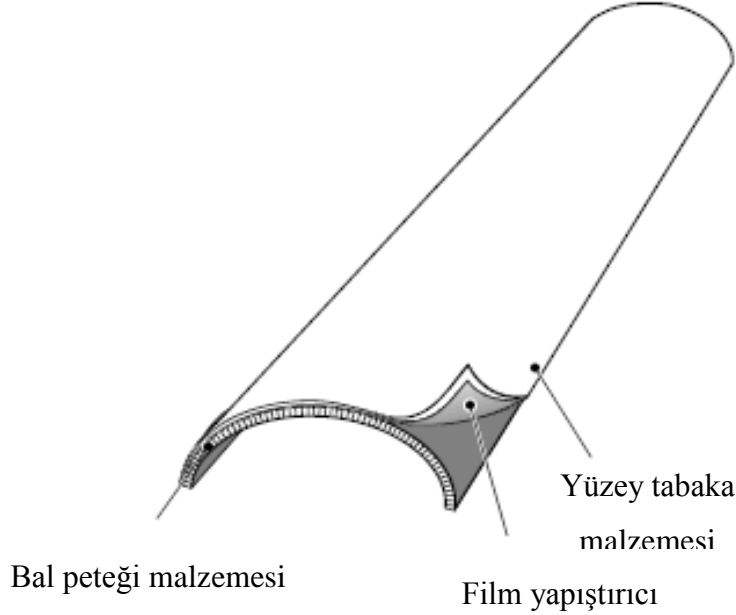
Karmaşık ve üretimi zor kompleks yapılar için kullanılır. Üretilcek parçalar ısıtma işlemi için bir seferde netice alınacak şekilde montajlanmalıdır. Gerekli birleştirme vakum torbası kullanarak yapılır. Önce parça fırında ısıtılır, otoklav kullanılıyorsa, ayrıca bütün üretim boyunca negatif basınç uygulanır.



Şekil 2.12. Vakum yöntemi ile sandviç yapı üretimi (Hexcell 2003)

Vakum torbasında üretim yöntemi, prepreg, önceden şekil verilmiş el yatırması (wet layup) kompozit malzemeler veya metal tabakalı sandviç yapılara uygulanır. Bu üretim metoduyla şekil verilmiş bal peteği ve yapıştırıcı film tabakaları kullanmak suretiyle

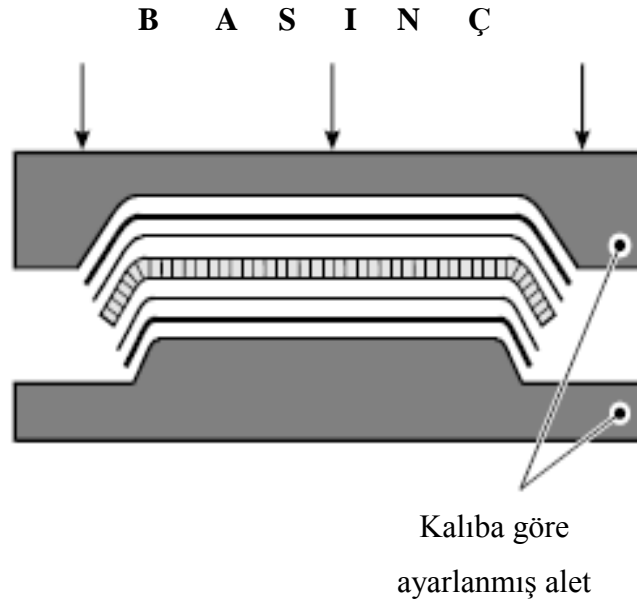
karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimi mümkündür. Anlatılan hususlar Şekil 2.12’de şematik olarak verilmiştir.



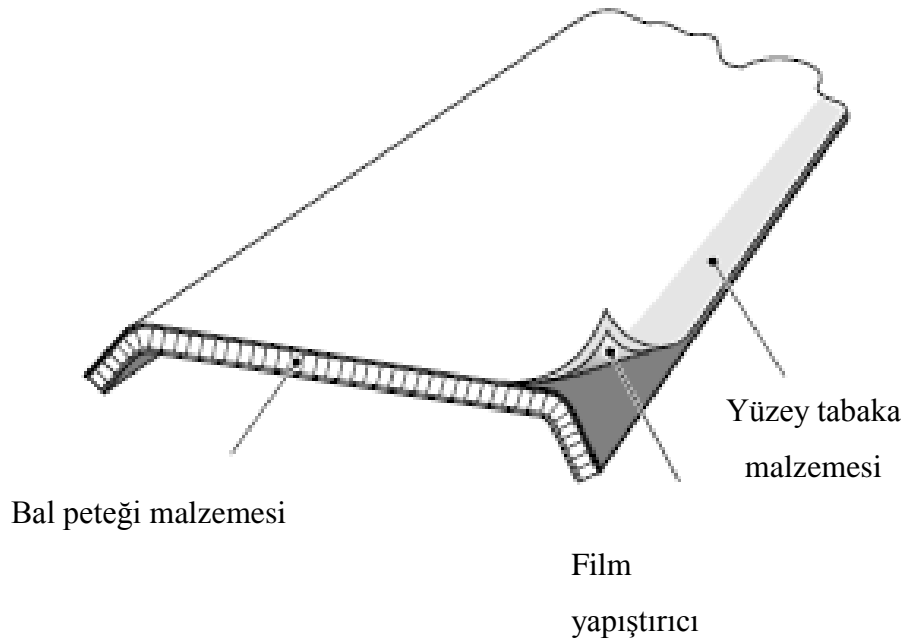
Şekil 2.13. Vakum yöntemi ile üretilmiş sandviç yapı (Hexcell 2003)

2.3.3. Kalıp metodu ile şekil verme

Bu metot genellikle tek bir kullanımlık malzeme üretimi için kullanılmaktadır. Bu tür üretim metodunun temel amacı; imal edilecek parçayı yüksek toleransta (hassas boyutta) üretmek ve yüzey iyileştirilmesi yapılarak tek seferde sonuç alınmasıdır. Bu tür üretim için çeşitli işlem basamakları uygulanarak sıcaklık ve basınç ayarlamaları yapmak mümkündür. Isıtılmış donanımlarla mekanik basınç altında, ısıtılmamış aletlerle basınç altında ve fırın içinde kürlemeyle yapılan üretimler bunların bazılarıdır. Bunun dışında ısıtıcı kullanım imkânı yoksa veya sandviç yapı çok büyükse oda sıcaklığında soğuk yapıştırma işlemi de uygulanabilir. Yöntem, Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Kalıp metodu ile sandviç kompozit üretimi (Hexcell 2003)



Şekil 2.15. Kalıp metodu ile üretilmiş sandviç kompozit yapı (Hexcell 2003)

2.4. Sandviç Petek Yapıların Temel Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır.

Özellikle ileri kompozit malzemeler havacılık sanayinde çok geniş uygulama alanları bulmaktadır. Kompozit malzemelerinin hafifliklerine oranla üstün mekanik özellikleri uçaklarda ve helikopterlerde sadece iç mekan değil yapısal parçalarını da polimer esaslı kompozitlerle üretilmesine neden olmaktadır. Polimer matrisli malzemelerin en fazla tercih edildiği sektör havacılık sektörüdür. Günümüzde, askeri ve sivil uçak endüstrisinde kompozitleri, uçakların gövde ve motorlarında etkin bir şekilde uygulayan birçok üretici vardır.



Şekil 2.16. Ticari bir uçak (Aydıncak 2007)

Resimde de görüldüğü gibi ticari bir uçağın burun, ön ve arka kanat, gövde, motor ve bölmeleri ayırırken kullanılan malzemelerin birçoğunun yapımında sandviç yapılı kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Güncel manada havacılıkta ilk kullanım örneği 1944 yılında Vultee BT-15 uçağında sergilenmiştir.



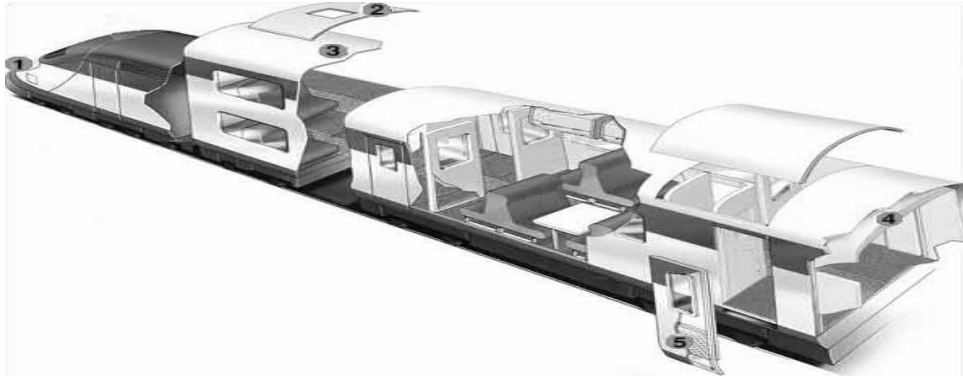
Şekil 2.17. Petek yapının kullanıldığı bir örnek (THY)

Uçağın arka kısmında balsa ağacı çekirdek kısmı olmak üzere cam fiber takviyeli paneller kullanılmaktaydı. 1960'lı yıllarda ise petek yapıların kullanımı yaygınlaşmaya başladı. O yıllarda özellikle İngilizler tarafından önce grafit-fiber sonra Amerikalılar tarafından boron-fiber takviye elemanlarının geliştirilmesi petek yapı kullanımını hızlandırdı. 1970'li yıllarda özellikle askeri uçaklarda petek yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır. F-111 uçağının yatay kuyruğu, F-4 uçağının dikey kuyruğu, F-15 uçağının ise hem yatay hem dikey kuyruğu petek yapıdan yapılmıştı.

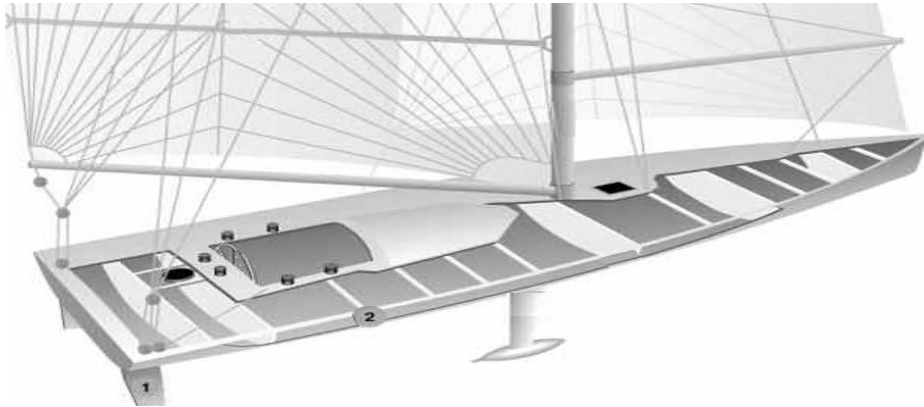
1970'li yılların ortalarında grafit epoksi ağırlıklı olarak petek yapılarda kullanılmaya başlandı. F-16 uçağının tüm kuyruk yüzeyleri, kanatlardaki ve gövdedeki diğer

kumanda yüzeyleri ve F/A-18 uçağının kanat ve kuyruk kısımları petek yapı kullanımına örneklerdir.

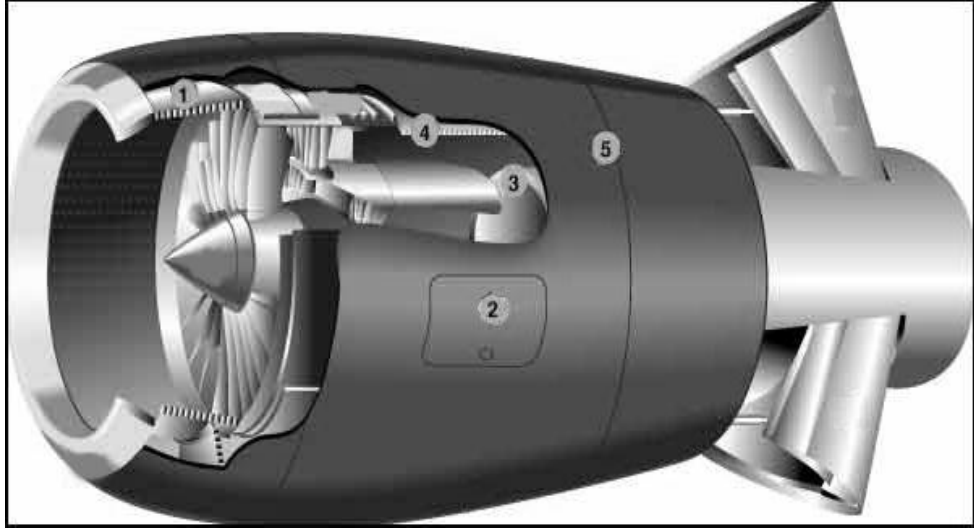
Kompozit prepreg ve dokuma malzemeler türleri artan oranlarda tren konstrüksiyonunda maliyet ve ağırlık düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. İskelette ağırlığın düşürülmesi enerji tasarrufu sağlamakla beraber daha hızlı araçların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca trenlerde malzemelerin yüksek katılığa sahip olmaları iskeletin desteklenmesine gerek olmaması anlamına gelmektedir ki böylece yolcu taşıma bölümü ayrılan mekan artırılabilir. Tren konstrüksiyonunda kolay ve hızlı değişebilen genellikle prepreg levhalar kullanılır. Böylece tekil zarar gören paneller hızla değiştirilebilmektedir.



Şekil 2.18. Tren vagonunda kompozit sandviç kullanılan bölgeler (Aydıncak 2007)



Şekil 2.19. Teknede kompozit sandviç kullanım bölgeleri (Aydıncak 2007)



Şekil 2.20. Bir jet motorunda kompozit sandviç yapı kullanım alanları (Aydıncak 2007)



Şekil 2.21. F/A-18 E/F uçağının görünümü (The Flight Group 2005)

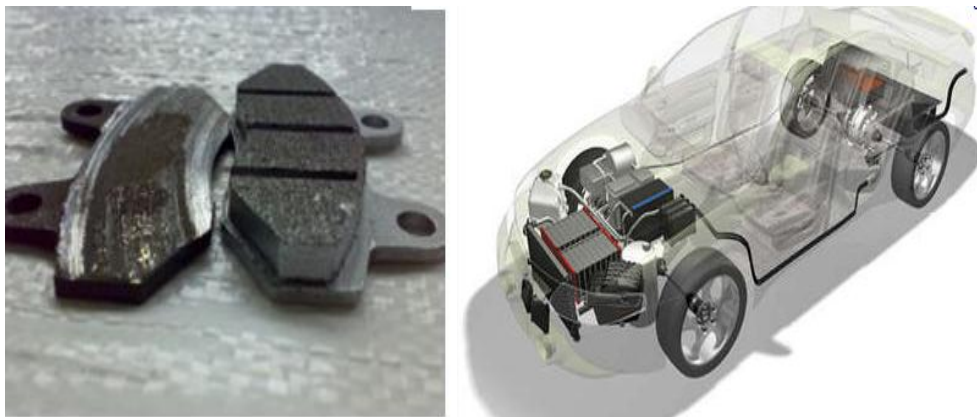
Kompozit malzemelerin popüler olduğu yeni sektörler arasında spor araç ve gereçleri her geçen gün daha da öne çıkmaktadır. Özellikle ağırlığın azalması, dolayısıyla hareket kabiliyetinin artması ve dayanıklılığın artmasına neden olan cam ve karbon elyafı takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Kompozitler kano, sörf ve yatlar için çok önemli olan malzeme yorgunluğu ve darbe dayanımı konusunda üstün özelliklere sahiptirler. Dağ bisikletleri en iyi dayanım/ağırlık oranı ve en düşük ağırlık özellikleri

kazanmak için karbon elyafı ile üretilmektedir. Korozyona dayanım, emme ve sağlamlık gibi üstün özellikler kazandırmaktadır. Ayrıca golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerinde ağırlığı düşürmek için karbon elyafı takviyeli kompozit malzemelerden üretilmektedirler.



Şekil 2.22. Spor araçlarında kullanılan bazı kompozit malzemeler (Akbulut 2008)

Otomobil firması müşterilerinin ihtiyaçlarına karşılık vermek çevresel şartların baskısı altında daha hafif otomobiller üretmektedirler. Hafif otomobiller daha çabuk hızlanabilen, daha çabuk durabilen ilerlemek için daha küçük bir motora ve daha az benzine ihtiyaç duyan araç anlamına gelmektedir.



Şekil 2.23. Otomotiv sanayide kompozit malzeme kullanımı (Akbulut 2008)

London College of Furniture ve diğer bazı yerlerde ileri kompozit malzemelerle müzikal enstrümanlar yapılması üzerine çalışmalar bulunmaktadır. İleri kompozit

malzemelerle yapılan yaylı sazlarda boyun kimisinin tellerinin gerilmesinden dolayı deforme olması karşılaşılan temel sorunlardandır.



Şekil 2.24. Bazı müzik aletlerinde kullanılan kompozit malzemeler (Akbulut 2008)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

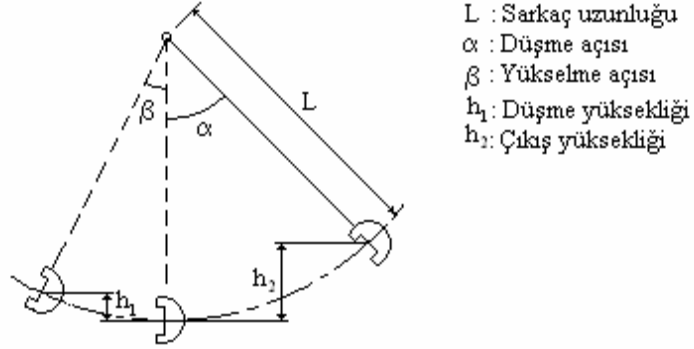
3.1. Çentik Darbe Testleri

Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemel bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir.

Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilim meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilimin etkisi ile olur. Numunenin kırılabilmesi için bu dik (normal) gerilimin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif dayanımdan fazla olması gerekir. Numune, plastik biçim değiştirmeye fırsat bulamadan bu hal meydana gelirse, buna gevrek kırılma denir. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir.

Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik biçim değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal (dik) gerilime ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilimi etki etmeye başlar. Kayma gerilimi, kayma dayanımını (kritik kayma gerilimi) aştığı an, elastik (esnek) özellik sona erer ve plastik biçim değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik biçim değiştirme, daha sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştedir.

Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Bulunan değer, malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Bu deneylerde, Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır.



Şekil 3.1. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi

Ağırlığı G olan sarkaç, h_2 yüksekliğine çıkarıldığında potansiyel enerjisi (Gh_2) mertebesindedir. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında, düşey bir düzlem içinde hareket ederek numuneyi kırar ve aksi istikamette h_1 yüksekliğine kadar çıkar. Böylece, numunenin kırılmasından sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji (Gh_1) mertebesinde demektir.

Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjii başka bir deyimle, darbe direncini verir. Bu enerji aşağıdaki formülle de gösterilebilir:

$$\text{Kırılma enerjisi} = G (h_2 - h_1) = GL (\cos\alpha - \cos\beta) \quad (3.1)$$

G = Sarkacın ağırlığı (N),

L = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h_1 = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_2 = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

β = Düşme açısı (derece),

α = Yükseliş açısı (derece),

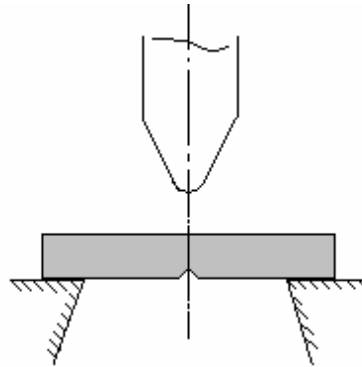
Darbe direnci (Nm) cinsinden ifade edilmektedir.

Bu deney tamamen ampirik olduğu ve şartlar değiştikçe malzeme farklı özellik gösterdiği için numunelerin cihaza uygun bir şekilde yerleştirilmesi, doğru sonuç alma yönünden önemlidir.

Deney esnasında önce sarkaç, daha önce tespit edilen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarılır. Daha sonra numune, uygun bir şekilde yerleştirilir. Örneğin, en çok uygulanan Charpy deneyinde numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi 0,5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanabilir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunur.

3.1.1. Charpy darbe testi

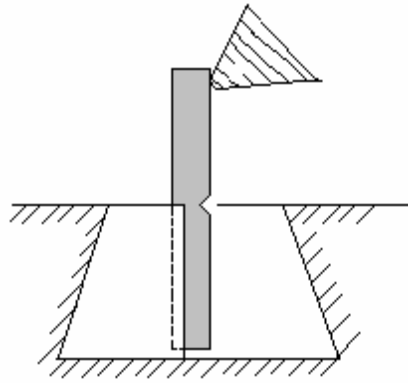
Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halinde iki mesnede yaslanan numunenin şekil 3.2 çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tespit etme işlemidir.



şekil 3.2. Charpy deneyinde numune ve eki konum şeması

3.1.2. İzod darbe testi

İzod darbe testi, dikey ve konsol kiriş halinde bir kavrama çenesine tespit edilen numunenin Şekil 3.3 yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilimler etkisi ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjiyi tayin işlemidir.



