DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME BÖLGESİNİN EĞİLME DAVRANIŞI

Sevim Nihal PUHURCUOĞLU

Temmuz, 2017
İZMİR

SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME BÖLGESİNİN EĞİLME DAVRANIŞI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Programı

Sevim Nihal PUHURCUOĞLU

Temmuz, 2017

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SEVİM NİHAL PUHURCUOĞLU, tarafından **PROF. DR. RAMAZAN KARAKUZU** yönetiminde hazırlanan **"SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME BÖLGESİNİN EĞİLME DAVRANIŞI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Yönetici

Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Kutlay SEVER

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Emine İlknur CÖCEN
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmalarım sırasında bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU' ya sonsuz teşekkür ederim.

Deney numunelerinin hazırlanmasına yardımcı olan ve çalışmalarımda bana yol gösteren Arş. Gör. Volkan ARIKAN ve Arş. Gör. Farshid KHOSRAVI MALEKI' ye çok teşekkür ederim. Ayrıca Mekanik Test Laboratuvarı teknisyeni Canip DURAK' a teşekkür ederim.

Arkadaşlığı ve dostluğu ile her zaman yanımda olan Deniz Ezgi Gülmez' e teşekkür ederim.

Son olarak, manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim ve bana güvenen aileme çok teşekkür ederim.

Sevim Nihal PUHURCUOĞLU

SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME BÖLGESİNİN EĞİLME DAVRANIŞI

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, üç nokta eğme testi uygulanan yapıştırma ile birleştirilmiş sandviç kompozitlerin eğilme davranışını incelemektir. Sandviç kompozit vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir ve 10 mm kalınlıklı çekirdek malzemeli sandviç yapı 125x150 mm^2 boyutlarında kesilmiştir. Daha sonra numuneler, yapıştırıcı görevi gören başka bir kompozit malzeme ile birleştirilmiştir. Yama olarak adlandırılan birleştirilen kompozit, sandviç kompozitin yüzey tabakaları ile aynı malzeme bileşenlerine sahiptir. Numunelerin birleştirilmesinden sonra, yama uzunlukları 30 mm, 45 mm, 60 mm, 75 mm ve 90 mm olan beş farklı numune tipi elde edilmiştir. Yama kompoziti el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Yamalı numuneler de vakumlanarak kürlenmiştir. Birleştirilen numuneler 250x50 mm^2 boyutlarında kesilmiştir ve farklı yama uzunluğundaki numune tipleri üç nokta eğme testi için tamamen hazır hale gelmiştir.

Daha sonra farklı yama uzunluğundaki bu numunelere üç nokta eğme testi uygulanmış ve maksimum kuvvete karşılık gelen düşey deplasmanlar belirlenmiştir. Aynı numuneler için, sonlu elemanlar analizi de ANSYS programında yapılmıştır. En sonunda, deneysel çalışmalar ve analiz sonuçları karşılaştırılmış ve hangi yama uzunluğundaki numune türünün daha mukavemetli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, yapıştırma ile birleştirme yöntemi, üç nokta eğme testi

BENDING BEHAVIOR OF JOINING AREA IN SANDWICH COMPOSITES

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the bending behavior of adhesively bonded sandwich composites by applying three point bending test. Sandwich composite was manufactured by vacuum infusion method and was cut in the dimension of 125x150 mm^2 with 10 mm core thickness. Then the samples were jointed with another composite acting as adherend. Bonded joint composite, called patch, has the same material components such as face sheets of sandwich composite. After the joint of the samples, five different types of specimens with the patch widths of 30 mm, 45 mm, 60 mm, 75 mm and 90 mm were obtained. Patch composites were manufactured by hand lay up method. Jointed samples also were vacuumed and cured. Bonded joint samples were cut to dimension of 250x50 mm^2 and sample types with different patch widths were completely ready for three point bending test.

Afterwards, these samples which have different patch widths were applied three point bending test and the displacements corresponding to the maximum force were determined. Finite element analysis also is carried out the same samples by using the ANSYS software. Finally, experimental investigation and analysis results were compared and it has been determined which width-patched sample types more strength.

Keywords: Sandwich composite, adhesively bonded joint method, three point bending test

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii

TEŞEKKÜR iii

ÖZ iv

ABSTRACT v

ŞEKİLLER LİSTESİ viii

TABLOLAR LİSTESİ xi

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ - SANDVİÇ KOMPOZİTLER 6

2.1 Sandviç Kompozitler 6

2.2 Sandviç Kompozit Çeşitleri 7

2.3 Eğilme Rijitliği 10

BÖLÜM ÜÇ –SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ 13

3.1 Birleştirme Yöntemleri 13

3.1.1 Yapıştırma ile Birleştirme 13

3.1.2 Mekanik Bağlantılı Birleştirme 17

BÖLÜM DÖRT – SANDVİÇ KOMPOZİTİN İMALATI 19

4.1 Giriş 19

4.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi 19

BÖLÜM BEŞ – ÜÇ NOKTA EĞME DENEYİ 24

5.1 Üç Nokta Eğme Deneyi 24

5.2 Deney Sonuçları 27

BÖLÜM ALTI – SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 32

6.1 Sandviç Kompozit Numunenin Mekanik Özellikleri 32

6.2 Sonlu Elemanlar Analizi 33

6.3 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 35

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR 44

KAYNAKLAR 45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Sandviç kompozitin bileşenleri 6

Şekil 2.2 Eğilme durumunda sandviç kompozit elemanlarının taşıdığı yükler 7

Şekil 2.3 Sandviç bir kirişin enine kesit görüntüsü 12

Şekil 3.1 a) Tek katlı birleştirme 14

Şekil 3.1 b) Çift katlı birleştirme 14

Şekil 3.1 c) Tek ve çift taraflı birleştirme 14

Şekil 3.1 d) Kademeli birleştirme ve boyunbağı birleştirme 14

Şekil 3.2 Alt ve üst yüzeylerinden yapıştırılarak birleştirilmiş sandviç kompozit 16

Şekil 3.3 H kesit birleştirme 16

Şekil 3.4 Yüzey tabakalarından sırt sırta birleştirilmiş sandviç kompozit 17

Şekil 3.5 Mekanik bağlantılı birleştirmede oluşabilecek hasar tipleri 18

Şekil 4.1 Cam elyafların vakum masasına dizilişi 20

Şekil 4.2 Sandviç kompozitin vakumlanması 21

Şekil 4.3 Yapıştırılacak kompozit numuneler 22

Şekil 4.4 a) Numunenin vakumlanması 22

Şekil 4.4 b) Numunenin kürlendikten sonraki hali 22

Şekil 4.5 Yama uzunluğu 60 mm olan numune 23

Şekil 5.1 Üç nokta eğme deneyi altındaki bir sandviç kompozitte oluşabilecek hasar modları 24

Şekil 5.2 Tekil yük uygulanan iki ucu mesnetli bir kirişte meydana gelen kesme kuvveti ve moment diyagramları 25

Şekil 5.3 Numunenin deney cihazına bağlanması 26

Şekil 5.4 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin kuvvet altındaki çökme durumu ..26

Şekil 5.5 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin deney sonunda birleşme bölgesinden kırılması 27

Şekil 5.6 Yama uzunluğu 30 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği .. 27

Şekil 5.7 Yama uzunluğu 45 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği .. 28

Şekil 5.8 Yama uzunluğu 60 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği .. 28

Şekil 5.9 Yama uzunluğu 75 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği .. 29

Şekil 5.10 Yama uzunluğu 90 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği ...29

Şekil 5.11 Yamasız sandviç kompozit numunenin kuvvet-çökme grafiği..... 29

Şekil 5.12 Farklı yama uzunluğundaki numunelerin kuvvet-çökme grafiği..... 30

Şekil 5.13 Üç nokta eğme testi uygulanan sandviç kompozit numunelerde maksimum kuvvet-yama ilişkisi 31

Şekil 6.1 Solid 185 tabakalı elemanın geometrisi..... 33

Şekil 6.2 Tabakadaki gerilmeler ve koordinat sistemleri..... 34

Şekil 6.3 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin sonlu eleman modellemesi 34

Şekil 6.4 Yamasız sandviç kirişin sonlu eleman modellemesi 35

Şekil 6.5 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği 36

Şekil 6.6 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği 36

Şekil 6.7 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği 37

Şekil 6.8 Yama uzunluğu 75 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği 37

Şekil 6.9 Yama uzunluğu 90 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği 38

Şekil 6.10 Yamasız numunenin kuvvet-çökme grafiği..... 38

Şekil 6.11 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri..... 39

Şekil 6.12 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri 39

Şekil 6.13 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri 40

Şekil 6.14 Yama uzunluğu 75 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri 40

Şekil 6.15 Yama uzunluğu 90 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri 41

Şekil 6.16 Yamasız numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri 41

Şekil 6.17 Farklı yama uzunluğundaki numunelerin maksimum çeki ve bası gerilmeleri 42

Şekil 6.18 Numunelerin orta noktasının düşey deplasman değerlerinin üç nokta eğme deneyi ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılması.....42

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 E ve S camları elyaf bileşenleri 9

Tablo 2.2 Oda sıcaklığında (23˚C) epoksi reçinenin özellikleri 10

Tablo 6.1 Cam elyaf-epoksi kompozitin mekanik özellikleri 32

Tablo 6.2 Poliüretan köpük çekirdeğin mekanik özellikleri 32

Tablo 6.3 Numunelerin taşıyabildiği maksimum kuvvet değerleri..... 35

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Sandviç kompozitlerin kullanımı; yüksek eğilme rijitliği, yüksek mukavemet ve oldukça hafif yapılar olmaları sebebiyle günümüz teknoloji uygulamalarında ve savunma sanayinde giderek artmaktadır. İki rijit yüzey tabakası ile bu yüzeyleri birbirinden ayıran ve yük aktarımını sağlayan kalın ve hafif çekirdek malzemeden oluşan sandviç kompozitler, metalik malzemeler ile kıyaslandığında geniş ölçüde kullanılmaktadırlar. Kullanılan çekirdek malzeme, sandviç kompozitlerin eğilme rijitliklerini geniş ölçüde arttırmıştır. Eğilmeye karşı oldukça dayanıklı olan sandviç yapılarda birtakım hasar modları meydana gelebilmektedir. Bunlar; çekirdek kayması, yüzey mikro burkulması, yüzey kırışması veya buruşması ve çentiktir.

Tagarielli, Fleck ve Deshpande, ankastre ve basit mesnetli sınır koşullu vinilester-cam elyaf yüzeyli ve PVC köpüklü sandviç kompozit kirişler için; çökme modları olan *face micro buckling* (yüzey mikro burkulması), *core shear* (çekirdek kayması) ve *indentation* (çentik) hasar tiplerini analitik olarak tanımlamışlardır. Daha sonra üç nokta eğme testi uygulayıp sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Bu üç farklı çalışmanın ortak sonucu olarak; basit mesnetli kirişler başlangıçtaki çökme mekanizmasına karşılık gelen bir tepe noktasındaki yani çıkabildiği maksimum yük değerine kadar çıkarken (nihai yük değeri), ankastre kirişlerin üst yüzey tabakasında meydana gelen çekme yırtılması nedeniyle yük taşıma kapasitelerinin azaldığını ve akma sonrası sertleştiği sonucuna varmışlardır. Başlangıç çökme yükü ve enerji emilimi değerlerini belirleyen çökme mekanizması sonuçları, minimum ağırlıklı PVC köpüklü cam elyaf yüzey tabakalı sandviç kompoziti hesaplamalarında kullanılmıştır (Tagarielli, Fleck ve Despandhe, 2004).

McCormack ve arkadaşları, yapıştırmalı birleştirme yöntemi ile yüzeyleri metal köpük çekirdeğe yapıştırarak elde ettikleri sandviç kompozitlere üç nokta eğme testi ve sonlu elemanlar analizi uygulayarak etkin hasar modlarının çekirdek kayması ve çentik olduğunu görmüşlerdir. Sandviç kiriş numunelerini hasar başlangıç yükü ve

limit yükü ölçerek tasarlamışlardır. Daha sonra analiz ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır (McCormack, Miller, Kesler ve Gibson, 2001).

Styles, Compston ve Kalyanasundaram, alüminyum köpüklü termoplastik yüzeyli sandviç kompozitlerin eğilme davranışına çekirdek kalınlığının etkisini, dört nokta eğme deneyi ve birim şekil değiştirme analizi uygulayarak araştırmışlardır. Daha az kalınlıktaki numunelerde, hasarın yüzey boyunca meydana geldiğini, yüzeyde kırılma hasarı ile bir miktar çekirdekte çatlaklar ve ezilmeler gözlemlerken; çekirdek kalınlığının artmasıyla birlikte deformasyonların çekirdekte olduğunu ve bu deformasyonların çentik şeklinde çekirdek deformasyonlarına sebep olduğunu gözlemlemişlerdir (Styles, Compston ve Kalyanasundaram, 2007).

Potluri ve arkadaşları, sonlu elemanlar analizi ile farklı kalınlıktaki PUR çekirdek ve yine farklı kalınlıktaki Alüminyum-çelik yüzey malzemesine sahip sandviç kompozitlerin kayma mukavemeti ve rijitlikleri üstünde çalışmışlardır. Sandviç kompozitin rijitliğinin doğrudan çekirdek ve yüzey tabakası kalınlığından etkilendiği; kütle ve elastik birim şekil değiştirmenin çekirdek kalınlığından ziyade yüzey tabakası kalınlığından doğrudan etkilendiği ve esas hasarın çekirdekteki kayma hasarı olduğu sonucunu çıkarmışlarıdır. Sonuç olarak; düşük ağırlıklı ve yüksek rijitlikte bir sandviç kompozit (metal yüzeyli ve köpük çekirdekli) tasarımı için, yüzey tabakasını sabit tutarak çekirdek kalınlığını ve köpük yapısını optimize etmenin (çünkü burada çekirdek önemli rol oynamaktadır) rijitlik açısından daha iyi sonuçlara yol açabileceğini göstermişlerdir (Potluri, Kumar, Raju ve Babu, 2017).

Linul ve Marşavina, farklı yoğunluktaki poliüretan köpük çekirdek (40kg/m^3 ve 200 kg/m^3) ve farklı yüzey tabakalarına sahip (cam elyaf takviyeli polimer/GFRP, epoksi, polyester ve alüminyum) sandviç kompozitler üzerinde üç nokta eğme testi uygulayarak bu kompozitlerin hasar modlarını araştırmışlardır. Ayrıca sandviç malzemeleri karakterize edebilmek için hücresel köpük yapılara taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile statik analiz uygulamışlar ve sonrasındastatik basma testine tabi tutarak Young modülü, akma değeri gibi mekanik özellikleri belirlemişlerdir. Bu testten elde edilen değerlerle analitik olarak da hasar modlarını hesaplamışlardır.

Elde ettikleri hasar modlarını, üç nokta eğme deneyi ile doğrulamışlardır (Linul ve Marşavina, 2015).

Sharaf, Shawkat ve Fam, bina kaplamalarında kullanılan cam elyaf takviyeli polimer yüzey tabakalı ve iki farklı yoğunluklu poliüretan köpük çekirdekli (0,31 kN/m^3 ve 0,63 kN/m^3) sandviç kompozitleri üniform yük altında üç nokta ve dört nokta eğme testlerine tabi tutarak eğilme davranışını ve mukavemetini araştırmışlardır. Sonuç olarak; aynı yüzey tabakasına sahip sandviç kompozit için çekirdek yoğunluğu fazla olan numune türünün eğilme rijitliği ve mukavemetinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca çekirdekte meydana gelen kayma hasarının düşük yoğunluklu çekirdekte daha fazla olduğunu görmüşlerdir (Sharaf, Shawkat ve Fam, 2010).

Sharma, Murthy ve Krishna, poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin yorulma davranışındaki ara yüzey çalışmasını üç nokta eğme deneyi altında yapmışlarıdır. Yüzey tabakaları; epoksi-cam elyaf/epoksi-cam elyaf, polyester-cam elyaf/polyester-cam elyaf ve epoksi-cam elyaf/polyester cam elyaf olan üç farklı numune türünün yorulma hasar mekanizmasını sonlu elemanlar analizi ile yapmışlardır. Statik eğilme test sonuçlarına göre; her iki yüzeyi epoksi-cam elyaf olan numune türünün en yüksek yorulma mukavemeti ve rijitlik azalmasına, her iki yüzeyi polyester-cam elyaf olan numune türünün de en düşük yorulma mukavemeti ve rijitlik azalmasına sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, her üç numune türünde yorulma frekansındaki artışa bağlı olarak rijitlik azalmasında da bir artış olduğunu görmüşlerdir (Sharma, Murthy ve Krishna, 2004).

