

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKANİK OLARAK BAĞLANMIŞ
KOMPOZİTLERİN DAYANIMI

Halil Doğuş ÖĞRENCİ

Ağustos, 2012
İZMİR

MEKANİK OLARAK BAĞLANMIŞ KOMPOZİTLERİN DAYANIMI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

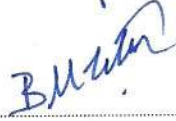
Halil Doğuş ÖĞRENCİ

Ağustos, 2012

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HALİL DOĞUŞ ÖĞRENCİ, tarafından **Doç.Dr. BÜLENT MURAT İÇTEN** yönetiminde hazırlanan **“MEKANİK OLARAK BAĞLANMIŞ KOMPOZİTLERİN DAYANIMI”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç.Dr. Bülent Murat İÇTEN

Yönetici



Doç.Dr. Mustafa TOPARLI

Jüri Üyesi



Yrd.Doç.Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi



Prof.Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin yapımında ve tamamlanmasında bana her türlü desteği sağlayan, hiçbir yardımı esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni sürekli destekleyen, maddi manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Halil Doğuş ÖĞRENCİ

MEKANİK OLARAK BAĞLANMIŞ KOMPOZİTLERİN DAYANIMI

ÖZ

Bu çalışmada, pim ile zorlanan değişik dokuma sıklığında üretilmiş kompozit plakalardaki yatak mukavemeti ve hasar şekli deneysel olarak araştırılmıştır.

Fiber malzemesi olarak cam lifi, matris malzemesi olarak epoksi seçilmiştir. 300, 500 ve 800 gr/m² lik dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Tüm malzeme kalınlıkları aynı olacak şekilde tabaka sayıları ayarlanmıştır. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak plakalar üretilmiştir. Üretilen her bir kompozitin malzeme özellikleri tespit edilerek dokuma sıklığının malzeme özelliğine etkisi araştırılmıştır. Plakalar, numune boyutlarında kesilerek 5 mm çapında delinmiş ve çelik bir pim yardımıyla çekme yükü uygulanmıştır. Pimli numunelerde, numune genişliği (W) ve delik çap merkezinden serbest kenara olan uzaklık (E) parametre olarak seçilmiştir. Her bir numune için yatak mukavemeti ve hasar şekilleri tespit edilmiş ve yorumlar yapılmıştır.

Buna göre, E ve W parametrelerinin yatak mukavemetine etkilerinin büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca dokuma sıklığının malzeme özelliklerinin değişiminde etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Kompozit levhalar, hasar analizi, pim bağlantı

STRENGTH OF MECHANICALLY FASTENED COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, the bearing strength and shape of damage on composite plates which made of different weaving density with pins were investigated experimentally.

Fiber and matrix materials are selected as glass fibers and epoxy resin, respectively. 300, 500 and 800 gr/m² of woven fabrics were used. Layers numbers for each composite are selected to provide about the same product thickness. The plates were produced by using the method of vacuum infüzyon. The influence of weaving density was investigated by determining material specification of each composite produced. Plates were drilled by cutting the sample size of 5 mm in diameter and applied to the tensile load with the help of a steel pin. In the pin samples, the sample width (W) and the distance from the center diameter hole to the free edge (E) is selected as a parameter. For each sample, the bearing strenght and shape of damage are determined and commented.

It was observed that the bearing strength is highly dependent of the parameters E and W. In addition, woven fabric density affect to the material specifications.

Keywords: Composite plates, damage analysis, pin joint

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	1
1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları	2
1.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	2
1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	3
1.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	4
1.6 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Temel Maddeler.....	6
1.6.1 Elyaf Türleri.....	6
1.6.1.1 Cam Elyaflar	6
1.6.1.2 Bor Elyaflar.....	9
1.6.1.3 Silisyum Karbür Elyaflar	9
1.6.1.4 Alümina Elyaflar.....	10
1.6.1.5 Grafit (Karbon) Elyaflar	10
1.6.1.6 Aramid Elyaflar	10
1.6.2 Kompozit Malzemelerde Elyaf Türünün Dayanıma Etkisi	11
1.6.3 Matris Malzemeler	12
1.6.3.1 Epoksi Reçine Matrisler.....	13
1.6.3.2 Polyester Reçine Matrisler	14
1.6.3.3 Vinilester Reçine Matrisler	15
1.6.3.4 Metal Matrisler.....	15

BÖLÜM İKİ - DOKUMA KUMAŞLAR..... 16

2.1 Dokuma Yöntemi	16
2.1.1 Dokuma Kumaşların Sınıflandırılması	17
2.1.2 Dokuma Biçimlerinin Mukavemete Etkileri	19
2.1.2.1 Dokuma Kumaşının Mukavemetini Etkileyen Parametreler	19
BÖLÜM ÜÇ - LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	20
BÖLÜM DÖRT - TEST NUMUNELERİ İÇİN KULLANILAN MATERYAL VE UYGULANAN METOT	25
4.1 Materyaller	25
4.1.1 Reçine	25
4.1.2 Cam Elyafı	25
4.2 Test Numunelerinin Üretim Metodu	26
4.2.1 Test Numunelerinin Üretimde Uygulanan Vakum Destekli Reçine Transferi Yöntemi	26
4.3 Kompozit Malzemenin Üretilmesi	27
4.4 Numunelerin Oluşturulması İçin Kesme ve Delme İşlemleri	30
4.5 Kompozit Malzeme Özelliklerinin DeneySEL Olarak Bulunması	30
4.6 Testlerin Yapılışı	31
4.7 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	31
4.7.1 Fiber Yönündeki ve Fibere Dik Yöndeki Çekme Mukavemetlerinin Bulunması	31
4.7.2 Fiber Yönündeki ve Fibere Dik Yöndeki Basma Mukavemetlerinin Bulunması	33
4.7.3 Kayma Modülünün Hesaplanması	34
4.7.4 Kayma Mukavemetlerinin Hesaplanması	36
4.7.5 Pim Bağlantılı Kompozit Numunelerde Gerilmelerin Hesaplanması	38
BÖLÜM BEŞ - ANALİZLER	40
5.1 Kompozit Malzemelerde Meydana Gelen Hasar Tipleri	40

5.2 Kompozit Malzemelerde Yatak Dayanımı	42
BÖLÜM ALTI - TARTIŞMA VE SONUÇ	46
KAYNAKLAR	48
EKLER.....	51
EK A	51

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde bina yapımından havacılık sektörüne kadar çok geniş kullanım alanı olan kompozit malzemeler, bir mühendislik konusu olarak ele alınması 1940' lı yıllardan itibaren başlamıştır.

Son yüzyılda daha yüksek mukavemetli, daha ekonomik ve de çok hafif malzemelerin oluşturulması için yapılan araştırmalar ve çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bu sayede malzemeyi oluşturan bileşenlerin kombinasyonları sonucu oluşan kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

Ülkemizin kırsal bölgelerinde, yapı malzemesi olarak saman çöpleriyle takviye edilmiş olan kerpiçler kompozit malzemelerin en ilkel özellikte olanlarındandır. Bugün kullanılan kompozitler ise cam fiber reçine (epoksi), molibden takviyeli alüminyum, tungsten, karbon ve çelik fiber takviyeli plastiklerdir. Bunlar genellikle plastik - plastik, plastik - dolgu maddesi, plastik - cam elyaf, metal matrisli kompozitler, plastik - metal fiber ve seramikler olarak sınıflandırılırlar.

1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine Kompozit Malzeme denir.

Kompozit malzemelerde genelde aşağıda yazılmış olan 3 şart aranmaktadır:

- 1- Bileşenlerinden hiçbirinin tek başına iken sahip olmadığı özellikleri taşıması,
- 2- Farklı özellikteki malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilmesi,
- 3-Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı olan en az iki ürünün bir araya getirilmesidir.

Bu özellikleri taşıyan malzeme, mikro yapı açısından bakıldığında heterojen bir ürün özelliği gösterirken, makro yapı açısından bakıldığında homojen bir ürün gibi davranmaktadır.

1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre önem kazanmalarının sebebi, bunların değişik uygulamalarda belirgin özelliklere sahip olmasından dolayıdır. Kompozit malzemelerinin özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı hafif konstrüksiyonlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerinin özelliklerden en önemlileri basınç, eğilme, çekme, çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlar, aşınma direnci, yorulma dayanımı, kırılma tokluğu, korozyon direnci, ısıya karşı dayanıklılığı, yüksek sıcaklığa dayanıklılık, elektriğe karşı göstermiş olduğu direnç, sese karşı gösterdiği direnç, yüksek mukavemet, kolay şekillenme, titreşim sönümlendirme özelliği, kimyasal etkilere karşı dayanımı, rijitliği ve hafif oluşudur.

1.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Üretilen kompozit malzemelerde, malzemenin herhangi bir olumsuz özelliği varsa bu özelliği üretilen kompozit malzemeye yansıtır. Kompozit malzemedeki oluşabilecek olumsuzlukları, zayıflıkları ortadan kaldırmak için günümüzde hala çalışmalar yapılmaktadır. Bu olumsuzluklara bir örnek vermek gerekirse, kompoziti oluşturan matris organik çözücülere karşı dayanıksızsa, onun oluşturduğu kompozit de bu olumsuz özelliği taşır. Dolayısıyla bu kompozit malzemelerde, organik çözücülerin bol miktarda bulunduğu ortamda kullanılmaması gerekir. Aynı mantık nem, sıcaklık v.b. gibi kimyasal etkiler açısından da düşünülebilir.

Kompozit malzemelerde şu tür dezavantajlar görülmektedir:

1- Kompozit malzeme içerisinde kalabilecek hava zerrecikleri, kompozit malzemenin yorulma direncini azaltıcı yönde olumsuz olarak etkiler,

- 2 - Kompozit malzemeler, farklı doğrultuda, farklı özellikler gösterebilirler,
- 3 - Üretiminin güç ve pahalı olması,
- 4- Kompozit malzemelerde gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- 5- Demir, alüminyum, bakır gibi madenlerle kıyaslandığında geri dönüşümü sorunludur,
- 6-İyi tanımlanmamış tasarım parametreleri varsa, bundan dolayı ham malzeme açısından yüksek imalat verimliliğine ulaşılabilmesi bir dezavantajdır,
- 7- Kompozit malzemeler metallere oranla çok daha kırılgan (gevrek) bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden ötürü plastik deformasyon meydana gelmez. Dolayısıyla kompozit yapıların kırılma olayı anlık olabilir. Metaller ise sünek bir yapıya sahip olduklarından, yükleme sırasında plastik deformasyon meydana gelebilir. Metallerdeki kırılma olayı belli süreçleri gerektirdiği için kırılmadan önce gerekli önlemlerin alınma şansı vardır.

1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, yukarıda anlatıldığı gibi bazı dezavantajları olmasına rağmen alüminyum ve çeliğe kıyasla birçok avantaja sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle ev eşyalarından tarım araçlarına, kimyasal madde depolama tanklarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümleyebilmektedirler.

Ev aletleri sektöründen bakıldığında, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi, sandalye, masa ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadırlar. Bu kompozit malzemelerin montaj kolaylığı, hafiflik ve elektriksel etkilerden korunması gibi avantajları vardır.

Havacılık sektöründe kompozitler, günden güne daha geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Planör ve uçak gövdesi, uçak modellerinde ve iç dekorasyonlarında, helikopter parçaları ve uzay sektöründe başarıyla kullanılmaktadırlar.

Otomotiv sektöründe ise kompozit malzemelerden oluşan başlıca ürünler, tamponlar, otomobil kaporta parçaları, bazı motor parçaları, oto lastikleri ve iç donanımlarıdır. Böylelikle üretici, seri üretim, düşük yatırım, kolay ve ucuz model değiştirme imkanlarına sahip olurken kullanıcı da yüksek mekanik dayanım, ucuz ve kolay onarım imkanlarına sahip olmaktadır.

İnşaat sektöründe kompozitler geniş ve önemli kullanım alanlarına sahiptir. Cephe kaplamaları, tatil evleri, otobüs durakları, büfeler ve inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Üreticiye, tasarım esnekliği ve kolaylığı, hafiflik, ucuz izolasyon, montajda ve nakliyyede kolaylık gibi imkanlar sağlarken kullanıcıya da hafiflik bakım giderlerinin en aza inmesi, izolasyon problemlerine çözüm ve yüksek mekanik dayanım gibi faydalar sağlamaktadır.

Şehir planlamasında kompozitler çevre güzelleştirme (banklar, çöp bidonu, elektrik direği) ve toplu konut yapımlarında kullanılmaktadır. Üreticiye yüksek miktardaki ürünün kısa zamanda üretilmesini, montajından tasarruf, hafif olması, ucuz mal edilmesi gibi avantajlar sağlarken kullanıcıya da mekanik dayanımı yüksek olan ürün ve yüksek izolasyon kapasiteli ürün gibi imkanlar sunmaktadır. Bunun yanında, kompozitlerin bu alanlarda kullanılması, estetik, mahalli idarelere de ekonomik avantajlar sunmaktadır.

Mobilya sektöründe ise kompozitlerden pek çok şekilde faydalanılmaktadır. Masa, sandalye, koltuk, sehpa, mutfak dolapları, kütüphane, çiçek saksıları ve dekoratif eşyalar yapılmaktadır. Üreticiye, seri ve ucuz ürün, tasarımda kolaylık ve esneklik gibi faydalar sağlarken kullanıcıya ise yüksek mekanik dayanım, değişik tasarım, alışılmışın dışında farklı görünüm gibi yararlar sağlamaktadır.

1.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, yapısındaki bileşenlere göre ve yapılarını oluşturan malzemelerin türlerine göre olmak üzere iki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

Kompozit malzemenin yapısındaki bileşenlere göre sınıflandırılacak olursak:

- 1- Partikül esaslı kompozitler,
 - 2- Lamel esaslı kompozitler,
 - 3-Fiber esaslı kompozitler,
 - 4- Tabaka yapılı kompozitler,
 - 5- Dolgu kompozitleri
- şeklinde sıralanabilirler.

Kompozit malzemenin yapısını oluşturan malzemenin türlerine göre ise:

- 1- Plastik- plastik kompozitler
 - 2- Plastik- metal fiber kompozitler
 - 3- Plastik- cam elyaf kompozitler
 - 4- Plastik- köpük kompozitler
 - 5- Metal matrisli kompozitler
 - 6- Seramik kompozitler
- başlıkları altında sıralanabilirler.

Bu tezde, kompozit malzeme türlerinden fiber esaslı kompozit malzeme kullanılmıştır. Fiber esaslı kompozitler; birçok özellikte artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilave edilmesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretilmelerinden dolayı mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden yüksek düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği ise 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır.

1.6 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Temel Maddeler

1.6.1 Elyaf Türleri

Matris malzemenin içerisinde yer almakta olan elyaf takviyeleri kompozit malzeme yapısının en temel mukavemet sağlayan elemanlarıdır. Yüksek elastisite modülüne, sertliğe ve düşük yoğunluğa sahip olan elyafların korozyona da dirençleri yüksektir.

Günümüzde kullanılmakta olan en eski elyaf tipleri arasında cam elyaflar yer almaktadır. Zaman içerisinde elyafların zayıf olan özellikleri geliştirilerek dış etkilere karşı dayanımları arttırılmıştır. Bu yüzden elyaflar üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Elyafların mühendislik malzemeleri olmasının en önemli nedenleri:

- 1- Üstün mikro yapısal özellikler, küçük çapta üretilmeleri ve tane boyutlarının küçük oluşu,
- 2- Boy / çap oranının artması halinde matris malzemesinden elyaf malzemeye iletilen yük miktarının artması,
- 3- Elastisite modülünün çok yüksek olması,
- 4- Düşük yoğunluğunun olması,
- 5- Üretim kolaylığı,
- 6- Yüksek dayanımlı, olmasıdır.

1.6.1.1 Cam Elyaflar

Cam elyaflar, camın eritilip çekilmesiyle elde edilen bir tekstil ürünüdür. Elyaf esaslı üretilen kompozit malzemelerin ilk sırasında cam elyaf içerikli olanlar gelmektedir. Birçok üstün özelliklerinin olmasının yanında yaygın kullanılma sebeplerinin en başında ekonomiklik gelmektedir.

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:(Ersoy, H.K., 2001)

- 1- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler.
- 2- Cam elyafların ısıya karşı olan dirençleri düşüktür. Cam elyaflar yanmazlar, fakat yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
- 3- Cam elyafların kimyasal malzemelere karşı dirençleri yüksektir.
- 4- Nemi absorbe edebilme yetenekleri yoktur. Fakat nemden kaynaklı bir olay ile matris ve cam elyafın arasında bir çözülme görülebilir. Uygulanacak olan birkaç özel işlem ile bu sorun ortadan kaldırılabilir.
- 5- Cam elyaflar elektriği iletmezler. Bu özellikleri sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyaflı kompozitler kullanılmaktadır.

Silis kumuna ilave edilen katkı maddeleri ile üretilen cam elyaf malzemelerin farklı özellikler kazandığı görülmüştür. Dört farklı tipte cam elyaf türü mevcuttur.

1. A (Alkali) Camı: Alkali oranı yüksek olan bir cam türüdür. Bundan dolayı elektriksel yalıtkanlık özelliği düşüktür. En yaygın cam tiplerinden biri olan A camının kimyasal direnci yüksektir.

2. C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere karşı direnci çok yüksek olan bir cam türüdür.

3. E (Elektrik) Camı: Yapısında bulundurduğu alkali oranının düşük olması sebebiyle elektrik yalıtkanlığı diğer cam türlerine göre çok iyidir. E camının suya karşı olan direnci ve mukavemeti oldukça yüksektir. Nemli ortamlara olan direnci yüksek olduğu için böyle ortamlarda kullanmak için E camı kullanılmaktadır. Fiber oluşturma özelliği gayet iyidir.