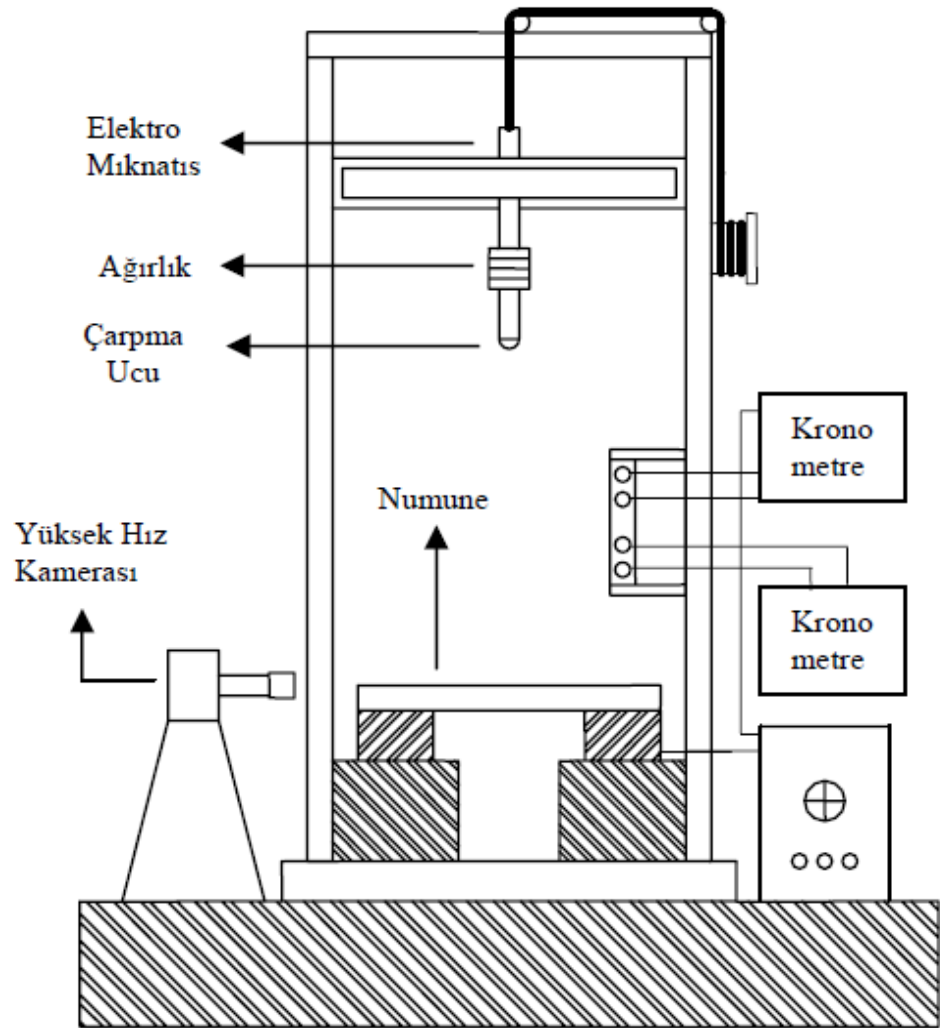
Şekil 3.3. İzod deneyinde numune ve çekiç konum şeması

3.2. Ağırlık Düşürme Testleri

3.2.1. Düşük hızlı darbe

Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilmediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak tanımlamışlardır. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe düşük enerjili darbe olarak da tanımlanır. Düşük hızlı darbede malzemenin içyapısında darbeye karşı

cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe tepkisi malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hakim olunur ki bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur. Bu tip deneye ait şematik gösterim Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

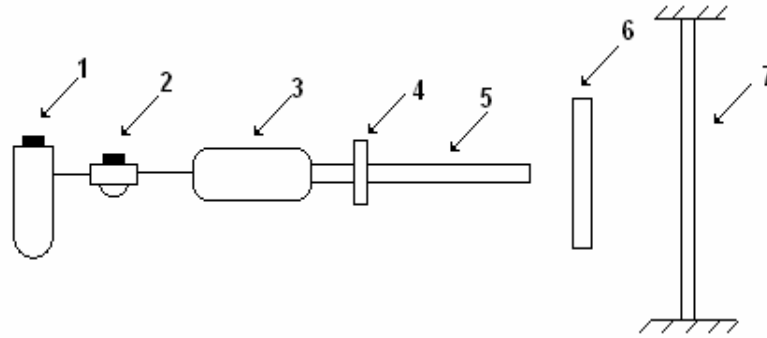


Şekil 3.4. Ağırlık düşürme test düzeneği şematik gösterimi

*1) magnet, 2) ağırlık ve vurucu uç, 3) numune tutucu, 4) numune

3.2.2. Yüksek hızlı darbe

Yüksek hızlı darbelerde yukarıda belirtilen 10m/s'nin üzerindeki hızlar için sınıflandırılabilir. Genellikle balistik deneylerde mermi kullanılarak deneyler yapılmaktadır. Özellikle askeri alanda bu çalışmalar yapılmış olup, çelik yelekler ve zırhlı araç malzemeleri üzerinde testler gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında uçakların iniş ve kalkışı esnasında pist üzerinde bulunan küçük taş vb maddelerin tekerleklerden fırlayarak uçak gövdesine veya kanatlarına çarpması da hasar oluşturacağından bu şekilde modellemeler yapılabilir. Bu deneyler gaz tabancası kullanılarak yapılmaktadır. Bu deneye ait şematik gösterim Şekil 3.5 deki gibidir.



Şekil 3.5. Gaz tabancası deney düzeneği şeması

*1) hava filtresi, 2) basınç regülatörü, 3) havatankı, 4) vana, 5) boru, 6) hız ölçüm cihazı, 7) örnek

3.3. Darbe Test Hesaplamaları

Birkaç farkın olmasına rağmen sarkaç ve ağırlık düşürme test sisteminde, ihtiyaç duyulan hesaplamalar hemen hemen aynıdır. Sarkacın yatay ve ağırlık düşürme testinin düşey olması hesaplamaları etkilemez. İlk aşamada, plak ile temas halinde olan tüpün potansiyel enerjisini ihmal edecek kadar, defleksiyon vardır. İkinci aşamada, yerçekimine bağlı ivme, darbe kuvvetinin meydana getirdiği ivme ile mukayese edildiğinde küçük olduğu kabul edilir. Bu kabullerin ikisi de ağırlık düşürme hesapları üzerinde daha etkilidir. Dinamik darbe testi için önemli hesaplamalar (3.3) ve (3.4) denklemleri ve yer değiştirmelerdir. Belirli olan yer değişimi tüpün hareket denkleminin zamana göre integre edilmesi ile zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilir. Koordinat

sistemi, tütün başlangıçtaki yer değişimi $\delta(t)$, (t)' nin integrasyonundan denklem (3.2)'deki hesaplanır.

$$\delta(t) = \int_0^1 V(t) dt + \delta(0) \quad (3.2)$$

Darbe testi hesaplamalarında F(t) ölçülen, E(t) absorbe edilen enerjiyi ve $\delta(t)$ yer değiştirmeyi göstermektedir.

3.3.1. F(t), Ölçülen kuvvet

Ağırlık düşürme darbe test cihazında (Drop Weight Test System) temas kuvvetini ölçmek için bir kuvvet sensörü. Ayrıca ivmeyi ölçmek için bir de ivmemetre vardır. Analiz yapabilmek için deney boyunca bu iki aygıtın okuduğu değerler bir bilgisayara transfer edilir.

3.3.2. E(t), Absorbe edilen enerji

Darbe testinde, darbe enerjisi ve numunenin absorbe ettiği enerji sık olarak olayı karakterize eder. Darbe enerjisi vurucu ucun numuneye çarptığı andaki kinetik enerjisidir. Darbe enerjisi tüp kütlelerinin büyüklüğü ile ve düşme yüksekliği ile kontrol edilir. Böylece kütlelerin bırakılmadan önceki potansiyel enerjisi, darbe anındaki kinetik enerjisi için üst sınırdadır. Tütün ivmelenmesi esnasındaki enerji kayıpları (kılavuz raylardaki kayma sürtünmesi, hava direnci gibi) darbeden hemen önceki tüp hızının ölçülmesiyle $V_{\text{tüp}}(0)$ hesaplanabilir.

$$\text{Darbe Enerjisi} = \delta \frac{M_{\text{imp}}}{2} V_{\text{imp}} (0)^2 \quad (3.3)$$

Darbe olayı başlangıçta sabit olan numune ile hareketli olan tüp arasındaki enerji transferidir. Numunenin absorbe ettiği enerji demek, numuneye transfer olan darbe enerjisi demektir. Bu enerji numunenin şekil değiştirme enerjisini ve kinetik enerjisini

içermektedir. Darbe olayı esnasında kılavuz raylardaki sürtünme kayıpları ve hava direncinin küçük olduğu farz edilir. Fakat gerçekte absorbe edilen enerji içindedir. Absorbe edilen enerji Newton'un ikinci kanununa göre $F(t)$ temas kuvvetinin integre edilmesiyle $V_{imp}(t)$ hızının bulunmasıyla (3.3) 'deki denklemlerle bulunur.

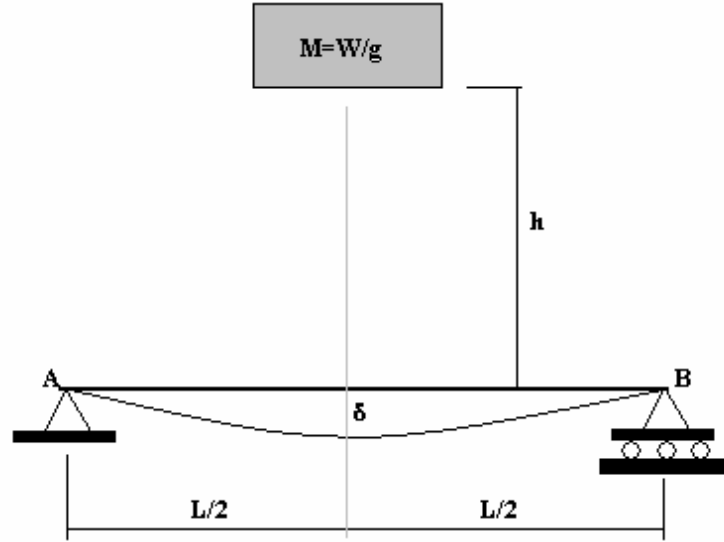
$$V_{imp} = V_{imp}(0) - \frac{1}{M_{imp}} \int_0^t F(t)dt \quad (3.4)$$

$$E(t) = \frac{M_{imp}}{2} [V_{imp}(0)^2 - V_{imp}(t)^2]$$

$E(t)$ kinetik enerji kayıpları ile absorbe edilen enerjiyi içermektedir. Absorbe edilen enerji direkt olarak ölçülen bir büyüklük değildir. Absorbe edilen enerjinin doğruluğu, M_{imp} kütesinin ölçülmesinin, temas kuvveti $F(t)$ 'nin ölçülmesinin, $V_{imp}(0)$ hızının ölçülmesindeki doğruluğa bağlıdır. Ve darbe olayı esnasındaki sürtünme kayıplarının ihmaline bağlıdır.

3.3.3. $\delta(t)$ Çarpma ile oluşan yer değiştirme

Çarpma yüküne maruz bırakılmış bir kirişin dinamik yer değiştirmesi, belli bazı basitleştirilmiş şartlar altında ve yüklerin de eşit sayılması durumunda kirişte depo edilmiş gerilme enerjisiyle belirlenebilir. Burada yapılan kabuller; düşen kütle kirişe yapışır ve onunla birlikte hareket eder, enerji kayıpları meydana gelmez, kiriş lineer elastiktir, kirişin yer değiştirmiş biçimi, dinamik yük altında statik yük altındakiyle aynıdır ve kirişin potansiyel enerjisinin neden olduğu pozisyondaki değişim ihmal edilebilir. Genel olarak bu kabuller, eğer düşen objenin kütlesi çok büyük ise ki bu kütle, kirişin kütlesi ile karşılaştırılır, o zaman makuldür. Aksi takdirde bu basitleştirilmiş analizler geçerli değildir ve daha ilerlemiş analizlere ihtiyaç duyulur.



Şekil 3.6. Kirişin dinamik yer değıştirmesi

Örnek olarak Şekil 3.6 'deki AB kirişini göz önüne alalım. Bu kirişin ortasına W ağırlığında bir cisim düşürülüyor. Yapılan kabullere dayanarak tüm işin cisim tarafından yapıldığını söyleyebiliriz. Bu iş cismin düşüşü boyunca olup, kirişin elastik gerilme enerjisine dönüştürülür. Bu işlem, objenin bir uçtan bir uca aldığı mesafe ($h+\delta$) olana kadar sürer. Burada, h kirişin üzerindeki kütlenin başlangıç mesafesi, ise kirişin maksimum yer değıştirmesidir.

Bu durumda yapılan iş gerilme enerjisi olarak,

$$U=W(h+\delta) \quad (3.5)$$

olur. Eğer W yükü bırakılırsa, yükün uyguladığı P kuvvetinin kirişe, yer değıştirmenin maksimum olduğunda etki ettiği söylenir. Bu durumda P ile δ arasındaki ilişki;

$$U = \frac{P\delta}{2} = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \quad (3.6)$$

olur.

Yapılan iş düşen kütle ile gerilme enerjisi arasında eşitlenirse,

$$W(h+\delta) = \frac{24EI\delta^2}{L^3} \quad (3.7)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik δ için 2. derecedendir ve bunun pozitif kökleri için çözülür. Kirişin dinamik yer değiştirmesi;

$$\delta_{\text{dinamik}} = \frac{WL^3}{48EI} + \left[\left(\frac{WL^3}{48EI} \right)^2 + 2h \left(\frac{WL^3}{48EI} \right) \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

burada kirişin statik yer değiştirmesi

$$\delta_{\text{statik}} = \frac{WL^3}{48EI} \text{ dır.} \quad (3.9)$$

bu durumda dinamik yer değiştirme daha sadeleştirilerek yazılır;

$$\delta_{\text{dinamik}} = \delta_{\text{statik}} + (\delta_{\text{statik}}^2 + 2h\delta_{\text{statik}})^{1/2} \quad (3.10)$$

Bu denklemden dinamik yer değiştirmenin her zaman statik yer değiştirmeden büyük olduğu anlaşılır. Eğer $h=0$ ise ki bu yükün ansızın ve serbest düşmesi olmadan tatbik edildiği anlamına gelir. Dinamik yer değiştirme statik yer değiştirmenin iki katıdır. Eğer h yüksekliği, δ yer değiştirme miktarı ile kıyaslandığında, çok büyük ise o zaman h terimi içeren (3.10) denklemi ağır basar ve bu denklem basitleştirilerek;

$$\delta = \sqrt{2h\delta_{\text{statik}}} \quad (3.11)$$

durumunu alır. Denklem hesaplanan yer değiştirme miktarı genellikle bir üst limiti gösterir. Çünkü çarpma boyunca bir enerji kaybının olmadığını kabul edilmiştir. Daha doğru bir analiz, kinetik enerji kaybı faktörünün de hesaba katılmasıyla yapılabilir.

3.4. Deneysel Çalışmalar

3.4.1. Materyal

Çalışmalarda materyal olarak kullanılan sandviç yapılar kendi laboratuvarımızda üretilmiştir. Bu sandviç yapı içerisinde kullanılan bal peteği çekirdek malzemesi CEL firmasından temin edilmiştir.

Laboratuarda deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere alt ve üst plakaları alüminyum olan sandviç yapıların üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Sandviç yapıyı oluşturan elemanlar



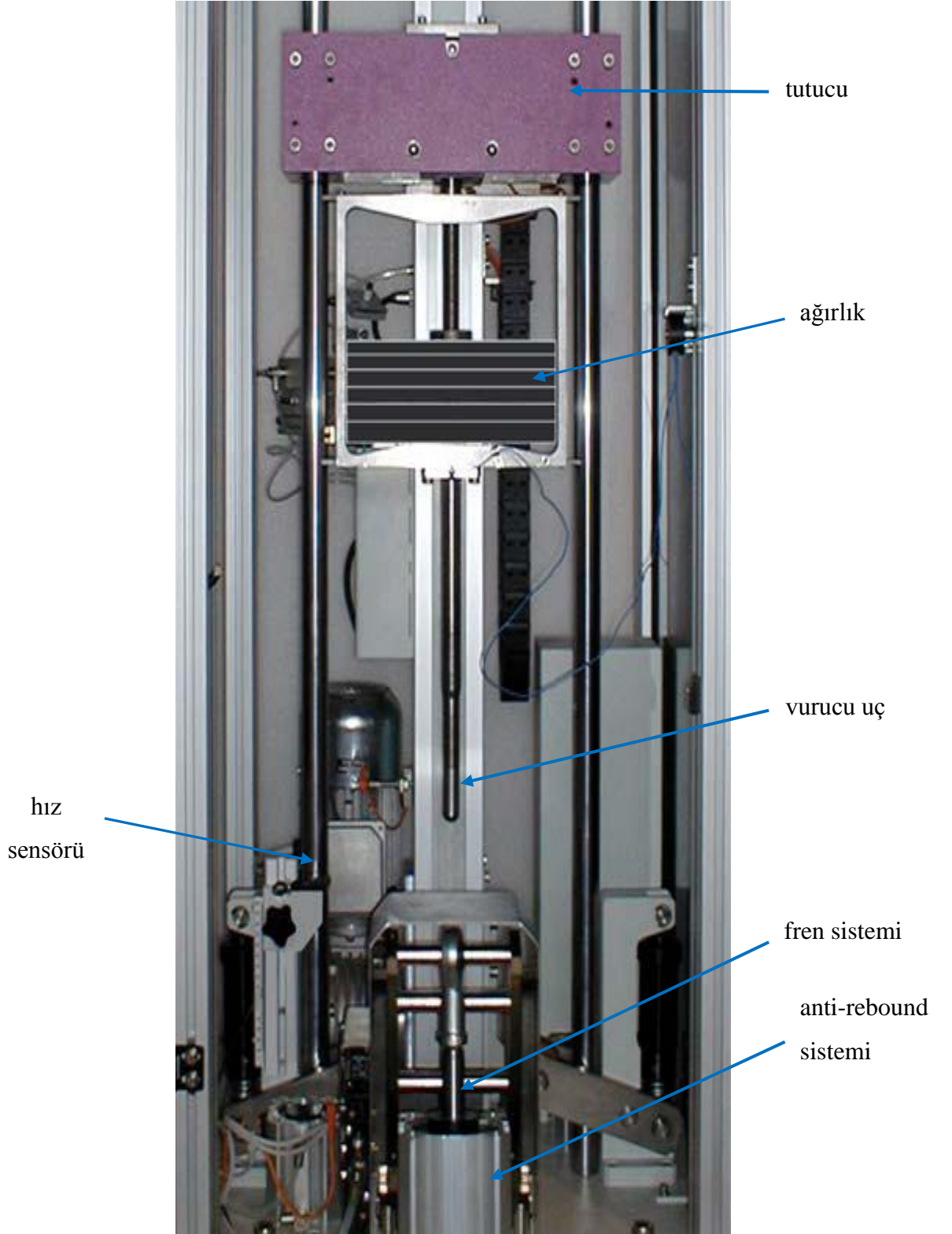
Şekil 3.8. Sandviç yapı

Numuneler üretilirken alüminyum plakalar çekirdek malzemesine uygun şekilde kesilmiştir. Kesilen plakaların yüzeyleri hassas şekilde temizlenerek yapıştırıcı film tabakası oluşturmak için uygun hale getirilmiştir. Yapıştırıcı olarak bu tarz çalışmalarda kullanılan Scotch Weld 1838 B/A yapıştırıcı malzemesi kullanılmıştır. Yapıştırıcı malzeme alüminyum plaka üzerine film tabakası oluşturacak şekilde uygulandıktan sonra bal peteği çekirdek malzeme iki plaka arasına düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra belirli bir basınç altında oda sıcaklığında bir gün boyunca bekletilerek deneysel çalışmalar için uygun hale getirilmiştir.

3.4.2. Darbe test düzeneği

Testler ağırlık düşürme esasına göre çalışan CEAST-Fractovis Plus, Şekil 3.9 cihazında yapılmıştır.