Mamalis ve arkadaşları, dört farklı polimer köpük çekirdekli (polimetakrilamid, poliüretan ve lineer ve çapraz dizilimli polivinil klorür) ve cam elyaf takviyeli değişik nitelikli akrilik reçineli iki farklı yüzey tabakasından oluşan sandviç kompozitlere üç nokta eğme deneyi uygulamışlar ve eğilme yükü altındaki bu numunelerde temel iki hasar modu tespit etmişlerdir. Bunlar; çekirdek kayması hasarı ve yerel çentik oluşumu hasarıdır. Sandviç yapı bileşenleri ve geometriden dolayı yüzey mikro burkulması ya da yüzey buruşması hasarları gözlemlememişlerdir. Çökme modları, eğilme altındaki sandviç yapıların çarpışma enerjisi emilimi ile ilgili mekanizmaları vurgulamaktadır.

İki çökme modu arasında çarpışma enerjisi emilimine göre en etkili olan yerel çentik oluşumudur (Mamalis, Spentzas, Manolakos, Ioannidis ve Papapostolou, 2008).

Padmanabhan, poliüretan köpük çekirdekli ve cam elyaf-epoksi ile karbon cam elyaf-epoksi yüzey tabakalı sandviç kompozitleri tasarım optimizasyonu yaparak ve yapmayarak tasarımlarını ve üretimlerini yapmış ve tasarım optimizasyonu yapıldığında eğilme rijitliğinde belirgin bir artış gözlemlemiştir (Padmanabhan, 2014).

Zu ve arkadaşları, alüminyum köpüklü sandviç kompozitleri, farklı mesnet aralıklarında ve farklı yüzey tabakalarında üç nokta eğme deneyine tabi tutmuşlar ve hasar davranışlarını araştırmışlardır. Hasar modlarını çentik, çekirdek kayması ve plastik bölgeler olarak gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yüzey tabakası kalınlığı daha fazla olan numunede maksimum kuvvetin daha fazla olduğunu ve mesnetler arası mesafenin artmasının maksimum kuvveti azalttığını gözlemlemişlerdir (Zu, Song, Zhong, Li, Mu ve Yao, 2012).

Kulkarni ve arkadaşları, PVC köpüklü S2-cam elyaf/epoksi yüzey tabakalı sandviç kompozitin üç nokta eğme deneyi ile yorulma çatlak ilerlemesini araştırmışlardır. Deney sırasında yerel çentik oluşumunu en aza indirgemek için bir bağlama elemanı tasarlamışlardır. Deney sonunda, kiriş eksenine paralel çekirdek-yüzey ayrılmasının üst yüzey boyunca yavaşça ilerlediğini, daha sonra bu ayrılmanın kayma çatlağı şeklinde çekirdek içine girdiğini ve en sonunda da büyüyerek numunede çökmeye yol açtığını gözlemlemişlerdir. Sandviç kompozitteki yorulmanın, çevrim sayısının bir fonksiyonu olan çekirdek hasarıyla kontrol edilebildiğini gözlemlemişlerdir (Kulkarni, Mahfuz, Jeelani ve Carlsson, 2003).

Gdoutos ve Daniel, tek yönlü karbon-epoksi yüzey tabakalı PVC köpüklü sandviç kompozitin üç nokta ve dört nokta eğme deneyi ile hasar modlarını araştırmışlardır. Gözlemledikleri yüzey buruşma hasarı, çentik hasarı ve çekirdek hasarını analitik çalışmalarla karşılaştırmışlar ve bu hasarların başlaması, ilerlemesi ve etkileşimlerinin yükleme türüne, malzeme özelliklerine ve geometrik boyutlara bağlı olduğunu söylemişlerdir (Gdoutos ve Daniel, 2008).

Rizov, Shipsha ve Zenkert, PMI köpük çekirdekli cam elyaf takviyeli yüzey tabakalı sandviç kompozitin çentik hasarı araştırmasını yapmışlar ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde ettikleri artık gerilme ve çentikleri deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Artık çentik hasarının, sandviç kompozitlerin çentik sonrası yük taşıma kapasitelerinin modellenmesinde çok önemli bir rol oynayacağını söylemişler ve sandviç yapıların çentik sonrası mekanik davranışlarını tanımlayabilen daha gelişmiş bir nümerik model geliştirmeye yönelik bir adım olarak düşünmüşlerdir (Rizov, Shipsha ve Zenkert, 2005).

Daniel ve Abot, alüminyum bal peteği çekirdekli karbon-epoksi yüzey tabakalı sandviç kirişleri üç nokta ve dört nokta eğme testine tabi tutarak eğilme davranışlarını araştırmışlardır. Yüzey tabakaları için moment-birim şekil değiştirme ilişkisinin, kompozit malzemenin kendisi gibi lineer olmayan bir davranış sergilediğini görmüşler ve hem çekirdekte hem de yüzeylerde kalınlık boyunca birim şekil değiştirmedeki lineerliği hesaplamışlardır. Sonuç olarak, eğilme rijitliği için çok sık kullanılan çekirdeğin katkılarının ihmal edilebileceğini söylemişlerdir (Daniel ve Abot, 2000).

Ferdous, Manalo ve Aravinthan, cam elyaf takviyeli fenolik köpük çekirdekli sandviç kompoziti epoksi polimer matrisle çift katlı yapıştırarak matris özelliklerinin, yapışma uzunluğunun, yapışma kalınlığının ve yapışma genişliğinin sandviç kompozitle matrisin yapışma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Taguchi tasarım deneyi, analiz ve teorik tahminlerinin ortak sonucu olarak bu dört bağımsız parametrenin optimum yapışma mukavemeti için değerlerini bulmuşlardır (Ferdous, Manalo ve Aravinthan, 2017).

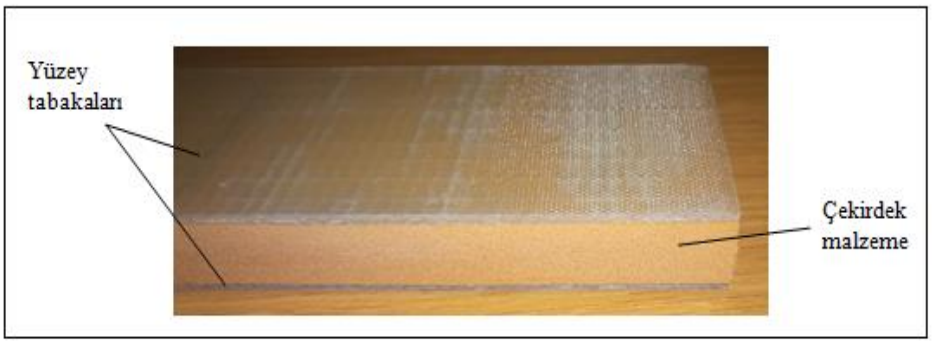
Bu çalışmada epoksi-cam elyaf yüzey tabakalı ve poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozit, yapıştırma ile birleştirilerek üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuştur. Birleştirme işlemi, yama olarak adlandırılan epoksi-cam elyaf kompozit malzeme ile olmuştur. Farklı yama uzunluğundaki numune grupları için üç nokta eğme deneyi sonucunda hangi yama uzunluğundaki numune grubunun maksimum kuvvete karşılık gelen çökme değerinin en fazla olduğu analiz sonuçları ile karşılaştırılıp değerlendirilmiştir.

BÖLÜM İKİ
SANDVİÇ KOMPOZİTLER

2.1 Sandviç Kompozitler

Sandviç kompozitler; uzay araçları, uçaklar ve ulaşım araçları gibi çeşitli yerlerde ve uygulamalarda kullanılmaktadır (Baba ve Thoppul, 2010). Hücresel çekirdekli sandviç kompozitler ise ağırlık tasarrufunun gerekli olduğu uçak ve otomobil üretiminde, yük taşıyan yapılarda ve spor aletlerinde kullanılmaktadır (Meraghni, Desrumaux ve Benzeggagh, 1999). Hafif ağırlıktaki elemanlara yönelik gelişmeler ve fiber takviyeli kompozit yapıların yaygın olarak kullanılması ile bu elemanların birleştirilmesi ilgi odağı haline gelmeye başlamıştır. (I'Armée, Stein ve Becker, 2016). Çekirdek (*core*) denilen hafif ağırlıktaki malzemelerin yüzey tabakası olarak adlandırılan fiber takviyeli kompozitlerle birleşmesi ile oluşan sandviç kompozitlerin kullanım alanları uzay-uçak sektöründe ve denizcilik alanında gün geçtikçe artmaktadır.

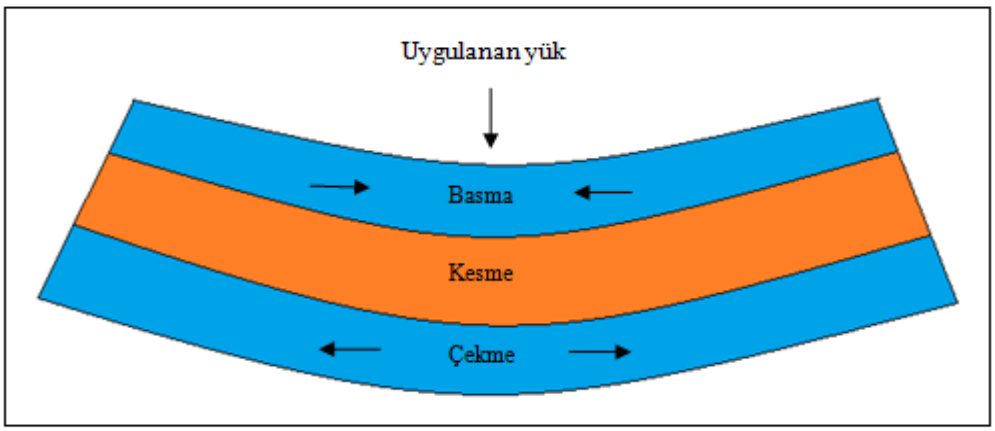
Sandviç yapılar, yüzey tabakası olarak adlandırılan iki kompozit malzeme ile eğilme rijitliği ve enerji emilimi için uygun olan düşük ağırlıklı çekirdek malzemeden oluşmaktadır (Sadighi ve Pouriayevali, 2008). Tipik olarak ince, rijit ve yüksek mukavemetli iki kompozit yüzey tabakası ilebu iki yüzeye yapıştırılmış kalın ve hafif ağırlıklı çekirdek malzemeden oluşan sandviç kompozit bileşenleri Şekil 2.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sandviç kompozitin bileşenleri

Bu tarz bir birleşim, katı bir kompozit malzeme yüzeyine nazaran yüksek bir özgül eğilme rijitliği sağlar. Bir sandviç kompozitte, çekirdek malzemesi kesme kuvvetlerini iletirken; yüzey tabakaları (alt ve üst yüzey) çekme ve basma gerilmeleri taşımaktadır. Aynı zamanda çekirdek; burkulma ve çatlaklara karşı yüzeylere destek sağlamaktadır. Yüzeyler arasındaki yük aktarımını sağlamak için, bu yapılar arasındaki yapıştırma düzgün olmak zorundadır. Düzgün bir yapışma olmaması çekirdek kayması gibi hasarlara yol açarken yapının da eğilmeye karşı direnci zayıf olacaktır. Bunların dışında sandviç yapılar; iyi bir termal ve akustik yalıtım, yüksek enerji emilimi ve suya batmama gibi çok yönlü avantaj sağlar.

Sandviç yapılardaki yüzey malzemesi (cam elyaf-epoksi, karbon elyaf-epoksi gibi) rijit ve ince iki tabaka olup; çekirdek malzeme, bu iki tabakayı birbirinden ayırır ve tabakalar arası yük aktarımını sağlar. Yapıştırma yüzeyi ise, kesme ve eksenel kuvvetleri çekirdekten yüzeylere iletebilen reçineden oluşur (Gladwell,2011). Şekil 2.2 ile eğilmeye maruz bir sandviç kompozitin taşıdığı yükler gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Eğilme durumunda sandviç kompozit elemanlarının taşıdığı yükler

2.2 Sandviç Kompozit Çeşitleri

Bir sandviç yapının çeşitlerinden bahsetmek, o kompozit yapıyı oluşturan bileşenlerin çeşitlerinden bahsetmek anlamına gelir. Yani sandviç kompozit

sınıflandırılırken; yüzey malzemesi, yapıştırıcı türü (reçine türü) ve çekirdek (core) malzemesine göre ayrılacaktır. Bu çalışmada yüzey malzemesi olarak cam elyaf, yapıştırıcı olarak epoksi ve çekirdek malzemesi olarak da poliüretan köpük çekirdek kullanıldığı için bu bileşenler anlatılacak; diğer malzemeler üzerinde durulmayacaktır.

Yüzey malzemesi; matris malzemesi (polimer, metal, seramik) ile takviye elemanından oluşmaktadır. Bu takviye elemanı sürekli veya süreksiz elyaf (lif), parçacık veya laminent tabaka şeklinde olabilir. Bu çalışmada sandviç kompozitin yüzey tabakasını ve yama kompozitin takviye fazını oluşturan cam elyaflar, sürekli elyaflardır.

Cam elyaf, silisyum dioksitten (SiO_2) meydana gelmektedir ve polimer matrisli kompozitlerden yaygın kullanılan takviye elemanıdır. Düşük maliyetli olmasının yanı sıra iyi bir korozyon direnci, yüksek çekme mukavemeti ve yüksek kimyasal dayanıklılığa sahiptir. Ancak, kullanımı sırasında aşınmaya karşı olan hassasiyeti çoğunlukla çekme mukavemetini düşürür. Yüksek özgül ağırlık, nispeten düşük yorulma direnci ve yüksek sertlik de dezavantajları arasındadır (Schwartz, 1996).

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan cam elyaf tipleri E-camı ve S-camıdır. Bunlardan başka bir de asitlere karşı iyi bir korozyon direnci olan C-camı vardır. E-camı ticari olarak kullanılan takviye fiberleri arasında en düşük maliyete sahiptir. Aslında uçak parçaları ve füze gövdeleri için geliştirilen S-camı, fiberler arasında en yüksek çekme mukavemetine sahip fiberlerdir. Bu niteliksel farklılık ve yüksek üretim maliyeti S-camının E-camına göre daha pahalı olmasına neden olmaktadır.

Tablo 2.1’ de E-camı ve S-camının kimyasal bileşenlerinin ağırlıkça yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 2.1 E ve S camları elyaf bileşenleri (% ağırlık) (Mallick, 2008)

Cam Bileşenleri	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**B_2O_3**	**Na_2O**
E Camı	54,5	14,5	17	4,5	8,5	0,5
S Camı	64	26	-	10	-	-

Sandviç kompozitin matris fazını oluşturan reçine malzemesi; takviye malzemesinin (elyaf) içinde bulunur ve aynı zamanda sandviç kompozitte yüzey malzemesi (takvive fazı) ile çekirdek (*core*) malzemenin birleştirilmesinde rol oynamaktadır.

Bu çalışmada reçine ve yapıştırıcı malzeme olarak kullanılan epoksi, bir mol oksijene karşılık iki mol karbon atomundan oluşan epoksi gruplarının birleşmesiyle meydana gelen düşük molekül ağırlıklı organik sıvı reçinelerdir.

Epoksi reçineler en çok kullanılan reçine türüdür. Epoksi üretimi sırasında tepkimeye sertleştiriciler eklenerek epoksinin viskozite, darbe, bozunma gibi çeşitli özellikleri iyileştirilebilir. Bu çalışmada sandviç kompoziti ve yama kompoziti üretmek için kullanılan epoksi, Fibermak Kompozit'in ürettiği F-1564 epoksi reçinedir. İçerisine ağırlıkça 1/3 oranında katılan sertleştirici ise Huntsman Şirketi'nin ürettiği Aradur 3487 BD ürün isimli sertleştiricidir. Reçinenin içine katılan sertleştirici ya da plastikleştirici kompozitin kürlenmesini hızlandırmaktadır. Avantajları; yüksek mekanik mukavemet ve elyaflara iyi yapışabilme özelliğidir (Kaw, 2006). Tablo 2.2 ile oda sıcaklığındaki epoksi reçinenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2 Oda sıcaklığında (23˚C) epoksi reçinenin özellikleri (Mallick, 2008)

Yoğunluk (g/cm$_3$)	1,2-1,3
Çekme Mukavemeti (MPa)	55-130
Elastisite Modülü (GPa)	2,75-4,10
Poisson Oranı	0,2-0,33

Çalışmada sandviç kompozitin çekirdek malzemesini oluşturan poliüretan, kompozit endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılan kapalı hücreli köpüklerdir. Kapalı hücreli yapılarından dolayı su emilimleri düşüktür. Küflenmeye ve çürümeye karşı dirençli yapılardır. Bu özelliklerinden dolayı denizcilik endüstrisi için elverişli malzemelerdir. Esnek ve dayanıklı yapıdaki bu malzemeler, hafif ağırlıktaki malzemelerin gereksinimlerini yerine getirirler (http://altairenlighten.com/in-depth/sandwich-structures/). Çalışmada kullanılan poliüretan köpük çekirdek AIREX® C70.55 tir.