E-camın belirli tek bir kompozisyonu yoktur. Kompozisyon üretici tarafından hammadde teminlerinde ve üretim proseslerinde ekonomiklik açısından uygun şekillerde değiştirilmektedir. Kompozisyonunda belirli sınırlarda yapılan ufak çaplı

değişiklikler E-camının elektrik yalıtkanlığı ya da yüksek dayanım gibi önemli özelliklerini etkilememektedir.

E-camın avantajları; yüksek rijitlik, düşük maliyet, yüksek dayanım, kısmen düşük yoğunluk, ısıya karşı dayanım, kısmen neme duyarlı olmama, iyi kimyasal dayanım, iyi elektrik yalıtımı sağlamasıdır.(Autor K. Kaw, 2006)

E-camın dezavantajları; düşük modülü, uygun işlem görmezse kendi kendini aşındırma ve bunun sonucu dayanımının azalması, karbon ve organik fiberlerle karşılaştırıldığında yüksek yoğunluğa sahip olması ve kısmen düşük yorulma dayancısıdır.(Autor K. Kaw, 2006)

E-camının sürekli fiber olarak kullanımından başka farklı takviye şekillerinde de kullanılmaktadır. Dokunmuş E-camı kumaşlar kompozit panel üretiminde bolca kullanılmaktadır.(Autor K. Kaw, 2006)

4. S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir cam türüdür.. E-camına oranla çekme mukavemeti daha yüksektir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık altında iyi bir yorulma direncine sahip malzemedir. Yorulma direncinin yüksek olmasından dolayı havacılık ve uzay sektöründe en çok kullanılan cam tipidir.

Tablo 1.1 Cam elyafların mekanik özellikleri (Autor K. Kaw, 2006)

Özellikler	A Camı	C Camı	E Camı	S Camı
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2,50	2,49	2,54	2,48
Elastik modül (Gpa)	67,0	69,0	72,4	85,5
Çekme muk. (Mpa)	3033,0	3033,0	3448,0	4585,0
Isıl Genleşme Katsayısı	8,6	7,2	5,0	5,6
Yumuşama Sıcaklığı	727,0	749,0	841,0	970,0

1.6.1.2 Bor Elyafı

Bor elyafı, bor'un kimyasal buharının çok ince bir tungsten teli üzerinde yoğunlaştırılması işlemi sonucunda elde edilmektedir. Çok sağlam ve çok dayanıklı bir yapı oluşturmaya gibi avantajlarının yanı sıra, yüksek yoğunlukta ve yüksek maliyet gerektirmesi dezavantaj sayılabilir. Bu yüzden kullanım alanı sınırlanmaktadır.

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak genellikle tungsten kullanılır. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.(Schwartz, 1984)

Bor elyaflar yüksek elastisite modülüne ve yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ile 3447 MPa arasındadır. Elastisite modülü ise 400 GPa'dır. Bu değer S camının elastisite modülünden 5 kat daha fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında ve uzay teknolojisinde kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak maliyetlerinin çok yüksek olması sebebiyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır.(Chawla, 1987)

1.6.1.3 Silisyum Karbür Elyafı

Silisyum karbürün bor elyaflarda olduğu gibi tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilir. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflara kıyasla daha iyidir. (A. S. M., 1984)

Bu elyaf türü genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak silisyum karbür elyaflar, bor elyaflara kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün tungsten yerine karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu daha düşüktür.(A. S. M., 1984)

1.6.1.4 Alümina Elyafı

Alümina'nın kimyasal formülü alüminyum oksittir (Al_2O_3). Alümina elyafının çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir. Fakat basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alümina / epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ile 2413 MPa'dır. Bunun yanında yüksek sıcaklık dayanımlarından dolayı uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.(Kayrak,1999)

1.6.1.5 Grafit (Karbon) Elyafı

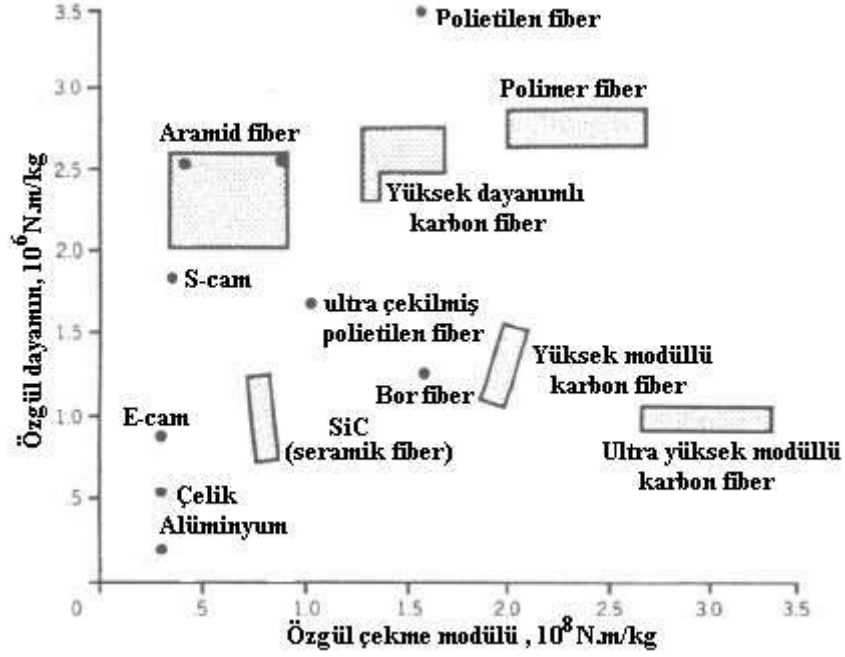
Cam elyaf türüne göre daha sonraları keşfedilen ve geliştirilen bir elyaf türü olmasına rağmen, günümüzde en yaygın olarak kullanılan elyaf türüdür. Hem grafit elyafı hem de karbon elyafı aynı esaslı malzemeden üretilirler. Karbon ve grafit aynı hammaddeden elde edilirler. Grafit daha yüksek sıcaklıkta elde edilmesinden dolayı daha yüksek saflık sağlar. Yüksek ısılarda yorulma dayanımları ve özelliklerini koruyabilme kapasitelerine sahiptir.

Karbon elyafının yapısal özelliklerinden dolayı olumsuz yanları da vardır. Liflerin sınırlı uzayabilme özelliklerinden dolayı darbe olaylarında dayanımları oldukça düşüktür. Elektrik iletme özelliklerinden dolayı da bazı alanlarında kullanılamamaktadır.

1.6.1.6 Aramid Elyafı

“Aromatik poliamid” in kısaltılmış ismi olan aramid elyafının Kevlar 29 ve Kevlar 49 adında iki farklı türü vardır. Mekanik özellikleri karbon elyafında olduğu gibi elyaf eksenine paralel doğrultuda iken çok iyi, fakat elyaf eksenine dik doğrultuda iken çok zayıftır.

Aramid elyaflar yüksek çekme mukavemeti, düşük ağırlık ve düşük maliyet özelliklerine sahiptirler. Bunun yanında darbe direnci yüksek ve gevrekliği ise grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Kevlar49'un elastisite modülü Kevlar29'unkinden iki kat daha fazladır.(Schwartz, 1984)



Şekil 1.1 Fiberlerin özgül çekme ve özgül dayanım değerleri (Rosato, D., 2004)

1.6.2 Kompozit Malzemelerde Elyaf Türünün Dayanıma Etkisi

Tasarım sonucunda imal edilmesine karar verilen kompozit malzemedan belirli bir sertlikte olması, belirli bir karşı kuvvet karşısında kuvveti sönümleyerek yapıya en az zararın gelmesini sağlayabilmesi ve kompozit malzemeye karşı uygulanabilecek herhangi bir basınç kuvvetine karşı belirli bir dayanıklılıkta olması istenmektedir. Kompozit malzemenin güçlendirilmesinde kullanılan reçinenin ve tekstil yapısının özellikleri de etkilidir.

Tablo 1.2 Metallerin ve elyaf türlerinin mekanik özellikleri (Kayrak, 1999)

Malzeme	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Poisson Oranı (μ)	Çekme Mukavemeti (σ_c) (MPa)	Özgün Sertlik (E/ ρ)
Metaller					
Çelik	7.8	200	0.32	1724	1.0
Alüminyum	2.7	69	0.33	483	1.0
Titanyum	4.5	91	0.36	758	0.95
Elyaf					
E-Camı	2.58	69	0.22	3450	1.05
S-Camı	2.46	86.8	0.23	4585	1.4
Karbon(AS4)	1.80	235	0.20	3599	5.1
Karbon(P100S)	2.15	724	0.20	2199	13.2
Karbon(IM8)	1.8	310	0.20	5171	6.7
Boron	2.6	385	0.21	3799	5.8
Kevlar 49	1.44	124	0.34	3620	3.6

1.6.3 Matris Malzemeler

Kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde matrisin önemli bir yeri vardır. Fiberlerin tek başlarına kullanımları sınırlı boyuttadır. Bu yüzden matrisler fiberlere destek sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yapılarında yükü elyaflara orantılı olarak dağıtmak, elyafları bir arada tutmak ve elyafları çevresel etkenlerden korumak matris malzemelerinin en önemli üç özelliğidir.

İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.(Kayrak, 1999)

Matrisler fiberlerle kıyaslandıklarında düşük mekanik özellikler sergilemesine rağmen kompozit malzemeye birçok mekanik özelliği matrislerden almaktadırlar. Bu özellikler basma dayanımı, kesme dayanımı, ısı genleşme katsayısı ve yorulma dayanımıdır. Bundan dolayı malzeme tasarımında dikkat edilmesi hususlardan biridir.

Kompozit malzemelerin üretiminde dört tip reçine kullanılmaktadır. Bunlar fenolik, polyester, vinilester ve epoksi reçinesidir. İmal edilecek kompozit malzemelerde yüksek mukavemet aranmaz ise en çok kullanılan reçine türü polyester reçinesi iken imal edilecek kompozit malzeme yüksek mukavemet gerektiriyorsa epoksi reçine kullanılmaktadır.

1.6.3.1 Epoksi Reçine Matrisler

Epoksi reçineler iki veya daha fazla epoksit içermekte olan bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Epoksi reçinesinin rengi berrak renkte ve sıvı haldedir. Tüm polimerler yüksek sıcaklıkta kauçuklaşırlar ve düşük sıcaklıkta saydamlaşırlar.

100 °C' de uygulanan bir kür işlemi sayesinde maksimum çalışma sıcaklığı 90-100 °C artırılabilir. 150- 250 °C arasında uygulanacak bir kür ile 150- 250 °C arasında uygulanan maksimum çalışma sıcaklığı sağlanabilir. Kür işlemleri en uygun katalizörlerin kullanılması ile hızlandırılabilir.(Kayrak, 1999)

- Epoksilerin avantajları:

- 1- Yüksek aşınma direncine sahip malzemelerdir.
- 2- Kimyasal dirençleri yüksektir ve uçucu malzeme değildir.
- 3- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiplerdir.
- 4- Elyaf yapılar ile yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.

- Epoksilerin dezavantajları:

- 1- Polyesterle kıyaslandığında pahalı bir malzemedir.
- 2- Polyestere oranla düşük viskoziteye sahiplerdir.

Epoksiler diğer ürünlerle kıyaslandığında avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir yapıda olmaları nedeniyle, uçaklarda tabakalı kompozit yapılar olarak yaygın bir kullanım alanına sahiplerdir. Genellikle karbon elyaflar ile birlikte kullanılmaktadır.

1.6.3.2 Polyester Reçine Matrisler

Cam elyaf takviyeli plastiklerin üretiminde en çok kullanılan reçine türüdür. Kür işlemi uygulandığında matrisin esnekliği iyileştirilebilir ve kopma gerilmesi arttırılabilir. Doymuş polyester reçine ve doymamış polyester reçine olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doymuş polyester reçineler termoplastik özellikler gösterirken, doymamış polyester reçine türü ise termoset özellikli reçinedir.(Ersoy H. Y., 2001)

- Polyester reçinelerin avantajları:

- 1- Polyester reçine takviyeliler nemin kolayca dışarı çıkarabilmesine olanak sağlayan düşük viskoziteye sahiplerdir.
- 2- Maliyet açısından ekonomiklerdir.
- 3- Çeşitli uygulamalar için üretim olanağı kolaydır ve üretim sınırları geniştir.
- 4- Polyester reçinelerin çevresel dayanımları yüksektir.

- Polyester reçinelerin dezavantajları:

- 1- Kür edilme esnasındaki yüksek ekzotermik reaksiyonlar, elyaf / matris bağ dayanımları zayıftır.
- 2- Yapıları gevrekleşmeye eğilimlidir.
- 3- Çok seyreltik alkalilere bile çok zayıf kimyasal direnç göstermektedirler.

Polyester reçinelerin, epoksi reçinelere kıyasla elyaf / matris arası bağ dayanımlarının daha düşük olmasından dolayı, havacılık sektöründeki kullanım alanları küçük uçaklarla ve plan rlerle sınırlıdır.

1.6.3.3 Vinilester Reçine Matrisler

Polyester reçine matrislerle benzerlik gösterirler. Elyaf ve matris arasındaki bağ dayanımının yüksek olması vinilester reçinelerinin en büyük avantajıdır. Vinilester reçineler yüksek korozyon dayanımı ve yüksek mekanik özellikler gösterirler. Kullanım prosesleri epoksi reçinelerinde olduğu gibi karmaşı k değildir. Kullanım alanları genellikle kimyasal dayanımları yüksek olmasından dolayı kimyasal tesislerdir.

1.6.3.4 Metal Matrisler

Kompozit malzemeler üretilirken genellikle matris malzemesi olarak hafif ve mukavemeti yüksek metaller kullanılır. En yaygın olarak kullanılanları ise titanyum, alüminyum ve magnezyumdur. Takviye olarak da berilyum,  elik, molibden ya da tungsten elyaflar kullanılır. Bunun yanında SiC kaplı bor elyaflar ve grafit elyaflar da kullanılır. Bu metal matrislerde elyaflar yapıya tokluk ve mukavemet kazandırırken metal matris de elyafları bir arada tutar, yükleri ve gerilmeleri  ekil değiştirerek karşılamaya çalışır.

Metal matrisli kompozitlerin genellikle kullanım alanı, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımlarının çok iyi olmasından dolayı uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.(Kayrak, 1999)

Metal kompozitlerde kullanılan peki tiricilerin bazı belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu  zellikler, ısı kararlılık, yoğunluk, üretim kolaylığı, ısı direnç ve kimyasal uygunluk olarak sayılabilir. Metal matrisli kompozitlerde, karbon, grafit, bor, silisyum karbür, alümina ve metalik teller kullanılan peki tiricilerdendir. (Kayrak, 1999)

BÖLÜM İKİ

DOKUMA KUMAŞLAR

Dikiş ve dokuma işlemlerinde kullanılmakta olan iplik, tekstil sektöründe ilk sırada olan bir hammaddedir. Doğal ve sentetik elyafların birçok işlemten geçirilmesiyle de dokuma kumaşlar meydana gelmektedir.

Kompozit malzemelerde kullanılmak üzere dokuma kumaş üretilirken dikkat edilmesi gereken bir husus bulunmaktadır. Bu husus, kompozit malzeme imalatında kullanılan önemli bir yöntem olan karışımlar kuralı hesap yöntemi ile bulunmaktadır.

Aşağıda verilen eşitlikte görüldüğü gibi karışımlar kuralı, matris ve fiber malzemesinin hacim oranlarına göre dayanımlarının toplamının kompozitin dayanımını verdiğini ifade etmektedir.(Broutman, J. ve Krock, R., 1967)

$$P_c = P_m + P_f \quad (2.1)$$

$$\sigma_c \cdot V_c = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f$$

Yukarıdaki (2.1) eşitliğe bakılacak olunursa bir kompozit malzemedan beklenen dayanım değeri belirlidir. Bunun yanında bir kompozit malzemenin içerebileceği fiber hacminin de sınırlı sayıda olduğu düşünülmektedir. Kullanılmak istenen matris malzemesi de sabit olduğuna göre formülde tek bilinmeyen fiberin dayanımıdır. Bu değeri formülden hesaplayarak teorik fiber dayanım değeri bulunabilmekte, bu sayede kullanılacak ipliğin dayanım değerine ulaşılmakta ve bu değere uygun bir iplik veya kompozit malzeme üretiminde kullanılacak bir malzeme seçebilme olanağı sağlamaktadır.

2.1 Dokuma Yöntemi

Dokuma, belirli kurallar dahilinde kompozit malzeme üretiminde kullanılacak iki aynı tür ürünün birbirleri arasında dik aç ve çapraz bir görünüm oluşturacak şekilde dokunması olayına “dokuma” denir.

Dokuma kumaşı, birbirine paralel olarak yan yana dizilmiş ipliklerin veya malzemelerin, birbirlerinin üstünden ve altından geçerek bağlanmaları yoluyla oluşturulmaktadır.(Yıldırım, B., 2005)

Dokuma kumaş yöntemi, kumaş oluşturma yöntemleri arasında en eski yöntemlerden biri olmasıyla birlikte hala günümüzde yerini ve önemini yitirmemiştir. Dokuma yöntemi ile kumaş oluşturma özellikle endüstri devrimi ile birlikte önemli gelişmeler göstermiştir. Hızla artan insan nüfusunun yanı sıra artan tekstil talebi ve bunların farklı ekonomik düzeylerdeki insanlar tarafından alınabilir/satılabilir özellikte olması, hızla gelişen teknolojik ve sanayi olanaklar ile bu atılımların hızlanmasına neden olmuştur.

2.1.1 Dokuma Kumaşların Sınıflandırılması

Dokuma kumaşlarının kullanım alanları en başta endüstriyel alanlar olmak üzere pek çok yerde kullanılmaktadır. Dokuma kumaşları yapılarına, kullanım alanlarına ve hammaddelerine göre sınıflandırılmaktadır. Hammadde seçenekleri ticari açıdan bakıldığında elyaf çeşitleriyle sınırlıdır. Dokuma kumaşlarının oluşturan elyaflar, pek çok çeşitte dokunmaktadırlar.