Cihaz ile küçük enerjilerden (2-3 J) büyük enerji (1800 J) değerlerine kadar test yapma imkânı vardır. Cihazın, ağırlığın numuneye çarptıktan sonra geri sıçrayıp (delinmeyen numuneler için) tekrar ikinci (veya daha fazla) kez çarpmasını engelleyen bir mekanizması (anti-rebound system) mevcuttur. Cihazın ortam fırını sayesinde testler -100°C ile +150°C arasında yapılabilmektedir. Testlerde 12,7 mm çapında küresel uca sahip bir darbe ucu kullanılmıştır. Kullanılan yük hücresinin (load-cell) kapasitesi 22,4 kN'dur. Darbede düşürülen toplam kütle (darbe ucu, load-cell vs dahil) 5 kg'dır. Enerji

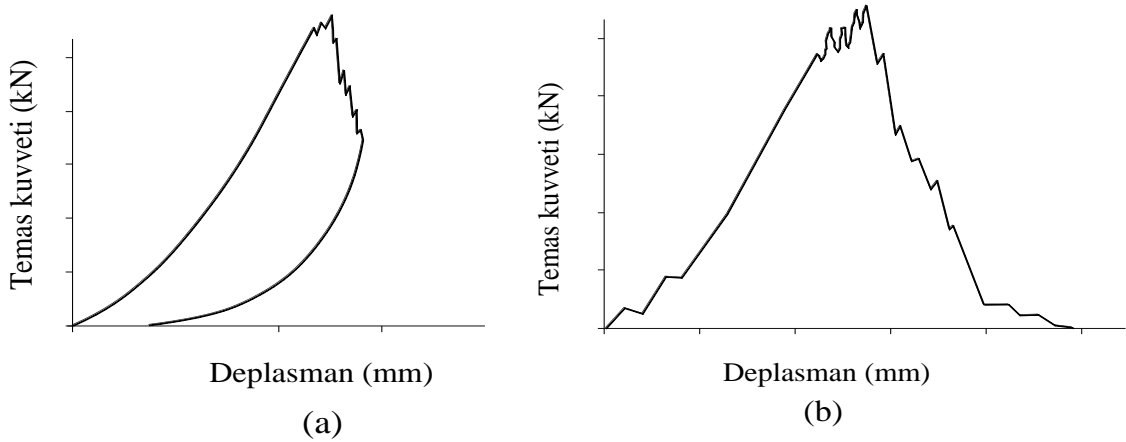


Şekil 3.9. CEAST-Fractovis Plus test cihazının ana parçaları

değişimleri vurucu kütlenin yüksekliği değiştirilerek sağlanmaktadır. Sistemde ayrıca yüksek enerjiler elde etmek için yay sistemi bulunmaktadır. Testlerde 100 mm x 100 mm boyutlarında kare numuneler kullanılmıştır. Vurucu ucun çarpma anındaki hızı bir hız sensörü ile ölçülür.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Darbe testinde; çarpan uca bağlı olan kuvvet-ölçer (load-cell) yardımı ile kuvvet- zaman eğrisi elde edilir. Daha sonra cihazdan ilgili datalar alınıp kinematik denklemler de kullanılarak (bir program vasıtası ile) çok çeşitli eğriler (kuvvet-deplasman, absorbe edilen enerji-zaman, hız-zaman, vb) ve veriler elde edilebilir. Darbe testlerini yorumlama da bu verilerden yararlanılabilir. Özellikle kuvvet-deplasman eğrileri darbe süresince malzeme cevabında meydana gelen değişimleri ve hasarları yorumlamak için çok önemli ipuçları içerir. Darbe enerjisi değerine bağlı olarak değişmekle birlikte, bu eğriler genellikle kapalı ve açık eğri olarak ortaya çıkar Şekil 4.1 kapalı eğriler delinmemiş, açık eğriler ise delinme eşiğindeki veya delinmiş numunelerin hasar mekanizmalarını temsil ederler. Bu eğrilerin altındaki alan (eğri ile yatay deplasman eksenini arasındaki alan) bize darbe olası süresince numune tarafından absorbe edilen enerji değerini vermektedir. Darbe enerjisi ise düşen ağırlığın serbest bırakılmadan önce sahip olduğu potansiyel enerji olarak ifade edilebilir. Ayrıca, darbe enerjisine bağlı olarak absorbe edilen enerji değişimini ifade eden “enerji profili diyagramı” da bir malzemenin darbeli yüklere karşı direncini veya cevabını karakterize etmede kullanılabilen önemli bir gösterebilir.



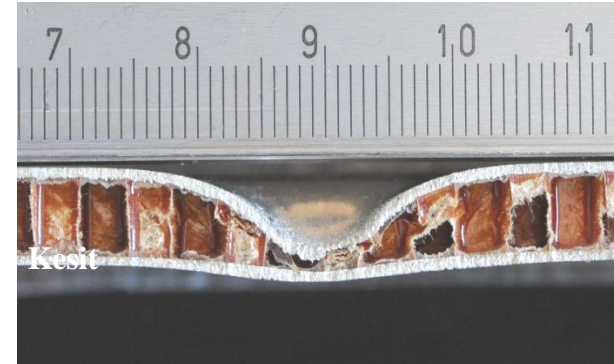
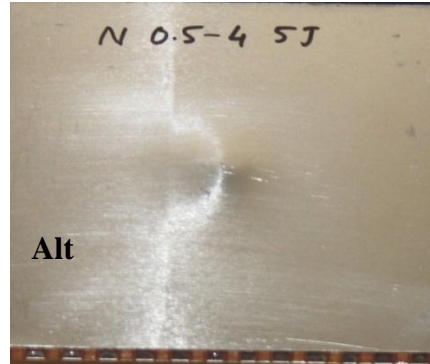
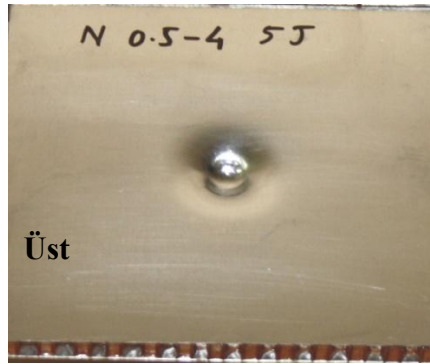
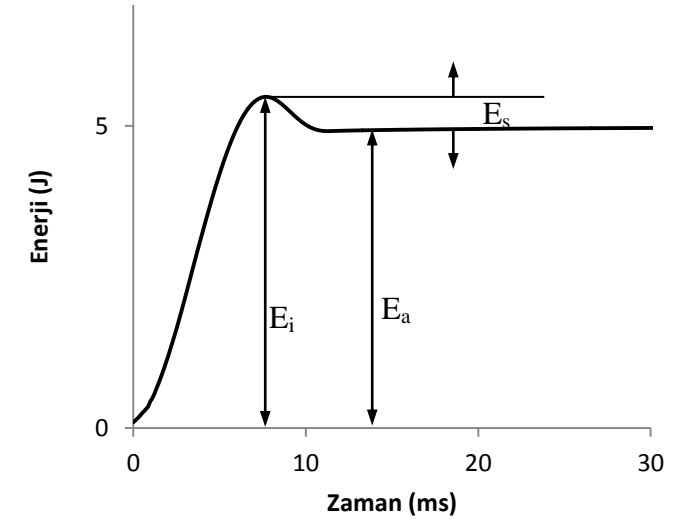
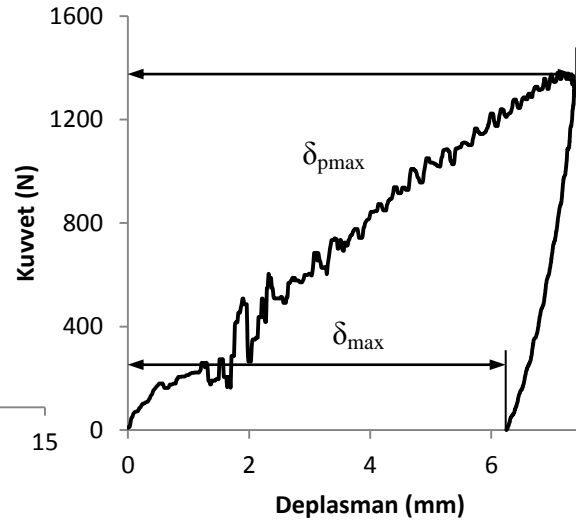
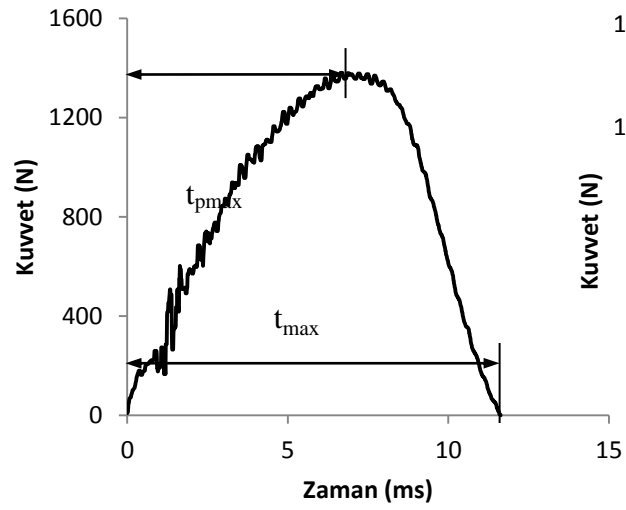
Şekil 4.1. Bir darbe olayında karşılaşılan eğri tipleri: (a) kapalı eğri, (b) açık eğri

Bir darbe testini yorumlarken, kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafiği ile hasarlı (darbe sonrası) numunelerin çapraz olarak incelenmesi büyük katkılar sağlamaktadır. Ayrıca numunelerin darbe sonrası çekilen kesit resimleri darbe sonrasında çekirdek yapıda oluşan hasar mekanizmalarının daha iyi görülebilmesine imkan vermektedir. Burada da söz konusu diyagramlardan ve resimlerden yararlanarak yapılan testler hakkında bilgiler verilmeye çalışılmıştır.

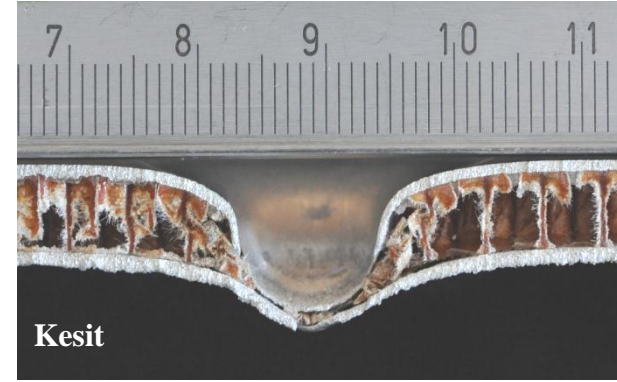
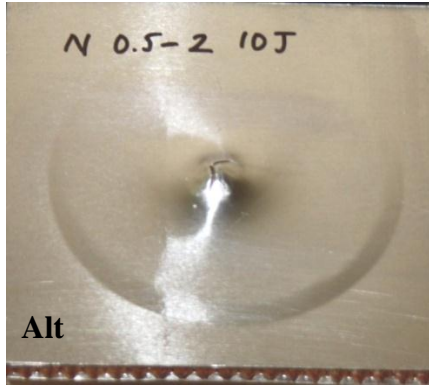
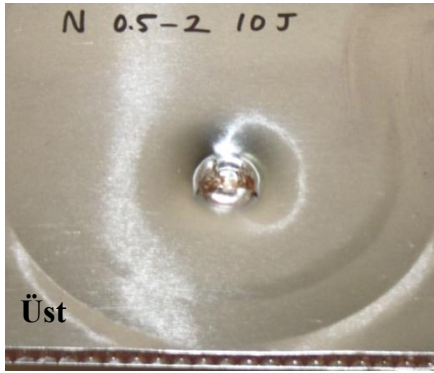
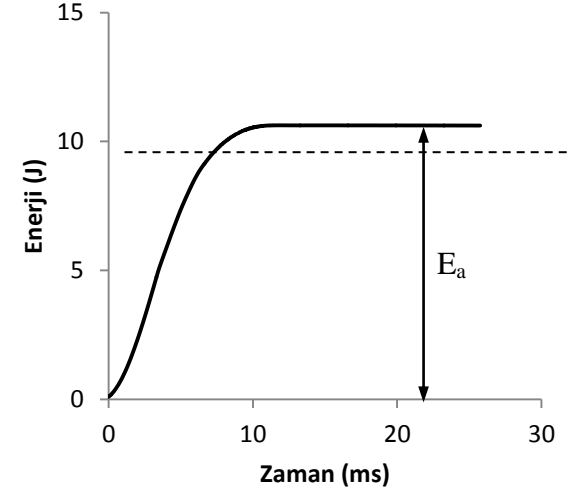
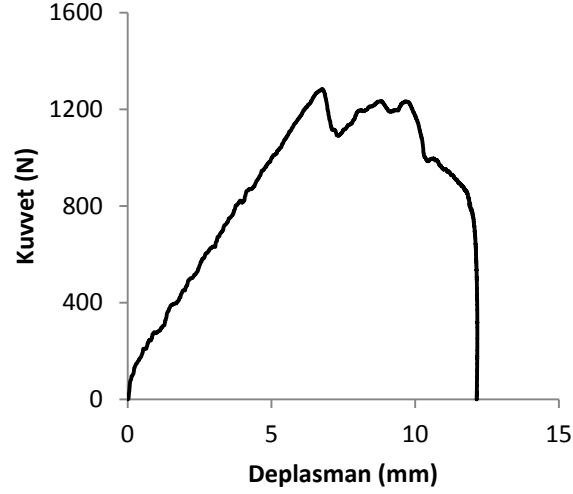
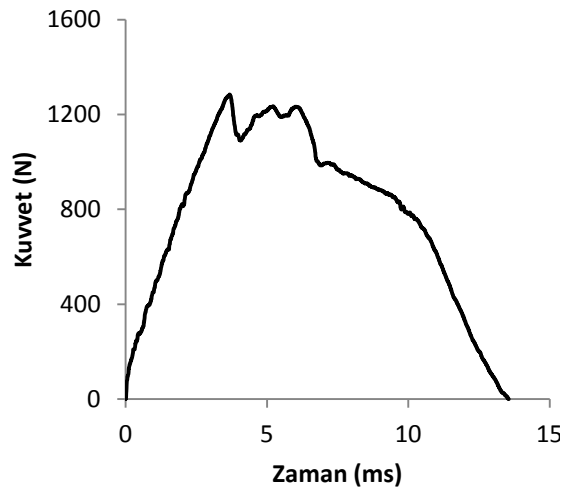
Darbe deneylerinde genel olarak üç çeşit davranış görülmektedir. Bunlar geri dönüş (rebounding), nüfuziyet-saplanıp kalma (penetration) ve delip geçme (perforation) olarak ifade edilebilir. Geri dönüş durumunda; vurucu numuneye çarptıktan sonra geri döner ve kuvvet-zaman eğrisi bir dağı andırmakta olup olay sonunda temas kuvveti sıfır olur. Nüfuziyet durumunda vurucu malzemeye saplanır ve sonunda hızı sıfır olur. Darbe enerjisi yeterince büyük olduğunda delip geçme durumu meydana gelir. Numunenin delinmesinden sonra temas kuvvetinin sıfır olması beklenir. Fakat bu durum asla gerçekleşmez. Bunun nedeni numune ile vurucu arasında meydana gelen sürtünme kuvvetidir. Temas kuvveti-deplasman eğrisi altındaki alan hesaplanarak absorbe edilen enerji-zaman grafiği çizilebilir. Geri dönüş durumunda darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden büyüktür. Dolayısıyla numune vurucunun sahip olduğu tüm enerjiyi absorbe edemez. Nüfuziyet durumunda ise numune vurucunun sahip olduğu tüm enerjiyi absorbe eder ve vurucu numune içerisine gömülerek hızı sıfırlanır. Vurucu sahip olduğu potansiyel enerji ile numuneye çarpar ve numunenin vurucuyu engellemesinden dolayı hızı zamanla düşer. Nüfuziyet durumunda vurucunun numuneye saplanması suretiyle hızının sıfıra düştüğü anda numunede meydana gelen çökme maksimum değerdedir. Fakat delip geçme durumunda vurucu numuneye çarptıktan sonra sahip olduğu enerjinin tamamını sönmüleyemediği için numuneyi deler ve hareketine lineer olarak devam eder. Maksimum çökme numunenin orta noktasında meydana gelir. Çökme vurucunun sahip olduğu darbe enerjisi arttıkça artmaktadır.

Çizelge 4.1. Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süreleri çizelgesi

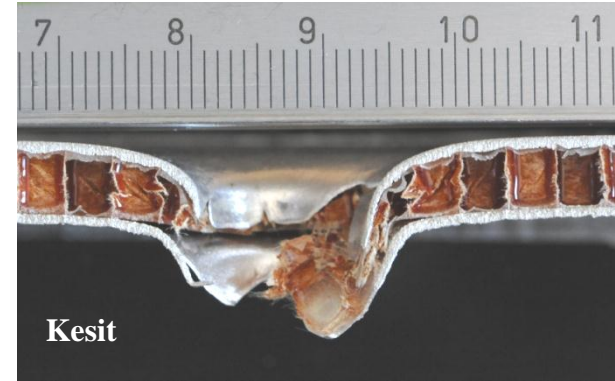
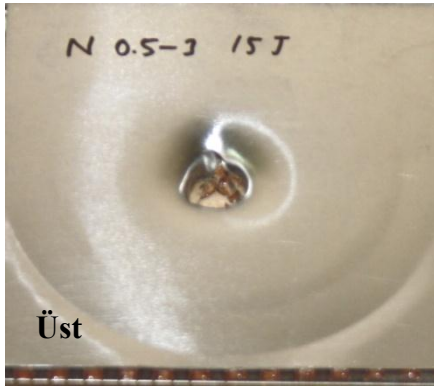
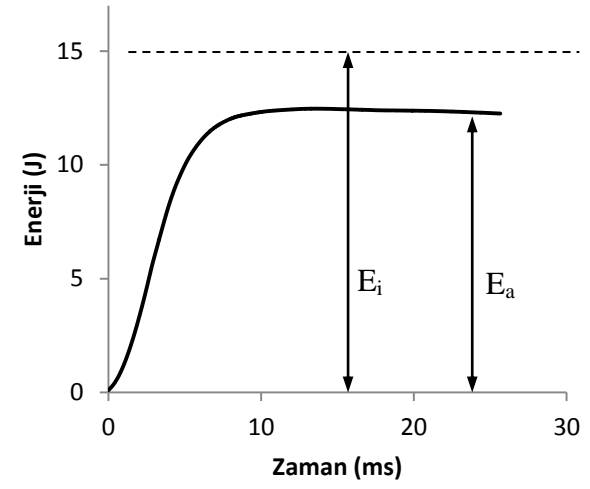
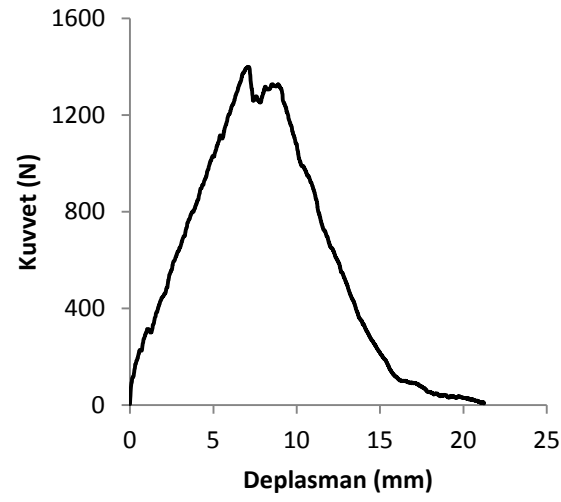
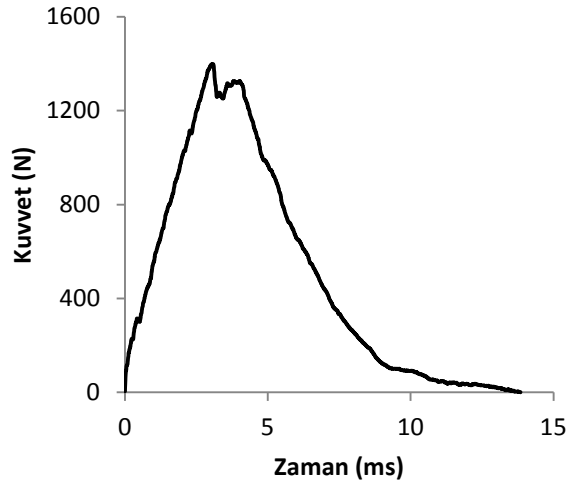
Levha kalınlığı (mm)	E_i (J)	F_{max} (N)	t_{pmax} (ms)	t_{max} (ms)	δ_{pmax} (mm)	δ_{max} (mm)
0.5	5	1380,4	6,7	11,63	7,37	6,24
	10	1284,1	3,68	13,55	6,76	12,13
	15	1398,8	3,07	13,84	7,07	21,23
0.7	5	1434,3	5,69	9,56	5,47	4,97
	10	1972,9	5,22	9,5	7,91	8,01
	15	2063,6	4,2	11,94	8,99	12,85
	20	5052,2	3,2	12,43	8,4	20,48
1	5	1637	5,56	9,06	5,45	4,83
	10	2362,6	5,72	8,76	7,82	7,2
	15	3017,4	5,24	8,21	9,35	8,81
	25	3747,3	4,28	8,32	10,88	11,64
	35	3530,5	3,1	14,5	10,17	21,08
1,2	5	1722,1	5,12	8,28	4,91	4,33
	10	2605,1	5,21	8	7,23	6,56
	15	3272,5	5,1	7,69	8,71	8,04
	20	3886,2	4,87	7,4	9,85	9,26
	25	4359,6	4,92	7,29	11,01	10,37
	35	4427,7	3,57	8,01	11,28	13,31
	45	5096,6	3,4	9,15	12,34	16,36
	60	5130,6	2,7	7,29	12,12	24,01



