

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CIVATALI KOMPOZİT BAĞLANTILARDA
HASAR ANALİZİ

Önder ÇUBUKCUOĞLU

Ağustos, 2005

İZMİR

CIVATALI KOMPOZİT BAĞLANTILARDA HASAR ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon İmalat Programı

Önder ÇUBUKCUOĞLU

Ağustos, 2005

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÖNDER ÇUBUKCUOĞLU, tarafından **Yrd. Doç. Dr. MELİH BELEVİ** yönetiminde hazırlanan “**CIVATALI KOMPOZİT BAĞLANTILARDA HASAR ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yrd. Doç. Dr. MELİH BELEVİ

Danışman

.....
Prof. Dr. RAMAZAN KARAKUZU

Jüri Üyesi

.....
Yrd. Doç. Dr. HASAN YILDIZ

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, bana her türlü desteği sağlayan, görüşlerinden ve fikirlerinden sürekli yararlandığım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Melih BELEVİ'ye, bu süreçte her konuda görüşlerinden faydalandığım sayın hocam Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU'ya, yardımlarını deneysel çalışmam boyunca esirgemeyen, Arş. Gör. Bülent Murat İÇTEN'e, Arş. Gör. Yusuf ARMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da benim bu günlere gelmemde büyük emeği olan, beni sürekli destekleyen ve yanımda olan, maddi manevi desteği esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Önder ÇUBUKCUOĞLU

CIVATALI KOMPOZİT BAĞLANTILARDA HASAR ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, üzerine ön gerilme uygulanan cıvata tarafından zorlanan 0^0 - 90^0 fiber yönlendirme açısına sahip örgülü plakalardaki hasar yükünün ve hasar modunu araştırmaktır. Buna ek olarak ön gerilmelerin ve rondelanında plaka üzerine etkisi de incelenmiştir. Hasar analizi deneysel olarak yapılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde konu hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümünde kompozit malzemelerin genel özelliklerinden bahsedilmiş, kompozit malzemeler sınıflandırılmış ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde kompozit malzemeyi oluşturan genel elemanlar ve türlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise deneysel çalışma anlatılmış ve yorumlar yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Kompozit, Hasar Analizi, Ön Gerilme, Cıvata

FAILURE ANALYSIS OF BOLTED COMPOSITE JOINTS

ABSTRACT

The aim of this study is to find out the failure loads and the failure modes of the woven composite plates, having 0^0 - 90^0 fiber orientation angles, and which have been loaded by the bolt, preload applied. In addition to this, the effects of the preload and the washer are examined. The failure analysis is performed experimentally.

In the first part of this study, general information about the objective is given. In the second part, general properties of composite materials are mentioned, they are classified and the explanation is made that where they are used.

In the third part general elements and kinds are examined which form composite materials. In the fourth part experimental study is mentioned and discussed. In the last part the results are given.

Keywords : Composite, Failure Analysis, Preload, Bolt

İÇİNDEKİLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
2.1 Tanım.....	7
2.2 Kompozit Teknolojisinin Gelişimi	7
2.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	8
2.3.1 Yüksek Mukavemet.....	9
2.3.2 Kolay Şekillendirme	9
2.3.3 Elektriksel Özellikler	9
2.3.4 Isıya ve Ateşe Dayanıklılık.....	9
2.3.5 Titreşim Sönümlendirme	9
2.3.6 Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet.....	10
2.3.7 Kalıcı Renklendirme.....	10
2.4 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	10
2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	11
2.5.1 Ev Aletleri.....	11
2.5.2 Elektrik ve Elektronik Sanayi.....	11
2.5.3 Havacılık Sanayi.....	12
2.5.4 Otomotiv Sanayi.....	12
2.5.5 İş Makinaları.....	13
2.5.6 Tarım Sektörü.....	13
2.5.7 İnşaat Sektörü	13
2.5.8 Taşımacılık Sektörü.....	13
2.5.9 Şehircilik.....	14
2.5.10 Mobilya Sanayi.....	14

2.6 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
2.6.1 Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre	14
2.6.1.1 Plastik – Plastik Kompozitler	14
2.6.1.2 Plastik – Metal Fiber Kompozitler	15
2.6.1.3 Plastik – Cam Elyaf Kompozitler	16
2.6.1.4 Plastik – Köpük Kompozitler	16
2.6.1.5 Metal Matrisli Kompozitler	16
2.6.1.6 Seramik Kompozitler	17
2.6.2 Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre	17
2.6.2.1 Partikül Esaslı Kompozitler	17
2.6.2.2 Lamel Esaslı Kompozitler	18
2.6.2.3 Fiber Esaslı Kompozitler	18
2.6.2.4 Dolgu Kompozitler	20
2.6.2.5 Tabaka Yapılı Kompozitler	20
BÖLÜM ÜÇ – ELYAF TÜRLERİ ve MATRİS MALZEMELERİ	21
3.1 Elyaf Türleri	21
3.1.1 Cam Elyaflar	21
3.1.2 Bor Elyaflar	23
3.1.3 Silisyum Karbür Elyaflar	23
3.1.4 Alümina Elyaflar	24
3.1.5 Grafit (Karbon) Elyaflar	24
3.1.6 Aramid Elyaflar	25
3.2 Matris Malzemeleri	25
3.2.1 Epoksi Reçine Matrisler	27
3.2.1.1 Epoksilerin Avantajları	27
3.2.1.2 Epoksilerin Dezavantajları	28
3.2.2 Polyester Reçine Matrisler	28
3.2.2.1 Polyester Reçinelerin Avantajları	28
3.2.2.2 Polyester Reçinelerin Dezavantajları	28
3.2.3 Vinilester Reçine Matrisler	29
3.2.4 Fenolik Reçine Matrisler	29

3.2.5 Metal Matrisler	29
BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMA.....	31
4.1 Deney Numuneleri	31
4.2 Deneysel Çalışma	33
4.3 Deney Sonuçları	39
4.3.1 t=1mm Kalınlığındaki Numunelerden Elde Edilen Deney Sonuçları	45
4.3.1.1 Ön Gerilme Değişiminin, Rondela Çapı Değişiminin t=1mm Kalınlığındaki Deney Numunelerinde Yuva Hasarına Etkisi	51
4.3.2 t=2mm Kalınlığındaki Numunelerden Elde Edilen Deney Sonuçları	56
4.3.2.1 Ön Gerilme Değişiminin, Rondela Çapı Değişiminin t=2mm Kalınlığındaki Deney Numunelerinde Yuva Hasarına Etkisi	62
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	68
KAYNAKLAR.....	74

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren tekniğin hızla gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Fakat yeryüzünde ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojinin gelişimine ayak uyduramamıştır. Uzay araçlarının yapımına geçilen geçen asırda, bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte mevcut malzemelerin özelliklerinden, bilimin gelişmesi paralelinde günün şartlarına uyacak şekilde gerek ekonomik gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler imal etme yolunu seçmişlerdir.

Dolayısıyla hem ekonomik hem daha yüksek mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin oluşturulması için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece malzemeyi teşkil eden bileşenlerin, özellikleri farklı olan kombinasyonlarının verdikleri, kompozit malzemeler, büyük bir önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler örneklerini tabiattan almış olup, çok uzun bir kullanım tarihine sahiptirler. Başlangıçları hakkında kesin bir şey bilinmemekle beraber, çok eski yıllardan beri kullanılmaktadırlar. Tabiatta bulunan kompozit yapıya en iyi örnek çam ağacıdır. Çam ağacının gövdesi bir kompozit yapı göstermektedir.

Gövde içinde yaz ve kış mevsimlerinde meydana gelmiş olan yaş halkaları içi içe bir görünümde dir. Kış halkaları sert fakat kırılğan, yaz halkaları ise yumuşak fakat esnektir. Bu özellik çam ağacının benzeri bir yapıya sahip olmayan kavak ve kayın gibi ağaçlara kıyasla daha sağlam olmasını sağlar. Ülkemizin kırsal bölgelerinde, yapı malzemesi olarak saman çöpleri ile takviye edilmiş olan kerpiçler kompozit malzemelerin en ilkel özellikte olanlarındandır. Bugün kullanılan kompozitler ise cam fiber reçine (polyester), tungsten, molibden takviyeli alüminyum, karbon ve çelik fiber takviyeli plastiklerdir. Bunlar genellikle plastik - plastik, plastik - dolgu maddesi, plastik - cam elyaf, plastik - metal fiber, metal matrisli kompozitler, seramikler olarak sınıflandırılırlar.

Son zamanlarda yüksek mukavemet / ağırlık, katılık / ağırlık oranlarına sahip olan fiber takviyeli reçine kompozitleri, uçak ve uzay taşıtları gibi ağırlığa hassas uygulamalarda önemli kullanım sahaları bulmuşlardır. Düne kadar saçtan tahtadan yapılan tekneler, yatlar yerlerini artık polyester - cam elyaftan yapılan benzerlerine bırakıyorlar. Bakım onarım bakımından daha avantajlı olan kompozit malzemeden yapılan tekneler aynı zamanda daha hafif uzun ömürlü ve süratli olmaları bakımından tercih edilmektedirler. İmalat sanayisinde artık birçok parça kompozit malzemeden yapılmaktadır.

Kompozit malzemeler üzerine bir çok araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların bazıları kompozit malzemelerin bağlantı noktalarındaki hasarları inceleyen araştırmalardır. Yüksek lisans tezimde civata bağlantılı kompozit malzemelerin hasar türleri araştırılmıştır. Literatürde pim bağlantılı kompozit malzemelere daha çok rastlanmaktadır. Yapılan bazı araştırmaları tezim öncesi inceledim ve daha sonra kendi tezim için bu araştırmalardan faydalandım.

Bağlantı yeri hasarı oluşana kadar yuva gerilmesi - pim yer değiştirmesi eğrisini tahmini için pim üzerinden yüklenmiş kompozit tabakaların aşamalı olarak hasar analizleri yapılan bir araştırmayı inceledim. Çalışmanın amacı; hasar kriterlerinin etkisini, non-lineer kayma davranışının mukavemet tahminleri üzerindeki etkisini, ve yük-pim yer değiştirme eğrisinin etkisini belirlemektir. Yapılan deneylerden şu sonuçlara varılmıştır. Fiber hasarı için maksimum gerilme kriterini kullanmak, kayma gerilmesi - şekil değiştirme ilişkisi lineer vaziyetteyken, Hashin kriterinden daha da yüksek ve gerçekçi mukavemet bulunmasına neden olur. Non-lineer kayma gerilmesi - uzama miktarı ilişkisini göz önüne alırsak farklı hasar analizlerinin tahminleri aynı noktada birleşme eğilimi gösterirler. Yarı-isotropik $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ tabakaları için karışık hasar kriteri kullanılırken non-lineer kayma hareketinin dahiliyeti küçük bir fark meydana getirirken ; $[(0/90)_6]_s$ ve $[(\pm 45)_6]_s$ tabakaları için ise mukavemet tahmininde büyük bir artışa sebep olur. Geliştirilmiş modelin kullanılmasıyla tahmin edilen hasar mukavemetleri deneysel verilerin %1 - %15 'ini kapsar.(Dano, Gendron ve Picard, 2000)

Pim ile yüklenmiş kompozit malzemenin yük altında nasıl bir hata dayanımı göstereceği ve hangi hata şekillerine maruz kalacağı araştırılan bir çalışmayı inceledim. Burada hata yükleri ve hata şekilleri hem nümerik hem de standart numunelerle deneysel olarak incelenmiştir. Hata analizlerinde Hoffman ve Hashin hata kriterleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada fiber yapı örgü biçimde standart olarak üretilmekte olup, bu örgü halindeki karbon epoksi içersine rasgele yerleştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bu araştırmada; W/D oranı 2,3,4,5, E/D oranı 1,2,3,4,5 ve Θ açısı ise 0° , 15° , 30° , 45° değerlerini almaktadır ve bu doğrultuda deneyler ve nümerik işlemler yapılmıştır. Bu araştırmadan şu sonuçlara varılmıştır. Yatak dayanımı direkt olarak geometrik parametreler bağlıdır. Yani, E/D ve W/D oranları arttıkça yatak dayanımı en üst değerine ulaşmaktadır. E/D oranı 4 ve 5 olduğu zaman, yatak dayanımı hemen hemen aynı değeri almakta ve hata olabileceğinin en iyisi olmaktadır. Fakat E/D oranı 1 olduğu zaman, yatak dayanımı en düşük değerini alır ve parça Şekil 7' de görülen çeki veya kayma hatasına maruz kalmaktadır. W/D oranı 2 olduğu zaman genelde çeki hatası, W/D oranı arttığı zaman ise hata kayma veya yatak hatası halini almaktadır. Ayrıca yatak dayanımı 0° katman yönlü malzemede en üst değerin alırken 45° katman yönlü malzemede en alt değerini almaktadır. Yani diğer bir deyişle, katman yön açısı arttıkça yatak dayanımında düşüş görülmektedir.(İçten, Karakuzu, 2002)

Cıvata deliği açıklığının, kompozit cıvata bağlantılarının rijitliği ve mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılan bir çalışma incelenmiştir. Çalışılmış olan konfigürasyon, tek bindirme ve tek cıvatalı bir konfigürasyondur. Değişik boyutlarda rayba kullanılarak dört farklı delik açıklığı tespit edilmiştir; bu açıklıklar tam geçme ile $240\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Numuneler, ASTM standardı D5961/D5961 M-96 ya uygun olarak grafit/epoksi HTA/6376 dan yarı-izotropik ve 0 hatalı tabakalar (lay-ups) olarak üretilmiştir. Hem cıvata başı dışarıda kalan altı köşe başlı hem de gömme başlı cıvatalar kullanılmış; iki farklı moment seviyesi uygulanmıştır. Numune çapları; yuvada birincil hasar türünün elde edilmesi için seçilmiştir. Cıvata birleşim rijitliği, yuva mukavemetindeki %2 lik sapma, en son yuva mukavemeti ve en son yuva gerinimi standarda göre elde edilmiştir. Ayrıca, sapma metodu üzerinde bazı avantajlara sahip olan alternatif bir mukavemet tanımlaması çıkarılmış ve

bulgular da bu tanımlamaya göre değerlendirilmiştir. Test edilen tüm konfigürasyonlarda civata deliği açıklığı artışının, bağlantı rijitliğinin azalması ve son gerinim değerlerinin artmasına bağlı olduğu saptanmıştır. Elle sıkma metodu ile birleştirilmiş olan altı köşe başlı civatalar, civata deliği açıklığı ve mukavemet arasında bir ilişki ortaya koymuştur. Ancak gömme başlı civatalar ve momentli bağlantılarda bu durum gözlenmemiştir.(McCarthy, Lawlor, Stanley, McCarthy, 2002)

