



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAL PETEĞİ YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ NANO PARÇACIK TAKVİYELİ YAPIŞTIRICI KULLANILARAK DENEYSEL VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Harun AKKUŞ

DOKTORA TEZİ

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Aralık-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BAL PETEĞİ YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ NANO PARÇACIK TAKVİYELİ YAPIŞTIRICI KULLANILARAK DENEYSEL VE TEORİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Harun AKKUŞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
İkinci Danışman: Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2016, 119 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Mustafa YAŞAR
Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK
Doç. Dr. Recai KUŞ
Yrd. Doç. Dr. Levent UĞUR

Bu çalışmada, dört farklı hücre genişlikleri (6,78-10,39-14,17-17,32 mm), iki farklı hücre yüksekliklerinde (10-30 mm) çekirdek ve iki farklı yapıştırıcı (saf epoksi-%1 MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotube) takviyeli epoksi) ile alüminyum bal peteği yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen bal peteği yapıların mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM standartlarına uygun numuneler hazırlanarak basma, darbe, üç nokta eğme ve soyma deneyleri yapılmıştır. Deney sonucu bal peteği yapıların göstermiş oldukları mukavemet değerleri ölçülmüş ve yapılarda meydana gelen hasarlar gözlemlenmiştir. Deney şartları ve elde edilen mukavemet değerleri göz önünde bulundurularak ANSYS Workbench 17 programı ile sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. ANSYS programı ile oluşturulan sonlu elemanlar modelinin deney sonuçları ile paralellik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) sonuçları basma, darbe, üç nokta eğme modelleri için yaklaşık %15 fark ile deney sonuçlarına yaklaşmıştır. Çalışmamızda özgün yön olarak epoksi içerisine nano parçacık takviyesi yaparak bilinen bir yöntemin yeni bir alana uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi, MWCNT, alüminyum bal peteği, basma, düşük hız darbe, üç nokta eğme, soyma, SEA.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIORS OF HONEYCOMB STRUCTURES BY USING NANO PARTICLE REINFORCED ADHESIVE

Harun AKKUS

Selcuk University
Institute of Science and Technology
Mechanical Education Department

Advisor: Prof. Dr. Hayrettin DUZCUKOGLU
Second Advisor: Assoc. Prof. Dr. Omer Sinan SAHIN

2016, 119 Pages

Jury
Advisor: Prof. Dr. Hayrettin DUZCUKOGLU
Prof. Dr. Mustafa YASAR
Assoc. Prof. Dr. Ilhan ASILTURK
Assoc. Prof. Dr. Recai KUS
Assit. Prof. Dr. Levent UĞUR

In this study, four different cell width (6,78-10,39-14,17-17,32 mm) at two different cell height (10-30 mm) core and two different adhesives (pure epoxy-1% MWCNT (Multi Wall Carbon Nanotube) reinforced epoxy) and production of aluminum honeycomb structures. In order to determine the mechanical properties of the honeycomb structures produced, samples were prepared in accordance with ASTM standards and compression, impact, three point bending and peeling experiments were carried out. The endurance values of the honeycomb structures shown in the experiment were measured and damage to the structures was observed. ANSYS Workbench 17 program was used to create a finite element model (FEM) considering the experimental conditions and the obtained strength values. It was concluded that the finite element model created with ANSYS program is in parallel with the experimental results. The FEM results approximated the experimental results with about 15% difference for the impression, impact, three point bend models. In our work, the application of a known method to a new field has been realized by making nano particle reinforcement into epoxy as the original direction.

Keywords: Epoxy, MWCNT, aluminum honeycomb, compressive, low velocity impact, three-point bending, peeling, FEM.

ÖNSÖZ

Bal peteği yapılar hafiflik, yüksek "eğme rijitliği/ağırlık" oranı, dayanıklılık, enerji absorbe gibi özelliklerin önemli olduğu yerlerde (demiryolu, otomotiv, uçak sanayi gibi) kullanılır. Geniş üretim sürecine sahip olması nedeniyle bal peteği yapıların mekanik davranışlarının belirlenmesi kullanılabilirliğini arttırmak için önemlidir. Bal peteklerinin özelliklerini belirlemek için darbe, eğme, soyma, çekme, basma gibi birçok test yapılmaktadır. Bu testler ile en uygun bal peteği tasarımı belirlenmeye ve bal peteği yapıların diğer mekanik özelliklerinin de arttırılması amaçlanmaktadır. Daha fazla numune için deney yapmak maliyet ve zaman alıcı olduğu için bilgisayar ile modelleme, matematiksel modelleme gibi yöntemler kullanılarak tahmin programı oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu doğrultuda bu çalışmada epoksi ve %1MWCNT takviyeli yapıştırıcı kullanılarak farklı hücre yüksekliği ve farklı hücre genişliğinde üretilen alüminyum bal peteği yapıların mekanik özellikleri deneysel ve SEA modelleri ile araştırılmıştır. Çalışmamız giriş, kaynak araştırması, materyal yöntem, araştırma sonuçları, tartışma ve öneriler kısmından oluşmaktadır.

Teknolojik gelişmelerin ışığında hızla gelişen ve büyüyen kompozit malzeme teknolojisine fayda sağlaması amacıyla yaptığım bu çalışmanın planlanması, deneysel ve sonlu elemanlar çalışmaları sırasında sağladığı araştırma olanakları, rehberlik ve yardımlarıyla kesintisiz çalışma fırsatı verdiği için öncelikle danışman hocalarım Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU ve Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e, Tez İzleme Komitesinde bilgi ve tecrübeleri ile çalışmamıza yön veren Prof. Dr. Mustafa YAŞAR ve Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK'e, deneysel çalışmalar için 13201066, 15401026 ve 15401128 nolu projeler ile destek sağlayan Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü'ne, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi yönetimi ve personeline, 6gen Panel firması yönetimi ve personeline, yapıştırma konularında tecrübe ve bilgilerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet AVCI, Yrd. Doç. Dr. Mürsel EKREM ve Öğr. Gör. Şakir YAZMAN hocalarıma, SEA modellerinde yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Levent UĞUR hocama, maddi ve manevi destekleriyle hayatım boyunca hep yanımda olan sevgili aileme en içten duygularımla teşekkür ederim.

Harun AKKUŞ
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Kompozit Malzemeler 1
1.2. Kompozit Sandviç Yapılar 4
1.3. Yapıştırma İşlemleri 5
1.4. Karbon Nanotüpler 7
1.5. Bal Peteği Yapılar 9
1.5.1. Alt üst katman 10
1.5.2. Çekirdek 10
1.5.3. Yapıştırma 12
1.6. Bal Peteği Yapıların Üretim Yöntemleri 13
1.7. Bal Peteği Yapılarda Zorlama Türleri 14
1.8. Bal Peteği Yapılarda Hasar Oluşum Türleri 16
1.9. Bal Peteği Yapılarda Karşılaşılacak Yükleme Problemleri 16
1.10. Tez Çalışmasının Amacı 17

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **19**

2.1. Basma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması 19
2.2. Darbe Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması 38
2.3. Üç Noktadan Eğme Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması 55
2.4. Soyma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması 59

3. MATERYAL ve YÖNTEM **61**

3.1. Deneysel Çalışma 61
3.1.1. Yapıştırıcının belirlenmesi 61
3.1.2. Deney numunelerinin hazırlanması 63
3.1.3. Basma deneyleri 65
3.1.4. Düşük hız darbe deneyleri 66
3.1.5. Üç noktadan eğme deneyleri 67
3.1.6. Soyma deneyleri 68
3.2. Sonlu Elemanlar Analizleri 69
3.2.1. Basma deneyleri için SEA 70
3.2.2. Düşük hız darbe deneyleri için SEA 72
3.2.3. Üç noktadan eğme deneyleri için SEA 73

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA **76**

4.1. Basma için Elde Edilen Sonuçlar 76
4.2. Düşük Hız Darbe için Elde Edilen Sonuçlar 82

4.3. Üç Noktadan Eğme için Elde Edilen Sonuçlar 90
4.4. Soyma için Elde Edilen Sonuçlar 95

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 97

5.1. Sonuçlar 97
5.2. Öneriler 100

KAYNAKLAR 101

EKLER 106

ÖZGEÇMİŞ 118

1. GİRİŞ

Tabiatta sınırlı sayıda bulunan ana malzemelerin ve bu malzemelerin özelliklerinin teknolojinin gelişmesiyle, yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu yüzden ekonomik, yüksek mukavemetli ve çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar artmıştır. Bu sayede, değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle, elde edilen kompozit malzemeler günümüzde büyük önem kazanmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ile geleneksel malzemeler kullanılarak ihtiyaçlar karşılanamamaktadır. Bu nedenle araştırmalar farklı malzemelerin birleştirilmesi ile meydana getirilen kompozit malzemelere yönelmiş, bu alanda kaydadeğer bir ilerleme kat edilmiştir (Engin, 2011). Son zamanlarda gelişen teknoloji sayesinde sandviç kompozit yapılara olan ilgi artmıştır. Bu tez çalışmasının konusu sandviç kompozit yapıların bir türü olan bal peteği yapılardır.

1.1. Kompozit Malzemeler

Eskiden insanların ihtiyaçlarını ağaç, demir, toprak gibi temel malzemeler karşılayabilir iken günümüzde artan nüfusa, gelişen teknolojiye bağlı olarak kullanıcıların ve üreticilerin malzeme talebi ve malzemeden beklentiler değişmiştir. Günümüzde tasarımlarda hafiflik, enerji absorbsiyonu, ses yalıtımı, ısı yalıtımı, maliyet, ağırlık/mukavemet oranı gibi birçok etken göz önünde bulundurulmaktadır. İnsanoğlu tek bir malzeme kullanmak yerine onları karıştırarak mevcuttaki malzemeden farklı malzemeler elde etmeye çalışmışlardır. Buda kompozit malzemelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Kompozit malzemeler temel olarak farklı şekil ve/veya kimyasal bileşenlerden, birbiri içerisinde kendiliğinden çözünmeyen en az iki yada daha fazla sayıda bileşenden oluşabilen malzemeler şeklinde tanımlanmaktadır. Metalürjik anlamda; birden fazla faz oluşturan bir malzeme olarak tanımlanabilir.

Kompozit malzemelerin ilk kullanım alanları doğada bulunan malzemelere yapılan müdahalelerdir. İlk çağlardan beri insanlar kırılgan malzemelerin içerisine hayvansal yada bitkisel kaynaklı lifleri ilave ederek bu kırılganlık özelliğini yok etmeyi amaçlamışlardı. Örneğin; kerpiç malzeme üretiminde balçık içine katılan saman, sarmaşık dallar gibi lifler ve saplar malzemelerin üretim ve kullanımında mukavemeti arttırmaktadır (Yiğit, 2010).

Kompozit malzeme üretiminde;

1. Basma, çarpma, eğme, çekme dayanımı,
2. Akustik iletkenlik,
3. Ses absorbe,
4. Yorulma mukavemeti,
5. Aşınma direnci,
6. Korozyon direnci,
7. Kırılma tokluğu,
8. Yüksek sıcaklığa dayanım,
9. Isıl direnç veya ısı iletkenliği,
10. Elektrik direnci veya elektrik iletkenliği,
11. Ağırlık,
12. Rijitlik,
13. Estetik gibi özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Yiğit, 2010).

Kompozit malzeme kullanımına karar verilmeden önce aşağıdaki belirtilen avantaj ve dezavantajları bilinmeli ve bu doğrultuda seçim yapılmalıdır. Başlıca avantajları:

1. Titreşimleri emme yeteneğine sahiplerdir.
2. Çok yüksek akma gerilmesine sahiplerdir.
3. Korozif etkiye izin vermezler.
4. Kopma sonucu uzama metal malzemelere oranla fazladır.
5. Yorulma mukavemeti mevcut malzemelere oranla daha fazladır.
6. Çatlak ilerleme hızı azalmıştır.
7. Kalıcı renklendirme sağlanabilmektedir.
8. Isıl dayanım sağlanabilmektedir.
9. Ağırlıkça tasarruf edilmiştir.

Başlıca dezavantajları:

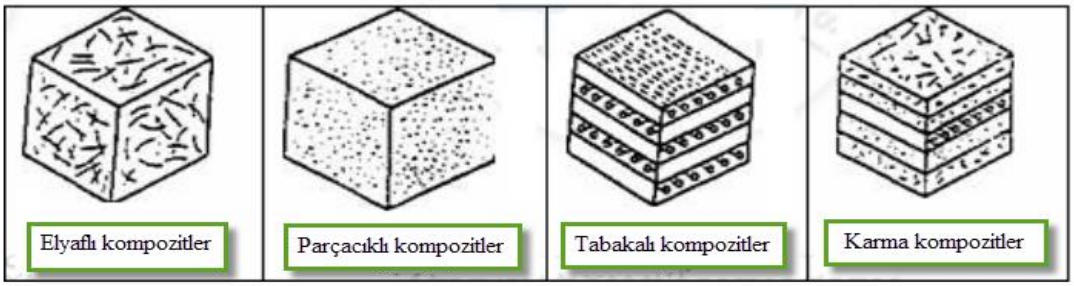
1. Fırınlamadan (pişirmeden) kullanılamazlar. Bazı fırınlama teknikleri uzun süre almaktadır.
2. Kompozit malzemeler yükleme çeşidine göre farklı mekanik özelliklere sahiplerdir. Aynı kompozit malzemeler için kesme, basma, eğme, çekme, soyma mukavemet değerleri farklılık göstermektedir. Elyaf doğrultusundaki elastik modül değeri, elyafa dik doğrultudaki elastik modül değerinden daha fazladır.
3. Üretim yöntemleri pahalı ve zaman alıcıdır.
4. Kompozit malzemelerde üretim sırasında yapı içerisinde kalan hava tanecikleri malzemenin yorulma özelliklerini düşürür.
5. Kompozit yapının kalitesi üretim yöntemlerine bağlıdır, standart bir kalite mevcut değildir.
6. Malzemelerin sınırlı bir raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozit malzemeler soğutma işlemi uygulanarak saklanmaktadır.
7. Kompozitlerin onarılması için temiz ve kuru olması gerekmektedir. Çok iyi bir işçilik ve dikkat gerektirmektedir.
8. Delme ve kesme işlemlerinde liflerde ayrılmaya sebep olmaktadır.
9. Hava kabarcıkları ve nem, kompozit yapının mukavemet özelliklerini düşürür. (Arıcasoy, 2006).

Kompozit malzemeler yukarıda belirtilen özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık, uzay sanayi, roket sanayi, savunma sanayi, demiryolları, deniz araçları, sağlık, spor aletleri, inşaat, enerji, ev dekorasyon gibi birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları (www.google.com.tr)

Şekil 1.2'de elyaflı, parçacıklı, tabakalı ve karma olmak üzere kompozitler dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Çizelge 1.1'de kompozit yapısı tablo olarak verilmiştir.



Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Bolat, 2011)

Çizelge 1.1. Kompozit yapısı (Kaya, 2009)

Matris Malzemeleri	Takviye elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-folyo
	Pudra	Bal peteği
	Yonga	Filaman sarılmış yapılar

1.2. Kompozit Sandviç Yapılar

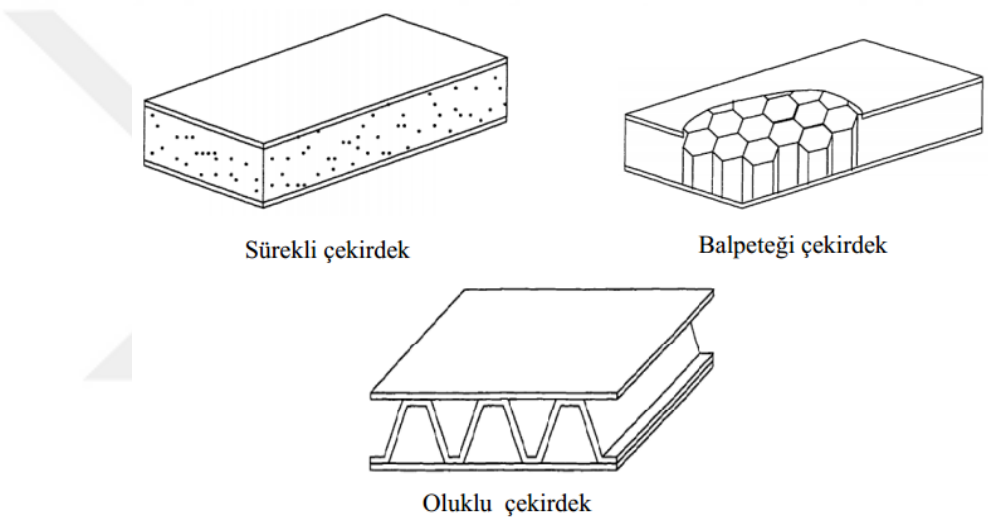
Sandviç yapılar temelde iki sert yüzey arasına yerleştirilmiş hafif çekirdek malzemenin yüzeylere yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmesiyle oluşturulur. Petek ve köpük olmak üzere iki farklı çekirdek yapısı vardır. Sandviç kompozitler içerisinde bulunan malzeme ve özellikleri bakımından çok geniş bir alana sahiptirler.

İlk kompozit sandviç yapı uygulaması havacılık alanında İkinci Dünya Savaşı sırasında Havilland Mosquito adlı ilk askeri uçağın gövde ve kanat yüzeylerinde balsa ağacından ve kontaplak kullanılarak oluşturulmuştur (Aktay ve ark., 2008). Geçmişten günümüze kompozit sandviç yapılara ilgi artmış uzay, inşaat, astronomi, havacılık, denizcilik, spor aletleri, raylı sistemler, mobilya gibi alanlarda kuallnılmıştır ve artan bir ilgiyle kullanılmaya devam etmektedir. Bu alanlarda kullanımının sağlanabilmesi için mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu mekanik özelliklerin istenilen şartları yerine getirebilmesi için çok sayıda çalışma (deneysel ve sayısal analiz) yapılmaktadır.

Sandviç yapılarda alt üst katman ince fakat dayanıklı bir yapıya sahipken, çekirdek malzemenin mukavemet değeri düşük ve hafiftir. Bunun sonucunda oluşturulan yeni malzeme daha mukavemetli ve hafif olmaktadır.

Sandviç yapıların en önemli özelliği eğme rijitliğidir. Çekirdek malzeme kayma gerilmelerine karşı direnç oluştururken ayrıca yüzeyler arasındaki mevcut mesafeyi koruyarak yeni malzemenin rijitliğini arttırmakta ve yüzeylere devamlı destek sağlayarak düzenli rijit bir sandviç yapı oluşturur. Çekirdek, yüzey ile yapıştırma bağlantısı tek bir yapı gibi davranır. Bunun sonucu sandviç yapı yüksek eğme rijitliği ve burulmaya sahip olur (Başdemir ve Elibol, 2012)

Sandviç yapıların üretiminde alt ve üst katman olarak çelik, bakır, alüminyum, fiber, cam takviyeli özel plastikler vb. malzemeler kullanılmaktadır. Çekirdek malzemesi olarak kağıt, alüminyum, pvc köpükler, balsa, tahta vb. kullanılır. Şekil 1.3'te farklı sandviç yapılar görülmektedir.



Şekil 1.3. Farklı çekirdek yapısına sahip sandviç yapılar (Bolat, 2011)

1.3. Yapıştırma İşlemleri

Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi birçok endüstri uygulamasında kullanılmaktadır (Akkus ve ark., 2014). Mevcut birleştirme yöntemlerine göre uygulamada kolaylık, düşük maliyet ve hafiflik unsurlarından dolayı kompozit yapıların birleştirilmesinde yapıştırma işlemlerinin kullanımı artmıştır. Hafiflik, rijitlik ve güvenilirlik unsurlarının önemli olduğu hava taşımacılığında yapıştırma bağlantıları gelişen kimya bilimi sayesinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Yapıştırma işlemleri gerilme yığılmalarını ortadan kaldırdığı, korozif etkinin olmadığı ve yorulma ömrünün uzun olmasından kompozit malzemelerde oluşan hasarların tamirinde de kullanılmaktadır (Turan ve Kaman, 2010).

Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları şunlardır (İşcan ve ark., 2009);

Avantajları:

1. Gerilme dağılımının düzgün olması,
2. Daha fazla yük taşıma alanı sağlaması,
3. İnce ve kalın malzemelerin birleştirilmesine imkan sağlaması,
4. Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesine imkan sağlaması,
5. Tekrarlı yük ve yorulma dayanımının olması,
6. Düzgün yüzeye sahip birleştirme imkanı sağlaması,
7. Dış ortamlara karşı yalıtım imkanı sağlaması,
8. Birçok teknolojik alana rahatlıkla kullanım imkanı sağlaması,
9. Elektirik ve ısı iletkenliğine karşı dayanım göstermesi,
10. Darbe ve oluşan titreşimi absorbe etme yeteneğinin yüksek olması,
11. Dayanım/ağırlık oranının yüksek olması,
12. Mekanik birleştirme yöntemlerine göre kolay uygulanması ve maliyetinin az olması,
13. Sıkı geçme bağlantılarında mukavemetisağlaması,
14. Sert ve yumuşak olan iki ayrı parçanın hasar görmeden birleştirmesine imkan vermesi,
15. Sızdırmazlık özelliği sağlaması,
16. Mevcut birleştirme metotlarına göre hafiflik sağlaması,
17. Kaynak, cıvata, perçin ile birleştirmede meydana gelen yüzey hasarlarının yapıştırıcı ile birleştirmede bulunmaması,
18. Yapışma alanında gerilme dağılımının düzgün olması,
19. Talaşlı üretim maliyetinin azaltılması ve kaliteli ürün oluşturulması.

Dezavantajları:

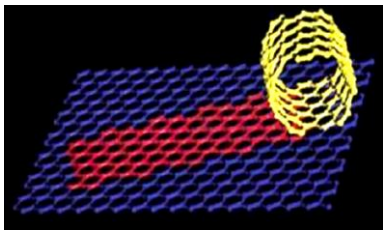
1. Yüzey hazırlıma ve temizliğne ihtiyaç duyulması,
2. Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin sıcaklık ve zamanla değişmesi,
3. Soyma ve darbe dayanımının düşük olması,
4. Yapıştırıcının performansıyla ilgili verilerde eksikliklerin bulunmasu,

5. Yapıştırma bağlantısının ömrünün çalışma koşullarından etkilenmesi,
6. Metal yapıştırıcıların belirli bir geçiş sıcaklığı vardır. Bu sıcaklık değerleri dışında mukavemette azalma meydana gelmesi,

Özel uygulamalar için birçok tipte yapıştırıcıbulunmaktadır. Bu ürünler viskozite, kullanım, sertleşme hızı, sıcaklık aralığı, renk ve hedeflenen dayanıklılık açısından birbirlerinden farklıdır (Anonim).

1.4. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüplerin yapısı, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi tüp haline gelecek şekilde yuvarlatılmış bir grafen levha olarak düşünülebilir. Grafit C-C sp^2 bağlarına sahiptir. Bu bağlar elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Çünkü C-C sp^2 bağlarının boyları daha kısadır. Ancak, grafit tabakaları arasındaki nispeten çok zayıf olan Van Der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına izin verir. Kaynak araştırması yapıldığında literatürde cidar sayılarına göre üç tür karbon nanotüp görülmektedir; tek cidarlı karbon nanotüpler, iki cidarlı karbon nanotüpler ve çok cidarlı karbon nanotüpler. Tek cidarlı karbon nanotüpler, çok cidarlı karbon nanotüplere göre daha dayanıklıdır çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluşur. Çok cidarlı karbon nanotüpler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüpler olup bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimallerinin bulunması dayanımlarını düşürür (Eskizeybek, 2012). Fakat tutunma yüzeylerini arttırır.



Şekil 1.4. Grafit tabakanın yuvarlanması sonucu meydana gelen tek cidarlı karbon nanotüp yapısı (Eskizeybek, 2012)

Karbon nanotüpler dayanıklı, hafif, yüksek termal iletkenliğe ve elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Boy/çap oranları büyük olan nano malzemelerdir. Karbon nanotüplerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır (Eskizeybek, 2012). Çizelge 1.2'de karbon nanotüplerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2. Karbon nanotüplerin önemli özellikleri (Eskizeybek, 2012)

Özellikler	Karbon nanotüpler	Yorumlar
Elastisite modülü	270 GPa-1 TPa	En güçlü çelikten 10-100 kat daha fazladır.
Çekme dayanımı	11-63 GPa	Yüksek dayanımlı çelikten 150-900 kat daha fazladır.
Termal iletkenlik	2000 W/(mK)	Elmastan iki kat fazladır.
Maksimum akım yoğunluğu	10 A/m^2	Bakır tellerden 1000 kat daha fazladır.
Boy/çap oranı	2000	

Günümüzde, karbon nanotüplerin üretimi için en fazla kullanılan yöntemler şunlardır:

1. Ark-deşarj yöntemi
2. Lazer buharlaştırma yöntemi
3. Kimyasal buhar yoğuşturma (CVD) yöntemi

Bu yöntemlerin çoğu vakum altında veya çeşitli gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. İlk büyük miktarda karbon nanotüp üretimi ark deşarj yöntemi ile gerçekleşmiştir. Halen günümüzde karbon nanotüp üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir (Eskizeybek, 2012).

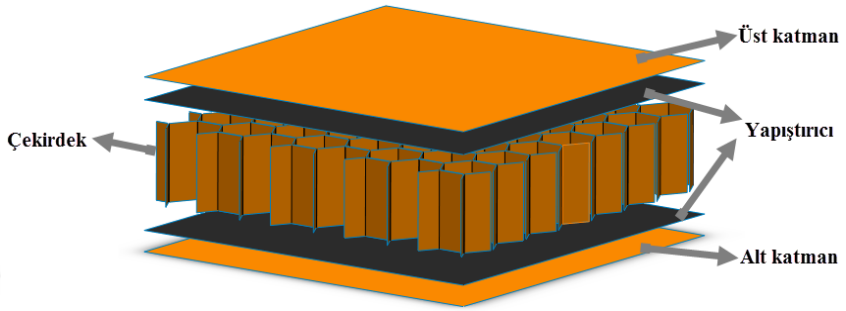
Karbon nanotüplerin polimer matriks içerisinde dağıtılmasında kullanılan çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler Şekil 1.5'te verilmiştir. Bu tez çalışmasında ultrasonikasyon işlemi uygulanmıştır.



Şekil 1.5. Karbon nanotüp yapıların polimer matriks içerisinde dağıtılmasında kullanılan yöntemler (Eskizeybek, 2012)

1.5. Bal Peteği Yapılar

Bal peteği yapılar alt üst katman arasına çekirdek yapının bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Şekil 1.6'da bal peteği yapıyı oluşturan kısımlar görülmektedir.



Şekil 1.6. Bal peteği yapının kısımları

Malzemenin kullanımın gerçekleştirileceği şartlar ve ortam kullanılacak malzemenin sahip olması gereken özellikleri belirleyen ölçütlerdir. Bu ölçütler arasında; yorulma, sürünme, sıcaklık, çevre, korozyon, rijitlik, mukavemet, hafiflik, insan ve maliyet faktörü sayılabilir. Fakat hava araçlarında en önemli husus ağırlık olduğu için bal peteği gibi hafif yapılara ihtiyaç vardır (Pehlivanoğlu, 2005).

Bal peteği yapıların ağırlık/mukavemet oranının önemli olduğu yerlerde (otomotiv, demiryolu, hava arçları gibi) kullanılır.Aynı zamanda çarpışmalarda enerji absorbe etmede kullanılırlar. Örneğin, yüksek hızlı trenlerin ön kısımlarında ve otomobil şaselerinde kullanılan petek yapılar kaza anındaki darbeleri absorbe ederek yaşam hücresi oluşturur yolcuların ve sürücünün hayatını korumada, yaralanmaların azalmasında pasif güvenlik sistemi olarak kazanın olumsuz yönlerini ortadan kaldırmak için kullanılır.

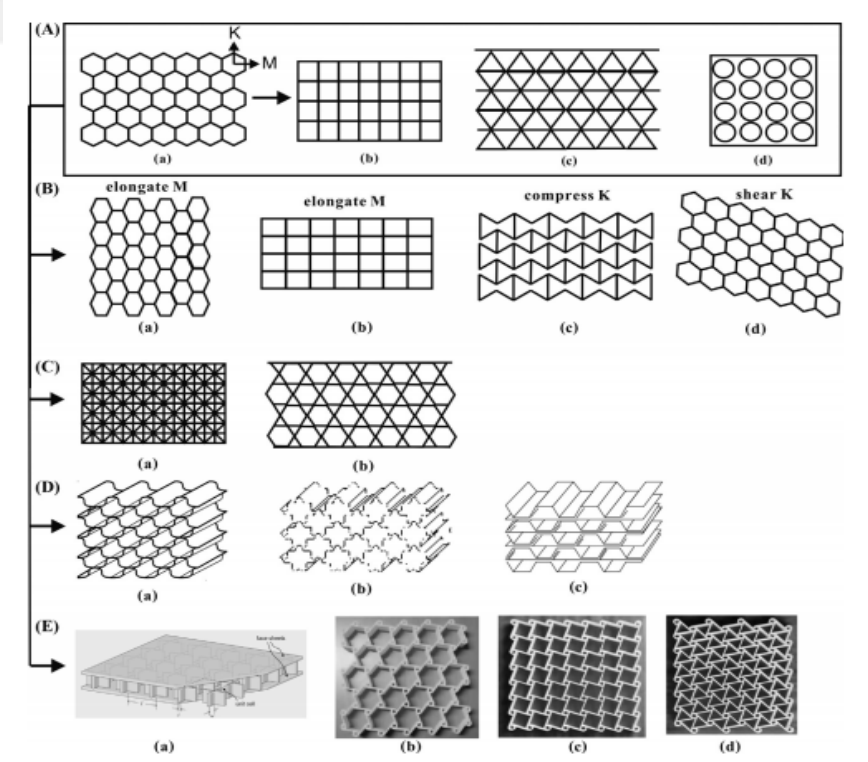
Eksenleri ve açıklıkları her zaman yatay düzendedir. Çekirdeğin altıgen yapı şeklinde olması, en küçük yüzey alanda en geniş kaplamayı elde etmemizi sağlar. Yani yüzey malzemelerle birleştiği noktada plakalara temas yüzeyleri az olmasına karşın kapladığı alan geniştir. Bu sayede altıgen yapı ile az malzeme kullanımı gerçekleştirilirek istenen kafes yapı elde edilir (Yiğit, 2010).

1.5.1. Alt üst katman

Alt ve üst katmanın esas görevi eğme ve kayma direnci sağlamaktır. Alt üst katman alüminyum çelik, paslanmaz çelik, karbon/epoksi, cam elyaf/epoksi, aramid/epoksi, kontrplak, kağıt gibi yapılardan oluşmaktadır. Genelde çalışmalarda alt üst tabaka aynı kullanılmaktadır. Farklı yüzeyler farklı genleşme katsayılarına sahip olacaklarından yapıda yüzey bozulmasına sebep olmaktadır.

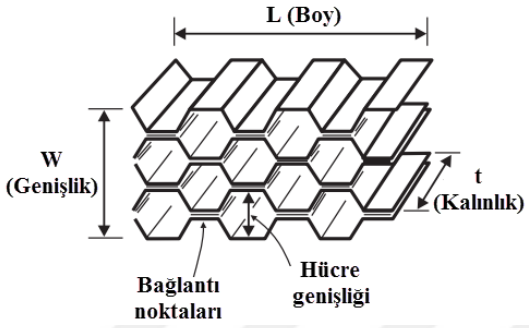
1.5.2. Çekirdek

Günümüzde çok çeşitli çekirdek yapılar kullanılmaktadır. Bal peteği yapılarda esas mekanik davranışı karşılayan kısımdır. Bal peteği yapılardaki çekirdekler farklı yapılarda (altıgen, kare, dikdörtgen, zigzag, elipsoit, yumurta kolisi vb.), içi boşluklu, içi dolu, farklı malzemelerden (köpük, alüminyum, balsa ağacı, bakır, kağıt, epoksi vb.), farklı birleştirme yöntemleriyle (yapıştırma, kalıplama vb.) oluşturulmaktadır. Şekil 1.7'de kullanılan farklı çekirdek yapıları görülmektedir.



Şekil 1.7. Farklı çekirdek yapıları (Zhang ve ark., 2014)

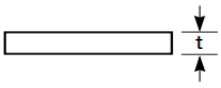
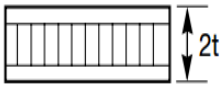
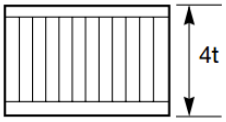
Bal peteği yapılarda çekirdek genelde altıgen olarak üretilir. Şekil 1.8'de altıgen bir çekirdeğin kısımları gösterilmiştir. Bağlantı noktalarından yapıştırıcı vasıtası ile çekirdeği oluşturan parçalar birbirine bağlanmaktadır. Bal peteği sandviç yapıların kullanımı çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeye yapıştırma işleminin mükemmelleşmesiyle yaygın bir hale gelmiştir.



Şekil 1.8. Çekirdek yapı

Bal peteği sandviç yapıların eğme rijitliği, dayanım ve ağırlık değişimleri Çizelge 1.3'te görülmektedir. Alt üst tabaka sabit tutulup çekirdek yüksekliği arttıkça eğme rijitliği ve dayanım artmaktadır. Ağırlık artışındaki çok az değişimin tasarımda hafiflik avantajı sağlayacağı göz ardı edilmemelidir.

Çizelge 1.3. Bal peteği yapıların avantajları (Hexcel, 1999)

	Katı malzeme 	Çekirdek kalınlığı t 	Çekirdek kalınlığı 3t 
Eğme rijitliği	100	700 (7 kat daha rijit)	3700 (37 kat daha rijit)
Basma mukavemeti	100	350 (3,5 kat daha dayanıklı)	925 (9,25 kat daha dayanıklı)
Ağırlık	100	103 (%3 ağırlık artışı)	106 (%6 ağırlık artışı)

Çekirdek yapıda birim alana düşen hücre sayısı, bağlantı kalınlığı arttıkça çekirdek yapıların eğme, basma, soyma, kesme ve darbe kuvvetlerine karşı mukavemetleri artmaktadır. Çekirdek yapıların kesme gerilmelerine karşı davranışları zayıftır. Kesme gerilmesine dayanım hücre sayısı ve alt üst katmanlar değiştirilerek arttırılmaktadır.

1.5.3. Yapıştırma

Bal peteği yapıların birleştirilmesinde genellikle nitril fenolik, vinil fenolik, epoksi, üretan, poliimid ve polyamid yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Bal peteklerinin yapıştırılmasında genellikle epoksi esaslı yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Epoksilerin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Avantajları:

1. Kopma mukavemeti fazladır.
2. Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlar.
3. Aşınma direnci yüksektir.
4. Uçucu değildir ve çalışma ortamında kimyasal yapısı bozulmaz.
5. Kötü çevre koşullarına (ıslanma ve yüksek nem gibi) karşı yüksek direnç sağlarlar.
6. Düşük ve yüksek çalışma sıcaklıklarında sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
7. Sertleşme sırasında kendini çekme yani alan daralması sorunu yoktur (Anonymous).

Dezavantajları:

1. Polyesterle karşılaştırıldığında sertleştiricisi de göz önünde bulundurulduğunda daha pahalıdır.
2. Polyestere oranla daha yüksek viskoziteye sahiptirler.

Epoksi reçineler genel olarak şu amaçlar için kullanılmaktadır (Taşyürek, 2014):

1. Genel amaçlı yapıştırıcılar.
2. Sert köpükler.
3. Koruyucu ve süs kaplaması.
4. Kaymaz kaplamalar, konserve ve fıçı kaplamaları.
5. Petrol sondaj kumlu yüzeyler katılaşabilme.
6. Endüstriyel kaplamalar.

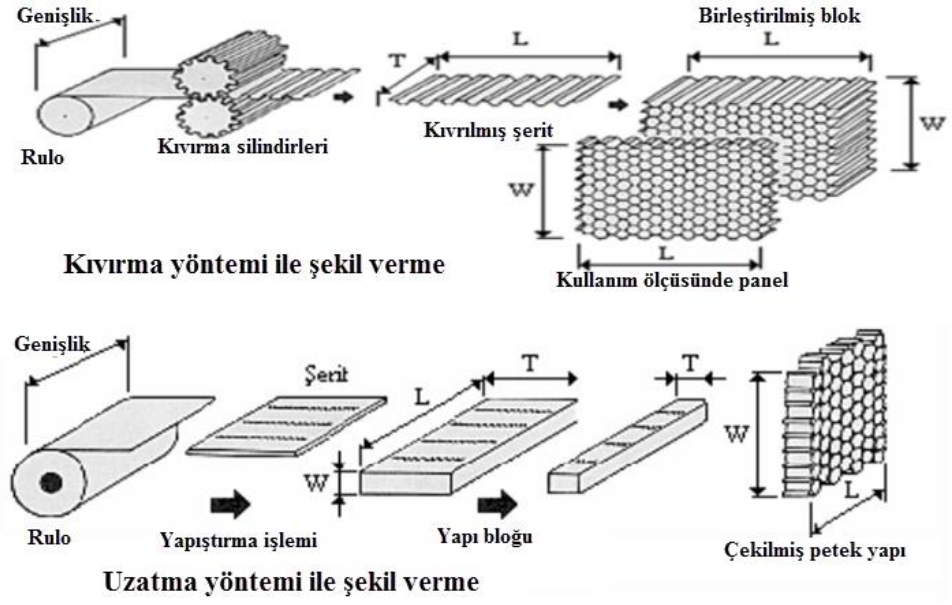
7. Çimento ve harçlarında bağlayıcı olarak.
8. Fiber takviyeli plastikler.

Bal peteği yapılarda çekirdek, yüzey tabakalar arası kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanı kuvvetli bir şekilde bağlayarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Sonuçta yüksek burulma ve eğme dayanımı elde edilmektedir.

Bal peteklerinin birleştirilmesinde yapıştırıcılar seçilirken kullanım, sertleşme hızı, viskozite, renk, sıcaklık aralığı ve hedeflenen dayanıklılık değerleri tercih edilir.

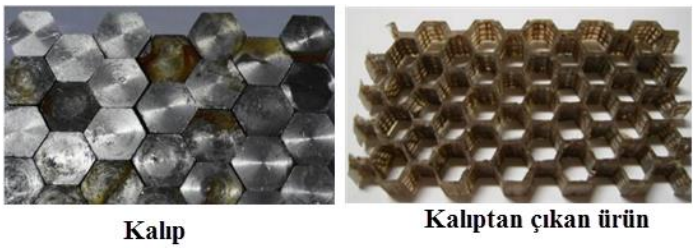
1.6. Bal Peteği Yapıların Üretim Yöntemleri

Metalik esaslı petek yapılar genelde kıvırma veya uzatma yöntemi ile üretilirler. Kıvırma yönteminde şerit levhalar istenilen ölçüde kıvrılarak düğüm noktalarına yapıştırıcı sürülmesi ile üst üste yığılarak oluşturulur. Uzatma yönteminde rulo halindeki çekirdek malzemesinin yapıştırıcı sürülmesi, rulo halindeki malzemenin üst üste dizilmesi ve sonra istenilen kalınlıkta kesilip çekilmesi ile oluşturulmaktadır. Üretim sonunda yapıda kalan yapıştırıcı veya çapak gibi malzemeler kullanılmadan önce temizlenmelidir. Şekil 1.9'da çekirdek üretim yöntemleri görülmektedir. Bu çalışmada uzatma yöntemi ile şekil verilmiş petek yapılar kullanılmıştır.



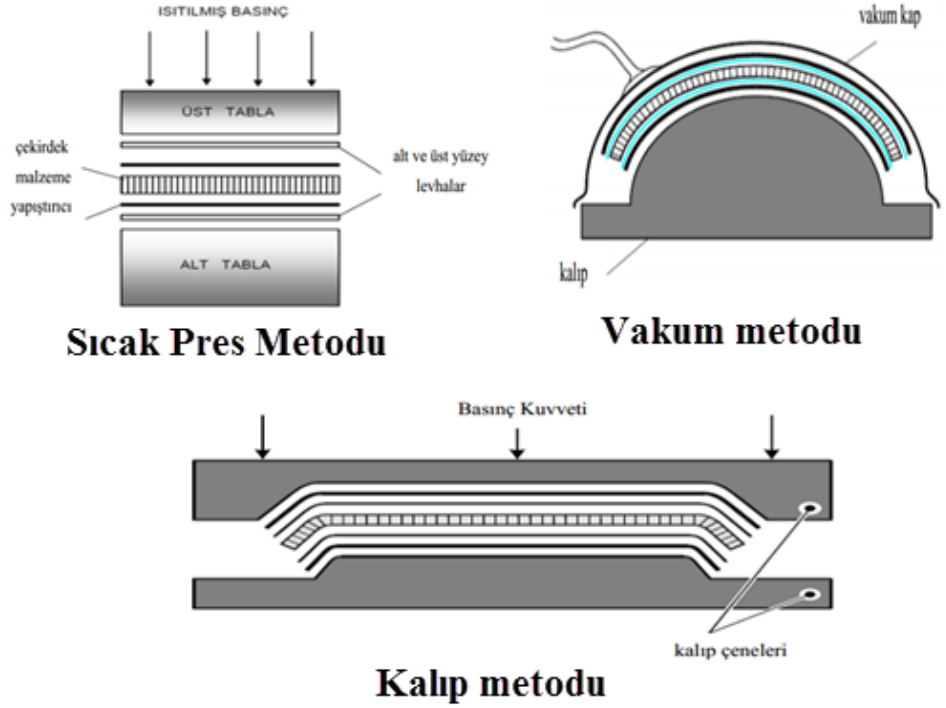
Şekil 1.9. Çekirdek malzemenin üretim yöntemleri (Hexcel, 1999)

Şekil 1.10'da epoksi esaslı çekirdek malzemesinin kalıba dökme yöntemi ile üretimi görülmektedir.



Şekil 1.10. Kalıba dökme yöntemi ile çekirdek üretimi (Stocchi ve ark., 2014)

Bal peteği kompozit malzemeleri üretmede; sıcak pres metodu, vakum metodu ve kalıp yöntemiyle üretim metodu olmak üzere üç üretim yöntemi vardır. Şekil 1.11'de bal peteği üretim yöntemleri görülmektedir.

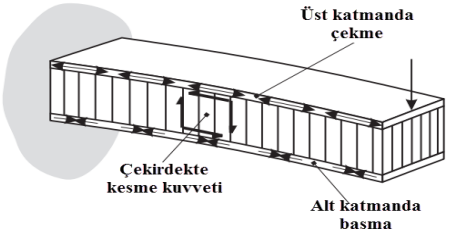


Şekil 1.11. Bal peteği üretim yöntemleri (Hexcel, 2000)

1.7. Bal Peteği Yapılarda Zorlama Türleri

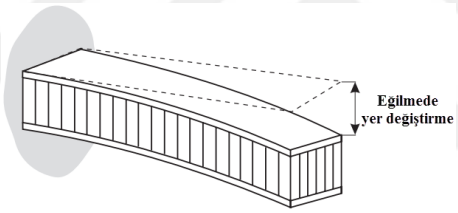
Yükler: Mesnetli bir kirişin serbest ucuna bir kuvvet uyguladığımızı düşünürsek, uygulanan kuvvet, bağlı uçta en yüksek olacak şekilde eğme momenti, kiriş boyunca da kesme kuvveti meydana getirir. Sandviç panellerde bu kuvvetler; üst

tabakada çekme gerilmesi, alt tabakada basma gerilmesi yaratırlar. Petek hücre iki tabaka arasındaki kuvvetleri sönümleyerek ve birbirlerine transfer ederek sandviç kompozit yapının homojen bir şekilde çalışmasını sağlar (Ercan, 2006). Bu model Şekil 1.12'de gösterilmiştir.



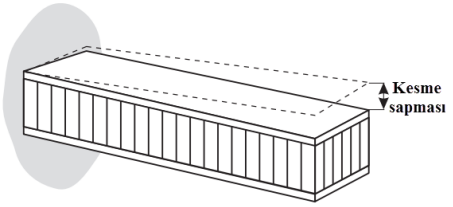
Şekil 1.12. Bal peteği yükleme modeli (Hexcel, 2000)

Yer değiştirme-deformasyon, sehim: Sandviç kompozit yapılardaki deformasyon eğme ve kesme bölümlerinden oluşur. Eğme sapması tabaka yüzeylerinin nispi çekme ve eğme modülüne bağlıdır. Şekil 1.13'te bu zorlama türü görülmektedir.