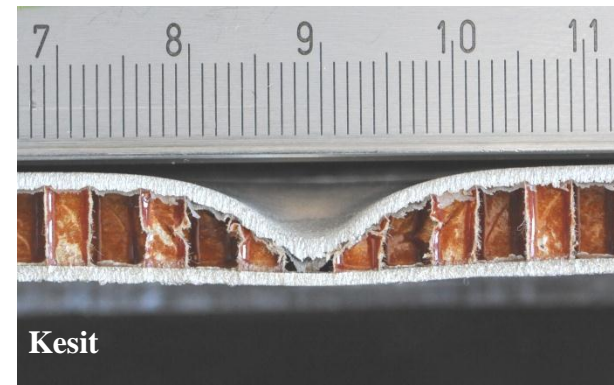
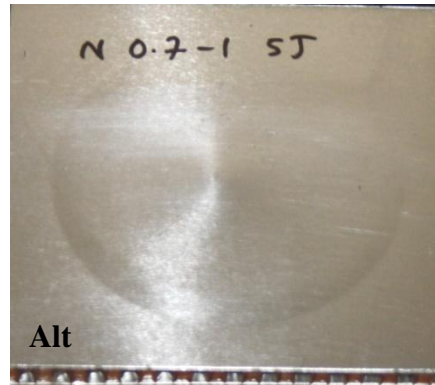
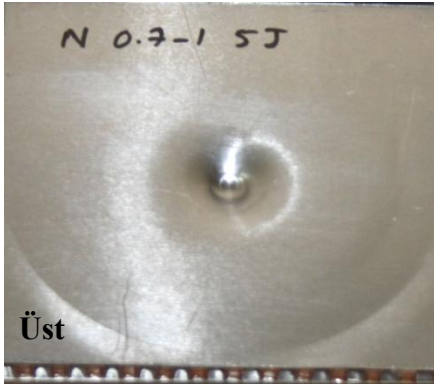
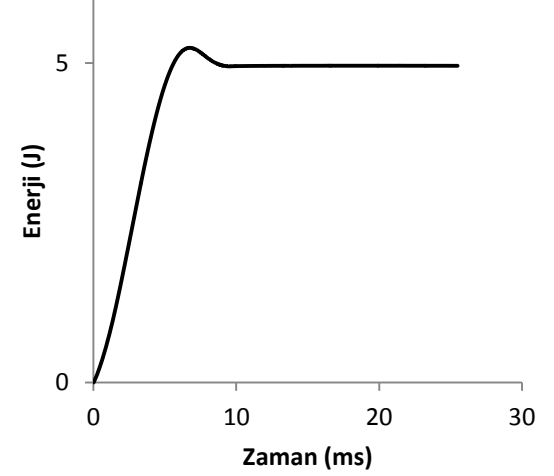
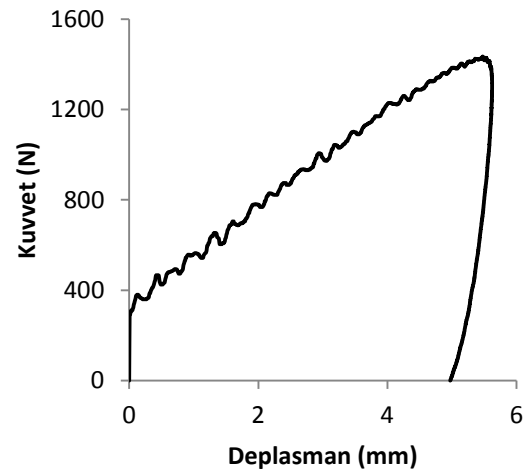
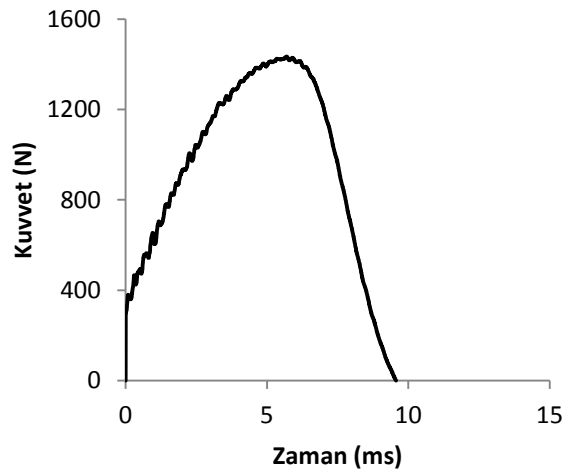
Şekil 4.2. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



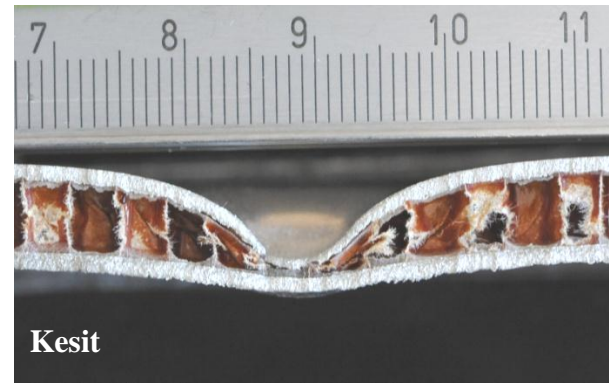
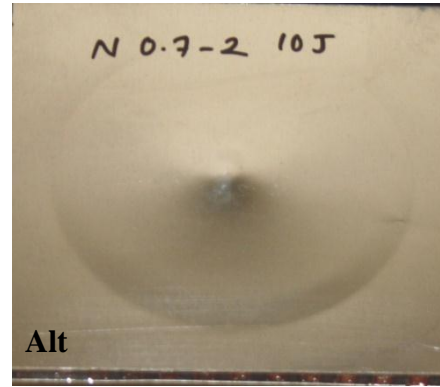
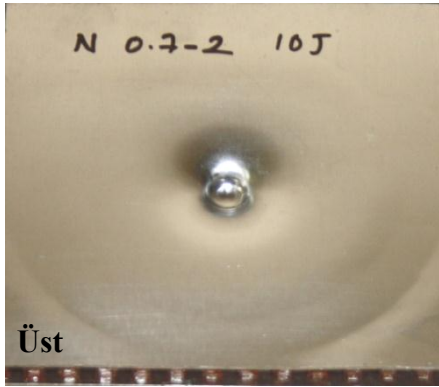
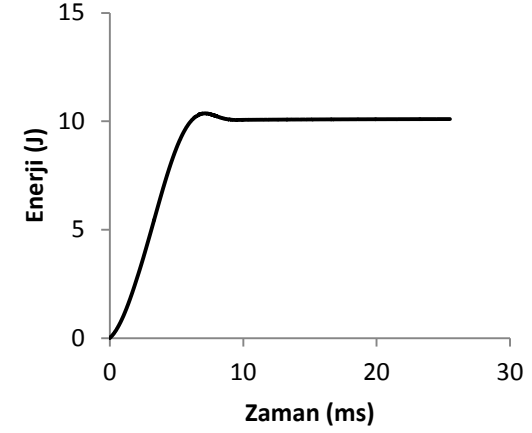
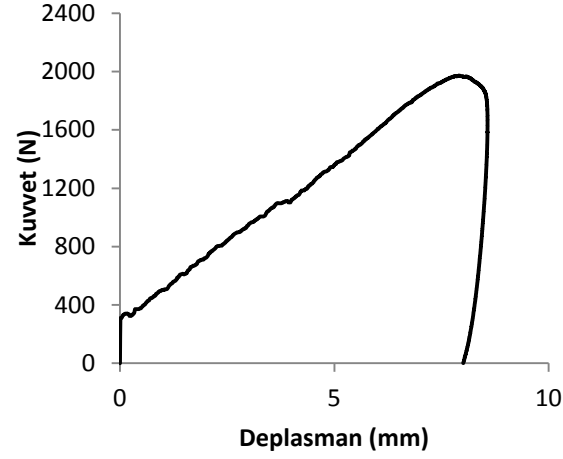
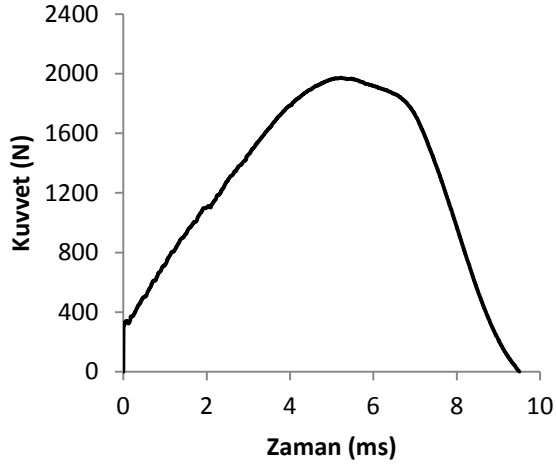
Şekil 4.3. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



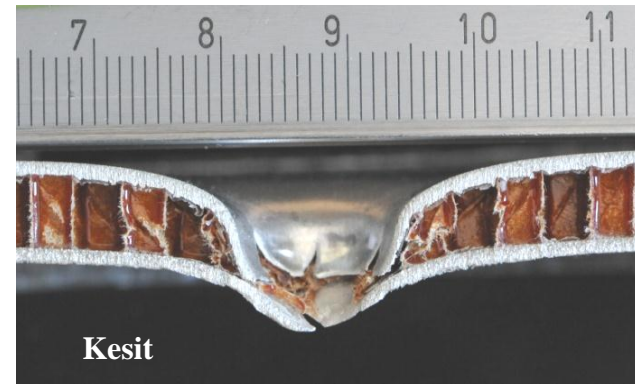
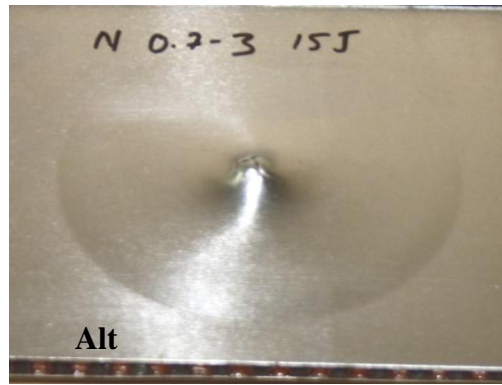
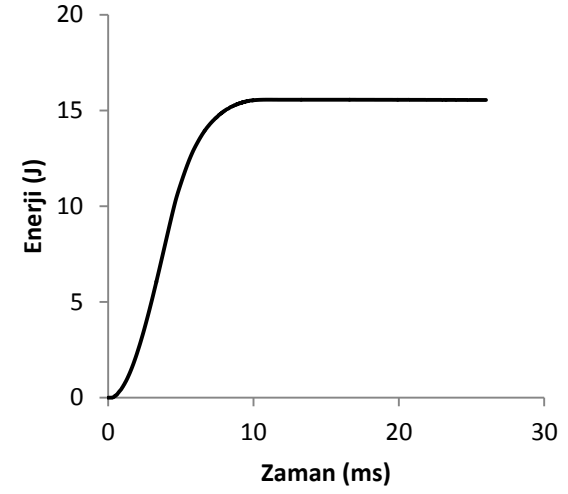
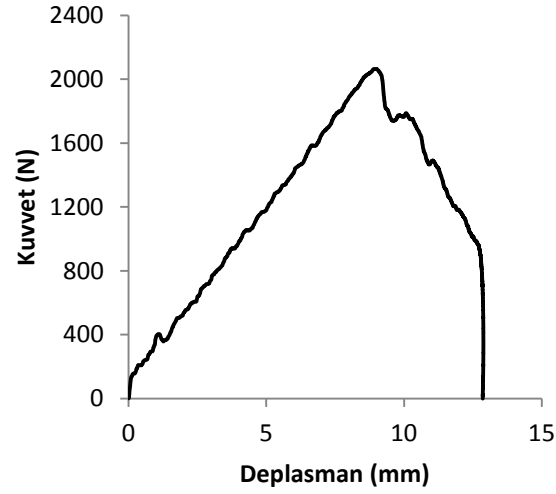
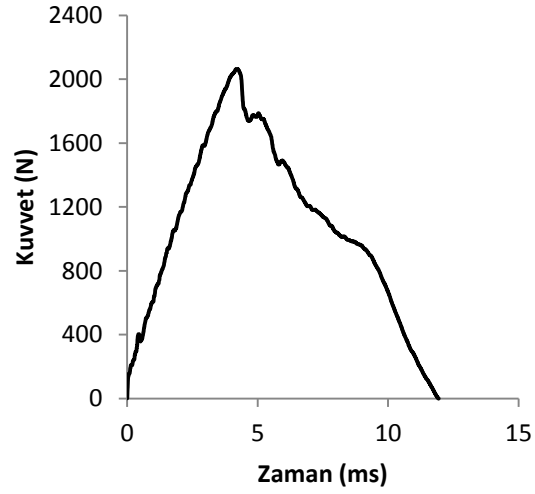
Şekil 4.4. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



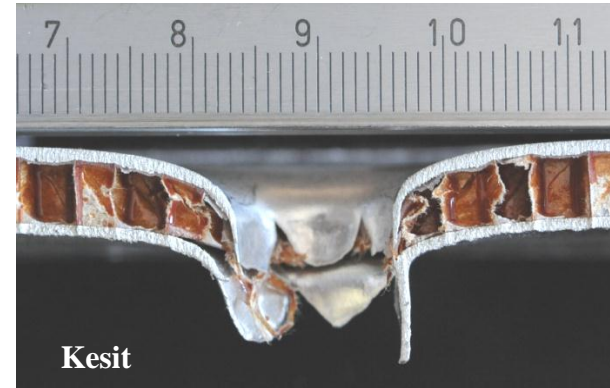
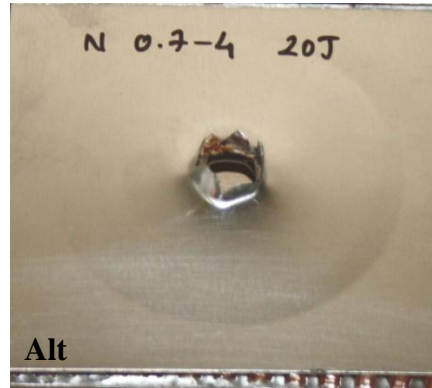
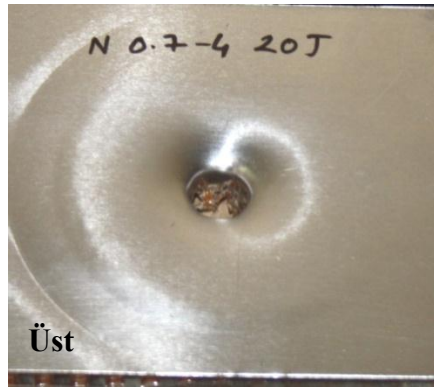
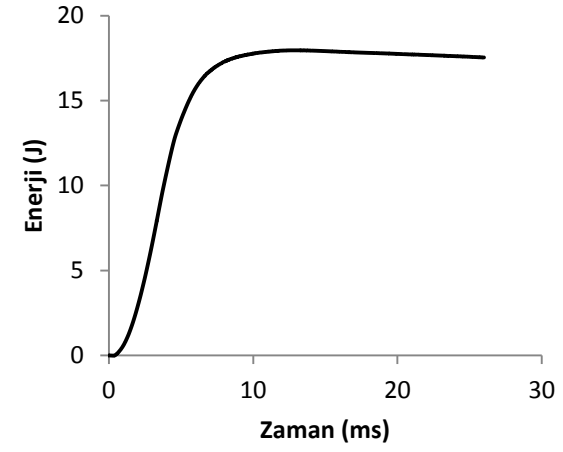
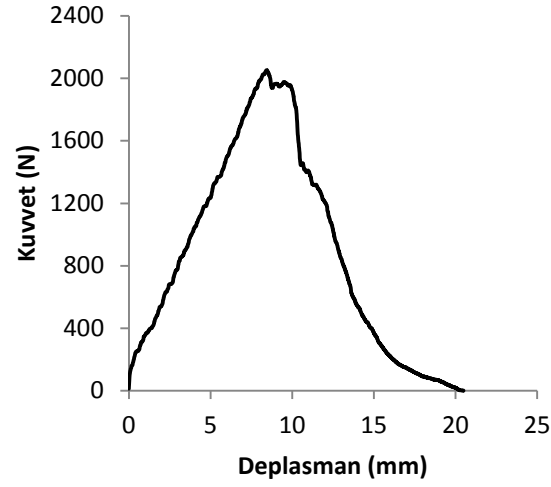
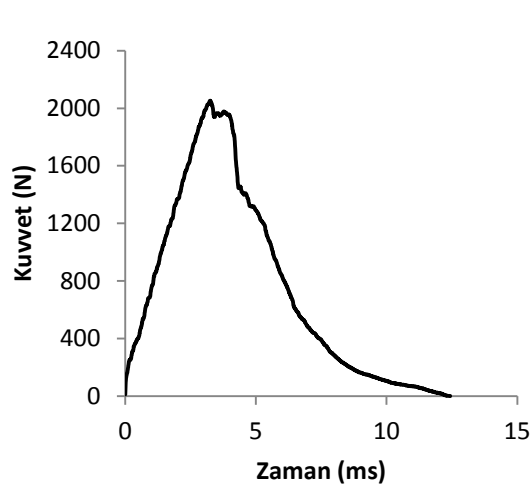
Şekil 4.5. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



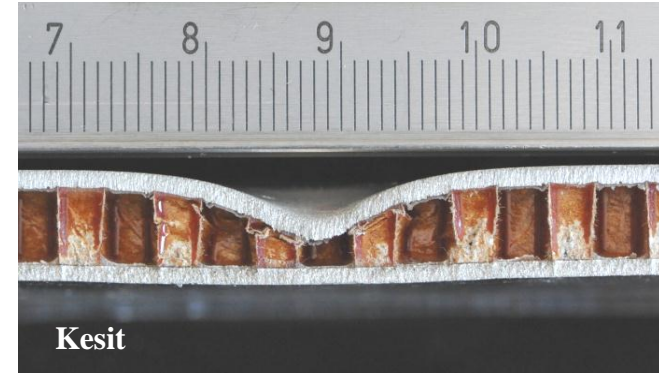
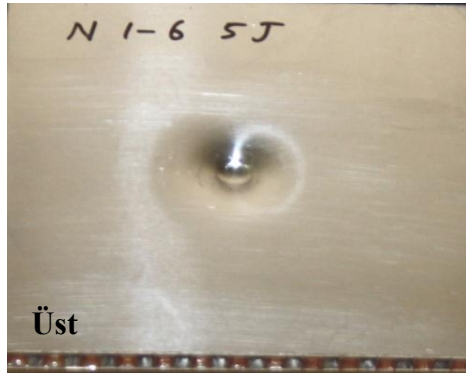
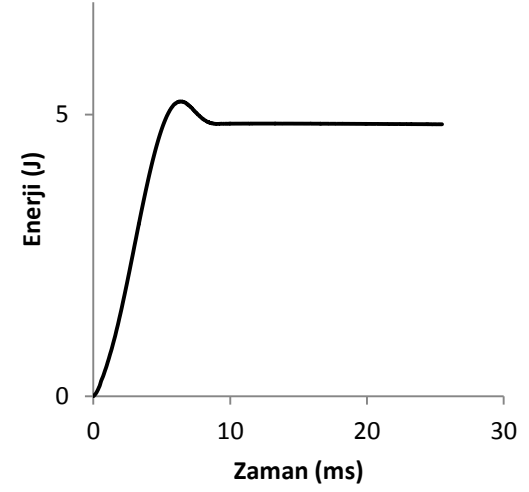
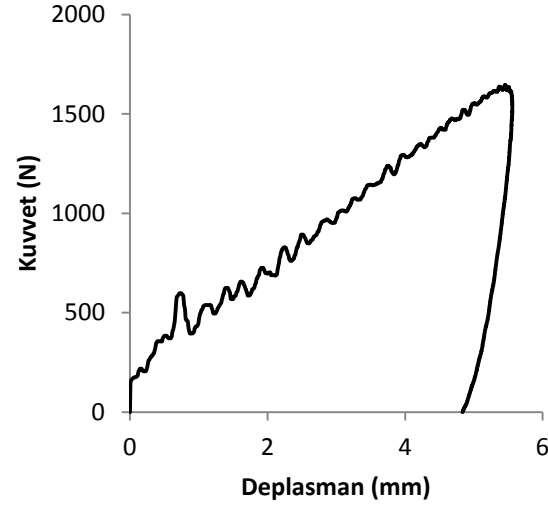
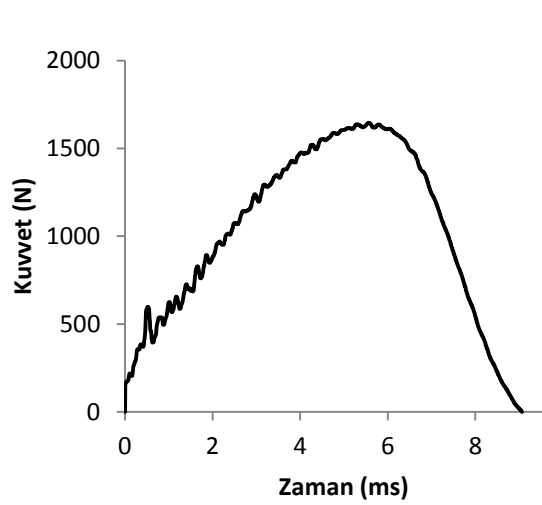
Şekil 4.6. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