2.3 Eğilme Rijitliği

Bu tez çalışmasında vakum infüzyon yöntemi ile üretilen sandviç kompozit, üç nokta eğme deneyine tabi tutulacağı için eğilme rijitliğinden bahsetmek doğru olacaktır.

Paralel eksen teoreminden sandviç kirişin eğilme rijitliği E_xI,

$$E_x I = E_x^c I_c + 2E_x^f I_f \tag{2.1}$$

olarak elde edilir. Burada, I_c çekirdek malzemenin tarafsız eksene göre ve I_f yüzey malzemesinin tarafsız eksen y'ye göre atalet momentleridir.

Eşitlik 2.2 ile çekirdek malzemenin atalet momenti I_c ve Eşitlik 2.3 ile her bir yüzey tabakasının atalet momenti I_f nin tarafsız eksene göre (*y-ekseni*) matematiksel tanımları verilmiştir.

$$I_f = \frac{bh_f^3}{12} + \frac{bh_f d^2}{4} \tag{2.2}$$

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} \tag{2.3}$$

Sandviç kirişteki birim genişlik başına düşen eğilme rijitliği ise,

$$\frac{E_x I}{b} = \frac{E_x^c h_c^3}{12} + E_x^f \left(\frac{h_f^3}{6} + \frac{h_f d^2}{2} \right) \tag{2.4}$$

olarak tanımlanır. E_xI/b ifadesi, D_x ifadesini kast eden eğilme rijitliği olarak tanımlanır. Eşitlik 2.4 düzenlenirse,

$$D_x = E_x^f h_f d^2 \left[\frac{h_c^3}{12 h_f d^2} \left(\frac{E_x^c}{E_x^f} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{h_f}{d} \right)^2 + \frac{1}{2} \right] \tag{2.5}$$

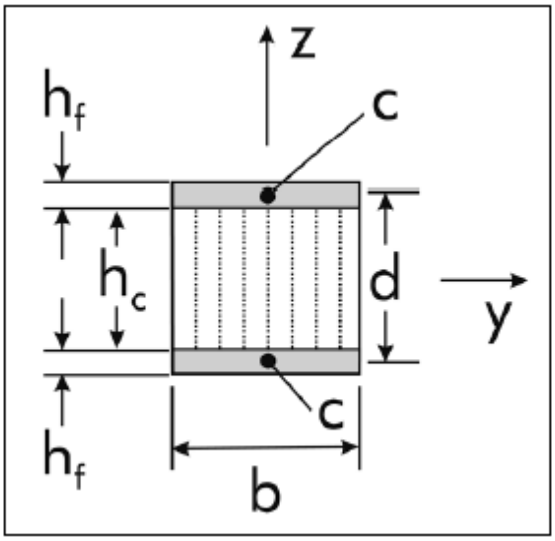
eşitliği elde edilir. Eşitlik 2.5'te parantez içindeki ilk terim çekirdeğin eğilme rijitliğine sağladığı katkıyı temsil etmektedir. Ancak bu değer çok küçük bir değerdir ve ihmal edilebilir. Parantez içindeki ikinci terim ise, sadece kalın yüzeyler için çok büyük katkı sağlar. Sandviç yapıların çoğu ince yüzey tabakasına sahip olduğundan geometriye bağlı olan ikinci terim, üçüncü terim olan 1/2 ile kıyaslandığında ihmal edilebilir.

Bu durumda ince yüzey tabakalı sandviç kirişteki eğilme rijitliği Eşitlik 2.6 ile verilmiştir.

$$D_x = \frac{E_x^f h_f d^2}{2} \tag{2.6}$$

Görüldüğü gibi, büyük bir eğilme rijitliği elde edebilmek için, E_x^f yüzey tabakası modülü ve yüzey tabakalarının merkezleri arasındaki uzaklık *d* genişliği olarak ve iki faktörün büyüklüğü önemlidir. Bu iki faktör, eğilme rijitliği ile doğru orantılıdır. Her ne kadar yüzey tabakası yüksekliği h_f eğilme rijitliği ile doğru orantılı olsa da ve eğilme rijitliğine katkı sağlayacakmış gibi dursa da, ağırlık açısından faydalı olmayacaktır. Çünkü bu değerin artması yapının ağırlığını arttıracaktır ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere; eğilme rijitliği ve ağırlık açısından en uygun sandviç kompozit tasarımı düşük yoğunluklu bir çekirdekten ziyade ince ve yüksek modüllü yüzey tabakası kullanımıdır.

Şekil 2.3'te sandviç kompozitin enine kesiti gösterilmiş olup *C* ifadesi, yüzey tabakalarının merkezi noktalarını göstermektedir.



Şekil 2.3 Sandviç bir kirişin enine kesit görüntüsü (Gladwell, 2011)

BÖLÜM ÜÇ
SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1 Birleştirme Yöntemleri

Sandviç kompozitlerde birleştirme yapmanın amacı, bir kompozit yapıdan diğerine yük aktarımını gerçekleştirmektir. Böylece eğilme mukavemeti açısından da sandviç bir kirişe göre daha sünek bir yapı elde edilir. Fiber takviyeli kompozit yapılarda birleştirme işlemi, bir kompozit yapıda en zayıf bölgeye uygulandığından bu anlamda çok önemlidir (Mallick, 2008).

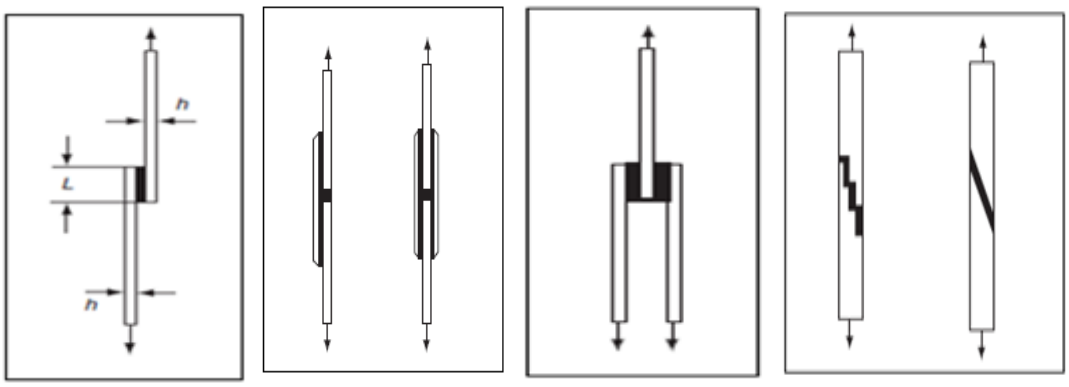
Bu çalışmada poliüretan köpük çekirdekli cam elyaf-epoksi yüzey tabakalı sandviç kompozit, yapıştırılarak birleştirildiğinden yapıştırmalı birleştirme yöntemi üzerinde durulacak ve bu yöntemle karşılaştırma yapabilmek için mekanik bağlantılı birleştirmeden bahsedilecektir.

3.1.1 Yapıştırma ile Birleştirme

Çalışmada sandviç kompozitler, yama olarak adlandırılan epoksi-cam elyaf kompozit ile birleştirilmiştir. Matris malzemesi olan epoksi aynı zamanda yapıştırıcı malzemesi olarak yapışkan ara yüzeyini oluşturmaktadır.

Bu yöntem ile kompozit yapıların, yüzey tabakalarından tek katlı veya çift katlı; tek bir yüzeyden veya her iki yüzeyden yapıştırılarak birleştirilmeleri söz konusudur.

Şekil 3.1a-d ile yapıştırma ile birleştirme yöntemleri gösterilmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 3.1 a) Tek katlı birleştirme, b) Çift katlı birleştirme, c) Tek ve çift taraflı birleştirme, d) Kademeli birleştirme/solda ve boyunbağı birleştirme/sağda (Mallick, 2008)

Şekil 3.1 a) ile tek katlı birleştirme örneği verilmiştir. Bu yöntem çok sık kullanılan basit bir yöntemdir. Burada yapıştırıcı içinde oluşan kayma gerilmesinden yük aktarımı meydana gelmektedir.

Aynı zamanda, uygulanan yük merkezde olmadığı için yani bağlantı bölgesinin kenarlarında olmasından dolayı eğilme davranışı, yapıştırıcıdaki kalınlık boyunca normal bir gerilme oluşturur. Kayma gerilmesi ve normal gerilme dağılımları, yapıştırma yüzeyinin uç katlarında (alt ve üst noktalarda) yüksek değerlere sahip olurlar.

Şekil 3.1 b) ile görülen çift katlı bir birleştirme örneğinde tek katlı birleştirmede oluşan bu yüksek normal ve kayma gerilmeleri, neredeyse yarı yarıya azaltılmış olur. Böylece daha yüksek bir bağlantı mukavemeti elde edilmiş olur.

Tek katlı ve çift katlı birleştirmelerden başka yüzeylerin tek ya da çift taraflı birleştirilmeleri söz konusudur. Bu yöntemde iki kompozit yapı sırt sırta yerleştirilerek yüzeylerden birinden veya her iki yüzeyden yapıştırılır. Gerilme dağılımları daha düzgün olan bu birleştirme yöntemi tek katlı birleştirmeye göre daha mukavemetli ve

daha dayanıklı bir yapıya sahiptir. Şekil 3.1 c) ile tek taraflı ve çift taraflı birleştirme örnekleri verilmiştir.

Bunlardan başka bir de Şekil 3.1 d) ile gösterilen kademeli ve boyunbağı birleştirme mevcuttur. Ancak bu yöntemler yüksek bağlantı mukavemetine sahip olsalar da pek tercih edilmemektedir. Zira kademelerin işlenmesindeki zorluklar ve boyunbağı açıları gerilme yığılmalarının oluşmasına neden olabileceği için köşeli bağlantı noktaları mukavemet açısından kullanışlı değildir.

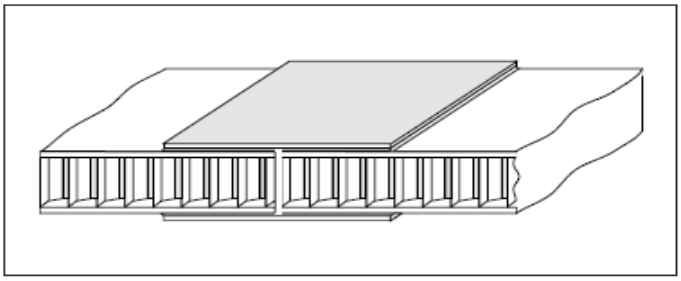
Yapıştırma ile birleştirme yönteminde, mekanik birleştirmeye göre daha kolay bir tasarım mevcuttur. Örneğin; cıvatalı birleştirmedeki gibi delik açılmasına gerek yoktur. Bu da gerilme yığılması oluşumunu en aza indirger. Yani daha homojen bir gerilme dağılımı sağlar. Aynı zamanda yapıştırmalı birleştirme nispeten daha düzgün bir gerilme dağılımı içerir (Silva, Neves, Adams ve Spelt, 2009).

Bu yöntemde, cıvata ya da perçin gibi mekanik parçaların olmaması yapıda neredeyse fazladan hiç ağırlık artışına neden olmaz ve bu da yöntemin en önemli avantajlarından biridir. Mekanik parçaların olmamasından dolayı maliyeti oldukça düşüktür üstelik korozyon problemini de en aza indirger. Bağlantıda düz ve pürüzsüz yüzeylerin elde edilmesi çentik oluşumunu da azaltır. Mekanik birleştirmeye göre yükü daha geniş alanlara dağıtır (Mallick, 2008).

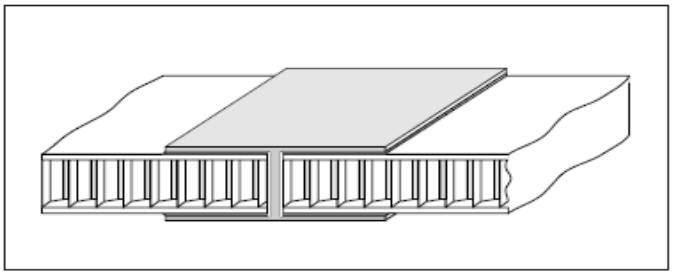
Yöntemin avantajlarına rağmen birtakım dezavantajları mevcuttur. Bağlantının demontajı tahribatsız çok zordur. Yani yüzeylere zarar vermeden parçaları birbirinden ayırmak neredeyse imkansızdır. Aynı zamanda birleştirme yapmadan önce çok titiz bir yüzey hazırlığı gerektirir (Cao, 2003). İşlem sıcaklığından ve nem çevresel koşullardan etkilenebilir (Mallick, 2008). Diğer bir husus da birleştirme yaparken yüzeylerin birbirleri ile olan temasının düzgün olabilmesi için bağlantı sırasında yapıştırma işlemi büyük hassasiyet gerektirir. Yanlış yapılan bir birleştirmenin

demontajı, o kompozitlerin tekrar kullanılamayacağı anlamına gelir ki bu da hem maliyet hem de zaman açısından kayıp demektir.

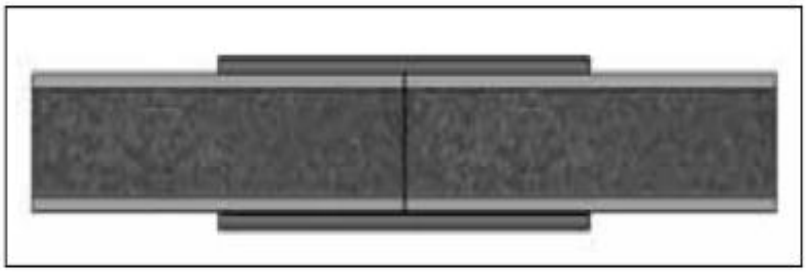
Sandviç kompozitlerde yapıştırma ile birleştirme yönteminde birleştirme bölgesine uygulanan yama kompozitin başka uygulamaları Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Alt ve üst yüzeylerinden yapıştırılarak birleştirilmiş sandviç kompozit (Sandwich panel fabrication technology, b.t)



Şekil 3.3 H kesit birleştirme (Sandwich panel fabrication technology, b.t)



Şekil 3.4 Yüzey tabakalarından sırt sırta birleştirilmiş sandviç kompozit (Banea ve Silva, 2009)

Bu çalışmada, sandviç kompozite uygulanan yapıştırma ile birleştirme yöntemi, Şekil 3.4 ile gösterilen yöntem gibi olmuştur. Hafif ağırlıklı yapıları, düşük üretim maliyeti ve iyileştirilmiş hasar toleransı bu yöntemi mekanik bağlantılı birleştirmeye göre daha avantajlı yapmaktadır (Banea ve Silva, 2009).

3.1.2 Mekanik Bağlantılı Birleştirme

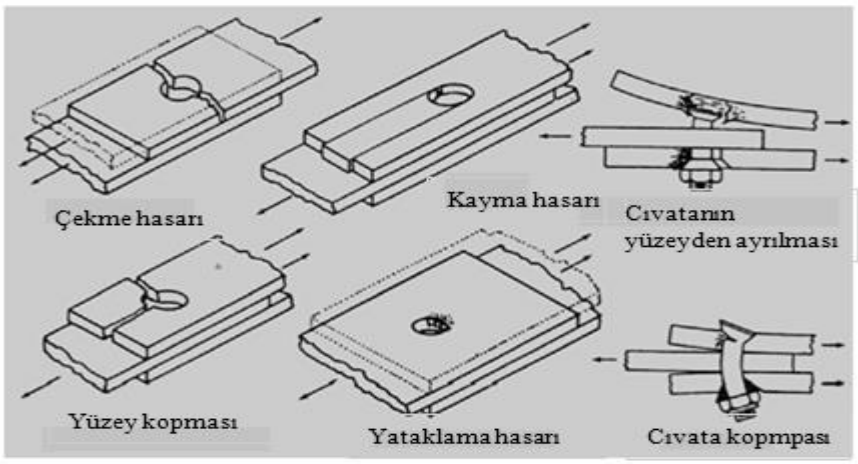
Mekanik bağlantılı birleştirme, kalın parçaların bağlantısında kullanılan bir yöntemdir ve ağır yüklere karşı dayanıklıdır. Yöntemde cıvata ya da perçin gibi makine elemanları kullanılır. Yapıştırma ile birleştirme yönteminin dezavantajları, bu yöntemin neredeyse avantajlarıdır.