Belli başlı 6 değişik dokuma tipi vardır. Bunlardan bahsetmek gerekirse:

Düz Dokuma: En çok kullanılmakta olan dokuma örgüsü tipidir. Bu dokuma türü sağlam kararlı ve dayanıklı yapıdadır. Aynı zamanda simetrik bir yapıya sahiptir. Fakat dokumalar arasındaki kaplanma özelliğinin en zoru bu yapıya aittir. Diğer dokuma türleri ile kıyaslandığında yüksek derecedeki fiber kıvrımları yapıya nispeten daha düşük mekanik özellik vermektedirler.

Basket Tipi Dokuma: Temel olarak düz yapı ile aynıdır. Düz dokuma türüyle kıyaslanacak olursa daha esnektir. Diğer dokuma türleri ile kıyaslanacak olursa en

kararsız yapıdır. Aynı miktardaki iplik sayısına ve ağırlığa sahip düz yapıya göre daha güçlü ve düzgün yapılıdır. Basket tipi dokuma, ağır dokumaların kalın iplikler ile aşırı kıvrımlı olmasının önlenmesinde kullanılabilmektedir.

Çapraz Dokuma: Düz dokumaya veya basket tipi dokumaya göre daha esnek yapıdadır. Saten dokuma tipine kıyasla ise daha iyi dikilme özelliğine sahiptir. Çözümlü iplikleri düzgün tekrarlar ile iki ya da daha fazla atkılı ipliğinin altından ve üstünden geçerek dokuma yapısını oluşturmaktadırlar. Çapraz tipi dokuma, düz yapıya kıyasla daha üstün kaplama özelliği göstermektedir. Kıvrımlı haldeyken, çapraz dokuma daha yumuşaktır ve diğer dokuma türlerine kıyasla daha iyi mekanik özellik göstermektedir.

Saten Dokuma: Saten dokuma tipi, tüm dokuma türleri içinde en çok esnek özelliği gösteren türdür. Çok yüksek dayanıma sahiptir. Saten dokuma, çapraz yapıdaki atkılı ve çözgülerin daha az kesişerek kompozisyon olmaları ile oluşmaktadır. Saten dokumaların düşük kıvrımlı olması, diğer türlere göre daha iyi mekanik özellikler kazandırmaktadır. Saten dokuma üretim aşamasında fiberlerin birbirlerine çok yaklaşmalarına ve sımsıkı kenetlenmesine olanak sağladığı için kompakt ve sıkı bir yapı oluşmaktadır.

Leno Dokuma: Leno dokuma türü genellikle az miktarda iplik sayısına sahip olan açık dokumaların geliştirilmesinde diğer dokuma türleri ile birlikte kullanılmaktadır. Eğer yalnız kullanılırsa, açıklıkları fazla olduğu için tam olarak kompozit bileşeni oluşturamamaktadır. Bu tür dokumalarda yüksek dayanım için çok sayıda lif gerekmektedir ve dokuma kumaşı gözenekli olmalıdır.

Üç Eksenli Dokuma: Bu dokuma türü düşük fiber hacim oranında yüksek seviyede boyutsal kararlılık özelliği göstermektedir.

Tek Yönlü Dokuma: Bu tür dokumalar, belirli bir yönde yüksek mukavemet göstermektedirler. Diğer yönlerdeki dayanımı çok düşüktür. Kullanım alanları Tek yönlü dayanım gösteren parçalar olduğu için çok geniş sınırlara hitap etmemektedir.

2.1.2 Dokuma Biçimlerinin Mukavemete Etkileri

Dokuma biçimlerine göre mukavemet değerleri kıyaslandığında en yüksek dayanım verileri saten dokuma tipinde görülmüştür. Saten dokuma biçiminden sonraki en yüksek dayanımı çapraz dokuma biçimi gösterirken düz dokuma biçimi ise en yüksek üçüncü dayanım değerini vermiştir.

Düz dokuma, çapraz dokuma, saten dokuma, basket dokuma ve leno türü dokumalar karşılaştırıldığında en yüksek kararlılığı düz dokuma türü verirken en düşük kararlılığı leno türü dokuma vermektedir. İyi kaplanma açısından kıyas yapıldığında en yüksek iki değeri saten ve leno tipi dokumalar vermekte olup en düşük değeri düz dokuma tipi vermektedir. Gözeneklilik yönünden kıyas yapıldığında en düşük gözenekli yapı saten dokumada oluşurken leno dokuma türünde en gözenekli yapı olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yapılan kıyaslamada ise saten dokumada yüzey pürüzlülüğü en az iken leno yapı en pürüzlü yapıdır.

2.1.2.1 Dokuma Kumaşının Mukavemetini Etkileyen Parametreler

Kompozit malzemelerde kullanılan dokuma kumaşları, aynı koşul ve malzeme ile dokunmuş bile olsa, dokuma biçimleri çok büyük önem taşımakta, kumaşın özellikleri ve kumaşın yapısı tamamen değişmektedir.

Dokuma kumaş yapısını tanımlamak için gerekli parametreler şunlardır;

- 1- Dokuma kumaş oluşturulurken dokuma biçimi
- 2- Dokuma kumaş oluşturulurken malzemenin sık dokunması
- 3- Dokuma kumaş oluşturulurken kullanılacak olan malzemenin kalınlığı
- 4- Dokuma kumaşta kullanılacak malzemenin kıvrılma oranı önem taşımaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Kompozit malzemeler üzerine birçok araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalardan bazıları kompozit malzemelerin bağlantı noktalarında oluşan hasarları inceleyen araştırmalardır. Bu tezde pim bağlantılı kompozit malzemelerin hasar türleri araştırılmıştır.

Chang ve Chang, delikli kompozit levhalar için hasar ve gerilme analizleri yapmışlardır. İki boyutlu, ortotropik ve düzlemsel gerilme grafit/epoksi kompozit malzeme modeli incelenmiştir. Kompozit malzemeler, sonlu eleman analizlerinde uygulanmak için hasar ilerleme modeli geliştirilmiş ve Yamada-Sun hasar kriteri kullanılmıştır. Üç ana hasar şekli ele alınmıştır. Bunlar matris-elyaf kayması, matris çatlaması ve elyaf kopmasıdır. Sonlu eleman analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçlar uygun bulunmuştur. (Chang F.K ve Chang K.Y, 1987)

Chang ve arkadaşları, tabakalı kompozit levhalarda bulunan deliği, çekme kuvvetine maruz bırakıp hasar şekillerini incelemişlerdir. Nümerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulup kendi geliştirdikleri hasar ilerleme algoritmasını kullanmışlardır. Birbirinden farklı konfigürasyona sahip grafit/epoksi malzeme üzerinde çalışmışlardır. (Chang, Liu ve Chang, 1991)

Tan, delikli kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli ile, hasar şekillerini benzetmek için malzeme zayıflatma kuramı geliştirmiş ve sonlu eleman analizlerinde kullanmıştır. Çalışmasında Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Farklı konfigürasyonlar elde etmek için analizler yapılmış ve sonuçlar deneyler ile karşılaştırılmıştır. (Tan, Seng C., 1991)

Chang ve Chang, cıvata bağlantılı kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli geliştirmiştir. Cıvata bağlantılı kompozit levhalar için üç ana hasar şekli olduğu belirtilmiştir. Bunlar; yırtılma, net kopma ve cıvata baskısı neticesinde ortaya çıkan deliğin iç yüzeylerindeki ezilmedir. Deneysel incelemeler ve araştırmalar sonucunda

levhanın yırtılmasının ve kopmasının iki boyutlu (düzlemsel) olduğu, ezilme seklinin ise üç boyutlu olduğu görülmüştür. Çalışmalarında sadece ilk iki hasar şekli olan levha yırtılması ve kopması incelenmiştir. İki boyutlu düzlemsel gerilme durumu ele alınmış, yukarıda bahsedilen algoritma ve hasar kriterleri çalışmalarında da uygulanmıştır. (Chang F. K. ve Chang K. Y., 1987)

Shokrieh ve Lessard, çalışmalarında pim bağlantılı karbon/epoksi malzeme için iki boyutlu hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, pimi rijit olarak kabul ederek ve radyal sınır koşulları uygulayarak pim modellenmesi yapılmıştır. Pim deliği/kenar uzaklığı ve pim deliği/plaka genişliği oranlarının kompozit levhanın mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Bunun yanında lineer olmayan malzeme davranışının da etkisi araştırılmıştır. Geliştirdikleri hasar ilerleme modeli sonlu eleman analizlerinde uygulanmış, elde edilen sonuçlar deneyler ile karşılaştırılmıştır. (Shokrieh ve Lessard, 1995)

Camanho ve Matthews, civata ve pim bağlantılı kompozit levhalar üzerine yapılmış çalışmaları incelemiş ve bu çalışmalarını derleyerek bir makale hazırlamışlardır. Pim bağlantılı kompozit levhalar üzerinde yapılan çalışmalarda pim ile delik arasındaki boşluk, temas yüzeyi ve sürtünme göz önünde bulundurulmalıdır. Oluşan yatak gerilmesinin üç boyutlu analizler ile hesaplanmasının gerekli olduğu da vurgulanmıştır çünkü kalınlık boyunca tabaka takviye açısının etkisi önemle dikkate alınmalıdır. (Camanho ve Matthews, 1997)

Qiu ve Fan, çalışmalarında seri olarak bağlanmış tabakalı ve 4 pimli kompozit levhaların gerilme analizleri üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında, sürtünme katsayısının ve pim deliklerinin toleransının, pim deliklerindeki reaksiyon kuvvetlerin dağılımını nasıl etkilediği analitik olarak incelenmiştir. Birinci ve dördüncü pimlerin deliklere sıkı geçtiği, ikinci ve üçüncü pimlerin deliklere boşluklu geçtiği varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmalarında T300/648 kompozit malzeme kullanılmıştır. (Qiu ve Fan, 1993)

grafit/epoksi malzeme kullanılmıştır. Cıvata/pim rijitliğinin, bağlantı şeklinin, pul boyutunun ve cıvata ön gerilmesinin yatak mukavemetini ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Deneylerinde çeşitli tabaka konfigürasyonları, pim delik çapları, (W/D) ve (E/D) oranları kullanılmıştır. Parametrelerin sonuçları ne şekilde etkilediği de araştırılmıştır. Çalışmalarında hem cıvata bağlantısı hem de pim bağlantısı ayrı ayrı incelenmiştir. Farklı cıvata ön gerilmelerinin bağlantının mukavemetini ne şekilde etkilediği detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda pim bağlantılı yapılarda kırılmanın birdenbire gerçekleştiği, fakat cıvata bağlantılı yapılarda kırılmanın adım adım ilerlediği belirtilmiştir. Bunun yanında ön gerilmenin artması sonucunda bağlantının mukavemetinin de arttığı gözlenmiştir. (Wang, Hung ve Chang, 1996)

Kim ve Hwang, çalışmalarında pim bağlantılı, elyaf takviyeli kompozit levhaların dayanımı üzerinde durmuşlardır. Mukavemet analizlerini sonlu elemanlar metodu kullanarak yapmışlardır. Pim/delik arasındaki temasın modellenmesi ve delik iç yüzeyindeki yük dağılımının hesaplanması incelenmiştir. Hashin hasar kriteri uygulanmış ve hasar ilerleme algoritmasıyla birlikte kullanılmıştır. Pim rijit olarak kabul edilmiş, kompozit tabakalar simetrik olarak yerleştirilmiş, pim/delik arasındaki sürtünme katsayısı ise sabit alınmıştır. Modellemede yırtılma, net kopma ve ezilme hasar şekilleri incelenmiştir. (Kim ve Hwang, 1998)

Zhang ve arkadaşları, çalışmalarında pim bağlantılı kompozit levhaların, pim/delik yüzeyinde oluşan sürtünmenin, üç boyutlu temas gerilmesine olan etkisini incelemişlerdir. Sayısal ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sürtünme katsayısının, delik civarında üç boyutlu gerilme durumunu önemli bir şekilde etkilediği görülmüştür. İki boyutlu modellemelerin düzlemsel gerilme seklinde yapılmış olup, üç boyutlu gerilme durumu arasında önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiş, bu farklılığın özellikle kayma gerilmesinde daha belirgin görüldüğü ifade edilmiştir. (Zhang, Ganesan ve Suong, 2000)

Whitworth ve arkadaşları, çalışmalarında pim bağlantılı kompozit levhalarda hasar analizi yapmışlardır. Yamada-Sun hasar kriterini çalışmalarında kullanmışlardır. Delik çevresinde oluşabilecek hasarı tayin etmek için karakteristik uzaklık hesaplamaları analitik olarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar literatürde yer alan deneyler ile karşılaştırılmıştır. (Whitworth, Othieno ve Barton, 2003)

Kelly ve Hallström, cıvata bağlantılı karbon/epoksi malzemeler için cıvata ile delik arasında oluşan boşluğun mukavemete olan etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, oluşturdukları üç boyutlu sonlu eleman modellemeleri ile karşılaştırılmıştır. Cıvata ile delik arasında boşluğun artması halinde, temas alanının azaldığı ve bu durumun da bağlantıyı zayıflattığı belirtilmiştir. (Kelly ve Hallström, 2004)

Okutan ve arkadaşları, çalışmalarında dokuma cam/epoksi malzemeden üretilmiş pim bağlantılı kompozit levhaların mukavemetini araştırmışlardır. Bu çalışmada levha genişliği/delik çapı oranı 2'den 5'e kadar ve delik merkezinin levha kenarına uzaklığı/delik çapı oranı 1'den 5'e kadar değiştirilerek farklı farklı numuneler üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Test numunelerinde meydana gelen hasar şekilleri karşılaştırılmıştır. (Okutan, B., Aslan, Karakuzu, R., 2001)

İçten ve Karakuzu, çalışmalarında pim bağlantılı karbon/epoksi levhaların hasar şekillerini incelemek üzere deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarında dokuma kompozit levhalar kullanılmıştır. Delik merkezinin plaka kenarına uzaklığı/delik çapı, (E/D) ve plaka genişliği/delik çapı, (W/D) , oranlarının yapının mukavemetine olan etkisi araştırılmıştır. Çekme testleri uygulanarak kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Pim-delik yüzeyi arasında meydana gelen kuvvet, kosinüs dağılımı şeklinde delik yüzeyine uygulanmış ve düzlemsel gerilme analizleri yapılmıştır. Analizlerde Hashin ve Hoffman hasar kriterleri hasar ilerleme algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Aynı zamanda hasar durumuna göre malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralları

uygulanmıştır. Deney sonuçları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. (İçten, B. M. ve Karakuzu, R., 2002)

Okutan, çalışmasında pim bağlantılı, çok yönlü cam elyaf takviyeli epoksi levhalarda (E/D) ve (W/D) oranları ile takviye açılarının mukavemete etkisini araştırmış ve hasar durumlarını belirlemiştir. Yapmış olduğu çalışma deneysel ve nümerik kısımlardan oluşmuştur. Çekme testleri uygulanarak farklı (E/D) ve (W/D) oranları için kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri çıkarılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur ve pimi benzetmek için delik yüzeyine radyal sınır koşulları uygulanmıştır. Malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralları ve Hashin hasar kriteri uygulanmıştır. Analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. (Okutan, B., 2002)

Pim/cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhaların mukavemet analizi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmış ve önemli olduğu düşünülen çalışmalar yukarıda özetlenmiştir. Literatür incelendiğinde bu konu ile ilgili olarak bazı çalışmaların yalnızca deneysel bazılarının da hem deneysel hem de sonlu eleman analizlerini içerdiği belirlenmiştir. Literatürde yer alan sonlu eleman modellerinin büyük bir çoğunluğu iki boyutlu olup pim bağlantısını simule etmektedir. Çok az sayıda üç boyutlu cıvata bağlantılı kompozit yapılar için sonlu eleman analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada 300 gr/m², 500 gr/m² ve 800 gr/m², lik dokuma cam lifi kumaşlardan üretilmiş kompozit levhaların pimli çekme deneyleri yapılmıştır. Numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 2, 3, 4, 5 ve delik çapı merkezinden serbest kenara olan uzaklığın delik çapına oranı (E/D) 1, 2, 3, 4, 5 olarak seçilmiştir. Numune boyut ve delik pozisyon parametrelerinin numunenin yatak mukavemetine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

BÖLÜM DÖRT

TEST NUMUNELERİ İÇİN KULLANILAN MATERYAL VE UYGULANAN METOT

4.1 Materyaller

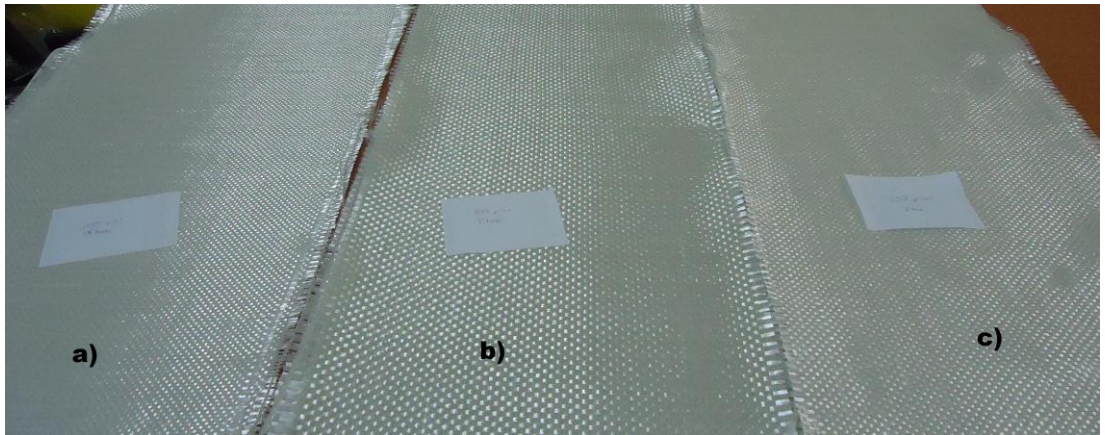
Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Araştırma Laboratuvarında imal edilen deney numuneleri için aşağıda temel özellikleri verilen materyaller kullanılmıştır.