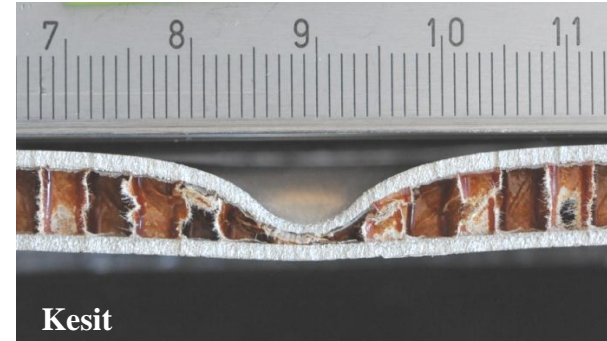
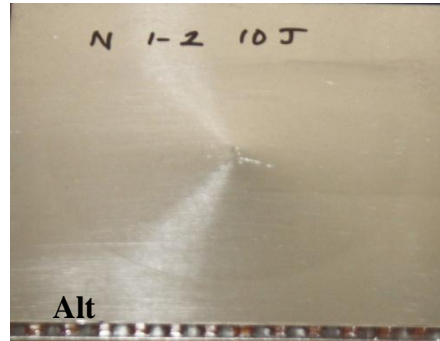
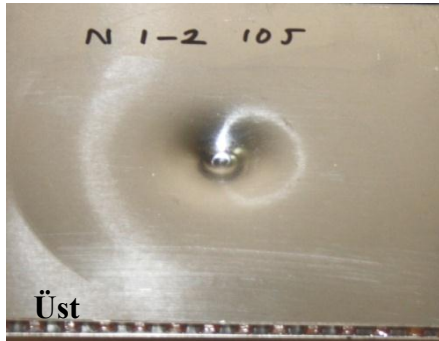
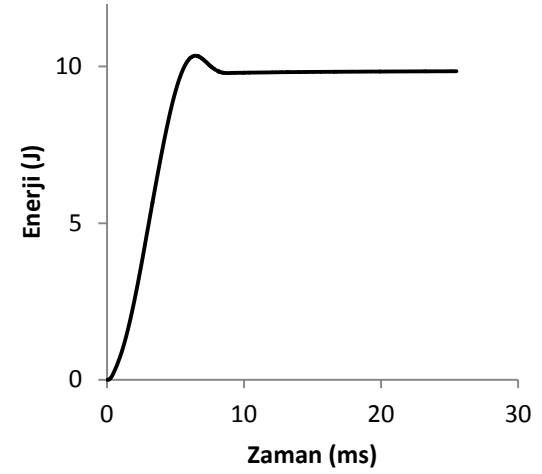
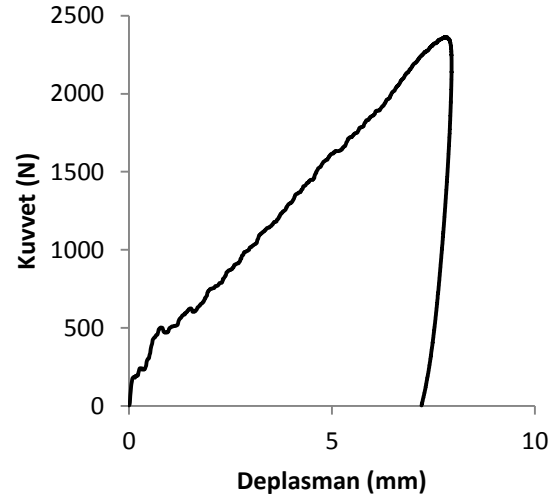
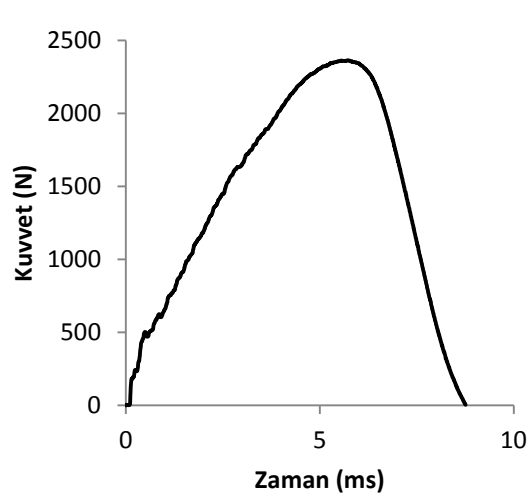
Şekil 4.7. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



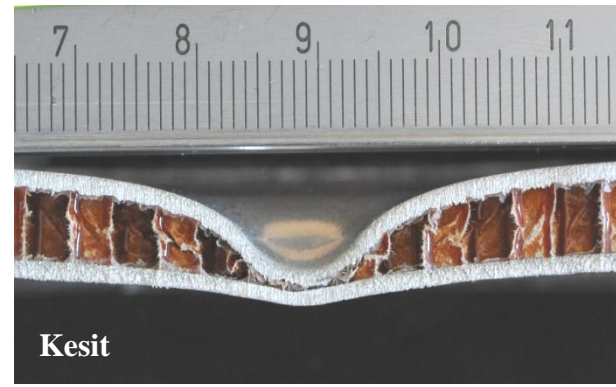
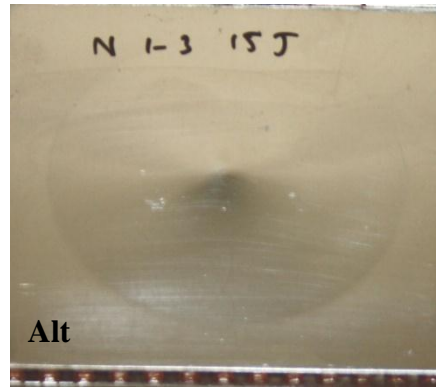
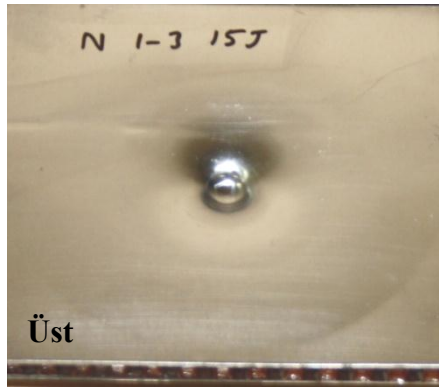
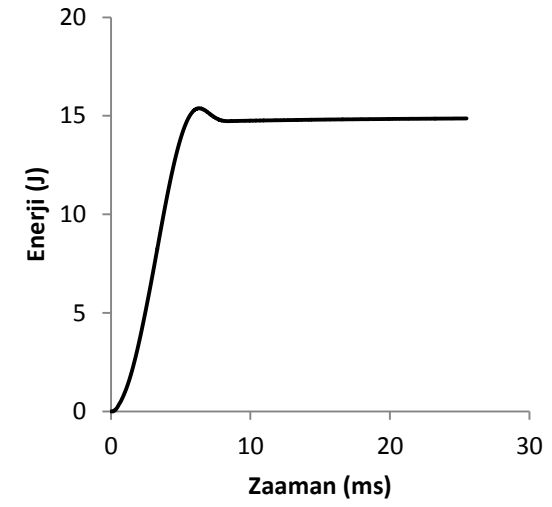
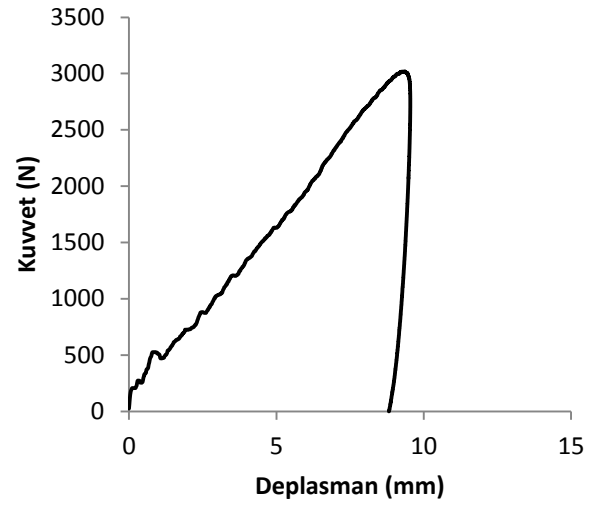
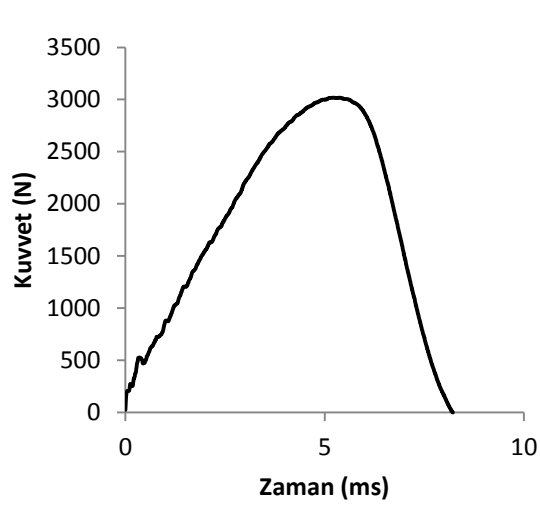
Şekil 4.8. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının 20 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



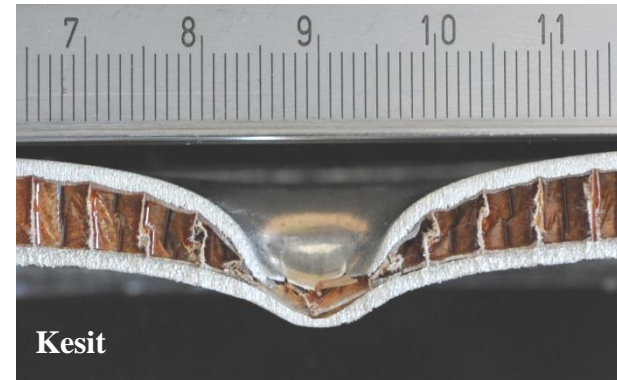
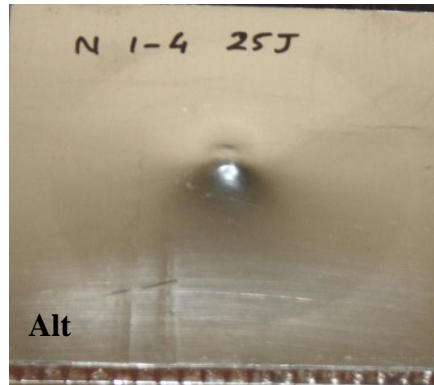
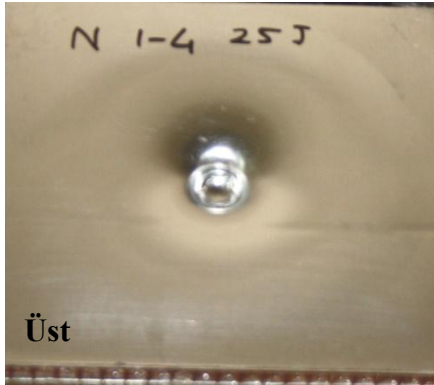
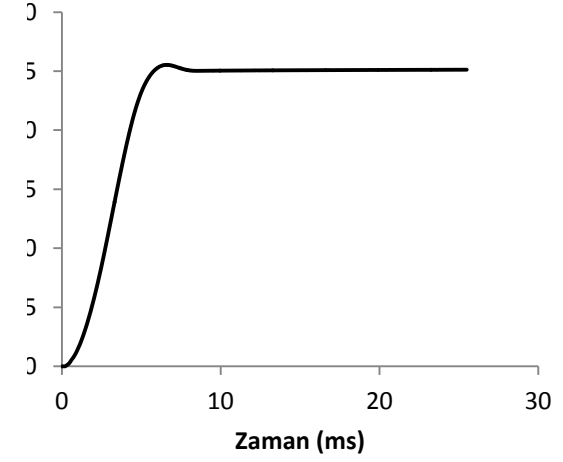
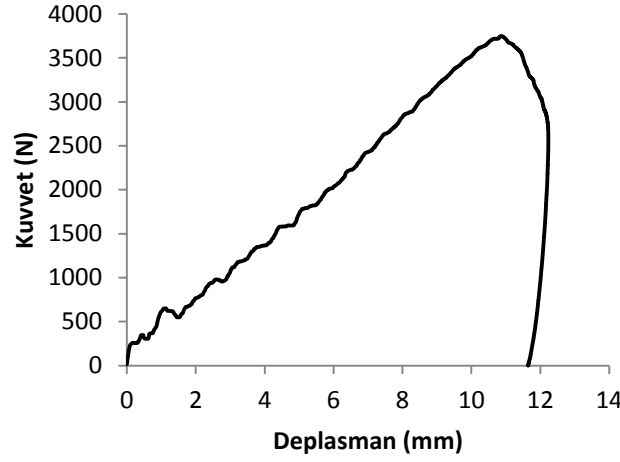
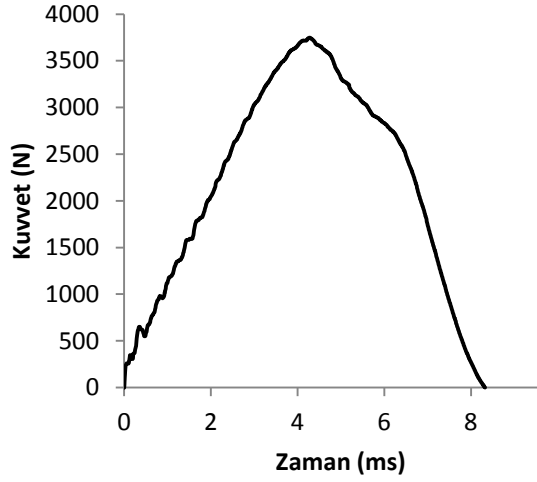
Şekil 4.9. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



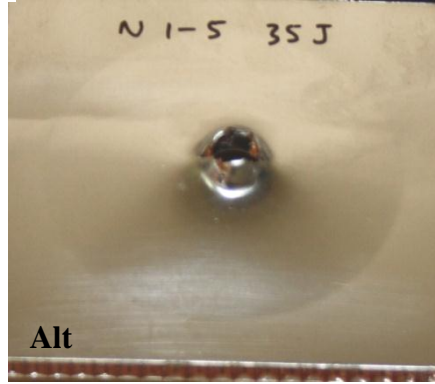
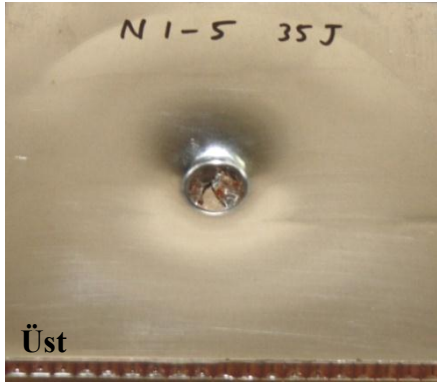
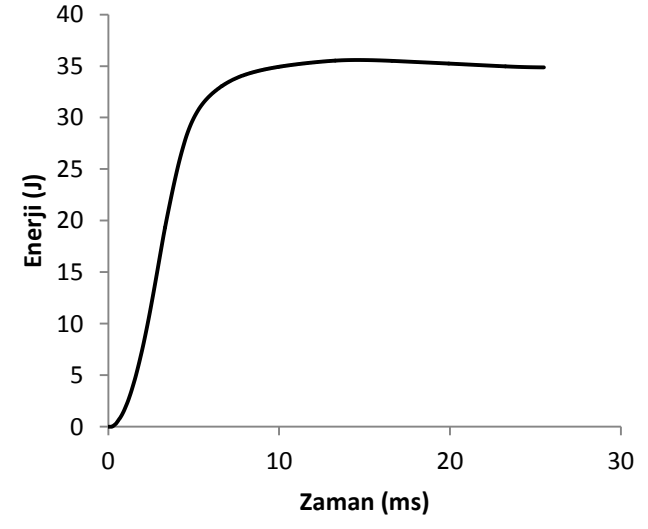
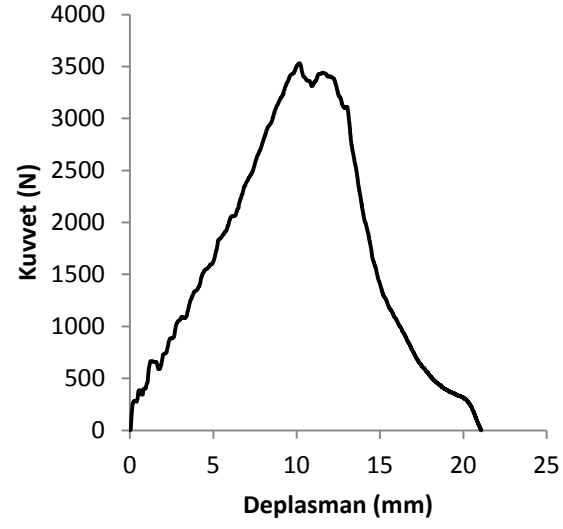
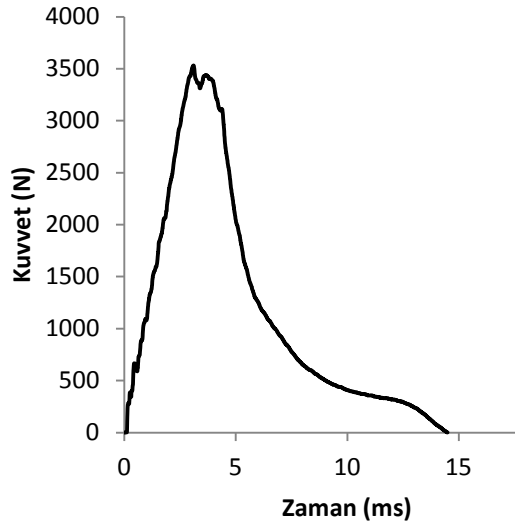
Şekil 4.10. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



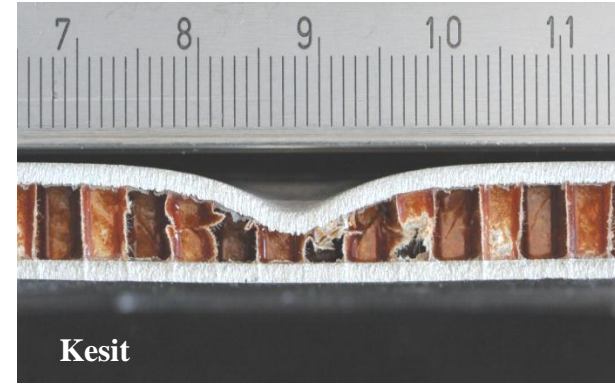
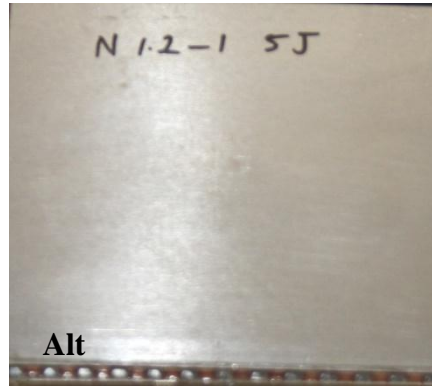
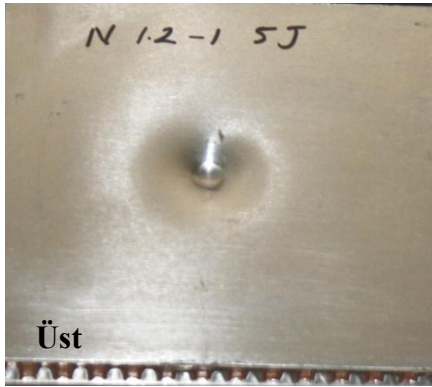
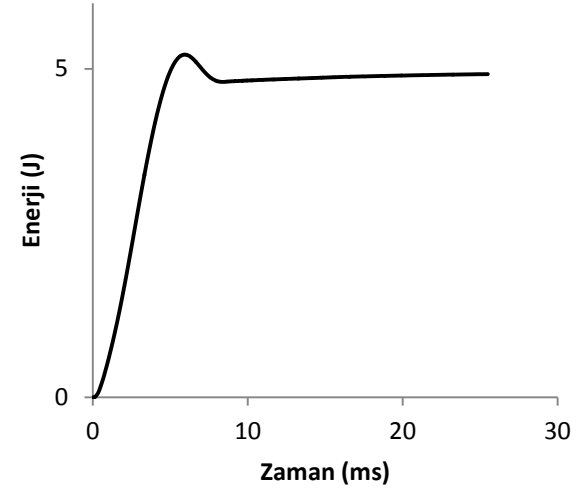
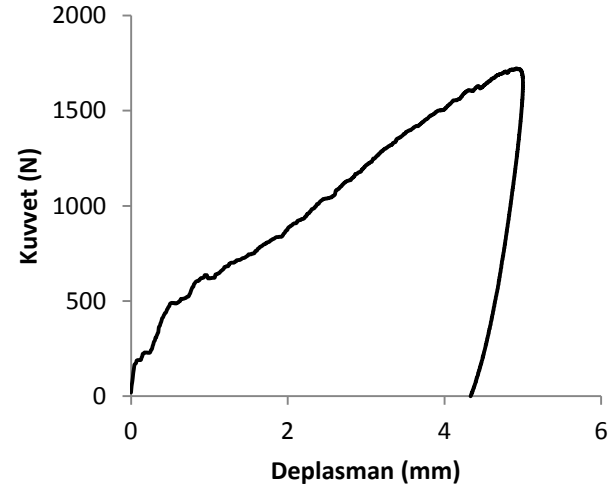
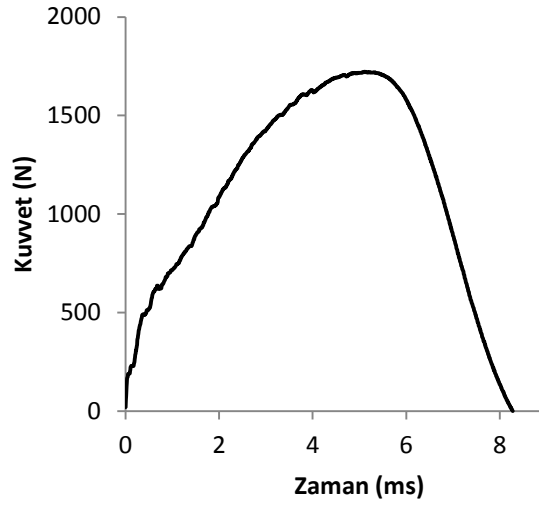
Şekil 4.11. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