Bu avantajlardan kısaca bahsetmek gerekirse, tahribatsız bir demontaj söz konusudur yani yüzeylere zarar vermeden parçaları birbirinden ayırmak mümkündür. Birleştirme için titiz bir yüzey hazırlığı gerektirmez ya da çok az gerektirir. Demontajı kolay bir şekilde yapılabildiği için bağlantı yerinin kontrolü kolayca yapılabilir. Birleştirme sırasında hassasiyet gerektirmez. Ancak bağlantı delikleri doğru ve ölçülü açılmalıdır yoksa yataklama hasarını doğurabilir.

Yöntemin dezavantajları ise yapıştırma ile birleştirme yönteminin neredeyse avantajlarıdır. Birleştirme yapılacak bölgelere açılacak bağlantı delikleri fiberlerin sürekliliğini engellediği ve yerel gerilme yığılmaları oluşturduğu için gerilme dağılımı düzgün olmaz. Aynı zamanda bu bağlantı deliklerinin işlenmesi gerektiğinden yüzey

tabakalarının mukavemetini azaltabilir. Cıvata, perçin gibi bağlantı elemanlarından ötürü yapıya fazladan ağırlık ilavesi söz konusudur ki bu kompozit yapıların özellikle uzay endüstrisinde tercih edilmelerinin bir nedeni olduğundan, fazladan ağırlık artışı istenmeyen bir durumdur (Mallick, 2008).

Şekil 3.5 ile mekanik birleştirme sonucu ortaya çıkabilecek bazı hasar tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Mekanik bağlantılı birleştirmede oluşabilecek hasar tipleri (Cao, 2003)

Şekil 3.5'te görüldüğü üzere cıvata, perçin gibi bağlantı elemanlarının sebep olduğu gerilme ve birim şekil değiştirme konsantrasyonu kompozit etrafında homojen olmayan bir gerilme dağılımına neden olabileceği gibi yüzey kopması gibi hasara da yol açabilir (Schwartz, 1996). Ayrıca düzgün açılmayan bağlantı delikleri, yataklama hasarına neden olabilir.

BÖLÜM DÖRT
SANDVİÇ KOMPOZİTİN İMALATI

4.1 Giriş

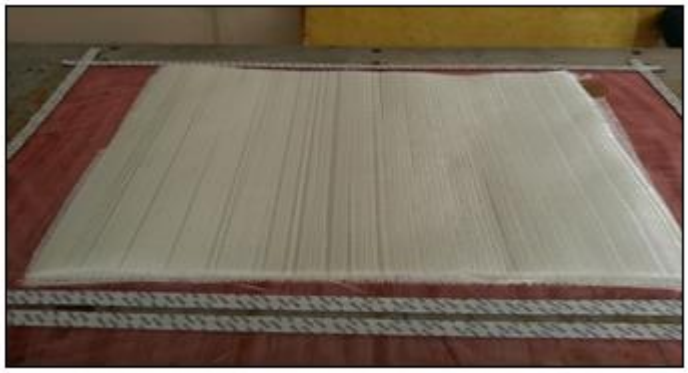
Bu çalışmada poliüretan köpük çekirdekli (AIREX® C70.55) fiber takviyeli polimer sandviç kompozit üretilmiştir. Fiber malzemesi olarak cam elyaf ve polimer olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Yüzeyleri birbirine ve çekirdeği yüzeylere bağlayıcı olarak yine epoksi reçine, yapıştırma malzemesi olarak kullanılmıştır. Sandviç kompozit vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş, daha sonra 125x150 mm^2 boyutlarında numuneler kesilmiştir. Kesilen bu numuneler uzun kenarları birbirine temas edecek şekilde olmak üzere yapıştırma ile birleştirme yöntemi ile birleştirilmiş ve mekanik bir hasarın olmaması için (kayma, yüzey ayrılması vb.) vakumlanarak hava geçirmeyecek şekilde 8 saat boyunca 80˚C' de fırında kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenen numuneler kısa kenarı üç eşit parçaya ayrılacak şekilde 250x50 mm^2 ölçülerinde tekrar kesilmiştir.

Birleştirme, yama kompozit olarak adlandırılan ve yine epoksi-cam elyaf malzemeli kompozitin el yatırması yöntemiyle üretilerek yapıştırılmasıyla olmuştur. Yama uzunlukları 30 mm, 45 mm, 60 mm, 75 mm ve 90 mm olmak üzere beş; yamasız kompozit kiriş ile birlikte toplam altı farklı numune türü elde edilmiştir. Numuneler, üç nokta eğme testine tabi tutulup maksimum kuvvetteki düşey deplasman değerleri tespit edilmiştir.

4.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Çalışmada kullanılacak sandviç kompoztin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık kontrollü vakum infüzyon masası üzerine bir ayırıcı film konulduktan sonra ayırıcının kenarlarını çerçeveleyecek şekilde

vakum bantları yapıştırıldı. Daha sonra cam elyaflar [0/90/45/-45] dizilişinde olacak şekilde üst üste yerleştirildi. Şekil 4.1'de cam elyafların vakum masasına dizilişi gösterilmiştir.

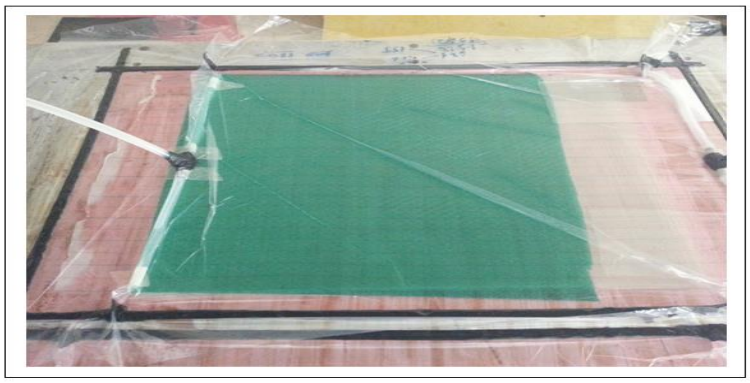


Şekil 4.1 Cam elyafların vakum masasına dizilişi

Dizilen cam elyafların üstüne poliüretan köpük, çekirdek malzeme olarak konuldu ve çekirdeğin üzerine [0/90/45/-45] tabaka sırasında tekrar cam elyaflar konuldu. Böylece cam elyaf $[0/90/45/-45]_s$ oryantasyonunda, arada çekirdek malzeme ile birlikte sandviç kompozit malzemeleri yerleştirilmiş oldu. Sonrasında üzerine *peel ply* denilen soyma kumaşı konuldu. Soyma kumaşının amacı, vakum torbasını ve reçine emdirici kumaşı parçadan rahat bir şekilde ayırabilmektir. Soyma kumaşının üstüne, reçinenin tabakalar arasına homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla delikli naylon da denilen reçine emdirici kumaş konuldu. Bu kumaşın kenarlarına spiral borular vakum bandıyla yapıştırıldı. Reçinenin düzeneğe verileceği boru, T boru olacak şekilde spiral borulara bağlandı. Böylece reçinenin tüm bölgeleri ıslatması sağlandı. Bu yöntem ile fazla reçinenin kompozit dışına çekilerek elyaf/reçine oranının atması sağlanır. Böylece oldukça gevrek bir yapıya sahip olan reçinenin yapı içerisinde gereğinden fazla olmaması sebebiyle yapının da gevrek yani kırılgan olması önlenmiş olur. Reçinenin içine, reçine miktarının üçte biri kadar sertleştirici konuldu ve homojen bir karışım oluncaya kadar karıştırıldı.

Reçine hattının olduğu T boru oluşturulduktan sonra vakum hattının olduğu vakum hortumu hazırlandı. Vakum hortumunun bir ucu vakum makinasında, diğer ucu çerçeve vakum bantlarının hemen yanına yapıştırıldı.

Son olarak, vakum torbası bütün yapıyı kaplayacak şekilde çerçeve vakum bantlarının üzerine yapıştırıldı. Bu işlem yapılırken vakum sırasında oluşacak gerilmenin vakum torbasını delmemesi için bazı kenarlarda vakum torbasının bir bölümü, ekstra vakum bandıyla içten yapıştırılarak bir miktar havaya kaldırıldı ve kulakçık denilen paylar bırakıldı. Vakum torbası sıkıca vakum bantlarıyla yapıştırıldıktan sonra vakum makinası çalıştırıldı ve reçine hattındaki borunun reçine kabındaki kısmına, hava kabarcıklarının yapıya girmesini engellemek için kilit takıldı. Vakumlanan yapıda basınç değerinde bir azalma olmadığına yani iyi vakumlandığına emin olunduktan sonra reçine akışını sağlayan boru üzerindeki kilit çıkartıldı ve reçine akışı gerçekleştirildi. İşlem bittikten sonra yapıya hava girmesini önlemek amacıyla reçine kabındaki boruya tekrar kilit takıldı ve yapı sekiz saat boyunca 80˚C ‘de kürlenmeye bırakıldı. Şekil 4.2’de sandviç kompozitin vakumlanması gösterilmiştir



Şekil 4.2 Sandviç kompozitin vakumlanması

Vakumlama işleminin ardından yapı içindeki ve dış ortamdaki basınç farkından yararlanarak yapıya reçine emdirilmesi uygulandı. Sekiz saat boyunca kürlenmeye bırakılan sandviç kompozit; soyma kumaşı, ayırıcı kumaş, reçine emdirici kumaş, vakum torbası ve vakum ile reçine borularından ayrılarak 125x150 mm^2 boyutlarında

kesildi. Elde edilen numuneler, yapıştırma ile birleştirme yöntemi ile birleştirilmek üzere Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Yapıştırılacak kompozit numuneler

Kesilen numuneler, el yatırması yöntemi ile üretilen yama kompozit ile alt ve üst yüzeylerinden yapıştırıldıktan sonra vakumlanarak 80˚C'de sekiz saat boyunca Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı'nda bulunan Nüve marka KD 400 modelli fırında kürlenmeye bırakıldı.

Çift taraflı yapıştırılan ve yama uzunluğu 30 mm olan numune türünün vakumlanması ve kürlendikten sonraki hali Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b ile örnek olarak verilmiştir.

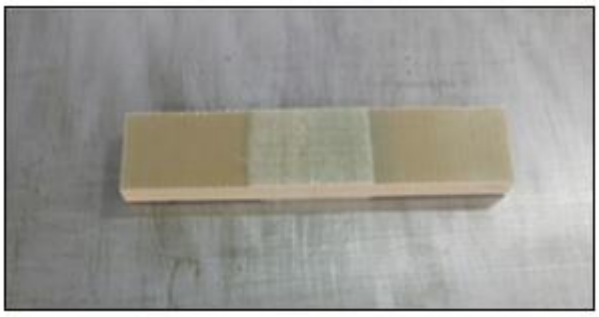


(a) (b)

Şekil 4.4 a) Numunenin vakumlanması, b) Numunenin kürlendikten sonraki hali

Yama uzunlukları 45 mm, 60 mm, 75 mm ve 90 mm olan numune türleri için de aynı işlemler uygulandı. Kürlenen numuneler 250x50 mm^2 boyutlarında kesilmiş ve

yama uzunluğu 60 mm olan numune türü Şekil 4.5 ile örnek olarak gösterilmiştir. Kesilme işlemi diğer yama uzunluğuna sahip numune türleri için de uygulanmıştır.



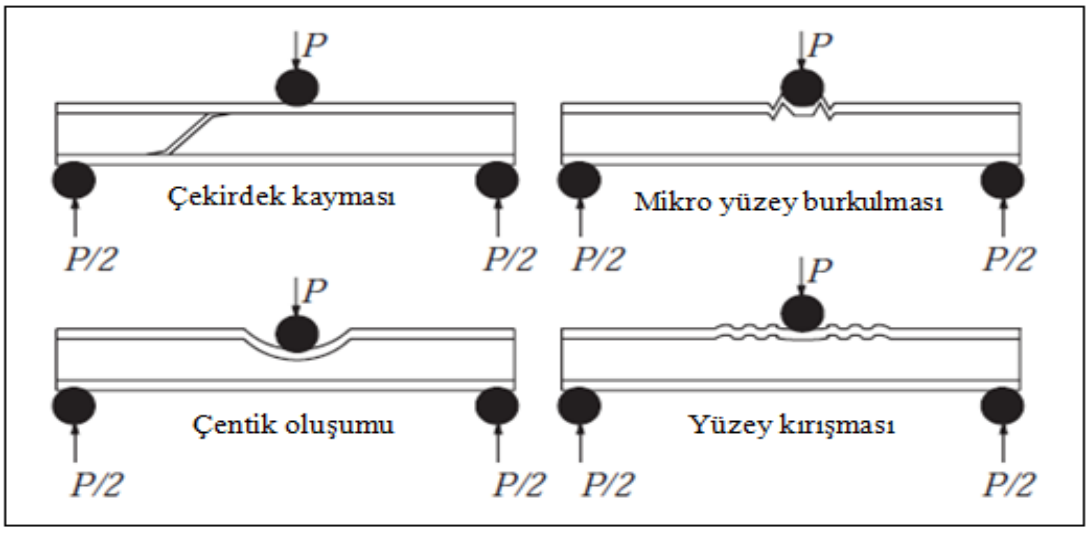
Şekil 4.5 Yama uzunluğu 60 mm olan numune

BÖLÜM BEŞ
ÜÇ NOKTA EĞME DENEYİ

5.1 Üç Nokta Eğme Deneyi

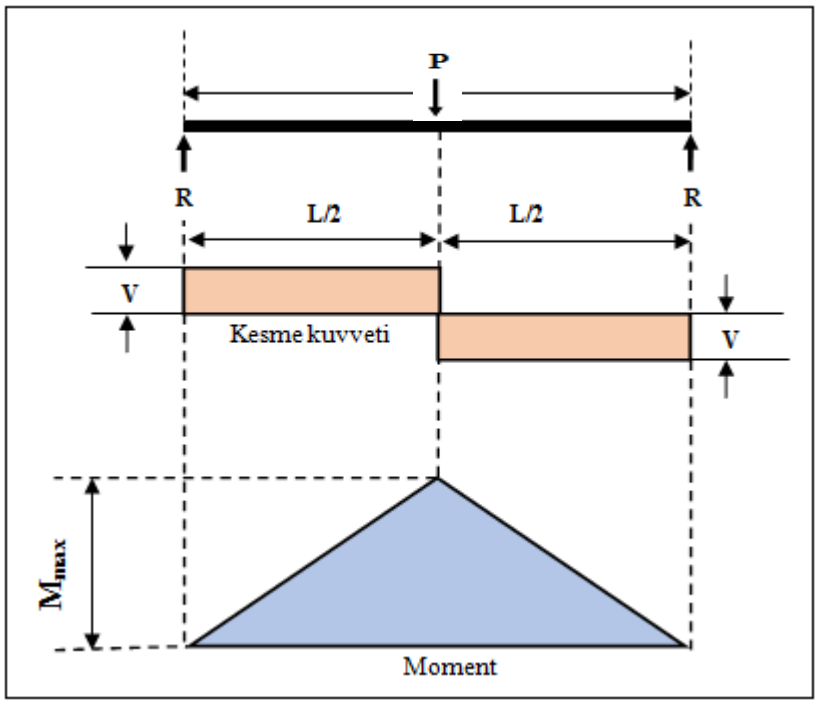
Bu çalışmada, farklı yama uzunluğundaki sandviç kompozit ve yamasız sandviç kiriş numunelerine uygulanan üç nokta eğme deneyi sonucu maksimum kuvvetteki çökme miktarları araştırılmıştır.