Şekil 1.13. Yer değiştirme (Hexcel, 2000)

Kesme deformasyonu petek hücrenin kayma modülüne bağlıdır. Kesme sapması Şekil 1.14'te gösterilmiştir.

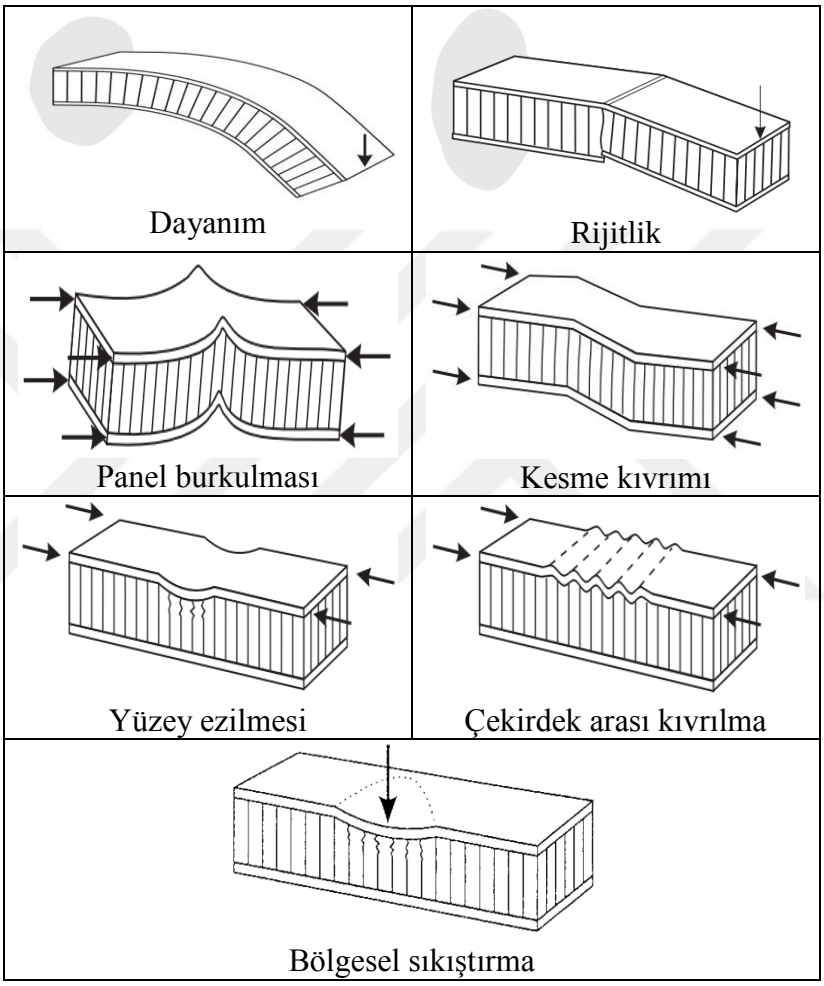


Şekil 1.14. Kesme sapması (Hexcel, 2000)

Bal peteği yapıda meydana gelen toplam deformasyon eğme sapması ile kayma deformasyonunun toplamına eşittir.

1.8. Bal Peteği Yapılarda Hasar Oluşum Türleri

Hexcel firması 2000 yılında yapmış olduğu çalışmada hasar oluşum türlerini yedi sınıfta sınıflandırmıştır (Hexcel, 2000). Şekil 1.15'te bal peteği yapılarda meydana gelen hasar oluşum türleri görülmektedir. Bal peteği yapıların bu hasar türlerine karşı koyabilecek mukavemet gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir.

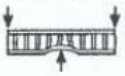


Şekil 1.15. Bal peteği yapılarda meydana gelen hasarlar (Hexcel, 2000)

1.9. Bal Peteği Yapılarda Karşılaşılacak Yükleme Problemleri

Bal peteği yapılarda dizaynı yapılırken yukarıdaki şekilde özetlenen kuvvet yükleme hatalarından oluşabilecek durumlar mutlaka göz önüne alınmalı, sebepler iyice gözden geçirilerek optimum dizayn kriterleri ortaya konmalıdır (Ercan, 2006). Çizelge 1.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 1.4. Bal peteği yapılarda meydana gelebilecek yükleme problemleri özeti (Ercan, 2006)

Durum	Sebepler	Durum	Sebepler
Genel kıvrılma 	Yetersiz panel kalınlığı yetersiz petek kesme mukavemeti	Yüzey hatası  Yüzey çekme hatası  Yüzeyde bası hatası	İlk hata bası ve çeki yüklerinden yüzeylerde, yetersiz panel kalınlığından, yüzey mukavemeti veya tabakalar arası ayrılmadan meydana gelebilir
Kesme ondülasyonu 	Genel kıvrılma sonucu düşük petek kesme modülü veya yapıştırıcı kesme mukavemetinden		
Yüzey kıvrılması Yapıştırma hatası  Petek bası hatası 	Peteğin relative yanal bası mukavemeti, baskı ve ters çekme mukavemetinden dolayı yüzeyler içeri veya dışarı kıvrılabilir	Geçiş kesme yükü hatası 	Yetersiz petek kesme mukavemeti veya panel kalınlığı
		Değişken petek ezilmesi 	Yetersiz petek yanal bası mukavemeti veya aşırı panel defleksiyonu (değişimi)
Hücreler arası kıvrılma yüzeyler petek hücrelerin kıvrılmasından kıvrılır 	İnce yüzey veya geniş petek hücrelerinden oluşabilir. Bu sebeple diğer yakın hücrelerde kıvrıma uğrayabilir.	Bölgesel petek ezilmesi 	Düşük petek bası mukavemeti

1.10. Tez Çalışmasının Amacı

Bal peteği yapıların geniş üretim sürecine sahip olması nedeniyle mekanik özelliklerinin belirlenmesi zordur. Bal peteği yapıların kullanılabilirliğini arttırmak için mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Asadi ve ark., 2007).

Özellikle darbe sonucu ortaya çıkan enerjinin absorbe edilmesi istenilen yüksek mekanik dayanım gerektiren yerlerde petekli kompozit yapılar kullanılır. Sandviç yapıların iç-dış katmanları arasına bu petekli yapılar hafif sistemler elde etmek için konumlandırılır. Tabakalar arasına petekli yapının yerleştirilmesi sonucu mevcut yapının eğme dayanımı ve atalet momentinde arttış meydana gelir. Plakaların birleştirilmesi sonucu oluşturulan petek yapılı hücreler, sandviç yapıların dolgu (iç) malzemesini oluşturur.

Mühendislik yapılarında imalat, montaj ve kullanım sırasında dışarıdan gelecek bir darbeye karşı istenilmeyen sonuçlar meydana gelebilir. Bu istenilmeyen sonuçları ortadan kaldırmak için malzemenin bu tür etkilere karşı davranışının nasıl olacağının belirlenmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilecek darbe deneyleri ile bu davranışlar tahmin edilebilir.

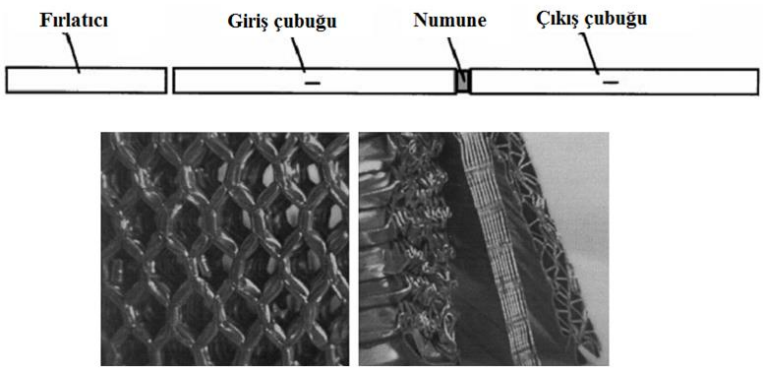
Zhou ve Hill (2009) çalışmalarında bal peteği kompozit yapıların basmaya karşı mukavemetleri iyi olmasına rağmen kesme ve eğmeye karşı dirençlerinin iyi olmadığı hasarların uygulanan yüke bağlı genel olarak yapışma bölgelerinde ayrılma şeklinde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Jhen ve Chang (2009) çalışmalarında etki altında yüzeylerin ayrıldığını gözlemlemişlerdir. Jen ve ark. (2009) çalışmalarında farklı yapıştırıcı kullanılması bal peteği yapıların darbelere karşı dayanımını arttıracağını göstermişlerdir. Son günlerde nano yapıştırıcı uygulamalarda artan bir şekilde kullanılmaktadır ve yapıştırılan yüzeyler arasında iyi bir kenetlenme özelliği göstermektedir (Kaboorani ve Riedl, 2012).

Bal peteğinin kullanım alanlarının geniş olması, avantajları ve literatürde aydınlatılacak birçok noktanın olması bizi bu çalışmaya yöneltmiştir. Nano yapıştırıcılar kompozit malzemelerde farklı alanlarda kullanılmaktadır. Yapmış olduğumuz literatür araştırmasında epoksi yapıştırıcılar genel olarak bal peteği yapıştırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında çalışmamızın özgün yönü olarak epoksi yapıştırıcısına nano parçacık takviyesi yaparak bilinen bir yöntemi yeni bir alana uygulamak tezimizin amacıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

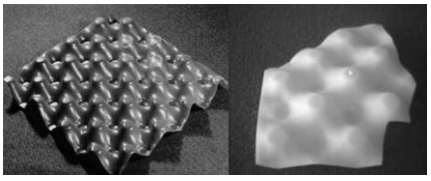
2.1. Basma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması

Zhao ve Gary (1998) yılında yapmış oldukları çalışmalarında araçlarda kullanılan alüminyum bal peteklerinin dinamik ve statik yük altında kırılma davranışını, çarpışma anındaki enerji emme kapasitesini ve hasar mekanizmalarını belirlemek için Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) yöntemi ile deneysel olarak araştırmışlardır. Şekil 2.1'de deney düzeneği ve yapıdaki hasar görülmektedir. Dinamik ve statik yükler altında gerilmelerinin farklı olmasıyla alüminyum folyo peteklerin önemli derecede ezilme direnci olduğu ve araçlarda kullanımının farklı çalışmalarla denenerek kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

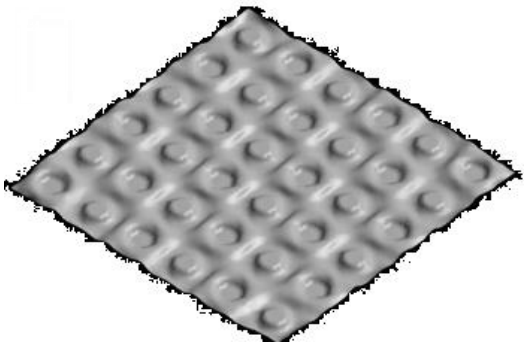


Şekil 2.1. SHPS deney düzeneği ve yapıda meydana gelen hasar (Zhao ve Gary, 1998)

Ashmead ve ark. (2000) çalışmalarında presle şekil verilmiş yumurta kolisi şekline benzer üç numune (çelik, PU ve PP malzeme) ve altıgen (alüminyum) şeklindeki bal peteği yapıların dinamik özelliklerini deneysel ve SEA yöntemi incelemişlerdir. Basma ve darbe deneyi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları yumurta şeklindeki hücre yapıları Şekil 2.2'de görülmektedir. Basma sonucu meydana gelen hasar Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.2. Oluşturulan yumurta şeklindeki petek yapılar (Ashmead ve ark., 2000)



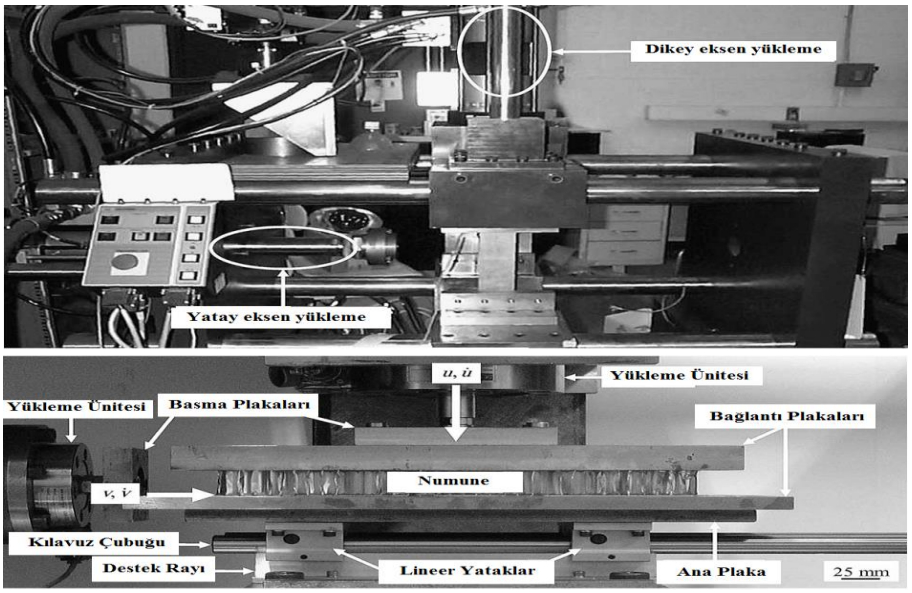
Şekil 2.3. Basma sonucu meydana gelen hasar (Ashmead ve ark., 2000)

Asadi ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmalarında Al-3003 alaşımından yapılmış çekirdek yapılarda düşme sırasında enerji emme kapasiteleri, hasar mekanizmaları ve alüminyum folyoları arasındaki bağı deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Şekil 2.4'te deney düzeneği, yapıda meydana gelen hasar ve sonlu elemanlar yönteminde zamana bağlı hasar şekli verilmiştir. Çalışmada kullanılan petek çekirdek yapının tasarıma uygunluğunu ortaya koymuşlardır.



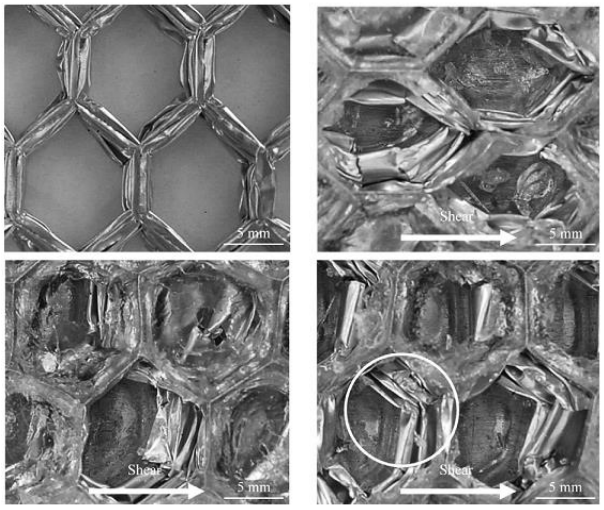
Şekil 2.4. Asadi ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışma

Hong ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmalarında alüminyum 5052-H38 petek numunelerin ezilme davranışlarını yarı-statik deneylerle incelemiştir. Basma ve kesme yüklerinin kontrol edilebileceği bir deney düzeneği oluşturmuşlardır. Şekil 2.5'te çalışmalarında kullandıkları deney düzeneği görülmektedir. Yapıya dikey eksende yapılan yüklemeye yatay eksene göre yaklaşık dokuz kat daha mukavemet gösterdiği sonucuna varmışlardır. Yani bal peteği yapılar basmaya karşı direnç gösterir iken kaymaya karşı daha zayıftır.



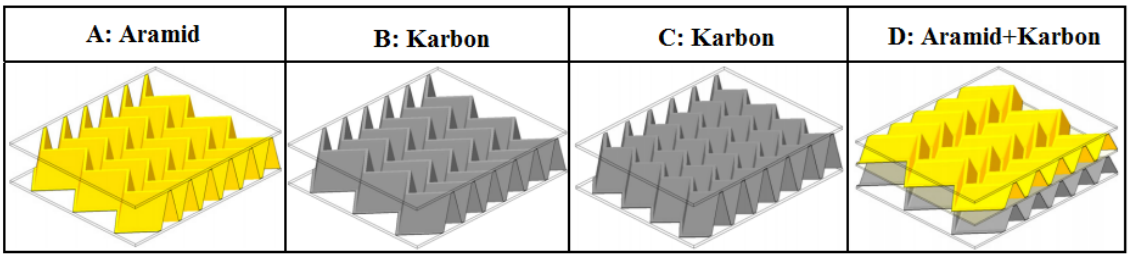
Şekil 2.5. Instron marka çok eksenli test düzeneği (Hong ve ark., 2006)

Hong ve ark. (2008) yapmış oldukları çalışmalarında eğimli yükler altında alüminyum 5052-H38 petek numunelerin basma ve darbe davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde Al-5052 alt üst katmana epoksi ile yapıştırılmış çekirdek ve sade çekirdek olarak iki farklı numune kullanmışlardır. Dinamik ezilme testleri ile çarpma hızı arttıkça, normal gerilmenin arttığı ve kayma gerilmelerinin hemen hemen aynı kaldığı sonucuna varmışlardır. Basınçlı ve eğimli yükler altında petek yapılarda benzer mikroskobik katlama ve kırılma mekanizmaları, yapıştırma işlemli peteklerde farklı yırtılma mekanizmaları gözlemlemişlerdir. Şekil 2.6'da yapıda meydana gelen katlanma, yırtılma ve kaymaları göstermişlerdir.

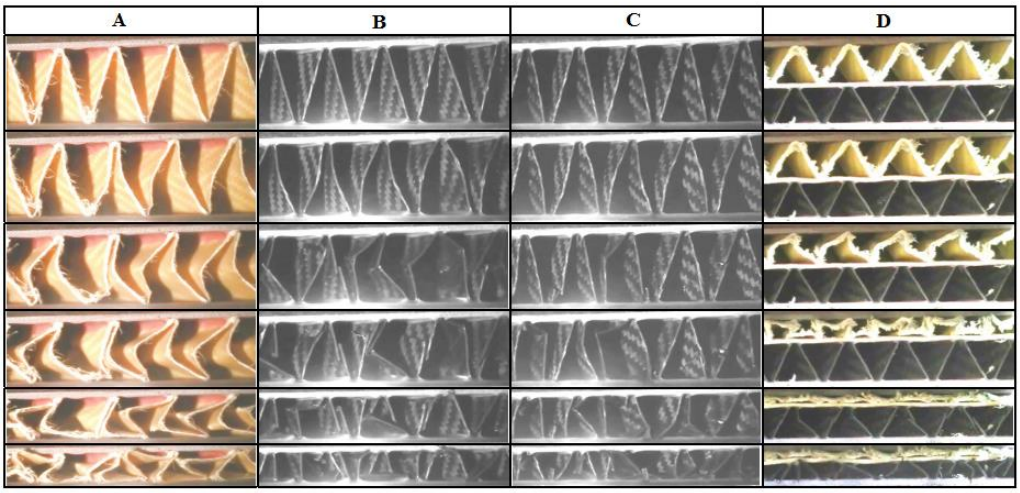


Şekil 2.6. Yapıda meydana gelen katlama, yırtılma ve kayma (Hong ve ark., 2008)

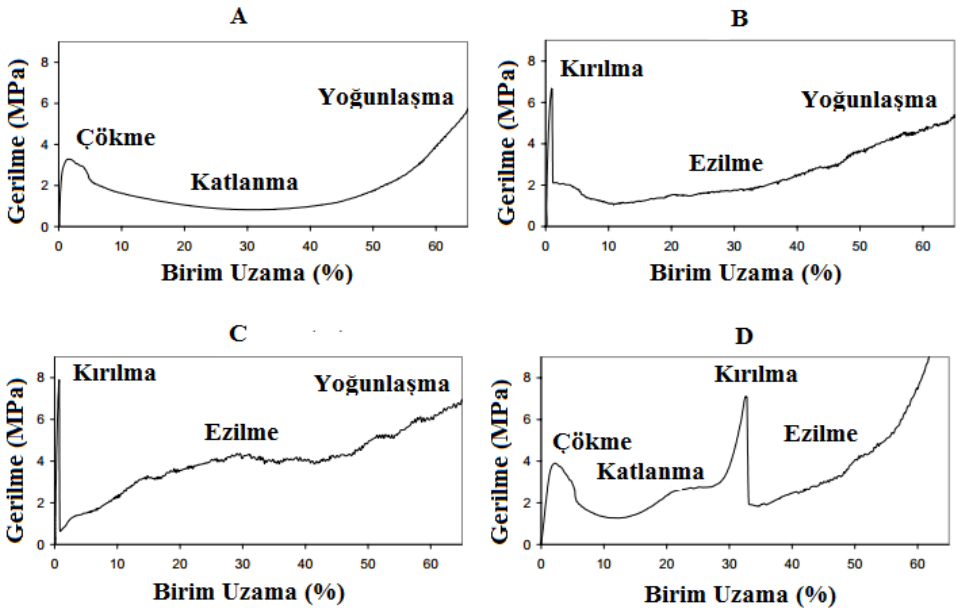
Heimbs ve ark. (2009a) çalışmalarında sandviç peteklerde zigzag diye tabir edilen çekirdek yapıların çekme, açılı çekme, basma ve darbelere karşı göstermiş oldukları mukavemeti deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmanın basma kısmı burada, darbe kısmı ise darbe ile yapılan araştırmalar kısmında verilmiştir. Petek malzemesi olarak dört farklı karbon fiber kullanmışladır. Oluşturdukları petek yapılar Şekil 2.7'de verilmiştir. Basma sonucu yapıda meydana gelen hasar Şekil 2.8'de verilmiştir. Şekil ve elde ettikleri grafiklerden absorbsiyon kapasitesi sırasıyla tip C, D, B ve A olduğu sonucuna varmışlardır. Elde ettikleri grafikler Şekil 2.9'da verilmiştir. Yapılarda farklı diyagram görülmesinin sebebinin fiber yapısından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Yapıya ilave edilen karbon miktarının gerilmelerde değişiklik meydana getirdiğini göstermişlerdir. SEA yöntemi ile elde ettikleri tip D'nin hasar mekanizması Şekil 2.10'da görülmektedir.



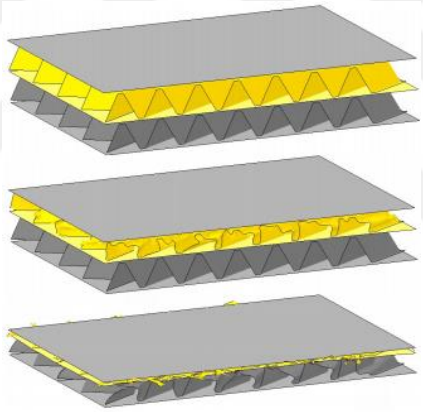
Şekil 2.7. Oluşturdukları petek yapılar (Heimbs ve ark., 2009a)



Şekil 2.8. Basma sonucu meydana gelen şekil değişimi (Heimbs ve ark., 2009a)

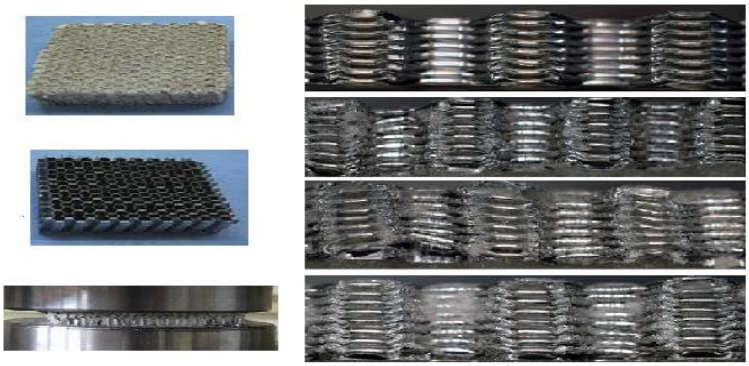


Şekil 2.9. Dört farklı çekirdek tipi için gerilme-gerinim diyagramı (Heimbs ve ark., 2009a)



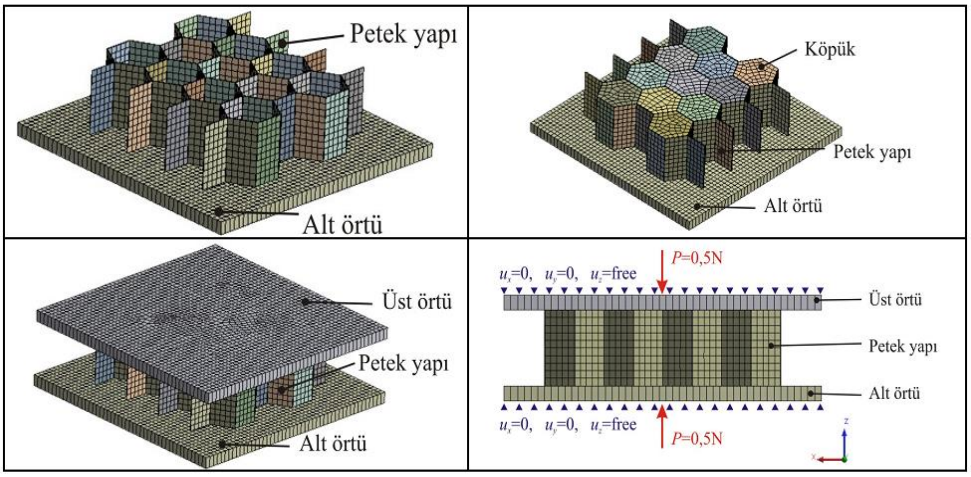
Şekil 2.10. Tip D için SEA yönteminde meydana gelen hasar (Heimbs ve ark., 2009a)

Nia ve Sadeghi (2010) yapmış oldukları çalışmalarında köpük dolgulu altıgen petek panellerin plastik şekil değiştirme davranışlarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Beş farklı sade ve köpük dolgulu alüminyum 5052-H39 petekler statik eksenel basınç yüklemeye maruz bırakmışlardır. Hücre yüksekliği, hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığının ezilme mukavemeti, enerji emme kapasitesi ve kıvrımların dalga boyuna etkilerini araştırmışlardır. Şekil 2.11'de deney numunesi ve katlanma sonucu meydana gelen hasarı gösterilmişlerdir. Deney sonuçlarında köpük dolgusu arttıkça panellerin ortalama ezilme mukavemetleri ve enerji kapasitelerinin %300 arttırdığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.11. Deney numunesi ve hasar (Nia ve Sadeghi, 2010)

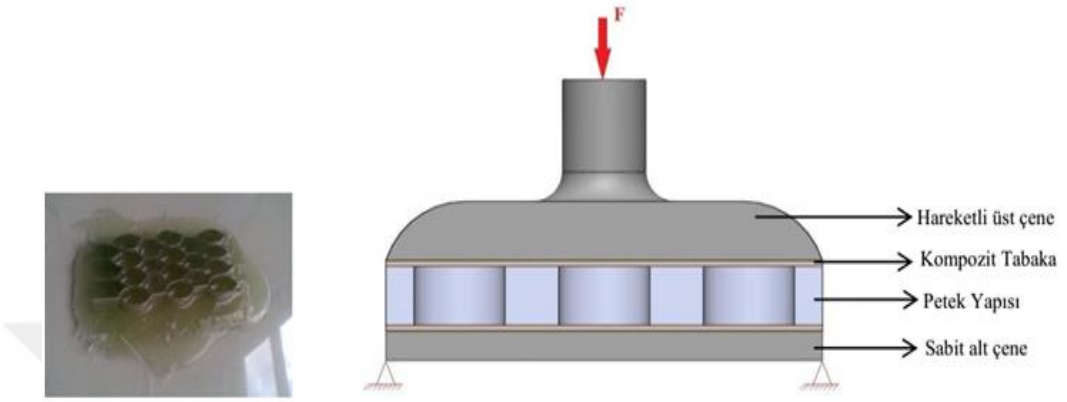
Solmaz ve ark. (2010b) çalışmalarında altıgen bal peteği yapıların petek hücre boşluklarına köpük takviyesinin burkulma yüklerine etkisini sayısal olarak belirlemeye çalışmıştır. Modelledikleri bal peteği sandviç yapılar ve ANSYS programında belirledikleri sınır şartlar Şekil 2.12'de vermişlerdir. Sonuçta hücre boşluklarına köpük ilavesinin, tüm hücre duvarı kalınlıkları ve boyutları için numunelerin kritik burkulma yükünü arttırdığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.12. Köpüksüz ve köpüklü modeller, ağ yapısı, sınır şartları ve yükleme durumları (Solmaz ve ark., 2010b)

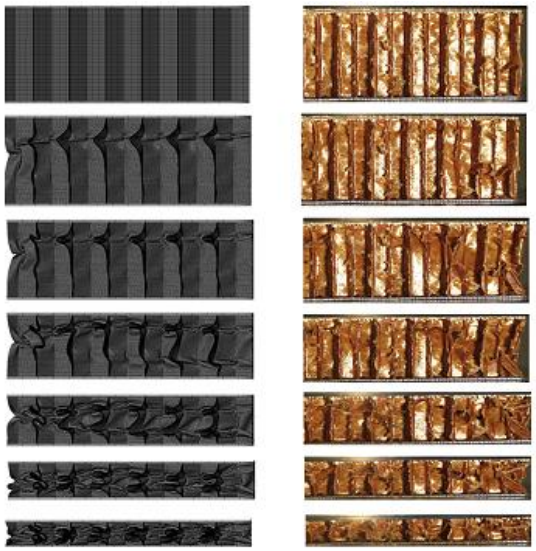
Solmaz ve Topkaya (2012) çalışmalarında elipsoit petek şekline sahip yapıların burkulma yüklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında bakır ve alüminyum olmak üzere iki farklı petek malzemesi ve altı farklı petek boyutu kullanılarak on iki farklı numune hazırlamışlar ve deneysel olarak burkulma yüklerini elde etmişlerdir. ANSYS programı kullanarak her bir numunenin modelini oluşturmuşlar ve sonlu elemanlar yöntemi ile burkulma (Eigen Buckling) analizlerini

yapmışlardır. Şekil 2.13'te alüminyum petek yapının epoksi ile kaplanışı ve SEA için sınır şartları göstermişlerdir. Sonuç olarak bakır hücreli numunelerde kritik burkulma yükü değerlerinin alüminyum hücreye sahip numunelerden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

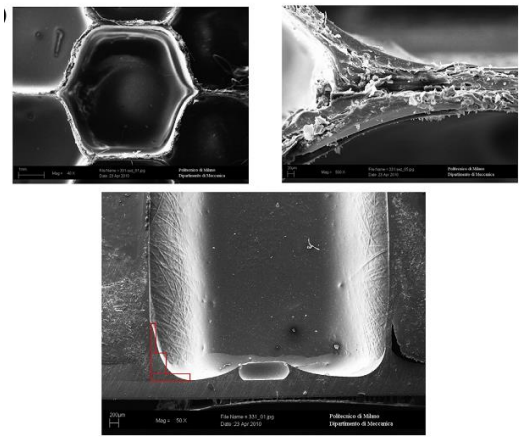


Şekil 2.13. Alüminyum petek yapının kaplanışı ve SEA için sınır şartları (Solmaz ve Topkaya, 2012)

Giglio ve ark. (2012) çalışmalarında Nomex™ çekirdekli bal peteklerinin mekanik özellikleri basma testi ile belirlemiş ve SEA modeli ile modellemişlerdir. Elde etmiş oldukları sonuçların kıyaslamasını yapmışlardır. Şekil 2.14'te deney sonuçları ile SEA sonuçlarının kıyaslanmasını vermişlerdir. SEM görüntülerinden yola çıkarak bal peteği yapıların iç yapısını ve yapışma şekillerini incelemişlerdir. Şekil 2.15'te çekmiş oldukları SEM görüntülerini vermişlerdir.

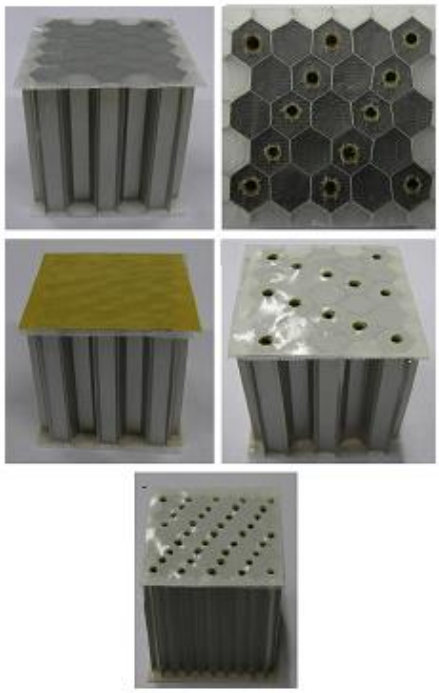


Şekil 2.14. SEA ile deneysel sonuçlar sonucu meydana gelen hasarların karşılaştırılması (Giglio ve ark., 2012)

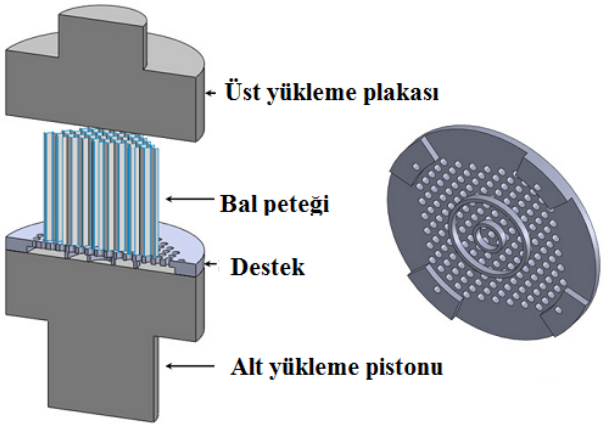


Şekil 2.15. SEM görüntüleri (Giglio ve ark., 2012)

Xu ve ark. (2012)çalışmalarında altıgen çekirdek yapısına sahip fakat alt üst katmanda farklı delik sayısına sahip hava kanallı sandviç bal peteklerinin üretimini ve basma deneyleri sonucu mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Şekil 2.16'da deneylerde kullanılan numuneleri göstermişlerdir. Artan hava kanalları sayesinde içeride sıkışan havanın tahliyesi ile mukavemet artışı sağlamayı amaçlamışlardır. Basma sırasında destekte oluşturulan hava kanalları sayesinde içeride hava birikmesi önlenmiş ve mukavemet değerlerinde artma olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.17'de deney için kullanılan destek plaka göstermişlerdir.

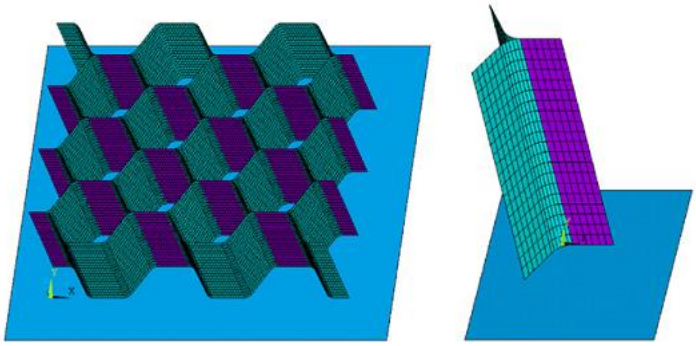


Şekil 2.16. Deneylerde kullanılan farklı petek yapılar (Xu ve ark., 2012)

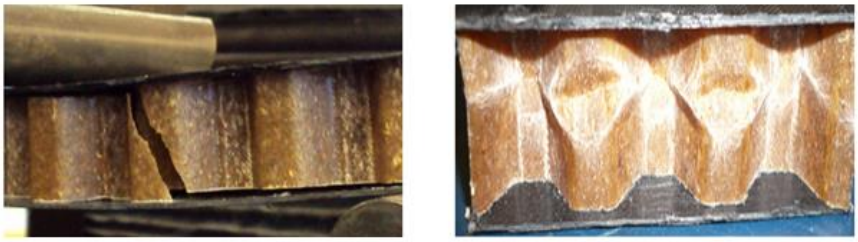


Şekil 2.17. Destek plakası (Xu ve ark., 2012)

Rao ve ark. (2013)çalışmalarında geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmiş petek sandviç panellerin enerji emme özelliklerini deneysel (basma ve eğme deneyleri) ve SEA yöntemi ile araştırmışlardır. Bu çalışmada çekirdek testere tozu polipropilen kompozit olarak üretilmiştir. Deney sonucu kırılmaların genellikle peteklerin kıvrım noktalarında meydana geldiği buda kalıplarda tam bir birleşme olmadığından kaynaklandığı sonucuna varmışladır. Şekil 2.18'de sonlu elemanlar mesh uygulaması ve bir hücre göstermişlerdir. Şekil 2.19'da ise eğme ve basma deneylerinde oluşan hasar örnekleri vermişlerdir. Deney sonuçları ile SEA sonuçları paralellik göstermektedir.

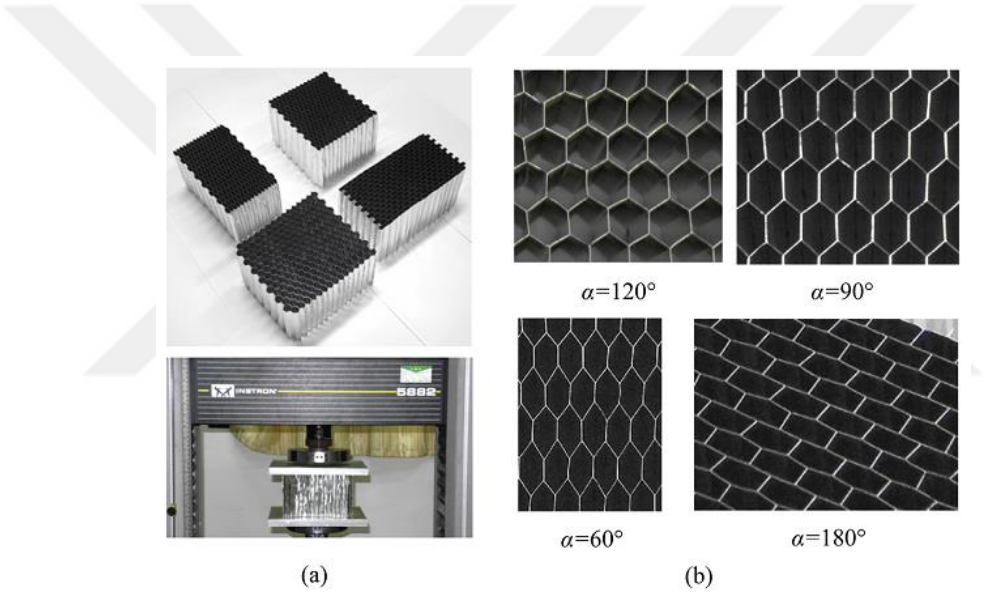


Şekil 2.18. Sonlu elemanlar çalışmasından kesit (Rao ve ark., 2013)



Şekil 2.19. Eğme ve basma sırasında oluşan hasar mekanizması (Rao ve ark., 2013)

Zhang ve ark. (2014) çalışmalarında çeşitli hücre konfigürasyonlarına sahip alüminyum peteklerde hücre sayısının ve merkez açısının düzlem ezilme direncine etkisini basma deneyi ile araştırmışlardır. Şekil 2.20'de üretilen petek numuneleri, test makinesi, numunelerin hücre şekillerini vermişlerdir. Hücre sayısı ve merkez açıdaki azalma bal peteği yapıların mukavemetini %10'dan az etkilediğini gözlemlemişlerdir. SEA yöntemi ile oluşturulan model sayesinde ezilme ve deformasyonları simüle etmişlerdir. Şekil 2.21'de deney ve SEA ile elde edilen deformasyonların karşılaştırılması vermişlerdir. Çift folyo yapıştırılan numunede sayısal ve simülasyon sonuçları deney ve teorik tahminlere uygun çıktığını görmüşlerdir. Düzlem dışı merkez açının bal peteği mukavemeti üzerindeki etkisinin duvar kalınlığından az olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.20. (a) Petek örnekleri ve test makinesi, (b) Numunelerin hücre şekilleri (Zhang ve ark., 2014)

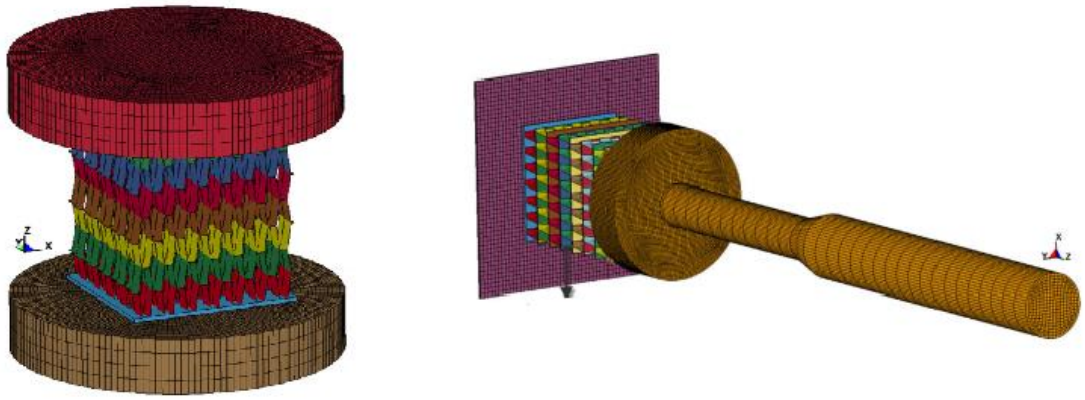


Şekil 2.21. Deformasyon şekilleri (Zhang ve ark., 2014)

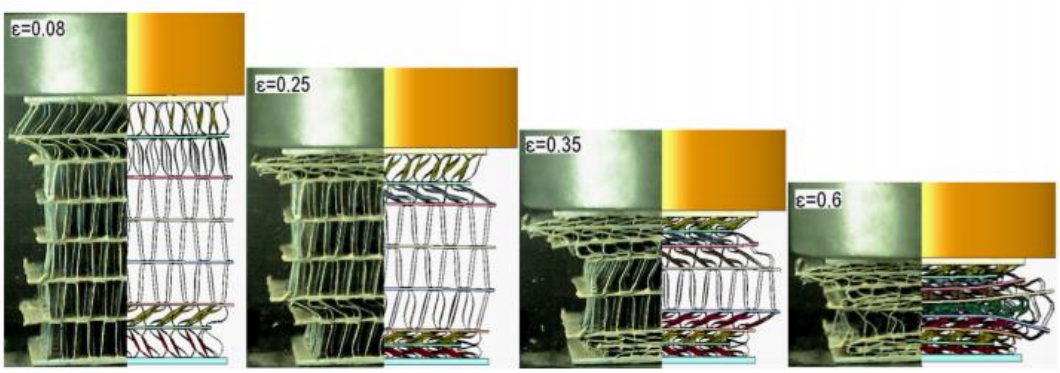
Kılıçaslan ve ark. (2014) çalışmalarında çok katmanlı 1050 H14 trapez alüminyum oluklu çekirdek sandviç yapıların eksenel basma ve yüksek hızlı darbe davranışlarını deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Şekil 2.22'de deneylerde kullandıkları çok katlı bal peteği numuneleri vermişlerdir. Çoklu çekirdek katmanların burkulma gerilmesini azalttığı ve yüzeysel gerilmeleri arttırdığı sonucuna varmışlardır. Şekil 2.23'te oluşturdukları SEA modeli görülmektedir. Deneysel ve SEA ile gerilme-uzama eğrilerinin ve hasar mekanizmalarının birbirleri ile paralel olduklarını görmüşlerdir. Şekil 2.24'te deneysel ve SEA ile oluşan hasarların karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.22. Deneylerde kullanılan çok katlı bal peteği numuneler (Kılıçaslan ve ark., 2014)

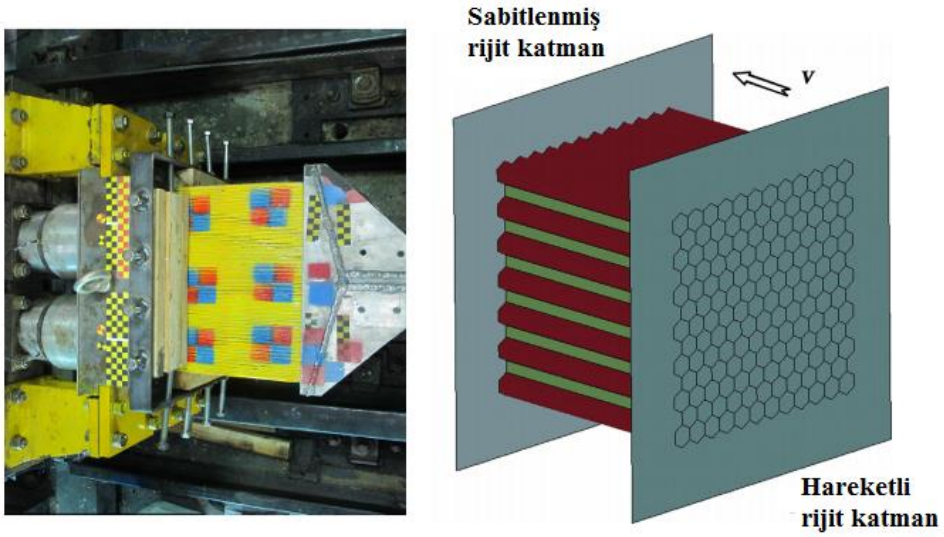


Şekil 2.23. SEA modeli (Kılıçaslan ve ark., 2014)



Şekil 2.24. Deneysel ve SEA ile oluşan hasarların karşılaştırılması (Kılıçaslan ve ark., 2014)

Wang ve ark. (2014) çalışmalarında 20-80 m/s hız aralığında alüminyum petek yapıların yüksek hızlı eksenel çarpışma sonucu enerji absorbe edebilme yeteneğini deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. 30 m/s'den düşük hızlarda darbeye mukavemet artarken, 30 m/s'den yüksek hızlarda mukavemetin azaldığını gözlemlemişlerdir. Şekil 2.25'te deney düzeneği ve oluşturulan SEA modeli görülmektedir. Darbelere mukavemetin azalmasının sebebi petek yapıdaki yapışma, duvar kalınlığı ve hücre ebatlarından olduğu sonucuna varmışlardır. Yüksek hızlara dayanımın artması için bu olumsuzlukların geliştirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.25. Deney düzeneği ve SEA modeli (Wang ve ark., 2014)

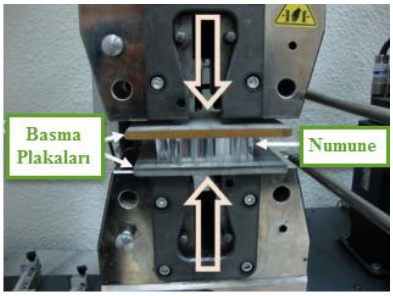
Hou ve ark. (2014) çalışmalarında Kevlar dokuma kumaş/epoksiden kirigami yöntemi ile çekirdek yapıları üretmişlerdir. Şekil 2.26'da ürettikleri çekirdek numuneler ve üretim aşamaları görülmektedir. Üretilen çekirdek numunelere düzlemesine ve kenar bölge yükleme yapılarak (basma ve darbe) mukavemet değerlerini incelemişlerdir.