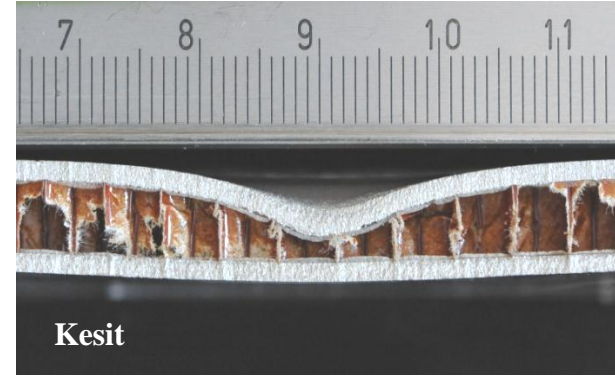
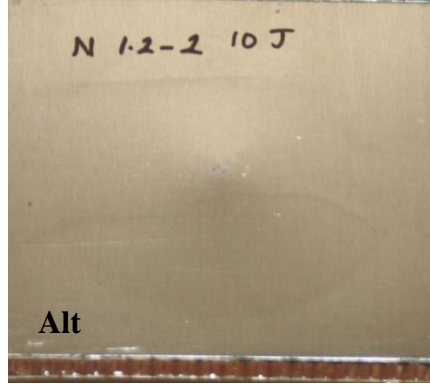
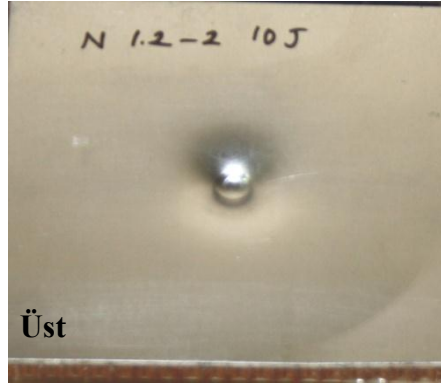
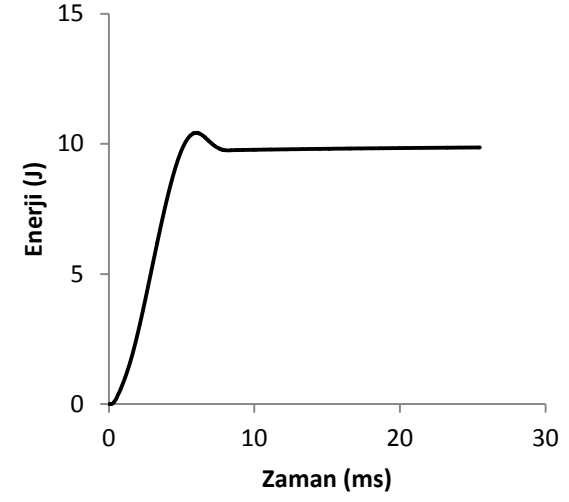
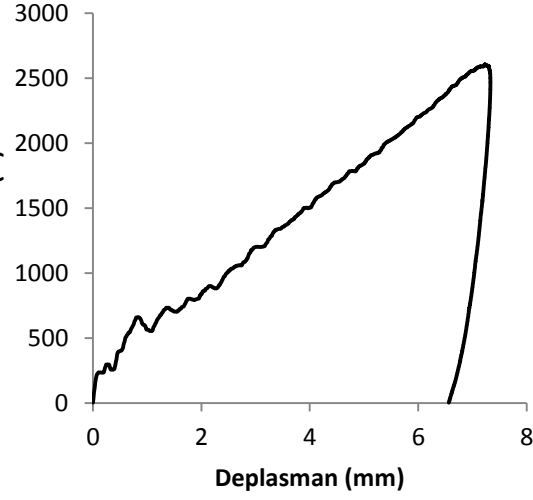
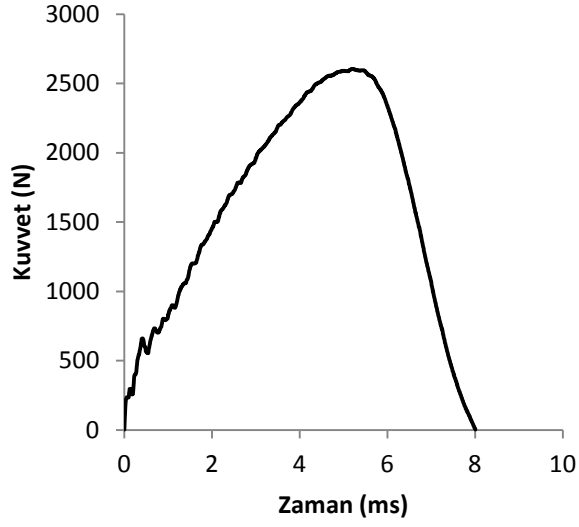
Şekil 4.12. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 25 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



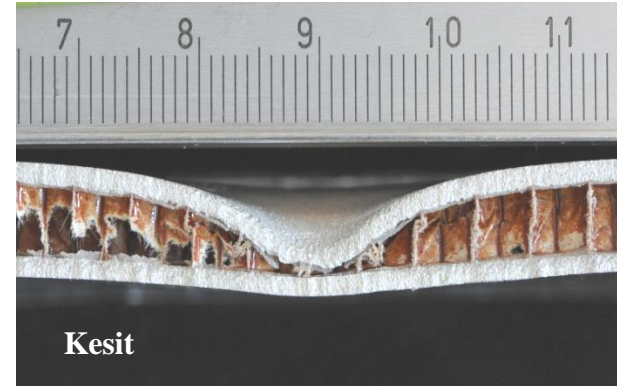
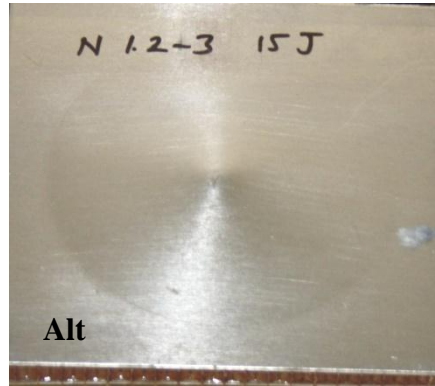
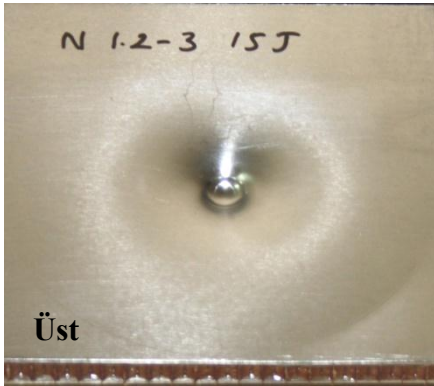
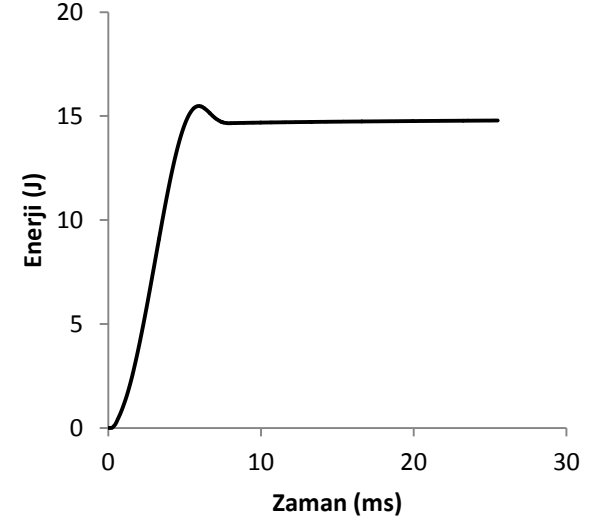
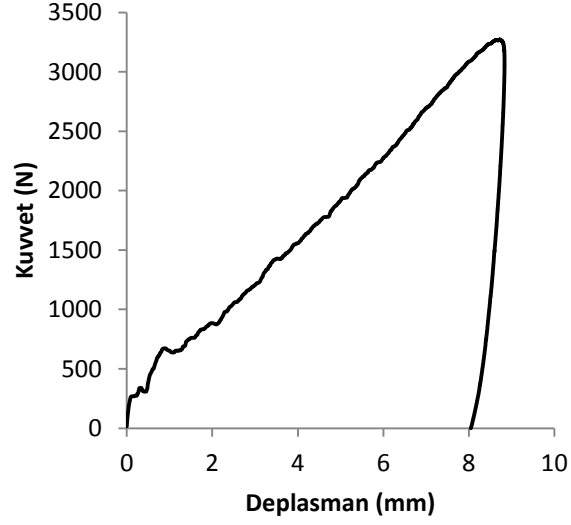
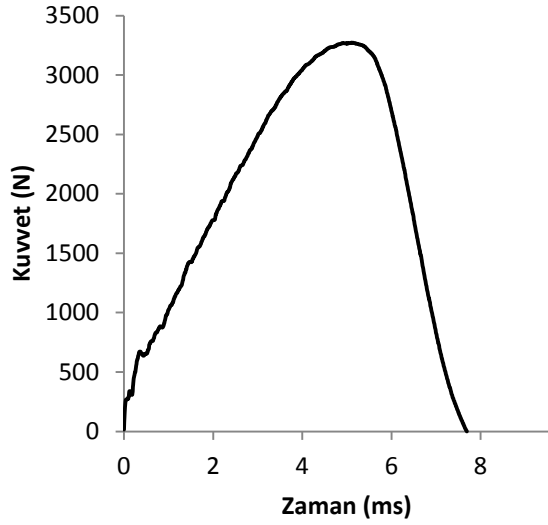
Şekil 4.13. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının 35 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



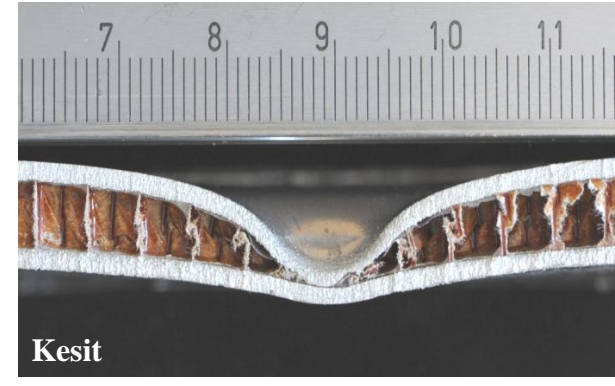
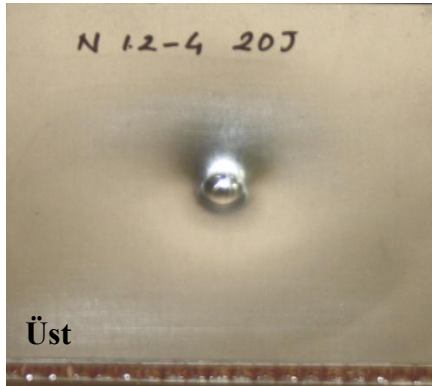
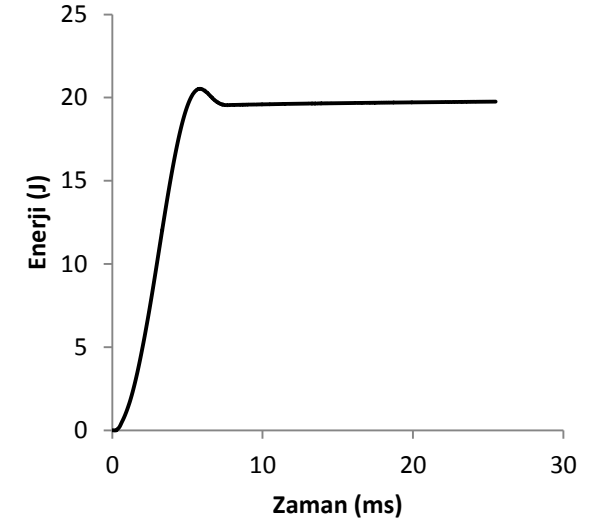
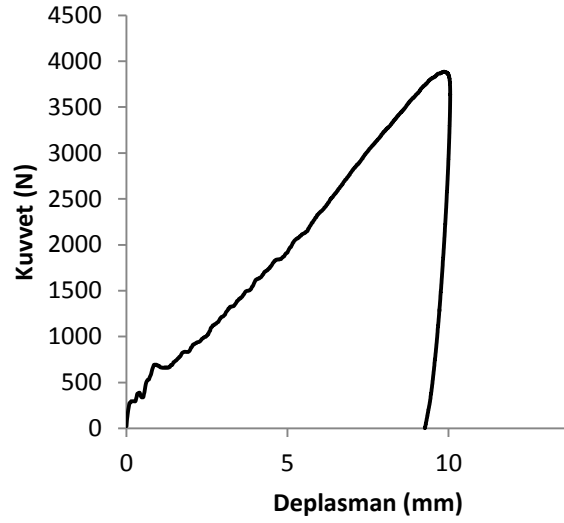
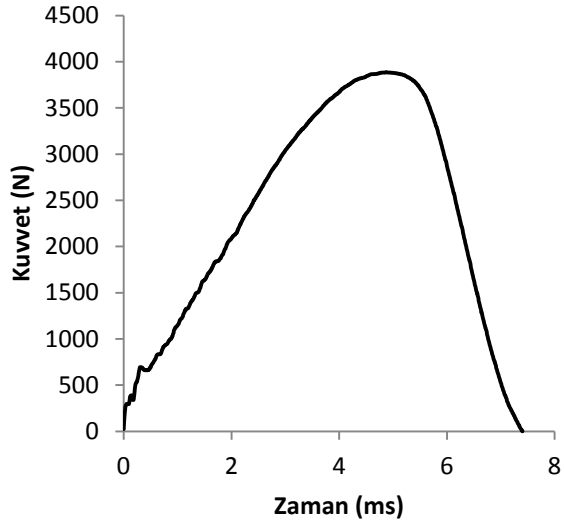
Şekil 4.14. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 5 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



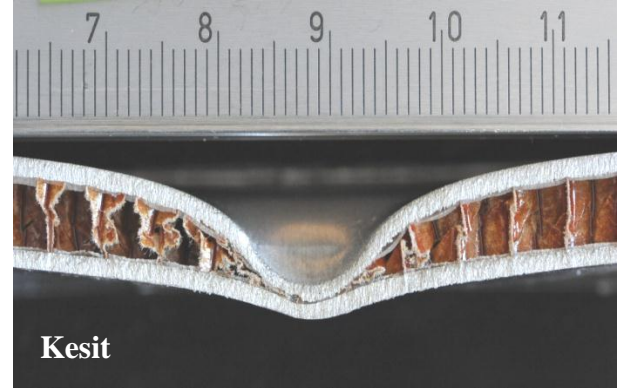
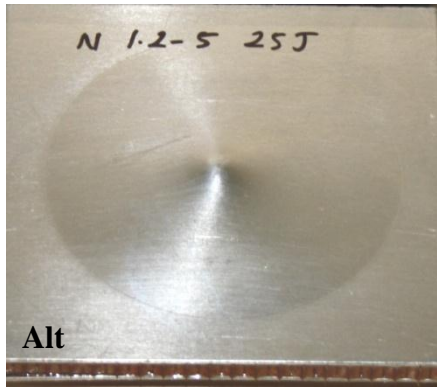
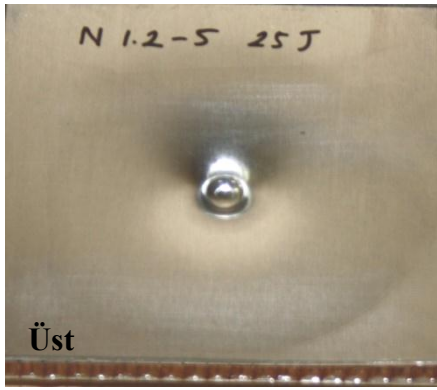
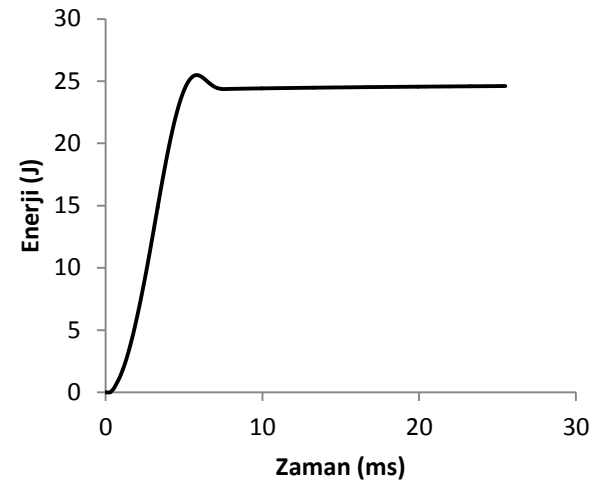
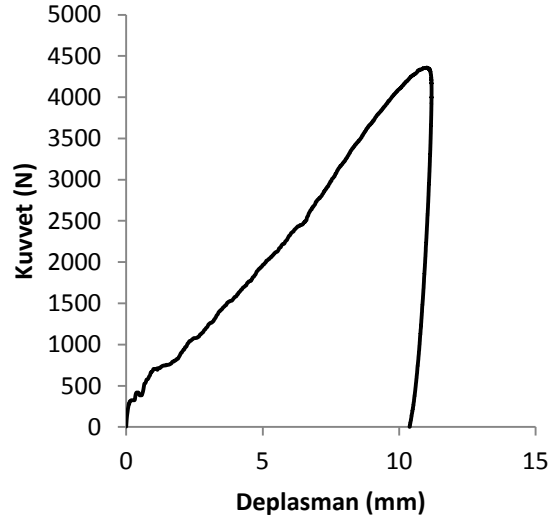
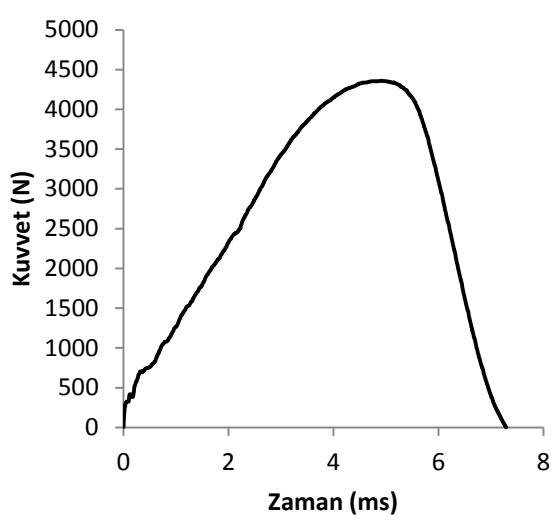
Şekil 4.15. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 10 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



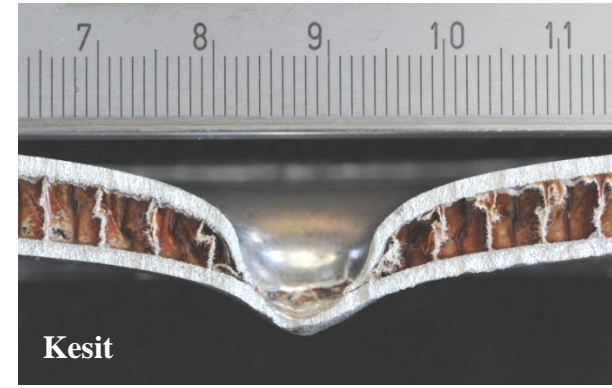
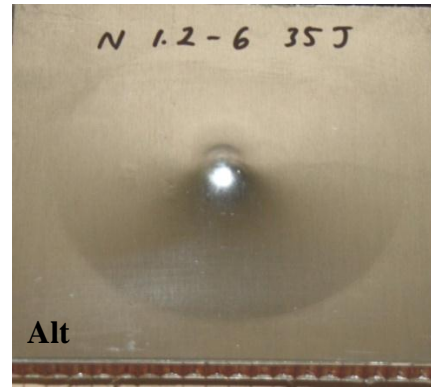
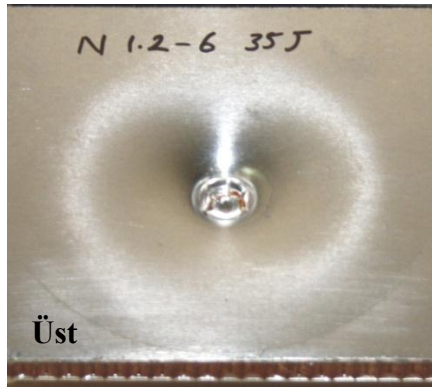
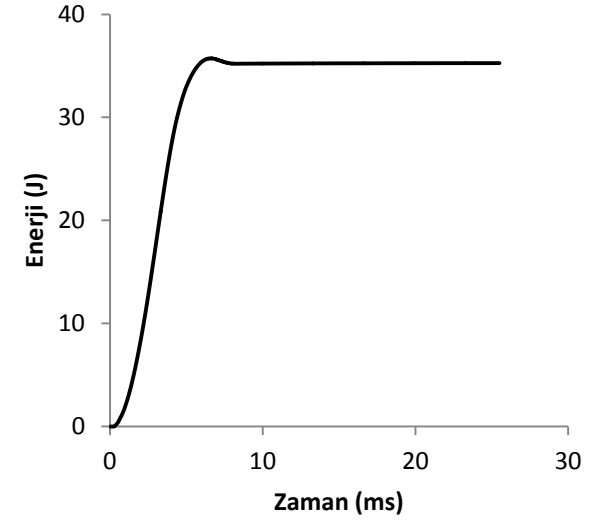
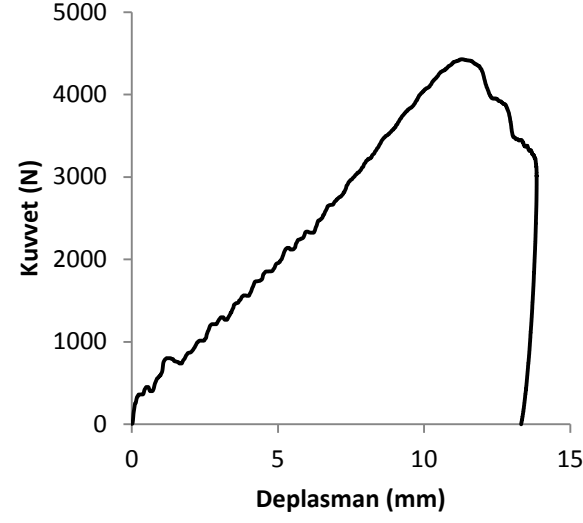
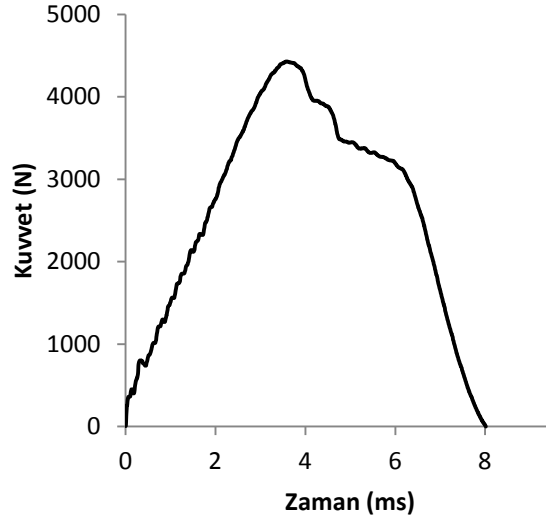
Şekil 4.16. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 15 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