Üç nokta ve dört nokta eğme testleri uygulanan bir sandviç kompozitte dört temel hasar modu meydana gelmektedir. Bunlar; yüzey kırışması, yüzey akması yani mikro yüzey burkulması, çekirdek kayması ve çentik hasarıdır (Steeves ve Fleck, 2004). Üç nokta eğme deneyi altındaki bir sandviç kirişte oluşabilecek hasar modları Şekil 5.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Üç nokta eğme deneyi altındaki bir sandviç kompozitte oluşabilecek hasar modları (Steeves ve Fleck, 2004)

Üç nokta eğme deneyinde tekil yük uygulanan iki ucu mesnetli bir kirişte meydana gelen kesme kuvveti ve moment diyagramları Şekil 5.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Tekil yük uygulanan iki ucu mesnetli bir kirişte meydana gelen kesme kuvveti ve moment diyagramları

Burada *V*, kesme kuvveti olup *L* değeri kirişin boyudur. *R* ise her bir mesnetin tepki kuvvetidir. Kesme kuvveti tepki kuvvetine eşit olup değeri uygulanan *P* tekil yükünün yarısı yani *P/2* kadardır. Maksimum moment Şekil 5.2'de de görüldüğü üzere yükün tam uygulandığı noktada olup değeri *Pl/4* kadardır. Kiriş üzerindeki bir *x* noktasının değeri *l/2* değerinden az olduğunda ise moment değeri *Px/2* dir.

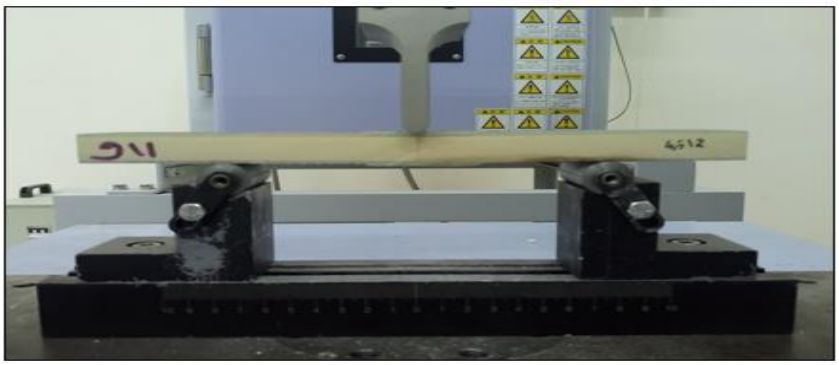
Kirişin maksimum çökmesi, yükün tam uygulandığı noktada meydana gelip değeri Eşitlik 5.1 ile verilmiştir.

$$\delta_{mak} = \frac{Pl^3}{48EI} \tag{5.1}$$

x yatay mesafesinin kirişin yarı boyundan küçük oluğu durumlardaki yani kiriş üzerindeki herhangi bir *x* noktasındaki çökme değeri Eşitlik 5.2 ile verilmiştir.

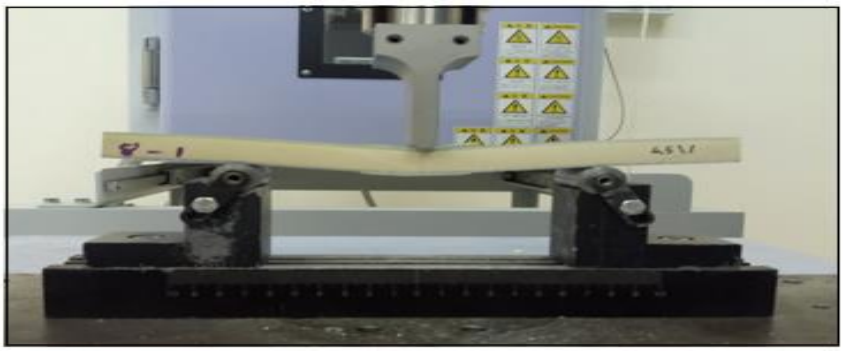
$$\delta = \frac{Px}{48EI}\left(3l^2 - 4x^2\right) \tag{5.2}$$

Şekil 5.3'te 45 mm yama uzunluğundaki sandviç kompozit numunenin deney cihazına bağlanması örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Numunenin deney cihazına bağlanması

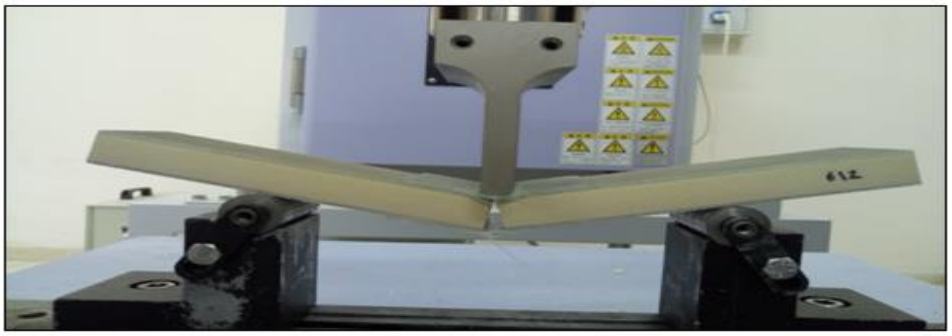
Şekil 5.4'te ise yama uzunluğu 45 mm olan bir numune örneğinin, kuvvet altındaki çökme durumu gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin kuvvet altındaki çökme durumu

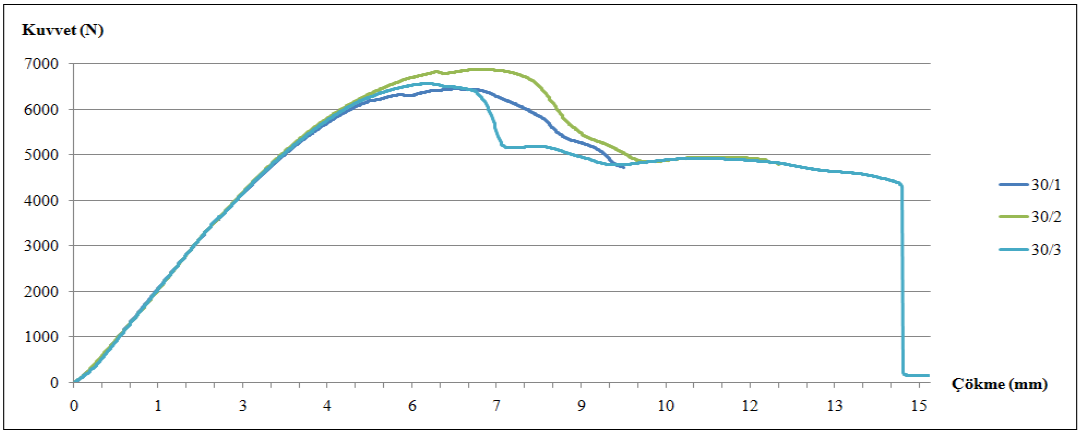
5.2 Deney Sonuçları

Yama uzunlukları 30 mm, 45 mm, 60 mm ve 75 mm olan sandviç kompozitlerden üçer numune; yama uzunluğu 90 mm olan sandviç kompozitten iki numune ve yapıştırma ile birleştirme yapılmamış sandviç kompozit kirişten bir numune üç nokta eğme testine tabi tutulmuş ve sonuçların kuvvet-çökme grafikleri oluşturulmuştur. 60 mm yama uzunluğundaki sandviç kompozit numunenin deney sonundaki kırılması birleşme bölgesinde meydana gelmiş ve örnek olarak Şekil 5.5 ile verilmiştir.

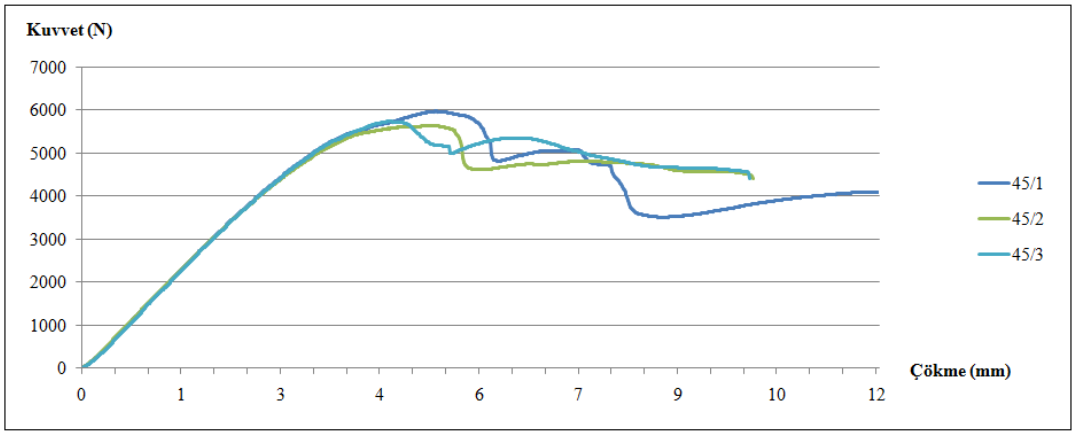


Şekil 5.5 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin deney sonunda birleşme bölgesinden kırılması

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ile yama uzunlukları 30 mm ve 45 mm olan sandviç kompozit numunelerin kuvvet-çökme grafikleri gösterilmiştir.

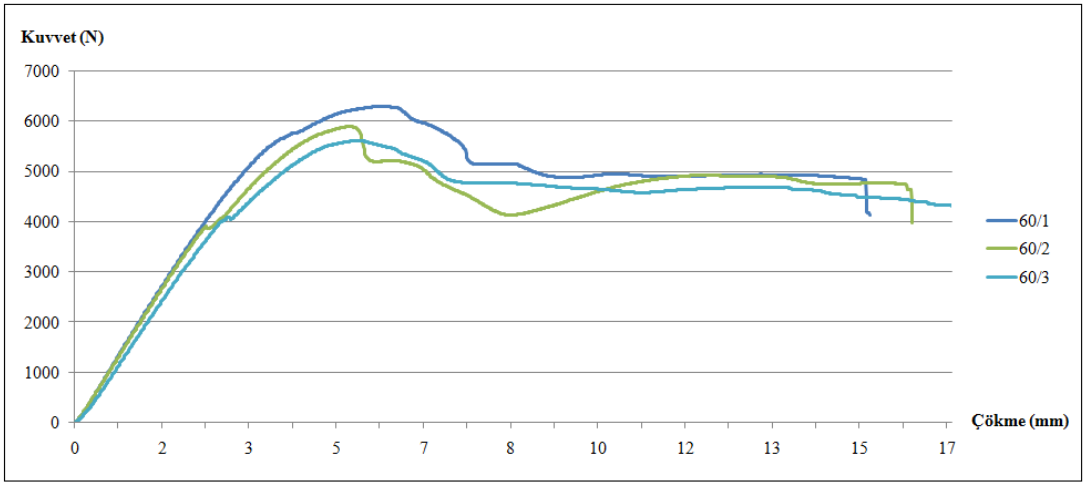


Şekil 5.6 Yama uzunluğu 30 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği

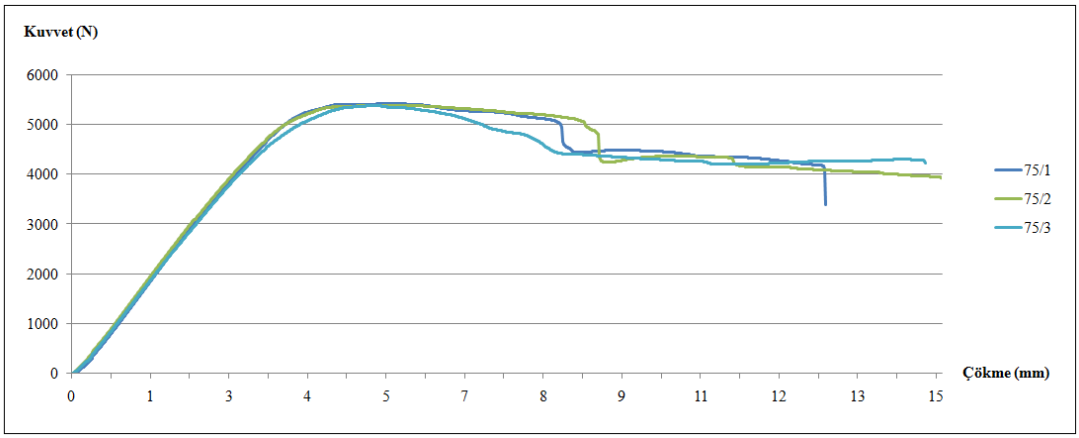


Şekil 5.7 Yama uzunluğu 45 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği

Yama uzunlukları 60 mm ve 75 mm olan sandviç kompozit numunelerin kuvvet-çökme grafikleri Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile verilmiştir.

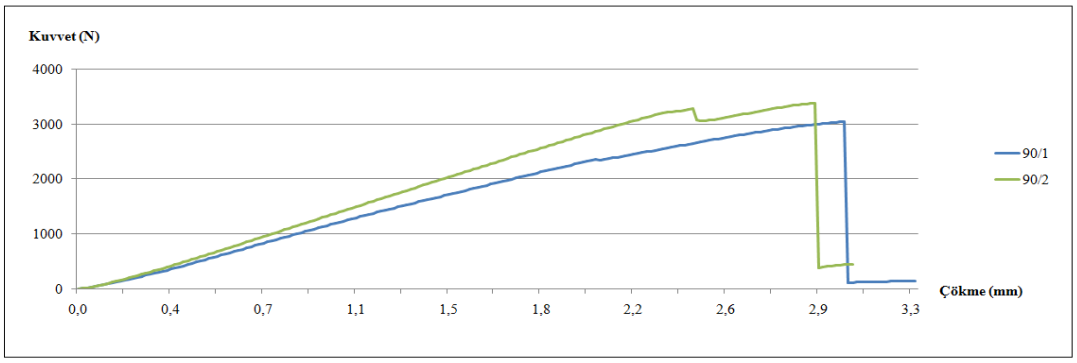


Şekil 5.8 Yama uzunluğu 60 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği

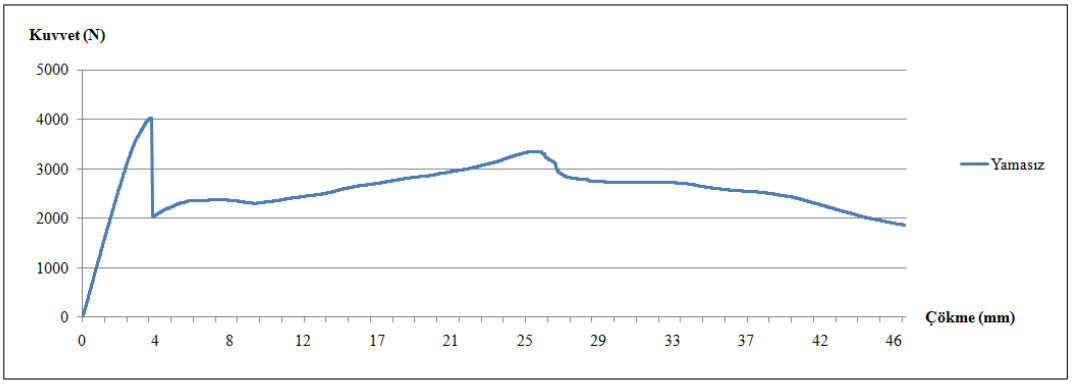


Şekil 5.9 Yama uzunluğu 75 mm olan üç farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği

Şekil 5.10 ile yama uzunluğu 90 mm olan sandviç kompozit numunenin ve Şekil 5.11 ile yamasız sandviç kompozit numunenin kuvvet-çökme grafikleri verilmiştir.