Yapılarda meydana gelen hasar mekanizmalarının çekirdek katman ayrılmaları ve çekirdek yapışma bölgelerinde ayrılma şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

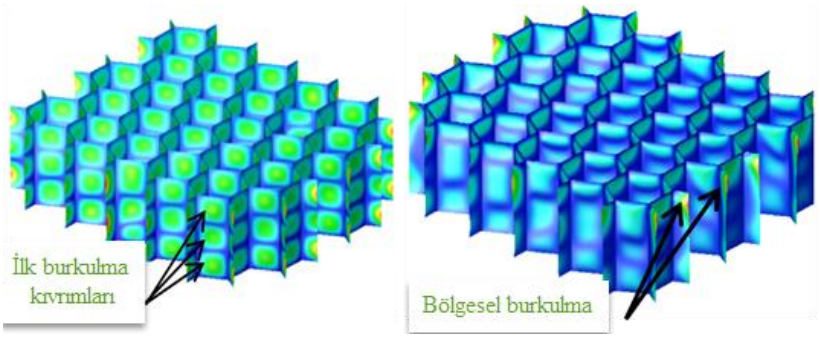


Şekil 2.26. Çekirdek numunelerin üretimi (Hou ve ark., 2014)

Khoshravan ve Pour (2014) çalışmalarında bal peteği çekirdek yapıların hücre ekseni boyunca basmaya karşı göstermiş olduğu mukavemeti deneysel ve SEA yöntemi ile araştırmışlardır. Hücre genişliğindeki azalma ve hücre duvar kalınlığındaki artışın bal peteği yapılarda basma mukavemetini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Şekil 2.27'de numunenin test düzeneğine bağlanması gösterilmiştir. Şekil 2.28'de SEA yöntemi sonucunda yapıda meydana gelen burkulma şekillerini göstermişlerdir. Şekil 2.29'da basma sonucunda çekirdeğin birleşme noktasında meydana gelen hasar görülmektedir. Bu şekilde hücre kalınlığının önemi olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.27. Numunenin deney cihazına bağlanması (Khoshravan ve Pour, 2014)

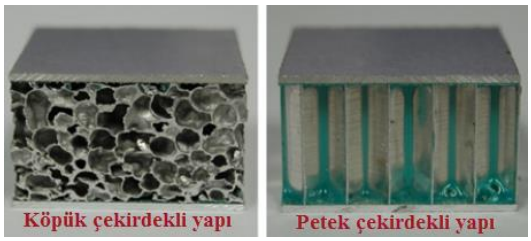


Şekil 2.28. Sonlu elemanlar modeli burkulma şekilleri (Khoshravan ve Pour, 2014)

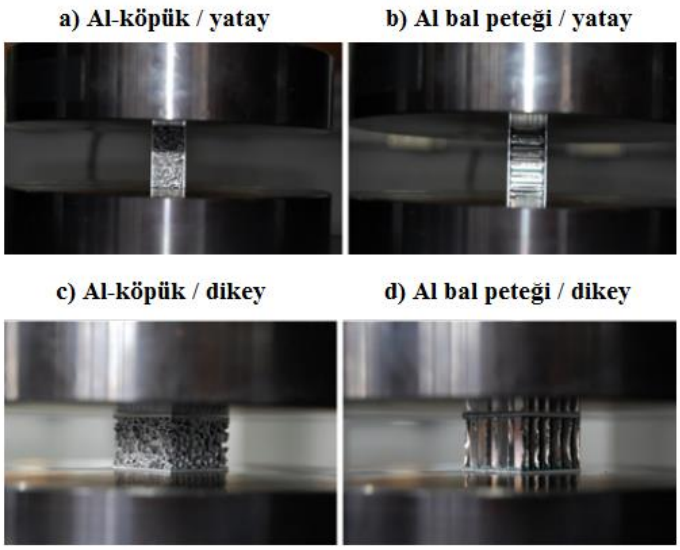


Şekil 2.29. Birleşme noktasında meydana gelen hasar (Khoshravan ve Pour, 2014)

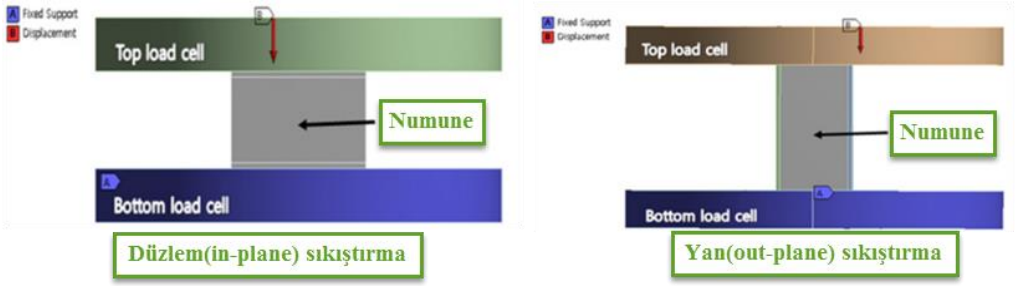
Bang ve Cho (2015) çalışmalarında alüminyum köpük ve petek çekirdekten oluşan sandviç kompozit malzeme üretmişlerdir. Şekil 2.30'da ürettikleri numuneler görülmektedir. Üretilen kompozit malzemelerin mukavemet özellikleri hakkında deneysel (basma)ve SEA yöntemi sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Basma deneylerini üst ve yan taraf olmak üzere gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.31'de deney düzeneğine numunelerin bağlanması görülmektedir. Yük artışı ile burkulmanın arttığını gözlemlemişlerdir. Düzlem (in-plane) sıkıştırma testinde, maksimum yükte alüminyum köpük numunelerin petek sandviç yapıyla benzer şekiller gösterdiğini belirtmişlerdir. Numunelerin özgül ağırlıklarını göz önüne aldıklarında köpük peteklerin mukavemet özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Yan (out-plane) sıkıştırma testinde petek sandviçlerin, köpük sandviç yapılara göre daha yüksek dayanım sergilediklerini gözlemlemişlerdir. Oluşturulan SEA modeli sınır şartları Şekil 2.32'de verilmiştir. Deney sonuçları ve SEA sonuçları elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin paralellik arz ettiğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.30. Üretilen deney numuneleri (Bang ve Cho, 2015)

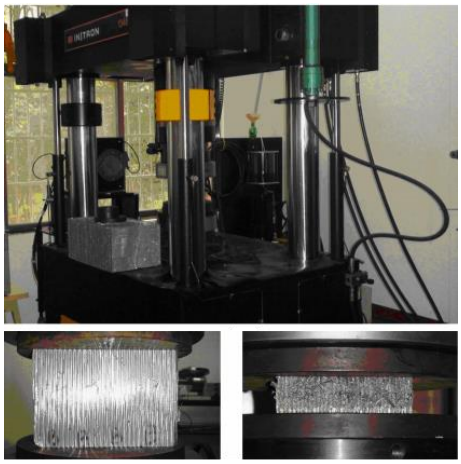


Şekil 2.31. Deney numunelerinin test düzeneğine bağlanması (Bang ve Cho, 2015)



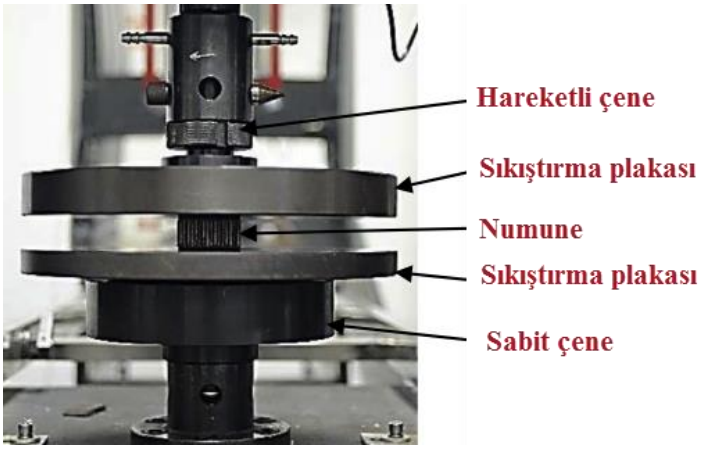
Şekil 2.32. Oluşturulan sınır şartları (Bang ve Cho, 2015)

Xie ve Zhou (2015) çalışmalarında alüminyum çekirdek yapının ezilme davranışını sayısal olarak geliştirmeyi amaçlamışlardır. Deneysel, SEA yöntemi ve polinom yüzey cevap metodu sonuçları arasındaki kıyaslamayı sayısal olarak ortaya koymuşlardır. Enerji absorbe etme yeteneğini uzunluk (l) ve kalınlığa (t) bağlı olarak modellemişlerdir. Sonuçlar t arttıkça l azaldıkça bal peteği yapıların enerji absorbe etme özelliğinin arttığını göstermiştir. Şekil 2.33'te deney düzeneği, numune ve ezilmiş hali görülmektedir.

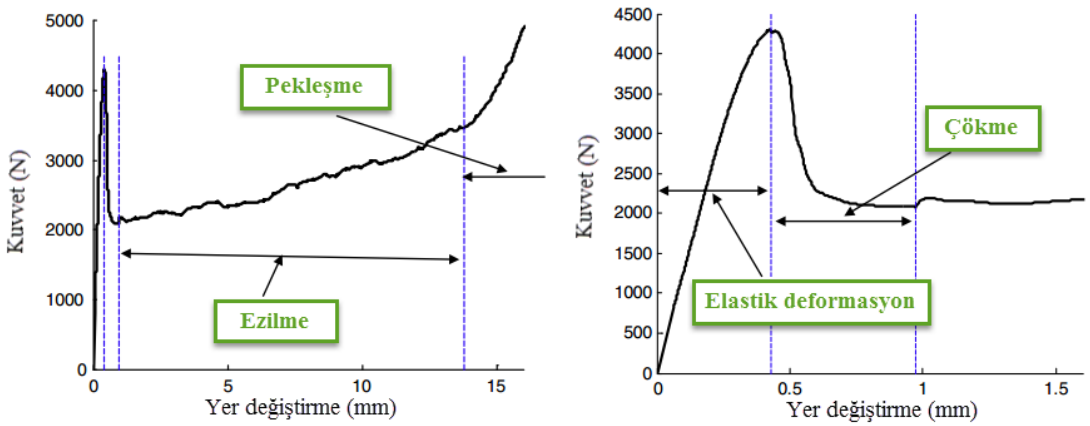


Şekil 2.33. Deney düzeneği, numune ve hasar (Xie ve Zhou, 2015)

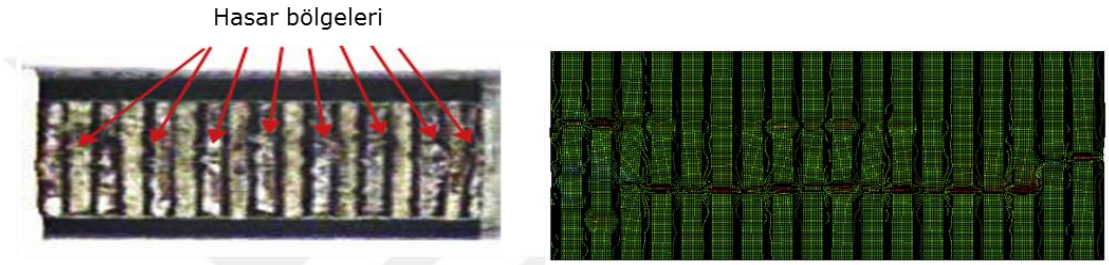
Liu ve ark. (2015a) çalışmalarında altıgen Nomex petek çekirdek yapıların ezilme davranışlarını enine yük altında deneysel (basma ve çekme) ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Şekil 2.34'te deney numunesinin test cihazına bağlantısı verilmiştir. Test sonuçlarında petek yapıda meydana gelen gevrek kırılmanın sebebinin fenolik reçinenin yapısından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 2.35'te gösterilmiştir. Yük ve yer değiştirme eğrilerinde meydana gelen ezilme, çökme, pekleşme ve elastik deformasyon bölgelerini göstermişlerdir. SEA yöntemi ile deneysel sonuçların paralellik gösterdiğini grafiklerle göstermişlerdir. Şekil 2.36'da deney ve SEA sonucu oluşan hasar kıyaslaması verilmiştir. Petek yapısı olarak Şekil 2.37'de hasarları incelediklerinde iç bölgelerde çekirdeklerdeki hasarın ezilme tarzında olduğu fakat dış bölgelerde olan hasarın ayrılma şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir.



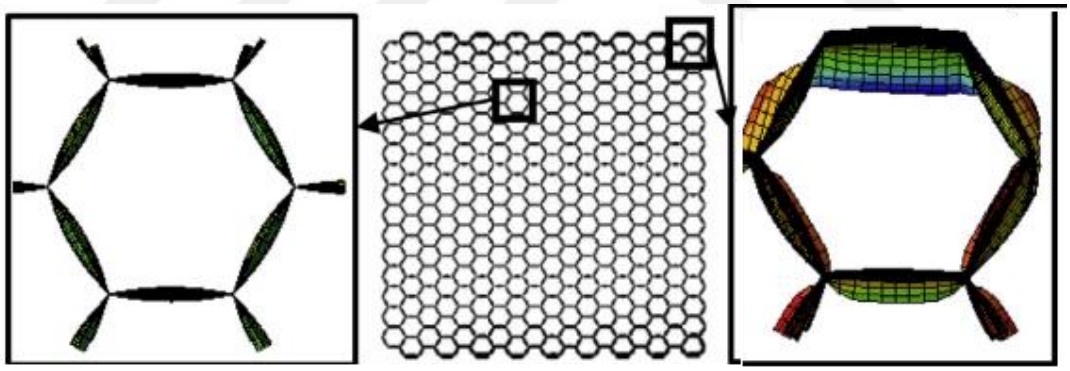
Şekil 2.34. Deney numunesinin test cihazına bağlanması (Liu ve ark., 2015a)



Şekil 2.35. Yük-yer değiştirme eğrileri (Liu ve ark., 2015a)



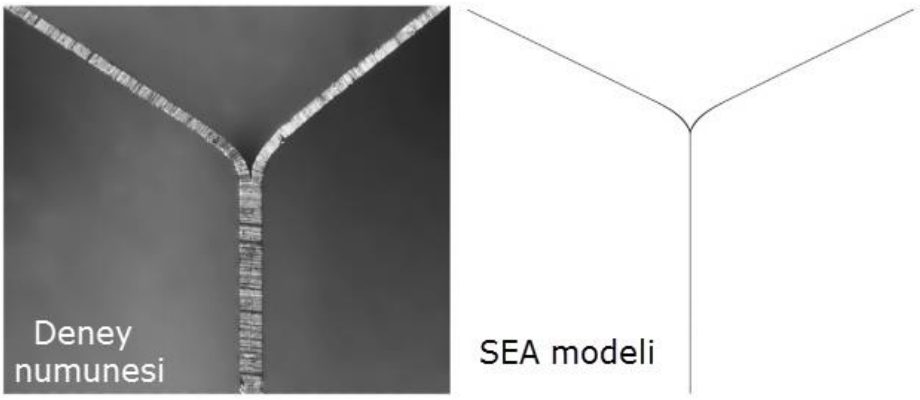
Şekil 2.36. Deney ve SEA sonucu oluşan hasar kıyaslaması (Liu ve ark., 2015a)



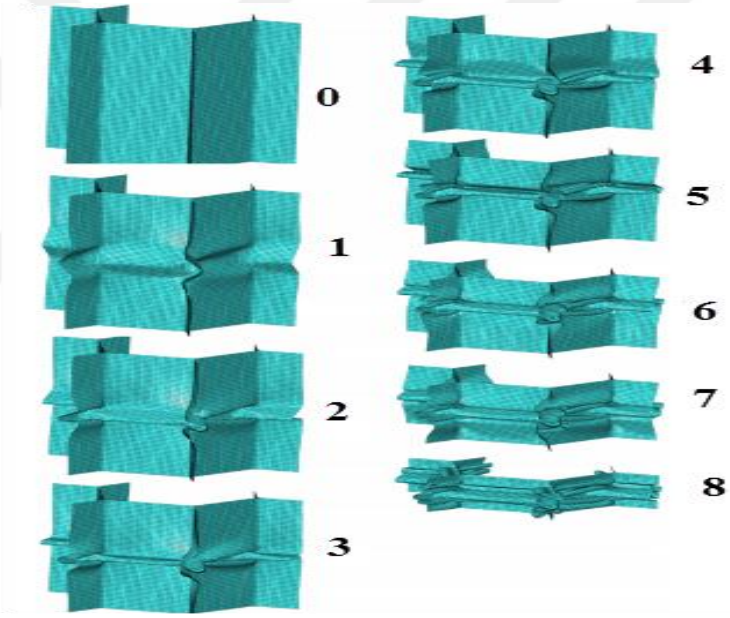
Şekil 2.37. Petek bazında hasar incelemesi (Liu ve ark., 2015a)

Jang ve Kyriakides (2015)çalışmalarında ürettikleri genişletilmiş alüminyum altıgen petek yapıların ezilme altında hücre ve enerji absorbe edebilme davranışlarını deneysel ve SEA yöntemi ile araştırmışlardır. Şekil 2.38'de çift duvarlı ve tek cidarlı genişletilmiş petek numuneler gösterilmiştir. Yapılarda meydana gelen genişlemeyi basma deneyleri ve SEA yöntemi ile araştırmışlar hasar mekanizmalarını ve gerilme-gerinim diyagramlarını oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda burkulma gerilmesinde yaklaşık %10 artış, çökme gerilmesinde %5 azalma ve hasar için gerekli ortalama

gerilmede artma olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Şekil 2.39'da SEA sonucu hücrede meydana gelen ezilmenin zamana bağlı değişimi görülmektedir.

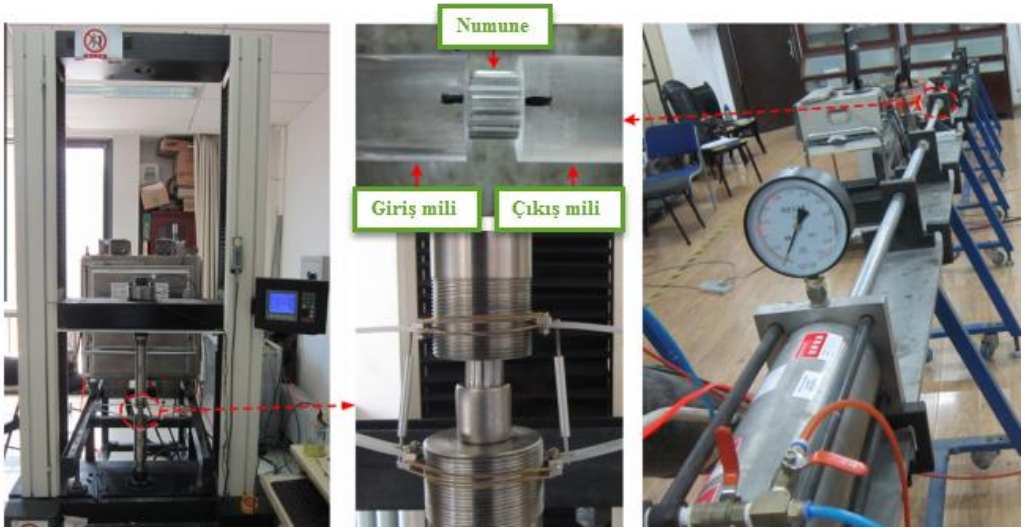


Şekil 2.38. Deney numunesi ve SEA modeli (Jang ve Kyriakides, 2015)

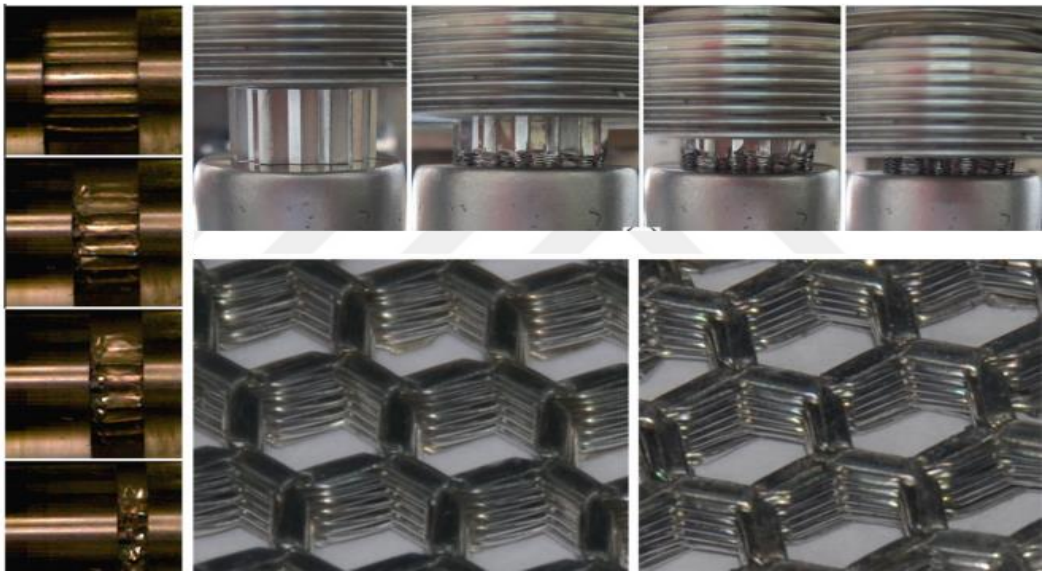


Şekil 2.39. SEA sonucu hücrede meydana gelen ezilme (Jang ve Kyriakides, 2015)

Tao ve ark. (2015) çalışmalarında alüminyum bal peteklerinin dinamik basma altındaki mukavemet davranışlarını araştırmışlardır. Basma ve Split Hopkinson Pressure Bar deneysel yöntemi ile yapılarda gerilme-gerinim diyagramlarını ve meydana gelen hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Şekil 2.40'da çalışmalarında kullandıkları deney düzenekleri görülmektedir. Hız aralığı değiştikçe numunelerin gerilme değerlerinin de değişim gösterdiği sonucuna varmışlardır. Şekil 2.41'de yapıda meydana gelen hasar gösterilmiştir.

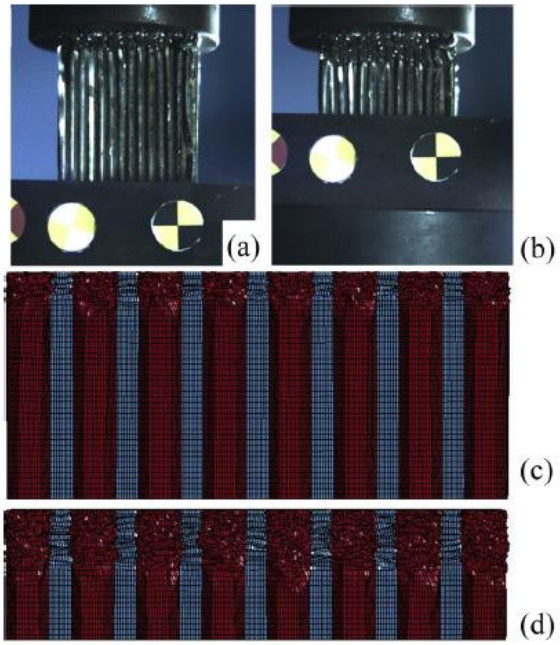


Şekil 2.40. Basma ve SHPB deney düzenekleri (Tao ve ark., 2015)



Şekil 2.41. Yapıda meydana gelen hasar (Tao ve ark., 2015)

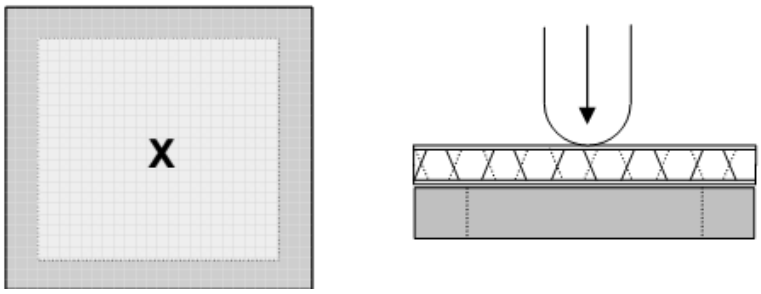
Wang ve ark. (2016b) yapmış oldukları çalışmalarında bal peteği yapıların basmaya karşı göstermiş oldukları mekanik davranışları deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Şekil 2.42 incelendiğinde yapılar arasındaki paralellik dikkat çekicidir. Şekil a'da numunenin deney başlangıcındaki hali, b'de deney sonu ezilme, c'de analiz başlangıcı hasar, d'de analiz sonucu en son hasar verilmiştir. Bunun sebebini deney şartlarını sonlu elemanlar analizine iyi aktarmalarına dayandırmışlardır.



Şekil 2.42. Wang ve ark. (2016b)elde ettiği sonuçlar

2.2. Darbe Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması

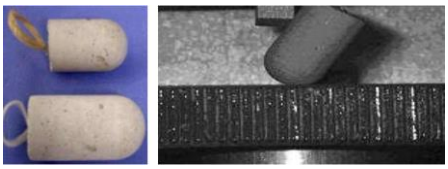
Ashmead ve ark. (2000) çalışmalarında presle şekil verilmiş yumurta kolisi şekline benzer üç numune (çelik, PU ve PP malzeme) ve altıgen (alüminyum) şeklindeki bal peteği yapıların dinamik özelliklerini deneysel ve SEA yöntemi incelemişlerdir. Çalışmanın darbe kısmı burada, basma kısmı ise basma ile yapılan araştırmalar kısmında verilmiştir. Şekil 2.43'te darbe için oluşturdukları deney düzeneğini görülmektedir.



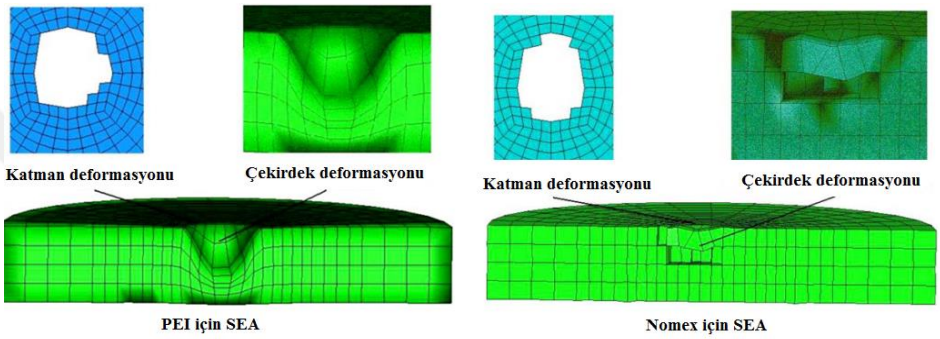
Şekil 2.43. Deney düzeneği (Ashmead ve ark., 2000)

Aktay ve ark. (2005) çalışmalarında aramid kağıt petek (Nomex) ve polieterimid (PEI) köpük çekirdekli kompozit sandviç panellerin yüksek hız darbe davranışlarını deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Şekil 2.44'te deneyde kullanılan küresel

uç ve yüksek çözünürlüklü kamera ile malzemeye çarpma anı görülmektedir. Şekil 2.45'te SEA analizi sonucu yapıda küresel ucun malzemede meydana getirdiği hasar görülmektedir. PEI numuneler iç enerjiyi dağıtmada nomex yapılardan daha yüksek performans sergilediği sonucuna varmışlardır.

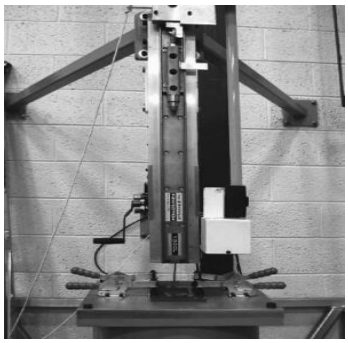


Şekil 2.44. Deneyde kullanılan küresel uç ve malzemeye çarpma anı (Aktay ve ark., 2005)

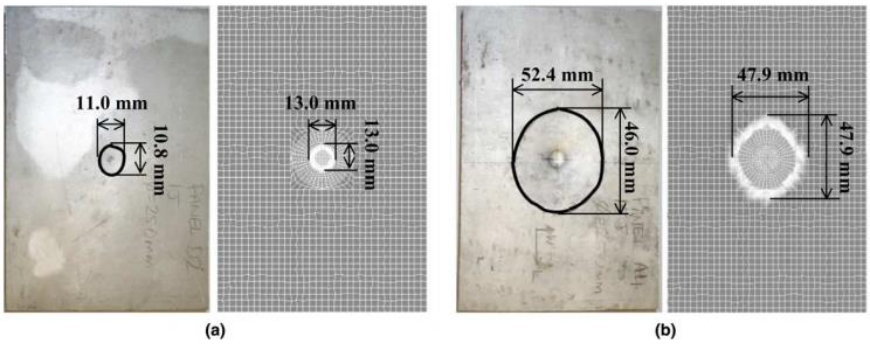


Şekil 2.45. SEA analizi sonucu yapıda meydana gelen hasar (Aktay ve ark., 2005)

Nguyen ve ark. (2005) çalışmalarında deneysel ve explicit SEA temelli olarak alüminyum bal petekleri yapılarda oluşan hasarları tahmin etmeyi amaçlamıştır. Petek yapısı olarak altıgen zigzag yapı kullanmışladır. Çalışmada kullandıkları deney düzeneği Şekil 2.46'da gösterilmiştir. Şekil 2.47'de a'da 1J b'de 15J darbe sonucu meydana gelen enerjinin yüzeyde dağılmasını, çapını deney ve SEA yöntemi ile kıyaslamışlardır. Darbe hızı arttıkça petek yapının absorbe ettiği enerji miktarının arttığı ve hasar şeklinin değiştiği sonucuna varmışlardır.

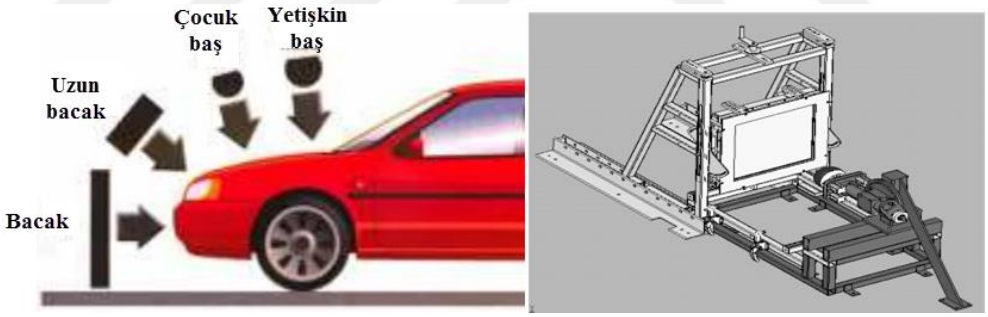


Şekil 2.46. Deney düzeneği (Nguyen ve ark., 2005)

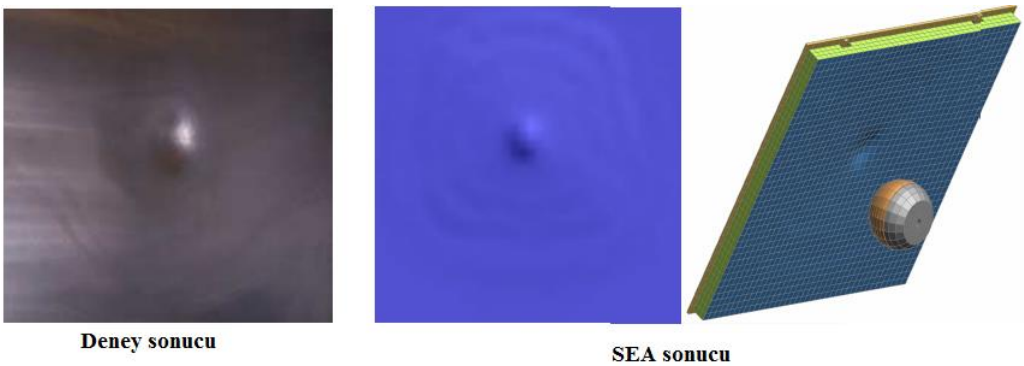


Şekil 2.47. a) 1J b) 15J darbe sonucu meydana gelen enerjinin kıyaslamaları (Nguyen ve ark., 2005)

Asadi ve ark. (2007) çalışmasında arabanın çarptığı çocuğun kaputa başını vurmasını Cellbond alüminyum petek sandviç panele çocuk kafası şeklinde bir vurucu ile darbe oluşturmayı simüle etmiştir. Darbenin etkisini deneysel ve SEA yöntemi ile incelemiştir. Petek yapıların açısal olarak ezilmesini de incelemiştir. EuroNcap testinde düşük hızlarda çocuktan yetişkine çarpma sonucu başın ve bacakların nereye geleceğinden yola çıkarak oluşturduğu deney düzeneği Şekil 2.48'de verilmiştir. Şekil 2.49'da çarpma sonucu yapıda meydana deney ve SEA sonuçlarını göstermiştir. Hasar şekilleri ve emilen enerji miktarının yaklaşık olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.48. Deney düzeneği (Asadi ve ark., 2007)

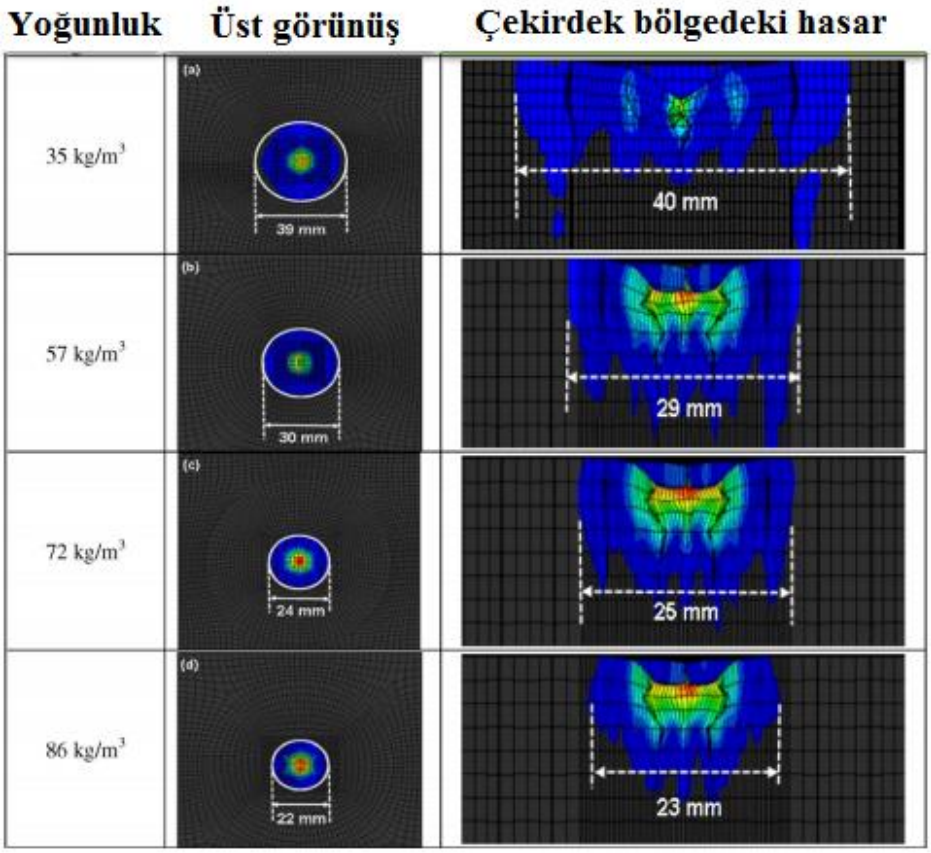


Şekil 2.49. Yapıda meydana gelen hasar (Asadi ve ark., 2007)

Foo ve ark. (2008) çalışmalarında alüminyum sandviç panellerin düşük hız darbe davranışlarını deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Deneylerde kullandıkları cihaz Şekil 2.50'de verilmiştir. Çalışma sonucunda yoğunluk arttıkça hasar çapında azalma olduğunu Şekil 2.51'de göstermiştir.

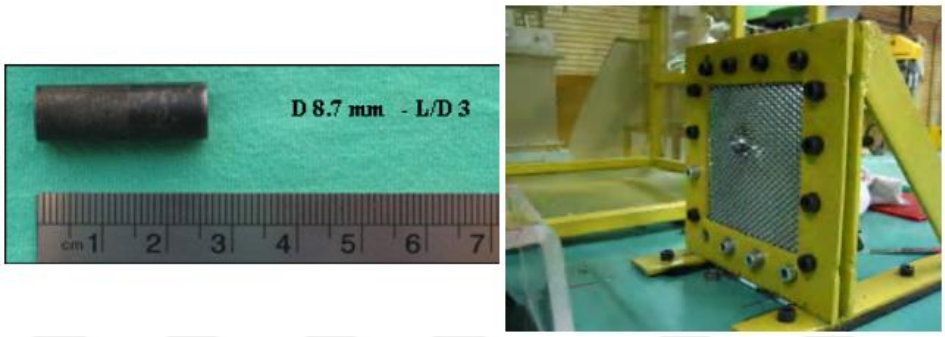


Şekil 2.50. Deney düzeneği (Foo ve ark., 2008)

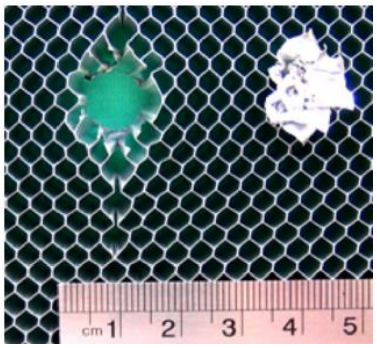


Şekil 2.51. Hasar durumları (Foo ve ark., 2008)

Nia ve ark. (2008) çalışmalarında bal peteği yapıların enerji emici özelliklerinden dolayı balistik uygulamalarda kullanılabileceğini ifade etmek için bir deney düzeneği oluşturmuştur. Deney düzeneğinde kullanılan hedef ve bu hedefe fırlatılan silindir vurucu Şekil 2.52'de gösterilmiştir. Değişken olarak hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı ve hücre yüksekliğine göre dört adet numune hazırlamıştır. Deney sonucu elde ettiği enerji emme miktarını sayısal olarak yaptığı hesaplarla kıyaslamıştır. Hesaplar ve deney sonuçları arasında yaklaşık %10'luk bir sapma olduğunu görmüşlerdir. Hücre genişliği azaldıkça, hücre duvar kalınlığı ve panel kalınlığı arttıkça emilen enerji miktarının arttığı sonucuna varmışlardır. Şekil 2.53'te 72,2 m/s hızda meydana gelen hasar gösterilmiştir.