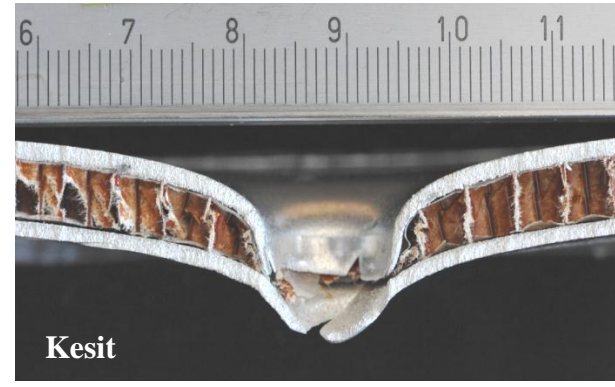
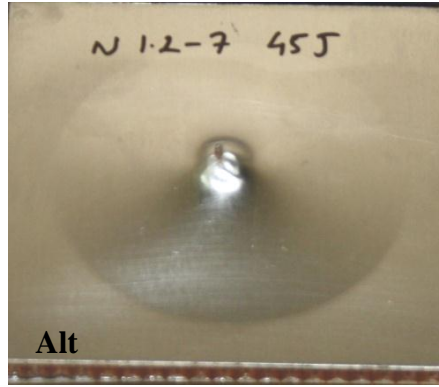
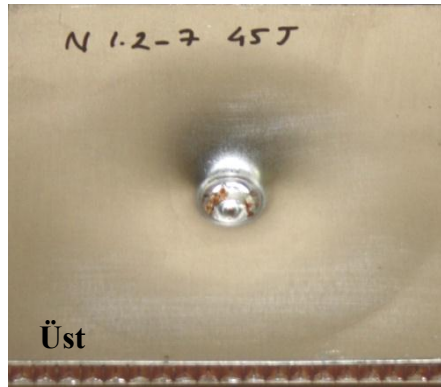
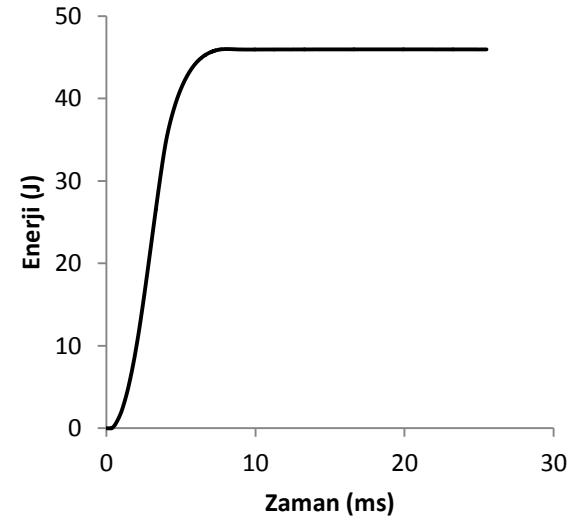
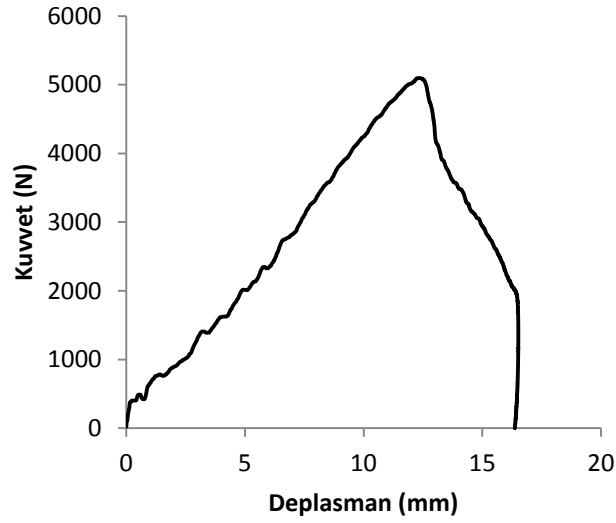
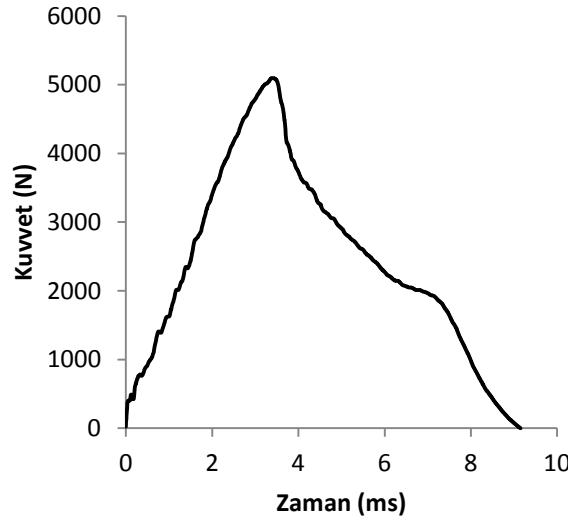
Şekil 4.17. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 20 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



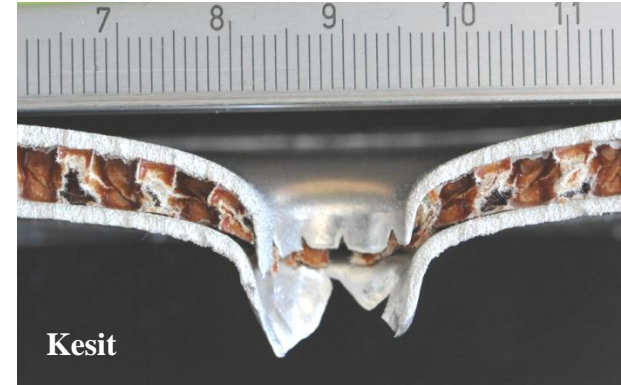
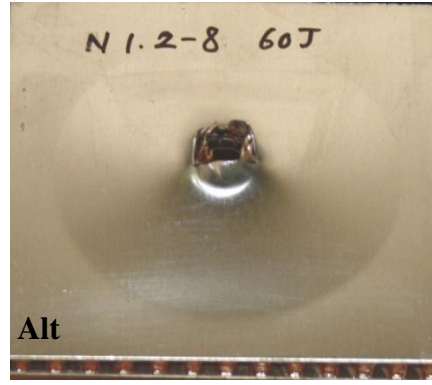
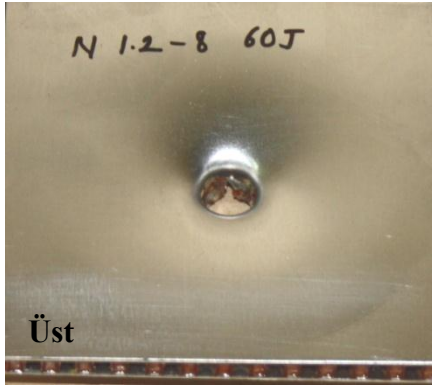
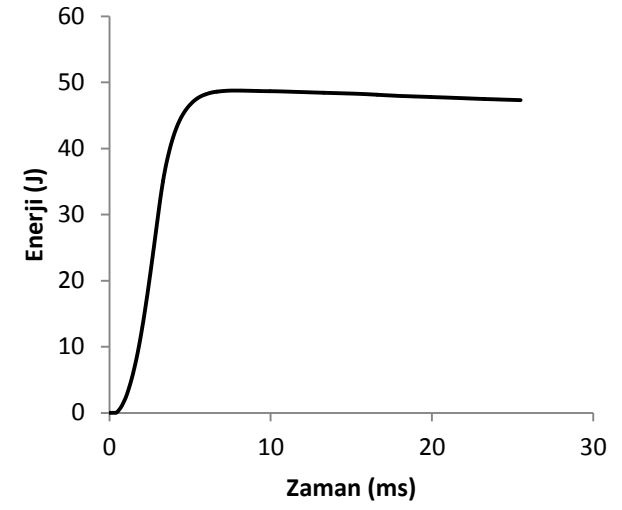
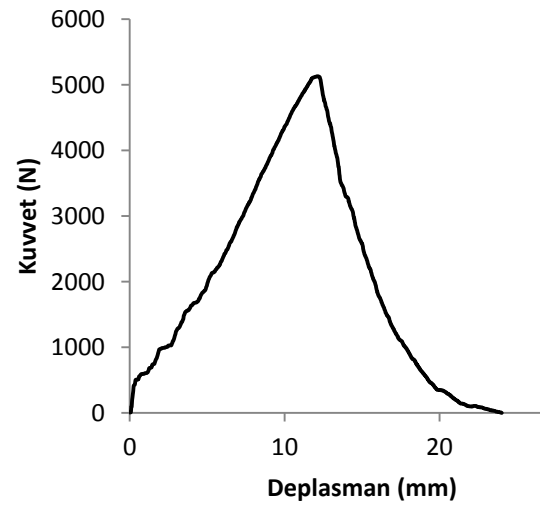
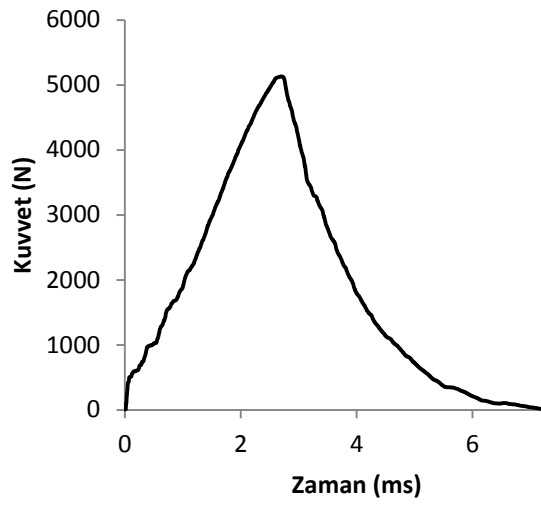
Şekil 4.18. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 25 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



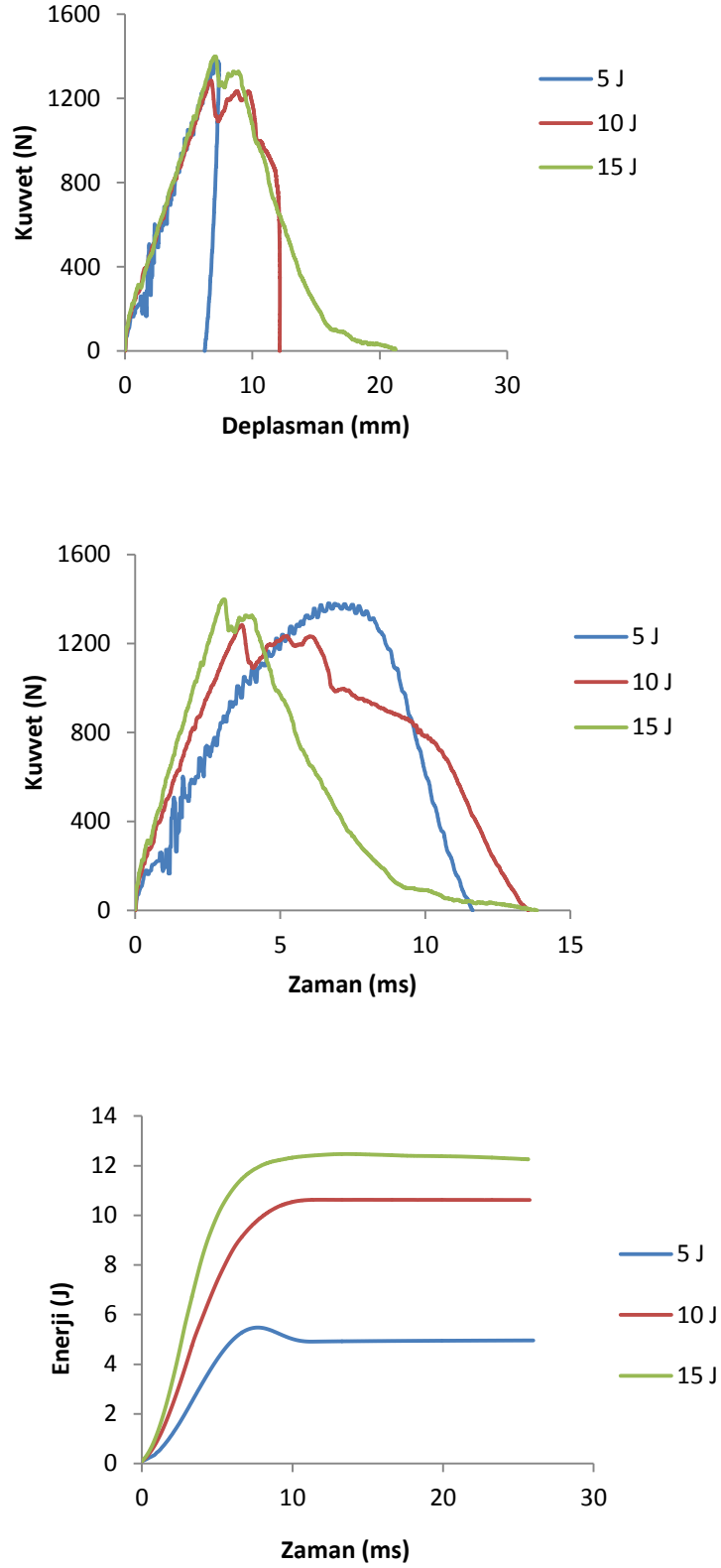
Şekil 4.19. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 35 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



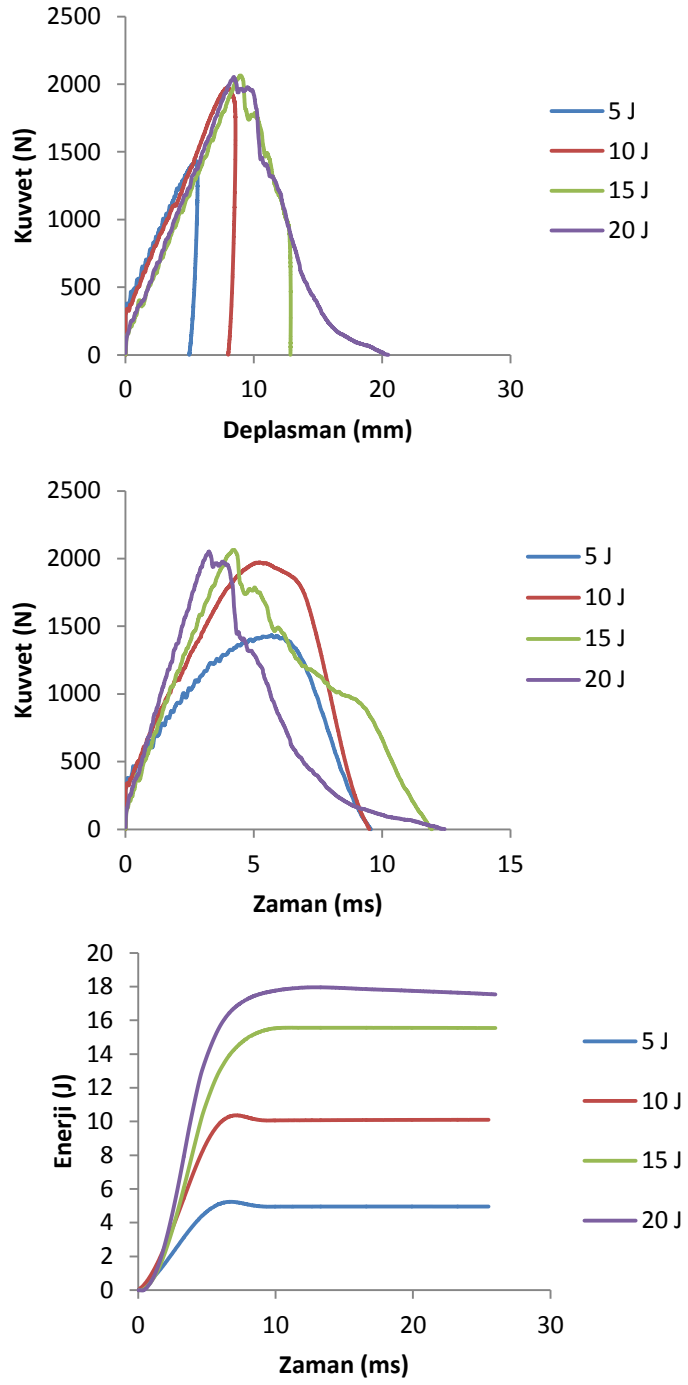
Şekil 4.20. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 45 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



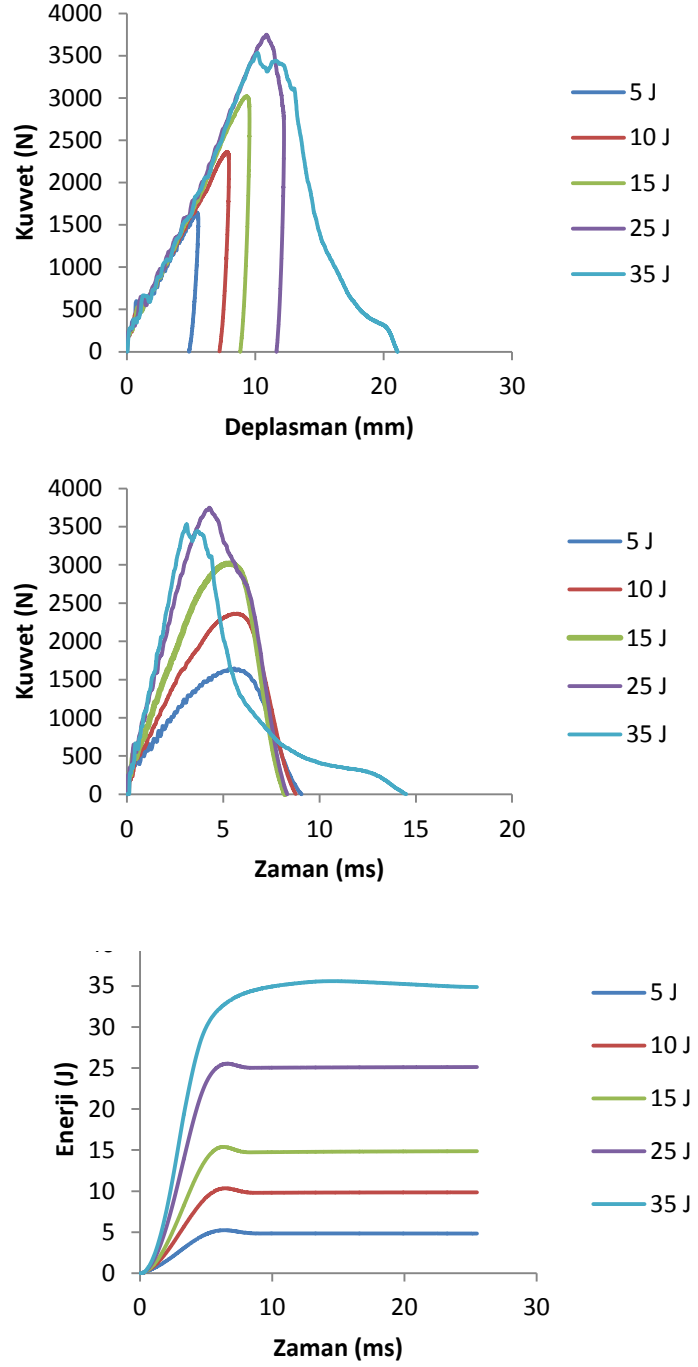
Şekil 4.21. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının 60 J'lük darbe enerjisine karşılık elde edilen, kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının üst, alt ve kesit resimleri