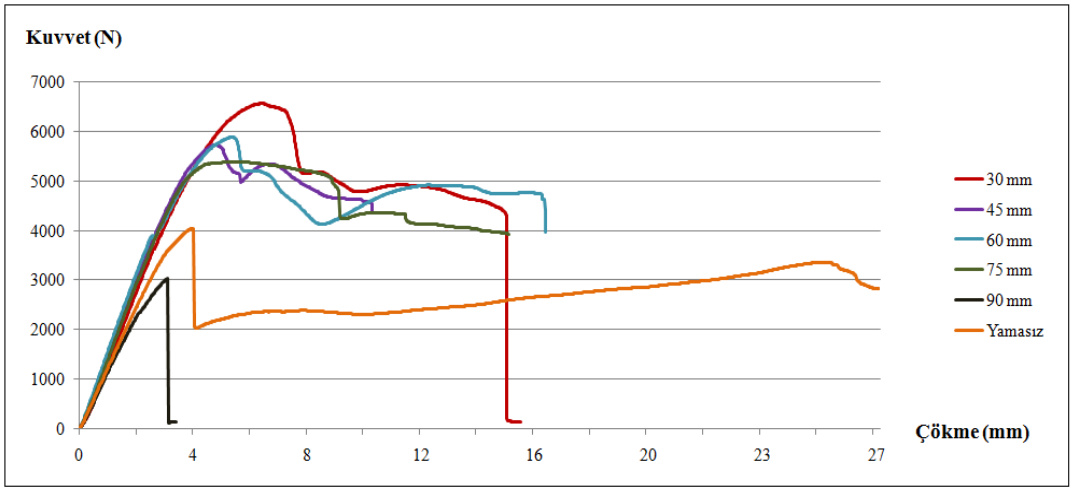


Şekil 5.10 Yama uzunluğu 90 mm olan iki farklı numunenin kuvvet-çökme grafiği



Şekil 5.11Yamasız sandviç kompozit numunenin kuvvet-çökme grafiği

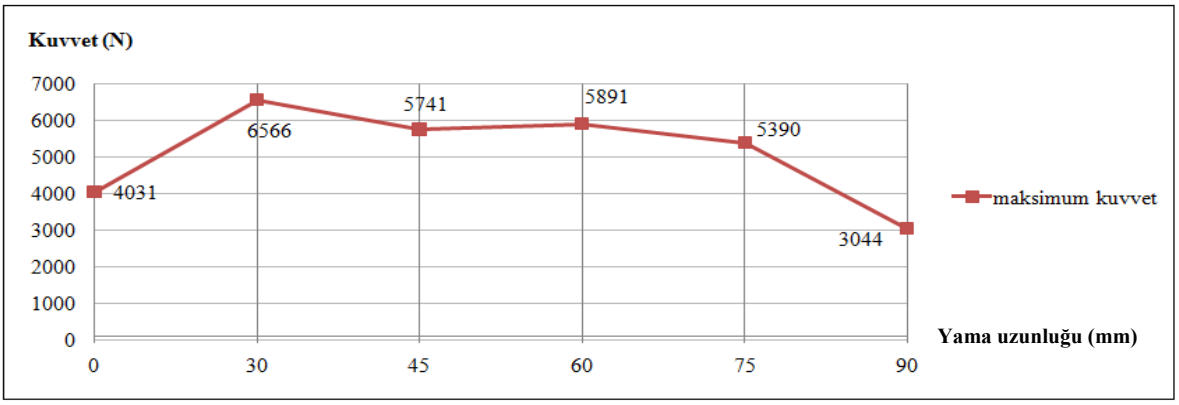
Farklı yama uzunluğundaki numune grupları ve yamasız numune arasında uygulanan üç nokta eğme deneyi sonunda, her grup içindeki orta değerler alınarak oluşturulan kuvvet-çökme grafiği Şekil 5.12 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Farklı yama uzunluğundaki numunelerin kuvvet-çökme grafiği

Şekil 5.12'deki kuvvet-çökme grafiğine bakıldığında 90 mm yamaya sahip numune hariç diğer yamalı numunelerin eğilme rijitliklerinin yamasız numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Elastik bölge sınırına kadar 30 mm, 45 mm, 60 mm ve 75 mm yama uzunluğundaki numuneler hemen hemen aynı davranışı göstermişler; ancak yama uzunluğu arttıkça yük taşıma kapasitelerinde kısmen azalma ve çökme miktarlarında giderek bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerin yama uzunluğuna karşılık gelen maksimum kuvvet değerleri Şekil 5.13 ile verilmiştir.



Şekil 5.13 Üç nokta eğme testi uygulanan sandviç kompozit numunelerde maksimum kuvvet –yama uzunluğu ilişkisi

Grafik incelendiği zaman maksimum kuvvetin 30 mm yama uzunluğuna sahip numunede meydana geldiği görülmüştür. 90 mm yamaya sahip numune hariç diğer yamalı numunelerdeki kuvvetler yamasız numuneye göre daha büyük olarak elde edilmiştir. Bu da yama uzunluğu çok fazla olmadığı zaman numunenin eğilme rijitliğinin yamasız numuneye göre daha fazla olduğunu gösterir.

BÖLÜM ALTI
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

6.1 Sandviç Kompozit Numunenin Mekanik Özellikleri

Sonlu elemanlar analizi için gerekli olan cam elyaf-epoksi kompozitin mekanik özellikleri çekme deneyi ile bulunmuştur. Kompozitin tabaka dizilişi $[0/90/45/-45]_s$ şeklindedir. Analiz için gerekli poliüretan köpük çekirdeğin verileri ise http://www.airexbaltekbanova.com internet sitesindeki AIREX® C70 kataloğundan alınmıştır. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de sırasıyla cam elyaf-epoksi ve poliüretan köpük çekirdeğin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.1 Cam elyaf-epoksi kompozitin mekanik özellikleri

Malzeme	E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}
Cam elyaf-epoksi	26000 MPa	6500 MPa	4000 MPa	0,21

Tablo 6.2 Poliüretan köpük çekirdeğin mekanik özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (E)	Kayma Modülü (G)	ν
Köpük çekirdek	45 MPa	22 MPa	0,0227

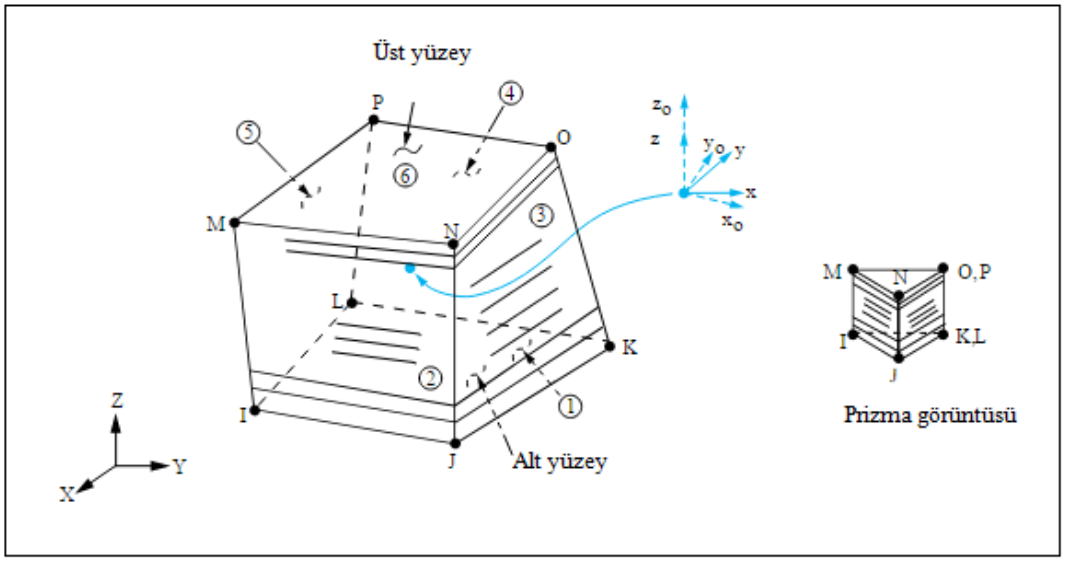
Çekirdek malzemenin Poisson oranı ν ise Eşitlik 6.1 ile verilmiştir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \rightarrow \nu = \frac{45}{2.22} - 1 = 0{,}0227 \tag{6.1}$$

olarak bulunmuştur.

6.2 Sonlu Elemanlar Analizi

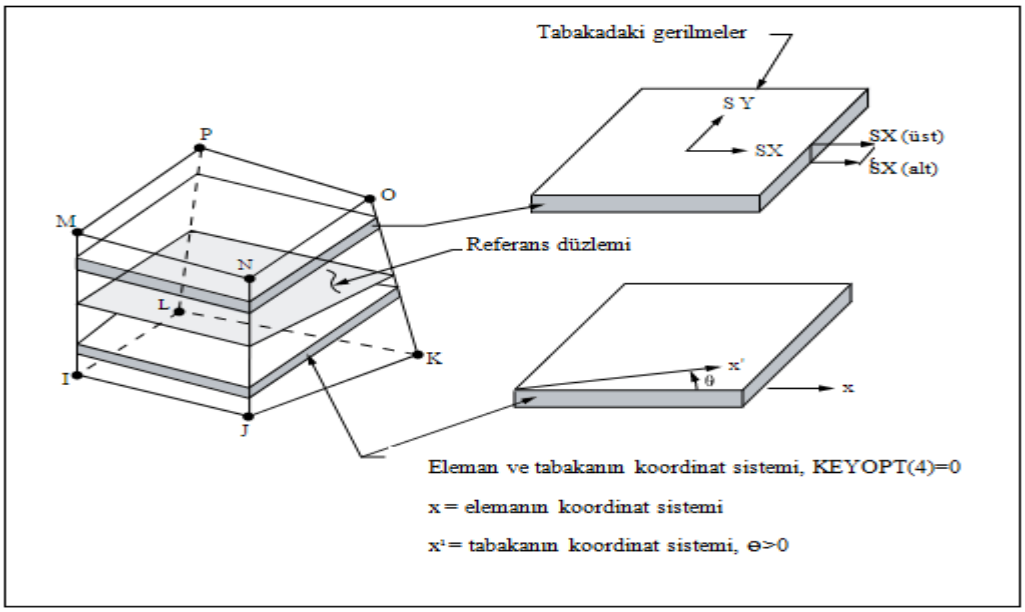
Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için ANSYS paket programı kullanılmıştır. Numune tipi, ortotropik eleman ve katı modeli 8 düğümlü SOLID185'tir. Bu eleman [Keyopt(3)=1] tabakalı solid yapıların modellenmesinde kullanılır. Elemanın geometrisi www.ansys.com internet sitesinden alınmış olup Şekil 6.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Solid 185 tabakalı elemanın geometrisi (3-D 8 Node Structural Solid, b.t)

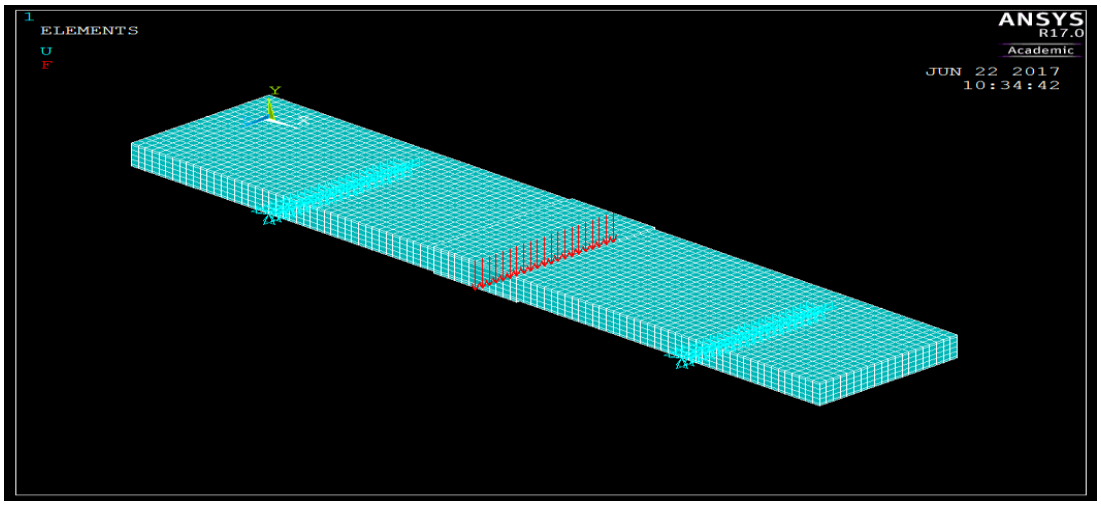
Şekil 6.1 deki prizma görüntüsü, elemanı düğümlere ayırırken köşede kalan bölgede K ve L düğümleri ile O ve P düğümlerinin aynı düğüm sayılarını belirtmesinden kaynaklanır.

Şekil 6.2 de tabakalardaki gerilmeler ve koordinat sistemleri gösterilmiştir.

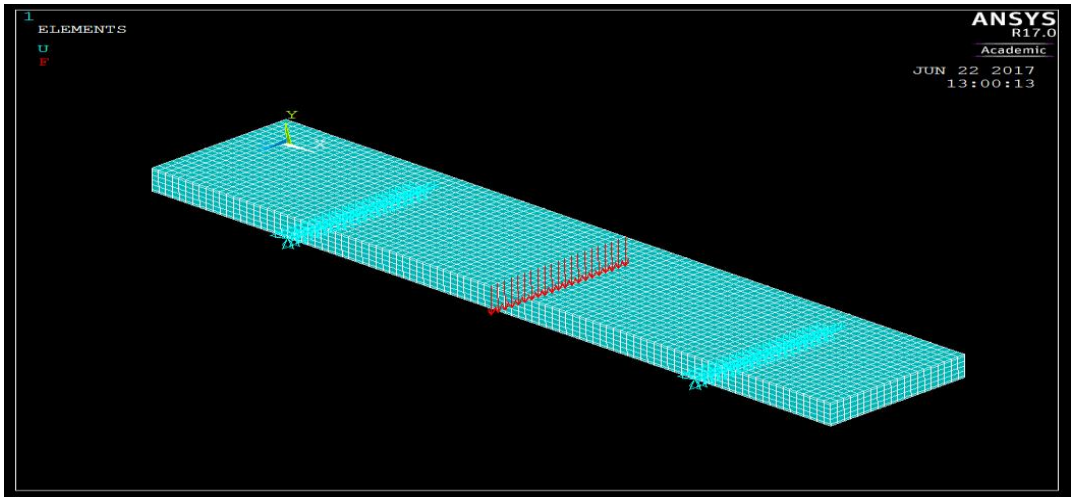


Şekil 6.2 Tabakadaki gerilmeler ve koordinat sistemleri (3-D 8 Node Structural Solid, b.t)

Kompozit numunenin mekanik modellemesi (üç boyutlu numune modeli, düğümlere ayırma, etkiyen kuvvet ve sınır şartları), yama uzunluğu 30 mm olan sandviç kompozit ve yamasız kompozit kiriş için sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 ile örnek olarak verilmiştir.



Şekil 6.3 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin sonlu eleman modellemesi



Şekil 6.4 Yamasız sandviç kirişin sonlu eleman modellemesi

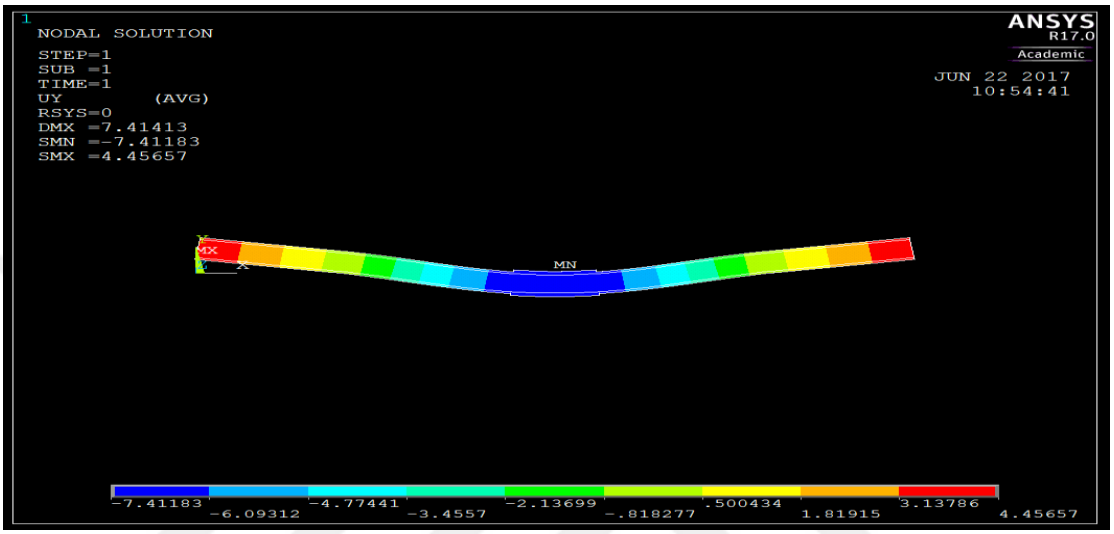
6.3 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Farklı yama uzunluğuna sahip numunelerin maksimum kuvvet değerleri, uygulanan üç nokta eğme deneyi neticesinde tespit edilmiş olup Tablo 6.3'te verilmiştir. Bu kuvvet değerleri sonlu elemanlar analizinde uygulanan kuvvet değerleridir.