Geometrik parametrelerin tek pim bağlantılı ve çok yönlü cam fiber ile güçlendirilmiş epoksiden elde edilmiş numunenin hata dayanımı üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada [0/90/0] , [90/0/90] katman yönlü ve tek pim bağlantılı kompozit malzemeler kullanılmıştır. İlk önce ASTM standartlarına uygun numune ile malzemenin mekanik özellikleri ve dayanımları bulunmuştur. Daha sonra ise nümerik ve deneysel olarak inceleme yapıp karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler ve nümerik çalışmalardan sonra şu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada da görüldüğü gibi tek delikli numunelerde net çeki dayanımı katman yönlerine bağlıdır. Tek delikli bağlantının kayma performansına bakıldığı zaman, kayma dayanımının katman yönlerine ve E mesafesine bağlı olduğu görülür. [90/0/90] için deneysel sonuçlara bakıldığı zaman, W/D oranının 2 ve 3 olduğu durumlarda kritik E/D oranı 4 ve W/D oranının 4 olduğu durumlarda ise kritik E/D oranının 2 olduğu görülmektedir.(Okutan 2002)

Pim bağlantılı kompozit malzemenin dayanımını inceleyen bir araştırmada, kompozit malzeme bileşenleri olarak E – camı ve epoksi kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı katman yönünde ([0,±45], [90,±45]) 20 farklı geometri kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; [0,±45] katman yönlerine sahip numunenin yatak dayanımının [90,±45] katman yönlerine sahip numuneden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. W/D oranının azaldıkça pim yataklarındaki dayanımında azaldığı görülmektedir. Aynı sonuç E/D oranı için de geçerlidir. [90,±45] için maksimum dayanım, E/D oranının 3 veya 3' ten büyük ve W/D oranının da 4 veya 4' ten büyük olduğu durumlarda görülmektedir. [0,±45] için maksimum dayanım ise, E/D ve W/D oranlarının 3 olduğu durumdur. Bu araştırmada, tek delikli numunenin net gerilim dayanımının

katman yönlerine ve numunenin genişliğine bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, W/D oranındaki değişikliğin doğurduğu etkiler $[0, \pm 45]$ katman yönlü numunede daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Tek delikli bağlantının kayma dayanımının, E/D oranına bağlı olarak katman yönlerine bağlı olduğu görülmüştür. Buna bir örnek olarak, $[0, \pm 45]$ için E/D oranının artırılması ile maksimum kayma gerilimi %50 kadar azaltılabilmektedir. Fakat $[90, \pm 45]$ için ise, E/D oranındaki değişiklikler dayanımda yaklaşık %66 kadar kayba yol açmaktadır.(Okutan, Karakuzu, 2003)

Pim üzerinden yüklemeli kompozit bağlantı elemanlarında hasar analizini araştıran bir çalışma incelendi. Yapılan analiz sonucunda, bir güç fonksiyonu bağlantısı, çekideki karakteristik uzamayı delik ölçüsünün bir fonksiyonu olarak yeterlilikle verebildiği görülmüş. Ayrıca deneylerle elde edilen verilerle kabul edilen veriler arasında iyi bir uyum gözlemlenmiş. İlaveten, çeki ve basıdaki boyut belirleme metodunun, analiz ve grafit-epoksi laminantlardan yapılmış bağlantılar için olan deneysel yuva gerilmeleri arasındaki makul uyumun olduğu yerdeki bağlantı gerilimi tahminini yeterlilikle yaptığı kanıtlanmış.(Whitworth, Othieno, Barton, 2003)

Kumaş şeklinde dokunmuş karbon elyafla güçlendirilmiş plastik levhalardaki mekanik olarak tutturulmuş eklemlerin yuva mukavemetleri, deneysel ve nümerik olarak araştırılmış olan bir çalışma incelendi. Bu çalışmada levha ardışık yığınlarının ve geometrisinin yuva dayanımı üzerindeki etkileri ve buna ek olarak kopma yükü ve %4 delik deformasyonu ile birincil civata-delik boşluğunun yuva dayanımı üzerindeki etkileri deneysel olarak saptanmıştır. Civata-delik boşluğunun bir sonucu olarak mengene ile sıkıştırılmış ve pim yüklü levhalarda %4'lük delik deformasyonundaki yuva dayanımında önemli bir azalma bulunmuştur. Sonuç olarak; mekaniksel olarak tutturulmuş eklemler söz konusu olduğunda civata deliği boşluğunun etkileri göz önünde bulundurulmalıdır kanısına varılmıştır.(Kelly, Hallstörn, 2004)

Karbon epoksi levha yuvalarının statik ve dinamik yük altındaki mukavemetini araştıran bir çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$

ardışık yığılı karbon epoksi laminatları üzerindeki statik ve dinamik mukavemet davranışlarını incelemek için pim-bağlantı deneyleri yapılmıştır. Test sırasında en iyi geometriyi elde etmek için kenar uzunluğunun pim çapına oranı E/D ve numune genişliğinin pim çapına oranı W/D sistematik olarak değiştirilmiştir. Sonuç olarak dayanıklılık açısından $[90/45/-45/0]_s$ sırası $[0/45/-45/90]_s$ sırasına göre %12 ye kadar daha güçlü olduğu bulunmuş. Buna ek olarak, en iyi geometri $E/D \geq 4$ ve $W/D \geq 4$ te edildi ve iki dizilimde en üst yuva mukavemetlerini bu oranlarda göstermişler. Tüm E/D ve W/D ve yığın dizilimleri karşılığında E/D ve W/D oranları artarken yorulma dayanımı, Statik dayanımın %63 üne kadar azalma göstermiş. $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$ yığınları için yorulma dayanma limiti, E/D ve W/D oranları artarken , azalma göstermiş. Buna rağmen her iki sıralı yığında aşağı yukarı aynı dayanıklılık sınırını vermiş.(Akkuş, 2005)

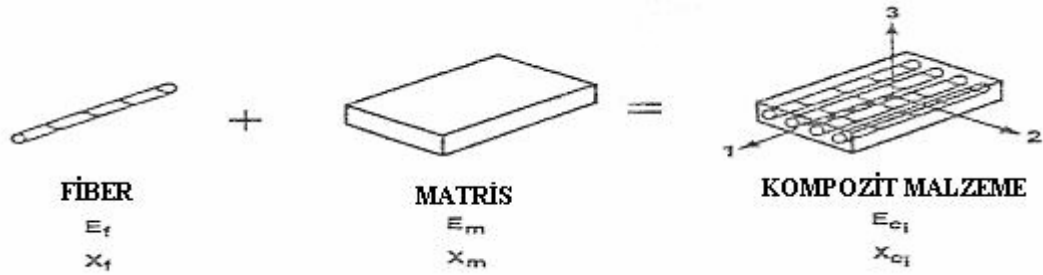
BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Tanım

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı özelliklerdeki iki yada daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemelere *Kompozit Malzemeler* denir.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunur. Bu iki malzeme grubundan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da, fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylelikle fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olunur.



Şekil 2.1 Kompozit malzemenin temel şekli

2.2 Kompozit Teknolojisinin Gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit

malzeme örneklerindedir. Sonraları taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme kullanılmıştır. Otoyollar, asfalt ve çakıl taşı karışımı ile daha lineer, dayanımlı hale gelmiştir.

Teknoloji gelişimine paralel olarak elektrik enerjisi naklinde kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İyi bir iletken olan bakır fiberler ile hafif metal olan alüminyum matris kullanılarak, enerji nakli daha verimli hale getirilmiştir.

Selüloz ve reçineden oluşan kağıt ise, yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak bilimin ve insanlığın hizmetine sunulmuştur. Deri ve bez parçalarından sonra kullanıma giren kağıt, bilimsel çalışmaların, sanatsal olayların, hatta toplumsal kültürlerin belgelenmesinde ve gelecek nesillere ulaştırılmasında en önemli araç olmuştur. Kompozitler her çağda geniş kullanım alanı bulmuş ve geliştirilmişlerdir.

2.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre önem kazanmaları, bunların değişik uygulamalarda belirgin özelliklere sahip olmasından ileri gelir. Bunlar; çekme, basma, eğilme, akma, sürünme, yorulma mukavemeti, sertlik, tokluk, rijitlik, aşınma direnci gibi mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik / yalıtkanlık, magnetik özellikler, yoğunluk vb. fiziksel özelliklerle, kararlılık, korozyon direnci gibi kimyasal özelliklerdir. Malzeme seçimi ve dizaynından önem kazanan ve değişik tekniklerle ölçülebilen bu özelliklerin yanında, malzemenin birim maliyeti, gereksinilen tonaj, kolay bulunabilirlik, işlenebilme ve şekillendirebilme gibi diğer faktörler de mühendis ve işletmecilerin her zaman göz önünde bulundurdukları faktörlerdir.

Uygulamada pek çok durumda elimizdeki malzemenin yukarıda ileri sürdüğümüz özelliklerin çoğuna sahip olmasını bekleriz. Kompozit malzemelerin avantajlı özelliklerini aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz.

2.3.1 Yüksek Mukavemet

Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve istenen bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilir.

2.3.2 Kolay Şekillendirme

Büyük ve kompleks parçalar, tek işlemle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

2.3.3 Elektriksel Özellikler

Uygun malzemelerin seçilmesiyle, çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir.

2.3.4 Isıya ve Ateşe Dayanıklılık

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özellikleri, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

2.3.5 Titreşim Sönümlendirme

Kompozit malzemelerin, süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve darbe şoklarını yutabilme özellikleri vardır ve bu özellikleri metallere göre önemli ölçüde fazladır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

2.3.6 Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet

Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler, kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörleri, tekne ve deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır.

2.3.7 Kalıcı Renklendirme

Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

Teknolojinin gelişmesiyle beraber yeni uygulama alanlarında gittikçe daha kompleks malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı uygulamalarda, malzemenin yüksek bir sertliği yanı sıra yüksek tokluk özelliğine de sahip olması ve darbe enerjilerini absorbe etmesi istenebilir. Klasik mühendislik malzemelerinde (metal ve metal alaşımları) bu özelliklerin birlikte kazanılması oldukça zordur. İşte yüksek sertlikteki malzemelerle, yumuşak, sünek malzemelerin kompozit şeklinde tasarımları bu tür uygulamalar için bir çözüm yolu olmaktadır.

2.4 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin mantığı gereği, bir tür malzemenin olumsuz özellikleri mevcutsa bu özellik mevcut kompozit malzemeye yansır. Örneğin kompoziti oluşturan matris organik çözücülere karşı dayanıksız ise, onun oluşturduğu kompozite de bu olumsuzluk yansır. Dolayısıyla bu kompozit malzemelerin, organik çözücülerin bol miktarda bulunduğu ortamda kullanılmaması gerekir. Aynı mantık, sıcaklık, nem v.s gibi kimyasal etkiler açısından da yürütülebilir.

Kompozit malzemelerde şu tür dezavantajlar görülmektedir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri, malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkiler.

- Kompozit malzemeler, değişik doğrultularda, değişik özellikler gösterirler.
- Çekme, basma, kesme operasyonları uygulanan aynı kompozit numunelerin liflerinde açılma meydana geldiğinden, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- İyi tanımlanmamış tasarım parametreleri varsa, bundan dolayı ham malzeme açısından en yüksek imalat verimliliğine ulaşılabilmesi bir dezavantajdır.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlara rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından, deniz teknelerine, kimyasal madde depolama tanklarına, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar bir çok sanayi kolunda problemleri çözümlenebilirler.

2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin kullanım alanları çok geniş boyutlara ulaşmıştır. Ülkemizde henüz çoğu yetersiz olan bu alanların başlıcaları ve kompozit malzeme kullanımı ile sağlanan avantajları şu şekilde sıralanabilir.

2.5.1 Ev Aletleri

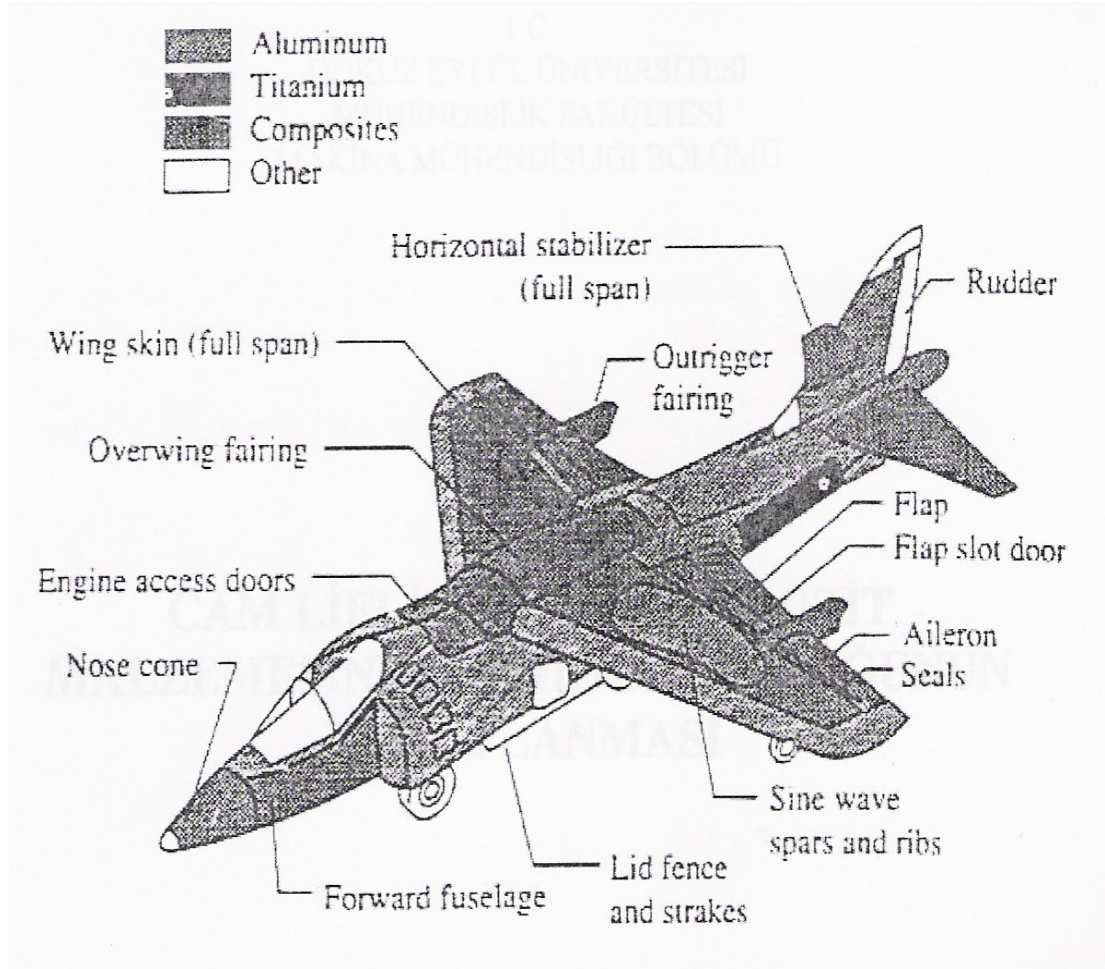
Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde, komple ve karmaşık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlanmaktadır .

2.5.2 Elektrik ve Elektronik Sanayi

Kompozitler, elektronik, elektroteknik ve elektrik sanayinde de amaca uygun özellikleri ve taşıdığı üstün nitelikler nedeniyle (başta elektriksel izolasyon olmak üzere) her türlü elektrik ve elektronik malzemelerin yapımında, üretim malzemesi olarak kullanılırlar.

2.5.3 Havacılık Sanayi

Havacılık sanayinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu (Şekil 2.2), helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.2 Kompozitlerin uçak gövdesindeki kullanım yerleri

2.5.4 Otomotiv Sanayi

Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler, otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir. Böylelikle üretici, seri üretim, düşük yatırım, kolay ve ucuz model değiştirme imkanlarına, kullanıcı da yüksek mekanik dayanım, ucuz ve kolay onarım imkanlarına sahip olur.

2.5.5 İş Makinaları

İş makinalarının koruma kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler başarıyla kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olabilmektedir.

2.5.6 Tarım Sektörü

Kompozitler tarım sektöründe, sera, ilaçlama depoları, tahıl depolama siloları, drenaj suyu boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır. Burada üreticiye, seri üretim imkanları, kolay montaj, düşük yatırım imkanı, düşük kalıp maliyeti, kapasitenin tam kullanılabilmesi gibi avantajlar sağlar. Kullanıcı isterse bu malzemeye ışık geçirgenlik, korozyona dayanıklılık, tabiat şartlarına dayanıklılık ve yüksek mekanik dayanım sağlanabilir.

2.5.7 İnşaat Sektörü

Bu sektörde kompozitler önemli kullanım alanına sahiptir. Cephe kaplamaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları, ondüle levhalar birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Üreticiye, tasarım esnekliği ve kolaylığı, ucuz izolasyon, hafiflik, montajda ve nakliyede kolaylık gibi imkanlar sağlar. Kullanıcıya da hafiflik bakım giderlerinin en aza inmesi, izolasyon problemlerine çözüm ve yüksek mekanik dayanımı gibi faydalar sağlar.

2.5.8 Taşımacılık Sektörü

Taşımacılık sektöründe, frigorifik kamyon kasaları, nakliye tankerleri, kamyon kasaları gibi üretimler yapılmaktadır. Üreticiye kolay kalıplama imkanı, malzemelerden tasarruf ve düşük maliyet gibi avantajlar kullanıcıya da yüksek ısı izolasyonu ve kolay temizlenebilirlik gibi kolaylıklar sağlar.

2.5.9 Şehircilik

Bu alanda kompozitler toplu konut yapımında ve çevre güzelleştirme (heykel, çöp bidonu, elektrik direği, banklar) çalışmalarında kullanılmaktadır. Üreticiye çok sayıda standart ürünün kısa zamanda imal edilebilmesi, montajdan tasarruf, ucuz maliyet, hafiflik gibi imkanlar sağlar. Kullanıcıya, yüksek izolasyon kapasitesi ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlar. Bunun yanında, kompozitlerin bu alanda kullanılması, estetik, mahalli idarelere de ekonomik avantajlar sağlar.

2.5.10 Mobilya Sanayi

Kompozitlerden, bu sahada da geniş bir şekilde faydalanılmaktadır. Masa sandalye, sehpa, koltuk, kütüphane, mutfak dolapları, çiçek saksıları ve dekoratif eşyalar yapılmaktadır. Üreticiye, seri ve ucuz ürün eldesi, kolay model değiştirme, tasarımda kolaylık ve esneklik gibi faydalar sağlar. Kullanıcıya, yüksek mekanik dayanım, alışılmışın dışında farklı görünüm ve tasarım gibi yararlar sağlar.

2.6 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre (plastik kompozitler, metalik kompozitler, seramik kompozitler vb.) bir gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de (partikül esaslı kompozitler, lamel esaslı, fiber esaslı kompozitler, dolgulu “kafes” kompozitler, tabaka yapılı kompozitler şeklinde) sınıflandırılabilir.

2.6.1 Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre

2.6.1.1 Plastik – Plastik Kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici, darbe emici yada istenen amaca göre kullanılan

plastığın özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki ayrı sınıfta incelenebilir.

Termoplastikler: Bu tür plastikler, ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. Genellikle 5-50 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu gruba giren plastikler:

- a) Naylon
- b) Polietilen
- c) Karbonflorür
- d) Akrikler
- e) Selülozikler
- f) Viniller

şeklinde sıralanabilir.

Termoset Plastikler: Bu tip plastiklerde ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikleri ise:

- a) Polyesterler
- b) Epoksi ler
- c) Alkiter
- d) Aminler

olarak verilebilir.

2.6.1.2 Plastik – Metal Fiber Kompozitler

Endüstride çok kullanılan bir tür olan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberleri (bakır, bronz, alüminyum, çelik vs.) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirmesi ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır.

Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirilme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır.

2.6.1.3 Plastik – Cam Elyaf Kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset, plastikten oluşan matris ve cam liflerin uygun kompozisyonlarından üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılğan olmasından dolayı çok küçük dirençlidirler.

Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de, daha önce belirtildiği gibi termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerin de düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyesterlerdir.

2.6.1.4 Plastik – Köpük Kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta, köpük ise matris konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük bir kısmı sentetik olarak imal edilmiş hafif maddelerdir. Köpük hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak yada elastik olabilmektedir. Matris olarak kullanılan bu köpük türleri, kullanılan plastiğin de çeşitlenebilmesiyle değişik özellikte kompozit malzemelerin oluşumunu sağlayabilmektedir.

2.6.1.5 Metal Matrisli Kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek

sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler.

Bakır ve Alüminyum matrisli, Wolfram veya Molibden fiberli kompozitler ve Al - Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşılmasını sağlamaktadır.

Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi, gelişi güzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedir.

2.6.1.6 Seramik Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimlerinden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler.

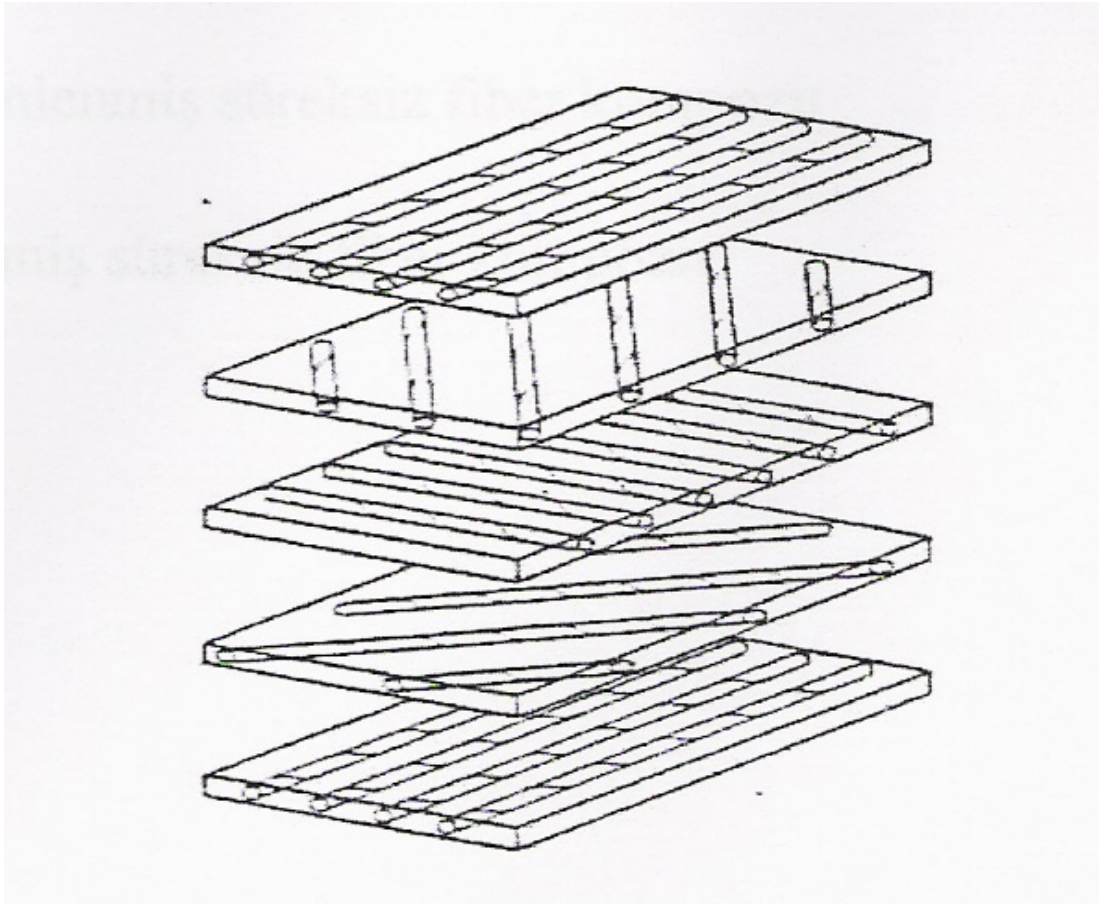
2.6.2 Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre

2.6.2.1 Partikül Esaslı Kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilirler. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rasgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliğide oldukça iyidir.

2.6.2.2 Lamel Esaslı Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk / çap oranında dolgu malzemesi ilave edilerek üretilirler. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilirler. Düzlemsel yapıya sahip pullarla sıkı paketleme ile elde edilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.



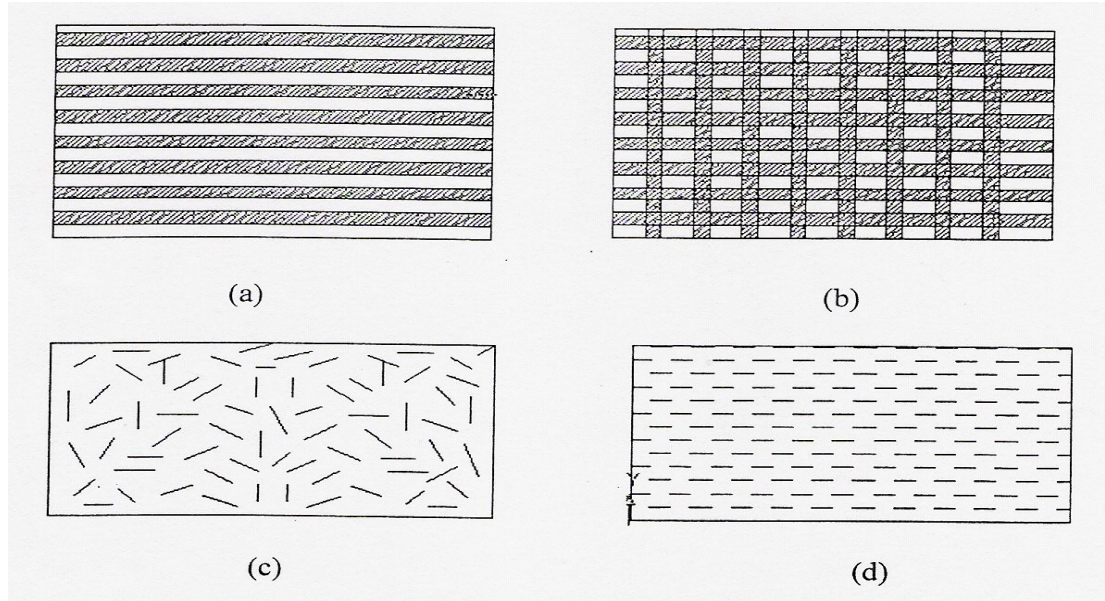
Şekil 2.3 Açılı tabakaların ayrı gösterimi

2.6.2.3 Fiber Esaslı Kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle

halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır.

Fiberler yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler.



Şekil 2.4 Değişik tipte fiber kompozitler

a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit b) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler c) Rasgele yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit d) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit

Fiber - matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlendirilmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber - matris ara yüzey özellikleridir.

Fiberler dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet vs.) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı

ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir.

2.6.2.4 Dolgu Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir.

2.6.2.5 Tabaka Yapılı Kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

BÖLÜM ÜÇ

ELYAF TÜRLERİ ve MATRİS MALZEMELERİ

3.1 Elyaf Türleri

Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar korozyona da dirençlidirler.

Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar.

Cam elyaflar teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipleridir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan elyaf tipleridir.

Elyafların ince çaplı üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere bağlıdır.

- 1- Üstün mikro yapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.
- 2- Boy / çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.
- 3- Elastisite modülünün çok yüksek olması.

3.1.1 Cam Elyaflar

Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki quartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Birim ağırlık başına mukavemeti, çeliğinkinden yüksektir.

2- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.

3- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

4- Nem absorbe etme özellikleri yoktur. Ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.

5- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde, yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

1. A (Alkali) Camı: A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek olan A camı, en yaygın cam tipidir.

2. C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

3. E (Elektrik) Camı: Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

4. S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla % 33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir.

Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçineler ile kullanılırlar.

Tablo 3.1 Cam elyafların mekanik özellikleri

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

3.1.2 Bor Elyaflar

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.

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

3.1.3 Silisyum Karbür Elyaflar

Bor gibi silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilir. 0,1 mm ile 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370 °C'de mukavemetinin sadece % 30'unu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640 °C'dir.

Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak silisyum karbür elyaflar, bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür.

3.1.4 Alümina Elyaflar

Alümina alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alümina, 0,02 mm çapındaki alümina flamanın silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir.

Alümina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir. Ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alümina / epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ile 2413 MPa'dır. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

3.1.5 Grafit (Karbon) Elyaflar

Karbon, yoğunluğu $2,268 \text{ g/cm}^3$ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hem de grafit elyaflar aynı esaslı malzemedен üretilirler.

Karbon ve grafit aynı hammaddeden elde edilirler. Grafit daha yüksek sıcaklıkta elde edilir, bu da daha yüksek saflık sağlar. Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması Tablo 3.2 de verilmektedir.

Tablo 3.2 Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması

Özellik	Grafit	Karbon
Saflık (%)	99	93 - 95
İşlem Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	>1700	<1700
Elastisite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

3.1.6 Aramid Elyaflar

Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptirler. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır.

Her iki kevlar da 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve kopma uzamaları %1,8'dir. Kevlar49'un elastisite modülü Kevlar29'unkinden iki kat fazladır. Kevlar elyafların yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür.

Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanı sıra kevlar / epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür.

3.2 Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra

elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir.

Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf yada matriste oluşacak bir çatlakın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf / matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinylester ve fenolik reçinelerdir. Yüksek mukavemet gerektirmeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Matris iyileştirilmesi çalışmaları özellikle yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun ve düşük nem duyarlılığına sahip yapıların üretilmesi doğrultusundadır. Tablo 3.3 de bazı matris malzemelerinin önemli özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3 Bazı matris malzemelerinin özellikleri

Özellikler	Epoksi Oda Sıc. Kürlenmiş	Epoksi Yük. Sıc. Kürlenmiş	Epoksi Gelişmiş	Polyester	Fenolik
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,1–1,3	1,2–1,4	1,3	1,2	1,2–1,3
Elastik modül (Gpa)	2–3	2,5–3,0	3,5	2–3	5–11
Çekme muk. (Mpa)	50–70	70–90	60	50–60	50–60
Kop. Uzaması (%)	2–6	2–5	2	2–3	1,2
Maks. İşlem sıc. (°C)	70–100	100–180	180	60–80	100–125

3.2.1 Epoksi Reçine Matrisler

Epoksiler iki yada daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Viskoz ve açık renkli bir sıvı halindedirler. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımları 150-200 °C seviyelerine arttırılabilir. Tüm polimerler düşük sıcaklıkta saydamlaşırlar ve yüksek sıcaklıkta kauçuklaşırlar. Geçişin meydana geldiği sıcaklık aralığına "cam geçiş sıcaklığı" adı verilir. Cam geçiş sıcaklığı, maksimum çalışabilme sıcaklığının bir ölçüsüdür. 100 °C'de uygulanan bir kür işlemi ile maksimum çalışma sıcaklığı 90-100 °C arttırılabilir. 150-250 °C arasında uygulanacak bir kür ile 150-250 °C arasında uygulanan maksimum çalışma sıcaklığı sağlanabilir. Kür işlemleri uygun katalizörlerin kullanılması ile hızlandırılabilir.

3.2.1.1 Epoksilerin Avantajları

- 1- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- 2- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- 3- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- 4- Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.

3.2.1.2 Epoksilerin Dezavantajları

- 1- Polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdır.
- 2- Polyestere oranla düşük viskoziteye sahiplerdir.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir yapılar olmaları nedeniyle, uçaklarda tabakalı kompozit yapılar olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

3.2.2 Polyester Reçine Matrisler

Polyester matrisler dibazik asitlerin, dihidrik alkoller (glikol) yada dihidrik fenollerle karışımının yoğunlaşması ile şekil alırlar. Polyesterin ana tipleri, polyester bileşeninin doymuş asitle yada alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi arttırılabilir.

3.2.2.1 Polyester Reçinelerin Avantajları

- 1- Takviyelerin neminin kolayca dışarı atılabilmesine izin veren düşük viskoziteye sahiptirler.
- 2- Düşük maliyetlidirler.
- 3- Çeşitli uygulamalar için geniş bir sınır içinde kolay imal edilebilirler.

3.2.2.2 Polyester Reçinelerin Dezavantajları

- 1- Kür sırasındaki yüksek egzotermik reaksiyon, zayıf elyaf / matris bağ mukavemetine neden olur.
- 2- Sistem gevrekleşmeye eğilimlidir.
- 3- Çok seyreltik alkalilere bile zayıf kimyasal direnç gösterir.

Polyester reçinelerin, epoksi reçinelere göre elyaf / matris arası bağ mukavemetinin daha düşük olması nedeniyle, uçak yapılarındaki kullanım alanları küçük uçaklarla ve planörlerle sınırlıdır.

3.2.3 Vinilester Reçine Matrisler

Polyesterlere benzerler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Polyesterde glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler.

3.2.4 Fenolik Reçine Matrisler

Fenol, alkalın şartlar altında formaldehitle yoğuştuğunda polimerizasyon oluşur. Polimerizasyon asidik şartlar altında yapılır. Fenolik reçinelerin en büyük avantajı yüksek sıcaklık dirençleridir. En önemli dezavantajları ise, diğer matris malzemelerine göre mekanik özelliklerinin düşük olmasıdır. Bu nedenler uçak yapılarında tercih edilmezler.

3.2.5 Metal Matrisler

Kompozit malzemelerde, matris malzemesi olarak mukavemetli ve hafif metaller kullanılır. En yaygın olanları alüminyum, titanyum ve magnezyumdur. Takviye olarak da berilyum, molibden, çelik yada tungsten elyaflar kullanılır. Ayrıca SiC kaplı bor elyaflar ve grafit elyaflarda kullanılır. Bu kompozitlerde de diğerlerinde olduğu gibi elyaflar yapıya mukavemet ve tokluk kazandırırken metal matris de elyafları bir arada tutar, gerilmeleri ve yükleri şekil değiştirerek karşılar. Bu kompozitler, yüksek sıcaklık dayanımlarının mükemmelliği nedeniyle, uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

Ancak metal matrisli kompozitlerin üretiminde kimi problemler söz konusudur. İnce elyaf yapılar kompozit üretiminde ergimiş matris malzemesinin içine yerleştirilir. Reçine matrislerin ergime sıcaklıkları elyaflarinkinden düşüktür. Ancak,

metal matrislerin ergime sıcaklıkları yüksek olduğundan problemler yaşanır. Yüksek sıcaklık elyaflara zarar verebilir. Bu nedenle metal matrisler için farklı yöntemler kullanılmalıdır. Elektriksel kaplama işleminde elyafların üzeri metal ile kaplanır. Plazma spreji ise başka kaplama yöntemidir. Metal plazma haline getirilerek elyafların üzerine sprej şeklinde kaplanabilir.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deney Numuneleri

Elimizdeki parçalar epoksi – cam elyaftan oluşmaktadır. Bu nedenle üretimde sabit sıcaklık ve basınç altında presleme yöntemi kullanıldı.

a) Dışarıdan hazır alınan ve fiber açısı $0 - 90^\circ$ (örgü sistemi) olan cam elyafa reçine (epoksi) fırça ile emdirildi. Bu işlem parçanın oluşturduğu katman sayısı kadar tekrarlandı.

b) Üst ve alt katmanların pres makinesine yapışmaması için ısıya dayanıklı, reçineye bağlanmayan bir muşamba ile paketlenildi.

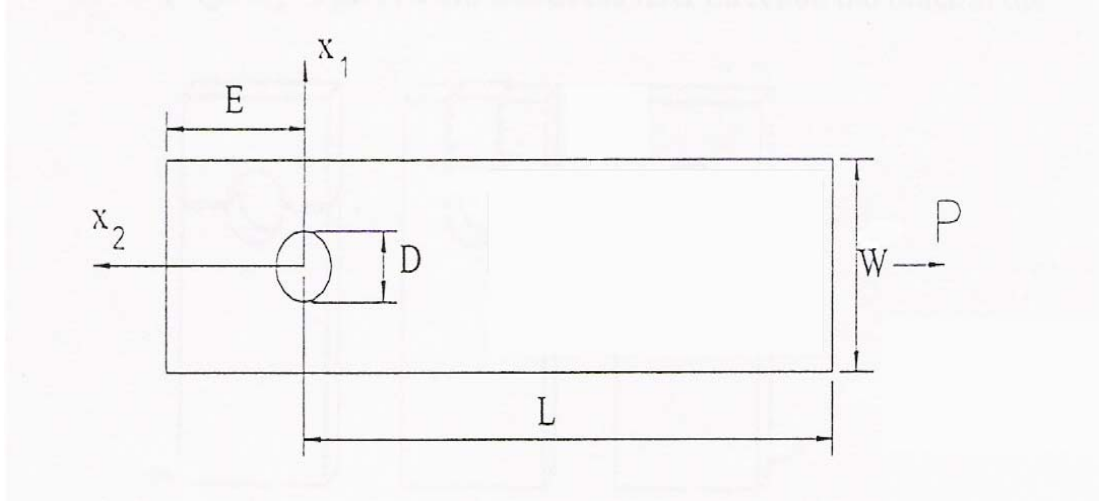
c) Paketlenmiş tabakalar prese yerleştirildi.

d) Parçanın kalınlığına göre sıcaklık ve bekleme süresi ayarlanır. Kullandığımız parçalar 1 mm ve 2 mm kalınlığındadır. Buna bağlı olarak sıcaklık 120°C ve bekleme süresi 1,5 saattir. Uygulanan basınç ise parça kalınlığından bağımsız olarak 150 – 160 bar'dır (epoksi – cam elyaf için).

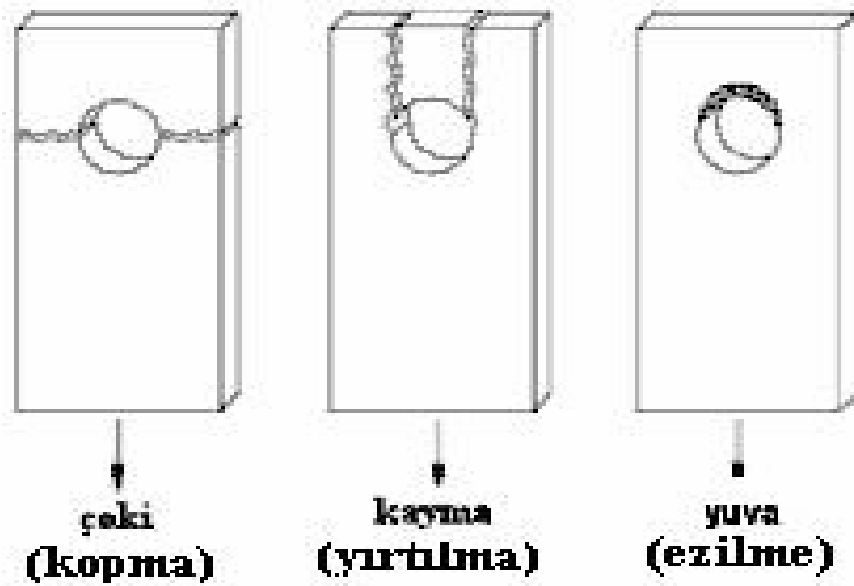
e) Presleme işlemi bittikten sonra malzeme oda sıcaklığında elle tutulacak sıcaklığa gelinceye kadar bekletildi.

f) Soğuyan malzeme muşambasından çıkarıldı ve Tablo 4.1'de verilen boyutlarda kesme işlemi yapıldı.

Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi delik çapı D , uzunluğu $L+E$, kalınlığı t ve genişliği W olan dikdörtgen bir kompozit plaka üzerinde çalışma yapılmıştır. Çapı $D = 5$ mm olan bir delik, plakanın merkez çizgisi boyunca ($x_1 = 0$) ve tabakanın bir kenarından E mesafe uzaklıkta bulunmaktadır. Deliğin içerisine çapı D olan sertleştirilmiş cıvata yerleştirilmiş, somun ile sıkıştırılmıştır ve plakaya paralel, merkez çizgisine göre simetrik (x_1, x_2 eksenlerinde eğilme momenti oluşturamaması için) P çeki yükü uygulanmıştır.



Şekil 4.1 Problem geometrisi



Şekil 4.2 Çekme yükü altında mekanik sıkıştırılmış bağlantılarda oluşan hasar tipleri

Mekanik olarak sıkıştırılmış bağlantılar çekme yükü altında genellikle üç temel hasara uğrarlar. Bunlar çeki, kayma ve yuva hasarları olup şekil 4.2 de şematik olarak gösterilmişlerdir. Pratikte bu hasarların beraber görülebilmeleri de olasıdır.

Tablo 4.1 Deney Planı

E/D	W/D	E (mm)	W (mm)	E + L (mm)	Deney Adı	M ₁ (Nm)	M ₂ (Nm)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	Çekme Hızı (mm/dk)
1	2	5	10	95	E1W2	5	10	10	16	1
	3		15		E1W3					
	4		20		E1W4					
	5		25		E1W5					
2	2	10	10	100	E2W2	5	10	10	16	1
	3		15		E2W3					
	4		20		E2W4					
	5		25		E2W5					
3	2	15	10	105	E3W2	5	10	10	16	1
	3		15		E3W3					
	4		20		E3W4					
	5		25		E3W5					
4	2	20	10	110	E4W2	5	10	10	16	1
	3		15		E4W3					
	4		20		E4W4					
	5		25		E4W5					
5	2	25	10	115	E5W2	5	10	10	16	1
	3		15		E5W3					
	4		20		E5W4					
	5		25		E5W5					

4.2 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, boyuna mesafenin çapa oranı (E/D) ve genişliğin çapa oranı (W/D) sırasıyla 1'den 5'e ve 2'den 5'e değişmektedir. Deney planı Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi deneyler kenar uzaklığı oranı ve genişlik oranı sembollerinin bir araya getirilmesi ile isimlendirilmiştir. Bu oranların dışında ön yükleme momenti ($M_0=0$, $M_1=5$, $M_2=10$ Nm), rondela çapı ($R_0=0$, $R_1=10$,

$R_2=16$ mm) ve levha kalınlığı ($t_1=1$, $t_2=2$ mm) deneysel değişkenler olup toplam deney deneysel sayısı 200 dür. İstatistiksel açıdan doğrulama amacı ile her deney üç kez tekrarlandığı için 600 adet deney yapılmıştır.

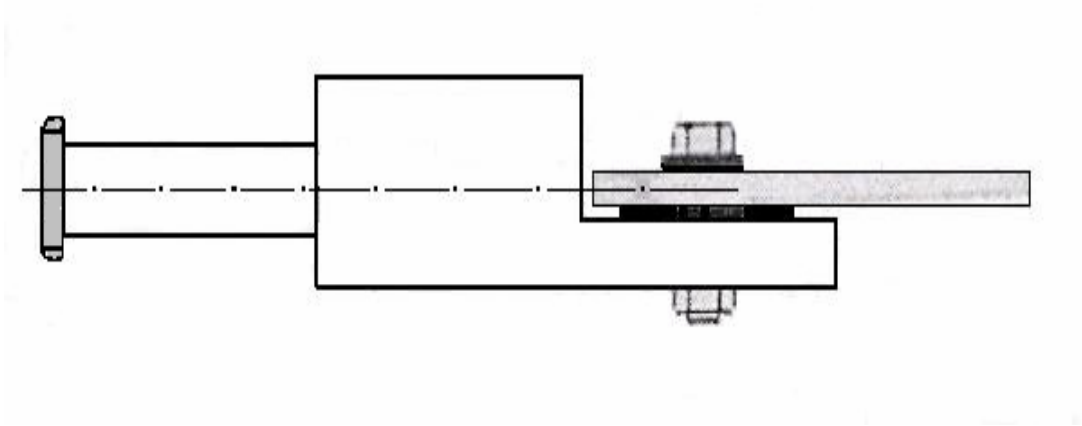
Ön yüklemde kullanılan moment anahtarının hassasiyeti momentlerimizin küçük olması nedeniyle yetersiz kalınca anahtar koluna strain-gauge yapıştirılarak moment – gerilme kalibrasyon eğrisi çıkartılarak çok hassas yükleme yapma olanağı elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Ön yüklemde kullanılan moment anahtarı ve düzeneği