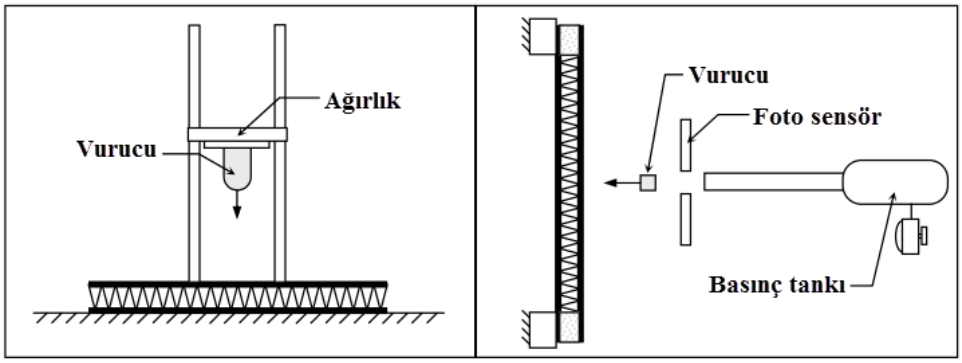
Şekil 2.52. Deney düzeneği (Nia ve ark., 2008)



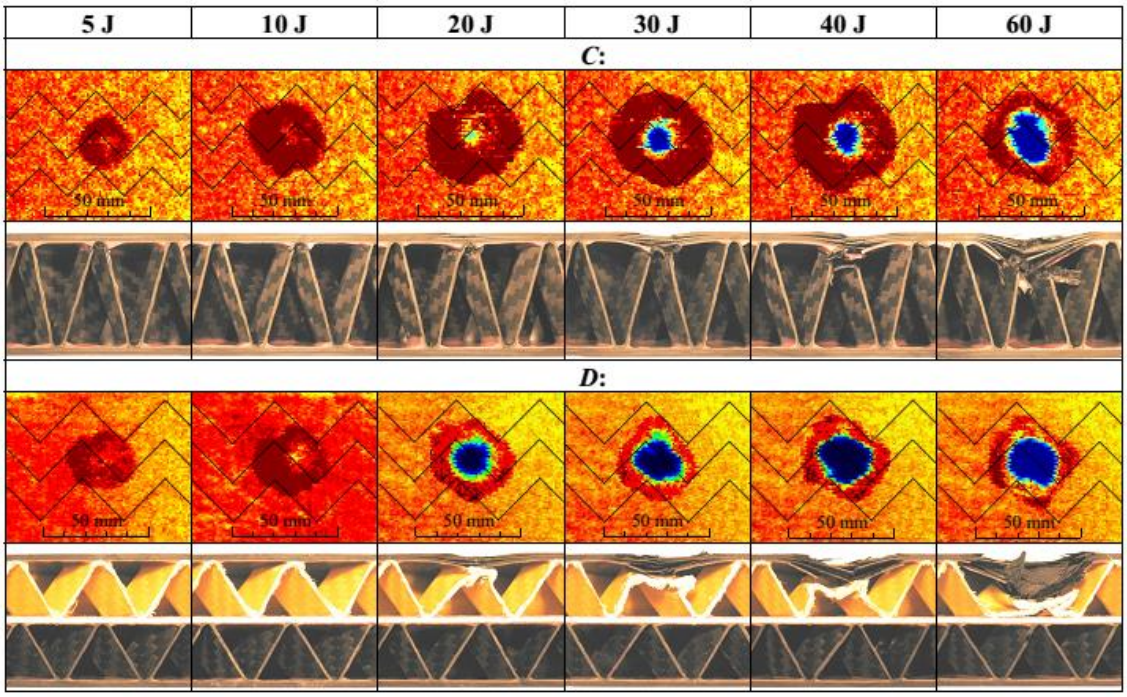
Şekil 2.53. 72,2 m/s hızda meydana gelen hasar (Nia ve ark., 2008)

Heimbs ve ark. (2009b) çalışmalarında sandviç peteklerde zigzag diye tabir edilen çekirdek yapıların çekme, açılı çekme, basma ve darbelere karşı göstermiş oldukları mukavemeti deneysel ve SEA yöntemi ile incelemişlerdir. Petek malzemesi olarak dört farklı karbon fiber kullanmışladır. Çalışmanın darbe kısmı burada, basma kısmı ise basma ile yapılan araştırmalar kısmında verilmiştir. Yapıların darbe davranışlarını belirlerken kullandıkları düşük hız ve yüksek hız darbe test düzeneği Şekil 2.54'te verilmiştir. Şekil 2.55'te C ve D numuneleri için düşük hız darbe deneyleri

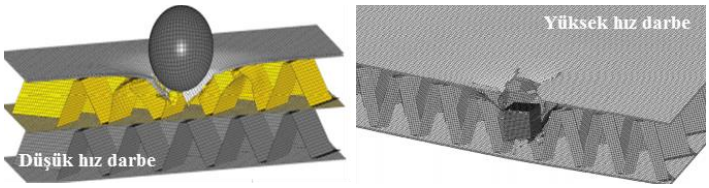
sırasında kameranın almış olduğu görüntü ve numunenin son halini vermişlerdir. Şekil 2.56'da SEA sonucu meydana gelen hasar mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.54. Deneylerde kullanılan test düzeneği (Heimbs ve ark., 2009a)



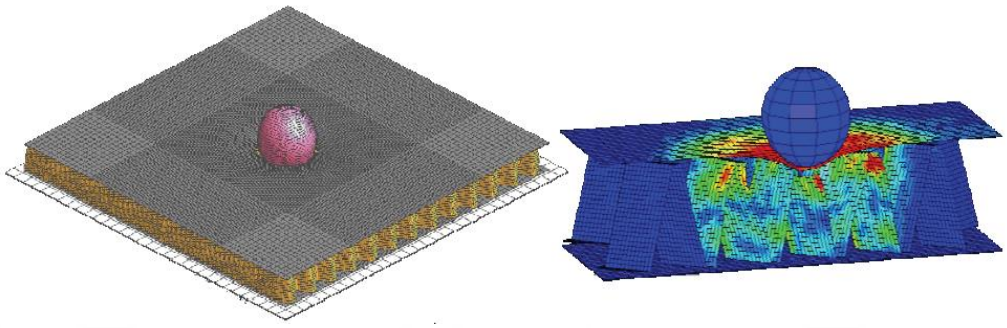
Şekil 2.55. Tip C ve tip D için deneyde meydana gelen görüntüler (Heimbs ve ark., 2009b)



Şekil 2.56. SEA sonucu meydana gelen hasar (Heimbs ve ark., 2009b)

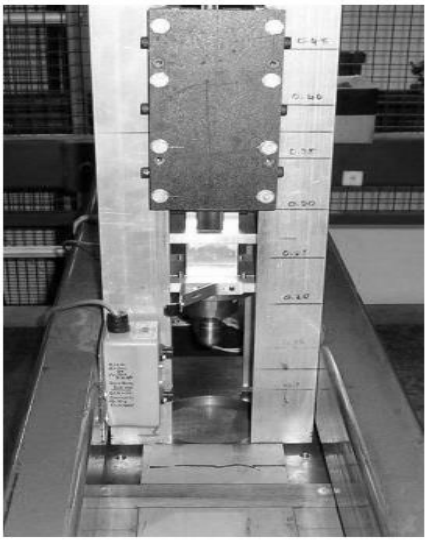
Heimbs ve ark. (2009a) karbon fiber/epoksi, aramid fiber/epoksi ve alüminyum folyo çekirdekten oluşan zigzag çekirdek yapısına sahip üç numunenin darbe

davranışlarını deneysel ve SEA yöntemi ile araştırmışlardır. Deneysel ve SEA arasındaki farkın deney numunelerinde homojenliğin tam sağlanamamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Şekil 2.57'de SEA analizi sonucu yapıda meydana gelen hasar görülmektedir.



Şekil 2.57. Yapıda meydana gelen hasar (Heimbs ve ark., 2009a)

Zhou ve Hill (2009) yapmış oldukları çalışmalarında sekiz kat karbon/epoksi yüzeyden oluşan alt ve üst yüzey tabakası ile Al ve Nomex kompozit bal peteği sandviç panel yapıların düzlem içi basınç davranışlarını belirlemek için darbe deneylerine tabi tutmuşlardır. Şekil 2.58'de deney düzeneği görülmektedir. Hasarlar darbe bölgesinin etrafında toplandığını, yüzeyde yayılma olmadığını görmüşlerdir. Yüzeyde yayılma olmamasının sebebini yapıştırıcı filminin kopması olarak ifade etmişlerdir. Şekil 2.59'da darbe sonrası alüminyum ve Nomex yapıda meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 2.58. Deney düzeneği (Zhou ve Hill, 2009)

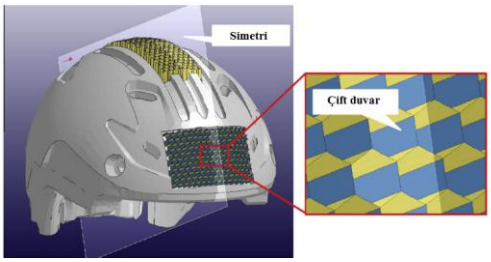


Şekil 2.59. Darbe sonrası alüminyum ve nomex yapıda meydana gelen hasar (Zhou ve Hill, 2009)

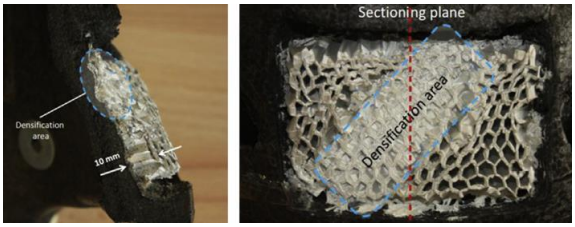
Caserta ve ark. (2011) çalışmalarında alüminyum petek yapısını bisiklet kaskının ön, üst ve arka kısmına monte ederek enerji absorbe özelliklerini inceleyerek bisikletçilerin güvenliğini arttırmayı amaçlamışlardır. Şekil 2.60'ta petek yapı yerleştirilmiş bisiklet kaskı ve deney düzeneği görülmektedir. ECE 22.05 standardına göre belirlenen etki noktalarına göre hem üç adet prototip kaska hemde üç adet ticari modelleri (aynı ölçü, aynı geometri, aynı malzeme özellikleri ve ağırlık için) dinamik kuvvetlere karşı performanslarını ölçmüşler ve kıyaslamalarını yapmışlardır. SEA yöntemi için oluşturulan model yapı Şekil 2.61'de verilmiştir. Prototip olarak üretilen kaskın kaldırım taşından yapılmış çekice karşı iyi bir koruma sağladığını görmüşlerdir. Şekil 2.62'de kaskta meydana gelen hasar verilmiştir.



Şekil 2.60. Deney düzeneği ve kask (Caserta ve ark., 2011)

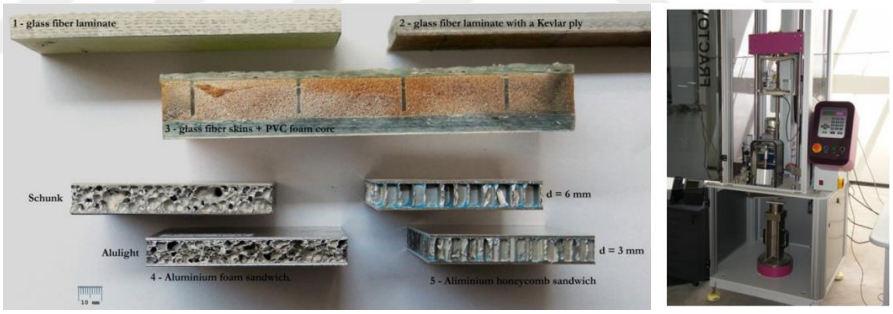


Şekil 2.61. SEA için oluşturulan model (Caserta ve ark., 2011)

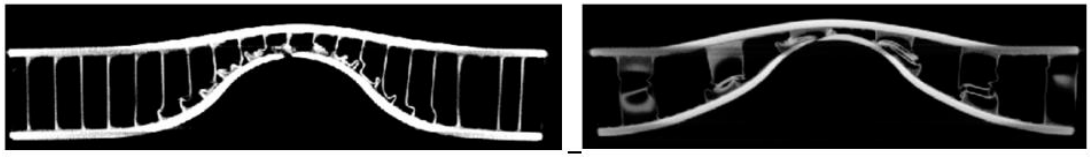


Şekil 2.62. Kaskta meydana gelen hasar (Caserta ve ark., 2011)

Crupi ve ark. (2011) çalışmalarında lamine kompozitler, PVC köpük çekirdekli sandviç, Al köpük sandviç (AFS) ve Al petek sandviç yapıların CEAST Fractovis Plus düşme test cihazı ile düşük hızda hasar davranışlarını incelemişlerdir. Şekil 2.63'de deneylerde kullanılan numuneler ve test cihazı gösterilmiştir. Hasara uğramış numunelerde değişken odak nokta boyutu teknolojisine dayalı, X ışınları kullanılarak üç boyutlu nesnelerin kesitsel görüntülerini oluşturup incelemişlerdir. Numunelerdeki ölçü farklılıklarından dolayı PVC köpük çekirdekli sandviç yapıda enerji absorbe yeteneğinin daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Şekil 2.64'te alüminyum petek yapıda meydana gelen hasar görülmektedir.

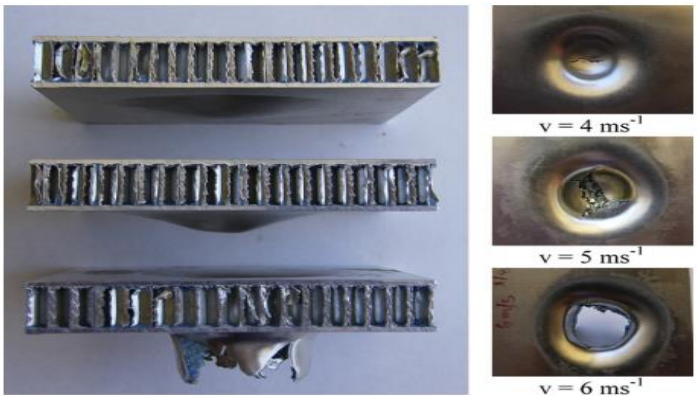


Şekil 2.63. Deney numuneleri ve test cihazı (Crupi ve ark., 2011)



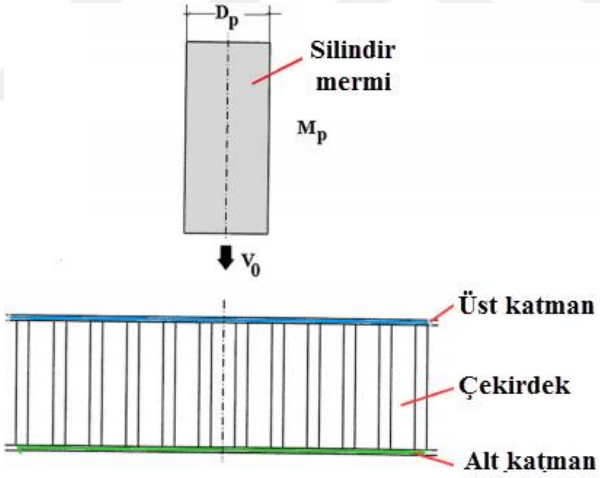
Şekil 2.64. 4m/s hızda alüminyum petek yapıdaki hasar (Crupi ve ark., 2011)

Crupi ve ark. (2012) çalışmalarında alüminyum petek yapıların darbe ve eğme davranışlarını incelemişlerdir. Şekil 2.65'te 3mm kalınlığındaki altıgen petekli yapıda darbe sonucu oluşan şekil değişimi görülmektedir. Hasarın vurucu çevresinden yüzeye yayıldığı, alt-üst katmandaki şekil değişimlerini ve enerji absorbe miktarlarını incelemişlerdir.



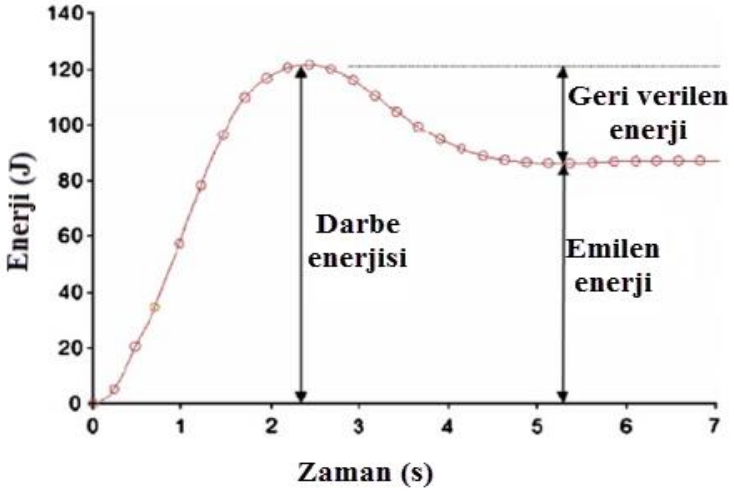
Şekil 2.65. Meydana gelen hasar (Crupi ve ark., 2012)

Feli ve Pour (2012) çalışmalarında alüminyum bal peteği yapıların yüksek hız darbe davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Alt üst katmana çekirdek yapıştırılarak sandviç yapıları oluşturmuşlardır. Şekil 2.66'da oluşturdukları deney düzeneği çizimi görülmektedir. Yapıda meydana gelen enerji absorbe performansını değerlendirmişlerdir.

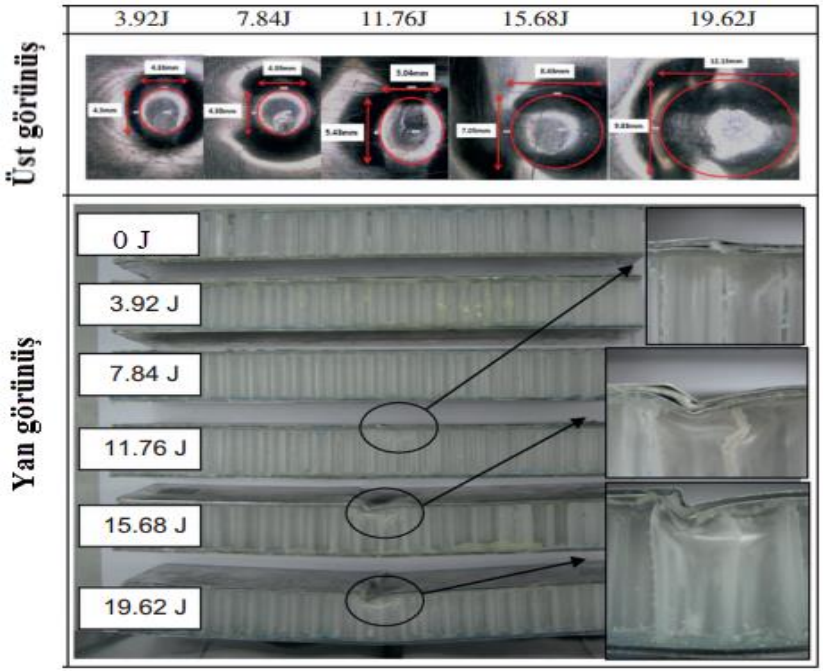


Şekil 2.66. Deney düzeneği ve mermi (Feli ve Pour, 2012)

Tan ve Akil (2012) elyaf metal laminatları bir sandviç yapı oluşturmak üzere polipropilen petek nüvesi üzerine alt üst katman olarak kullanmışlardır. Oluşturulan sandviç yapıların düşük hız darbe davranışlarını araştırmışlardır. Şekil 2.67'de darbe enerjisi, absorbe edilen enerji ve geri verilen enerji miktarlarını göstermişlerdir. Yapıda darbe enerjisi arttıkça meydana gelen hasar Şekil 2.68'de gösterilmiştir.



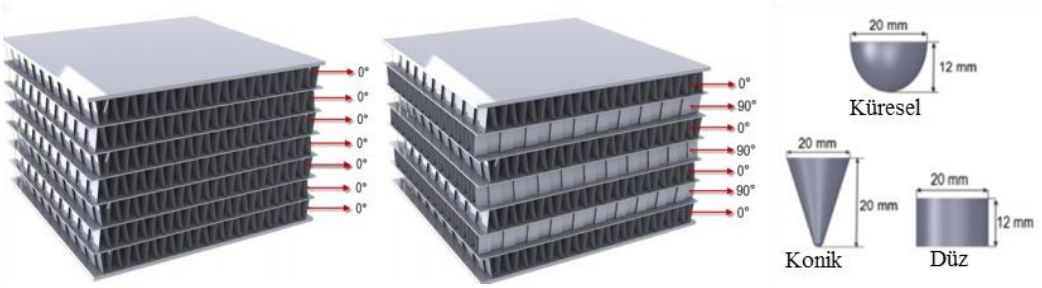
Şekil 2.67. Enerji-zaman grafiği (Tan ve Akil, 2012)



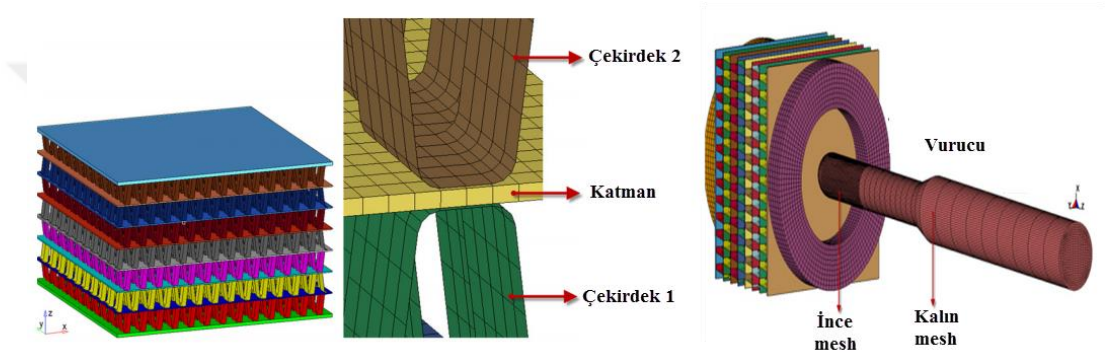
Şekil 2.68. Yapıda meydana gelen hasar (Tan ve Akil, 2012)

Kılıçaslan ve ark. (2013) çalışmalarında alüminyum katmanlı ve alüminyum çekirdekli oluklu ikizkenar sandviç yapıların darbeye karşı yüzey yanıtlarını deneysel ve SEA ile incelemişlerdir. Sandviç yapılarda küresel, düz ve konik uç kullanarak düşme testi yapmışlardır. Deney numunesi ve kullanılan uçlar Şekil 2.69'da gösterilmiştir. Testlerin tam geometrik modelleri LS-DYNA kullanılarak modellenmiştir. Şekil 2.70'de çizilen petek yapı ve SEA modeli mesh yapısı görülmektedir. Kuvvet-birim şekil değiştirme, enerji-birim şekil değiştirme eğrilerini ve yüzey şekillerini incelemişlerdir. Konik uç ile yapılan deneylerde daha iyi sonuçlar almışlar ve SEA modeli sonuçlarıyla karşılaştırılmasından tatmin edici sonuçlar

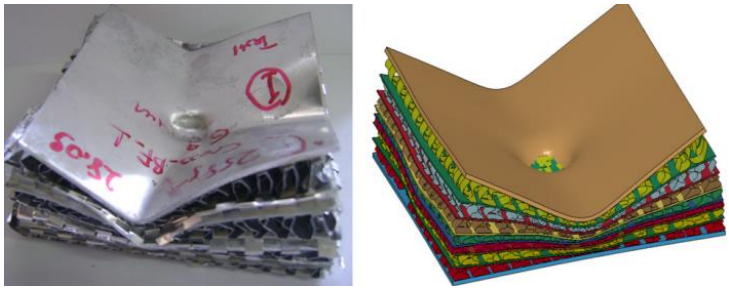
almışlardır. Şekil 2.71'de deney ve analiz sonucu meydana gelen hasar mekanizmasının kıyaslanması verilmiştir.



Şekil 2.69. Deney numunesi ve vurucu uçlar (Kılıçaslan ve ark., 2013)

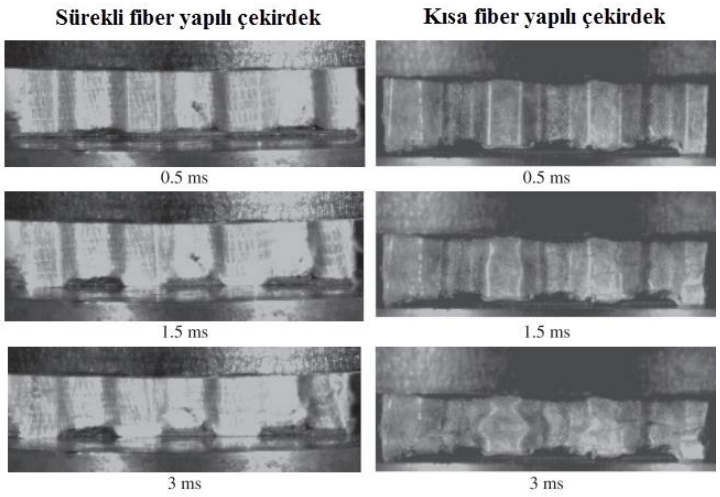


Şekil 2.70. SEA için çizim ve modelleme (Kılıçaslan ve ark., 2013)



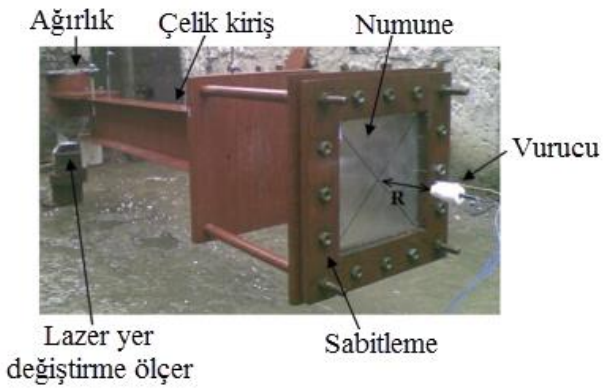
Şekil 2.71. Hasar mekanizmalarının kıyaslanması (Kılıçaslan ve ark., 2013)

Petrone ve ark. (2013) çalışmalarında fiber takviyeli petek yapıların düşük hız darbe davranışlarını incelemişlerdir. Deney parametreleri olarak iki farklı malzeme tipi, iki farklı hücre yüksekliği ve sade-katmanlı olarak belirlemişlerdir. Şekil 2.72'de görüldüğü gibi sürekli ve kısa fiber yapıları kıyasladıklarında sürekli fiber yapılarda hasar oluşturmak için gerekli kuvvet değerinin daha fazla olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

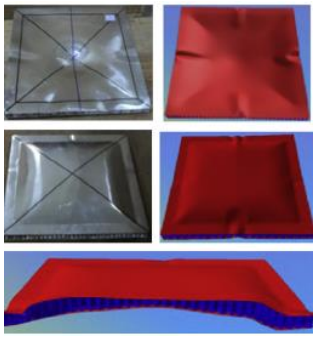


Şekil 2.72. 90 J darbe yüklemesi sonucu yapıdaki hasar durumu (Petrone ve ark., 2013)

Li ve ark. (2014) çalışmalarında balistik açıdan önemli patlama altında alüminyum petek sandviç panellerin davranışını deneysel ve SEA ile araştırmışlardır. Çalışmada kullandıkları deney düzeneği Şekil 2.73'de verilmiştir. Çalışmada şok dalgası ve yapıda meydana gelen hasarları tartışmışlardır. Şekil 2.74'te deney sonucu ve SEA analizi sonucu meydana gelen hasar mekanizması verilmiştir.

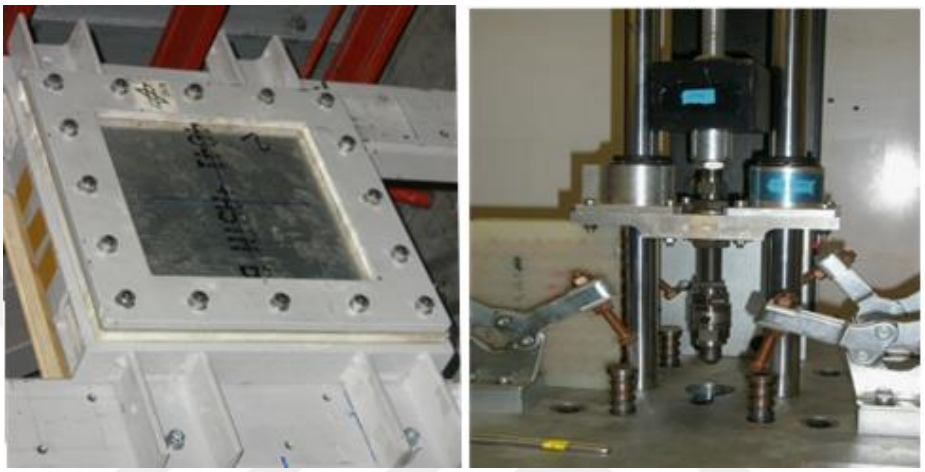


Şekil 2.73. Deney düzeneği (Li ve ark., 2014)

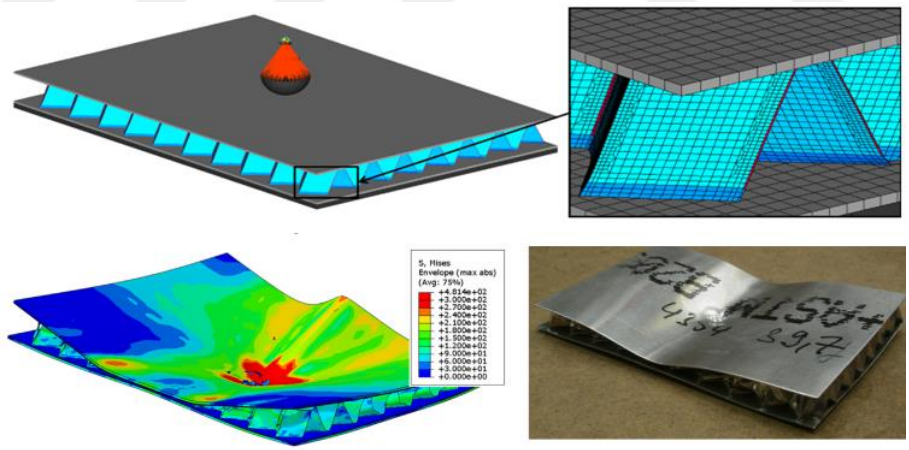


Şekil 2.74. Meydana gelen hasar karşılaştırılması (Li ve ark., 2014)

Fischer (2015) çalışmasında alüminyum zigzag petek yapıya sahip malzemenin mekanik özelliklerini basma, dört noktadan eğme ve darbe deneyleri ile incelemiştir. SEA ile oluşturduğu model sonuçlarını kıyaslamıştır. Şekil 2.75'te darbe deney numunesinin cihaza bağlanması ve darbe cihazı görülmektedir. Şekil 2.76'da SEA modeli ve hasar sonuçları karşılaştırılması gösterilmiştir. Deney ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

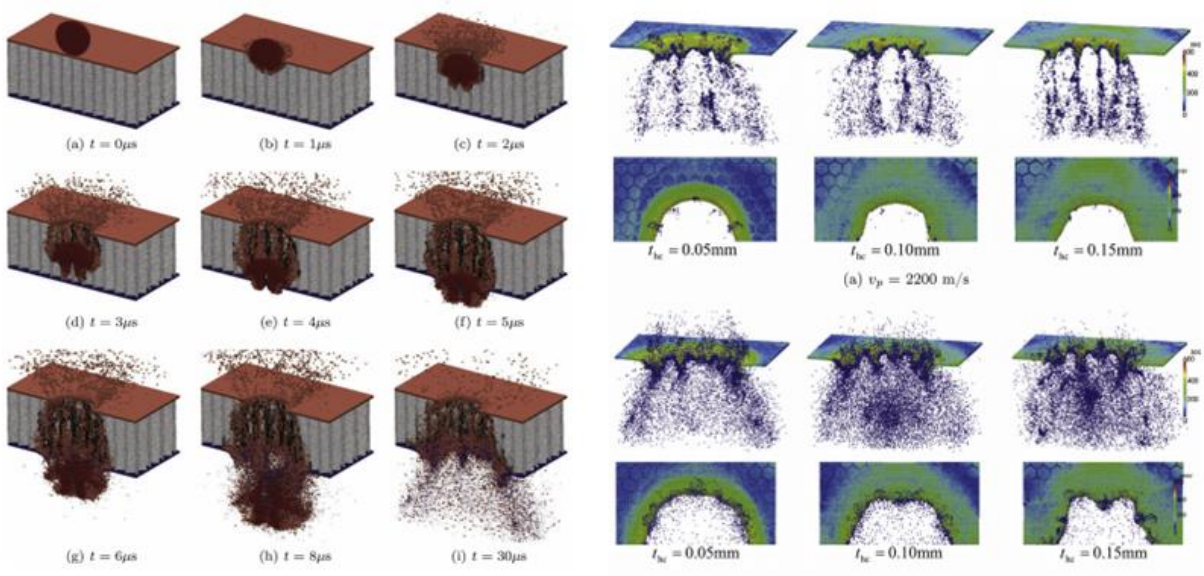


Şekil 2.75. Darbe deney numunesi ve cihazı (Fischer, 2015)



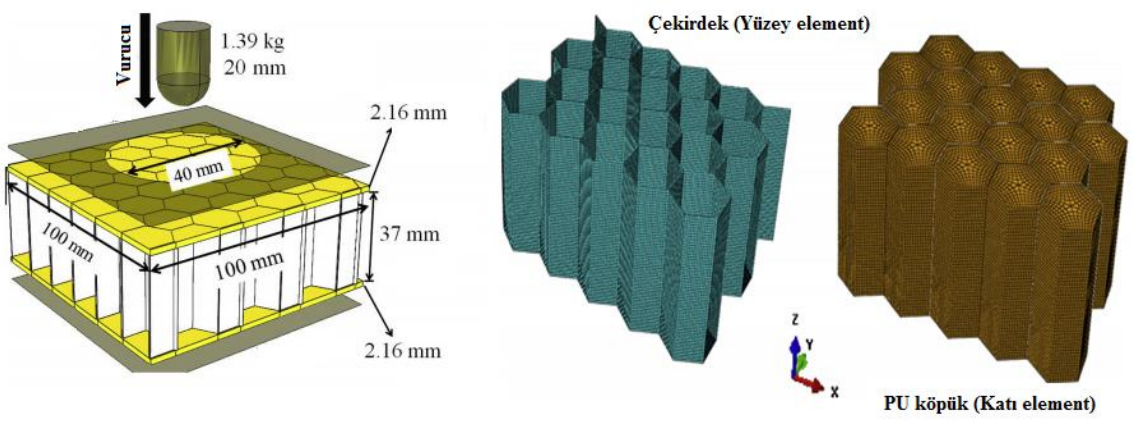
Şekil 2.76. SEA modeli ve hasar sonuçları karşılaştırılması (Fischer, 2015)

Liu ve ark. (2015b) çalışmalarında yüksek hızlı darbenin çekirdek iç yapısına etkisini araştırmışlardır. Zamana bağlı yapıda meydana gelen hasar mekanizmalarını simülasyon olarak incelemişlerdir. Şekil 2.77'de çalışmada zamana bağlı hasarı göstermişlerdir.

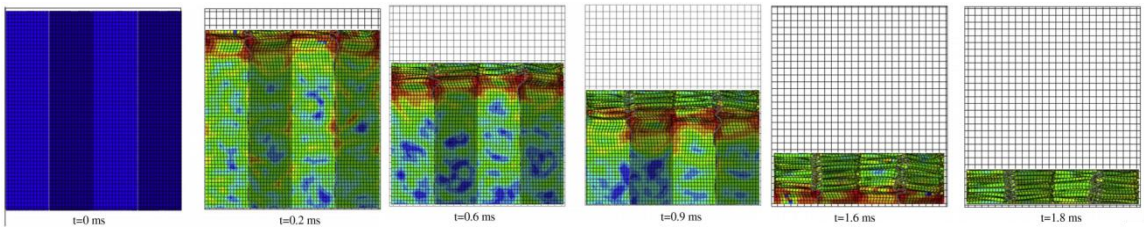


Şekil 2.77. Zamana bağlı yapıdaki hasar (Liu ve ark., 2015b)

Mozafari ve ark. (2015) çalışmalarında altıgen yapıya sahip alüminyum ve poliüretan çekirdeğin darbe davranışını SEA ile araştırmışlardır. Oluşturdukları SEA modeli ve mesh yapısı Şekil 2.78'de verilmiştir. Şekil 2.79'da zamana bağlı meydana gelen çökme miktarını alüminyum yapı için göstermişlerdir.

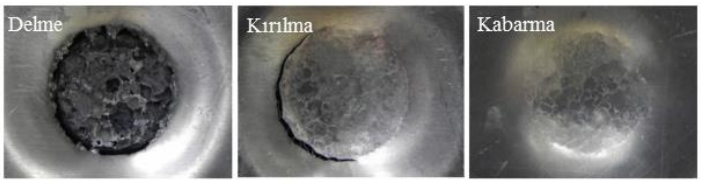


Şekil 2.78. SEA modeli ve mesh yapısı (Mozafari ve ark., 2015)

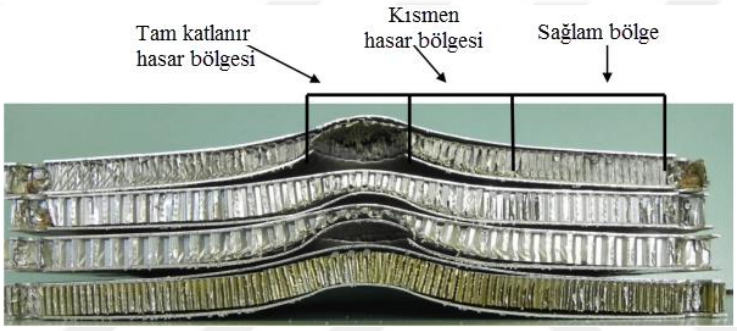


Şekil 2.79. Zamanla meydana gelen çökme (Mozafari ve ark., 2015)

Yahaya ve ark. (2015) çalışmalarında alüminyum bal peteği yapıların darbe davranışlarını deneysel incelemişlerdir. Yapıda meydana gelen hasar mekanizmalarını araştırmışlardır. Şekil 2.80'de darbe sonucu yapıda meydana gelen delme, kırılma ve kabarmayı göstermiştir. Şekil 2.81'de darbenin yüzeye dağılımını göstermişlerdir. Darbenin yüzeye yayılmasında yapıştırıcın büyük önemi olduğunu vurgulamışlardır.

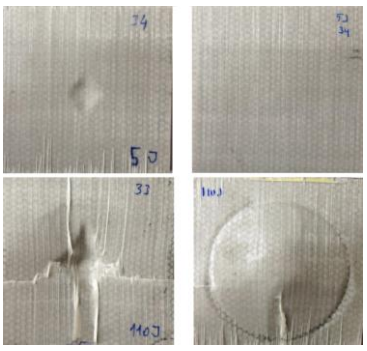


Şekil 2.80. Yapıda meydana gelen hasarlar (Yahaya ve ark., 2015)



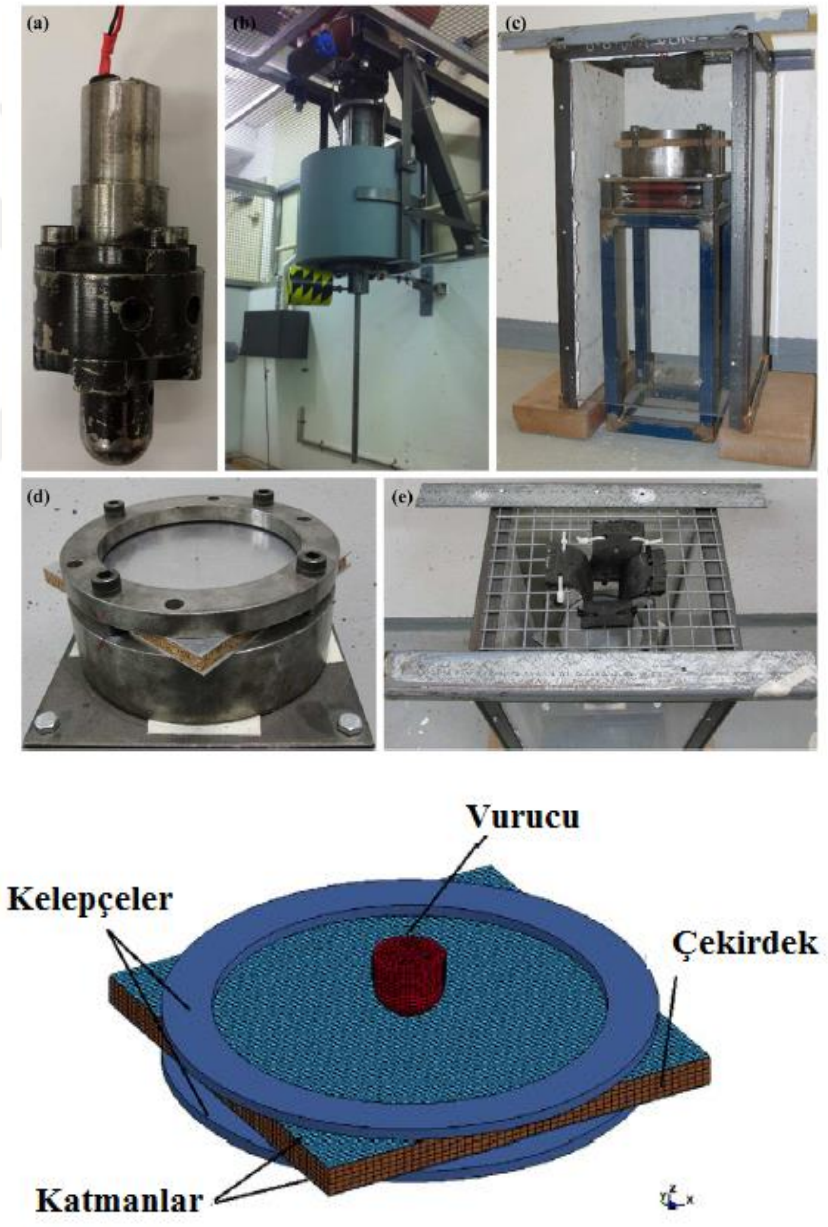
Şekil 2.81. Yapıdaki hasar bölgeleri (Yahaya ve ark., 2015)

Akatay ve ark. (2015) çalışmalarında cam fiber ile güçlendirilmiş epoksi alt üst katman ve alüminyum çekirdekten oluşan bal peteği yapıların düşük hız darbe ve basma davranışlarını incelemişlerdir. Darbe yükleri, darbe enerjileri ve kalıcı hasarları yorumlamışlardır. Darbe enerjisi arttıkça yapıda meydana gelen hasar miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Şekil 2.82'de 5J ve 110 J darbe enerjisinde yapıda ön ve arka kısımda meydana gelen hasar görülmektedir.



Şekil 2.82. Yapıda meydana gelen hasar (Akatay ve ark., 2015)

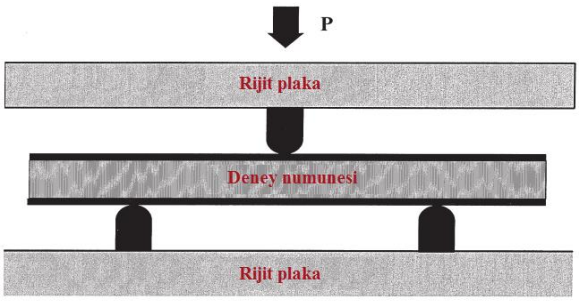
Wang ve ark. (2016a) yapmış oldukları çalışmalarında bal peteği yapının darbe davranışını deneysel ve istatistiksel olarak araştırmışlardır. Şekil 2.83'te deney düzeneği ve sonlu elemanlar analizi görülmektedir. Çalışmalarında kuvvetlerin maksimum değerlerini ve kuvvet-yer değiştirme grafiklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çalışmalarında malzemenin iç yapısındaki boşluk arttıkça darbe oluşturan kuvvet değerinin azalacağını ifade etmişlerdir. Yani hücre genişliği artıkça malzemenin iç yapısında azalma meydana gelmektedir. Buda rijitliği azalttığından darbe kuvvet değeri azalmaktadır.



Şekil 2.83. Wang ve ark. (2016a) çalışmalarından kesitler

2.3. Üç Noktadan Eğme Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması

Paik ve ark. (1999) çalışmalarında alüminyum petek çekirdekli sandviç panel yapıların mukavemet özelliklerini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Üç noktadan eğme deneyi şematik gösterimi Şekil 2.84'de verilmiştir. Hücre yüksekliği arttıkça ve hücre genişliği azaldıkça plastik deformasyon için gerekli kuvvet değerinin arttığı sonucunu elde etmişledir. Şekil 2.85'te eğme sonucu meydana gelen hasar değişikliği görülmektedir.

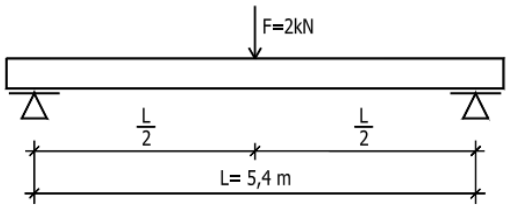


Şekil 2.84. Deney düzeneği (Paik ve ark., 1999)



Şekil 2.85. Yapıda meydana gelen hasar değişikliği (Paik ve ark., 1999)

Kowalska ve ark. (2008) çalışmalarında bal peteği yapıların eğme davranışlarını üç noktadan eğme ve dört noktadan eğme deneyleri ile incelemişlerdir. Şekil 2.86'da üç noktadan eğme test bilgileri görülmektedir. Sayısal analiz ile oluşturdukları model sonucu meydana gelen hasar mekanizması Şekil 2.87'de görülmektedir. Sonuç olarak yapıya uygulanan çökme miktarı arttıkça kuvvet değerlerinde artma olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.86. Üç noktadan eğme testi (Kowalska ve ark., 2008)

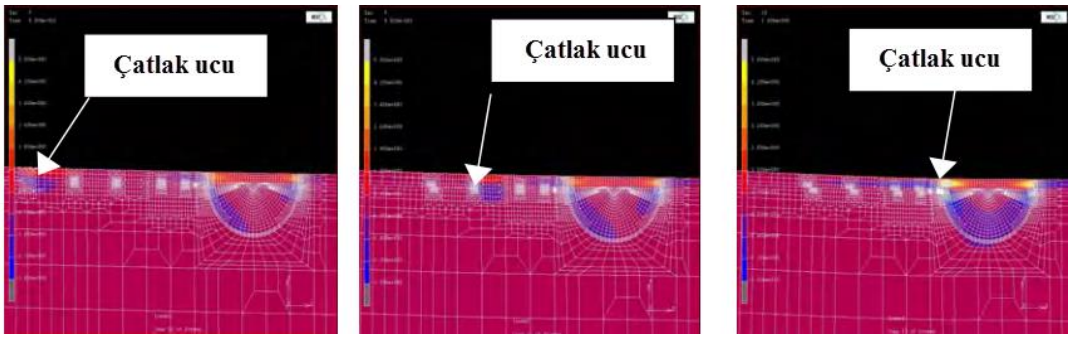


Şekil 2.87. Sayısal analiz sonucu (Kowalska ve ark., 2008)

Hirose ve ark. (2008) çalışmalarında köpük petek yapıların eğme davranışlarını iki tip üç noktadan eğme deney düzeneği ile deneysel ve SEA ile araştırmışlardır. Şekil 2.88'de deneylerde kullandıkları deney düzenekleri görülmektedir. SEA analizi ile çatlak ilerlemesinin yüzeyde dağılımını Şekil 2.89'da göstermişlerdir. Yüzeylerdeki çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesinin çökme ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmışlardır.