4.1.1 Reçine

Üretim aşamasında 45cm x 120 cm' lik 3 levha için 3686 gram epoksi ve 1228 gram sertleştirici kullanılmıştır.

4.1.2 Cam Elyafı

Çalışmada kullanılmak üzere 300, 500 ve 800 gr/m²'lik E-cam lifinden dokumuş kumaşlar temin edilmiştir.

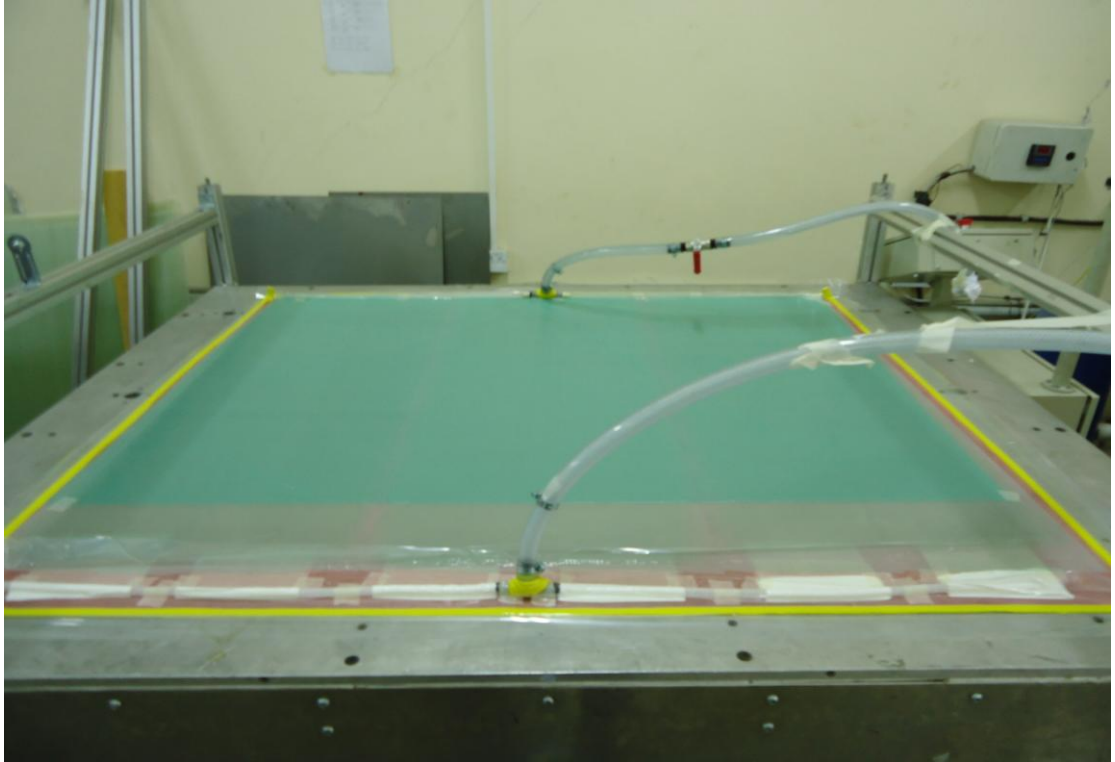


Şekil 4.1 Temin edilen cam elyaf tipleri a) 300 gr/m² E-cam dokuma b) 800 gr/m² E-cam dokuma c) 500 gr/m² E-cam dokuma

4.2 Test Numunelerinin Üretim Metodu

4.2.1 Vakum Destekli Reçine Transferi Yöntemi

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte fazla iş gücü gerektiren elle yatırma yöntemi, günümüzde yerini vakum destekli reçine transfer yöntemine bırakmıştır ve çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.2’de yöntem gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Vakum destekli reçine transferi yöntemi

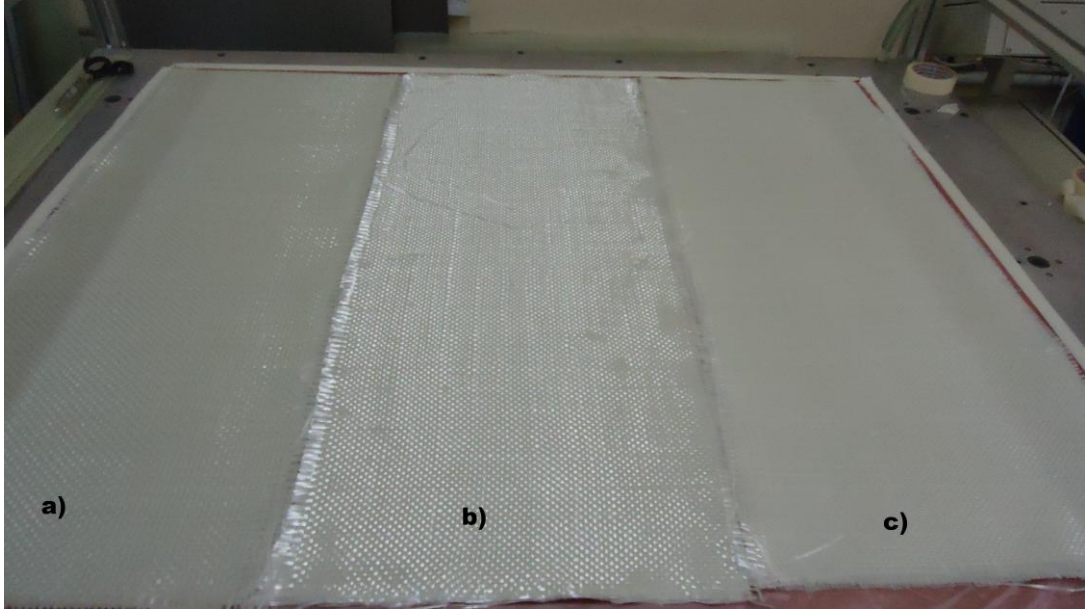
Vakum destekli reçine transferi yönteminin başlıca avantajları şunlardır;

- 1-Düşük üretim maliyeti,
- 2-Tasarımda değişikliklerin gerektiğinde kolaylıkla yapılabilmesi,
- 3-Diğer yöntemlerle kıyaslandığında düşük yatırım maliyetine sahip olması,
- 4-Yerinde kalıplama imkanı,
- 5-Prototip üretimine ve büyütmeye olanak sağlaması,
- 6-Maksimum tasarım esnekliği, belirli bölgenin daha dayanıklı yapılabilme olanağı,
- 7- İşgücünün yoğun olmadığı bir proses olmasıdır.

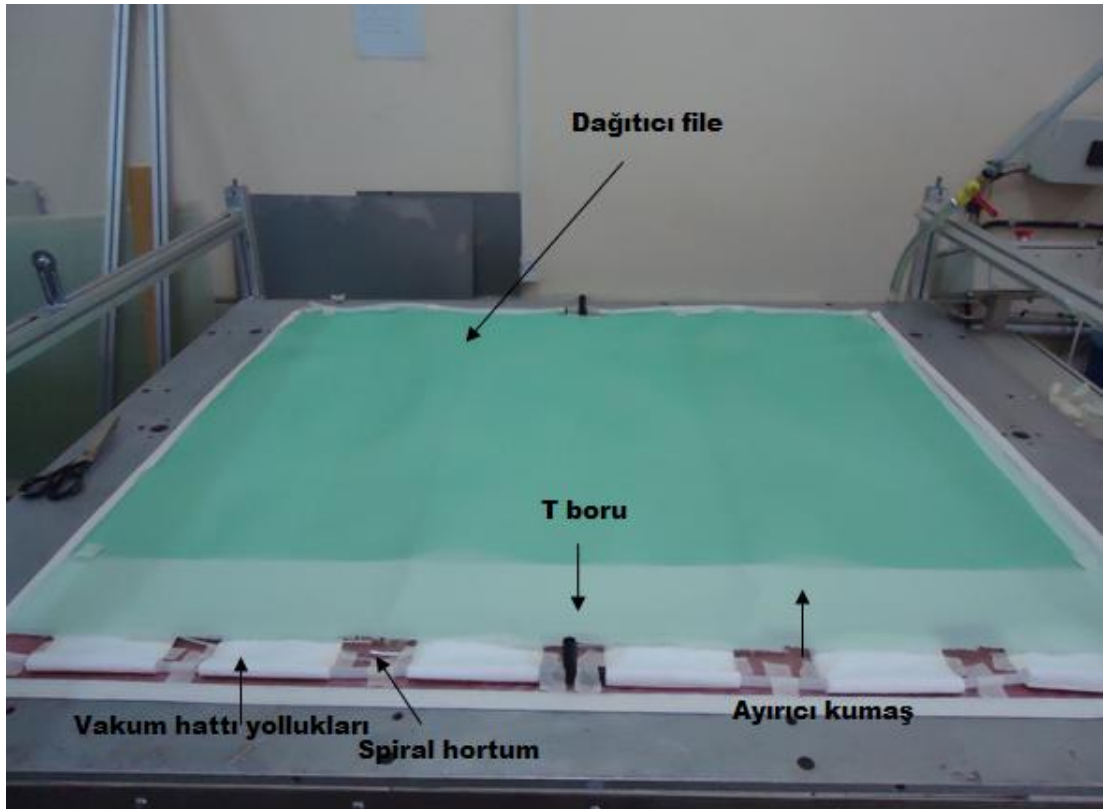
4.3 Kompozit Malzemenin Üretilmesi

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuarda üretilen kompozit levhalar aşağıda sıralanan aşamalardan sonra elde edilmiştir.

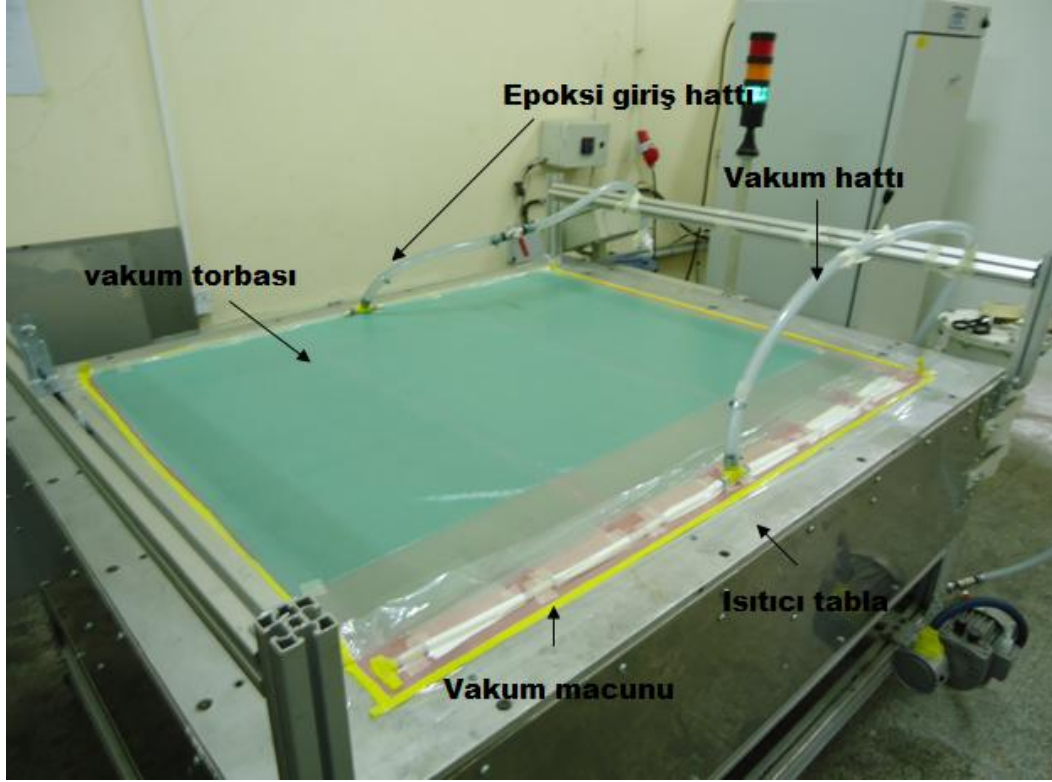
- 1- 300, 500 ve 800 gr/m²' lik cam elyaflar, yeterli sayıda numune elde edilebilmesi düşüncesiyle 45 cm x 120 cm' lik ölçülerde kesilerek hazırlanmıştır.
- 2- Şekil 4.2' de resmi görülen vakum tezgahının yüzeyi asetonla temizlenmiştir.
- 3- Bir kompozit levhada istenilen elyaf hacim oranına ve aynı kalınlığa ulaşmak amacıyla 300 gr/m²' lik cam dokuma elyafından 13 tabaka, 500 gr/m²' lik cam dokuma elyafından 8 tabaka ve 800 gr/m²' lik cam dokuma elyafından 5 tabaka kesilmiş ve üst üste konularak aynı kalınlık yakalanmaya çalışılmıştır.
- 4-Vakum tezgahına, tezgah genişliğinde, kompozitin tezgaha yapışmaması için ayırıcı torba serilmiştir.
- 5- Aynı anda üretim yapmak istediğimiz için 300, 500 ve 800 gr/m²' lik cam elyaflar yan yana getirilerek vakum tezgahına konmuştur.
- 6- Ayırıcı kumaş serilmiştir.
- 7- Epoksinin kompozit malzemenin içine iyice dağılması için ayırıcı kumaşın üzerine dağıtıcı serilmiştir ve Şekil 4.4' de gösterilmiştir.
- 8-Vakum hattı ve epoksi giriş hattının oluşturulması için spiral hortumlar, normal hortumlar ve vanalar kullanılmıştır. Şekil 4.5'de vakum torbasının macunlanması ve epoksi verme-vakumlama hatlarının oluşturulması gösterilmiştir.
- 9- Tabakaların üstü ise ısıya, yırtılmaya ve vakum basıncına dayanıklı vakum torbası ile örtülmüştür.
- 10-Vakum işleminin başarılı olabilmesi için vakum torbasının etrafı macun ile tezgaha bağlanıp vakumlama işlemi yapılmıştır.
- 11- Epoksinin verilmeye başlanması ile kürlleme işlemi başlamıştır. Kürlleme 90 °C' de 120 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir.
- 12-Tezgah ve üretilmiş olan kompozit levhalar soğuduktan sonra macunlar çıkarılarak vakum torbası altındaki kompozit levhalar tezgahdan ayrılmıştır.



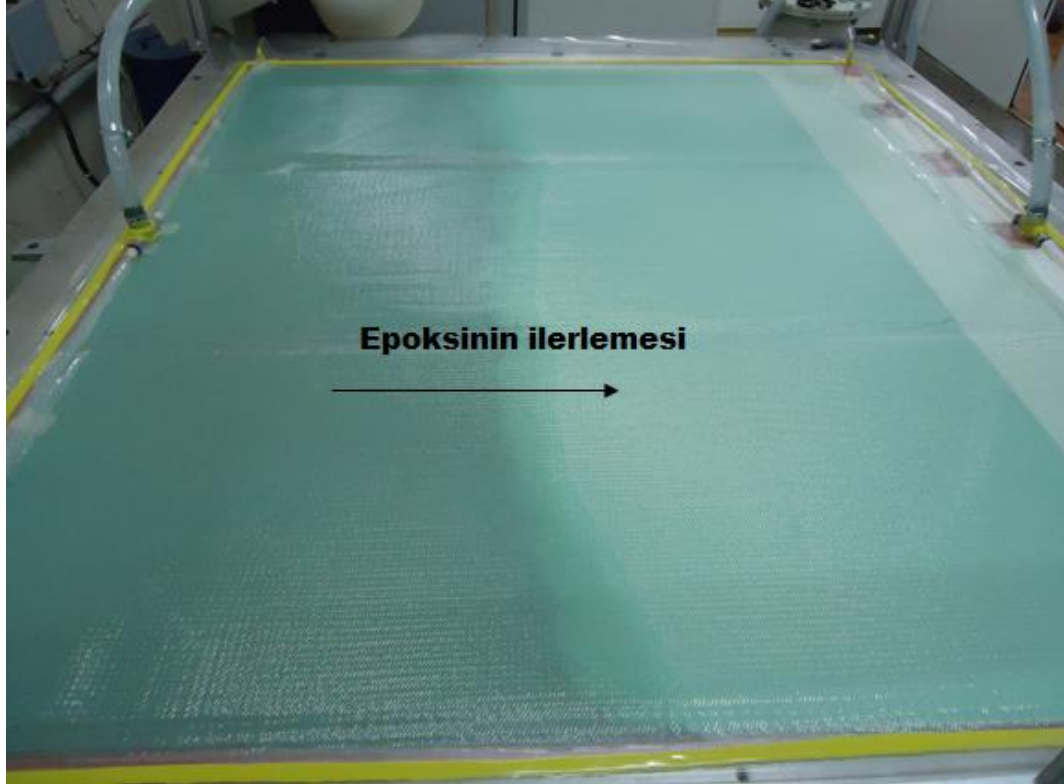
Şekil 4.3 Cam elyafların vakum tezgahına yerleştirilmesi a) 800 gr/m² kumaş b) 500 gr/m² kumaş c) 300 gr/m² kumaş



Şekil 4.4 Epoksi emme hatlarının oluşturulması ve dağıtıcının yerleştirilmesi



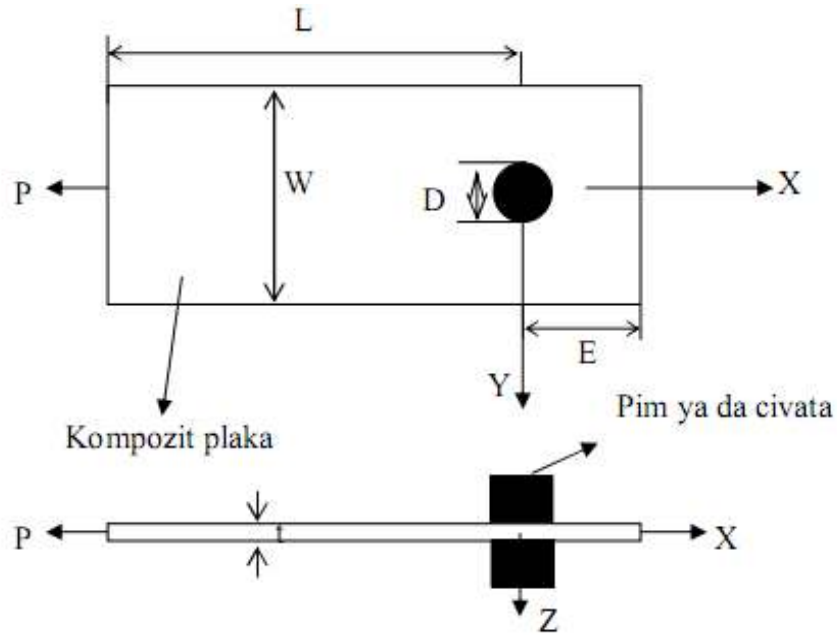
Şekil 4.5 Vakum torbasının macunlanması ve epoksi verme-vakumlama hatlarının oluşturulması



Şekil 4.6 Cam elyafın yarısına kadar epoksi verilmişken oluşan görüntüsü

4.4 Numunelerin Oluşturulması İçin Kesme ve Delme İşlemleri

Bu çalışmada kullanılan numunelerin boyutlandırılması için kompozit plakalar İZOREEL (Kompozit İzole Malzemeler, İzmir) firmasında, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek ve pim bağlantılı deneylerde kullanmak üzere belirli uzunluk ve genişliklerde kesilmiştir. Laboratuvarımızda, İzoreel firmasında kesilmiş olan numunelerin çene bağlantı kısmındaki yüzeyleri zımparalanmış, çeki ve bası deneylerinde uygulanmak üzere test cihazının numunelere zarar vermemesi ve gerçek sonuçlara yakın değerler alabilmek için numunelerin iki ucuna da klapeler yapıştırılmıştır. Pim bağlantılı deneylerde kullanılacak numuneler ise E/D oranı 1, 2, 3, 4, 5 ve W/D oranı 2, 3, 4, 5 olacak şekilde 5 mm' lik matkap ucu kullanılarak delinmiştir.