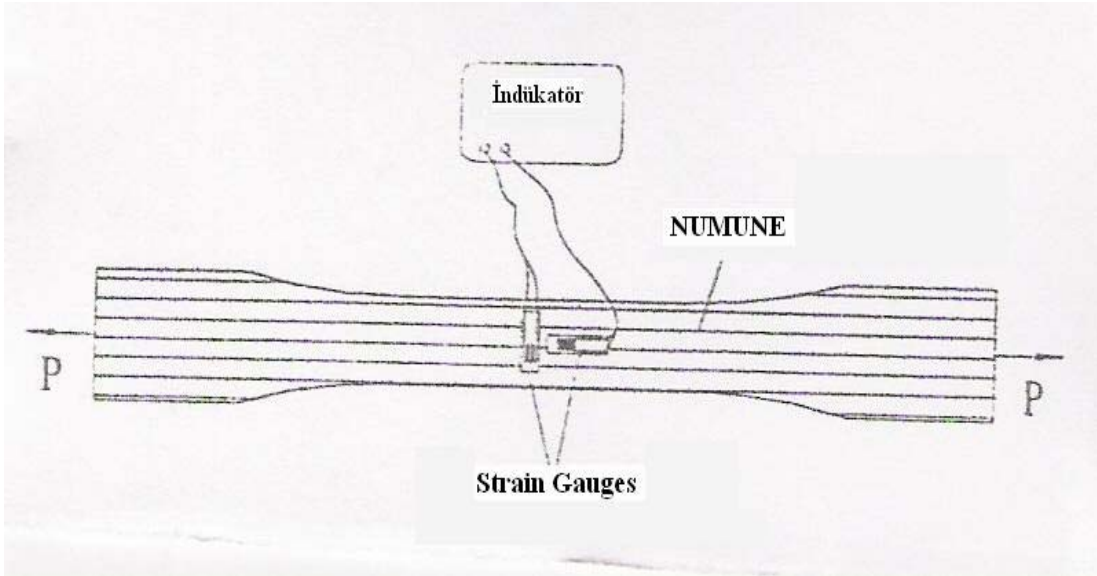
Numunelerin bağlama delik merkezlerinin simetri ekseni üzerinde ve daima istenen E uzaklığında olmasını sağlamak için delme kalıbı yapılmıştır. Çekme deneyi sırasında da aksenal sapmaların önlenmesi için özel bir bağlama aparatı dizayn edilmiştir (Şekil 4.4). Numunelerin dayanımının tahmini için yuva mukavemetlerinin hesaplanması gereklidir. Yuva mukavemeti hesabı ise şu şekilde yapılır; (Jones R.M. 1998)

$$\sigma_y = P / D.t \quad (4.1)$$



Şekil 4.4 Deney aparatı

Kullanılan kompozit levhaların mekanik özellikleri ön bir deney yapılarak strain – gaugeler yardımı ile tespit edilmiştir. E_1 , ν_{12} değerlerini bulabilmek için, fiber yönleri yük uygulanacak yön ile aynı olacak şekilde seçilen numune üzerine birbirine dik doğrultuda iki strain - gauges yapıştırılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Boyuna fiber doğrultusuna sahip numune ile yapılan çekme deneyi

Strain gauge'lerden bir tanesi fiber doğrultusu yönündeyken diğeri ona dik doğrultudadır. Numune, deney aparatına bağlandıktan sonra Instron – 1114 çekme cihazıyla adım adım yüklendi. Her adımda ϵ_1 ve ϵ_2 değerleri indükatörden okundu. Bu gerilme değerlerinden E_1 ve ν_{12} değerlerine erişildi. E_1 değeri numunemiz örgülü fiber dokusuna sahip olduğundan E_2 değerine eşit kabul edildi ($E_1=E_2$).

$$\sigma_1 = \frac{P}{A}, \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (4.2)$$

Kayma modülü G_{12} 'yi bulabilmek için lif yönleri 45° olan numunelerden faydalanılmıştır. Numuneye ekseni doğrultusunda strain – gauge yapıştırılır. Parça çekme cihazına parça ekseni doğrultusunda bağlandıktan sonra akma noktasına gelmeden belirli noktalarda durdurularak strain – gauge'deki değerler tespit edilir. $\sigma_n = P_n / A_0$ formülüyle uygulanan değişik yüklerdeki gerilmeler bulunur. İndükatörden okunan ε değerleri 10^{-6} ile çarpılır. $\sigma_n = E \cdot \varepsilon_n$ denkleminde elastisite modülü E_x bulunur. ($E_x=22194$ MPa)

$$E_x = \frac{P/A}{\varepsilon_x} \quad G_{12} = 1/(4/E_x - 1/E_1 - 1/E_2 + 2\nu_{12}/E_1) \quad (4.3)$$

Tablo 4.2 Cam lifi – epoksi kompozit malzemesinin mekanik özellikleri

$E_1 = E_2$ (Mpa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}
29600	8234	0,13

Hata yükünü ve hata türünü belirlemek için çeşitli deneyler yapıldı. Deneyler Şekil 4.4 de görülen deney aparatının yardımıyla yapıldı. Ön deneyden sonra Tablo 4.1 de verilen deney planına uygun olarak numuneler deney aparatına bağlanıp Instron – 1114 çekme cihazı (Şekil 4.6-7) ile çekme deneyine tabi tutuldu. Kontrol panelinde çekme hızı (numunenin uzaması) 1 mm/dk olacak şekilde ayarlandı. Panelde uygulanan kuvvet N, uzamalar ise mm olarak okundu. Tüm kompozit konfigürasyonları için kuvvet – şekil değiştirme grafikleri bulundu.



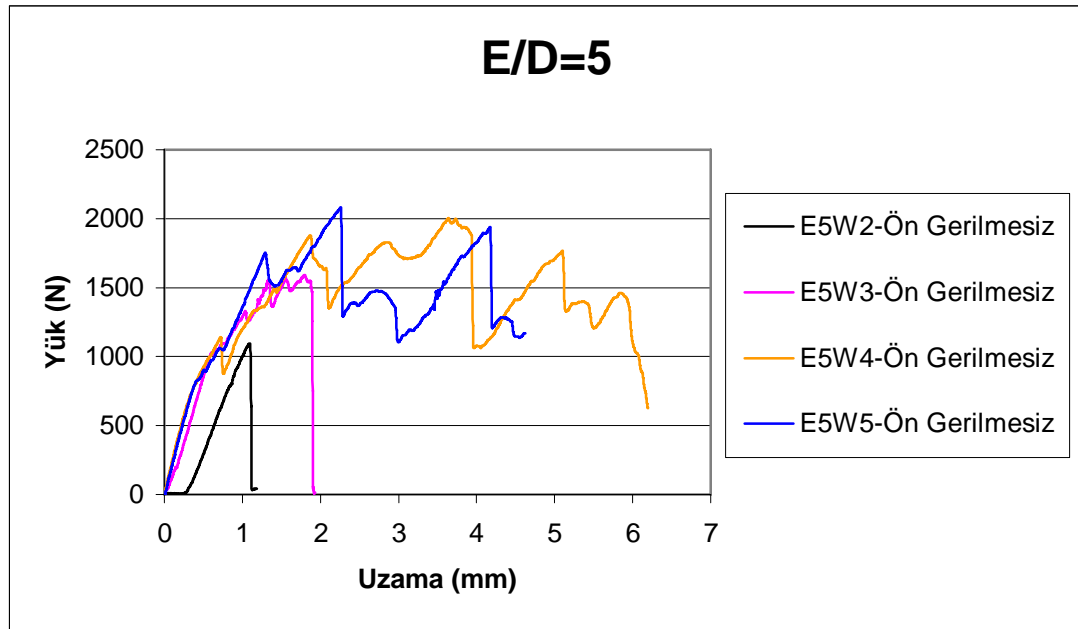
Şekil 4.6 Instron – 1114 çekme cihazı



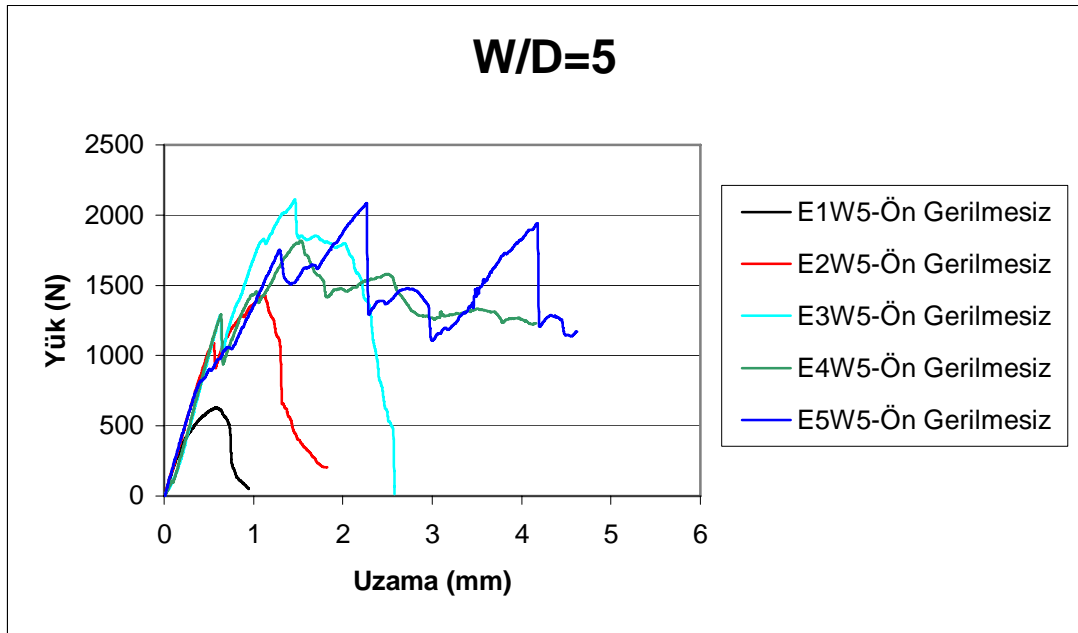
Şekil 4.7 Deney aparatının çenelere bağlantısı

4.3 Deneysel Sonuçları

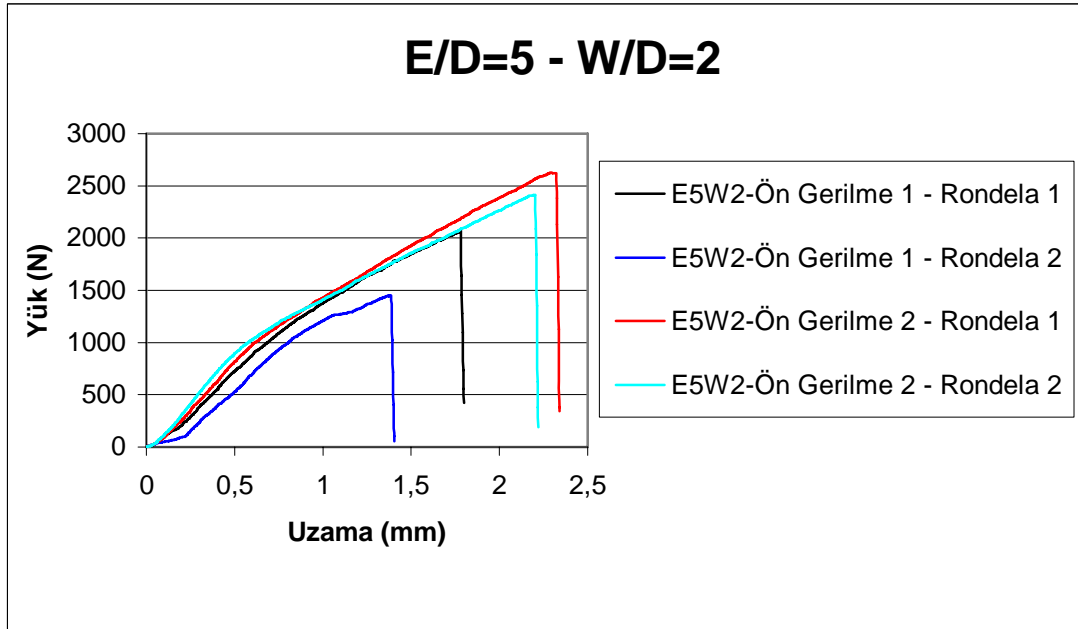
Deneysel çalışma sonucunda, yük / uzama eğrilerinin ilk hasar oluşuncaya kadar lineer olarak arttığı görülmüştür. İlk hasardan sonra küçük yük artışlarında büyük deformasyonların olduğu saptanmıştır. Genellikle yükün maksimum değerine deformasyonun 0,5 mm ile 3 mm olduğu aralıkta ulaşılmaktadır. Bu değerden sonra oluşan deformasyon artarken yük azalmaktadır. Bu durumu gösteren örnekler Şekil 4.8-19'ya kadar yer almıştır. Bazen numuneler yük taşımaya devam etmekte ve maksimum yük değeri bu sırada görülebilmektedir. (Şekil 4.8 – E5W4)



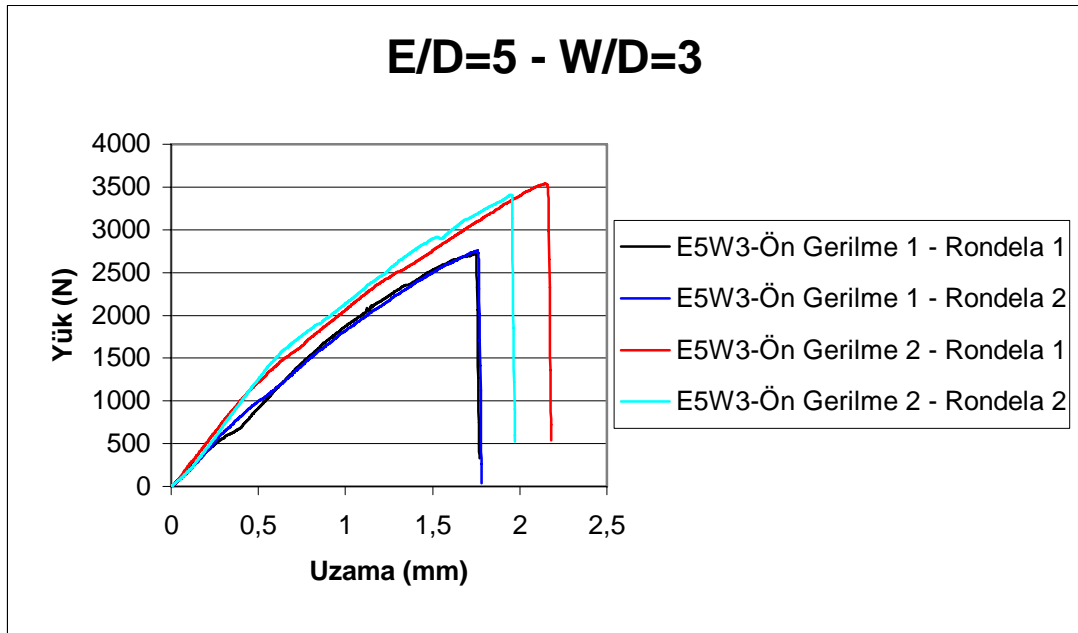
Şekil 4.8 Ön gerilmesiz, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 t=1mm)