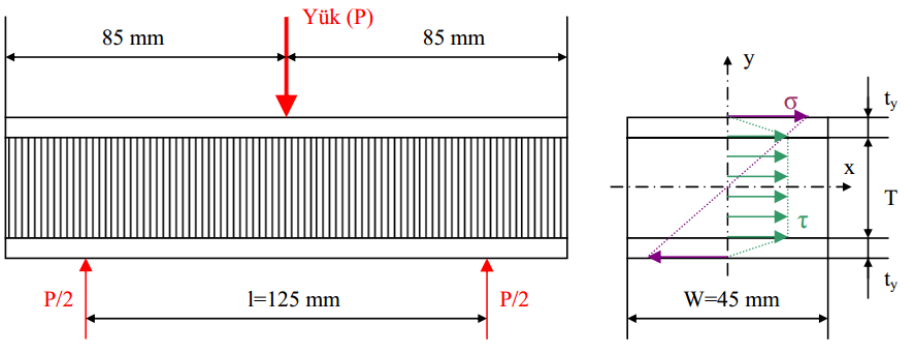


Şekil 2.88. Deney düzenekleri (Hirose ve ark., 2008)

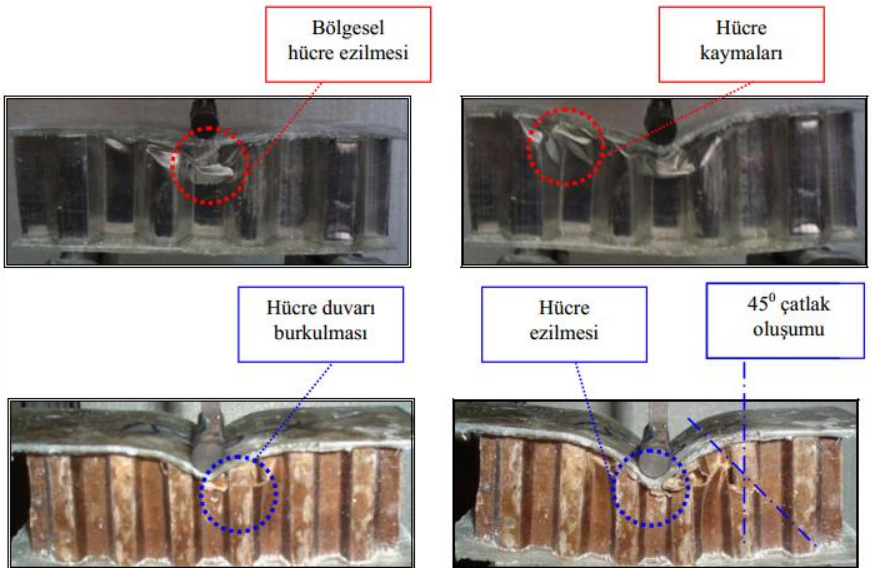


Şekil 2.89. Eğme sonucu çatlak ilerlemesi (Hirose ve ark., 2008)

Solmaz ve ark. (2010a) çalışmalarında altıgen petek yapılı kompozit levhaların eğme davranışlarını incelenmiştir. Şekil 2.90'da deney şartları ve numune ölçüleri görülmektedir. Kompozit levhaların yüzey örtüsü, polyester/cam fiberden üretilmiş olup petek hücre malzemesi olarak polyester emdirilmiş kâğıt ve alüminyum kullanmışlardır. Kağıt hücreli levhaların eğme dayanımlarının alüminyum hücrelilere göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Alüminyum çekirdekli numunelerde yük uygulanan bölgelerde bölgesel hücre ezilmesi ve kayma hasarları meydana gelirken, kağıt çekirdekli numunelerdeyse bu hasarlara ek olarak kısmen yüzey örtüsü/hücre ayrılması ve bölgesel çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.91'de deney sonucu meydana gelen hasarlar görülmektedir. Petek yapı hücre yoğunluğunun artmasıyla hücrelerin kayma rijitliklerinin ve levhaların eğme dayanımlarının arttığı sonucuna varmışlardır.

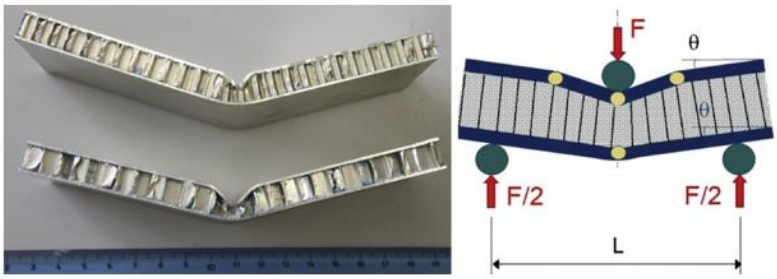


Şekil 2.90. Deney şartları ve numune boyutları (Solmaz ve ark., 2010a)



Şekil 2.91. Yapıda meydana gelen hasar (Solmaz ve ark., 2010a)

Crupi ve ark. (2012) çalışmalarında alüminyum petek yapıların darbe ve eğme davranışlarını incelemişlerdir. Şekil 2.92'de meydana gelen hasar görülmektedir. Şekilde sarı noktalar ile gösterilen yerlerden malzemenin kırılmaya başladığını ve çatlağın zamanla yüzeye yayıldığını ifade etmişlerdir.



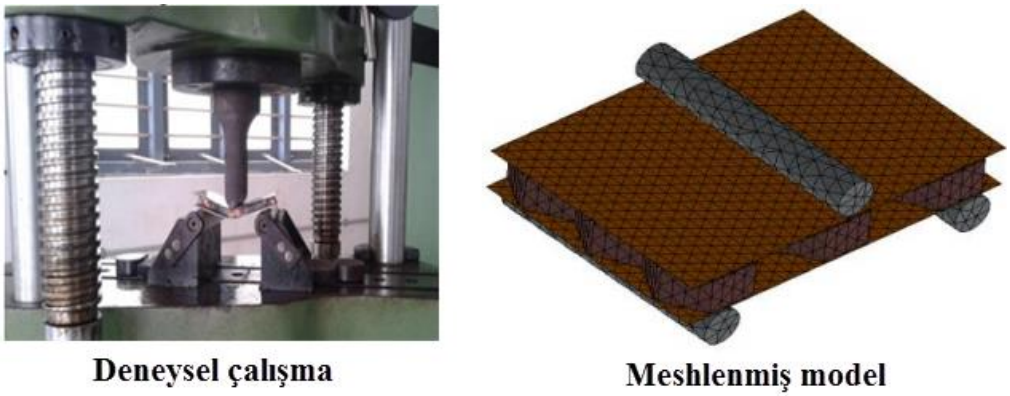
Şekil 2.92. Meydana gelen hasar (Crupi ve ark., 2012)

Nirupama ve ark. (2014) çalışmalarında parametre olarak panel levha, alt tabaka ve çekirdek, çekirdek yüksekliği, çekirdek şekli, panel boyutu, kaynak düzeni kalınlığı ve malzemeden oluşan parametreleri kullanarak Taguchi L_{16} deney tasarımı ile sandviç yapıların eğme davranışlarını deneysel ve SEA ile incelemişlerdir. Bu çalışmadaki temel amaçları optimizasyonu sağlamaktır. Şekil 2.93'de deney düzeneği, deney ve SEA hasarları görülmektedir.



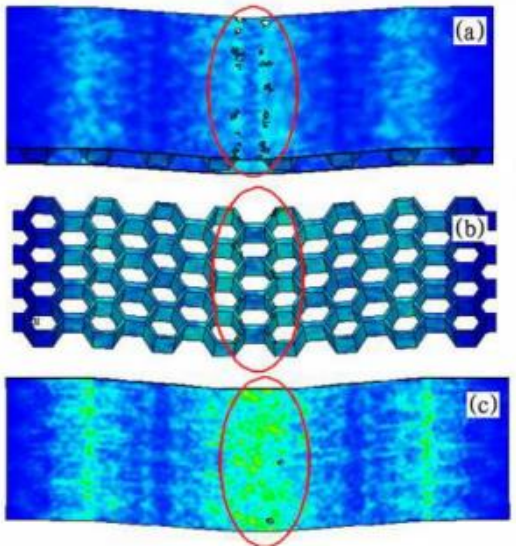
Şekil 2.93. Deneysel ve SEA sonuçları (Nirupama ve ark., 2014)

Gpoichand ve ark. (2013) çalışmalarında bakırdan üretilmiş altıgen çekirdek yapısına sahip bal peteklerinin üç noktadan eğme testi ile mekanik davranışlarını deneysel ve SEA ile incelemişlerdir. Çalışma sonunda hücre kalınlığı arttıkça eğme kuvvetlerinde artma olduğunu ortaya koymuşlardır. Şekil 2.94'te deneysel çalışma ve SEA modeli görülmektedir.



Şekil 2.94. Deneysel ve SEA çalışması (Gpoichand ve ark., 2013)

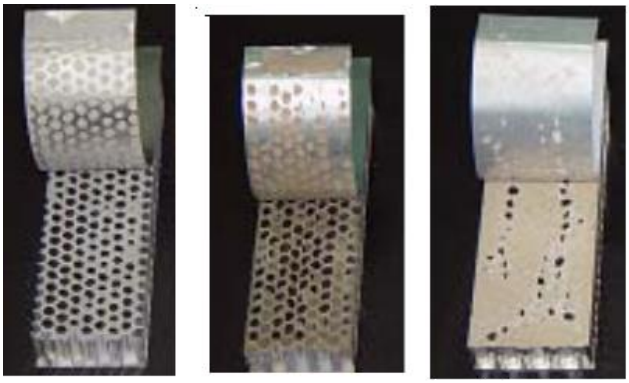
Lu ve ark. (2015) çalışmalarında karbon fiber epoksiden oluşturulan bal peteği yapıların eğme davranışları deneysel ve SEA ile incelemişlerdir. Analiz sonucu yapıda meydana gelen hasarları, ezilmeleri incelemişlerdir. Şekil 2.95'te yapıda alt üst tabaka ve çekirdekte meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 2.95. Hasarlar a) Üst tabaka b) Çekirdek c) Alt tabaka (Lu ve ark., 2015)

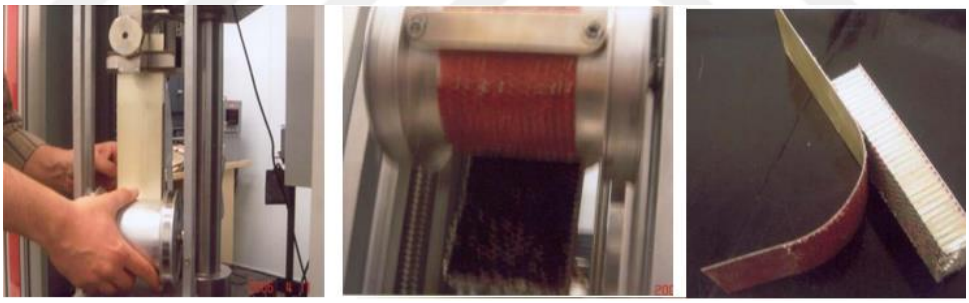
2.4. Soyma Deneyi İle İlgili Kaynak Araştırması

Oh ve ark. (2007) çalışmalarında alüminyum bal peteği yapıların yapışma özelliklerini soyma deneyi ile araştırmışlardır. Deneyde alt ve üst katmanı farklı yüzey temizleme yöntemleri ile temizleyerek epoksi yapıştırıcı ile yapıştırmışlardır. Çalışmada en iyi sonucu kumlama ve fosforik asit ile anotlaştırma yönteminde elde etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yapışkanların daha etkili tutunma sağladığı ve soyma direncinin arttığı sonucunu varmışlardır. Şekil 2.96'da meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 2.96. Meydana gelen hasarlar (Oh ve ark., 2007)

Bekem ve ark. (2011) çalışmalarında epoksi ile birleştirilen alüminyum bal peteği yapıların mekanik davranışlarını dört noktadan eğme, soyma ve çekme testleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları test düzeneği, test sonucu yüzey tabakaların petek hücrelerden ayrılması ve test sonrası numune Şekil 2.97'de görülmektedir. Çalışma sonucunda yapışkan seçimi, yüzey hazırlama ve kürleme işlemlerinin büyük önem taşıdığı sonucunu elde etmişlerdir.



Şekil 2.97. Test cihazı ve hasar (Bekem ve ark., 2011)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

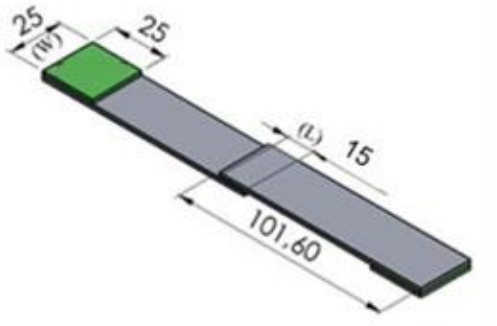
3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Yapıştırıcının belirlenmesi

Bu çalışmada basma, darbe ve eğme deneylerinin uygulanacağı alüminyum malzemelerde bağlantı malzemesi olarak saf epoksi (takviyesiz) ve MWCNT takviyeli yapıştırıcı kullanılmıştır. İlk başta MWCNT'nin hangi oranda katılması gerektiği ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürde farklı oranda katılmış çalışmalar mevcuttur (Wang ve ark., 2014; Wang ve ark., 2016b). Hsiao ve ark. (2003) çalışmalarında epoksi içerisine katılan MWCNT'nin yapışkanın mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Çalışmamızda saf epoksi, %0,5-1-1,5 olmak üzere dört ayrı yapışkan eldesi gerçekleştirilmiştir.

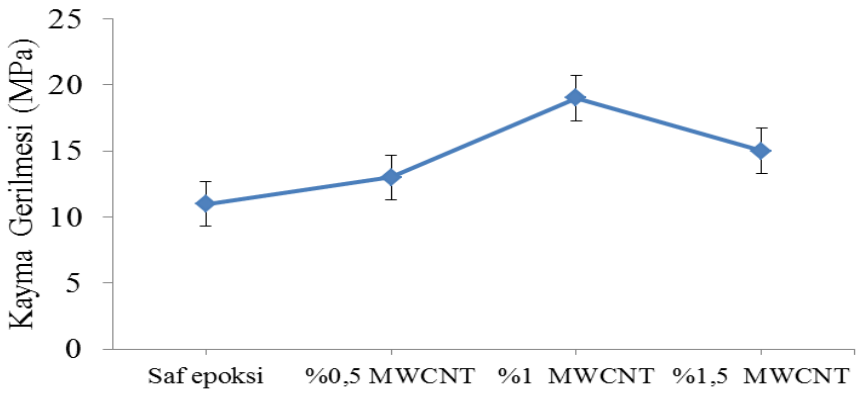
Birinci yapıştırıcı olarak takviyesiz, ikinci yapıştırıcı olarak %0,5-1-1,5 MWCNT takviyeli epoksi kullanılmıştır. İkinci yapıştırıcının üretiminde ilk olarak MWCNT'ler aseton içerisinde çözdürülmüş ve ultrasonic karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılarak soğutma banyosunda bekletilmiştir. Daha sonar aseton uçurma işlemi için 65 ^{o}C sıcaklıktaki fırında vakum ortamında 24 saat bekletilerek yapılmıştır. Epoksi içerisine katılan MWCNT'nin boyu 10-30 μm ve çapı 50 nm boyutlarda Times Nano Company şirketinden temin edilmiştir.

Elde edilen bu yapıştırıcılar ile single lap shear test (tek bindirmeli kayma testi) numuneleri hazırlanmış ve bu numunelerin çekme testi ve Charpy darbe testi uygulanmıştır. Şekil 3.1'de çekme testi ve Charpy darbe testi için hazırlanan numune ölçüleri verilmiştir. Deneyler üç tekrar olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler alınımıştır.



Şekil 3.1. Yapıştırma yapılmış numune ölçüleri

Single lap shear test sonuçları Şekil 3.2'de verilmiştir. MWCNT takviyelerinin hepsinin çekme kuvvetini arttırdığı görülmektedir. Bu kayma direncinin doğrudan çekme yükü ile ilişkili olduğu anlamına gelir. MWCNT takviyesi arttıkça kayma mukavemetini arttırmıştır. Ancak ağırlıkça %1,5 olduğunda düşmüştür. Bu düşmede sebep MWCNT'lerin yüzeylerde yığılma yapmasıdır.



Şekil 3.2. Çekme deney sonuçları

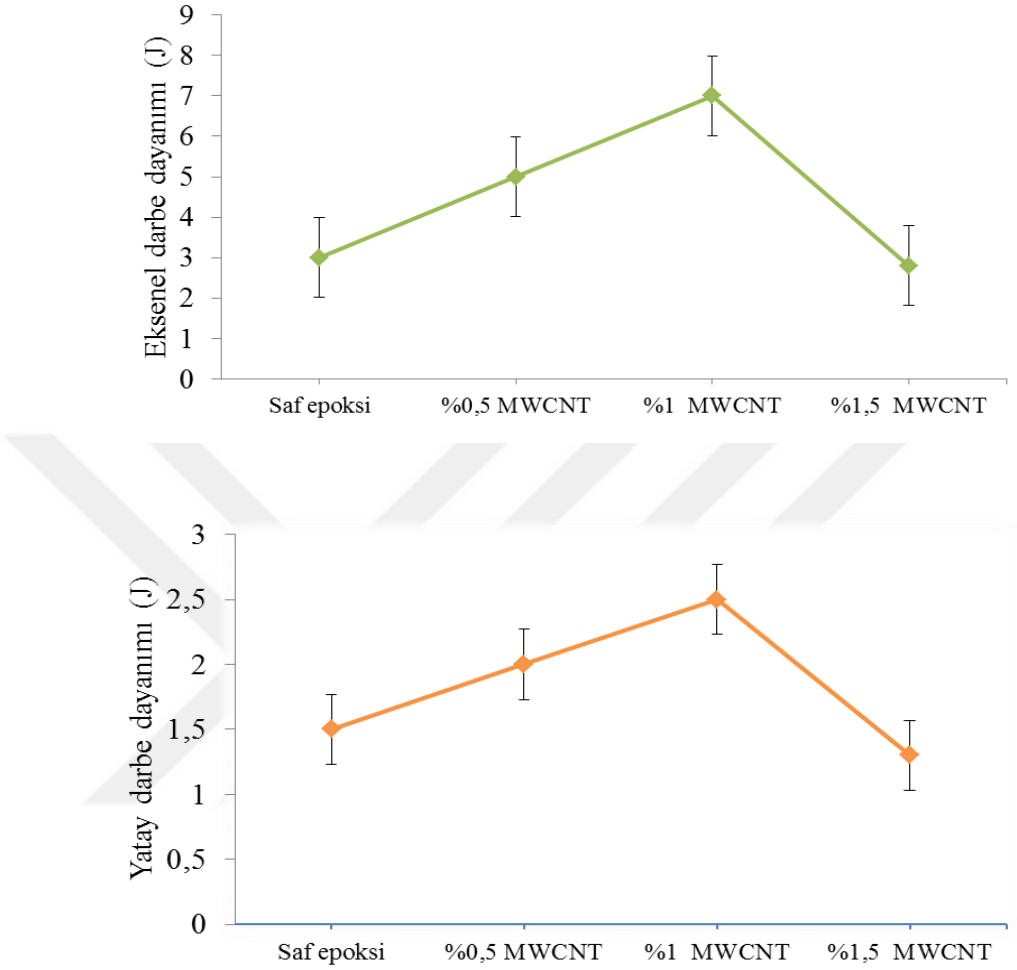
Charpy darbe testi eksenel ve yatay olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Darbe enerjisi 10 joule olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3'te Charpy test cihazına eksenel olarak bağlanmış numune görülmektedir.



Şekil 3.3. Eksenel charpy testi (Sayman ve ark., 2014)

Şekil 3.4'te eksenel ve yatay yöndeki darbe dayanımları verilmiştir. Eksenel ve yatay yönde takviye edilen MWCNT darbe dayanımı arttırmıştır. Maksimum darbe dayanımı %1 MWCNT'de elde edilmiştir. Bununla birlikte %1,5 MWCNT'de darbe

dayanımında azalma olmuştur. Bu durum MWCNT'lerin homojenlikleri ve kümelenmenin fazla olmasından meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 3.4. Charpy darbe testi sonuçları

Single lap shear test ve charpy deney sonuçları göstermiştir ki %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcının kayma gerilmesi ve darbe dayanımı daha yüksektir. Bu çalışmada yapılan araştırma sonuçlarında ikinci yapıştırıcı olarak %1 MWCNT takviyeli epoksi belirlenmiştir.

3.1.2. Deney numunelerinin hazırlanması

Deneysel tasarım için kullanılan bağımsız değişkenler Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bal peteği yapılar altıgen yapıya sahip 0,05 mm et kalınlığında alüminyum 3000 H19 serisi çekirdek ve 0,5 mm kalınlığa sahip alüminyum 1000 H14 serisi alt-üst katmandan oluşturulmuştur.

Çekirdekler rulo halinde gelen alüminyum folyo malzemenin istenilen bal peteği hücre genişliğinde üretilerek ve istenilen hücre yüksekliğinde kesilerek, gerdirme yöntemi ile çekirdek yapıya altıgen şekilleri verilmiştir.

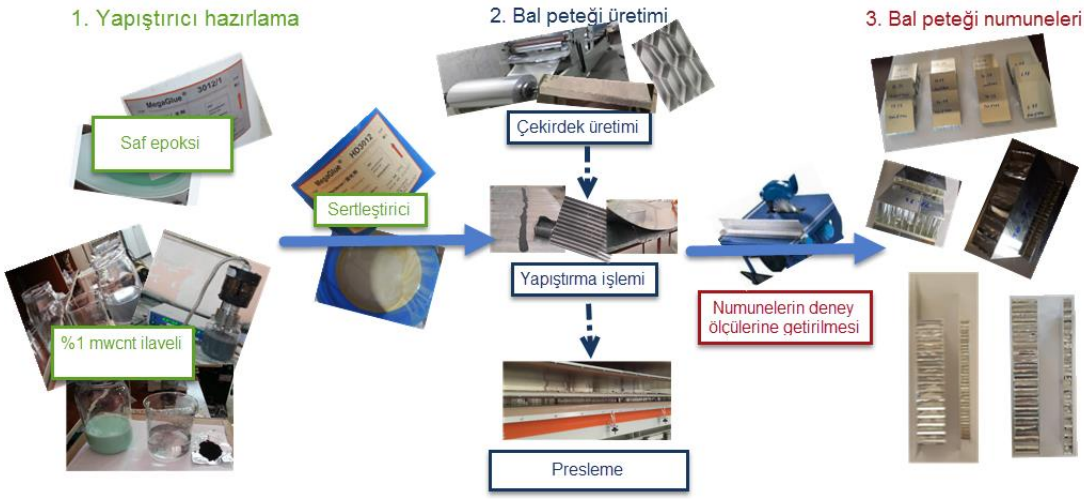
Çizelge 3.1. Deney parametreleri

Değişkenler	**Birim**				
Hücre genişliği	mm	6,78	10,39	14,17	17,32
Hücre yüksekliği	mm	10	30		
Yapıştırıcı	-	Saf epoksi	%1 MWCNT		

Yapıştırma işlemi Konya'da Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnşaat Panel San. Tic. Ltd. Şti. firmasında gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma işlemine başlamadan önce alt üst katmanlara çekirdeğin daha iyi tutunmasını sağlamak için P100 zımpara yardımıyla yüzeylerde pürüzlülük oluşturulmuştur. Pürüzlülük oluşturma işleminden sonra yüzeyde meydana gelen zımpara tozları yapışmaya engel oluşturmaması için yüzey temizleyici Sika Aktivator 205 (Sika Cleaner 205) ile silinerek arındırılmıştır. Elde edilen yapıştırıcılar ağırlıkça 2:1 oranında sertleştirici ile karıştırılarak bir rahle yardımı ile önce alt tabakaya sürülmüş ve üzerine çekirdek oturtulmuş daha sonra yapıştırıcı sürülmüş üst tabaka çekirdek üstüne kapatılmıştır. Oluşturulan bal peteği kompozit yapılar ilk kürleşme için yapıştırıcı kataloğundaki değerlere göre oda sıcaklığında 3 saat, son kürleşme için 15 bar basınç altında oda sıcaklığında bir gün preste bekletilmiştir. Alüminyum tabakalara yapıştırılan numuneler testere ile kesilerek standartlarda belirtilen deney ölçülerine getirilmiştir.

Şekil 3.5'te kullanılan yapıştırıcılar, çekirdek üretimi, yapıştırma, presleme ve kesme işlem sonrası numune elde edilmesi görülmektedir. Çekirdekler arası bağlantı, alt üst katmanın çekirdeğe bağlanmasında tamamen elde edilen yapıştırıcılar kullanılmıştır.

Çizelge 3.2'de oluşturulan deney matrisi verilmiştir. Çizelge 3.2'de belirtilen deney matrisi hem takviyesiz hem %1 MWCNT takviyeli yapışkan ile birleştirme ile 16 numune hazırlanmıştır. Deneyler üç tekrar olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 3.5. Numune hazırlama basamakları

Çizelge 3.2. Deney matrisi

Deney no	D (mm)	h (mm)
1	6,78	10
2	6,78	30
3	10,39	10
4	10,39	30
5	14,17	10
6	14,17	30
7	17,32	10
8	17,32	30

3.1.3. Basma deneyleri

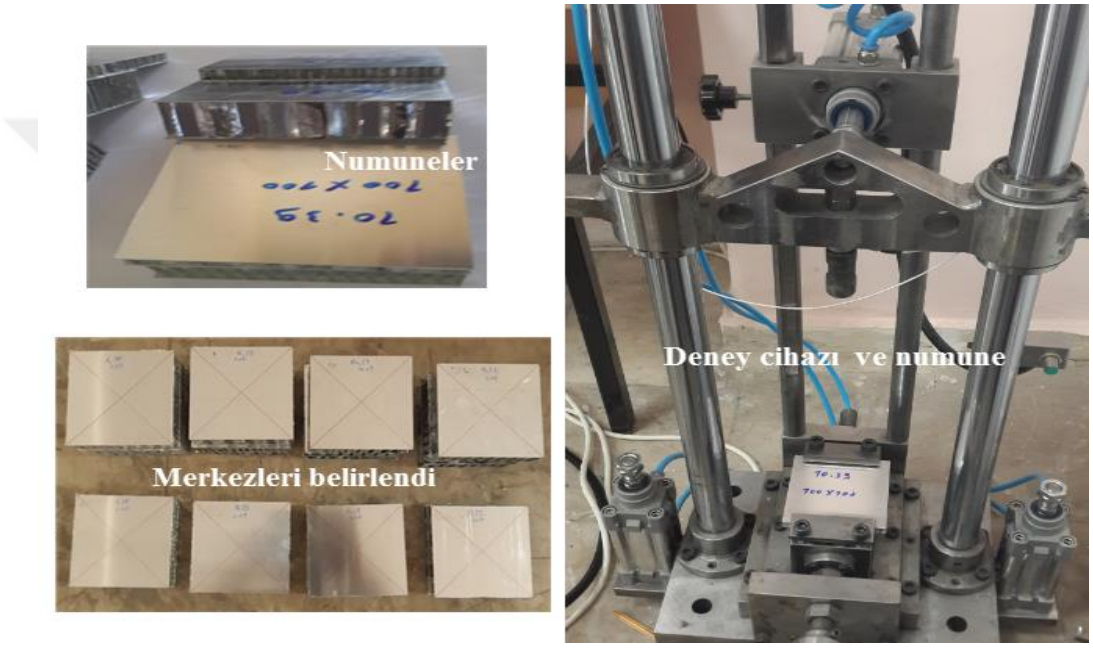
Basma numuneleri hücre yüksekliği 10-30 mm, hücre genişliği 6,78-10,39-14,17-17,32 mm, takviyesiz ve %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcılar ile 100X100 mm ölçülerinde üretilmiştir. Basma testleri Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında ASTM C365 standardına göre Instron marka 8081 model çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen deney numuneleri ve numunelerin test cihazına bağlanması Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Basma testi için üretilen numuneler ve deney cihazına bağlanan numune

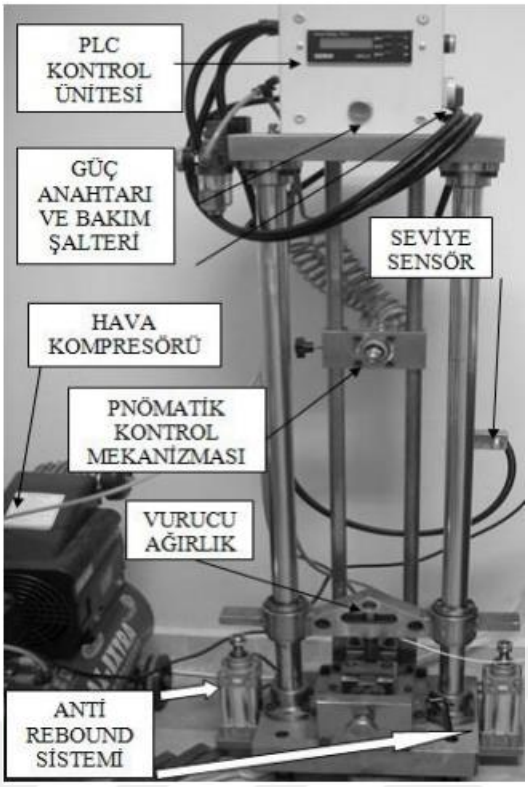
3.1.4. Düşük hız darbe deneyleri

Darbe numuneleri hücre yüksekliği 10-30 mm, hücre genişliği 6,78-10,39-14,17-17,32 mm, takviyesiz ve %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcılar ile 100X100 mm ölçülerinde ASTM D7766 standardına göre üretilmiştir. Düşük hız darbe testleri Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki ASTM-D2584 standardına uygun oluşturulmuş ağırlık düşürme cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler ve numunelerin test cihazına bağlanması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Darbe deneyi

Şekil 3.8'de darbe deneylerinde kullanılan ağırlık düşürme deneyi cihazı görülmektedir. Vurucu ağırlık 6,35 kg olup düşme yüksekliği 1 metreye kadar çıkarılabilmektedir. Test cihazı ağırlığın istenilen yükseklikten bırakılabilmesi için pnömatik bir mekanizmaya sahiptir. Bu sayede cihaz değişik darbe hızlarında deneylerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Hareketli vurucu kütlesi, gövdede bulunan çelik cetvel ve pnömatik başlatma kolu yardımıyla mesafe ayarı yapılabilmektedir (Güneş, 2013). Bu tez çalışmasında sadece ilk darbenin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk darbeden sonra vurucu ucun numuneye tekrar darbe uygulamasını önlemek için test düzeneğinde anti rebound sistemi mevcuttur.



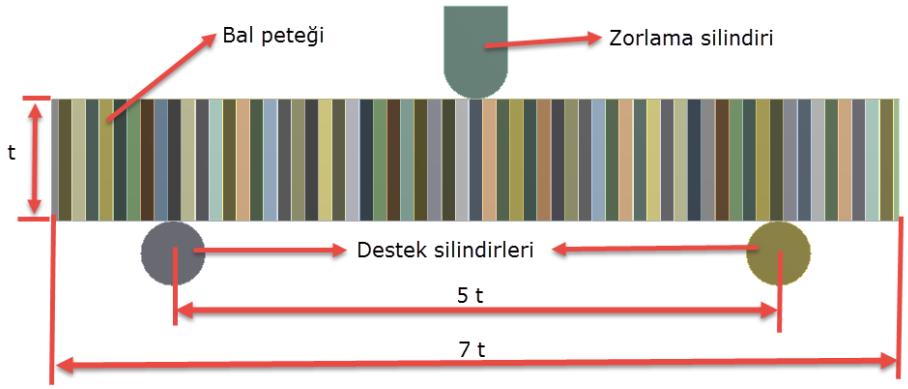
Şekil 3.8. Ağırlık düşürme deneyi cihazı (Güneş, 2013)

3.1.5. Üç noktadan eğme deneyleri

Üç nokta eğme numuneleri hücre yüksekliği 10-30 mm, hücre genişliği 6,78-10,39-14,17-17,32 mm, takviyesiz ve %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcılar ile 50 mm genişliğinde, 210 mm boyunda üretilmiştir. Üç noktadan eğme deneyleri Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında ASTM E1556-08 standardına göre 6 mm/min hızında 10 mm yüksekliğe sahip numune için 10 mm ve 30 mm yüksekliğe sahip numune için 30 mm çökme miktarı gerçekleşecek şekilde Instron 8081 çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da üç noktadan eğme deneyi için üretilen deney numuneleri ve numunelerin test cihazına bağlanması gösterilmiştir. Şekil 3.10'de ise ASTM E1556-08 için deney numunesi ölçüleri görülmektedir.



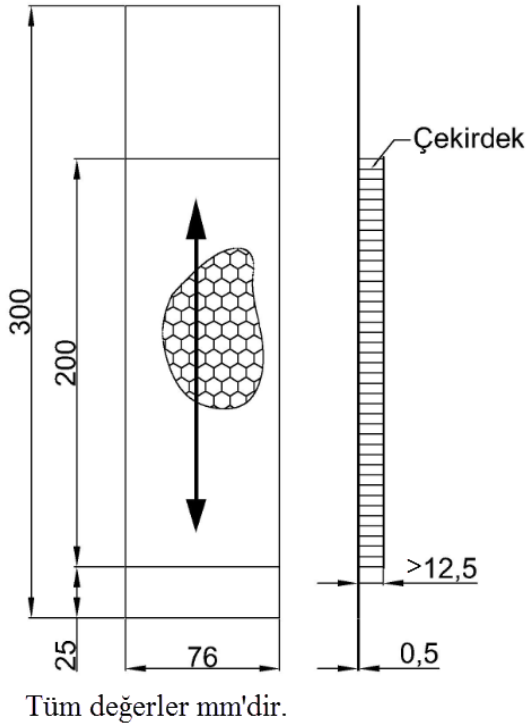
Şekil 3.9. Üç noktadan eğme deneyi için üretilen numuneler ve numunelerin test cihazına bağlanması



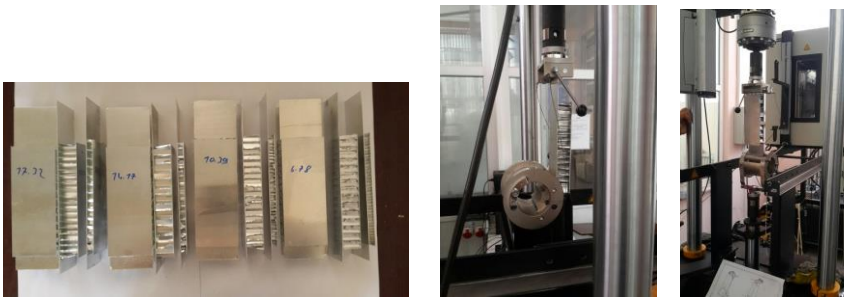
Şekil 3.10. ASTM E1556-08 standardında üç noktadan eğme testi

3.1.6. Soyma deneyleri

Soyma testleri yapıştırıcının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin ne kadar olduğunu araştırmak için yapılır. Soyma deneyleri ASTM D1781-98 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Soyma numuneleri hücre yüksekliği 30 mm, hücre genişliği 6,78-10,39-14,17-17,32 mm, takviyesiz ve %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcılar ile Şekil 3.11'de soyma testi için standart ölçüler verilmiştir. Şekil 3.12'de üretilen numuneler ve numunenin test cihazına bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Soyma testi için üretilen numuneler



Şekil 3.12. Soyma numuneleri ve çekme cihazına bağlanması

3.2. Sonlu Elemanlar Analizleri

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi oluşturulmuştur. Sonlu eleman yöntemiyle çözüm yapan ANSYS/Explicit Dynamics (sürüm 17, customer no: 1061539) programı kullanılmıştır. Analizlerde bal peteğini oluşturan bire bir gerçek yapı geometrisi oluşturulmuştur. Deneysel şartlar ile uyumlu çekirdek yapıyı oluşturan petek geometrisi ve sandviç model oluşturulmuştur. Analizlerde oluşturulan sonlu elemanlar modeli için programa girilen malzeme özellikleri değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çizelge 3.4'te ise yapıştırıcılar için programa girilen normal mukavemet ve kayma mukavemet değerleri verilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde çözümleme yapılırken hava direnci ihma edilmiştir.

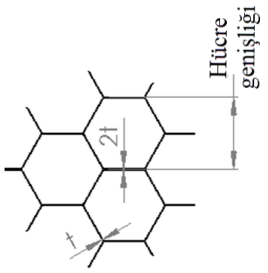
Table 3.3. Analizlerde tanımlanan malzeme özellikleri

Mekanik özellikleri	Alt üst katman malzemesi (Al. 1000 H14)	Çekirdek malzemesi (Al. 3000 H19)	Çelik
Yoğunluk (kg/m^3)	2710	2750	7850
Young's modülü (GPa)	69	70	200
Poison oranı	0,33	0,33	0,3
Elastikiyet modülü (MPa)	165	285	
Tanjant modülü (MPa)	140	160	

Table 3.4. Yapıştırıcı özellikleri

Yapıştırıcı	Normal mukavemet (MPa)	Kayma mukavemeti (MPa)
Epoksi	2,8	15
%1 MWCNT	1,3	19

Analizlerde kullanılan petek yapılar SolidWorks 2015 ile çizilmiş ve teorik çözümleme programı ANSYS'e aktarılmıştır. Şekil 3.13'te çizimi gerçekleştirilen petek yapı görülmektedir. Çekirdek yapılarda shell eleman ve 181 eleman özelliği kullanılmıştır.



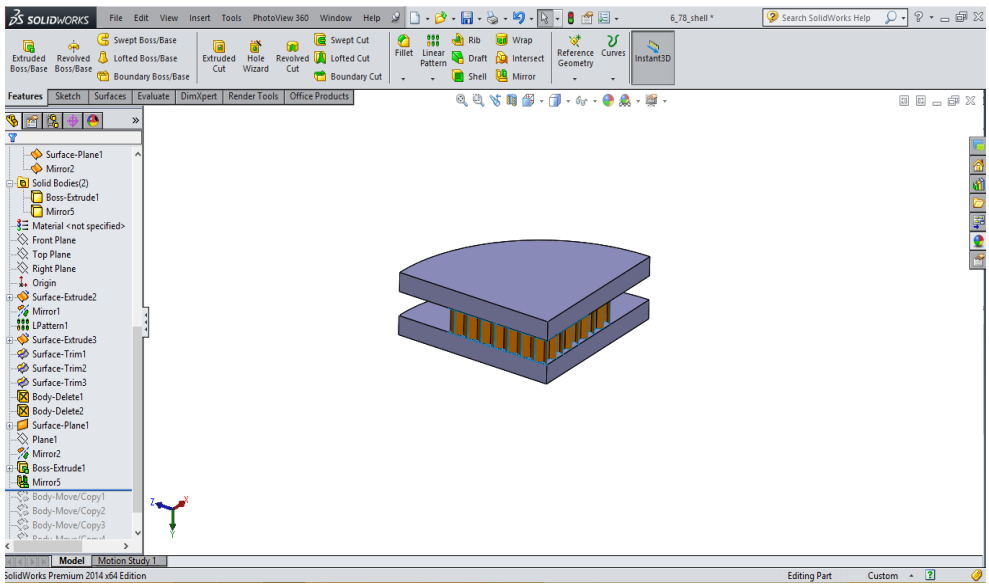
Şekil 3.13. SEA için çekirdek yapısı

Deneysel çalışmalarda kullanılan bal peteği deney düzenekleri ilk önce SolidWorks® 2015 (DassaultSystems, USA) programında gerçek yapı geometrisine göre kullanılan hücre genişlikleri dikkate alınarak yüzey olarak modellenmiştir. Oluşturulan modeller IGES (Initial Graphics Exchange Specification) formatına çevrilerek sonlu elemanlar programına gönderilmiştir.

Tüm modellerde deneysel ve teorik çalışmanın doğru karşılaştırılması için, deneysel çalışmada oluşturulan şartların tamamı sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Teroik çözüm süresi eleman ve nod sayısına göre değişiklik göstermektedir.

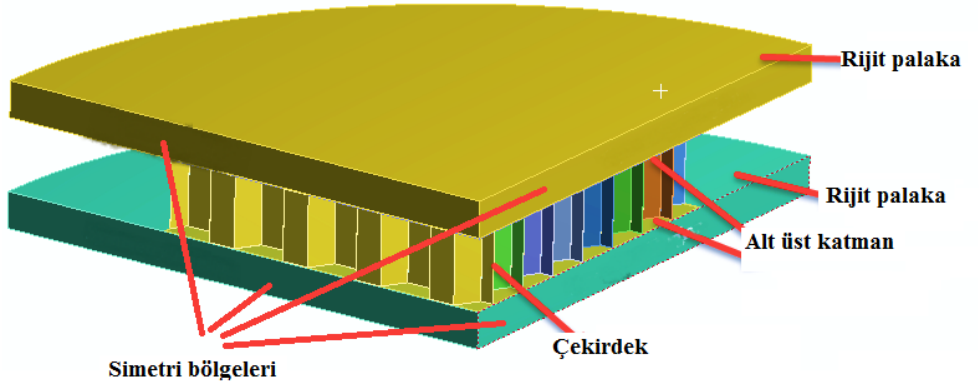
3.2.1. Basma deneyleri için SEA

Solid Works'te çizilen basma deney tasarımı Şekil 3.14'te görülmektedir.



Şekil 3.14. SolidWorks'ta çizilen basma deney düzeneği

ANSYS programı kullanılarak oluşturulan modeller, Şekil 3.15'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Çekirdek ve alt üst katman yapılarda ağ yapı boyutu 0,5 mm verildi. Çözüm süresinin kısaltılması açısından simetri bölgeleri tanımlanmıştır.



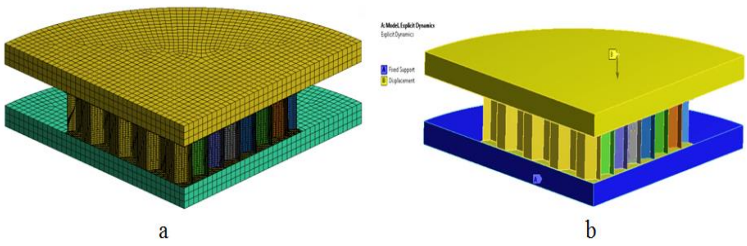
Şekil 3.15. Basma için oluşturulan model

Modellerde oluşan eleman ve nod sayısı Çizelge 3.5'te verilmiştir. Hücre genişliği arttıkça eleman ve nod sayısının azalması mesh boyutunun 0,5 mm olarak sabit tutulmasındandır.

Çizelge 3.5. Basma modellerinde elde edilen eleman ve nod sayıları

Deney no	Eleman sayıları	Düğüm sayıları
1	386918	379850
2	293098	288220
3	250850	246950
4	221219	218000
5	898518	889550
6	620698	614620
7	495650	490850
8	407919	404000

Deneysel çalışmayla aynı şartlara sahip olması amacıyla Şekil 3.16.b'de gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizi yapılırken alt tabaka sabitlenmiş, üst tabakadan ise 2 mm yer değiştirme uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan farklı olarak analizlerin çözüm süresini azaltmak ve basitleştirmek için simetri bölgeleri tanımlanmıştır.

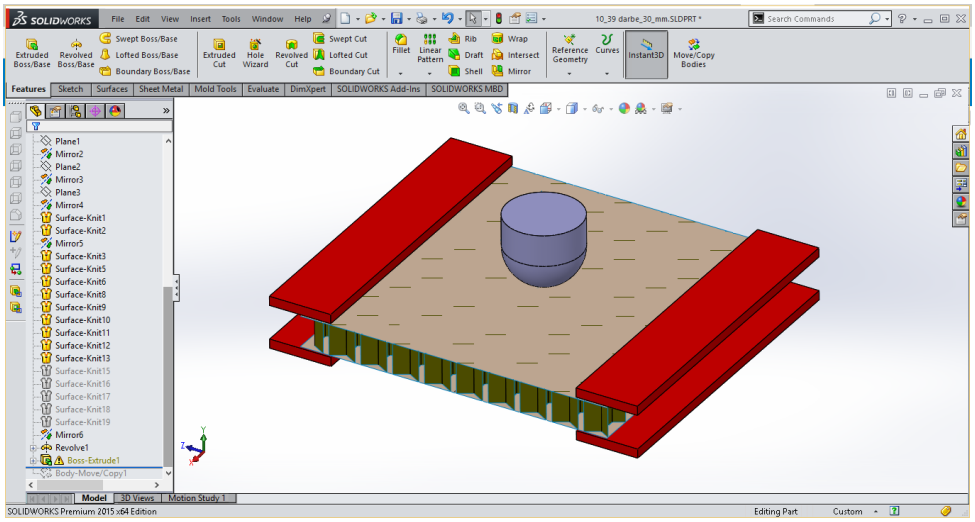


a b

Şekil 3.16. a) Basma için oluşturulan mesh modeli b) 2mm yer değiştirme

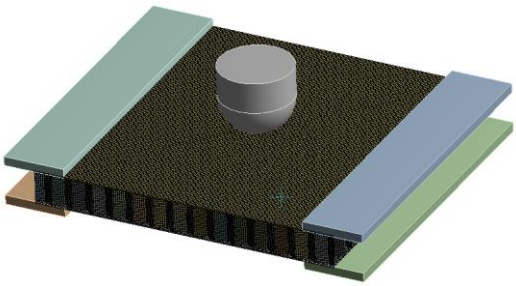
3.2.2. Düşük hız darbe deneyleri için SEA

Solid Works'te çizilen basma deney tasarımı Şekil 3.17'de görülmektedir.