Şekil 4.7 Numunelerde boyutlandırma gösterimi

4.5 Kompozit Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Bulunması

Kompozit malzemeler istenilen özelliklerin karşılanması ihtiyacından dolayı farklı farklı üretilmekte bu yüzden mekanik özellikleri çeşitlilik gösterebilmektedir. Kompozit malzemeler bu yüzden izotropik malzemelere kıyasla

daha karmaşık ve pahalıdır. Bundan dolayı, pim bağlantılı deneylerde kullanılan numunelerin mekanik özellikleri deneysel olarak bulunmuştur.

4.6 Testlerin Yapılışı

Çalışmalarda tüm mekanik özellik belirleme testleri ve pim bağlantılı hasar testleri SHIMADZU- Autograph AG-X modelindeki çekme cihazında yapılmıştır. Mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan numunelerin mekanik davranışı, çekme cihazına bağlı bir bilgisayar yardımıyla grafik ve data halinde alınmıştır. Malzemenin elastisite modülü ve poisson oranını belirlemek için numunelerin üzerine strengeler yapıştırılıp malzemenin şekil değiştirme değerleri bir data toplama sistemi yardımıyla belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Şekil 4.8’de Shimadzu çekme cihazı gösterilmiştir.



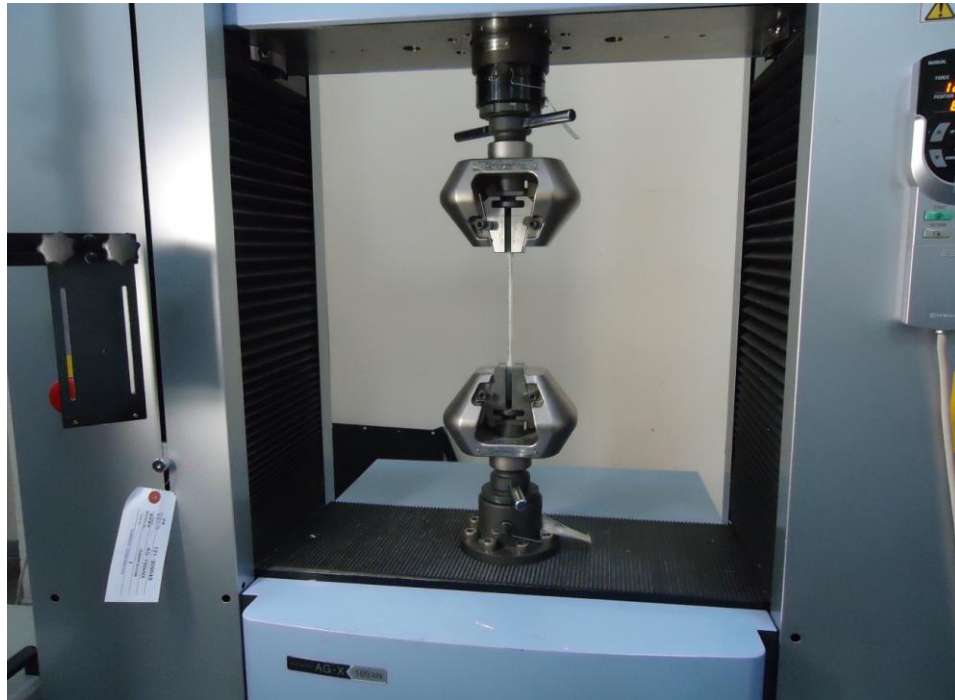
Şekil 4.8 Shimadzu çekme cihazı

4.7 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

4.7.1 Fiber Yönündeki ve Fibere Dik Yöndeki Çekme Mukavemetlerinin Bulunması

Kompozit malzemenin fiber doğrultusundaki poisson oranını, elastisite modülünü ve çekme mukavemetini belirlemek için 300, 500 ve 800 gr/m² lik numuneler, test standardı olan ASTM D3039- 76 standardına göre yapılmıştır. Numunelerin boyutları 12,7 mm x 230 mm' dir ve 5'er adet numune hazırlanmıştır.

Numune, Shimadzu çekme cihazına dokuma şeklindeki yapısının 90° açığa sahip olan fiberlerin, eksenleri tam çekme yönüne gelecek şekilde bağlanmıştır ve 2 mm/dak hızla çekilmiştir. Birim şekil değiştirmeler strengçeçler aracılığıyla alınmıştır. Şekil 4.9'da çekme deneyinin bir görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Çekme deneyinin bir görüntüsü

E_1 , ν_{12} ve X_φ değerleri aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \qquad \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \qquad (4.1)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \qquad X_\varphi = \frac{P_{kopma}}{A}$$

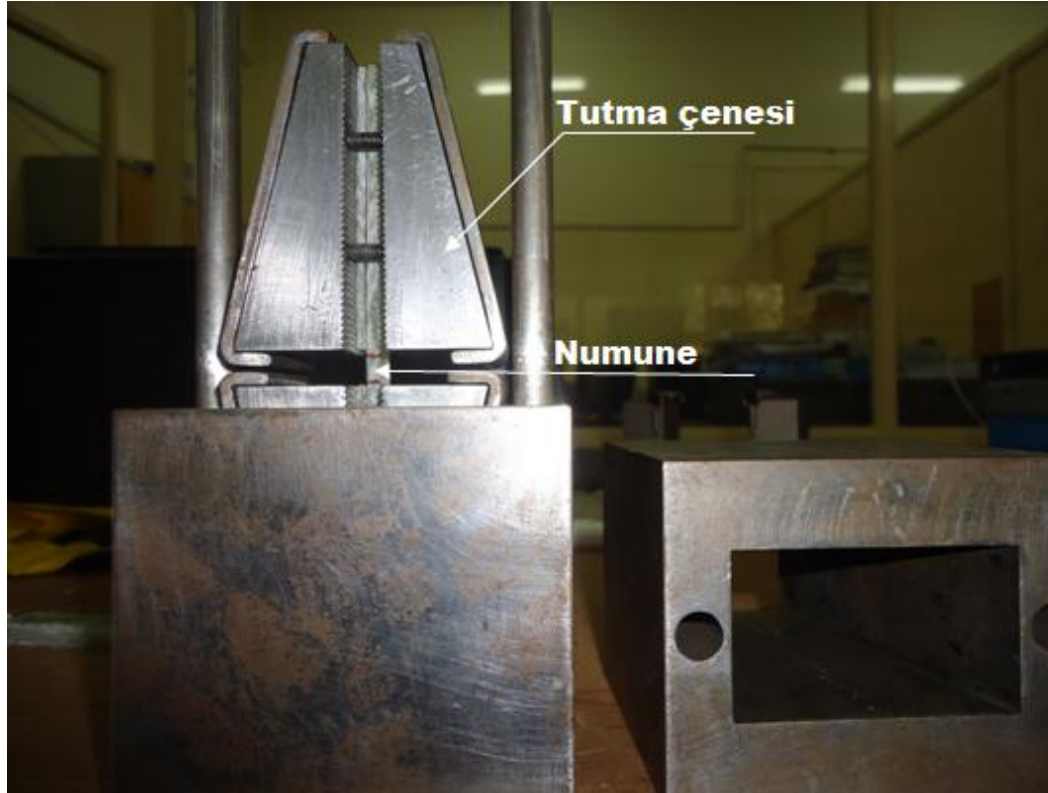
Burada A , numunenin çekme yönüne dik kesit alanıdır. Dokuma yapı nedeniyle E_1 ve X_φ değerleri sırasıyla E_2 ve Y_φ 'ye eşit alınmıştır.

4.7.2 Fiber Yönündeki ve Fibere Dik Yöndeki Basma Mukavemetlerinin Bulunması

Kompozit malzemenin fiber doğrultusundaki basma mukavemetini belirlemek için 300, 500 ve 800 gr/m² lik numuneler, test standardı olan ASTM D3410- 75 standardına göre boyutlandırılmış ve deney yapılmıştır. Numuneler Shimadzu çekme cihazında 2 mm/dak hızla basılmıştır. Numunelerin boyutları 12,7 mm x 140 mm' dir ve 5'er adet hazırlanmıştır. Şekil 4.11'de ITR bası aparatı gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Basma mukavemetinin deneysel olarak belirlenmesi



Şekil 4.11 Basma deneyinde kullanılan IITR bası aparatı

Basma mukavemetleri, numunelerin basma kuvvetinde dayanabildiği maksimum yükün, numunenin kesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Formülü aşağıda (4.2) denkleminde verildiği gibidir.

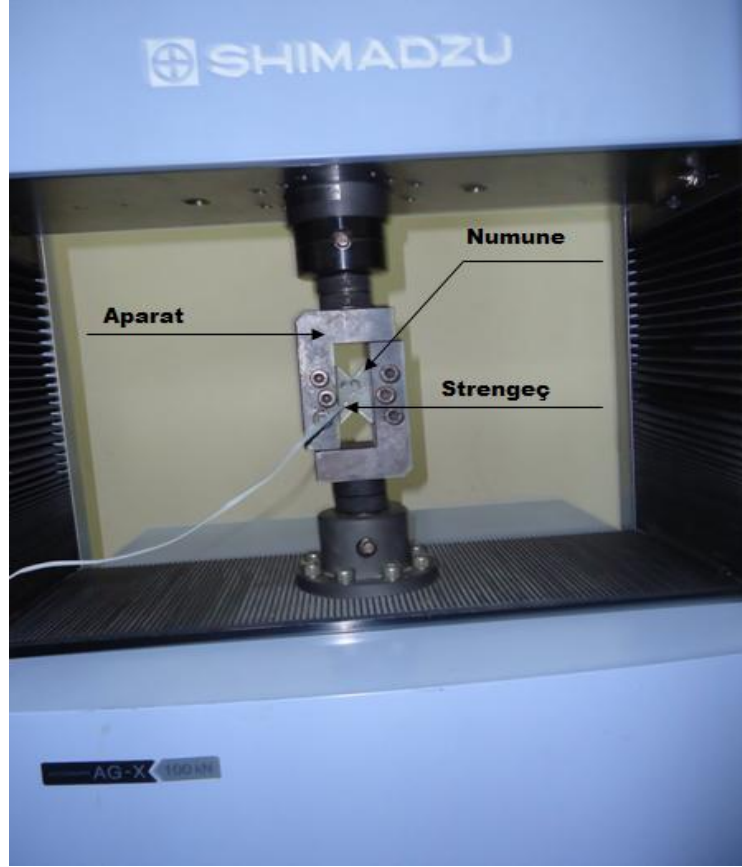
$$X_b = \frac{P_{hasar}}{A} \quad (4.2)$$

Burada A, numunenin basma yönüne dik kesit alanı olup dokuma yapı nedeniyle X_b , Y_b ’ye eşit alınmıştır.

4.7.3 Kayma Modülünün Hesaplanması

Kompozit malzemenin kayma modülünü belirlemek için 300, 500 ve 800 gr/m²’lik numuneler, dokuma yapısının fiber doğrultusunun açısı 45° olacak şekilde strengçe yapıştırılmıştır. ASTM D7078- 05 standardına göre boyutlandırılmış ve

deney yapılmıştır. Şekil 4.12’de kayma modülünün deneysel olarak bulunması ve Şekil 4.13’de kayma testleri sırasında kullanılan aparatlar gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Kayma modülünün deneysel olarak bulunması



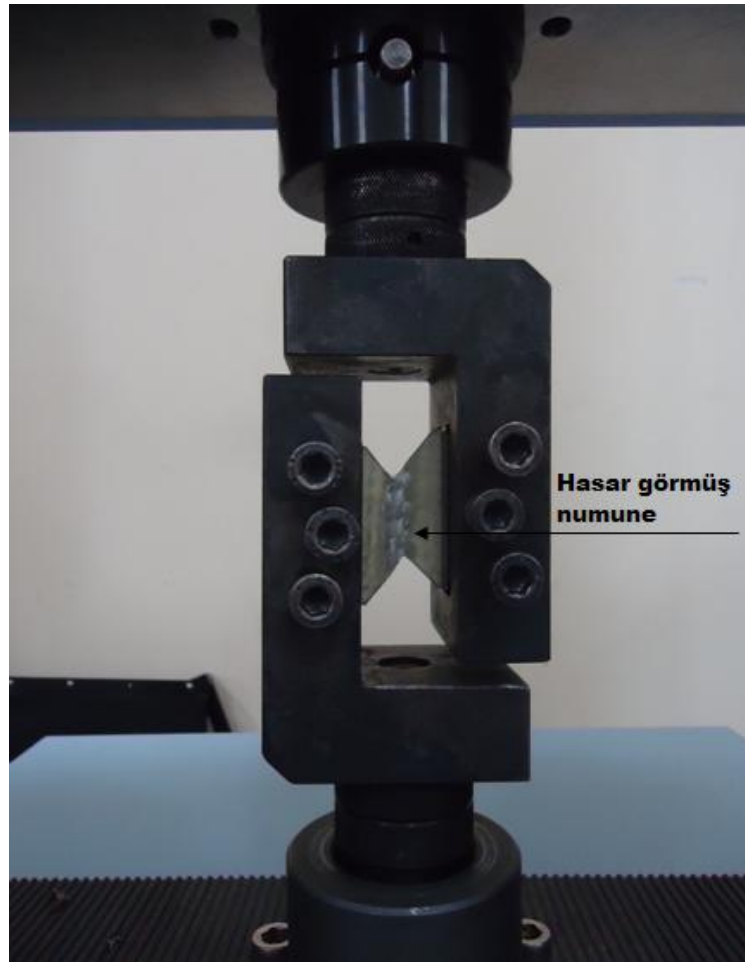
Şekil 4.13 Kayma testleri sırasında kullanılan aparat

Numunelerin eksenine bir adet streng  yapıştırılarak 2 mm/dak hızla çekilmiştir. G_{12} kayma modülü aşağıdaki (4.3) eşitliğındeki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

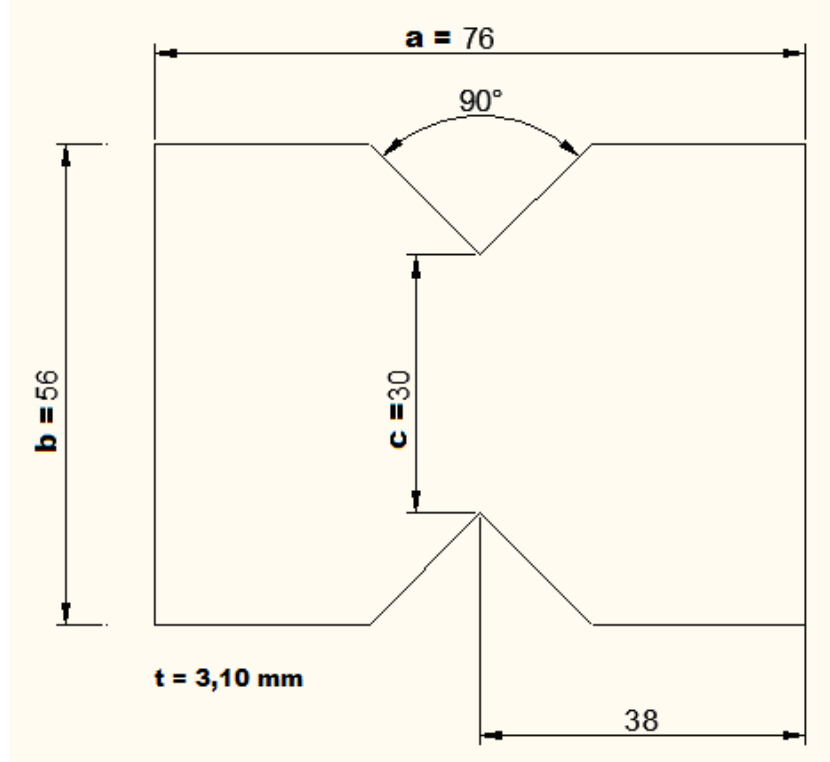
$$\tau = \frac{P}{A} \quad \gamma = 2\varepsilon_{45} \quad G_{12} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.3)$$

4.7.4 Kayma Mukavemetinin Hesaplanması

Kayma mukavemetini bulabilmek için birçok geometri ve test metodları geliştirilmiştir. Bunlar; Iosipescu testi, burulma tüpü testi, T testi, sandviç kiriş testi, ikili ray sistemi testi ve V- entikli kayma metodudur. Bu  alışmada V- entikli kayma metodu kullanılmıştır. şekil 4.14’de ise test düzeneğı gösterilmektedir.