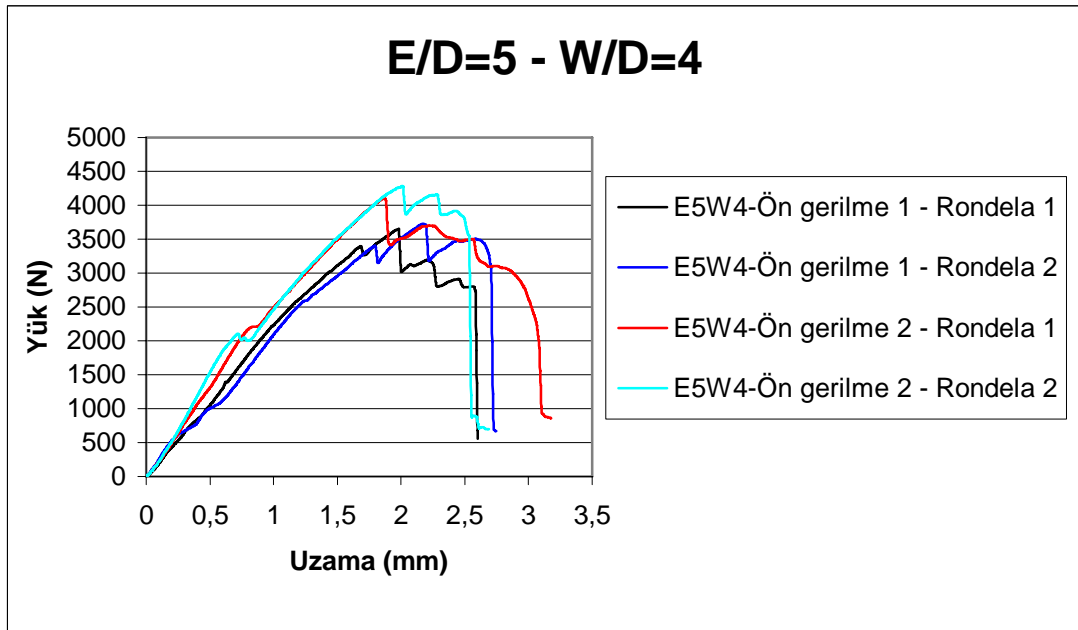
Şekil 4.9 Ön gerilmesiz, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (W/D=5 t=1mm)



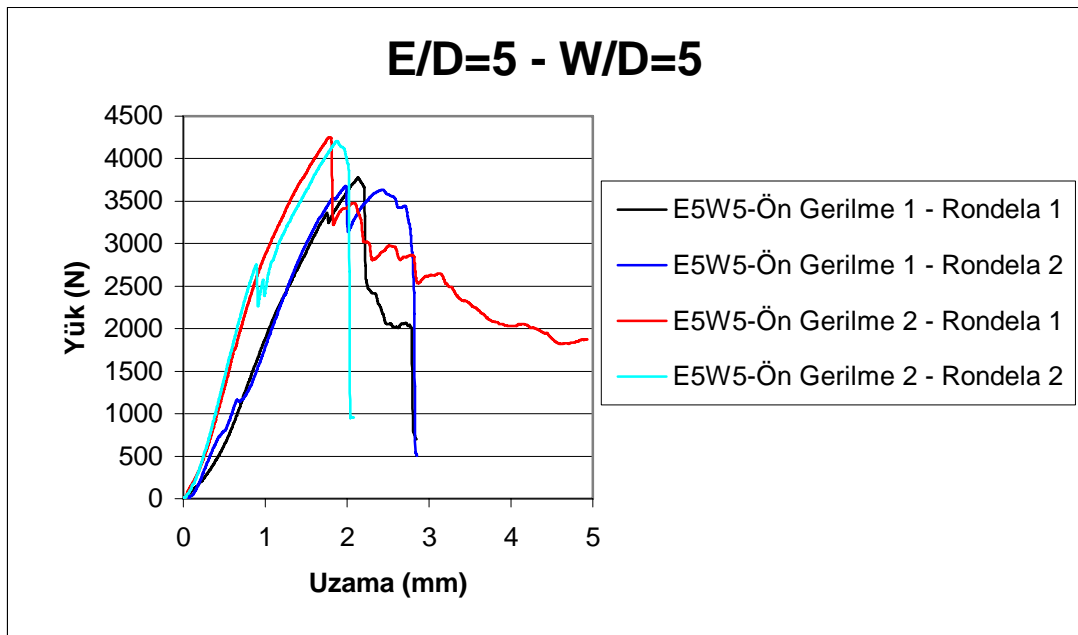
Şekil 4.10 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 W/D=2 t=1mm)



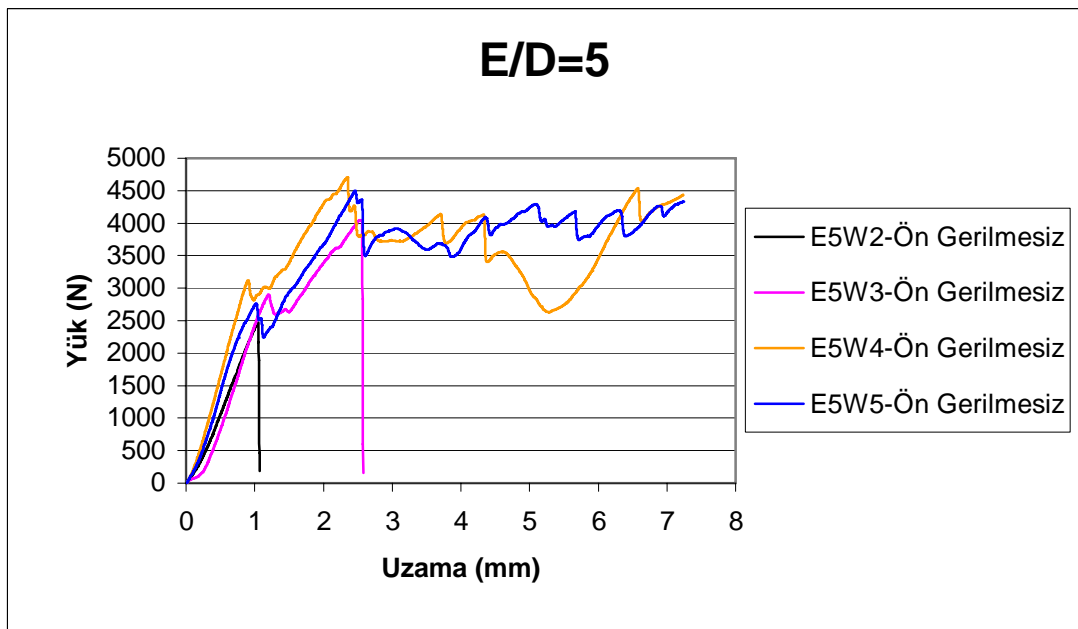
Şekil 4.11 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 W/D=3 t=1mm)



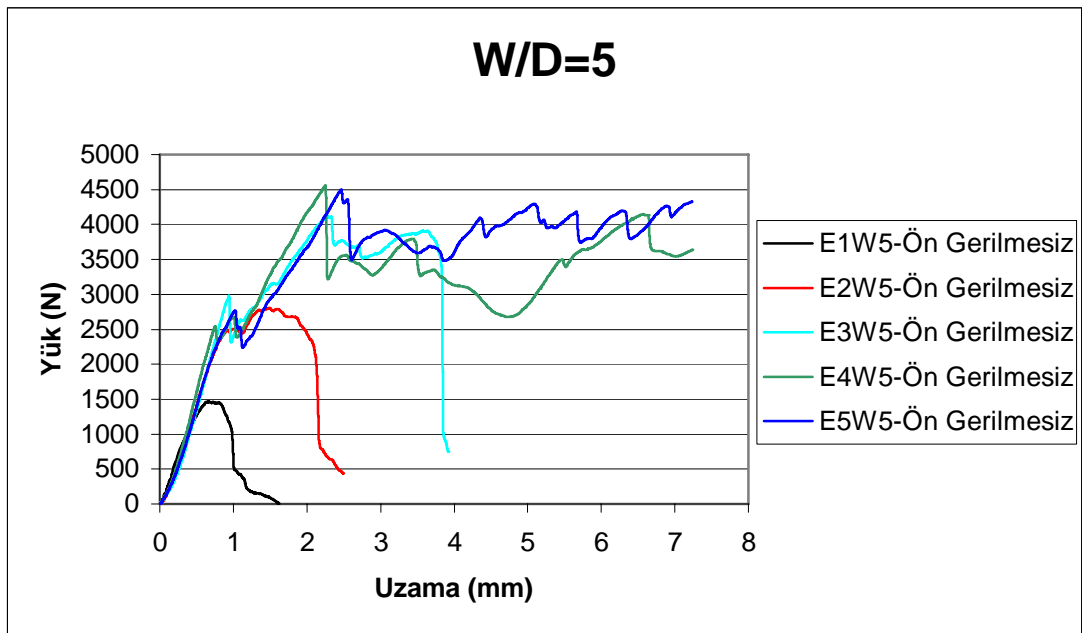
Şekil 4.12 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 W/D=4 t=1mm)



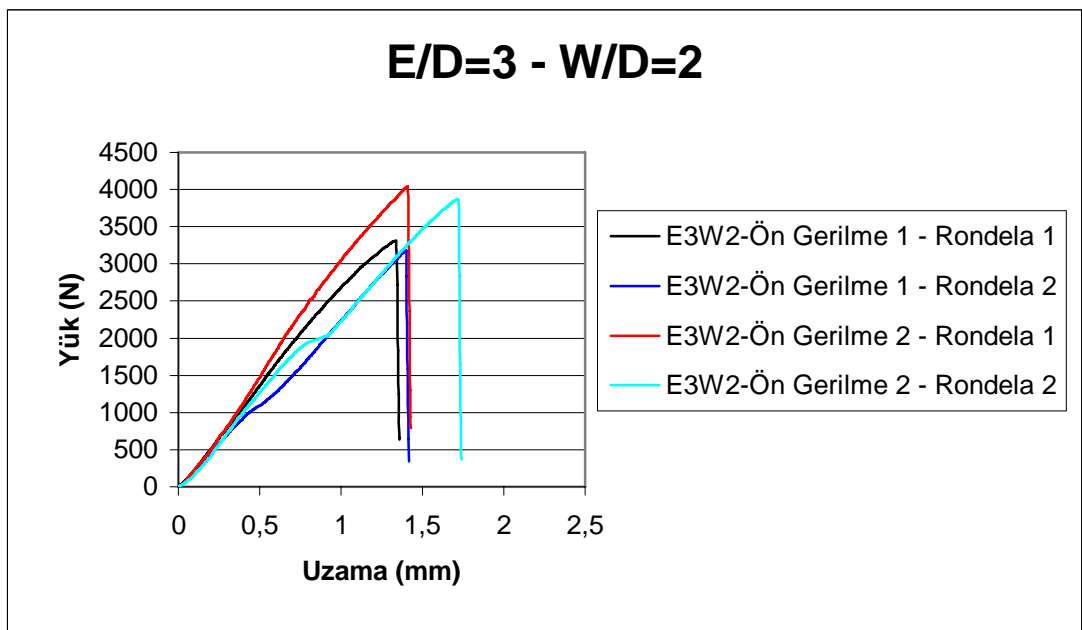
Şekil 4.13 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 W/D=5 t=1mm)



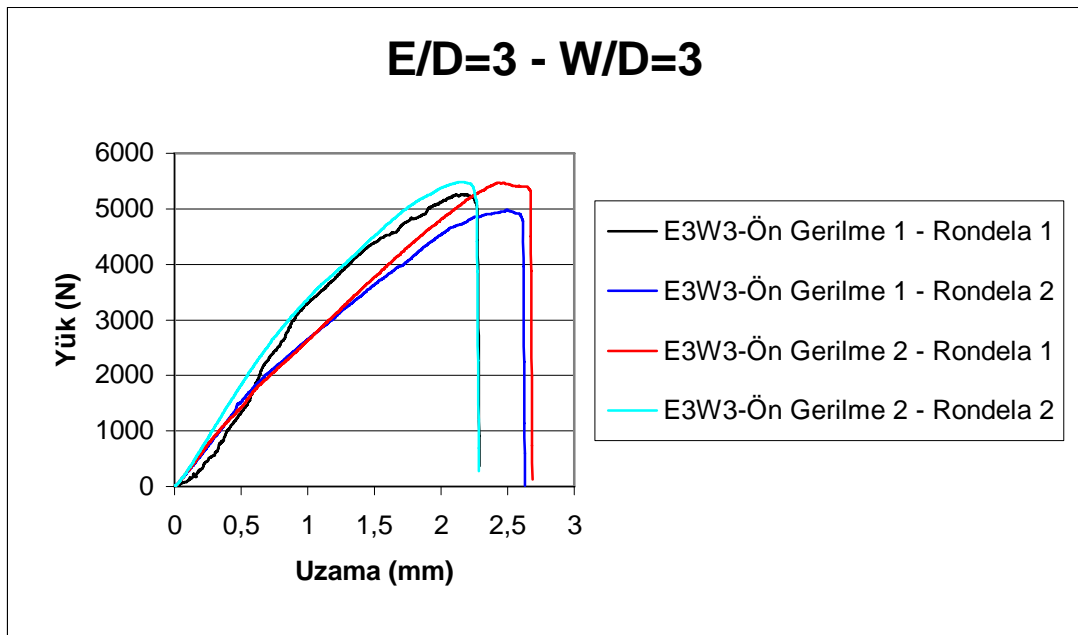
Şekil 4.14 Ön gerilmesiz, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=5 t=2mm)



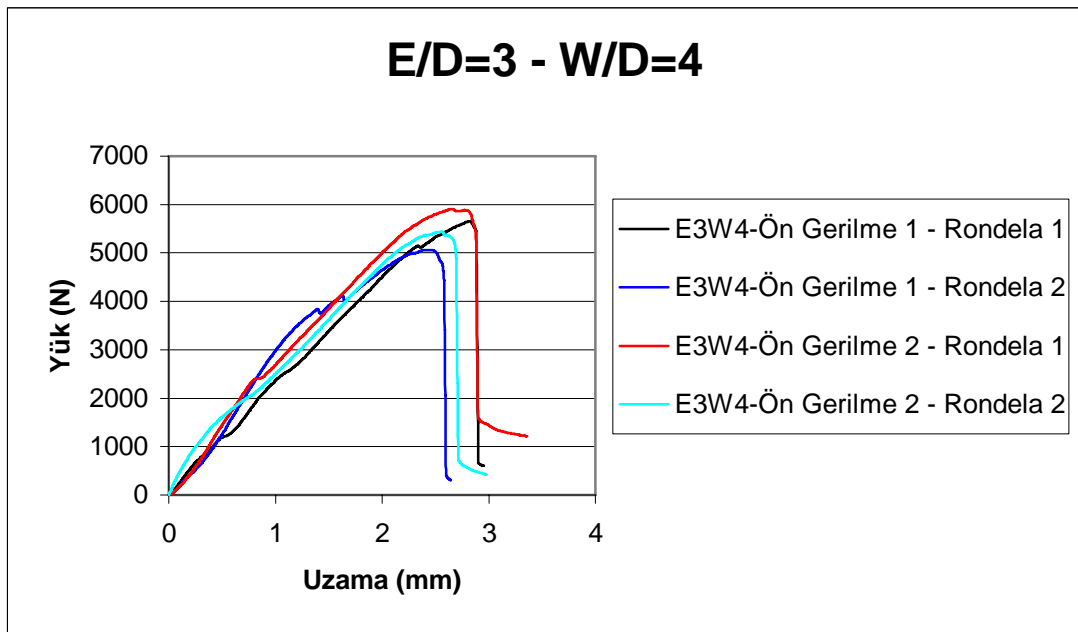
Şekil 4.15 Ön gerilmesiz, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri ($W/D=5$ $t=2$ mm)