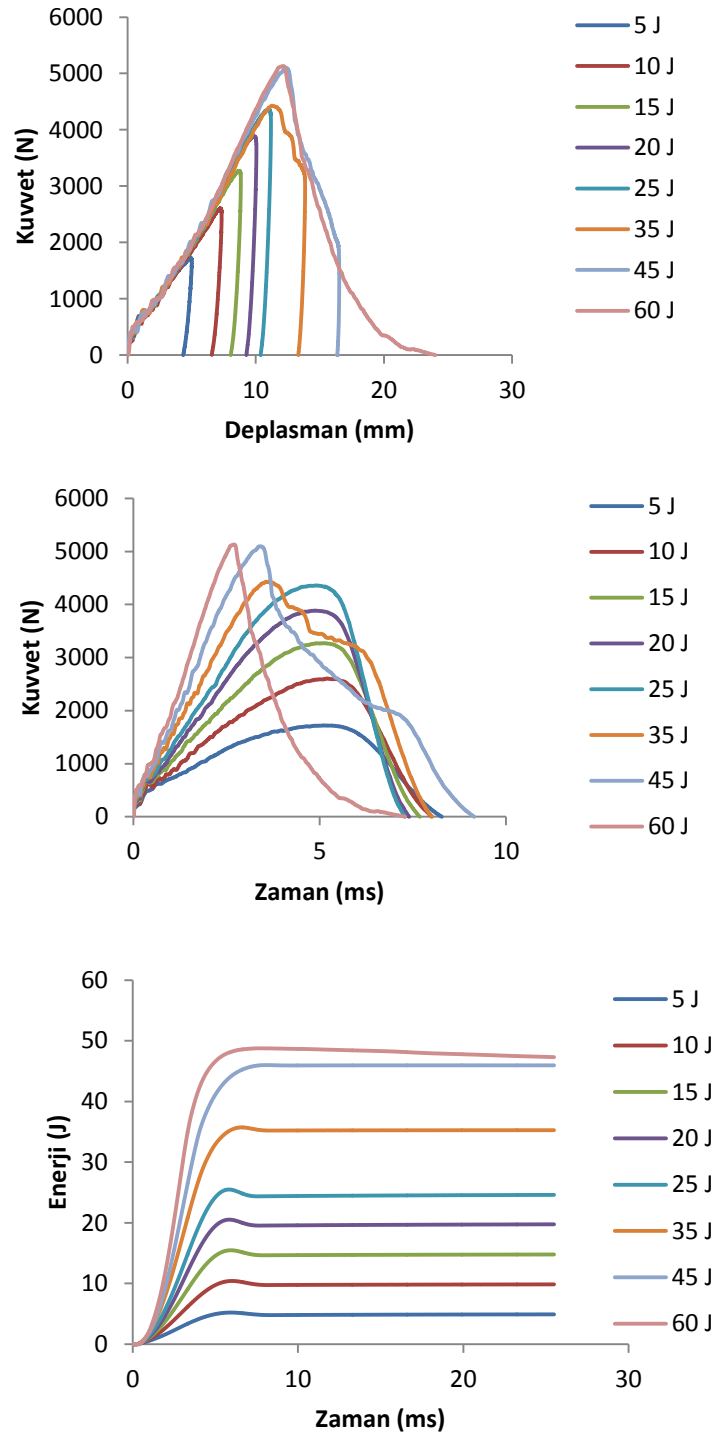
Şekil 4.22. Levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri



Şekil 4.23. Levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri



Şekil 4.24. Levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki Kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri



Şekil 4.25. Levha kalınlığı 1,2 mm olan sandviç yapının tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri

Şekil 4.2’de alt ve üst levha kalınlığı 0,5 mm olan numunede 5 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1380,46 N’luk maksimum kuvvet 6,7 ms’de oluşurken toplam deney süresi 11,63 ms olarak gerçekleşmiştir. Yani şekil değişiminin tamamı için geçen süre 11,63 ms’dir. Numunenin üst ve alt resimlerinden görüldüğü gibi, kuvvet-zaman eğrisi bir dağ andırdığı için geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak kuvvet-deplasman eğrisi kapalı eğri formunu oluşturmuştur. Numune üzerinde darbe sırasında geri dönüş olduğu için darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden daha fazladır. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen hasar görmüş, alt levhada ise çok az deformasyon meydana gelmiştir.

Şekil 4.2’de t_{pmax} maksimum kuvvetin oluştuğu zamanı, t_{max} toplam deformasyon için geçen süreyi, δ_{pmax} maksimum çökme miktarını, δ_{max} ise numune üzerindeki kalıcı deplasmanı göstermektedir. Yine E_i darbe enerjisini, E_a absorbe edilen enerjiyi, E_s ise geri sıçrama enerjisini göstermektedir.

Şekilden de görüldüğü gibi darbe enerjisi uygulanan enerjiden biraz daha fazladır. Bunun sebebi darbe cihazının malzeme yüksekliğini hesaba katmayıp referans olarak malzeme yüzeyini almasıdır (Darbe enerjisine levhanın şekil değişimi için harcanan enerji de dahil ediliyor).

Şekilden görüldüğü gibi geri dönüş durumunda sıçrama enerjisi darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki farktan bulunabilir.

Şekil 4.3’te alt ve üst levha kalınlığı 0,5 mm olan numunede 10 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1284,09 N’luk maksimum kuvvet 3,68 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin verilen üst ve alt

resimlerinden görüldüğü üzere bu enerji değerinde numunede nüfuziyet olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen alt levha ise kısmen hasar görmüştür. Kuvvet-deplasman eğrisinde görüldüğü gibi bu numunede darbe sonrası nüfuziyeti temsil kapalı bir eğri meydana gelmiştir. Çünkü maksimum çökmeden sonra geri dönüşü temsil eden bir kısım mevcut değildir. Yani bu durumda maksimum çökme kalıcı deformasyona eşit olmaktadır. Darbe enerjisi absorbe edilen enerjiye eşittir. Nüfuziyet durumunda vurucunun numuneye saplanması suretiyle hızının sıfıra düştüğü anda numunede meydana gelen çökme maksimum değerdedir.

Bu enerji seviyesinde kuvvet-deplasman eğrisinde de görüldüğü gibi kalıcı deformasyon maksimum çökme miktarına eşit olmaktadır. Enerji-zaman grafiğinde de bir önceki paragrafta da bahsedildiği gibi darbe enerjisi uygulanan enerjiden biraz fazladır ve numunede nüfuziyet meydana geldiği için geri sıçrama enerjisi sıfırdır.

Şekil 4.4'te alt ve üst levha kalınlığı 0,5 mm olan numunede 15 J'lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1398,8 N'lük maksimum kuvvet 3,07 ms'de gerçekleşmiştir. Darbe sonrası üst, alt ve kesit resimlerinde de görüldüğü üzere delip geçme olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve yine kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha, çekirdek ve alt levha tamamen hasar görmüştür. Kuvvet-deplasman eğrisinde de görüldüğü gibi bu durumda açık eğri olarak ifade edilen bir durum söz konusudur. Delip geçme durumunda numune enerjinin tamamını sönmüleyemediği için darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden fazladır. Bu nedenle enerji-zaman diyagramında eğri absorbe edilen maksimum enerjiyi gösterip daha sonra sabit kalmıştır. Ayrıca kuvvet-deplasman grafiğinde görüldüğü gibi üst levha delindikten sonra çekirdek kısmına karşılık gelen enerjide bir miktar düşme olmakta alt levhaya gelindiğinde ise enerjide yine artış olmaktadır.

Şekil 4.22’de alt ve üst levha kalınlığı 0,5 mm olan sandviç yapıya ait olan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri 5 J, 10 J, 15 J değerleri için bir arada gösterilmiştir.

Çizelge 4.1’den de görüldüğü gibi darbe enerjisi arttıkça malzemede oluşan maksimum kuvvet genel olarak artmaktadır. Enerji arttıkça t_{pmax} azalır, t_{max} artar. Yani enerjinin artışına paralel olarak geri dönüşü temsil eden süre (deformasyonu temsil eden süre) artar.

Şekil 4.5’de alt ve üst levha kalınlığı 0,7 mm olan numunede 5 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1434,3 N’luk maksimum kuvvet 5,69 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimlerinden ayrıca kuvvet-zaman eğrisinden görüldüğü gibi numunede geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Numunede geri dönüş olduğu için darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden daha fazladır. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen hasar görmüş, alt levhada ise çok az deformasyon meydana gelmiştir. Kuvvet-deplasman eğrisinden görüldüğü gibi eğri kapalı eğri formundadır.

Şekil 4.6’da alt ve üst levha kalınlığı 0,7 mm olan numunede 10 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1972,9 N’luk maksimum kuvvet 5,22 ms’de gerçekleşmiştir. Burada da yine 5J enerjide olduğu gibi numune üzerinde geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Numunede geri dönüş olduğu için darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden daha fazladır. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen hasar görmüş, alt levhadaki deformasyon enerji artışına bağlı olarak biraz daha artmış ve çekirdek daha fazla hasara uğramıştır. Kuvvet-deplasman eğrisinden görüldüğü gibi eğri yine kapalı eğri formundadır.

Şekil 4.7’de alt ve üst levha kalınlığı 0,7 mm olan numunede 15 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 2063,6 N’luk maksimum kuvvet 4,2 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimlerinden de görüldüğü üzere nüfuziyet olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen alt levha kısmen hasar görmüştür. Bu durumda darbe enerjisi absorbe edilen enerjiye eşittir. Nüfuziyet durumunda vurucunun numuneye saplanması suretiyle hızının sıfıra düştüğü anda numunede meydana gelen çökme maksimum değerdedir. Kuvvet-deplasman eğrilerinden görüldüğü gibi eğri nüfuziyet durumundaki kapalı eğri formundadır.

Şekil 4.8’de alt ve üst levha kalınlığı 0,7 mm olan numunede 20 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 2052,27 N’luk maksimum kuvvet 3,2 ms’de gerçekleşmiştir. Bu enerji seviyesinde darbe sonrası üst ve alt resimlerinden de görüldüğü gibi delip geçme olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha, çekirdek ve alt levha tamamen hasar görmüştür. Delip geçme durumunda vurucu numuneye çarptıktan sonra sahip olduğu enerjinin tamamını sönmüleyemediği için (darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden fazladır) numuneyi delip ve hareketine devam etmiştir. Kuvvet-deplasman eğrisinden görüldüğü gibi eğri açık eğri formundadır.

Şekil 4.23’de alt ve üst levha kalınlığı 0,7 mm olan sandviç yapıya ait olan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri 5 J, 10 J, 15 J, 20 J değerleri için bir arada gösterilmiştir.

Çizelge 4.1’den de görüldüğü gibi 0,7 mm alt ve üst yüzey levhaya sahip sandviç malzemede darbe enerjisi arttıkça malzemede oluşan maksimum kuvvet artmaktadır. Buna bağlı olarak temas süresi de artmaktadır.

Şekil 4.9’da alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan numunede 5 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 1645,5 N’luk maksimum kuvvet 5,56 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimlerinden de görüldüğü gibi numunede geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ayrıca kuvvet-deplasman eğrisi kapalı eğri formunu almıştır. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdekte belirli bir miktar deformasyon oluşmuş, alt levhada ise hiç deformasyon meydana gelmemiştir.

Şekil 4.10’da alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan numunede 10 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 2362,6 N’luk maksimum kuvvet 5,72 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimlerinden de görüleceği gibi numunede geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen hasar görmüş, alt levhada ise çok az bir deformasyon meydana geldiği görülmüştür. Numunenin kuvvet-deplasman eğrisinden görüldüğü gibi eğri kapalı eğri formunu alır.

Şekil 4.11’de alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan numunede 15 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 3017,4 N’luk maksimum kuvvet 5,24 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin darbe sonrası üst ve alt resimleri ile kuvvet-zaman eğrisine bakıldığında numunede geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen hasar görmüş alt levhada ise darbe enerjisindeki artışa bağlı olarak daha fazla deformasyon meydana gelmiştir. Yine şekilde görüldüğü gibi kuvvet-deplasman eğrisi kapalı eğri formundadır.

Şekil 4.12’de alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan numunede 25 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 3747,3 N’luk maksimum kuvvet 4,28 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimleri ile kuvvet-zaman eğrisinden görüldüğü gibi numunede darbe sonrası geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş üst levha ve çekirdek tamamen deforme olmuş, alt levhada ise deformasyon artmıştır.

Şekil 4.13’de alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan numunede 35 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 3530,5 N’luk maksimum kuvvet 3,1 ms’de gerçekleşmiştir. Numunenin üst ve alt resimlerinden de görüldüğü üzere numunede nüfuziyet olarak adlandırılan davranış meydana gelmiş ve kesit resminde de görüldüğü gibi üst, alt levha ve çekirdek tamamen hasara uğramıştır. Kuvvet-deplasman eğrisinde görüldüğü gibi bu numune için eğri açık eğri olarak adlandırılan bir forma sahip olmaktadır. Bu durumda darbe enerjisi absorbe edilen enerjiye eşittir. Nüfuziyet durumunda vurucunun numuneye saplanması suretiyle hızının sıfıra düştüğü anda numunede meydana gelen çökme maksimum değerdedir.

Şekil 4.24’de alt ve üst levha kalınlığı 1 mm olan sandviç yapıya ait olan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri 5 J, 10 J, 15 J, 25 J, 35 J değerleri için bir arada gösterilmiştir.

Alt ve üst levha kalınlığı 1,2 mm olan numuneler için Şekil 4.14’de 5 J’lük, Şekil 4.15’de 10 J’lük, Şekil 4.16’da 15 J’lük, Şekil 4.17’de 20 J’lük ve Şekil 4.18’de 25 J’lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunelerde 5 J’de 1722,1 N’luk maksimum kuvvet 5,12 ms’de, 10 J’ de 2605,1 N’luk maksimum kuvvet 5,21 ms’de, 15 J’de 3272,5 N’luk maksimum kuvvet 5,1 ms’de, 20

J'de 3886,2 N'luk maksimum kuvvet 4,87 ms'de ve 25 J'de 4359,6 N'luk maksimum kuvvet 4,92 ms'de gerçekleşmiştir. Numunelerin üst ve alt resimlerindeki görünüşler ayrıca her bir numuneye ait kuvvet-zaman eğrisi bir dağı andırdığı için bu numunelerde geri dönüş olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Numunelerde geri dönüş olduğu için darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden daha fazladır. Kesit resimlerinden de görüldüğü gibi üst levha tüm enerji seviyelerinde deformasyona uğramış, çekirdek 5 ve 10 J'lük darbe enerji sonrasında kısmen, 15, 20 ve 25 J'lük darbe enerji sonrasında tamamen hasar görmüştür. Alt levhada ise 5 ve 10 J'lük darbe enerji sonrasında hiç deformasyon oluşmazken, 15, 20 ve 25 J'lük darbe enerji sonrasında enerji seviyesi ile doğru orantılı olarak deformasyon miktarı artmıştır. Kuvvet-deplasman eğrilerinden görüldüğü gibi bu numunelere ait eğriler kapalı eğri formundadır.

Yine alt ve üst levha kalınlığı 1.2 mm olan numuneler için Şekil 4.19'de 35 J'lük ve Şekil 4.20'de 45 J'lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunelerde 35 J'de 4427,7 N'luk maksimum kuvvet 3,57 ms de ve 45 J de 5096,6 N'luk maksimum kuvvet 3,6 ms'de gerçekleşmiştir. Numunelerin üst ve alt resimlerinden de görüldüğü gibi her iki numunede de nüfuziyet olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst levha ve çekirdek tamamen, alt levha kısmen deformasyona uğramıştır. Kuvvet-deplasman eğrisinde görüldüğü gibi bu numunelerde eğriler açık eğri olarak adlandırılan bir forma sahip olmaktadır. Her iki numune içinde darbe enerjisi absorbe edilen enerjiye eşittir.

Şekil 4.21'de alt ve üst levha kalınlığı 1,2 mm olan numunede 60 J'lük darbe enerji sonrası oluşan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri ile sandviç yapının darbe sonrası üst, alt ve kesit resimleri gösterilmiştir. Numunede 5130,6 N'luk maksimum kuvvet 2,7 ms'de gerçekleşmiştir. Numunelerin üst ve alt resimlerinden de görüldüğü gibi numunede delip geçme olarak adlandırılan davranış meydana gelmiştir. Kesit resminde de görüldüğü gibi üst, alt levha ve çekirdek tamamen deformasyona

uğramıştır. Delip geçme durumunda vurucu numuneye çarptıktan sonra sahip olduğu enerjinin tamamını snmleyemediği için (darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden fazladır) numuneyi delip hareketine devam etmiştir. Kuvvet-deplasman eğrilerinden görüldüğü gibi eğri açık eğri formundadır.

Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi 1,2 mm alt ve st yüzey levhaya sahip sandviç malzemede darbe enerjisi arttıka malzemede oluşan maksimum kuvvet artmaktadır. Buna bağlı olarak temas süresi de artmaktadır.

şekil 4.25'de alt ve st yüzey levhası 1,2 mm olan sandviç yapıya ait olan kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri 5 J, 10 J, 15 J, 20 J, 25 J, 35 J, 45 J, 60 J değerleri için bir arada gösterilmiştir.

5. SONUÇ

- Aynı levha kalınlığında enerji miktarı arttıkça alt ve üst yüzey levhada oluşan deformasyon miktarı artmaktadır.
- Aynı levha kalınlığında enerji miktarı arttıkça temas kuvveti ve maksimum temas süresi artmaktadır.
- Aynı levha kalınlığında darbe enerjisindeki artışa bağlı olarak, geri dönme, nüfuziyet ve delip geçme davranışları görülmektedir.
- Aynı enerji seviyelerinde levha kalınlığı arttıkça enerji-zaman, grafikleri farklılık göstermektedir. Örneğin 10 J darbe enerjisi için 0,5 mm lik numunede nüfuziyet varken, diğer levha kalınlıklarında hep geri dönüş söz konusudur. 15 J darbe enerjisi için 0,5 mm lik numunede delip geçme durumu söz konusu iken, 0,7 mm lik numunede nüfuziyet, 1 ve 1,2 mm levha kalınlıklarında geri dönüş söz konusudur. Çünkü kalınlık arttıkça numune daha az çökecektir. (Yani daha az deformasyona uğrayacaktır.)
- Aynı enerji seviyelerinde levha kalınlığındaki artışa bağlı olarak eğriler kapalı formundan açık eğri formunu alırlar.
- Aynı enerji seviyelerinde levha kalınlığı arttıkça temas kuvveti artmakta, darbe süresi ise azalmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aydıncak, I., Investigaton of design and analyses principles of honeycomb structures, (Yüksek Lisans Tezi), METU, Ankara, (2007).
- Akbulut, Kompozit Malzemeler Ders Notları, (2008).
- Bitzer, T.N., Honeycomb Technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing. Chapman & Hall. (1997).
- Buitrago, B.L., Santiuste, C., Saez, S., Barbero, E., Navarro, C., Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite Structures*, 92, 2090-2096, (2010).
- Bolat FÇ., Bal peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi, (Yüksek Lisans Tezi), AU (2011).
- Ercan, H., Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi, (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- Eren, Y., Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi, (2007).
- Foo, C.C., Seah, L.K., Chai, G.B., Low velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels, *Composite Structures*, 85, 20-28, (2008).
- Griskevicius, P., Zeleniakiene, D., Leisis, V., Ostrowski, M., Experimental and numerical study of impact energy absorption of safety important honeycomb core sandwich structures, *Materials Science*, 16,2, 119-123, (2010).
- Hazizan, MA., Cantvell, W.J., The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure, *Composites: Part B*, 34, 679-687, (2003).
- Herup EJ., Palazotto, A.N., Low velocity impact damage initiation in graphite/epoxy, nomex honeycomb- sandwich plates, *Composite Science and Technology*, 57, 1581-1598, (1997).
- Kara M., Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı (2007).
- Meo, M., Vignjeviç, R., Marengo, G., The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading, *International Journal of Mechanical Science*, 47,1301-1325, (2005).
- Palazotto, A.N., Herup, E.J., Gummadi, L.N.B., Finite element anlysis of low-velocity impact on composite sandwich plates, *Composite Structures*, 49, 209-227, (2000).
- Park, J.H., Ha, SK., Kang, K.W., Kim, C.W., Kim, H., Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact, *Journal of Materials Processing Technology*, 201, , 425-430, (2008).
- Qiao, P., Yang, M., Impact analysis of fiber reinforced polymer honeycomb composite sandwich beams, *Composites. Part B*, 38, 739-750, (2007).
- Simonetta, B., Giuseppe, F., Crash analysis of an impact attenuator for racing car in sandwich material, Report: F2008-SC-016.

Şakar, G.,Yaman, M. ve Temiz, Ş., Bal peteği sandviç malzemelerin dinamik davranışlarının incelenmesi (2010).
T.H.Y-Uçak Bakım Başkanlığı.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Erzurum'da tamamladı. 1995 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksekokulu Elektrik programından mezun olarak Elektrik Teknikeri unvanını aldı. 1996 yılında Atatürk Üniversitesinde pedagojik formasyon eğitimi aldı. 2001 yılında da 2001 Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olarak Makina Mühendisi unvanını aldı.