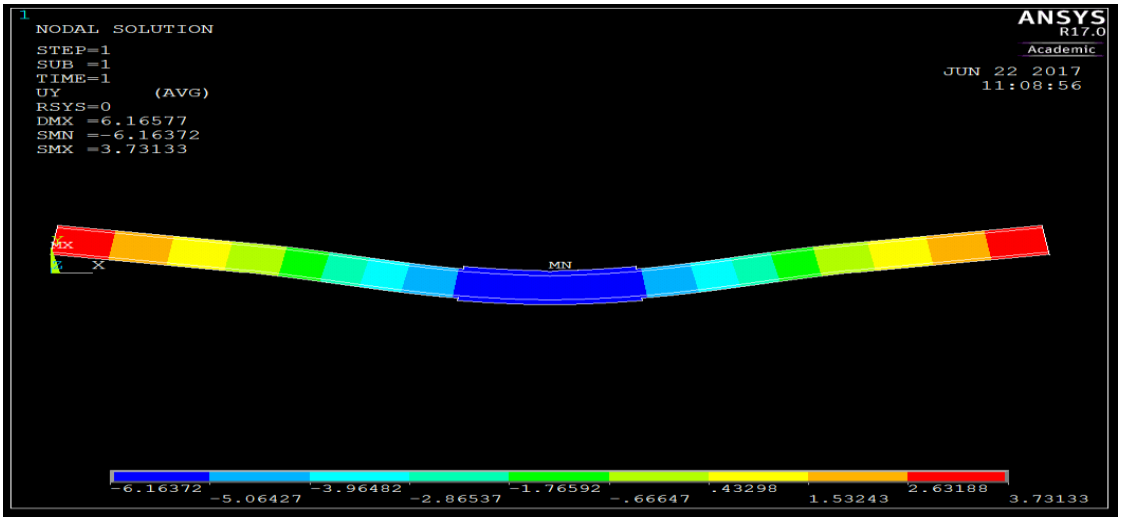
Tablo 6.3 Numunelerin taşıyabildiği maksimum kuvvet değerleri

Yama uzunluğu (mm)	Kuvvet (N)
30	6566
45	5741
60	5891
75	5390
90	3044
Yamasız	4031

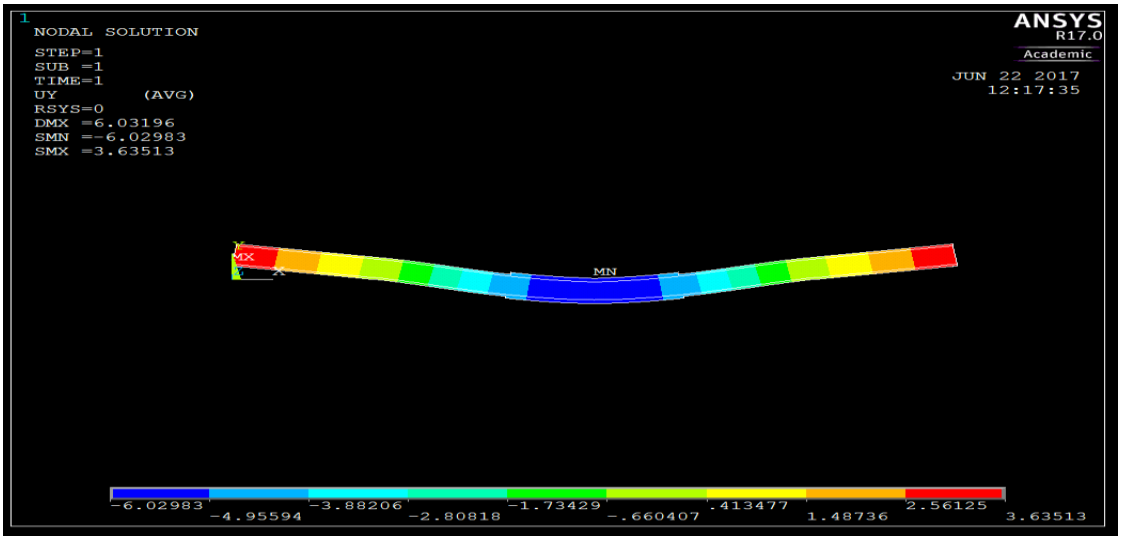
Aşağıda Şekil 6.5-9 ile gösterilen grafiklerdeki SMN değeri, farklı yama uzunluğuna sahip kompozit numunelerin her biri için hesaplanan orta noktanın düşey deplasman değerleridir. Şekil 6.10 ile de yamasız yani birleştirme yapılmamış sandviç kompozit numunenin düşey deplasman yani çökme değeri gösterilmiştir.



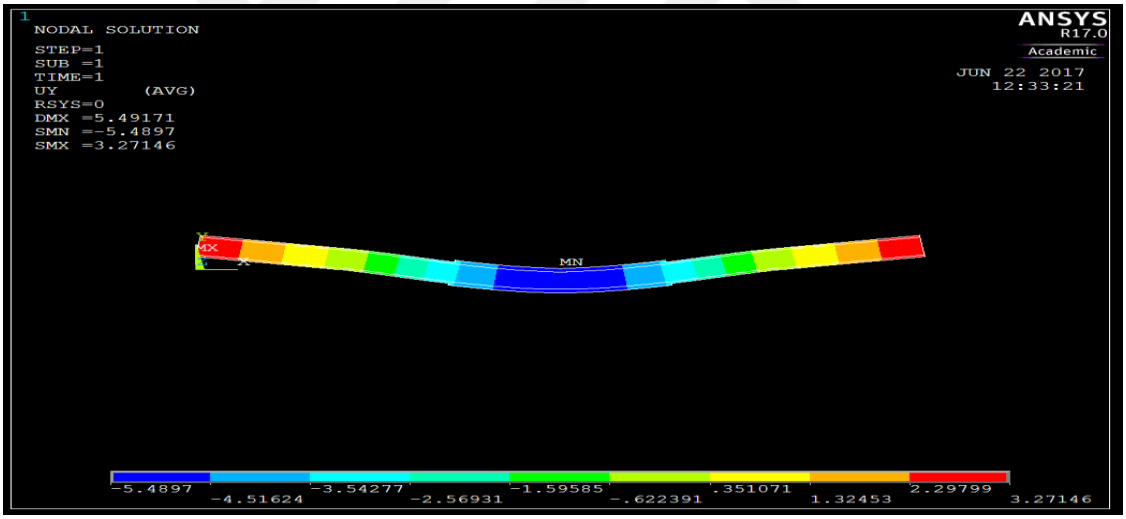
Şekil 6.5 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği



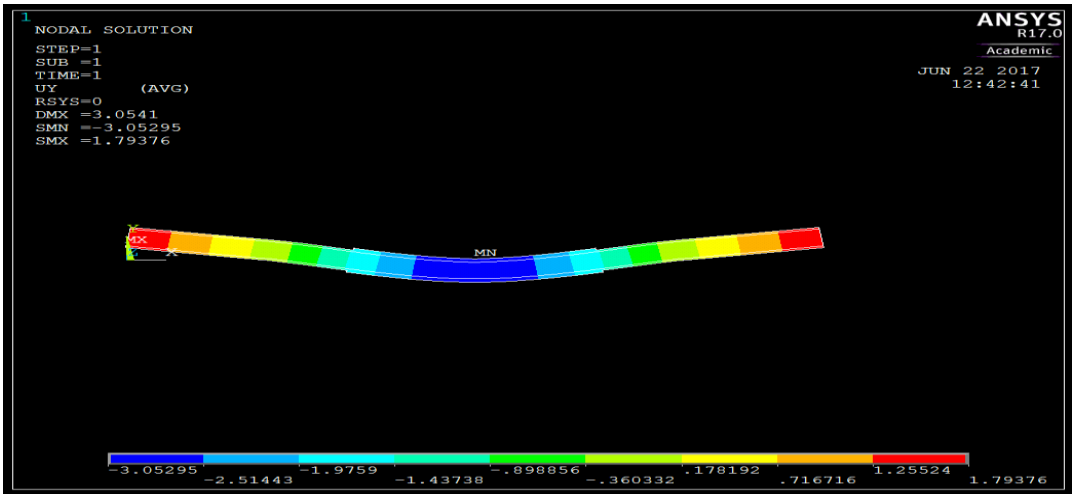
Şekil 6.6 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği



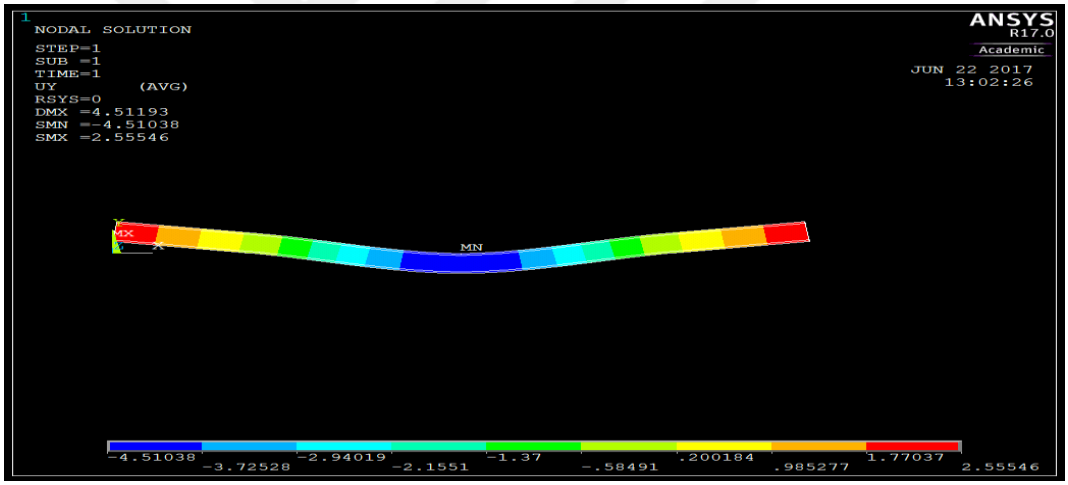
Şekil 6.7 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği



Şekil 6.8 Yama uzunluğu 75 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği



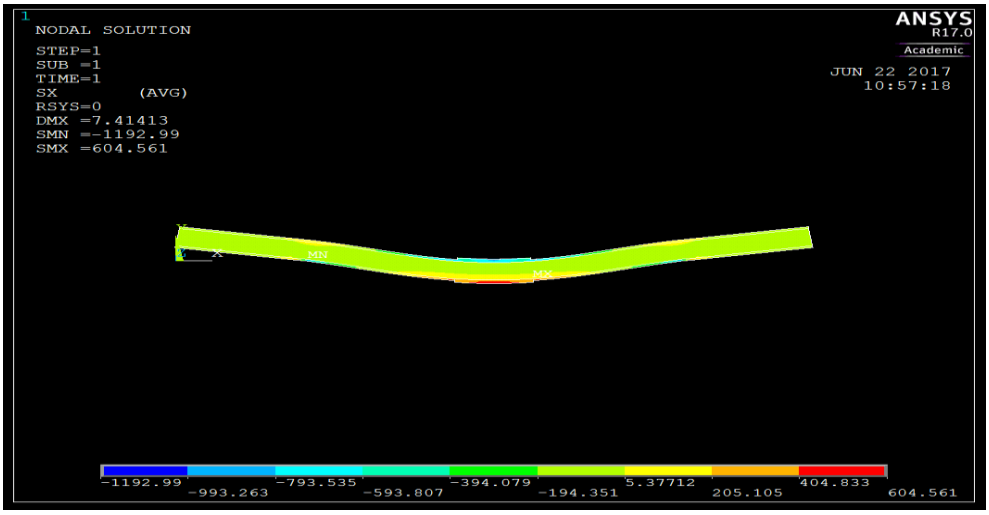
Şekil 6.9 Yama uzunluğu 90 mm olan numunenin kuvvet-çökme grafiği



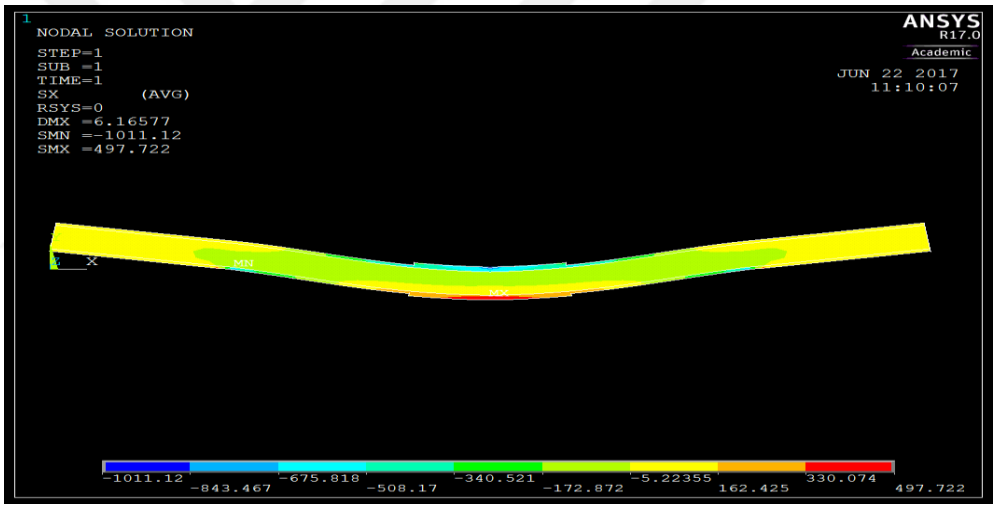
Şekil 6.10 Yamasız numunenin kuvvet-çökme grafiği

Yamalı ve yamasız numunelere uygulanan sonlu elemanlar çökme analizine ek olarak, uygulanan kuvvet neticesinde yük taşıyıcısı liflerde ve kuvvet aktarımını sağlayan köpükte meydana gelen gerilme analizi de yapılmıştır.

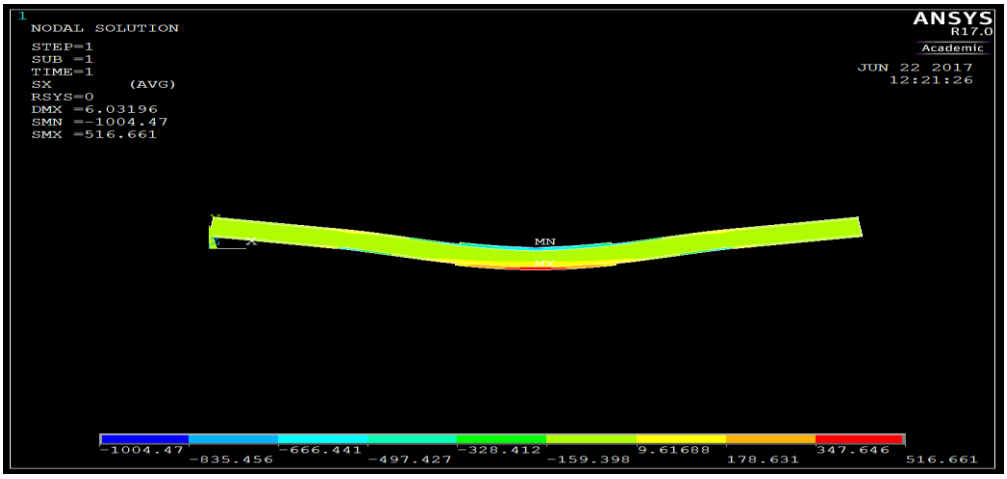
Şekil 6.11-15 ile verilen grafikler, farklı yama uzunluğundaki numunelerin ve Şekil 6.16 ile verilen grafik, yamasız numunenin x-ekseninde oluşan normal gerilme (σ_x) değerleridir.