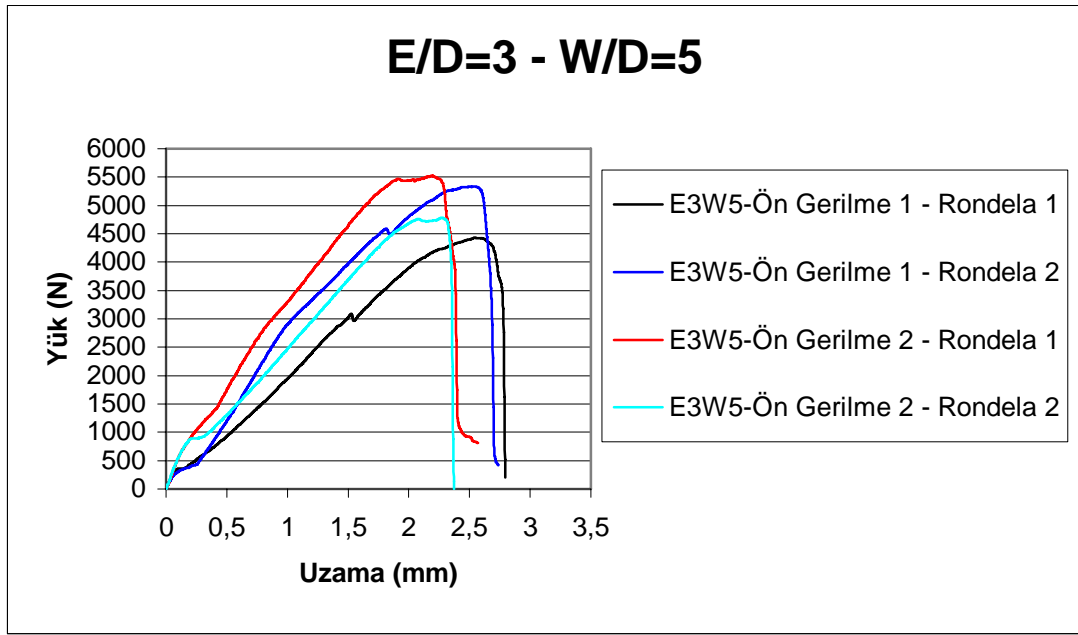
Şekil 4.16 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri ($E/D=3$ $W/D=2$ $t=2$ mm)



Şekil 4.17 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=3 W/D=3 t=2mm)



Şekil 4.18 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=3 W/D=4 t=2mm)



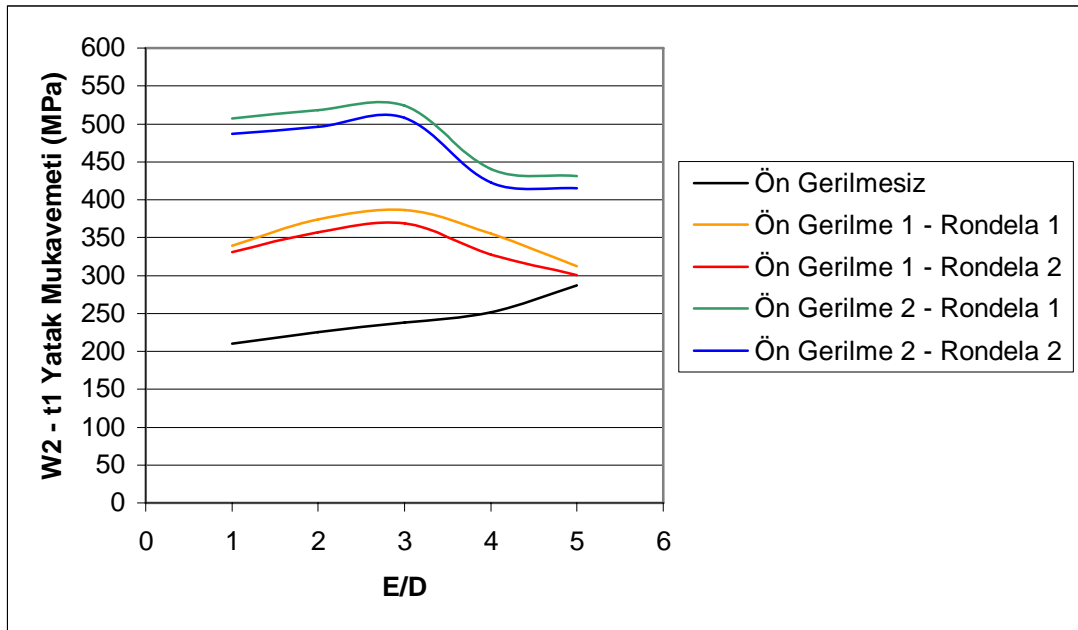
Şekil 4.19 Ön gerilmeli ve rondelalı, cam lifi-epoksi kompozit plakalarda yük-uzama eğrileri (E/D=3 W/D=5 t=2mm)

4.3.1 t=1mm Kalınlığındaki Numunelerden Elde Edilen Deney Sonuçları

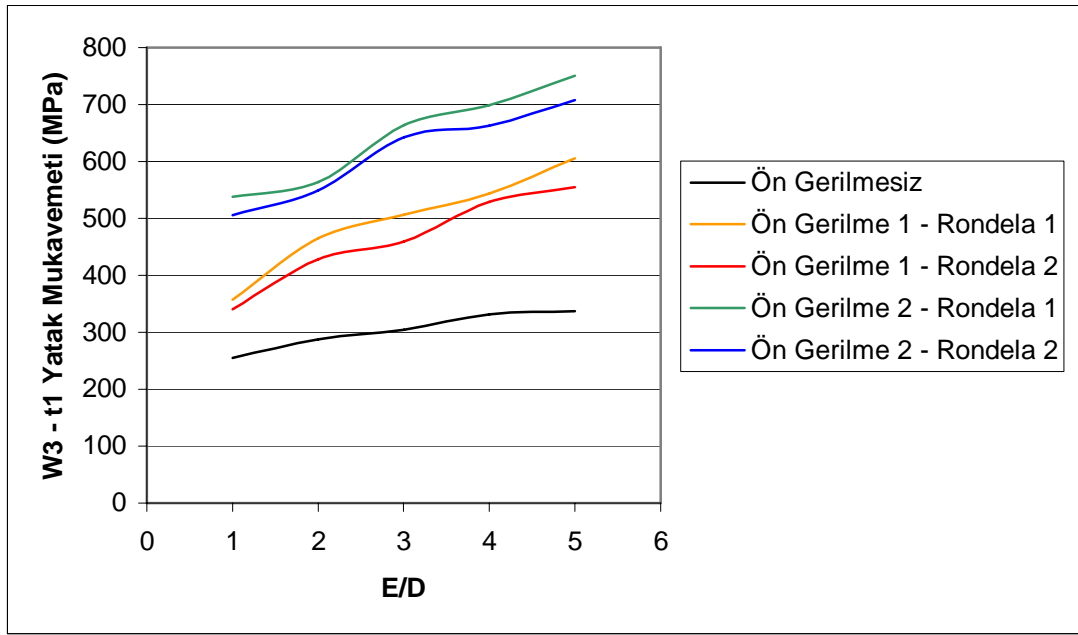
Yapılan deneyler ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir; (Şekil 4.20 – 28)

- W/D = 2 hariç diğer tüm numuneler için E/D'nin artmasıyla, yatak(yuva) mukavemetinde de bir artış görülmüştür.
- Tüm W/D oranları için E/D kritik noktası 3 noktasıdır. Bu noktadan sonra artışıdaki lineerlik azalmıştır. Fakat W/D = 2 için kritik noktadan sonra yatak(yuva) mukavemetinde azalma görülmüştür.
- E/D = 1 hariç diğer tüm E/D oranlarında W/D deki artış, yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur.
- E/D = 1 için kritik W/D noktası 3 noktasıdır. Bu noktadan sonra yatak(yuva) mukavemetinde azalma görülmüştür. W/D = 5 iken en düşük yatak(yuva) mukavemetine erişmişlerdir. W/D oranının artması ile rijitlik artmış ve şekil değiştirme oranı düşmüştür. Bu yüzden malzeme düşük kuvvetlerde kopmuştur.
- E/D = 1 hariç diğer E/D oranları için W/D kritik noktası 4 noktasıdır. Bu noktadan sonra artışıdaki lineerlik azalmıştır.

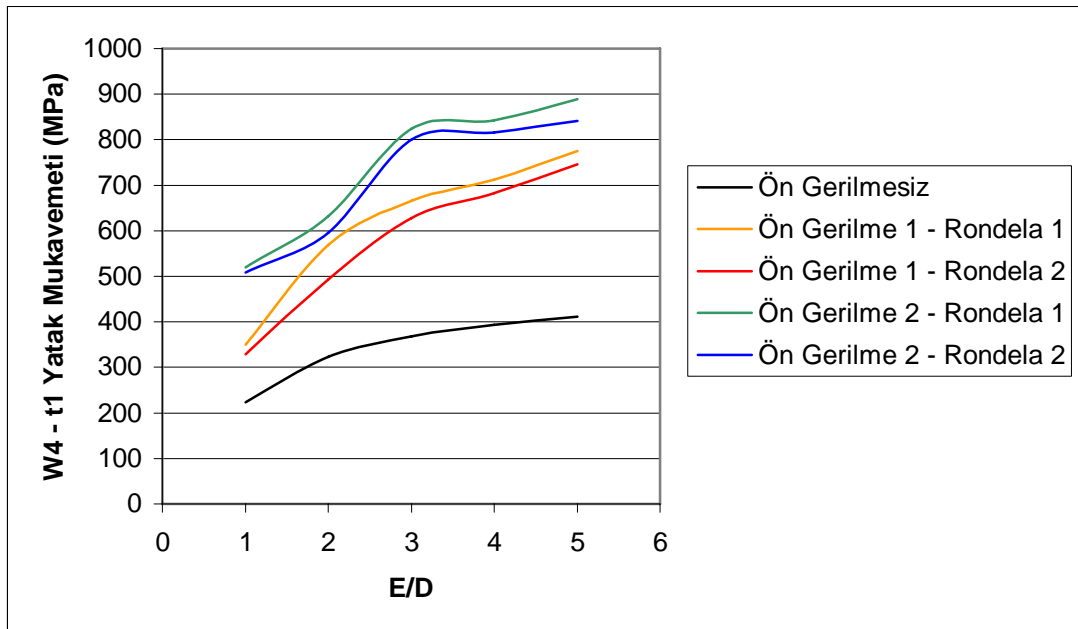
- Ön gerilme momentleri M_1 ve M_2 'nin etkileri incelendiğinde moment artışıyla beraber yatak(yuva) mukavemetinde de bir artış olduğu görülmüştür ($M_2 > M_1$)
- Rondela çapının etkileri incelendiği zaman ($R_2 > R_1$) R_1 çaplı rondela üzerinden uygulanan ön gerilme momentleri ile yapılan birleştirmelerin yatak(yuva) mukavemetlerinin R_2 çaplılara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Büyük çaplı rondela (R_2) üzerine gelen normal kuvvetin numune üzerinde geniş bir alana yayılması sonucunda numune daha düşük kuvvetlerde kopmuştur. Tam tersi etki küçük çaplı rondela üzerinde oluşmuş ve numune daha yüksek kuvvetlere dayanabilmiştir. Nedeni büyük çaplı rondela ile yapılan birleştirmelerde normal kuvvetin küçük olması nedeni ile sürtünme kuvvetinin de küçük olması ve çekme kuvvetinin sürtünme kuvvetini kolayca yenerek bağlantının kuvveti civata delik cidarı üzerinden aktarmaya erken başlamasıdır.



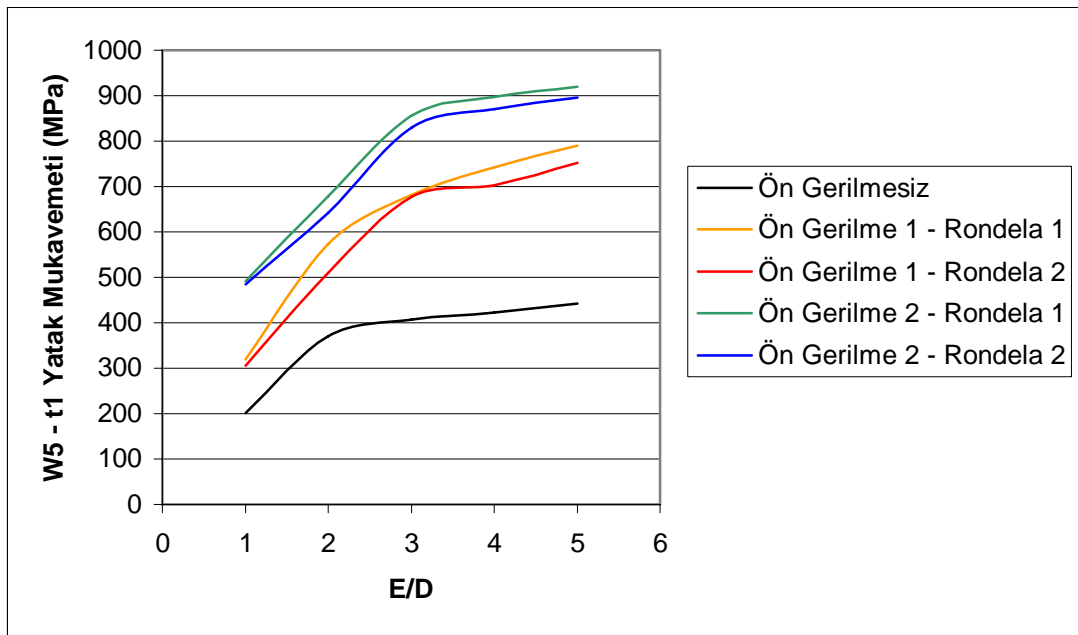
Şekil 4.20 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $W/D=2$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