şekil 4.14 V- entikli kayma test düzeneğı



Şekil 4.15 Kayma numunesinin boyutlandırılması

Boyutları; $a=76$ mm, $b= 56$ mm, $c= 30$ mm ve $t = 3,10$ mm olan numune 2 mm/dak hızla yüklenerek kayma mukavemeti aşağıdaki (4.4) eşitlik denklemi ile elde edilmiştir.

$$S_{12} = \frac{P_{\max}}{t.c} \quad (4.4)$$

Bu deneylerin uygulanmasıyla bulunan cam elyaf malzemenin özellikleri bir sonraki sayfadaki Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1 Cam elyaf-epoksi kompozit malzeme özellikleri

Özellik	Sembol (Birim)	300 gr/m ²	500 gr/m ²	800 gr/m ²
Fiber Yönündeki Elastisite Modülü	E ₁ (GPa)	19,48	20,68	20,74
Fibere Dik Yöndeki Elastisite Modülü	E ₂ (GPa)	19,48	20,68	20,74
Kayma Modülü	G ₁₂ (GPa)	4,60	4,96	5,06
Poisson Oranı	ν_{12}	0,14	0,14	0,14
Çekme Mukavemeti	X _c (MPa)	384	394	417
Basma Mukavemeti	X _b (MPa)	224	227	267
Kayma Mukavemeti	S ₁₂ (MPa)	56	59	60

4.7.5 Pim Bağlantılı Kompozit Numunelerde Gerilmelerin Hesaplanması

Delik çapı merkezinden serbest kenara olan uzaklığın delik çapına oranı (E/D) 1, 2, 3, 4, 5 ve numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 2, 3, 4, 5 olan 5 mm çapında delikli 300, 500 ve 800 gr/ m², lik kompozit numuneler Shimadzu çekme cihazına eksenler tam çekme yönüne gelecek şekilde bağlanmıştır ve 2 mm/dak hızla çekilmiştir. Her deneyden beşer tane numune kullanılmıştır.

Gerilme değeri aşağıda verilen (4.5) denklemindeki formül yardımıyla bulunmuştur. Burada P, kuvveti ve A, pimin iz düşüm alanını temsil etmektedir. Pimin iz düşüm alanı, numunenin kalınlığı ile delik çapının çarpımıdır. Şekil 4.16' da pim bağlantılı çekme deneyi gösterilmektedir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A}, \quad A = D.t \quad (4.5)$$



Şekil 4.16 Pim bağlantılı çekme deneyi

BÖLÜM BEŞ

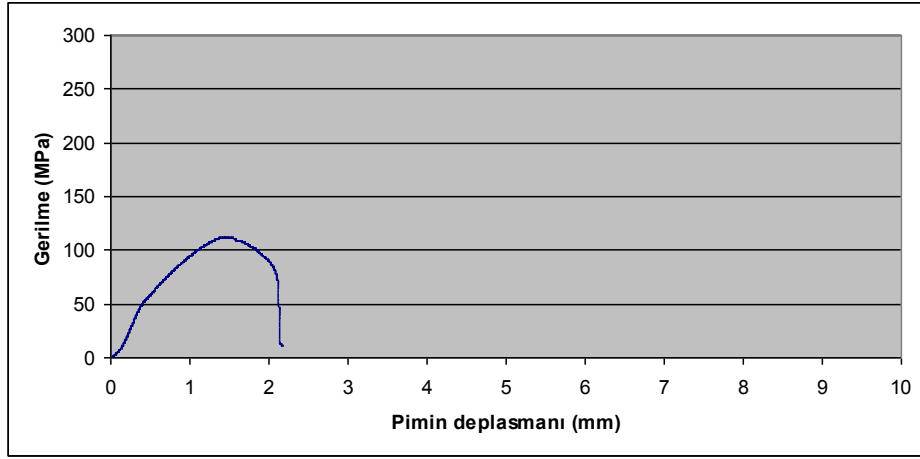
ANALİZLER

Cam lifi-epoksi dokuma kumaş plakalardan numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 2, 3, 4, 5; delik çapının merkezinden serbest kenara olan uzaklığın delik çapına oranı (E/D) 1, 2, 3, 4, 5 alınarak, bu geometrilere sahip olan bütün kompozit plakalar için çekme deneyleri yapılmış olup maksimum yatak mukavemetleri ve yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir.

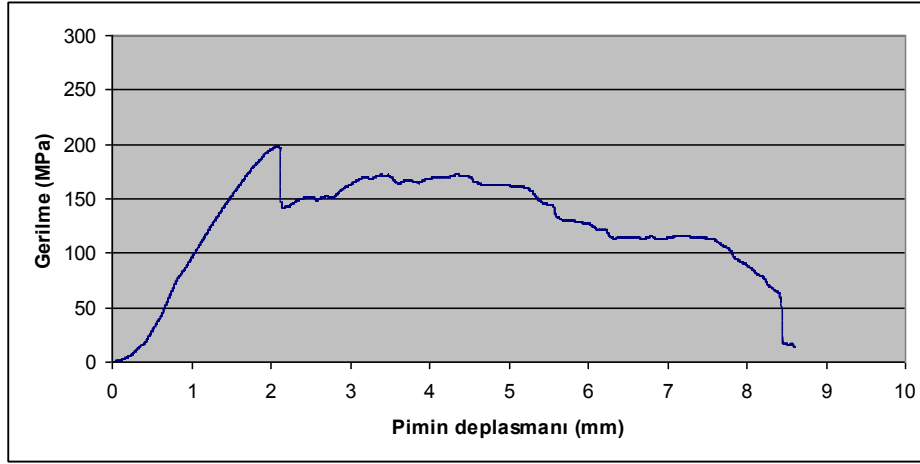
5.1 Kompozit Malzemelerde Meydana Gelen Hasar Tipleri

Yapılmış olan deneylerde elde edilen grafikler incelendiğinde, malzemede ilk hasar oluşumuna kadar yük-uzama eğrilerinin genellikle lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Genelde bütün grafiklerde üç temel eğri görülmektedir. Bunlardan birincisi net çekme hasar moduna karşılık gelen eğridir. Bu eğride yük belirli bir değere kadar artar ve kompozit malzemede aniden bir kırılma meydana gelir. Bu hasar türü en tehlikeli olanıdır. Diğer bir eğri çeşidinde ise yük maksimum değere ulaşmıştır fakat daha sonra yük azalırken deplasman artmaya devam etmektedir ve kompozit malzemede yırtılma meydana gelir. Bu eğri, kayma hasar moduna karşılık gelmektedir. Son eğri çeşidinde ise ilk hasar meydana geldikten sonra yük artarken deplasman da artmaya devam eder. Yük maksimum noktaya ulaşır ve yük azalmaya başlarken deplasman hala artmaya devam etmektedir. Fakat parça hala yük taşımaya devam etmektedir. Bu hasar tipi ise yatak hasar modudur.

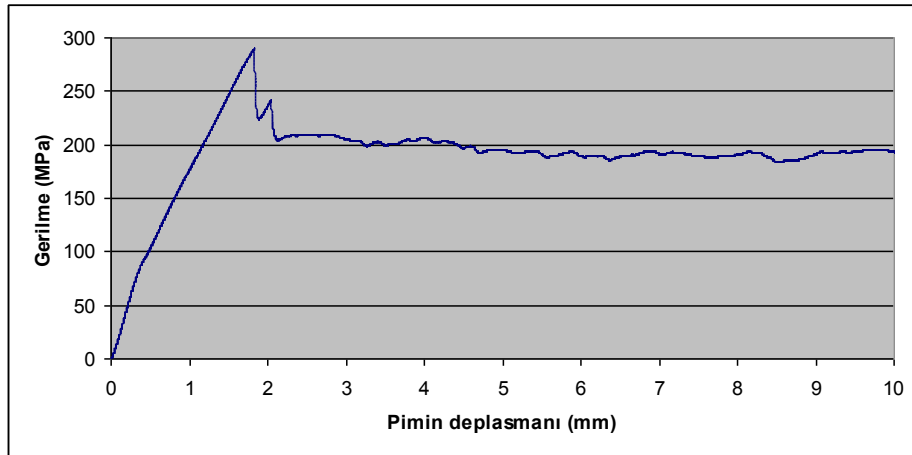
Yapılmış olan deneylerle bütün kompozit plakalara ait olan gerilme-deplasman grafikleri EK-A 'da verilmiştir.



Şekil 5.1 Kopma hasar moduna ait gerilme-deplasman grafiği



Şekil 5.2 Yırtılma hasar moduna ait gerilme-deplasman grafiği



Şekil 5.3 Yataklama hasar moduna ait gerilme-deplasman grafiği

5.2 Kompozit Malzemelerde Yatak Dayanımı

Kompozit malzemelerde maksimum yatak dayanımı, pim bağlantısının dayanabildiği maksimum gerilme olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{D.t} \quad (5.1)$$

Kompozit malzemede gerilme değeri, maksimum yatak mukavemetine ulaştığı vakit, malzemede oluşan çatlaklar yüzünden malzeme kuvvete karşı direncini kaybeder ve pim, malzeme içerisinde hızla ilerlemeye başlar. Maksimum yatak gerilmesi en küçük değerini, tüm fiber oryantasyonlarında E/D= 1 ve W/D= 2 iken almakta ve bu oran arttıkça maksimum yatak mukavemeti de artmaktadır.

Cam lifi-epoksi dokuma kumaş plakalardan numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 2, 3, 4, 5 olduğu durumlar için, delik çapı merkezinden serbest kenara olan uzaklığın delik çapına oranı (E/D)1, 2, 3, 4, 5 değerlerine bağlı olarak 300, 500 ve 800 gr/m² lik kompozitlerin ortalama maksimum yatak gerilme değerleri Tablo 5.1 ile Tablo 5.4 arasında verilmiştir.

Deneyde elde edilen tüm veriler incelendiğinde maksimum yatak gerilmesi değerlerinin hemen hemen bütün plaka geometrilerinde E/D oranının 4 ve 4'ten büyük olduğu durumlarda maksimum değerlere ulaştığı görülmüştür. Şekil 5.4 le Şekil 5.6 arasında yatak mukavemeti-(E/D) değişim grafikleri verilmiştir.

Tablo 5.1 Yatak gerilmesi değerleri (W/D= 2)

W/D=2	300 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	500 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	800 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)
E/D=1	82	85	88
E/D=2	109	152	150
E/D=3	141	128	157
E/D=4	159	150	161
E/D=5	157	151	156

Tablo 5.2 Yatak gerilmesi değerleri (W/D= 3)

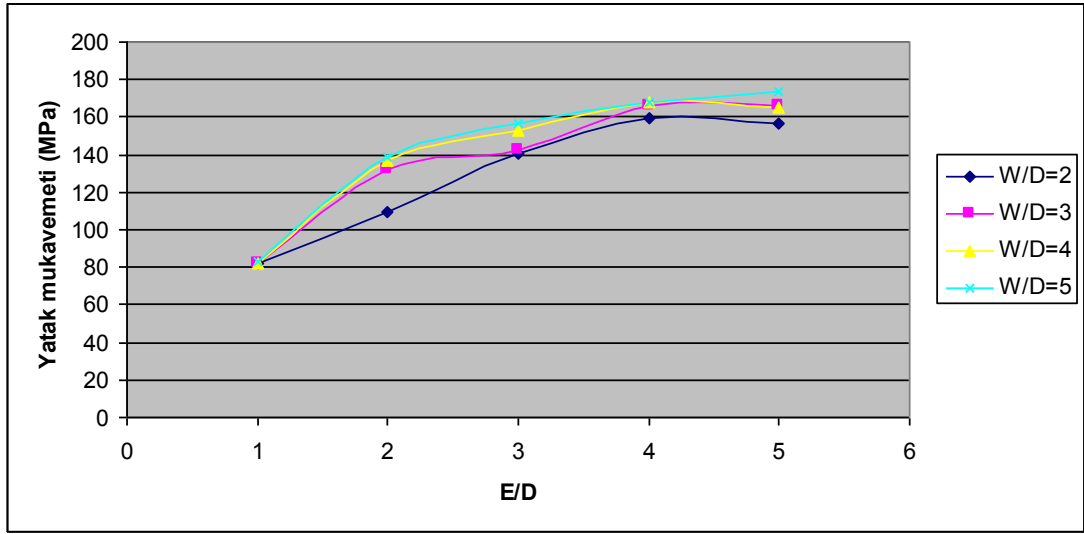
W/D=3	300 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	500 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	800 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)
E/D=1	82	98	88
E/D=2	132	165	167
E/D=3	142	155	159
E/D=4	166	148	163
E/D=5	166	160	173

Tablo 5.3 Yatak gerilmesi değerleri (W/D= 4)

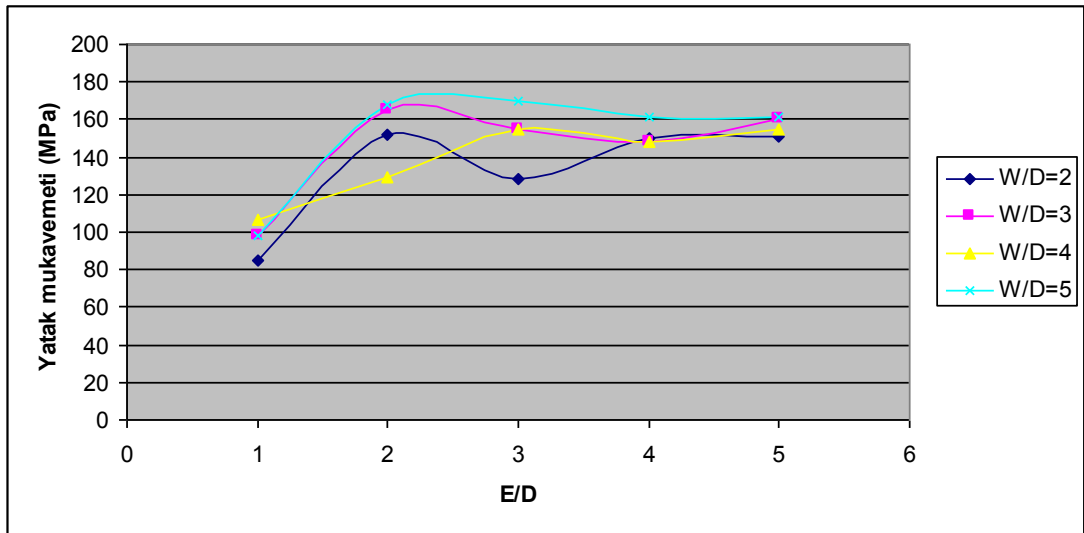
W/D=4	300 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	500 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	800 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)
E/D=1	82	107	88
E/D=2	137	129	168
E/D=3	153	155	171
E/D=4	168	148	164
E/D=5	165	155	169

Tablo 5.4 Yatak gerilmesi değerleri (W/D= 5)

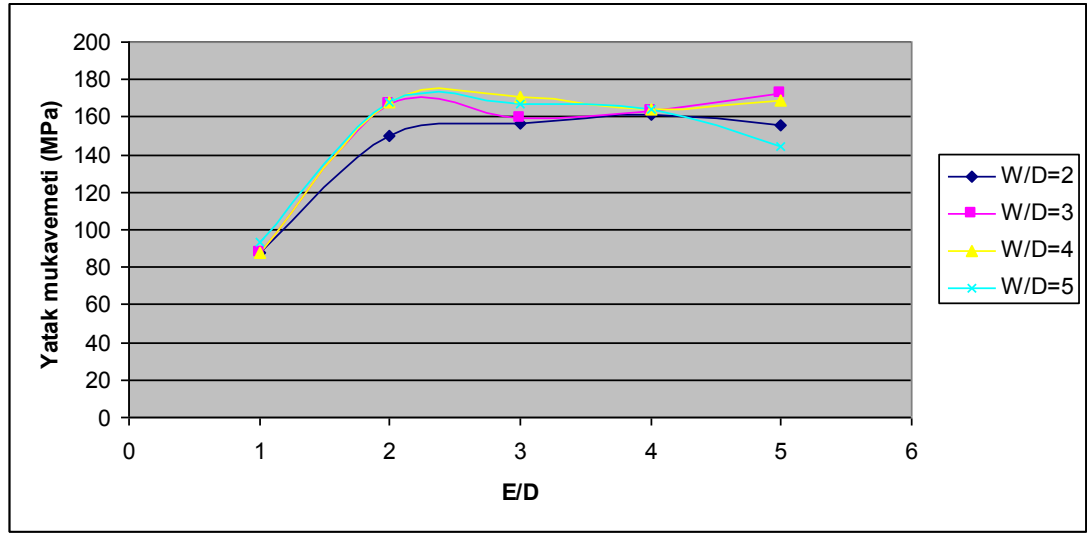
W/D=5	300 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	500 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)	800 gr/m² Maksimum Yataklama Gerilmesi (MPa)
E/D=1	83	98	93
E/D=2	139	168	168
E/D=3	157	170	167
E/D=4	168	161	164
E/D=5	174	161	144



Şekil 5.4 300 gr/m² lik kompozit levhadaki yatak mukavemeti- (E/D) değişim grafiği



Şekil 5.5 500 gr/m² lik kompozit levhadaki yatak mukavemeti- (E/D) değişim grafiği



Şekil 5.6 800 gr/m² lik kompozit levhadaki yatak mukavemeti- (E/D) değişim grafiği

BÖLÜM ALTI

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, pim tarafından çekilen cam elyaf-epoksi kompozit malzemenin maksimum hasar yükleri ve yatak gerilmeleri deneysel olarak elde edilmiştir. Cam elyaf-epoksi plakalardan numune genişliğinin delik çapına oranı (W/D) 2, 3, 4, 5; delik çap merkezinden serbest kenara olan uzaklığın delik çapına oranı (E/D) 1, 2, 3, 4, 5 alınarak 300, 500 ve 800 gr/m² lik kompozit levhalarda çekme deneyi yapılmış ve bu malzemelerin maksimum hasar yükleri ve yatak gerilmeleri bulunmuştur. Bununla birlikte, değişken (W/D) ve (E/D) oranlarına sahip farklı plaka geometrilerinde, maksimum hasar yükü ve yatak gerilmesi üzerindeki etkileri de belirlenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1- Kompozit levhalar arasında en yüksek elastisite modülü, kayma modülü, çekme mukavemeti, ve kayma mukavemeti 800 gr/m² de gözlemlenirken, en düşük değerler 300 gr/m² de gözlemlenmiştir.
- 2- 300 gr/m², 500 gr/m² ve 800 gr/m² lik kompozit levhalarda poisson oranları eşit çıkmıştır.
- 3-Kompozit levhaların yatak mukavemeti en küçük değerini bütün geometrilerde ve fiber oryantasyonlarında, W/D=2 ve E/D=1 iken almakta ve (E/D), (W/D) geometrik parametre oranları arttıkça yük taşıma kapasiteleri artmaktadır.
- 4-Yatak mukavemeti en düşük değeri W/D=2 ve E/D=1 geometrik parametre oranlarında aldığı için gerçek uygulamalarda tasarımcının bu oranlardan kaçınması gerekmektedir.
- 5- Deneyde elde edilen tüm veriler incelendiğinde yatak mukavemeti değerlerinin hemen hemen bütün plaka geometrilerinde E/D oranının 4 ve 4'ten büyük olduğu durumlarda maksimum değerlere ulaştığı görülmüştür.
- 6-Dairesel kesitli pim deneylerinde genellikle W/D=2 için, bütün E/D oranlarında net çeki hasar modu meydana gelirken, W/D oranının artmasıyla çeki hasar modundan kayma hasar moduna geçiş görülmektedir.
- 7-W/D oranından bağımsız olarak E/D' nin 1 olduğu geometrilerde genellikle kopma hasar modu gerçekleşmektedir. Genellikle E/D= 3, 4, 5 oranına sahip geometrilerde

ise hasar yükünün artmasıyla birlikte, en mukavemetli ve istenilen mod olan yatak hasar modu gerçekleşmektedir.