Şekil 3.17. SolidWorks'ta çizilen darbe deney düzeneği

Darbe analizleri ANSYS yazılımında Explicit analiz kullanılarak Şekil 3.18'de görüldüğü gibi ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller için ağ yapısı hexahedral ve boyutu 0,5 mm belirlendi. Modellerde oluşan eleman sayısı ve nod sayısı Çizelge 3.6'da verilmiştir.

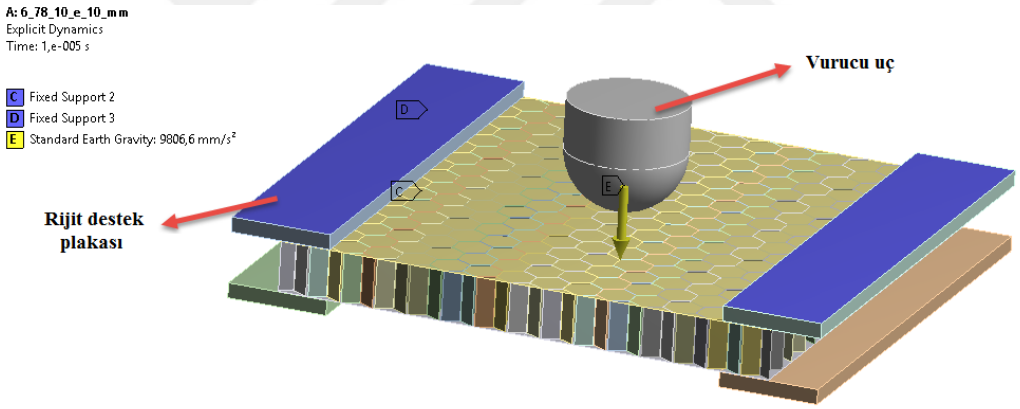


Şekil 3.18. Darbe için oluşturulan mesh modeli

Çizelge 3.6. Darbe modellerinde elde edilen eleman ve nod sayıları

Deney no	Eleman sayıları	Düğüm sayıları
1	558957	613534
2	508964	560528
3	498915	549476
4	485475	499635
5	881449	937891
6	831456	884885
7	821407	873833
8	807967	823992

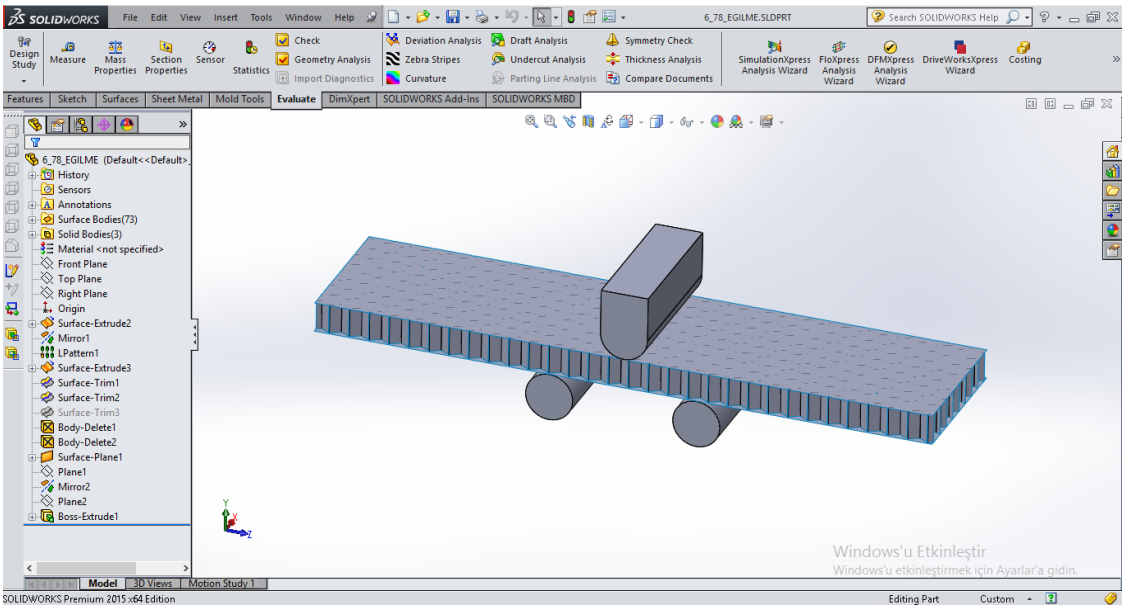
Deneysel çalışmayla aynı şartlara sahip olması amacıyla Şekil 3.19'da gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizinde yandaki rijit palakalarla fixed support seçilmiştir. 6,35 kg ağırlığa sahip vurucu uç 20,5 mm yükseklikten bırakılmıştır. Modellemede vurucuya herhangi bir ek kuvvet uygulanmadı. Vurucu uç yerçekimi kuvveti (G= 9806.6 mm/s^2) altında serbest bırakılmıştır.



Şekil 3.19. Darbe için tanımlanan sınır şartlar

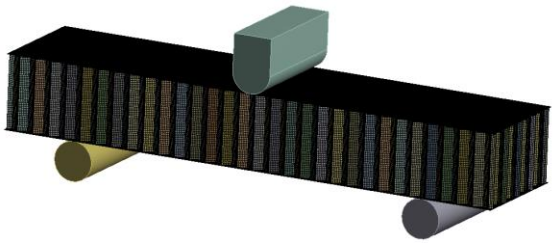
3.2.3. Üç noktadan eğme deneyleri için SEA

Solid Works'te çizilen üç noktadan eğme deney tasarımı Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20. SolidWorks'ta çizilen üç noktadan eğme deney düzeneği

Üç noktadan eğme analizleri ANSYS yazılımında Explicit analiz kullanılarak Şekil 3.21'de görüldüğü gibi ağ yapısı oluşturuldu. Oluşturulan tüm modeller için ağ yapısı hexahedral ve boyutu 0,5 mm verildi, Modellerde oluşan eleman sayısı ve nod sayısı Çizelge 3.7'de verilmiştir.

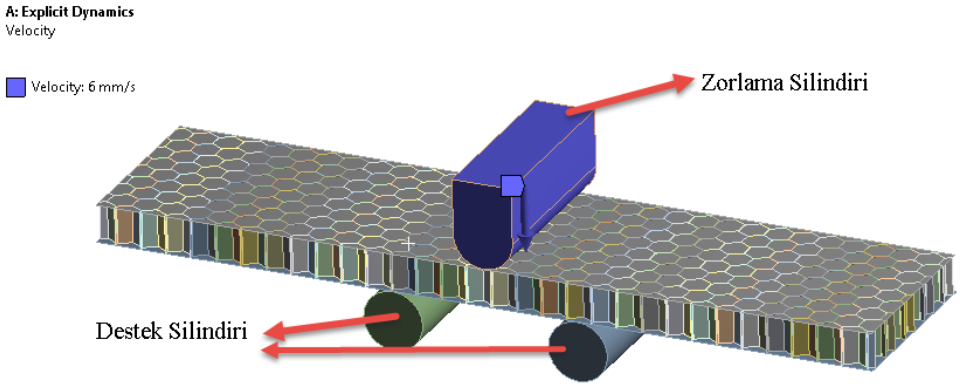


Şekil 3.21. Üç noktadan eğme için oluşturulan mesh modeli

Çizelge 3.7. Üç noktadan eğme modellerinde elde edilen eleman ve nod sayıları

Deney no	Eleman sayıları	Düğüm sayıları
1	567117	590287
2	497222	516353
3	427327	442419
4	357432	368485
5	913054	938927
6	717070	738151
7	521086	537375
8	325102	336599

Deneysel çalışmayla aynı şartlara sahip olması amacıyla Şekil 3.22'de gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizinde destek silindirleri üzerine deney numunesi yerleştirilerek üstten zorlama silindiri 6 mm/dk. hızla hücre yüksekliğine bağlı olarak 10 mm ve 30 mm yer değiştirme verilmiştir.



Şekil 3.22. Üç noktadan eğme için tanımlanan sınır şartlar

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu kısımda deneysel ve teorik sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması, ortalama deney sonuçları ile SEA sonuçlarının kıyaslanması, yüzdesel hata, numunelerde meydana gelen hasarlar incelenmiştir.

Sonuçların rahat kıyaslanabilmesi için üç tekrar olarak gerçekleştirilen deneylerin ortalama değerleri alınmıştır. Ekler kısmında tüm deney numunelerinin deneysel ve teorik görüntüleri birlikte verilmiştir.

4.1. Basma için Elde Edilen Sonuçlar

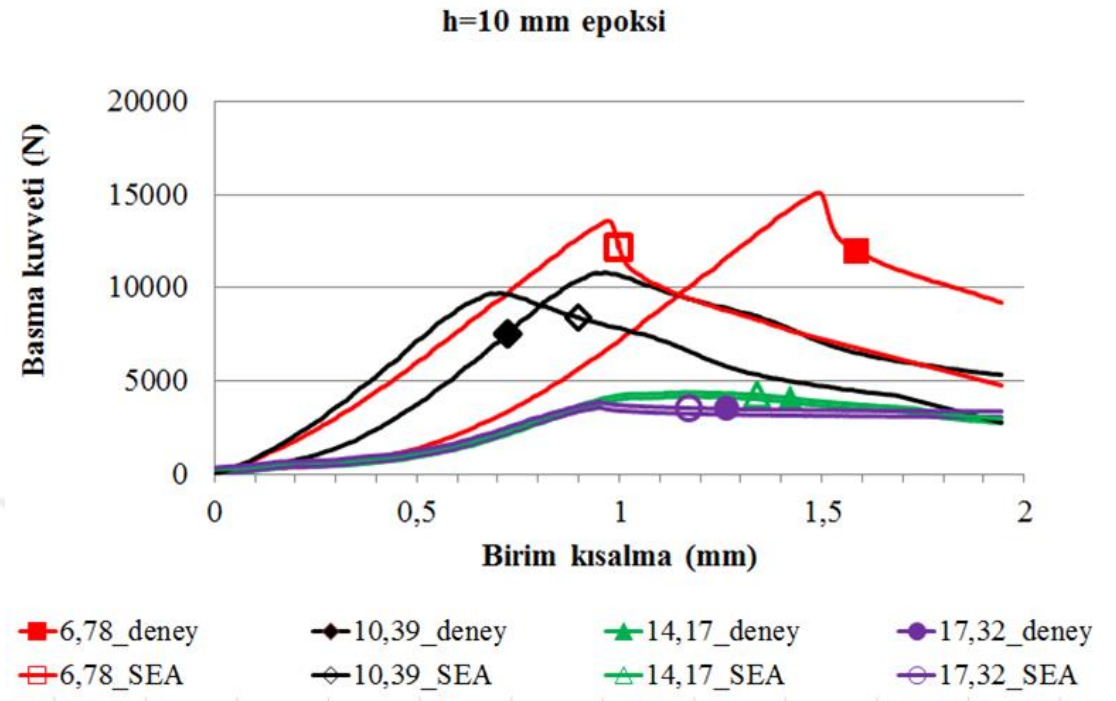
Şekil 4.1'de alüminyum bal peteği malzemenin basma sonucu göstermiş olduğu kuvvetin birim kısalmaya bağlı değişimi verilmiştir.

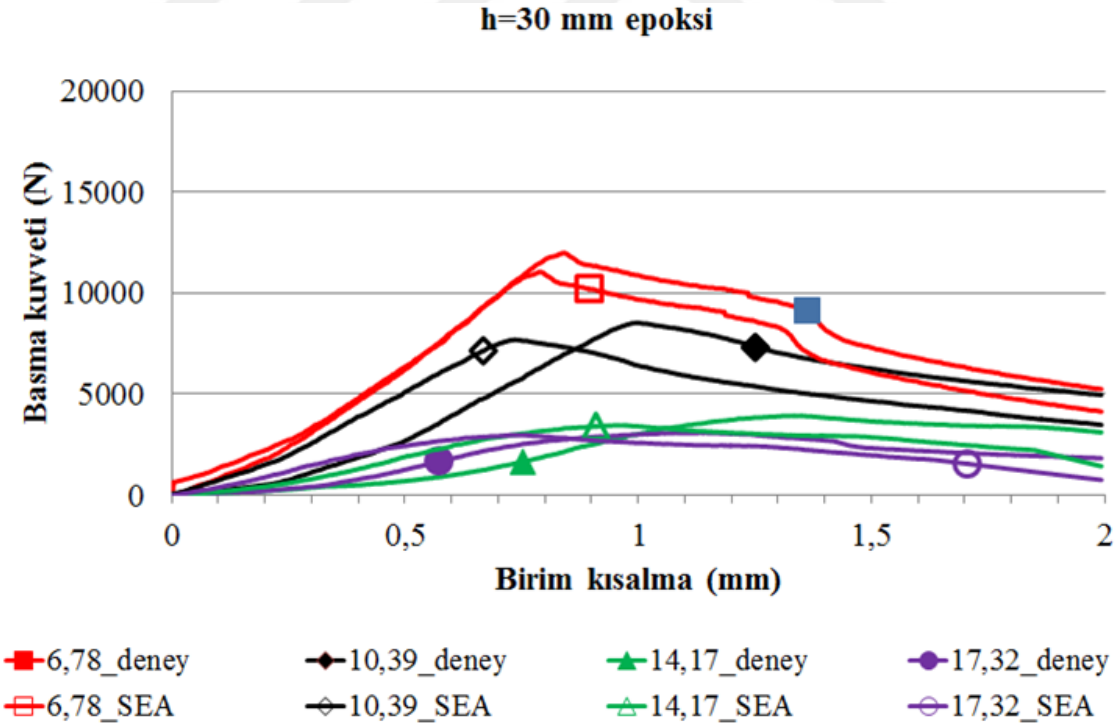
Şekil 4.1'de hücre genişliği sabit tutulup hücre yüksekliği arttırıldığında basma kuvvetinde bir azalma meydana geldiği tersi durumda artış olduğu sonucuna varılmaktadır. Hücre yüksekliği arttığında iç yapıda burkulma ve buna bağlı olarak çekirdeklerde yığılma ve yırtılma meydana gelmektedir.

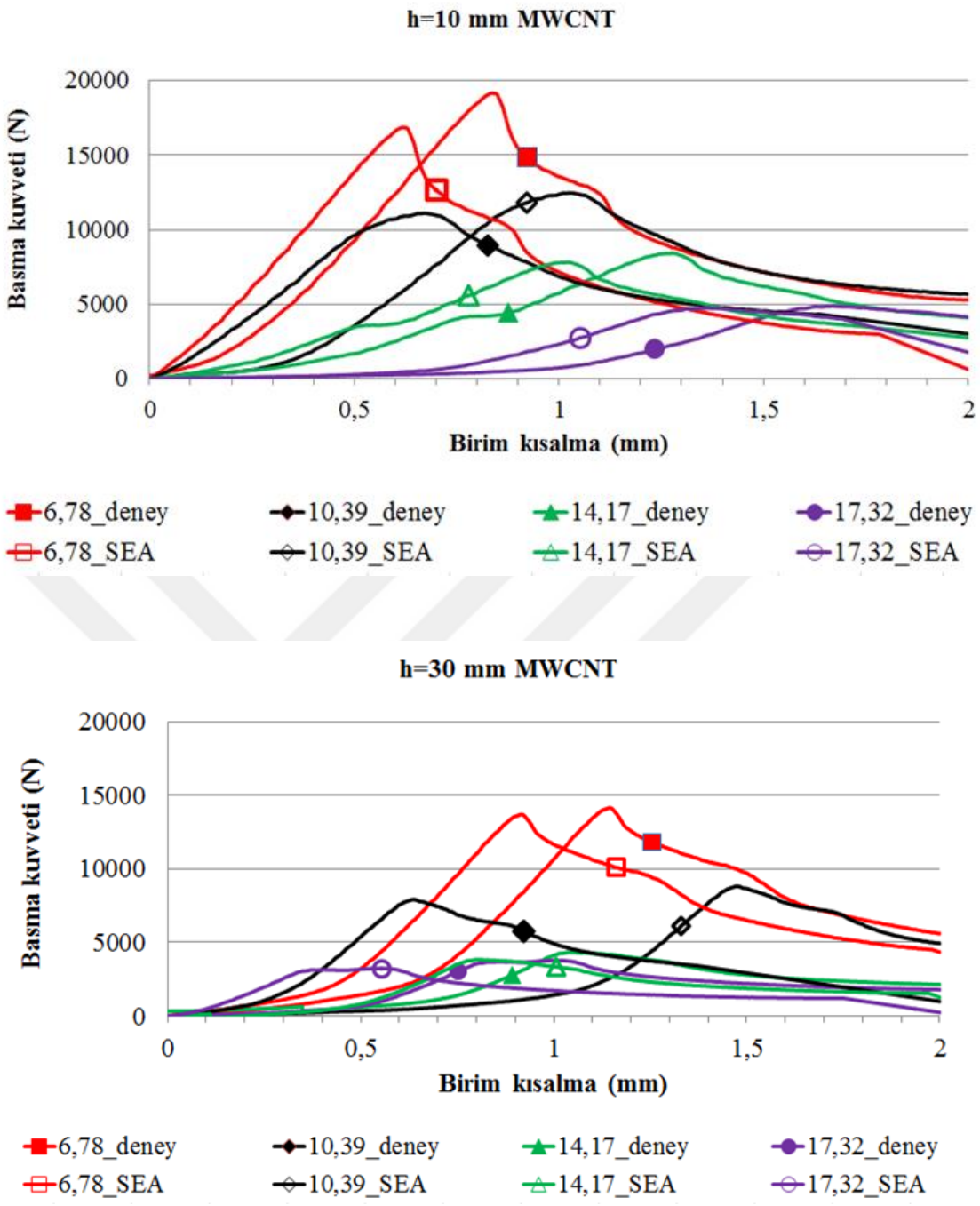
Şekil 4.1'de hücre yüksekliği için bakıldığında hücre genişliği arttıkça basma kuvvet değerlerinde bir azalma tersi durumda ise bir artış olduğu görülmektedir. Bunun sebebi hücre genişliği arttıkça yapıda meydana gelen boşluk miktarının artması ve buna bağlı olarak havanın çekirdek içerisini terk etmek istemesi ve basınçlı bir şekilde çekirdek duvarlarını ayırmasındandır. Şekil 4.4'te SEA sonuçlarında çekirdek iç yapısına bakıldığında bu kopmalar görülmektedir. Kopmalar dış bölgelerde çekirdekte bağlantısında kopma şeklinde meydana gelirken iç bölgelerde karşılıklı direnç oluşturmaktadır. Dış bölgeden boşana çekirdekler basmaya devam edildikçe içeri kısımdaki çekirdek boşluklarında kopma veya ayrılma olarak kendini göstermektedir.

Şekil 4.1 basma kuvvetlerine yapıştırıcının etkisi açısından bakıldığında epoksi içerisine katılan MWCNT'nin basma kuvvetlerinde artma sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi yapıştırıcının belirlenmesi kısmında ifade edildiği gibi yüzeyde tutunma alanını arttırmasındandır.

Şekil 4.1 deneysel ve teorik çözümleme sonuçları incelendiğinde sonuçlar arasındaki paralellik memnuniyet vericidir. Buradan da anlaşılacağı gibi basma deney şartları teorik çözümleme programı ANSYS'e doğrulukla tanıtılmıştır.


h=10 mm epoksi
Basma kuvveti (N)
20000
15000
10000
5000
0
0
0,5
1
1,5
2
Birim kısalma (mm)
6,78_deney
10,39_deney
14,17_deney
17,32_deney
6,78_SEA
10,39_SEA
14,17_SEA
17,32_SEA


h=30 mm epoksi
Basma kuvveti (N)
20000
15000
10000
5000
0
0
0,5
1
1,5
2
Birim kısalma (mm)
6,78_deney
10,39_deney
14,17_deney
17,32_deney
6,78_SEA
10,39_SEA
14,17_SEA
17,32_SEA



Şekil 4.1. Basma için kuvvet-birim kısalma grafikleri

Ek 1'de basma testi için deney ve analiz sonucu yapıda meydana gelen hasarlar verilmiştir. Ek 1 incelendiğinde yapıda meydana gelen hasar yapılarının maksimum ve minimum ezilme noktaları benzer olduğu görülmektedir. Alt üst katmanın basmada şekil değişikliği meydana getirmediği görülmektedir. Şekil değişiklikleri çekirdek iç bağlantılarında başta olmak üzere çekirdek-alt-üst katman bağlantılarında kopma, ayrılma ve yığılma olarak meydana gelmiştir.

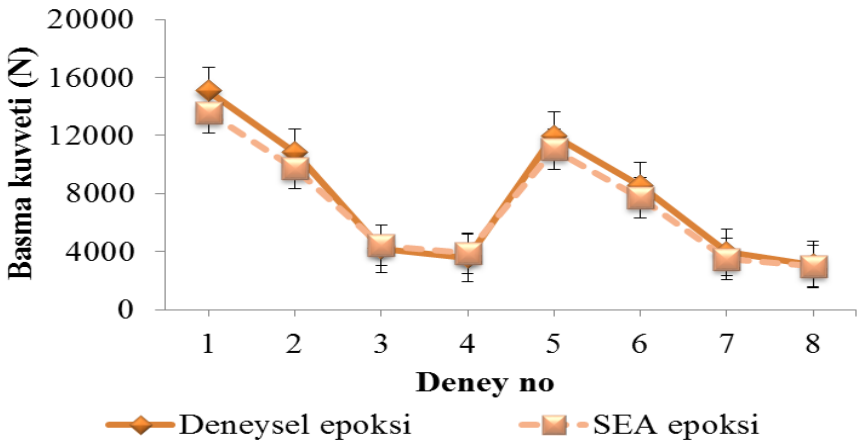
Çizelge 4.1'de deney sonuçları ile SEA sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerleri birlikte verilmiştir. Çizelge 4.1, Şekil 4.1 için yapmış olduğumuz açıklamaları daha iyi görmemize imkan sağlamaktadır.

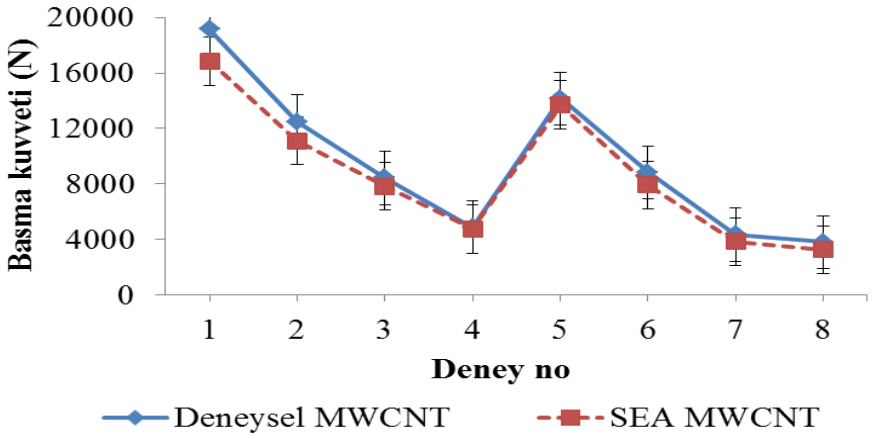
Basma için elde edilen sonuçlarda maksimum reaksiyon kuvvetinin 6,78 mm hücre genişliği, 10 mm hücre yüksekliğine sahip MWCNT yapıştırıcı ile birleştirmede oluştuğu, minimum reaksiyon kuvvetinin 17,32 mm hücre genişliği 30 mm hücre yüksekliğine sahip epoksi birleştirmede oluştuğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deney ve SEA sonucu elde edilen maksimum basma kuvvet değerleri

Deney no	Deneysel epoksi (N)	SEA epoksi (N)	Deneysel MWCNT (N)	SEA MWCNT (N)
1	15098,13	13583,13	19156,71	16861,71
2	10829,53	9725,52	12488,53	11120,53
3	4191,29	4420,28	8432,45	7834,44
4	3579,24	3880,23	4884,81	4751,81
5	11994,45	11052,45	14148,85	13697,85
6	8539,01	7700,01	8829,97	7926,96
7	3943,70	3467,70	4342,97	3842,97
8	3092,34	2985,70	3798,87	3256,87

Oluşturulan model sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin grafiksel karşılaştırılması Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde elde edilen sonuçların deney sonuçlarına paralellik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen bulgulardaki farklılıklar yapıştırıcıdaki MWCNT kümelenmesi, petek yapıların deney numunelerinde farklı yerde başlamasından veya çekirdek folyosunun kalınlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.





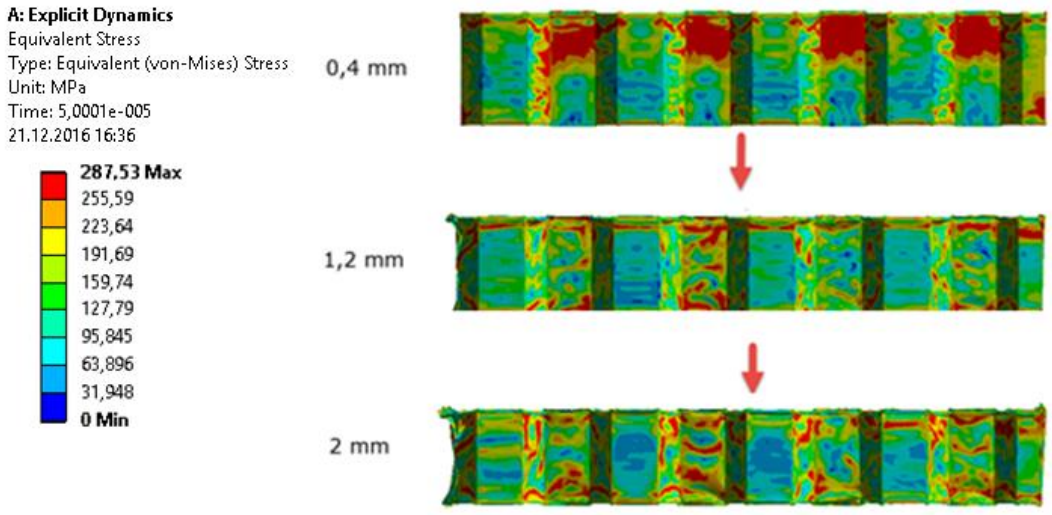
Şekil 4.2. Deneysel ve SEA sonuçlarının kıyaslanması

Çizelge 4.2'de yapılan analiz sonucu elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonuçları arasındaki yüzde sapma hesaplanarak verilmiştir. Bu hesaplama işleminde deney ve simülasyon sonucu birbirinden çıkarılıp, deney sonucuna bölünmesi ile % hata değeri hesaplanmaktadır. 100'den hata değeri çıkarıldığında doğruluk değeri elde edilmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde yapılan çözümlerin yaklaşık %85,73 örtüştüğü görülmektedir.

Çizelge 4.2. Deney ve SEA basma kuvvet sonuçları arasındaki yüzde fark

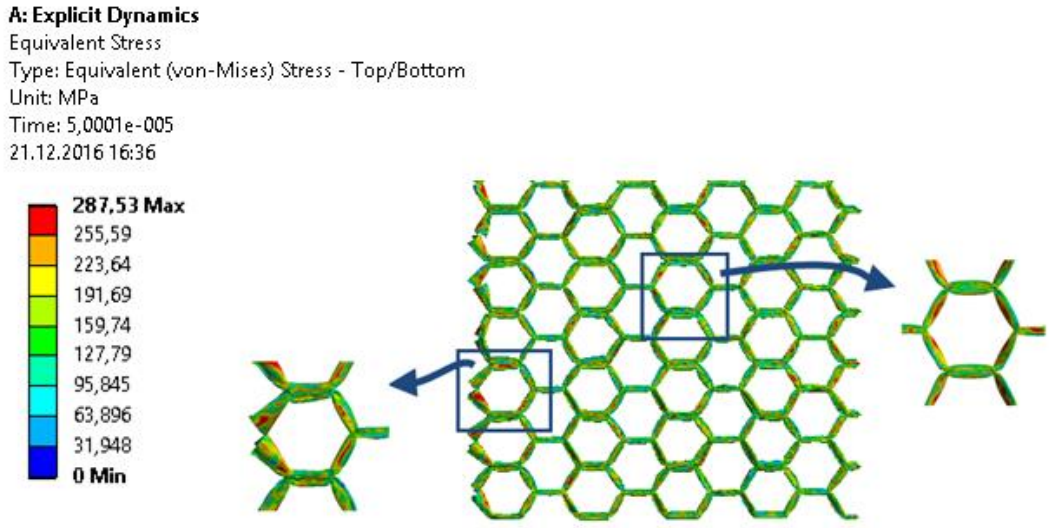
Deney No	Epoksi (% hata)	MWCNT (% hata)
1	10,03	11,98
2	10,19	10,95
3	5,46	7,09
4	8,41	2,72
5	7,85	3,19
6	9,83	10,23
7	12,07	11,51
8	3,45	14,27

Şekil 4.3 incelendiğinde 0,4-1,2-2 mm yer değiştirme için bal peteği yapıda meydana gelen deformasyonlar görülmektedir. Yapının kenarlarına bakıldığında deney numunelerinde olduğu gibi bir açılma söz konusu olduğu görülmektedir. 0,4 mm yer değiştirmede kırmızı olan bölgelerin 2 mm nihai yer değiştirmede baskıya daha fazla dayanamayarak çekirdek yapıda ayrılmalar meydana geldiği görülmektedir. Ek 1 incelendiğinde bu yapılar görülmektedir.



Şekil 4.3. Çökme miktarına göre şekil değişikliği

Şekil 4.4 incelendiğinde yapının kenar bölgelerinde basınca dayanamayarak çekirdekte ve alt-üst katmanda ayrılma şeklinde hasar meydana geldiği, iç bölgelerde ise hasarın ezilme şeklinde olduğu görülmüştür. İç bölgelerde beklenen hasar mekanizması görülmektedir. Dış bölgelerde çekirdekte ayrılma olmasının sebebi ise altıgen yapının tam oluşmaması ve yanında direnç sağlayacak çekirdek yapının eksikliğidir. Diğer bir ifade ile serbest yüzeylerin deformasyonunun daha kolay olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük hız darbede hasar sadece üst yüzey ezilmesi olarak meydana gelmiştir.



Şekil 4.4. 2 mm yer değiştirme sonunda meydana gelen gerilmeler

4.2. Düşük Hız Darbe için Elde Edilen Sonuçlar

Düşük hızlı darbe deneylerinde vurucu kütlesinin serbest düşme öncesinde sahip olduğu darbe enerjisini aşağıdaki mekanizmalara harcamaktadır (Metin, 2008).

1. Sıçrama enerjisine,
2. Kuvvet algılayıcıda harcanan enerjiye,
3. Darbe ucunda tüketilen enerjiye,
4. Mesnet sisteminde tüketilen elastik enerjiye,
5. Bağlama noktalarındaki kayma enerjisine,
6. Numuneye iletilen enerjiye (Numunede tüketilen elastik enerji ve hasar enerjisiye).

Şekil 4.5' te alüminyum bal peteği malzemenin darbe yüklemesine maruz kalması neticesinde göstermiş olduğu kuvvetin yer değiştirmeye bağlı değişimi verilmiştir. Şekillerde meydana gelen çift yada üç eğim ilk önce tabaka ve çekirdek arasındaki direncin aşıldığını daha sonra çekirdek yapının darbeye yanıt verdiğini göstermektedir. Hasar gelişimi ve/veya darbelerin farklı yerlere vurulmuş olabileceği söz konusudur.

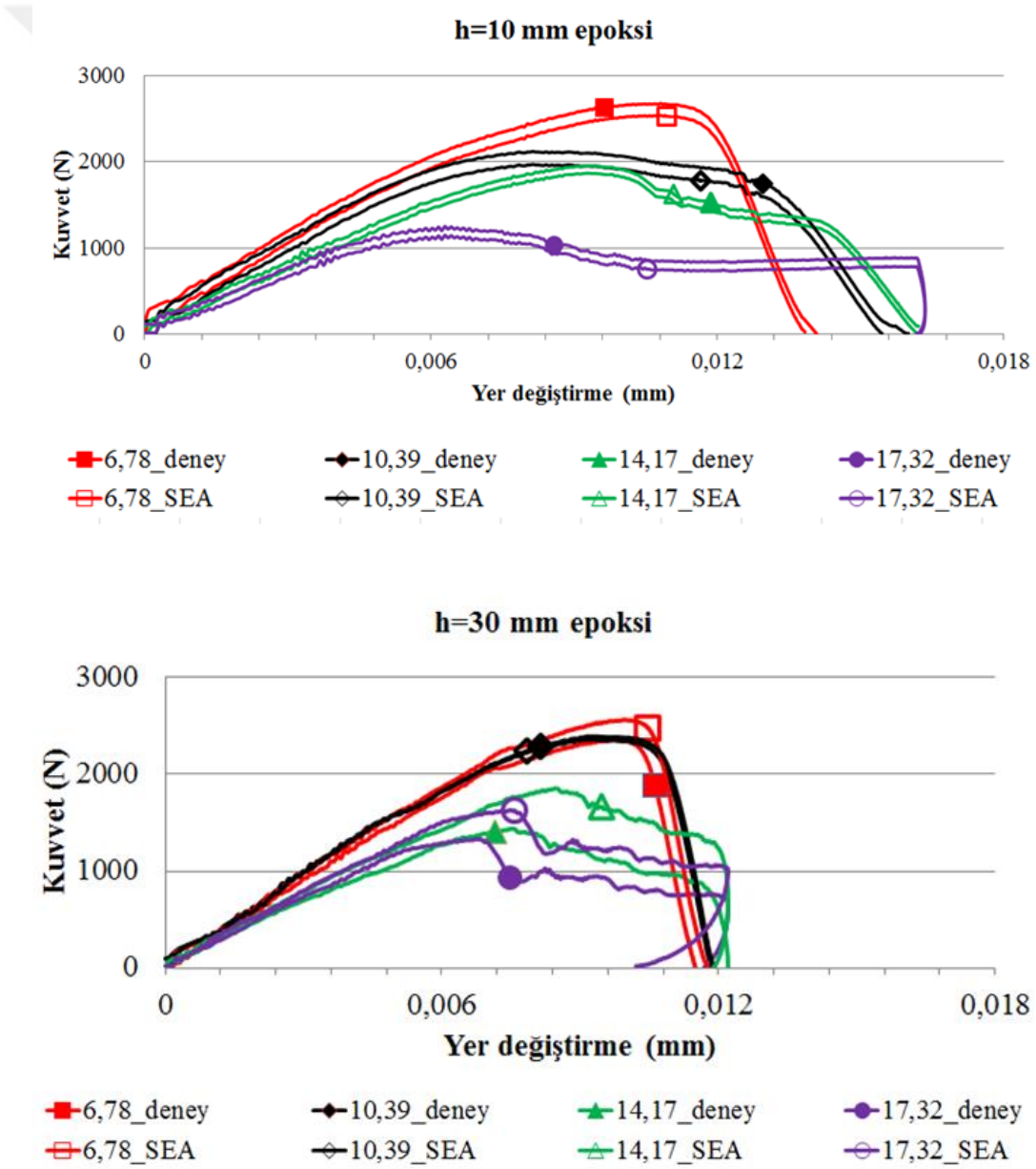
Şekil 4.5'te aynı hücre yüksekliği için bakıldığında hücre genişliği küçüldükçe kuvvet değerinde bir artma tersi durumda azalma olduğu görülmektedir. Küçülen hücre genişliği malzemenin birim alanda artış göstermesi anlamına geldiği için oluşan yapıda deformasyon oluşturabilmek için daha fazla kuvvet uygulanması gerektiğini ifade eder. Yani yapıda deformasyon olabilmesi için daha fazla darbe yüklerine maruz kalması gerekir. Bu bilgiler sonucunda 6,78 mm hücre genişliğine sahip malzemelerin deney ve SEA grafiklerinden de görüldüğü gibi darbe kuvveti daha yüksektir. En düşük olan ise 17,32 mm hücre genişliğine sahip yapıdır.

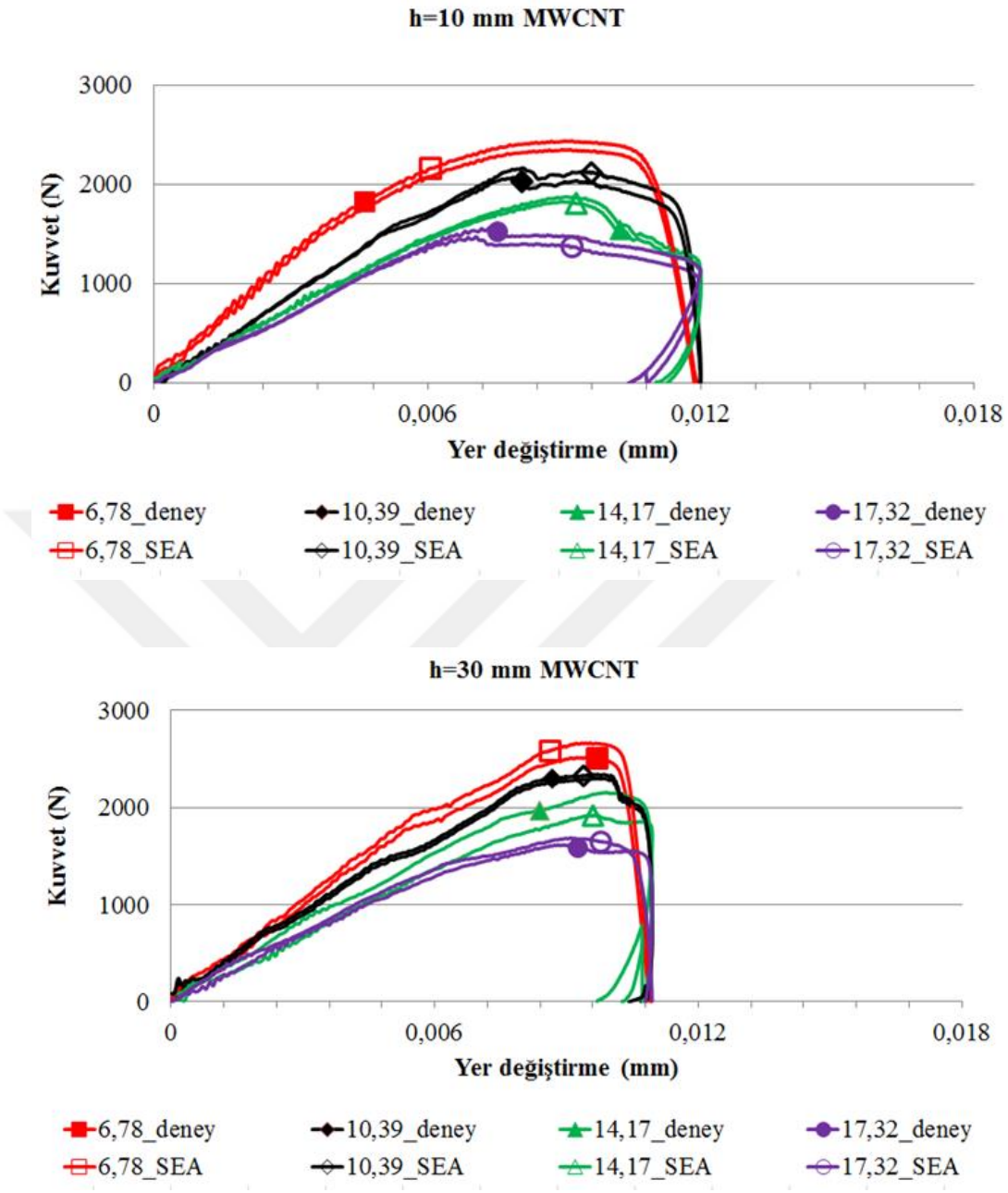
Şekil 4.5'te aynı zamanda hücre genişliği sabit tutulup hücre yüksekliği arttırıldığında darbe kuvvetinde bir artış meydana geldiği tersi durumda azalma olduğu sonucuna varılmaktadır. Burada çekirdek yapı yüksekliğinden dolayı batma şeklinde gelen darbeyi absorbe ettiği için daha fazla darbe kuvvetine dayanabilmektedir. Yüksekliğin haddinden fazla artması ise burkulmaları arttırarak çekirdek direncini azaltmaktadır. Hücre yüksekliği 30 mm olan yapılarda darbe kuvveti daha yüksektir.

Güneş (2013); genel olarak benzer şekil parametresine sahip numunelerde derinlik parametresi yüksek olanda maksimum kuvvet değerinin daha yüksek olduğunu ifade etmiştir.

Şekil 4.5'te MWCNT takviyeli yapıştırıcı daha fazla kuvvete dayanabiliyorken epoksi yapıştırıcı daha az kuvvete dayanabildiği görülmektedir. Buda MWCNT'lerin yüzeye daha çok tutunduğunun göstergesi ve nano yapıştırıcıların yapışan yüzey alanını arttırıcı özelliğinin bir sonucudur.

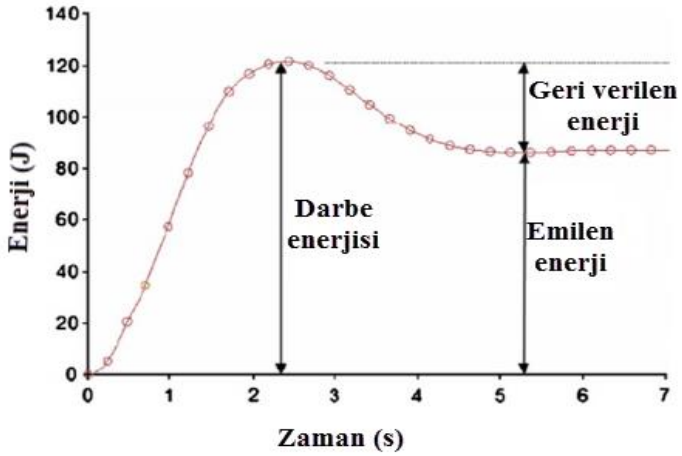
Şekil 4.5 deney sonuçları ve SEA sonuçları olarak incelendiğinde sonuçlar arasındaki paralellik gösterdiği görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi düşük hız darbe deney şartları SEA programına doğrulukla tanıtılmıştır.





Şekil 4.5. Darbe sonucu meydana gelen kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Şekil 4.6'da anlaşılacağı gibi enerji zaman grafiklerinde eğrinin en üst noktası darbe enerjisini, en üst nokta ile eğrinin bittiği yer geri verilen enerjiyi ve eğrinin bittiği yerde aşağıdaki yer ise emilen enerjiyi göstermektedir (Tan ve Akil, 2012). Burada verilen sonuçlar bu grafik doğrultusunda yorumlanacaktır.