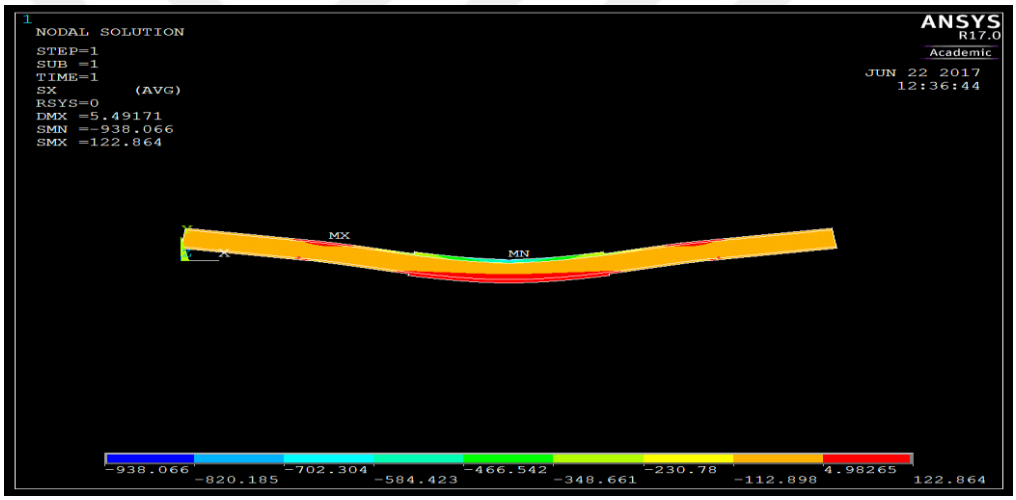
Şekil 6.11 Yama uzunluğu 30 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri



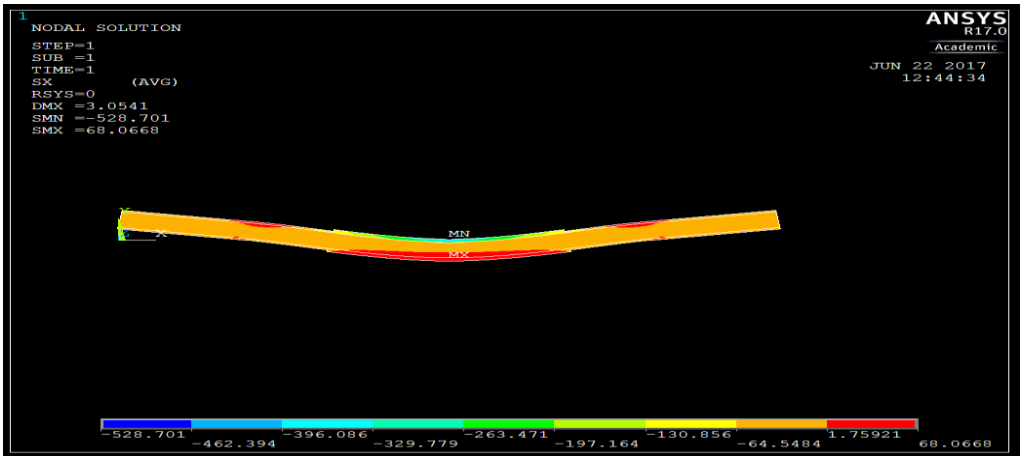
Şekil 6.12 Yama uzunluğu 45 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki $\sigma_x$değeri



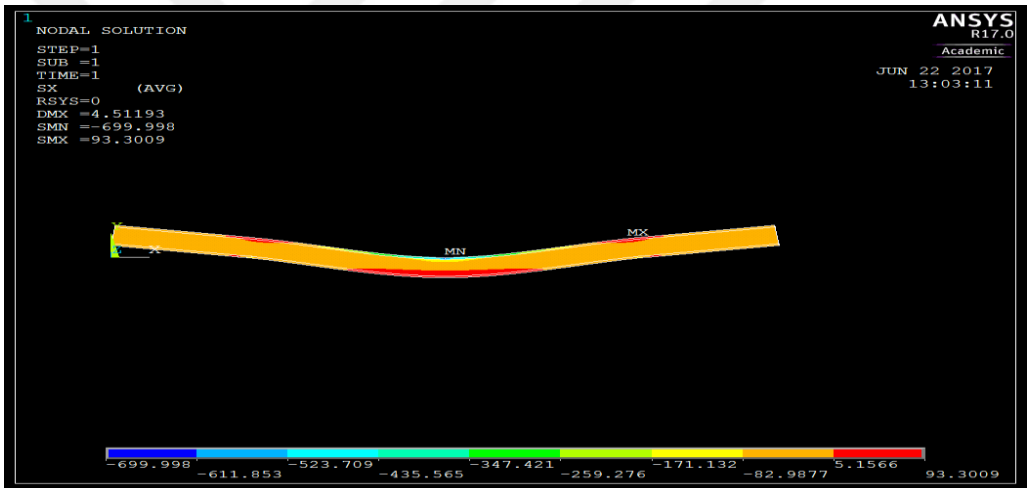
Şekil 6.13 Yama uzunluğu 60 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri



Şekil 6.14 Yama uzunluğu 75 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri



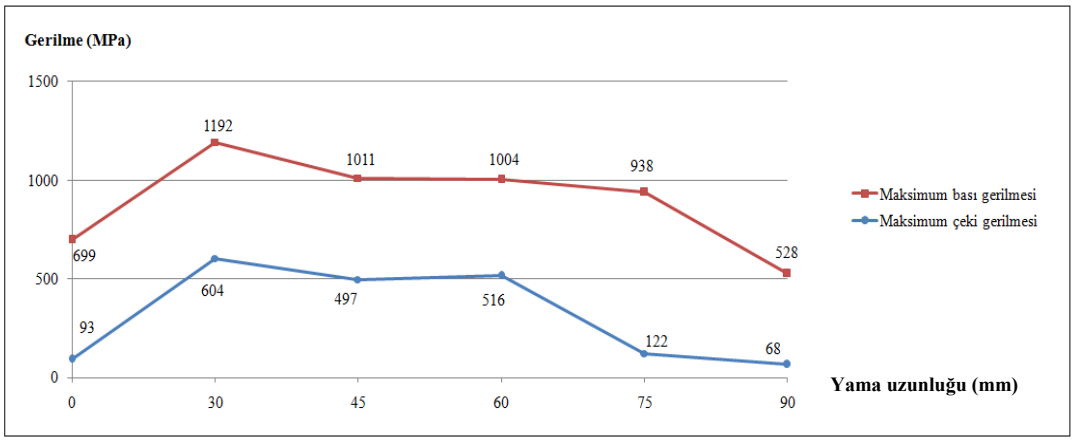
Şekil 6.15 Yama uzunluğu 90 mm olan numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri



Şekil 6.16 Yamasız numunenin maksimum kuvvetteki σ_x değeri

Görüldüğü üzere, numunelerin yama uzunluğundaki artış çökme miktarını azalttığı gibi x-ekseni yönündeki normal gerilme değerini de azaltmıştır. Bu da, elyafların yama uzunluğu arttıkça numunenin yük taşıma kapasitesinin azaldığını göstermektedir.

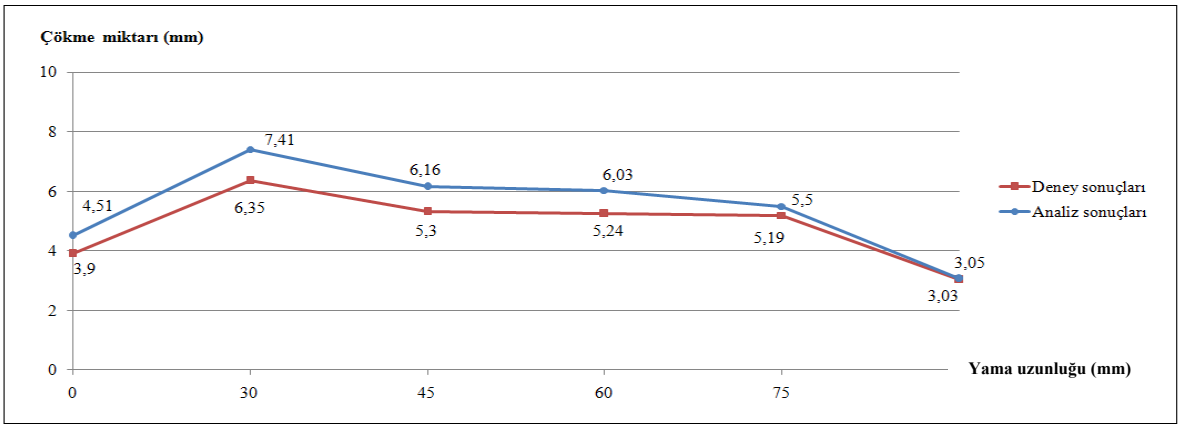
Şekil 6.17'de gösterilen grafikte farklı yamalı numune türlerinin eğilme altındaki maksimum çeki ve bası gerilmeleri gösterilmiştir.



Şekil 6.17 Farklı yama uzunluğundaki numunelerin maksimum çeki ve bası gerilmeleri

Şekil 6.17'de görüldüğü üzere numunelerin çeki ve bası gerilmeleri arasındaki fark artmaktadır. Özellikle yama uzunluğu 75 mm olan numunede gerilmeler arasındaki fark oldukça fazladır. Yama uzunluğu 90 mm olan numunedeki gerilmeler arasındaki fark, yama uzunluğu 75 mm olan numunedeki gerilmeler arasındaki farktan az olsa da bası ve çeki gerilme değerleri daha düşüktür.

Farklı yama uzunluğundaki numunelerin orta noktasının düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması, uygulanan üç nokta eğme deneyi ve yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu Şekil 6.18 ile verilmiştir.



Şekil 6.18 Numunelerin orta noktasının düşey deplasman değerlerinin üç nokta eğme deneyi ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılması

Nümerik ve deneysel çalışmalar sonunda elde edilen çökme miktarları arasındaki fark, yama uzunluğuna bağlı olarak % 0,67 ile % 16,7 arasında değişiklik göstermektedir. Çökme, en fazla 30 mm yamaya sahip numunede meydana gelirken yama uzunluğunun artmasına bağlı olarak çökme miktarı da azalmıştır. Bu durum, deneysel çalışma ve analiz sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Analiz sonuçları için çökme miktarları deney sonuçlarından daha yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni, deney sırasında numunenin mesnet görevi gören silindirlerin üzerinde bir miktar kaymasından ya da köpük çekirdeğin viskoelastik davranış göstermesinden kaynaklanmaktadır.

BÖLÜM YEDİ
SONUÇLAR

Bu çalışmada, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen $[0/90/45/-45]_s$ dizilimli cam elyaf-epoksi yüzey tabakalı poliüretan köpüklü sandviç kompozitin yapıştırma ile birleştirme yöntemi kullanılarak eğilme mukavemeti araştırılmıştır. Birleştirme bölgesi yüzey tabakası ile aynı malzeme olup yama kompozit, el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmada, farklı yama uzunluğuna sahip sandviç kompozit numuneler için hangi yama uzunluğundaki sandviç kompozitin mekanik özelliklerinin daha gelişmiş olduğunu belirlemek amaçlanmıştır. Yapılan üç nokta eğme deneyi ve sonlu elemanlar analizi sonucunda görülmüştür ki; kontrol grubu olan yama uzunluğu içinde en iyi mekanik performansı, gerek taşıyabildiği maksimum kuvvet açısından gerekse bu kuvvete karşılık gelen düşey deplasman miktarı bakımından 30 mm yama uzunluğuna sahip olan numune grubu göstermiştir.

Kompozit malzemede yük taşıyıcısı görevi gören elyafların, yama uzunluğunun artmasıyla birbirlerinden ayrılmaların daha kolay olduğu ve çekirdekte çatlaklar görülmüş, bu yüzden yapıştırma ile birleştirme tekniği kullanılarak üç nokta eğme deneyine tabi tutulan bu sandviç kompozitte, birleşme bölgesinin uzun olmasının yapıyı güçsüzleştirdiği tespit edilmiştir. Yamasız sandviç kompozit numunenin ise yamalı numunelere kıyasla daha gevrek ve kırılgan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yapıştırma ile birleştirme yöntemi, sandviç kompozite daha esnek bir mekanik özellik kazandırmıştır. Her ne kadar iki sandviç yapıyı birleştirerek tam ortasından yük uygulamak yekpare bir sandviç kirişe nazaran o yapıyı daha az mukavemetli olarak öngörse de, birleştirme bölgesinin yapıya kazandırdığı esneklik ve mukavemet sayesinde oluşacak çatlağın çekirdeğe ulaşmasını geciktirmekte ve böylece üzerine alabileceği yük miktarını da arttırmaktadır. Bu da, yapının daha esnek olduğu anlamına gelmektedir.

.

KAYNAKLAR

3A Composites Core Materials (2011). *Airex® C70,* 30 Nisan 2017, http://www.airexbaltekbanova.com/en/airex-c70-pvc-foam.html

3-D 8 Node Structural Solid (b.t). 15 Haziran 2017, https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID185.html#solid185L.assumptions

Baba, B. O. ve Thoppul, S. (2010). An experimental investigation on free vibration response of curved sandwich beam with face/core debond. *Journal of Reinforced Plasticsand Composites, 29,* 3208-3218.

Banea, M. D. ve Silva, F. M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proc. ImechE Part L: J. Materials: Design and Applications, 223,* 1-18.

Cao, C. (2003). *Damage and failure analysis of co-cured fiber-reinforced composite joints.* Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Daniel, I. M. ve Abot, J. L. (2000). Fabrication, testing andanalysis of composite sandwich beams. *Composite Science and Technology, 60,* 2455-2463.

Ferdous, W. ve Manalo, A. ve Aravinthan, T. (2017). Bond behaviour of composite sandwich panel and epoxy polymer matrix: Taguchi design of experiments and theoretical predictions. *Construction and Building Materials, 145,* 76-87.

Gladwell, G. M. L. (2011). *Solid mechanics and its application.* USA: Springer.

Gdoutos, E. E. ve Daniel, I. M. (2008). Failure modes of composite sandwich beams. *Theoret. Appl. Mech., 35,* 105-118.

I'Armée, A. T. ve Stein, N. ve Becker, W. (2016). Bending moment calculation for single lap joints with composite laminate adherends including bending-extensional coupling. *International Journal of Adhesion&Adhesives 66,* 41–52.

Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı) USA: CRC Press.

Kulkarni, N. ve Mahfuz, H. ve Jeelani, S. ve Carlsson, L. A. (2003). Fatigue crack growth and life prediction of foam core sandwich composites under flexural loading. *Composite Structures, 59,* 499-505.

Linul, E. ve Marşavina L. (2015). Assesment of sandwich beams with rigid polyurethane foam core using failure-mode maps. *Proceedings of The Romanian Academy, Series A, 16,* 522-530.

Mallick, P. K. (2008). Bonded joints. *Fiber-reinforced composites* (3. Baskı) içinde (490-492). USA: CRC Press.

Mamalis, A. G. ve Spentzas, K. N. ve Manolakos, D. E. ve Ioannidis, M. B. ve Papapostolou, D. P. (2008). Experimental investigation of the collapse modes and main crushing characteristics of composite sandwich panels subjected to flexural loading. *International Journal of Crashworthiness, 13,* 349-362.

Meraghni, F. ve Desrumaux, F. ve Benzeggagh, M. L. (1999). Mechanical behaviour of cellular core for structural sandwich panels. *Composites: Part A, 30,* 767-779.

McCormack, T. M. ve Miller, R. ve Kesler, O. ve Gibson, L. J. (2001). Failure of sandwich beams with metallic foam cores. *International Journal of Solid and Structures, 38,* 4901-4920.

Padmanabhan, K. (2014). Strength-based design optimization studies on rigid polyurethane foamcore-glass and carbon-class fabric face sheet/epoxy matrix sandwich composites. *Mechanics of Advanced Materialsand Structures, 21,* 191-196.

Potluri, R. ve Kumar, A. E. ve Raju, M. N. ve Babu, K. R. P. (2017). Finite element analysis of cellular foam core sandwich structures. *Materials Today: Proceedings, 4,* 2501-2510.

Rizov, V. ve Shipsha, A. ve Zenkert, D. (2005). Indentation study of foam core sandwich composite panels. *Composite Structures, 69,* 95-102.

Sadighi, M. ve Pouriayevali, H. (2008). Quasi-static and low-velocity impact response of fully backed or simply supported sandwich beams. *Journal of Sandwich Structures and Materials, 10,* 499-524.

Sandwich panel fabrication technology, (b.t). 10 Ocak 2017, http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf

Sandwich structurs, (b.t). 20 Mart 2017, http://altairenlighten.com/in-depth/sandwich-structures/

Schwartz, M. M. (1996). *Composite materials, volume II: processing, fabrication, and its applications.* USA: PrenticeHall PTR.

Sharaf, T. ve Shawkat, W. ve Fam, A. (2010). Structural performance of sandwich wall panels with different foam core densities in one-waybending. *Journal of Composite Materials, 44,* 2249-2263.

Sharma, S. C. ve Narasimha Murthy, H. N. ve Krishna, M. (2004). Interfacial studies in fatigue behavior of polyurethane sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23,* 893-903.

Silva, L. F. M. ve Neves, P. J. C. ve Adams, R. D. ve Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion&Adhesives, 29,* 319–330.

Steeves, C. A. ve Fleck, N. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *International Journal of Mechanical Sciences, 46,* 561-583.

Styles, M. ve Compston, P. ve Kalyanasundaram, S. (2007). The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foams and with structures. *Composite Structures, 80,* 532-538.

Tagarielli, V. L. ve Fleck, N. A. ve Deshpande, V. S. (2004). Collapse of clamped and simply supported composite sandwich beams in three-point bending. *Composites: Part B, 35,* 523-534.

Zu, G., Song, B., Zhong, Z., Li, X., Mu, Y. ve Yao, G. (2012). Static three-point bending behavior of aluminum foam sandwich. *Journal of Alloys and Compounds, 540*, 275-278.