8-Yapılan deneyler sonucunda 300, 500 ve 800 gr/m² lik kompozit levhalardan en dayanıklısı 800 gr/m² lik dokuma kumaşa sahip olan kompozit plakadır. Bu üç levhadan maksimum gerilme değerleri en düşük çıkan plaka, 300 gr/m² lik dokuma kumaşa sahip olan kompozit plakadır.

KAYNAKLAR

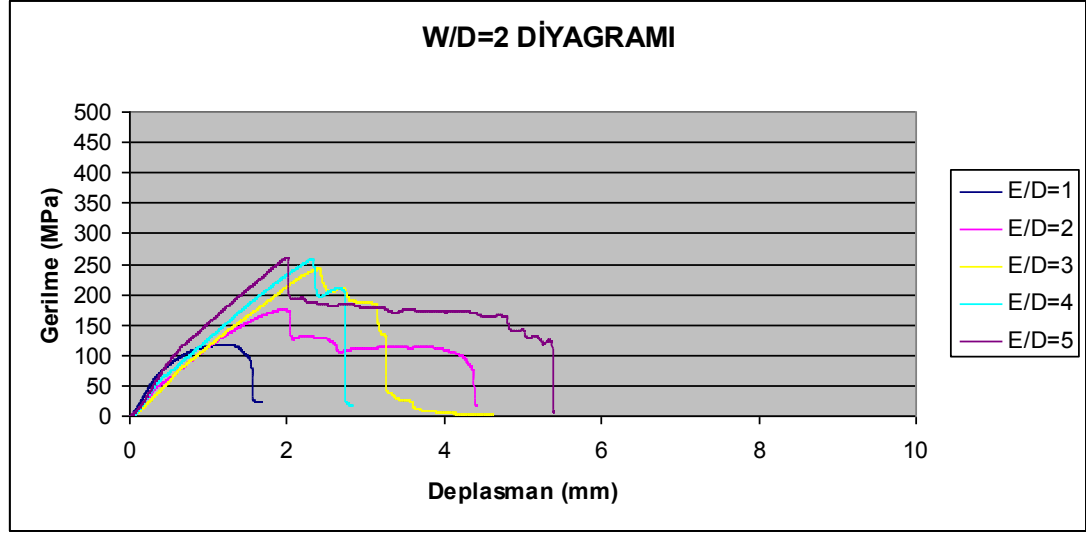
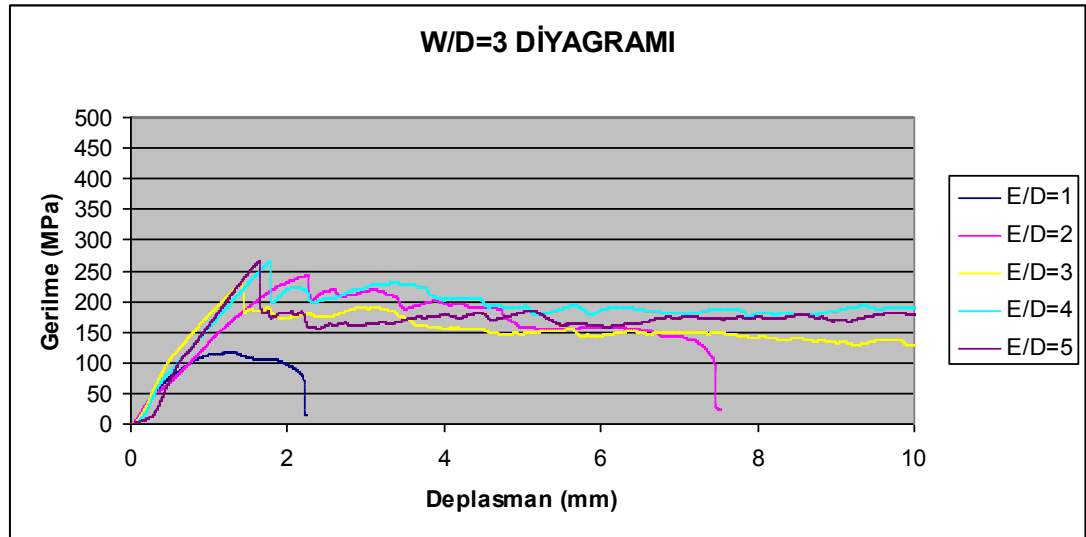
- Autor, K., (2006). *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis Group, 38-54.
- Broutman, J. ve Krock, R. H., (1967). *Modern Composite Materials*, Lawrence Addison-Wesley Publishing Company, 121-148.
- Camanho, P. P. ve Matthews, F. L., (1997). Stress Analysis and Strenght Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP: a Review, *Composites Part A*, 28, 529-547.
- Chang, F. K. ve Chang, K.Y., (1987). A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, *Journal of Composite Materials*, 21, 834-855.
- Chang, F. K. ve Chang, K.Y., (1987). Post- Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure, *Journal of Composite Materials*, 21, 809-833.
- Chang K. Y., Liu, S. ve Chang, F. K., (1991). Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Tensile Loadings, *Journal of Composite Materials*, 25, 274-301.
- Chawla, K. K., (1987). *Composite Materials Science and Engineering*, Springer Verlag Newyork Inc., 140-283.
- Ersoy, H. Y., (2001). *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayınları, No.66, İstanbul, 28-74.
- Fan W. X. ve Qiu, C. T., (1993). Load Distribution of Multi-Fastener Laminated Composite Joints, *International Journal of Solids and Structures*, 30 (21), 3013-23.

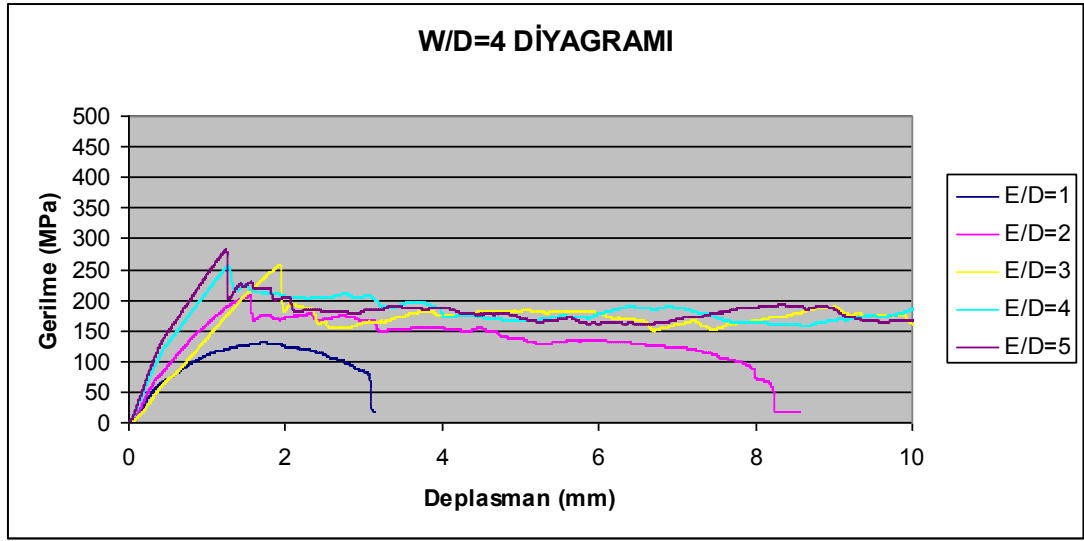
- Horrocks, A. R. ve Anond, S. C., (2000). *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing Limited, 25-28.
- İçten, B. M. ve Karakuzu, R., (2002). Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates, *Composite Science an Technology*, 62, 1259-1271.
- Kayrak, M. A., (1999). *Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri*, Eskişehir. 1-30.
- Kelly, G. ve Hallström, S., (2004). Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effect of bolt-hole clearance, *Composites : Part B*, 35, 331-343.
- Kim, S. J. ve Hwang, J. S., (1998). Progressive Failure Analysis of Pin-loaded Laminated Composites Using Penalty Finite Element Method, *AIAA Journal*, 36, 75-80.
- Lessard, L. B. ve Shokrieh, M. M., (1995). Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure, *Journal of Composite Materials*, 29 (5), 671-697.
- Okutan, B., Aslan, Z. ve Karakuzu, R., (2001). A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-elyaf reinforced epoxy laminate, *Composite Science and Technology*, 61, 1491-1497.
- Okutan, B., (2002). The effects of geometrical parameters on the failure strength for pin-loaded multi directional elyaf-glass reinforced epoxy laminate, *Composites Part B*, 33, 567-578.
- Rosato, D. ve Rosato, R., (2004). *Reinforced Plastics Handbook*, 3ed, Elsevier Science and Technology Boks, 28-35.
- Schwartz, M. M., (1984). *Compoosite Materials Handbook*, McGraw-Hill Inc., 1-26.

- Tan, Seng C., (1991). A progressive failure model for composite laminates containing openings, *Journal of Composite Materials*, 25, 556-577.
- Wang, H. S., Hung, C. L. ve Chang, F. K., (1996). Bearing failure of bolted composite joints part 1: experimental characterization, *Journal of Composite Materials*, 30, 1284-313.
- Whitworth, H. A., Othieno, M. ve Barton, O., (2004). Failure analysis of composite pin-loaded joints, *Composite Structures*, 59, 261-266.
- Yıldırım, B., (2005). *Dokuma Kumaş Mukavemetinin Hammadde Özelliklerinden Tahminlenmesini Sağlayan bir Bilgisayar Yazılımının Geliştirilmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Zhang, C., Ganesan, R. ve Suong V. H., (2000). Effects of Friction on Three-Dimensional Contact Stresses in Pin-loaded Laminated Composites, *Journal of Composite Materials*, 34 (16), 1382-1415.

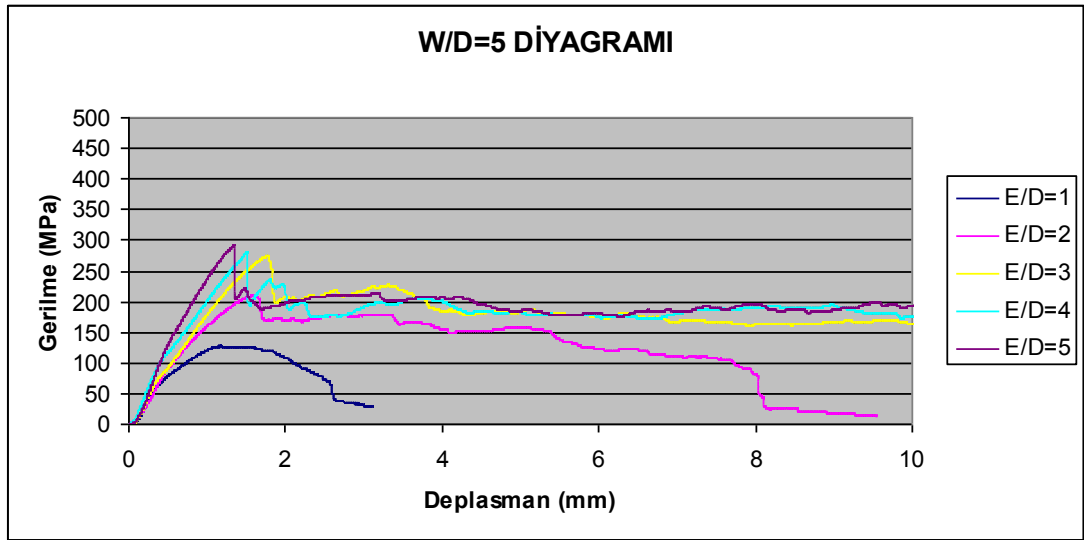
EKLER

EK A Kompozit Plakalar İçin Gerilme-Deplasman Grafikleri

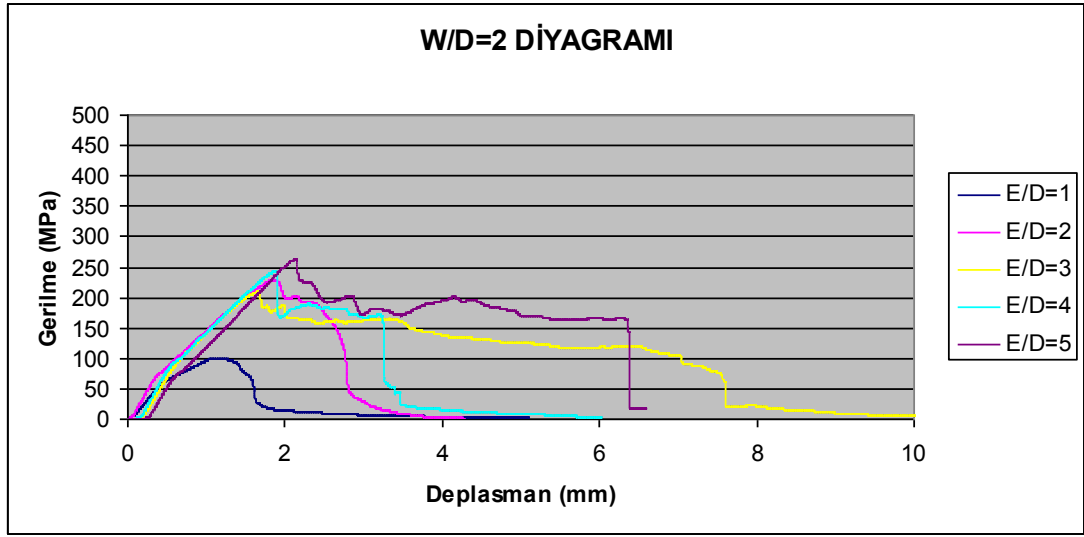
Şekil A.1 300 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=2)Şekil A.2 300 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=3)



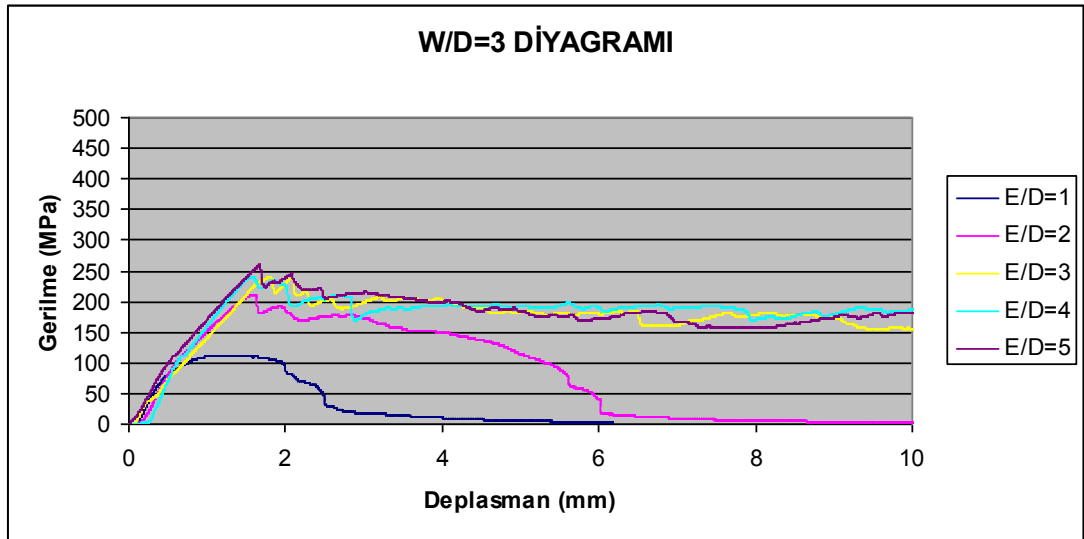
Şekil A.3 300 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=4)