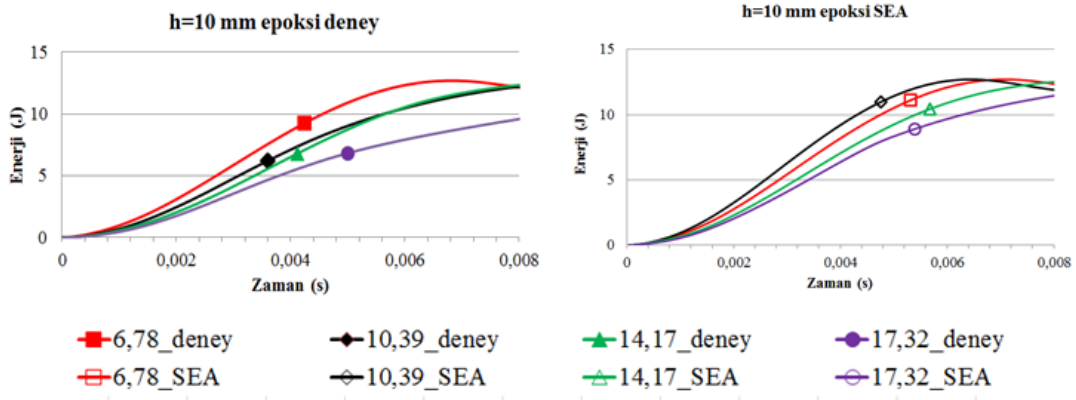
Şekil 4.6. Enerji zaman grafiği (Tan ve Akil, 2012)

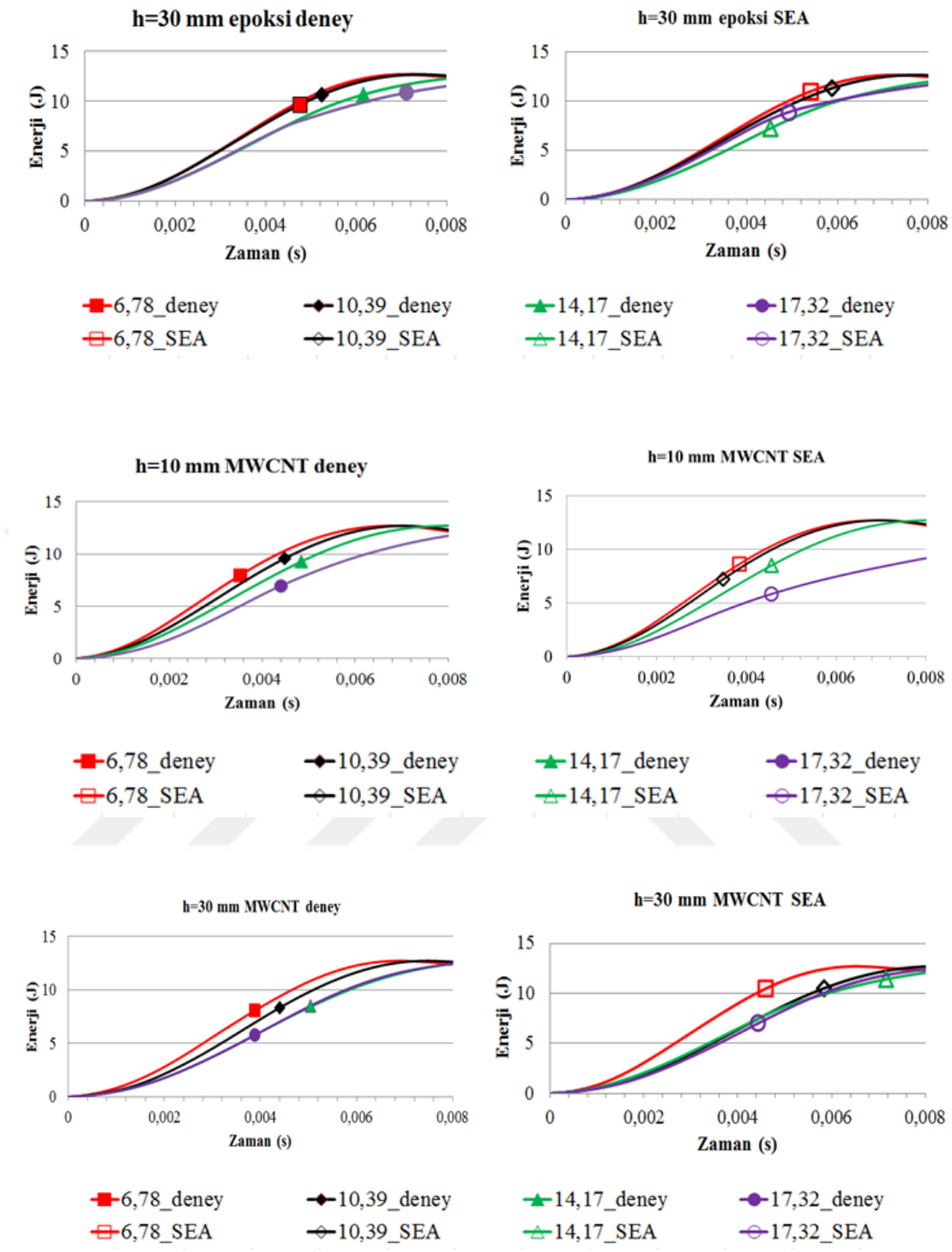
Şekil 4.7'de alüminyum bal peteği yapılardaki birikimli enerji absorbsiyon kapasiteleri görülmektedir. Grafiklerin elde edilmesinde birikimli enerji metodu kullanılmıştır. Deney ve SEA sonuçlarının paralellik arz etmesi memnuniyet vericidir.

Malzemelerin darbe yüklemeleri altında rijitliğinden bir şey kaybetmemesi ve yapıyı koruması istenir. Malzeme elastik olarak ne kadar fazla enerji absorbe ederse o kadar az hasara uğrar (Güneş, 2013).

Grafikler dikkatli bir şekilde incelendiğinde MWCNT'nin darbe yüklemesine cevabının daha kısa sürede gerçekleştiği görülür.

Enerji-zaman grafiklerindeki kırıklar delaminasyon oluşumuna karşılık gelmektedir. Bunun sonucu eğme rijitliğini düşmekte ve buna paralel elastik enerji absorbe etme yeteneği azalmaktadır. Grafikler incelendiğinde enerjisinin yaklaşık %80'i absorbe edilirken %20'si ise geri iade edilmiştir.





Şekil 4.7. Darbe sonucu meydana gelen enerji-zaman grafikleri

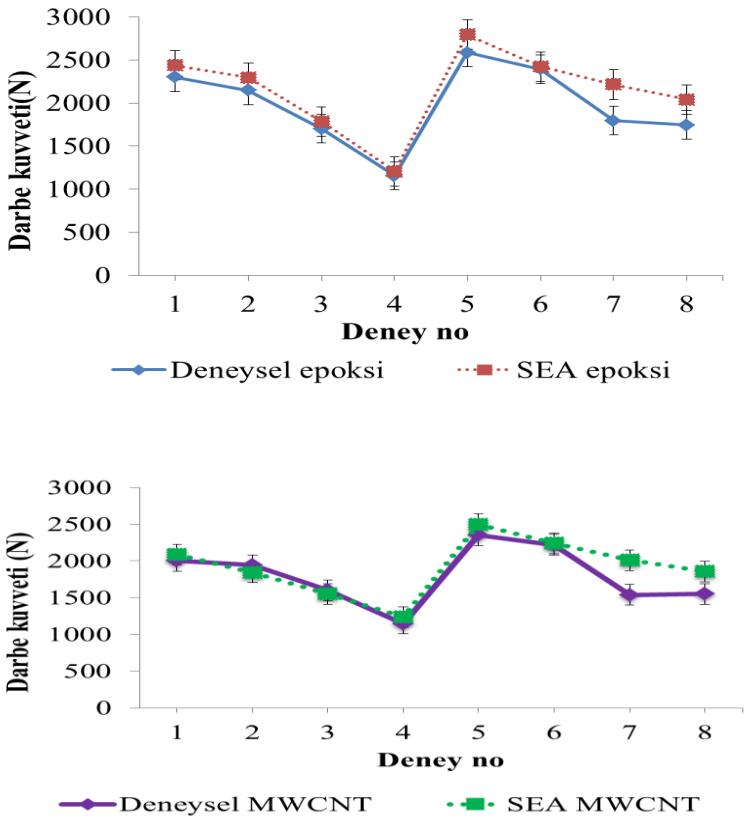
Darbe analizleri sonucunda elde edilen maksimum reaksiyon kuvvetleri Çizelge 4.3'te verilmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen değerler deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Oluşan farklılıklar deney şartlarının uyumsuzluğu ve yapıştırıcının homojen olarak sürülmediğinden dolayı oluştuğu

düşünülmektedir. Ayrıca modeller oluşturulurken vurucunun düştüğü yerin aynı olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Deney ve SEA sonucu elde edilen maksimum darbe kuvvet değerleri

Deney no	Deneysel epoksi (N)	SEA epoksi (N)	Deneysel MWCNT (N)	SEA MWCNT (N)
1	2299	2437	2000	2087
2	2146	2296	1942	1846
3	1701	1786	1600	1551
4	1155	1207	1148	1236
5	2585	2792	2350	2500
6	2392	2424	2220	2240
7	1796	2213	1540	2010
8	1743	2040	1550	1855

Darbe için elde edilen sonuçlarda maksimum reaksiyon kuvvetinin 6,78 mm hücre genişliği, 30 mm hücre yüksekliğine sahip MWCNT yapıştırıcı ile birleştirmede oluştuğu, minimum reaksiyon kuvvetinin ise 17,32 mm hücre genişliği 10 mm hücre yüksekliğinde oluştuğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.8. Darbe kuvveti için deney ve SEA sonuçlarının kıyaslanması

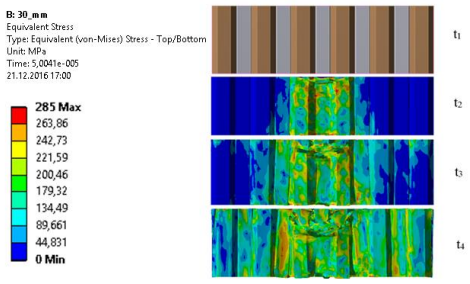
Oluşturulan model sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin grafiksel karşılaştırılması Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde elde edilen sonuçların deney sonuçlarına paralellik göstermesi memnuniyet vericidir. Elde edilen bulgulardaki farklılıklar yapıştırıcının deneysel olarak homojen dağılmaması, petek yapıların deney numunelerinde farklı yerde başlamasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.4'te yapılan analiz sonucu elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonuçları arasındaki yüzde sapma hesaplanarak verilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde yapılan çözümlerin yaklaşık %80,42 örtüştüğü elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Deney ve SEA darbe kuvvet sonuçları arasındaki yüzde fark

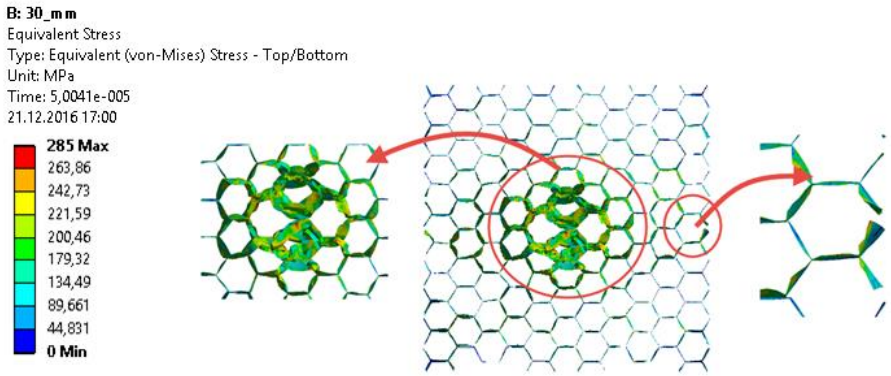
Deney no	Epoksi (% hata)	MWCNT (% hata)
1	13,01	14,39
2	9,51	19,58
3	5,94	13,17
4	0,58	2,44
5	9,08	10,46
6	7,19	7,58
7	14,23	9,17
8	11,08	9,09

Şekil 4.9 incelendiğinde darbe sonucu bal peteği yapıda meydana gelen deformasyon görülmektedir. Yapının kenarlarına bakıldığında deney numunelerinde olduğu gibi bir açılma söz konusu olduğu görülmektedir. Vurucunun parçaya saplanma miktarına göre orta bölgede nihai yer değiştirmede darbeye daha fazla dayanamayarak çekirdek yapıda ayrılmalar meydana geldiği görülmektedir. Buda darbenin ortadan kenarlara doğru yayıldığını göstermektedir. Deney numuneleri ile kıyaslama yapıldığında t4 anında meydana gelen darbe hem deneysel hem sonlu elemanlar çalışmasında paralellik gösterdiği Ek 2'de görülmektedir.



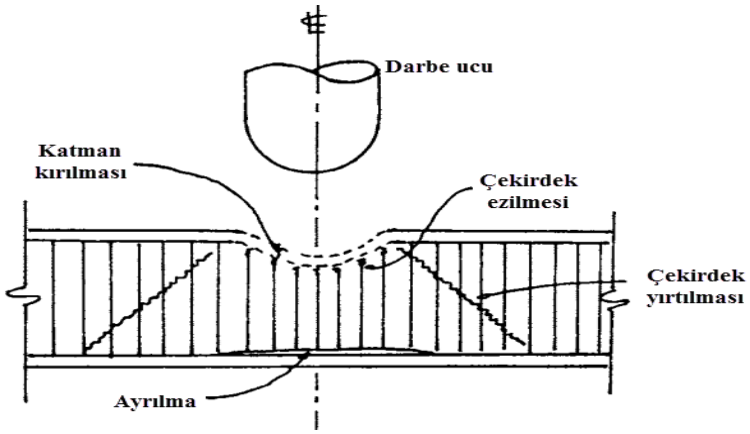
Şekil 4.9. SEA'nde çekirdeğin zamana bağlı şekil değiştirmesi

Şekil 4.10 incelendiğinde vurucu ucun etki ettiği kısımdaki çekirdeğin daha fazla şekil değiştirdiği kenarlara doğru bu hasarın azalarak iletildiği görülmektedir. Kenar bölgelerinde basınca dayanamayarak çekirdekte ve alt-üst katmanda ayrılma şeklinde hasar meydana geldiği, iç bölgelerde ise hasarın ezilme şeklinde olduğu görülmüştür. İç bölgelerde beklenen hasar mekanizması görülmektedir. Dış bölgelerde çekirdekte ayrılma olmasının sebebi ise altıgen yapının tam oluşmaması ve yanında direnç sağlayacak çekirdek yapının eksikliğidir.



Şekil 4.10. Çekirdekte meydana gelen hasarlar

Ek 2'de düşük hız darbe testi deney sonucu ve analiz sonucu yapıda meydana gelen hasar örneği verilmiştir. Ek 2 incelendiğinde yapıda meydana gelen hasar yapılarının benzerlik gösterdiği görülmektedir. Darbe sonucu yapıda meydana gelen hasarlar üst katman ve çekirdek arasında yapıştırıcı filminin kopması, üst katmanda yırtılma, çekirdek yapıda bozulma şeklinde ortaya çıkmaktadır. ASTM D7766 standardına göre oluşan hasar Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Ek 2'deki fotoğraflarda mevcut yapılar görülmektedir.



Şekil 4.11. ASTM D7766 standardına göre oluşan hasar

4.3. Üç Noktadan Eğme için Elde Edilen Sonuçlar

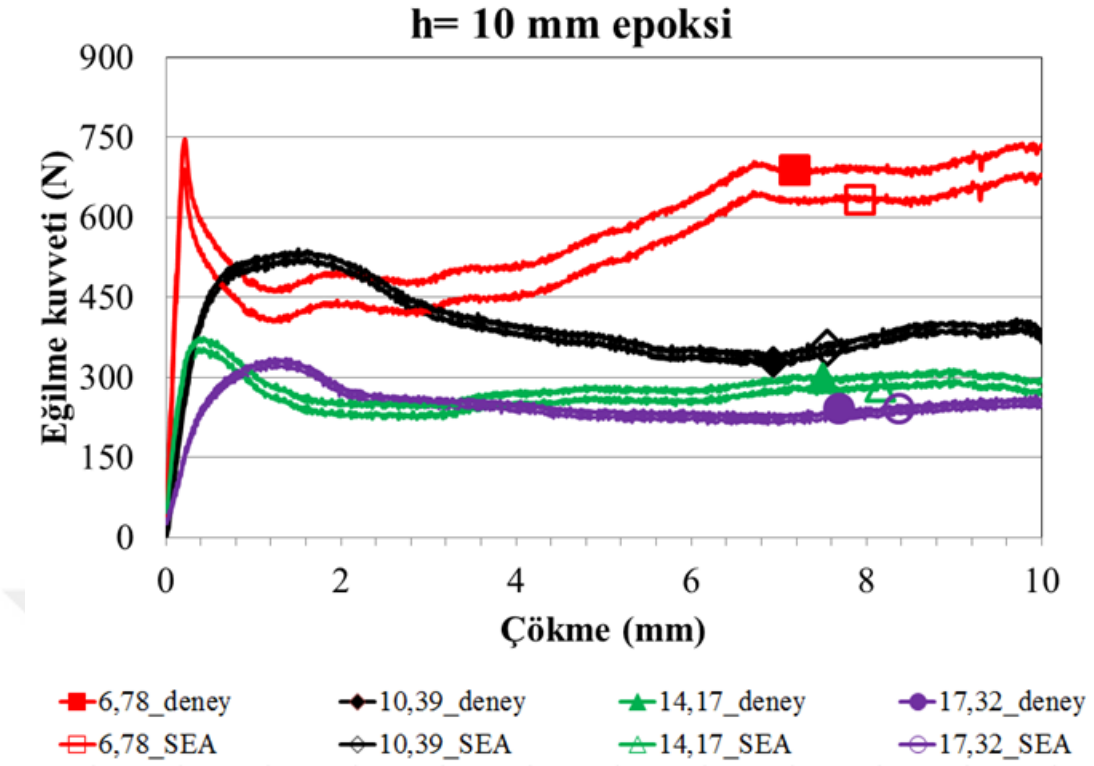
Üç noktadan eğme deneyleri sonucunda eğmeye sebep olan kuvvet-çökme grafikleri ölçüldü. Deneysel ve sonlu elemanlar sonucu yapıda meydana gelen kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde genelde ilk tepe noktasından sonra kuvvette bir azalma daha sonra hafif bir artma meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi eğme ile malzeme ezilmeye devam ettikçe daha rijit bir yapı oluşmasındandır.

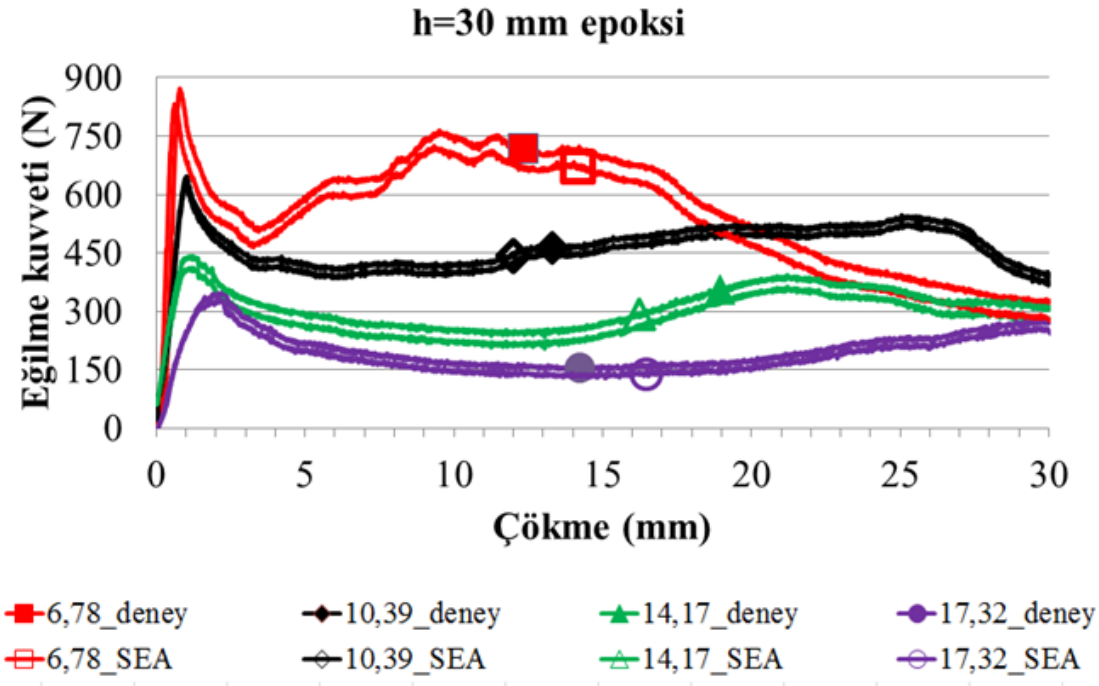
Şekil 4.12 hücre genişliği sabit tutulup hücre yüksekliği arttıkça eğme kuvvetlerinde bir artış olduğu görülmektedir. Bunun sebebi hücre yüksekliği arttıkça birim alanda artma olmakta ve buna bağlı olarak yapıda hasar meydana getirmek için daha fazla kuvvet ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Artan hücre yüksekliği burkulma dayanımını arttırdığı için eğme zorlayan kuvvet değerleri artmaktadır.

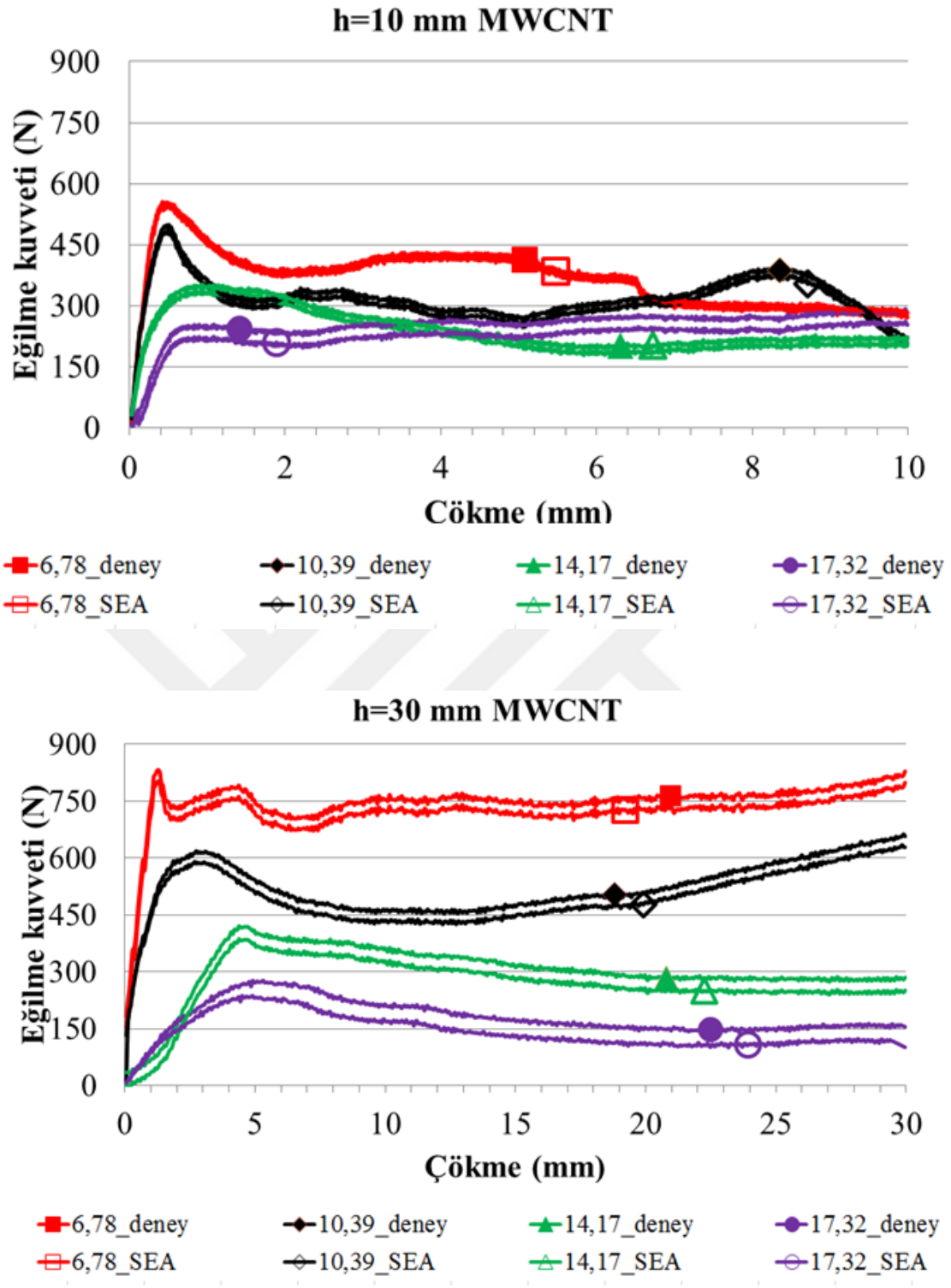
Şekil 4.12 hücre yüksekliği sabit tutulup hücre genişliği arttıkça eğme kuvvetlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma malzemedeki boşluk miktarının artması sonucu eğme kuvvetine karşı direnç oluşturacak malzemenin eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Artan hücre genişliği yapıda boşluklar meydana getirdiğinden eğme kuvvetleri azalmaktadır.

Şekil 4.12 yapıştırıcı açısından incelendiğinde epoksi içerisine katılan MWCNT'nin eğme kuvvetlerinde bir azalmaya sebebiyet verdiği görülmektedir. Malzeme eğmeye zorlanırken yüzeylerde meydana gelen kayma MWCNT'lerde daha kolay hareket etmekte ve yapı daha az bir kuvvetle şekil değişikliğine uğramaktadır. Yapıştırıcı içerisine katılan katı parçacıklar yüzey tutunmasını engellediğinden kuvvet değerleri MWCNT için düşmüştür.

Şekil 4.12 deney sonuçları ve SEA sonuçları olarak incelendiğinde sonuçlar arasındaki paralellik memnuniyet vericidir. Buradan da anlaşılacağı gibi üç noktadan eğme deney şartları ANSYS analiz programına doğrulukla tanıtılmıştır.


h= 10 mm epoksi
Eğilme kuvveti (N)
900
750
600
450
300
150
0
0
2
4
6
8
10
Çökme (mm)
6,78_deney
10,39_deney
14,17_deney
17,32_deney
6,78_SEA
10,39_SEA
14,17_SEA
17,32_SEA


h=30 mm epoksi
Eğilme kuvveti (N)
900
750
600
450
300
150
0
0
5
10
15
20
25
30
Çökme (mm)
6,78_deney
10,39_deney
14,17_deney
17,32_deney
6,78_SEA
10,39_SEA
14,17_SEA
17,32_SEA

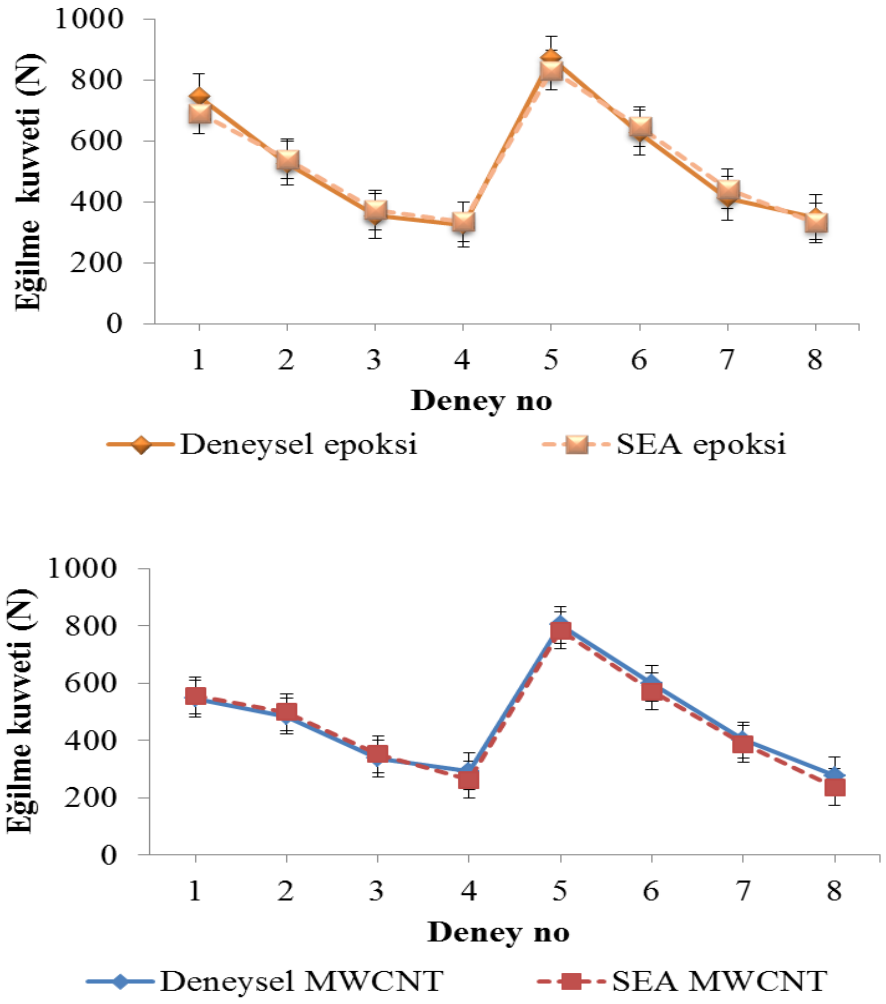


Şekil 4.12. Eğme için kuvvet-çökme grafikleri

Üç noktadan eğme analizleri sonucunda elde edilen maksimum reaksiyon kuvvetleri Çizelge 4.5'te verilmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen değerler deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Oluşan farklılıklar deney şartlarının uyumsuzluğu ve yapıştırıcının homojen olarak sürülmediğinden dolayı oluştuğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.5. Deney ve SEA sonucu elde edilen maksimum eğme kuvvet değerleri

Deney no	Deneysel epoksi (N)	SEA epoksi (N)	Deneysel MWCNT (N)	SEA MWCNT (N)
1	746,02	690,02	545,32	555,32
2	525,74	539,74	483,87	498,87
3	353,37	373,37	336,99	351,99
4	324,87	334,87	291,56	261,56
5	871,68	831,68	803,06	782,81
6	626,44	646,64	598,06	570,64
7	411,58	441,58	400,36	386,36
8	349,37	330,37	276,57	236,57



Şekil 4.13. Eğme kuvveti için deney ve SEA sonuçlarının kıyaslanması

Oluşturulan model sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin grafiksel karşılaştırılması Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde elde edilen sonuçların deney sonuçlarına paralellik göstermesi memnuniyet vericidir. Elde edilen

bulgulardaki farklılıklar yapıştırıcının deneysel olarak homojen dağılmaması, petek yapıların deney numunelerinde farklı yerde başlamasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.6'da yapılan analiz sonucu elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonuçları arasındaki yüzde sapma hesaplanarak verilmiştir. Çizelge 4.6 incelendiğinde eğme için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin deney sonuçları ile yaklaşık %85,54 örtüştüğü görülmektedir..

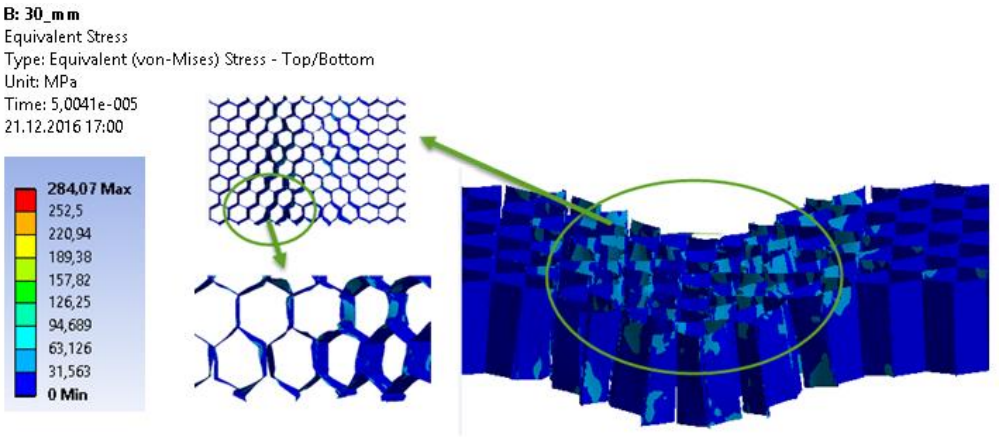
Çizelge 4.6. Deney ve SEA eğme kuvvet sonuçları arasındaki yüzde fark

Deney no	Epoksi (% hata)	MWCNT (% hata)
1	7,51	1,83
2	2,66	3,10
3	5,66	4,45
4	3,08	10,29
5	4,59	2,52
6	3,22	4,58
7	7,29	3,50
8	5,44	14,46

Eğme için elde edilen sonuçlarda maksimum reaksiyon kuvvetinin 6,78 mm hücre genişliği, 30 mm hücre yüksekliğine sahip epoksi yapıştırıcı ile birleştirmede oluştuğu, minimum reaksiyon kuvvetinin ise 17,32 mm hücre genişliği 10mm hücre yüksekliğinde oluştuğu gözlenmiştir.

Ek 3'te üç noktadan eğme testi için deney ve analiz sonucu yapıda meydana gelen hasar yapıları verilmiştir. Ek 3 incelendiğinde yapıda meydana gelen hasar yapılarının benzerlik gösterdiği görülmektedir. Eğme için ilk başta hasar başlangıcı eğme şeklinde olurken sonra çekirdek yığılması şeklinde devam etmektedir. En son safhada katmanlar ve çekirdek arasında ayrılma meydana gelmektedir.

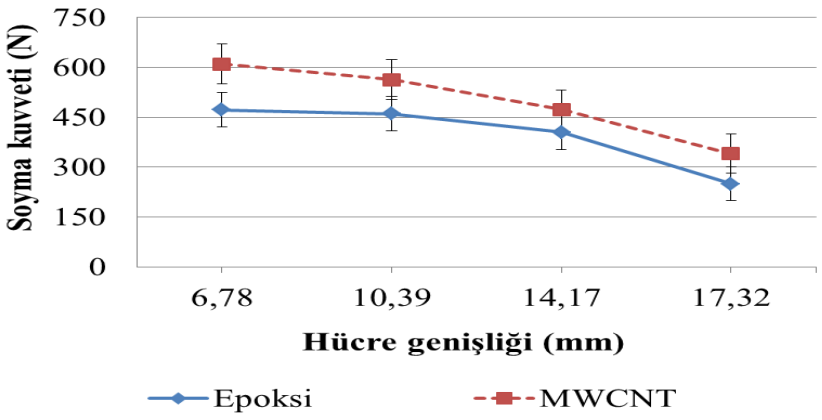
Şekil 4.14 incelendiğinde zorlama silindirinin bastığı yerde çekirdeğin daha fazla şekil değiştirdiği, zorlama silindirinden destek silindirlerine doğru gidildiğinde hasarın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Eğme sırasında çekirdekte meydana gelen hasarlar

4.4. Soyma için Elde Edilen Sonuçlar

Soyma deneyleri sonucunda soymaya sebep olan kuvvet-birim uzama grafikleri ölçüldü. Deneyler sonucu yapıda meydana gelen maksimum soyma kuvvet değerleri Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde yapıştırıcı içerisine yapılan MWCNT takviyesinin kuvvet değerlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır. 6,78 mm hücre genişliğine sahip numunede maksimum değer elde edilmesi, 17,32 mm hücre genişliğine doğru soyma kuvvet değerlerinin azalması birim alana düşen malzeme miktarının azalmasındandır. MWCNT takviyesi soyma kuvvetlerini arttırdığı şekilde görülmektedir.



Şekil 4.15. Soyma için elde edilen maksimum değerler grafiği

Soyma deneyleri sonucu elde edilen maksimum soyma kuvvetleri Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Soyma deneyi sonucu elde edilen maksimum soyma kuvvet değerleri

Hücre genişliği (mm)	Epoksi (N)	MWCNT (N)
6,78	472,37	610,27
10,39	460,19	562,88
14,17	404,565	472,92
17,32	249,56	340,07

Şekil 4.16'da soyma deney sonucu yapıda meydana gelen şekil değişikliği örnekleri verilmiştir. Soyma sonucu meydana gelen hasar numunelerinde yapıştırıcının bir kısmı çekirdekte bir kısmınında katman tabakasında kalması önemlidir.



Şekil 4.16. Soyma sonucu yapıda meydana gelen hasarlar

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada iki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmesi yapılan alüminyum bal peteği yapıların basma, düşük hız darbe, üç noktadan eğme ve soyma testlerine karşı göstermiş oldukları mekanik davranışlar deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Epoksinin hangi oranda takviye edileceğini belirlemek için yapılan tek bindirmeli kayma testi ve Charpy darbe testi sonuçları %1 MWCNT takviyeli yapıştırıcının kayma mukavemeti ve darbe dayanımının daha yüksek olduğunu göstermiştir.
2. Basma deneyleri sonuçlarına göre MWCNT takviyeli numunelerde hücre genişliği ve hücre yüksekliği azaldığında basma kuvvetlerinde artış olduğu gözlenmiştir.
3. Basma kuvvet değerleri epoksiye MWCNT takviyesi ile %3-50 artış elde edildiği sonucuna varılmıştır. Çizelge 5.1'de epoksiye takviye edilen MWCNT'nin basma kuvvetlerinde ne kadarlık bir artış sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. Basma testi için yapıştırıcının etkisi

Hücre genişliği (mm)	Hücre yüksekliği (mm)	MWCNT etkisi (%)
6,78	10	21,19
10,39	10	13,28
14,17	10	50,30
17,32	10	26,73
6,78	30	15,23
10,39	30	3,30
14,17	30	9,19
17,32	30	18,60

4. Basma testinde hücre genişliği arttırıldığı zaman kuvvet değerlerindeki azalmanın sebebi yapıdaki temas yüzey alanının azalmasından dolayı sistemin rijitliğinin azalması ve buna bağlı olarak yapışkan bağlantılarında oluşan kopmalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

5. Düşük hız darbe testi sonuçlarına göre MWCNT takviyeli yapıştırıcı ile elde edilmiş bal peteği numunelerinde hücre genişliği azaldığında ve hücre yüksekliği arttığında darbe reaksiyon kuvvetlerinde bir artış olduğu gözlenmiştir.
6. Düşük hız darbe kuvvet değerlerinde epoksiye MWCNT takviyesi uygulandığında %1-19 artış gözlemlenmiştir. Çizelge 5.2'de epoksiye takviye edilen MWCNT'nin düşük hız darbe kuvvetlerinde ne kadarlık bir artış sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5.2. Düşük hız darbe testi için yapıştırıcının etkisi

Hücre genişliği (mm)	**Hücre yüksekliği(mm)**	**MWCNT etkisi (%)**
6,78	10	5,67
10,39	10	6,51
14,17	10	4,78
17,32	10	4,30
6,78	30	7,42
10,39	30	1,31
14,17	30	18,86
17,32	30	14,57

7. Düşük hız darbe testi sonucunda hücre genişliği azaldığı zaman birim alana düşen temas yüzeyinin arttığı ve buna bağlı olarak vurucu ucun aşması gereken alan artmakta ve bunun sonucu olarakta hasar oluşturmak için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.
8. Düşük hız darbe testinde 30 mm hücre yüksekliğine sahip numunede darbe enerjisinin tamamı üst katman ve çekirdekte absorbe edilerek alt katmanda herhangi bir hasarın oluşmadığı tespit edilmiştir.
9. Üç noktadan eğme testleri eğmeye sebep olan kuvvet-çökme miktarları ölçümleri sonucunda epoksi ile oluşturulan numunelerin hücre genişliği azaltıldığında ve hücre yüksekliği arttırıldığında eğme reaksiyon kuvvetlerinde bir artış olduğu gözlenmiştir.
10. Üç noktadan eğmede hücre genişliği azaldığında birim alana düşen temas yüzeyinin arttığı ve buna bağlı olarak çekirdek yapının iç kısmında bulunan boşluk zorlamayla birlikte basınç artışının meydana geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu basınç artışının çekirdekte eğmeye neden olan kuvvet değerlerini azalttığı görülmüştür.
11. Üç nokta eğme testi sonucu elde edilen kuvvet değerlerinde epoksiye MWCNT takviyesi yapıldığında %3-27 azalma meydana gelmiştir. Çizelge 5.3'te epoksiye

takviye edilen MWCNT'nin eğme kuvvetlerinde ne kadarlık bir azalma sağladığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. Üç noktadan eğme testi için yapıştırıcının etkisi

Hücre genişliği (mm)	**Hücre yüksekliği(mm)**	**MWCNT etkisi (%)**
6,78	10	-26,90
10,39	10	-7,96
14,17	10	-4,64
17,32	10	-10,25
6,78	30	-7,87
10,39	30	-4,53
14,17	30	-2,73
17,32	30	-20,84

12. Üç noktadan eğmede meydana gelen kayma kuvvetlerinin MWCNT birikintilerinin mukavemetini düşürücü yönde hareket ettiği ve bu sebeple kompozit yapının direncinde azalmaya sebep olduğu sonucuna varılmıştır.
13. Üç noktadan eğme için ilk başta hasar başlangıcı eğme daha sonra çekirdek yığılması olarak devam ettiği en son safhada ise katmanlar ve çekirdek arasında ayrılma şeklinde meydana geldiği gözlenmiştir.
14. Soyma deneyi sonucu epoksi içerisine katılan MWCNT'nin soyma direncini arttırdığı ve soyma kuvvet değerlerinde %15-27 artış meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.
15. Soyma sonucu meydana gelen hasar numunelerinde yapıştırıcının bir kısmı çekirdekte bir kısmının da katman tabakasında kaldığı gözlemlenmiştir.
16. Teorik modeller oluşturulurken zamandan tasarruf etmek için basma numuneleri simetri bölgelerine ayrılmış ve çözüm sürelerinde yaklaşık %75'lik bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Düşük hız darbe ve üç noktadan eğmede ise simetri uygulamasına gidilmemiştir.
17. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki yüzdesel mutlak hatalar belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkın basma testlerinde %14,27, düşük hız darbe testlerinde %19,58 ve üç noktadan eğme testlerinde %14,46 olduğu görülmüştür.

5.2. Öneriler

1. Bundan sonraki çalışmalarda farklı hücre genişlikleri, hücre yükseklikleri, farklı malzemeler, alt üst katman, yapıştırıcı kombinasyonları, hücre geometrileri, birleştirme yöntemleri kullanılarak üretilecek bal peteği yapılarının basma, çekme, darbe, eğme, batma, soyma gibi testlerle mekanik davranışları belirlenebilir.
2. Bu çalışmada kullanılan çekirdek malzemenin içerisinde herhangi bir dolgu malzemesi kullanılmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda çekirdek içerisi köpük gibi farklı malzemelerle doldurulabilir ve yalıtım alanlarında kullanılabilir.
3. Darbe deneyleri için farklı vurucu uç, vurucu uç hızları, yükseklik değerleri, kütleler kullanılmak suretiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
4. Darbe deneyleri için yüzey çatlaklı ve çatlaksız numunelerin enerji absorbe etme özellikleri incelenebilir.
5. Yapmış olduğumuz çalışmalar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve numunelere bir ay içerisinde gerekli testler yapılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda numunelere farklı şartlandırma işlemleri uygulanarak testler yapılabilir ve elde edilen sonuçlar kıyaslanabilir.
6. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilebilir ve uygum bir optimizasyon yöntemi kullanılarak en iyi parametre elde edilebilir.
7. Bal peteği yapılarının ses yalıtımı, ısı yalıtımı, titreşim absorbe yeteneği gibi farklı özellikleri incelenebilir.
8. Numunelerde meydana gelen hasarlara hasar giderme yöntemleri uygulanabilir ve hasar giderme işleminden sonra gerekli testler yapılarak mekanik davranışları deneysel ve teorik olarak incelenebilir.
9. Yapıştırıcıya takviye yaparak sanayi alanında kullanmak isteyen işletmeler gerekli maliyet hesaplarını ve zaman faktörünü göz önüne alarak kullanabilirler.
10. Bal peteği yapılar enerji absorbe etme yeteneklerine sahip oldukları için trafikte orta refüj bölgelerinde kullanılabilirler.

KAYNAKLAR

Akatay, A., Bora, M. Ö., Çoban, O., Fidan, S. ve Tuna, V., 2015, The influence of low velocity repeated impacts on residual compressive properties of honeycomb sandwich structures, *Composite Structures*, 125, 425-433.

Akkus, H., Ekrem, M., Karabulut, S. E., Duzcukoglu, H., Sahin, Ö. S. ve Avcı, A., 2014, Impact behavior of mwcnt reinforced epoxy adhesive bonded joints made with aluminium, *15th International Materials Symposium (IMSP)*, Denzili, Türkiye, 742-748.

Aktay, L., Johnson, A. F. ve Holzapfel, M., 2005, Prediction of impact damage on sandwich composite panels, *Computational Materials Science*, 32 (3-4), 252-260.

Aktay, L., Johnson, A. F. ve Kröplin, B.-H., 2008, Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (9), 2616-2630.

Anonim, WEICON Kimya Sanayi Tic. Ltd. Şti.

Arıcasoy, O., 2006, Kompozit sektör raporu, İstanbul Ticaret Odası, p.

Asadi, M., Shirvani, H., Sanaei, E. ve Ashmead, M., 2006, A simplified model to simulate crash behavior of honeycomb, *Proceedings of the International conference on Advanced Design and Manufacture*, Harbin, China.

Asadi, M., Vollaire, A. C., Ashmead, M. ve Shirvani, H., 2007, Experimental test and finite element modelling of pedestrian headform impact on honeycomb sandwich panel, *18th Engineering Mechanics Division Conference (EMD2007)*.

Ashmead, M., Bedus, O. ve Bradley, S., 2000, Advanced materials for enhanced automotive safety. Automotive Composites and Plastics Conference.

Bang, S.-O. ve Cho, J.-U., 2015, A study on the compression property of sandwich composite with porous core, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16 (6), 1117-1122.

Başdemir, C. ve Elibol, M., 2012, Sandviç kompozit plakalarda sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi, *Dokuz Eylül Üniversitesi* İzmir.

Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M. ve Ünal, A., 2011, Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11).

Bolat, F. Ç., 2011, Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi* Erzurum.

Caserta, G. D., Iannucci, L. ve Galvanetto, U., 2011, Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner, *Composite Structures*, 93 (11), 2748-2759.

Crupi, V., Epasto, G. ve Guglielmino, E., 2011, Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading, *Fracture and Structural Integrity*, 17, 32-41.

Crupi, V., Epasto, G. ve Guglielmino, E., 2012, Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 43, 6-15.

Engin, Z. F., 2011, Balpeteği sandviç kompozitlerin darbe analizinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi* Erzurum.

Ercan, H., 2006, Uçak sanayiinde kullanılan balpeteği kompozitlerinin mekanik davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi* İstanbul.

Eskizeybek, V., 2012, Yüzeylerİne kİmyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmiş örgü cam fİber/epoksİ nanokompozİtlerİn üretİmİ ve tabakalar arasi kirilma davranişinin İncelenmesİ, *Selçuk Üniversitesi*, Türkiye.

Feli, S. ve Pour, M. H. N., 2012, An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 43 (5), 2439-2447.

Fischer, S., 2015, Aluminium foldcores for sandwich structure application: Mechanical properties and FE-simulation, *Thin-Walled Structures*, 90, 31-41.

Foo, C. C., Seah, L. K. ve Chai, G. B., 2008, Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels, *Composite Structures*, 85 (1), 20-28.

Giglio, M., Manes, A. ve Gilioli, A., 2012, Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2), 361-374.

Gpoichand, A., Mohanrao, R., Sankar, N. V. S., Rama Balaji, G. ve Sandeep Kumar, P., 2013, Design and analysis of copper bal peteği sandwich structure, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2 (4), 635-638.

Güneş, A., 2013, Üzerinde yüzey çatlağı bulunan hibrid tabakalanmış kompozit levhaların dinamik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi* Konya.

Heimbs, S., Cichosz, J., Kilchert, S. ve Klaus, M., 2009a, Sandwich panels with cellular cores made of folded composite material: mechanical behaviour and impact performance. 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17). Edinburgh.

Heimbs, S., Kilchert, S., Fischer, S., Klaus, M. ve Baranger, E., 2009b, Sandwich structures with folded core: mechanical modeling and impact simulations, *SAMPE Europe International Conference*, Paris, 324-331.

Hexcel, C., 1999, HexWeb honeycomb attributes and properties,

Hexcel, C., 2000, Hex Webtm honeycomb sandwich design technology,

Hirose, Y., Matsubara, G., Hojo, M. ve Matsuda, H., 2008, Evaluation of new crack suppression method for foam core sandwich panel via fracture toughness tests and analyses under mode-I and mode-II type conditions, *8th International Conference on Sandwich Structures(ICSS 8)*, 488-497.

Hong, S., Pan, J., Tyan, T. ve Prasad, P., 2006, Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under non-proportional compression-dominant combined loads, *International Journal of Plasticity*, 22 (6), 1062-1088.

Hong, S., Pan, J., Tyan, T. ve Prasad, P., 2008, Dynamic crush behaviors of aluminum honeycomb specimens under compression dominant inclined loads, *International Journal of Plasticity*, 24 (1), 89-117.

Hou, Y., Neville, R., Scarpa, F., Remillat, C., Gu, B. ve Ruzzene, M., 2014, Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading, *Composites Part B: Engineering*, 59, 33-42.

Hsiao, K. T., Alms, J. ve Advani, S. G., 2003, Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites, *Nanotechnology*, 14 (7), 791.

İşcan, B., Adin, H. ve Turgut, A., 2009, Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilmiş Z tipi bağlantılarda bindirme mesafesinin etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09).

Jang, W.-Y. ve Kyriakides, S., 2015, On the buckling and crushing of expanded honeycomb, *International Journal of Mechanical Sciences*, 91, 81-90.

Jen, Y. M., Ko, C. W. ve Lin, H. B., 2009, Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams, *International Journal of Fatigue*, 31, 455-462.

Jhen, Y. M. ve Chang, L. Y., 2009, Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams, *Engineering Failure Analysis*, 16, 1282-1293.

Kaboorani, A. ve Riedl, B., 2012, Nano-aluminum oxide as a reinforcing material for thermoplastic adhesives, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 1076-1081.

Kaya, R., 2009, Petek yapılı özgün bir kompozit panel üretimi ve bazı mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi* Kayseri.

Khoshravan, M. R. ve Pour, M. N., 2014, Numerical and experimental analyses of the effect of different geometrical modelings on predicting compressive strength of honeycomb core, *Thin-Walled Structures*, 84, 423-431.

Kılıçaslan, C., Güden, M., Odacı, İ. K. ve Taşdemirci, A., 2013, The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures, *Materials & Design*, 46, 121-133.

Kılıçaslan, C., Güden, M., Odacı, İ. K. ve Taşdemirci, A., 2014, Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches, *Thin-Walled Structures*, 78, 70-78.

Kowalska, M. C., Garstecki, A. ve Pozorski, Z., 2008, Methods of experimental determination of soft core parameters in sandwich panels, *8th International Conference on Sandwich Structures(ICSS 8)*, 463-473.

Li, X., Zhang, P., Wang, Z., Wu, G. ve Zhao, L., 2014, Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: Experiment and numerical analysis, *Composite Structures*, 108, 1001-1008.

Liu, L., Wang, H. ve Guan, Z., 2015a, Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading, *Composite Structures*, 121, 304-314.

Liu, P., Liu, Y. ve Zhang, X., 2015b, Internal-structure-model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 77, 120-133.

Lu, C., Zhao, M., Jie, L., Wang, J., Gao, Y., Cui, X. ve Chen, P., 2015, Stress Distribution on Composite Honeycomb Sandwich Structure Suffered from Bending Load, *Procedia Engineering*, 99, 405-412.

Metin, M., 2008, E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe hasarının burkulma özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi* Konya.

Mozafari, H., Khatami, S. ve Molatefi, H., 2015, Out of plane crushing and local stiffness determination of proposed foam filled sandwich panel for Korean Tilting Train eXpress – Numerical study, *Materials & Design*, 66, 400-411.

Nguyen, M. Q., Jacombs, S. S., Thomson, R. S., Hachenberg, D. ve Scott, M. L., 2005, Simulation of impact on sandwich structures, *Composite Structures*, 67 (2), 217-227.

Nia, A. A., Razavi, S. B. ve Majzoobi, G. H., 2008, Ballistic limit determination of aluminum honeycombs-Experimental study, *Materials Science and Engineering: A*, 488 (1-2), 273-280.

Nia, A. A. ve Sadeghi, M. Z., 2010, The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study, *Materials & Design*, 31 (3), 1216-1230.

Nirupama, G., Reddy, V. D. ve Krishnaiah, G., 2014, Design and fabrication of spot welded corrugated panel under three point bending by FEM, *Procedia Engineering*, 97, 1282-1292.

Oh, K., Lee, S., Park, H., Kim, Y. ve Kong, C., 2007, Adhesion properties investigation of sandwich composite structure with surface treatement of AA 5052 skin. 16th International conference on composite materials.

Paik, J. K., Thayamballi, A. K. ve Kim, G. S., 1999, The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels, *Thin-Walled Structures*, 35 (3), 205-231.

Pehlivanoğlu, Y. V., 2005, Havacılıkta kullanılan petek yapılar, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2 (2), 37-41.

Petrone, G., Rao, S., De Rosa, S., Mace, B. R., Franco, F. ve Bhattacharyya, D., 2013, Behaviour of fibre-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading, *Composite Structures*, 100, 356-362.

Rao, S., Das, R. ve Bhattacharyya, D., 2013, Investigation of bond strength and energy absorption capabilities in recyclable sandwich panels, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 6-13.

Sayman, O., Soykok, I. F., , D., T., Dogan, A. ve Arikan, V., 2014, Effects of axial impacts at different temperatures on failure response of adhesively bonded woven fabric glass fiber/epoxy composite joints, *Journal of Composite Materials*.

Solmaz, M. Y., Kaman, M. O., Turan, K. ve Turgut, A., 2010a, Petek yapılı kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (1), 1-11.

Solmaz, M. Y., Şanlıtürk, İ. H. ve Özben, T., 2010b, Petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgunun kritik burkulma yüküne etkisinin sayısal olarak tespiti, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye.

Solmaz, M. Y. ve Topkaya, T., 2012, Elipsoit petek yapılı sandviç yapıların burkulma dirençlerinin sayısal ve deneysel olarak araştırılması, *3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 53-61.

Stocchi, A., Colabella, L., Cisilino, A. ve Alvarez, V., 2014, Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics, *Materials and Design*, 55, 394–403.

Tan, C. Y. ve Akil, H. M., 2012, Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core, *Composites Part B: Engineering*, 43 (3), 1433-1438.

Tao, Y., Chen, M., Chen, H., Pei, Y. ve Fang, D., 2015, Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: Experiment and theory, *Composite Structures*, 132, 644-651.

Taşyürek, M., 2014, Yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° filaman sarım CNT takviyeli CTP kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve iç basınç etkisi altındaki yorulma davranışının araştırılması, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi* Konya.

Turan, K. ve Kaman, M. O., 2010, Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 315-323.

Wang, H., Ramakrishnan, K. R. ve Shankar, K., 2016a, Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores, *Materials & Design*, 99, 68-82.

Wang, Z., Tian, H., Lu, Z. ve Zhou, W., 2014, High-speed axial impact of aluminum honeycomb – Experiments and simulations, *Composites Part B: Engineering*, 56, 1-8.

Wang, Z., Lu, Z., Yao, S., Zhang, Y., Hui, D. ve Feo, L., 2016b, Deformation mode evolutional mechanism of honeycomb structure when undergoing a shallow inclined load, *Composite Structures*, 147, 211-219.

Xie, S. ve Zhou, H., 2015, Analysis and optimisation of parameters influencing the out-of-plane energy absorption of an aluminium honeycomb, *Thin-Walled Structures*, 89, 169-177.

Xu, S., Beynon, J. H., Ruan, D. ve Yu, T. X., 2012, Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression, *International Journal of Impact Engineering*, 47, 1-13.

Yahaya, M. A., Ruan, D., Lu, G. ve Dargusch, M. S., 2015, Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact – An experimental study, *International Journal of Impact Engineering*, 75, 100-109.

Yiğit, A., 2010, Petek yapılı sandviç yapıların dinamik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi* Erzurun.

Zhang, X., Zhang, H. ve Wen, Z., 2014, Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations, *International Journal of Impact Engineering*, 66, 48-59.

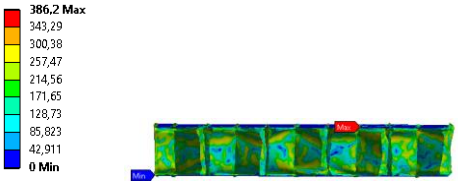
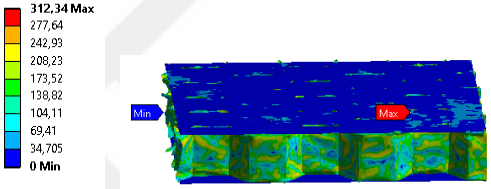
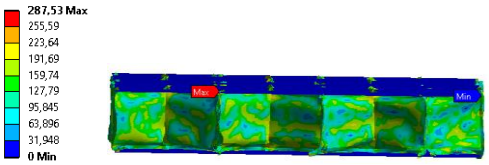
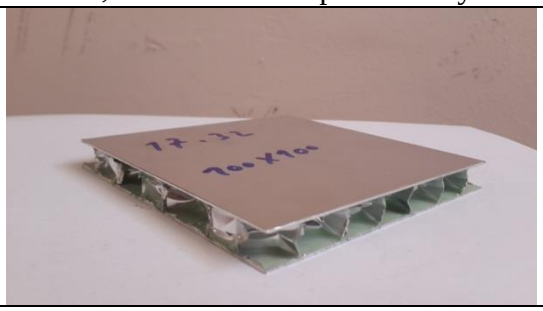
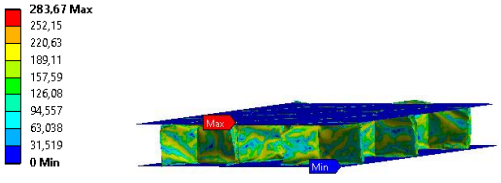
Zhao, H. ve Gary, G., 1998, Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 21, 827-836.

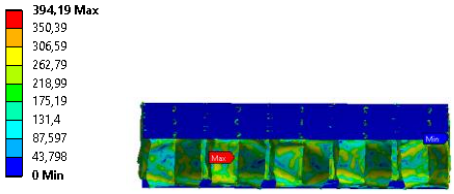
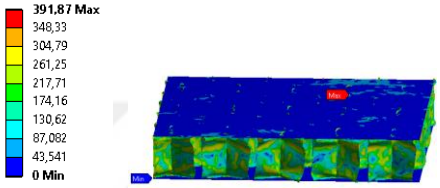
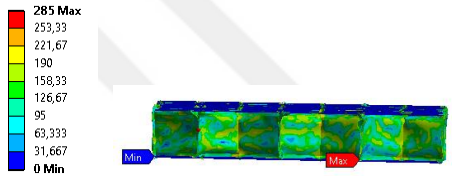
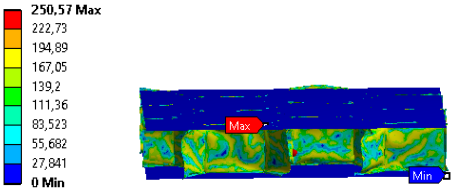
Zhou, G. ve Hill, M. D., 2009, Impact damage and energy absorbing characteristics and residual in-plane compressive strength of honeycomb sandwich panels, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 11, 329-356.

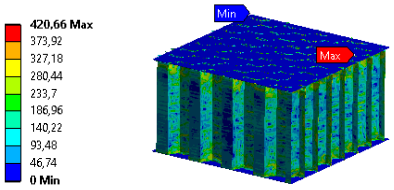
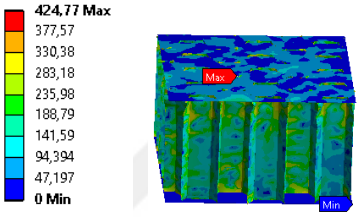
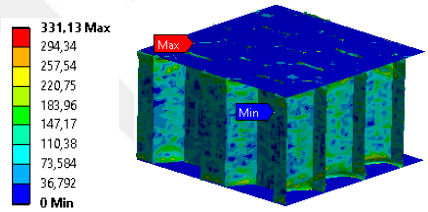
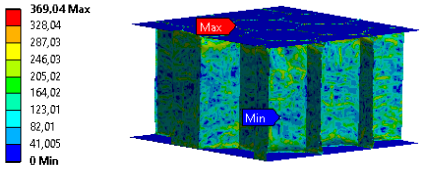
EKLER

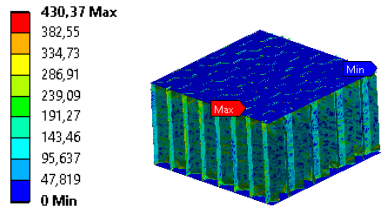
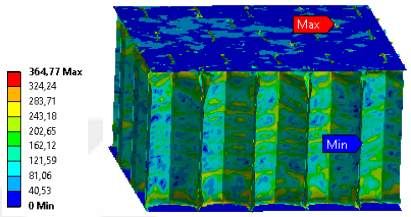
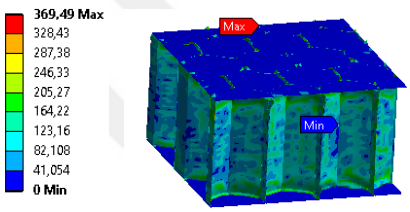
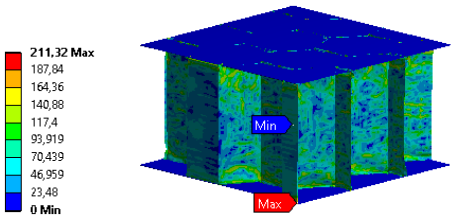
Grafiklerdeki verilen baremler Von mises gerilme değerlerini ifade etmektedir.

EK-1 Basma testi için numunelerde meydana gelen hasarların deney ve SEA fotoğrafları.

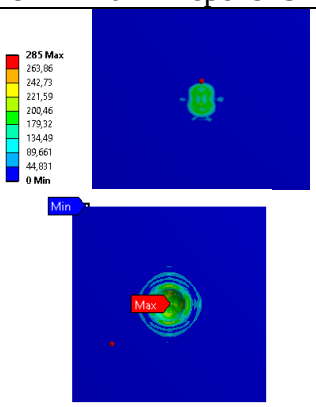
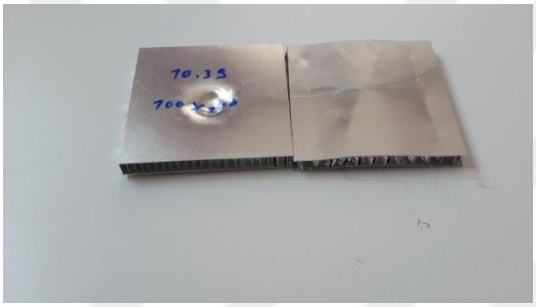
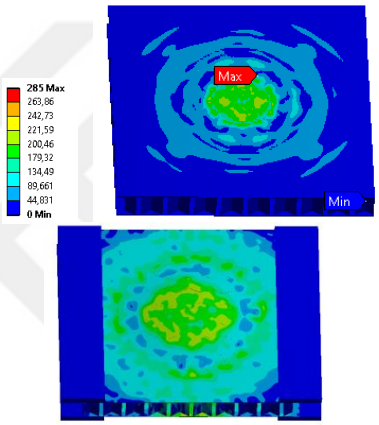
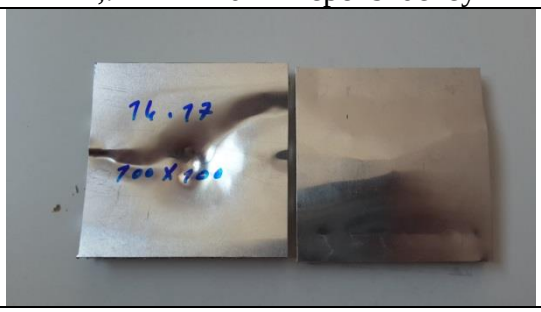
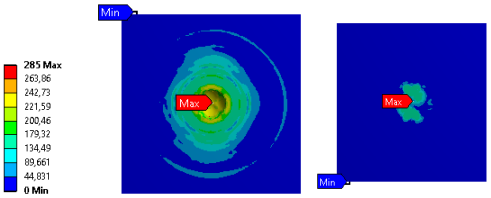
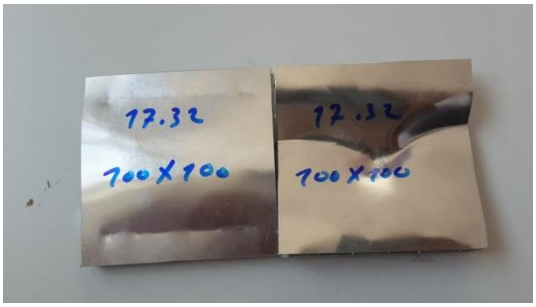
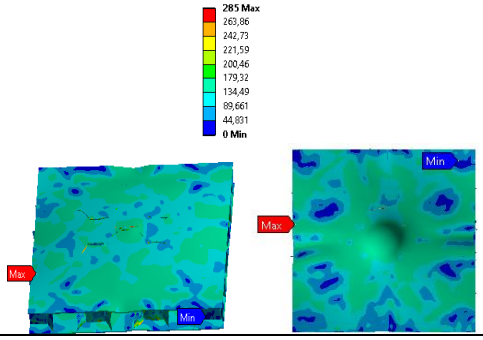
6,78 mm 10 mm epoksi deney	6,78 mm 10 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 10 mm epoksi deney	10,39 mm 10 mm epoksi SEA
	
14,17 mm 10 mm epoksi deney	14,17 mm 10 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 10 mm epoksi deney	17,32 mm 10 mm epoksi SEA
	

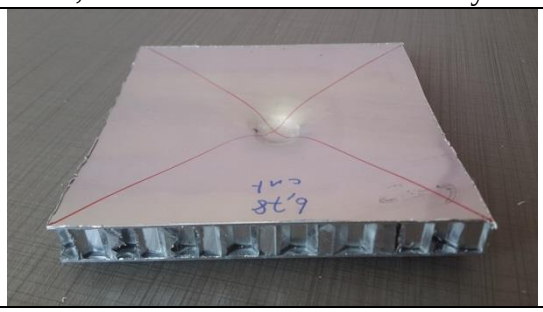
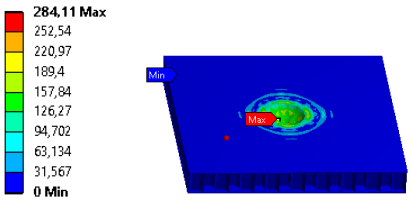
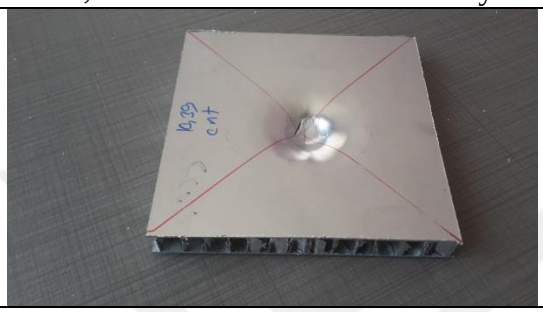
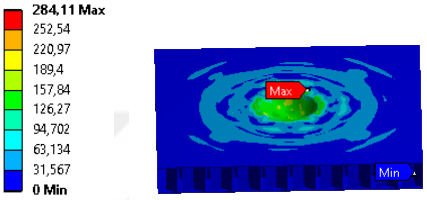
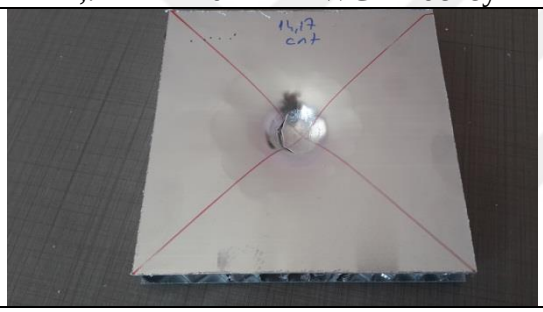
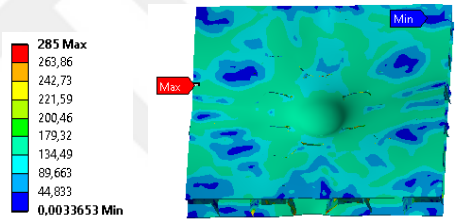
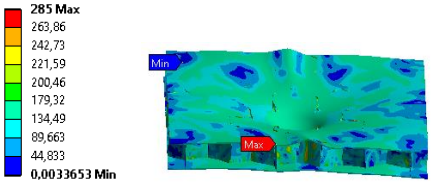
6,78 mm 10 mm MWCNT deney	6,78 mm 10 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 10 mm MWCNT deney	10,39 mm 10 mm MWCNT SEA
	
14,17 mm 10 mm MWCNT deney	14,17 mm 10 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 10 mm MWCNT deney	17,32 mm 10 mm MWCNT SEA
	

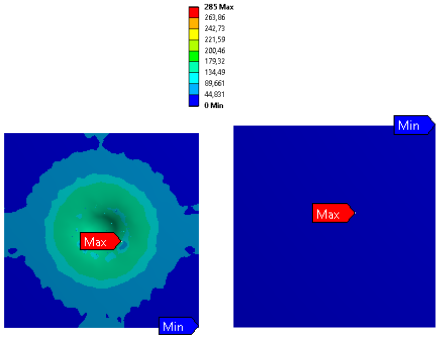
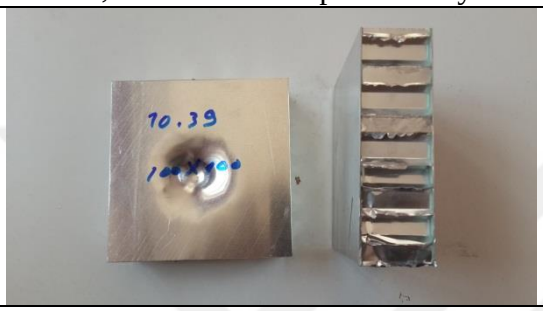
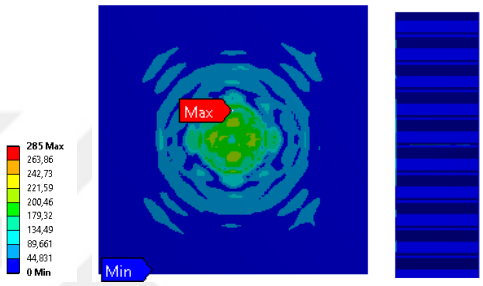
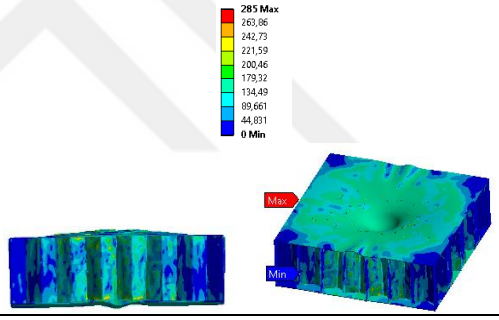
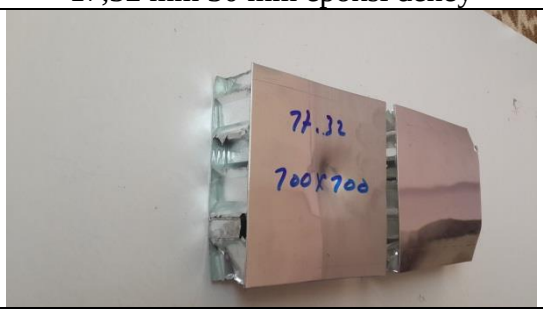
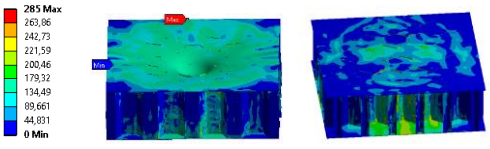
6,78 mm 30 mm epoksi deney	6,78 mm 30 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 30 mm epoksi deney	10,39 mm 30 mm epoksi SEA
	
14,17 mm 30 mm epoksi deney	14,17 mm 30 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 30 mm epoksi deney	17,32 mm 30 mm epoksi SEA
	

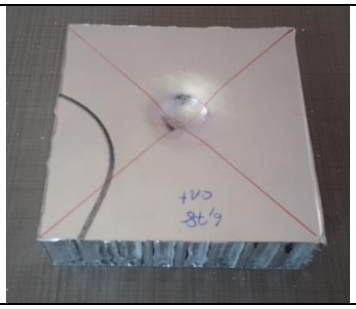
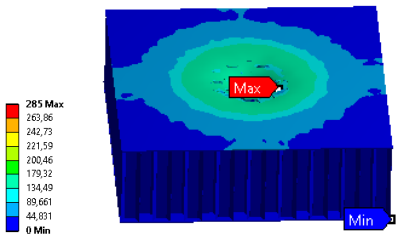
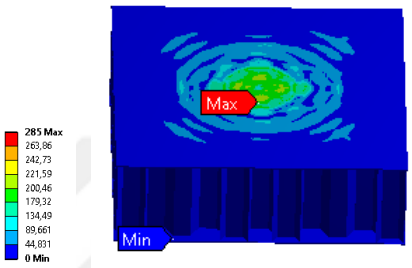
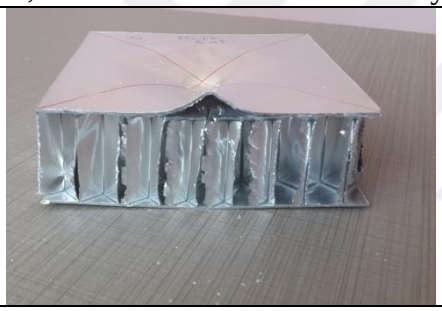
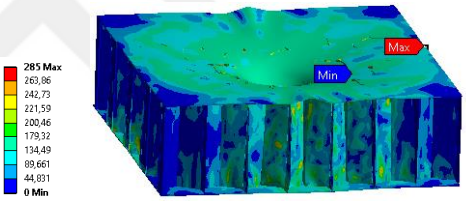
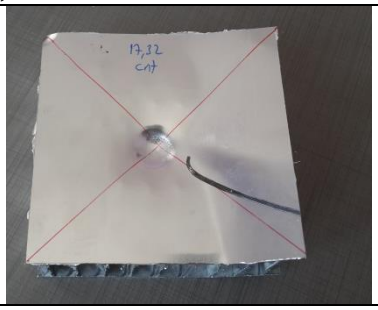
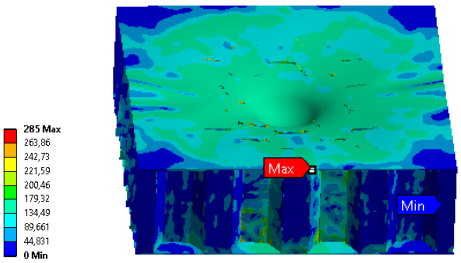
6,78 mm 30 mm MWCNT deney	6,78 mm 30 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 30 mm MWCNT deney	10,39 mm 30 mm MWCNT SEA
	
14,.17 mm 30 mm MWCNT deney	14.,17 mm 30 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 30 mm MWCNT deney	17,32 mm 30 mm MWCNT SEA
	

EK-2 Düşük hız darbe testi için numunelerde meydana gelen hasarların deney ve SEA fotoğrafları.

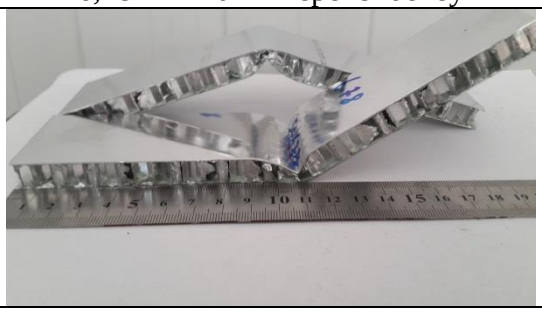
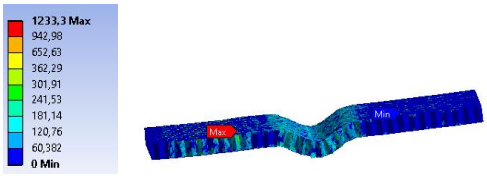
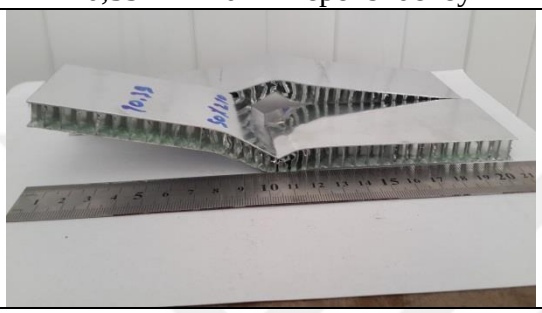
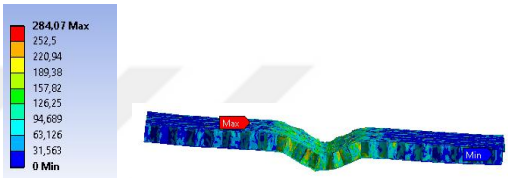
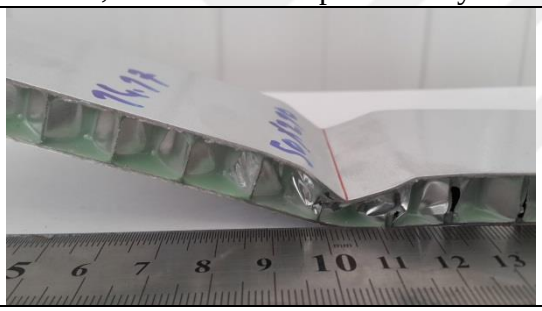
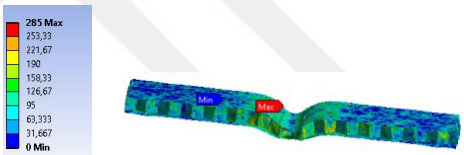
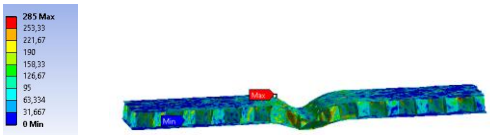
6,78 mm 10 mm epoksi deney	6,78 mm 10 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 10 mm epoksi deney	10,39 mm 10 mm epoksi SEA
	
14,.17 mm 10 mm epoksi deney	14.,17 mm 10 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 10 mm epoksi deney	17,32 mm 10 mm epoksi SEA
	

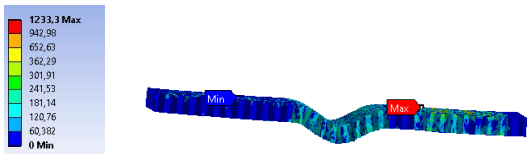
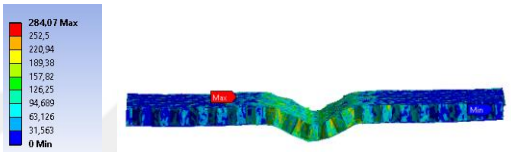
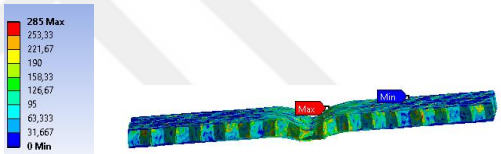
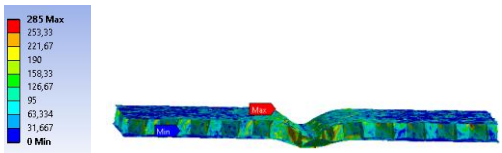
6,78 mm 10 mm MWCNT deney	6,78 mm 10 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 10 mm MWCNT deney	10,39 mm 10 mm MWCNT SEA
	
14,.17 mm 10 mm MWCNT deney	14.,17 mm 10 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 10 mm MWCNT deney	17,32 mm 10 mm MWCNT SEA
	

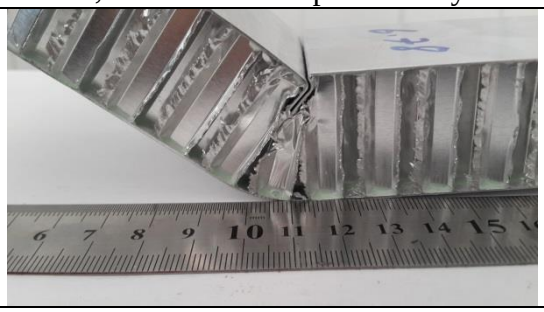
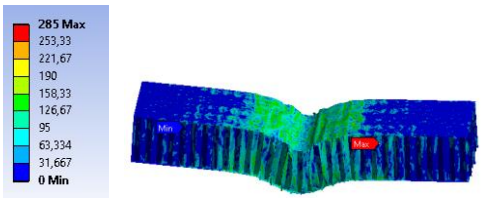
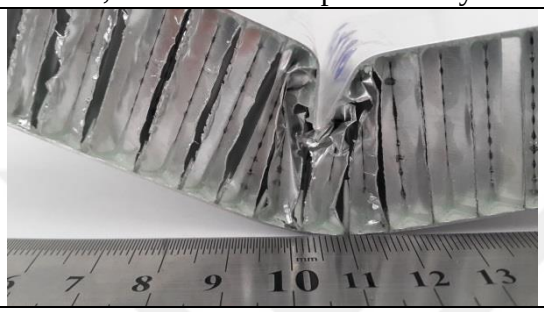
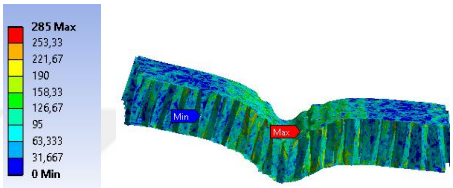
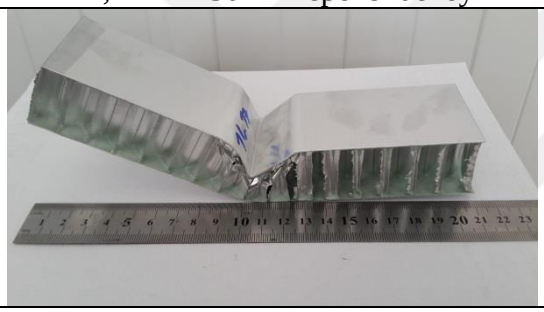
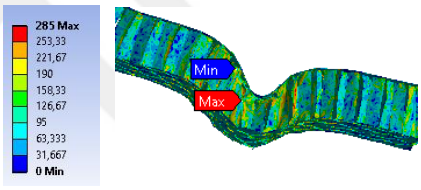
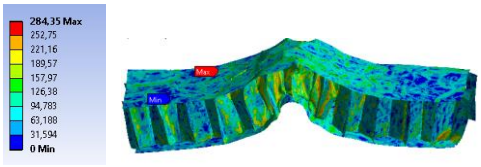
6,78 mm 30 mm epoksi deney	6,78 mm 30 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 30 mm epoksi deney	10,39 mm 30 mm epoksi SEA
	
14,.17 mm 30 mm epoksi deney	14.,17 mm 30 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 30 mm epoksi deney	17,32 mm 30 mm epoksi SEA
	

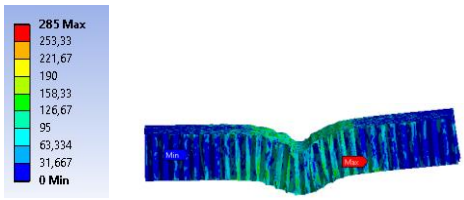
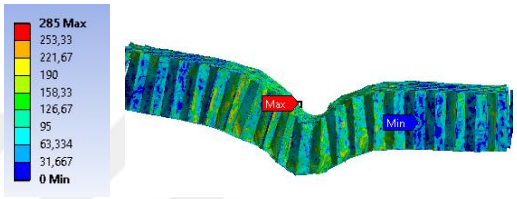
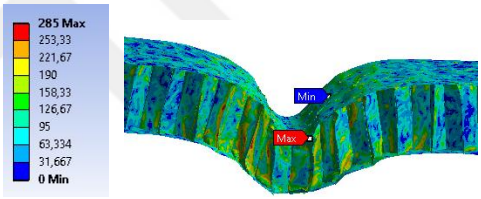
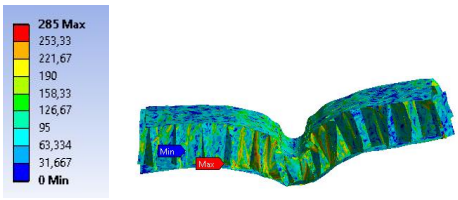
6,78 mm 30 mm MWCNT deney	6,78 mm 30 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 30 mm MWCNT deney	10,39 mm 30 mm MWCNT SEA
	
14,.17 mm 30 mm MWCNT deney	14.,17 mm 30 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 30 mm MWCNT deney	17,32 mm 30 mm MWCNT SEA
	

EK-3 Üç noktadan eğme testi için numunelerde meydana gelen hasarların deney ve SEA fotoğrafları.

6,78 mm 10 mm epoksi deney	6,78 mm 10 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 10 mm epoksi deney	10,39 mm 10 mm epoksi SEA
	
14,17 mm 10 mm epoksi deney	14,17 mm 10 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 10 mm epoksi deney	17,32 mm 10 mm epoksi SEA
	

6,78 mm 10 mm MWCNT deney	6,78 mm 10 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 10 mm MWCNT deney	10,39 mm 10 mm MWCNT SEA
	
14,17 mm 10 mm MWCNT deney	14,17 mm 10 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 10 mm MWCNT deney	17,32 mm 10 mm MWCNT SEA
	

6,78 mm 30 mm epoksi deney	6,78 mm 30 mm epoksi SEA
	
10,39 mm 30 mm epoksi deney	10,39 mm 30 mm epoksi SEA
	
14,17 mm 30 mm epoksi deney	14,17 mm 30 mm epoksi SEA
	
17,32 mm 30 mm epoksi deney	17,32 mm 30 mm epoksi SEA
	

6,78 mm 30 mm MWCNT deney	6,78 mm 30 mm MWCNT SEA
	
10,39 mm 30 mm MWCNT deney	10,39 mm 30 mm MWCNT SEA
	
14,17 mm 30 mm MWCNT deney	14,17 mm 30 mm MWCNT SEA
	
17,32 mm 30 mm MWCNT deney	17,32 mm 30 mm MWCNT SEA
	

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Harun AKKUŞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Bahçe/ OSMANİYE 1987
Telefon : 0546 298 00 37
e-mail : harunakkus@windowslive.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Fatih Lisesi, Merkez, NİĞDE	2004
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2008
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2010
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011-Devam ediyor	Amasya Üniversitesi	Öğr. Gör.

UZMANLIK ALANI

Otomotiv, Talaşlı imalat, Taguchi, Çoklu Regresyon Modeli, Sonlu Elemanlar Analizi.

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

A1. **Akkuş H.**, Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2017), "Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nano particles", Journal of Mechanical Science and Technology (JMST), Vol. 31 (1). (Doktora tezinden yapılmıştır.)

B. Uluslararası diğer hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

B1. **Akkuş H.**, Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2015), "Prediction model for compressive strength value of aluminum honeycomb materials joined with %1 MWCNT reinforced epoxy adhesive", Journal of Engineering and Fundamentals, Vol. 2 (1), pp. 13-20. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

B2. **Akkuş H.**, Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2015), "Alüminyum bal peteği yapılarda oluşan eğilme kuvvetlerinin çoklu regresyon ile incelenmesi", Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 11, Sayı 2, s. 217-223. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

B3. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2016), "Alüminyum bal peteği yapılarında darbe mukavemeti tahmini için regresyon modeli oluşturulması", Erzincan Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 9, Sayı 3, s. 102-111. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

B4. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2016), "Alüminyum honeycomb yapılarda eğilme mukavemeti için deneysel tasarım" Sigma, Cilt 34, Sayı 4, s. 577-584. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

C. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:

C1. Akkuş H., Ekrem M., Karabulut S.E., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., Avcı A., (2014), "Impact behavior of MWCNT reinforced epoxy adhesive bonded joints made with aluminium", 15th International Materials Symposium (IMSP), Bildiriler Kitabı s.742-748, 15-17 Ekim, Denizli, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

C2. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., Asiltürk İ, (2015), "Modeling of compressive strength of aluminum honeycomb structures by multiple regression", International Iron&Steel Symposium (IISS15), Bildiriler Kitabı s. 641-645, 1-3 Nisan, Karabük, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

C3. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., Asiltürk İ, (2015), "Development of regression model for strength prediction of aluminium honeycombs produced by carbon nanotube modified epoxy adhesives", 1. Uluslararası Katılımlı Savunma Sanayi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı s. 38-39, 9-10 Nisan, Kırıkkale, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

C4. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2016), "Impact behavior of mwcnt reinforced epoxy adhesive bonded joints made with aluminium", 16th International Materials Symposium (IMSP), Bildiriler Kitabı, 12-14 Ekim, Denizli, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

C5. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., Uğur L., Ekrem M., Avcı A., (2016), "Alüminyum bal peteği yapılarda oluşan basma kuvvetlerinin ANSYS ile modellenmesi", International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Bildiriler Kitabı, 26-28 Ekim, Adana, Türkiye. (Doktora tezinden yapılmıştır.)

D. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

D1. Akkuş H., Düzcükoğlu H., Şahin Ö.S., (2015), "Alüminyum bal peteği yapılarda darbe kuvvetlerinin optimizasyonu", İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı 2, s. 65-71. (Doktora tezinden yapılmıştır.)