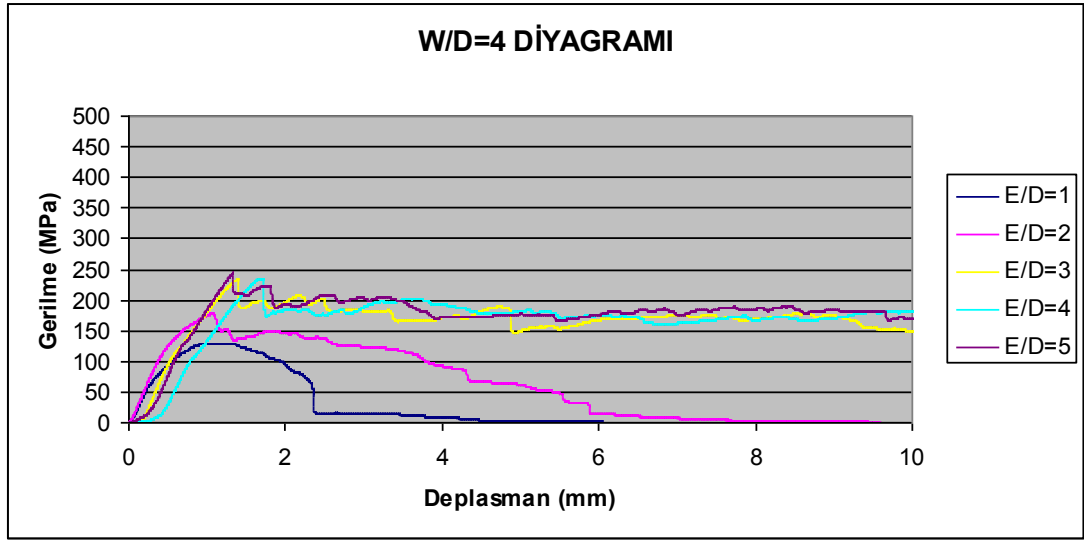
Şekil A.4 300 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=5)



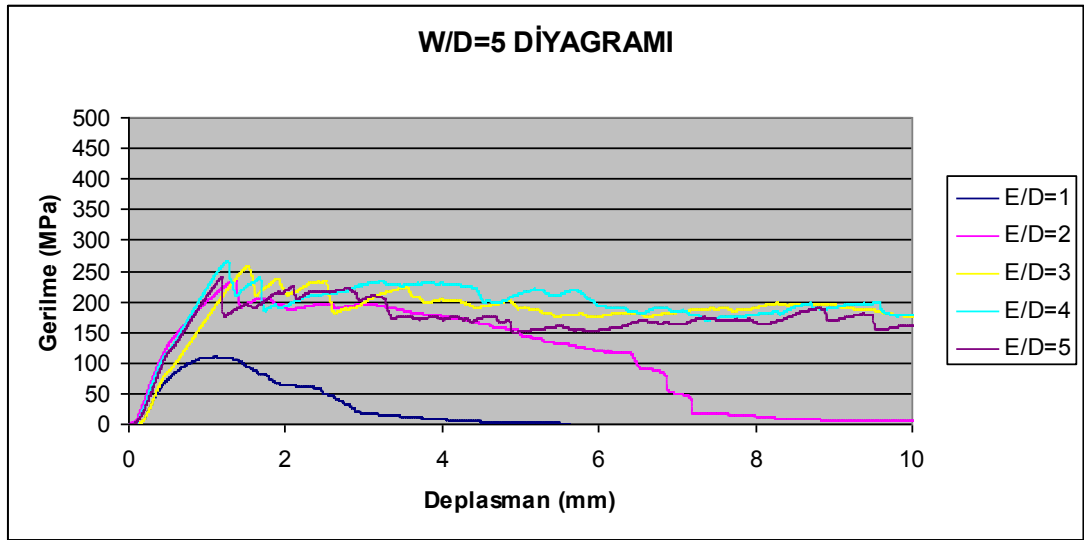
Şekil A.5 500 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=2)



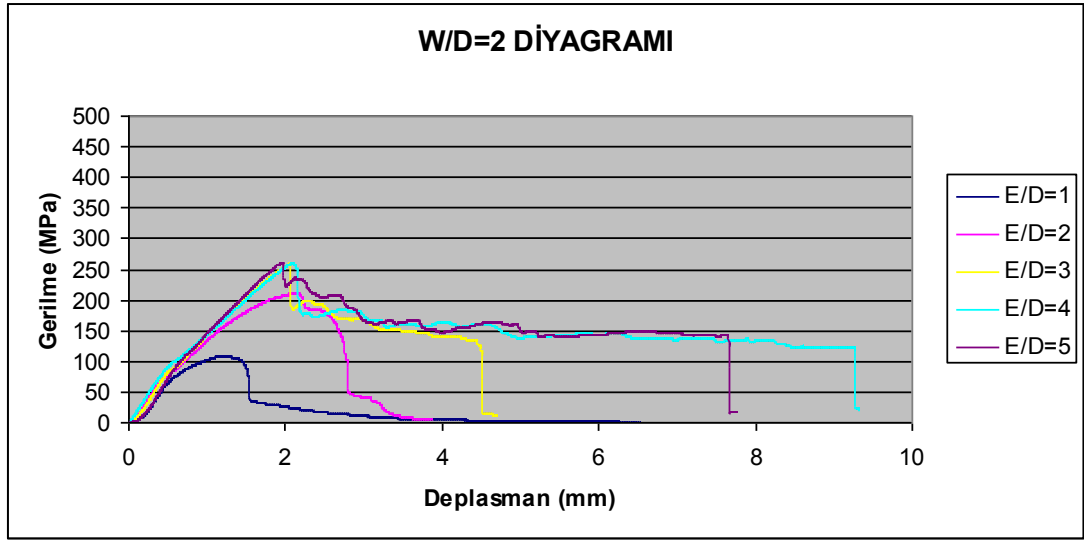
Şekil A.6 500 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=3)



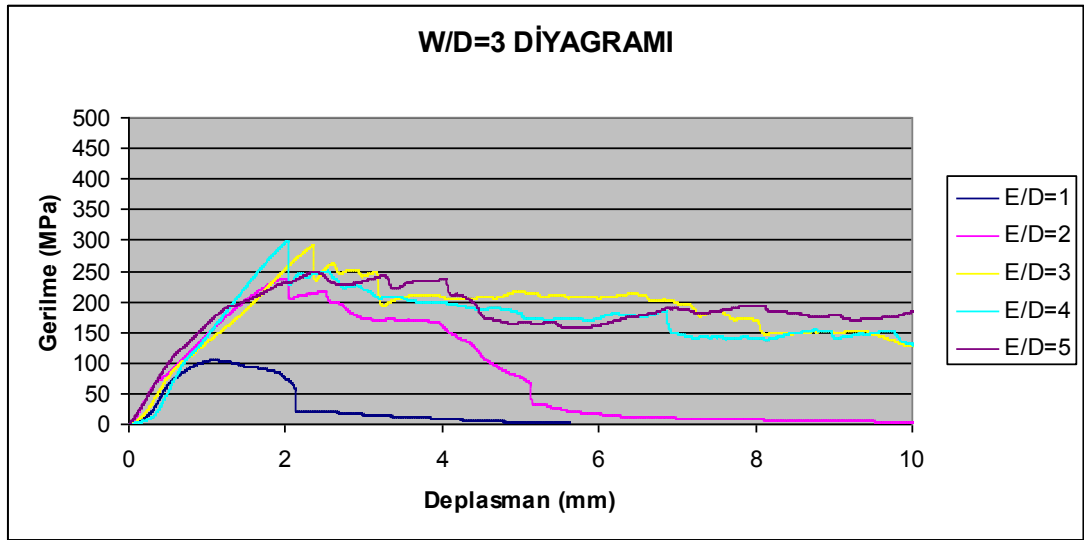
Şekil A.7 500 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=4)



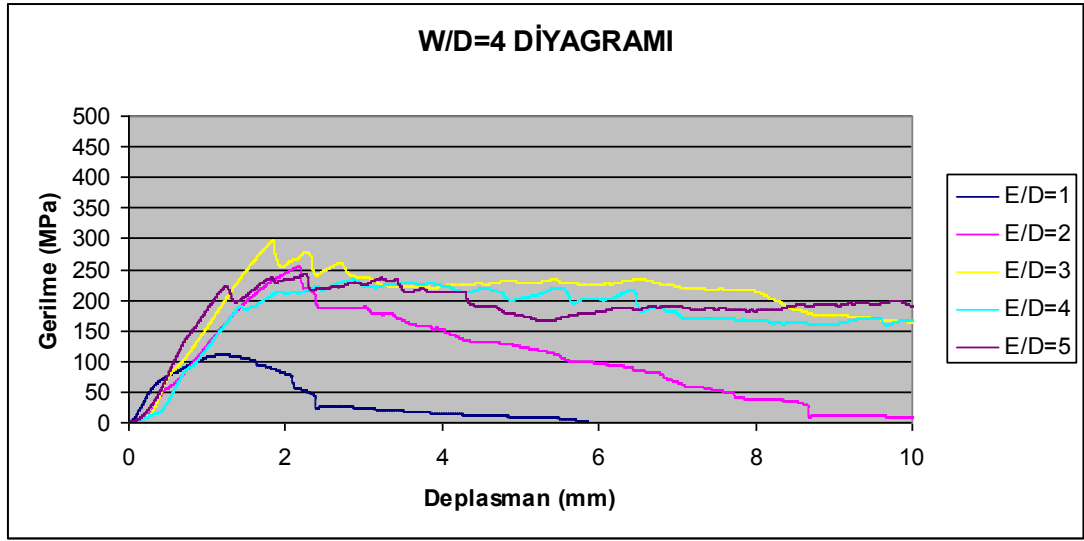
Şekil A.8 500 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=5)



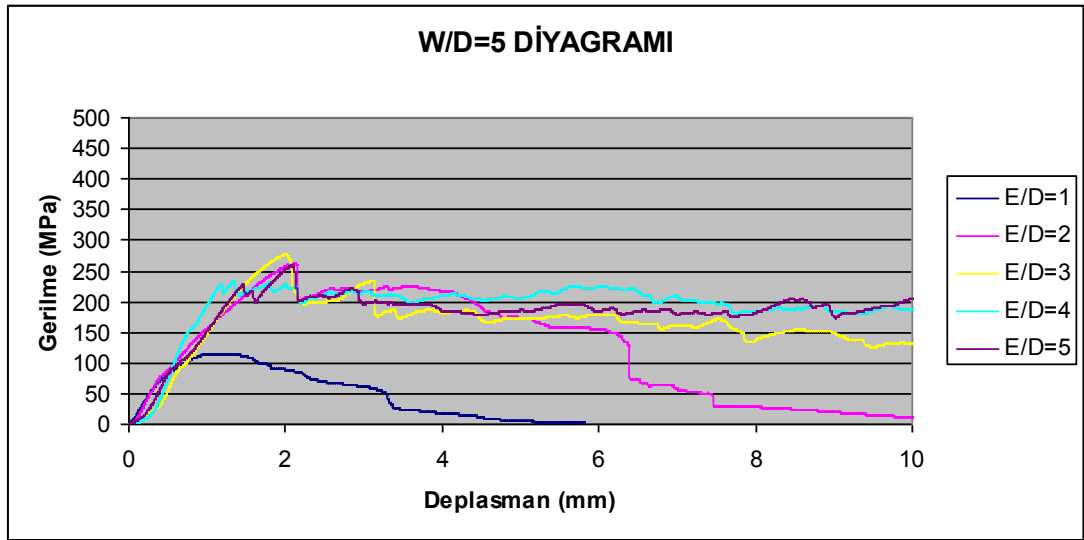
Şekil A.9 800 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=2)



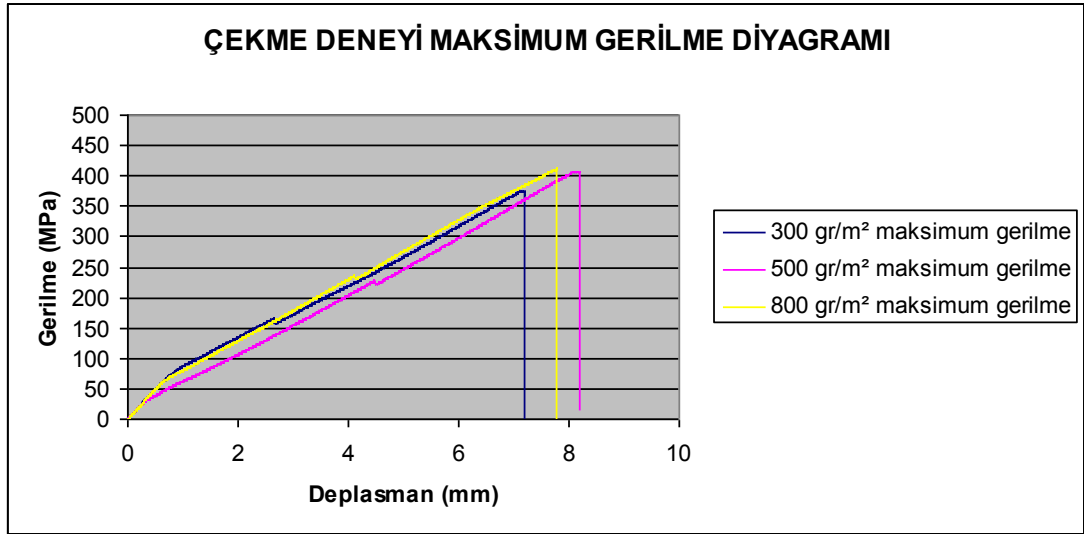
Şekil A.10 800 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=3)



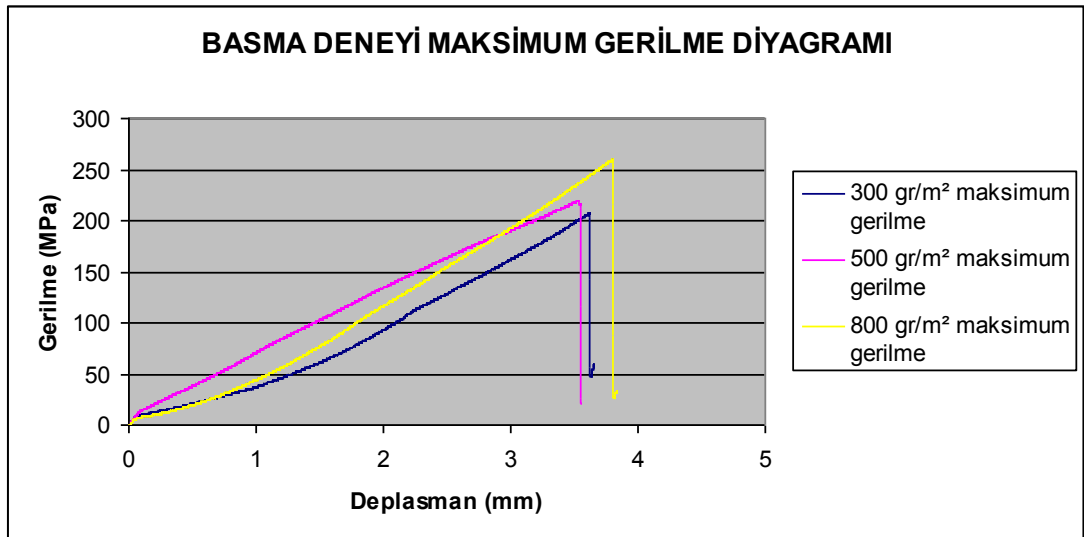
Şekil A.11 800 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=4)



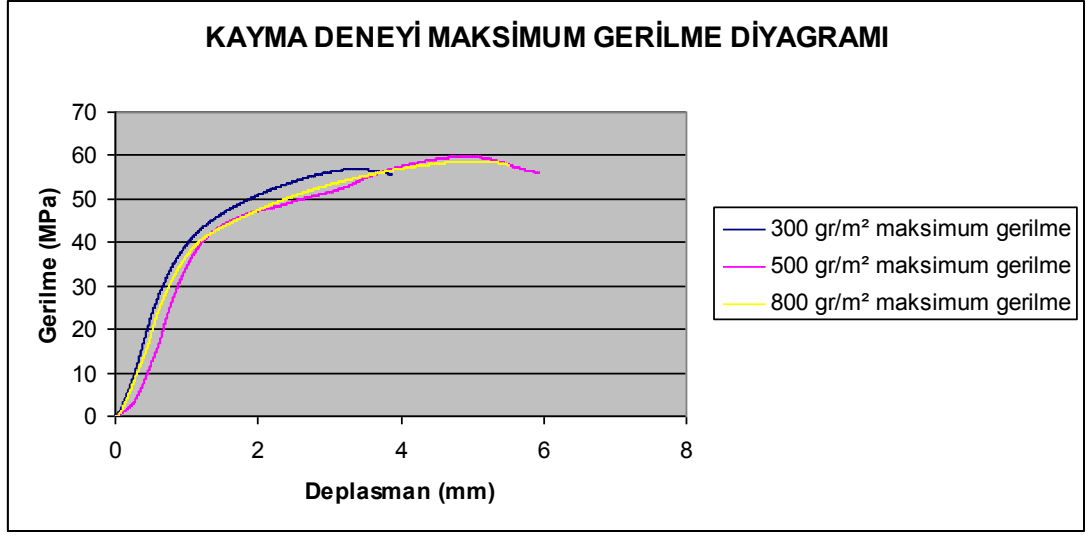
Şekil A.12 800 gr/m²'lik kompozit plakada gerilme-deplasman grafiği (W/D=5)



Şekil A.13 Çekme deneyi maksimum gerilme-deplasman grafiği gr/m²



Şekil A.14 Basma deneyi maksimum gerilme-deplasman grafiği



Şekil A,15 Kayma deneyi maksimum gerilme-deplasman grafiği