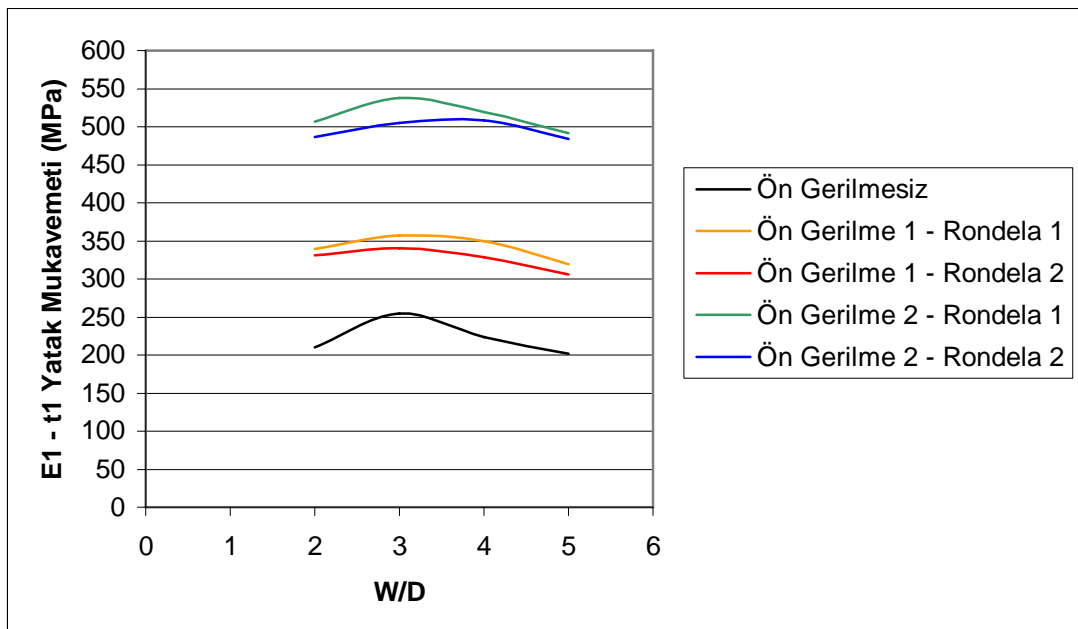
Şekil 4.21 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $W/D=3$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



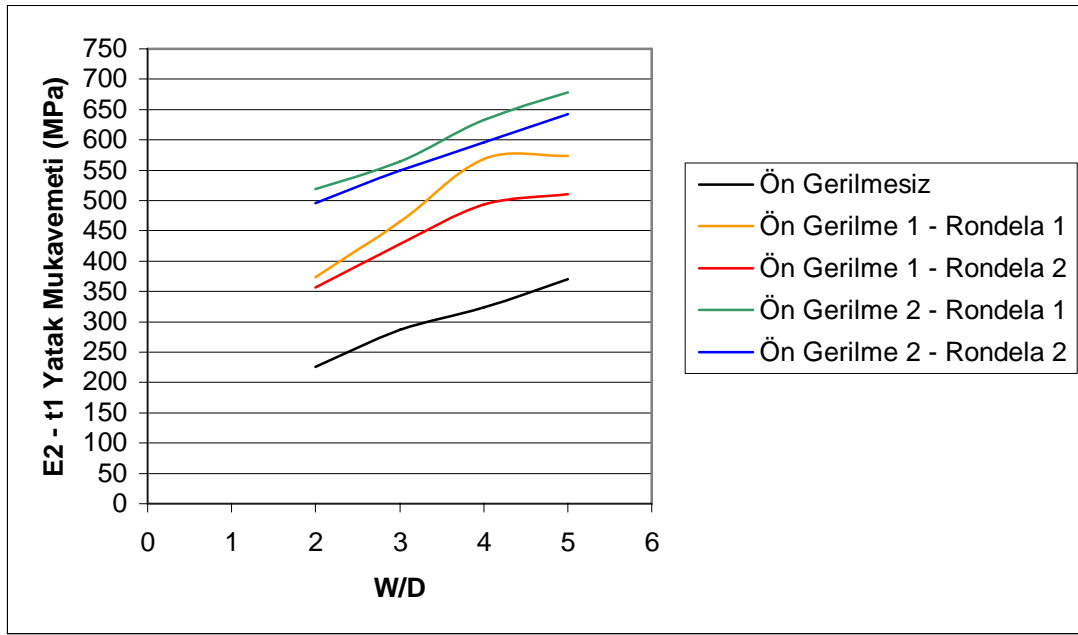
Şekil 4.22 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $W/D=4$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



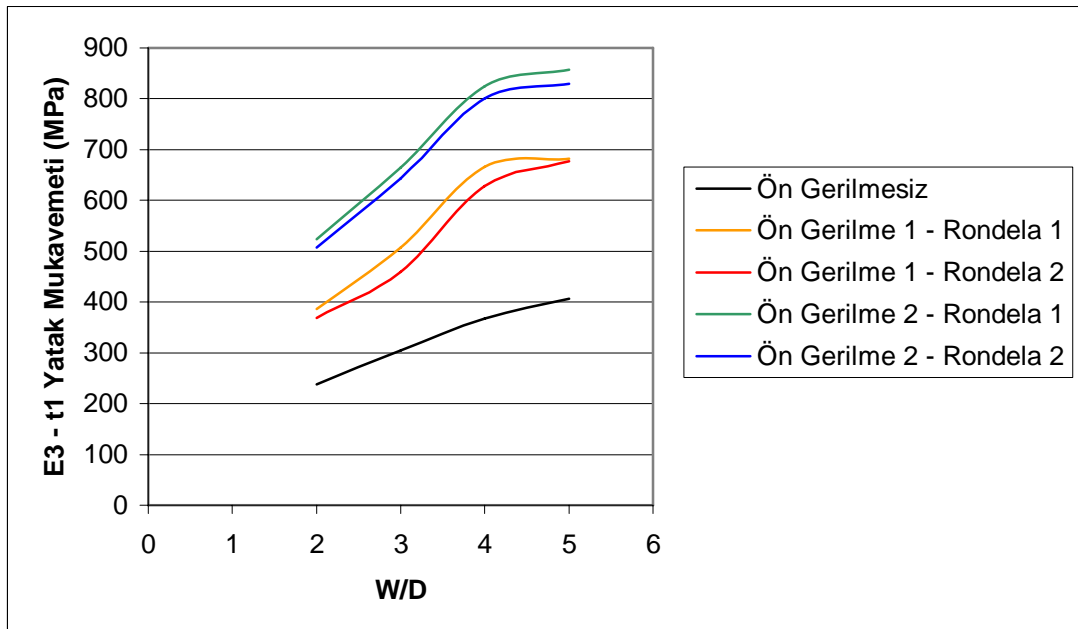
Şekil 4.23 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $W/D=5$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



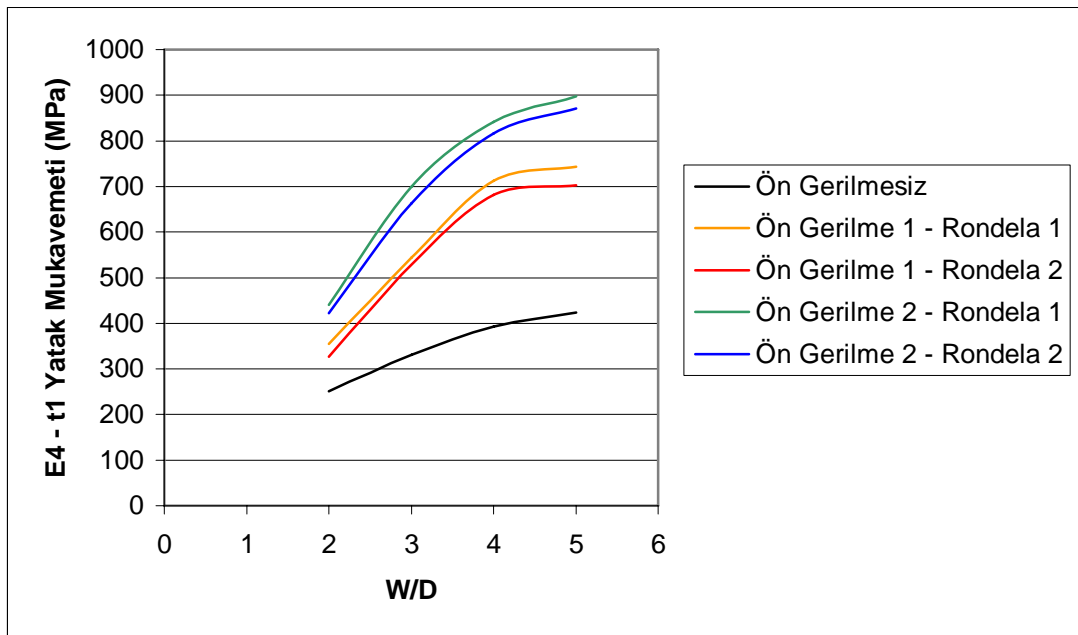
Şekil 4.24 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $E/D=1$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



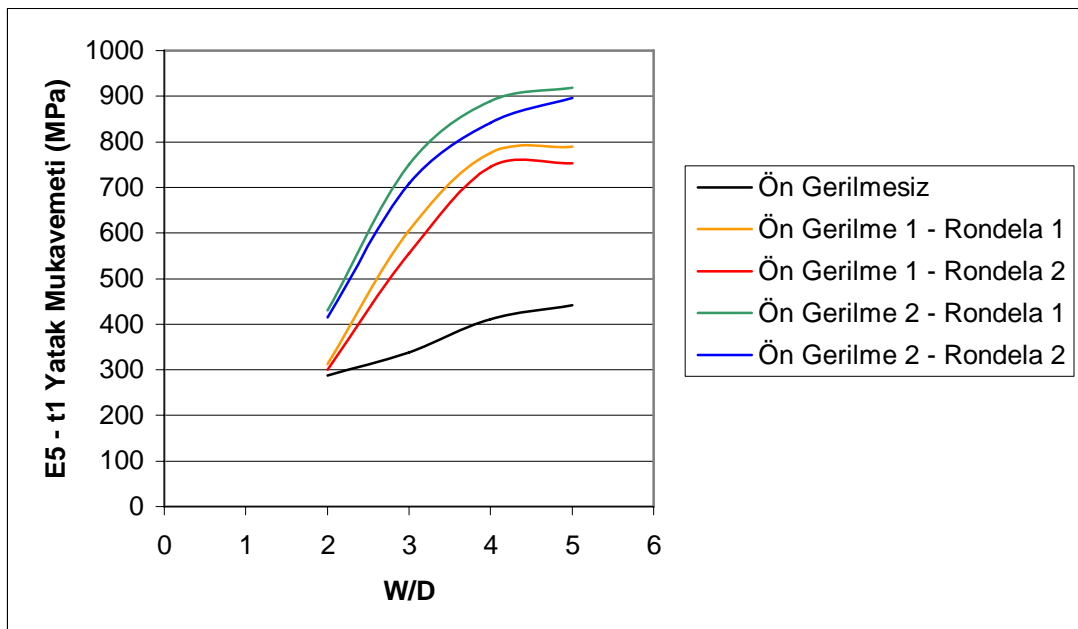
Şekil 4.25 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $E/D=2$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



Şekil 4.26 $t=1\text{mm}$ kalınlığında $E/D=3$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



Şekil 4.27 t=1mm kalınlığında E/D=4'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.

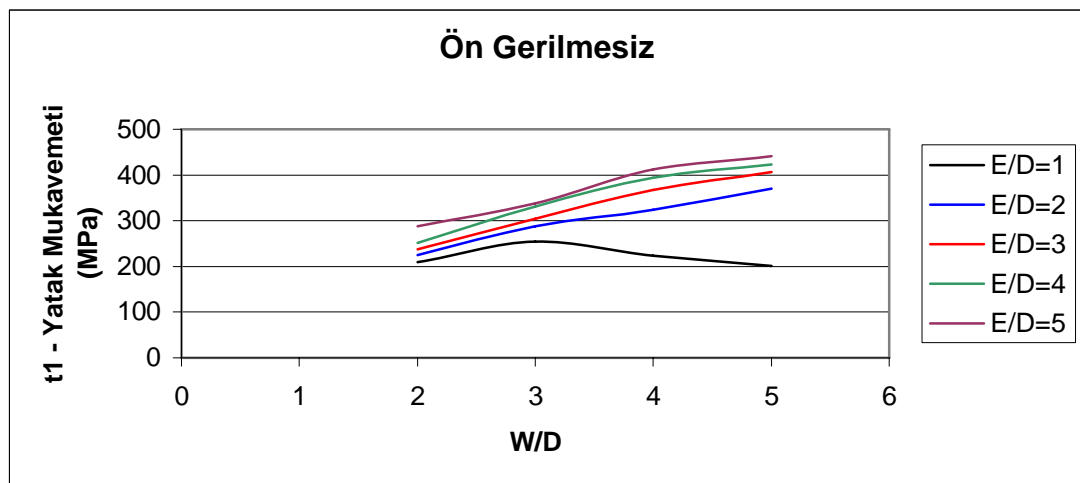


Şekil 4.28 t=1mm kalınlığında E/D=5'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.

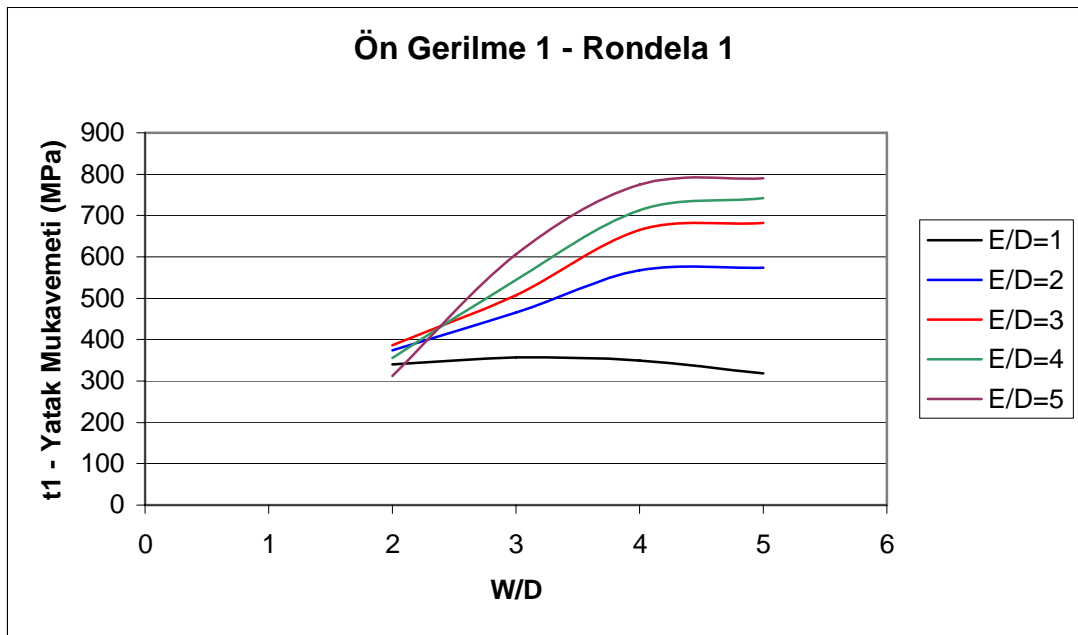
4.3.1.1 Ön Gerilme Değişiminin, Rondela Çapı Değişiminin $t=1\text{mm}$ Kalınlığındaki Deney Numunelerinde Yuva Hasarına Etkisi

Yapılan deneylerin sonuçlarını ön gerilme değişimi ve rondela çapı değişimi açısından düzenleyecek olursak; (Şekil 4.29 – 38)

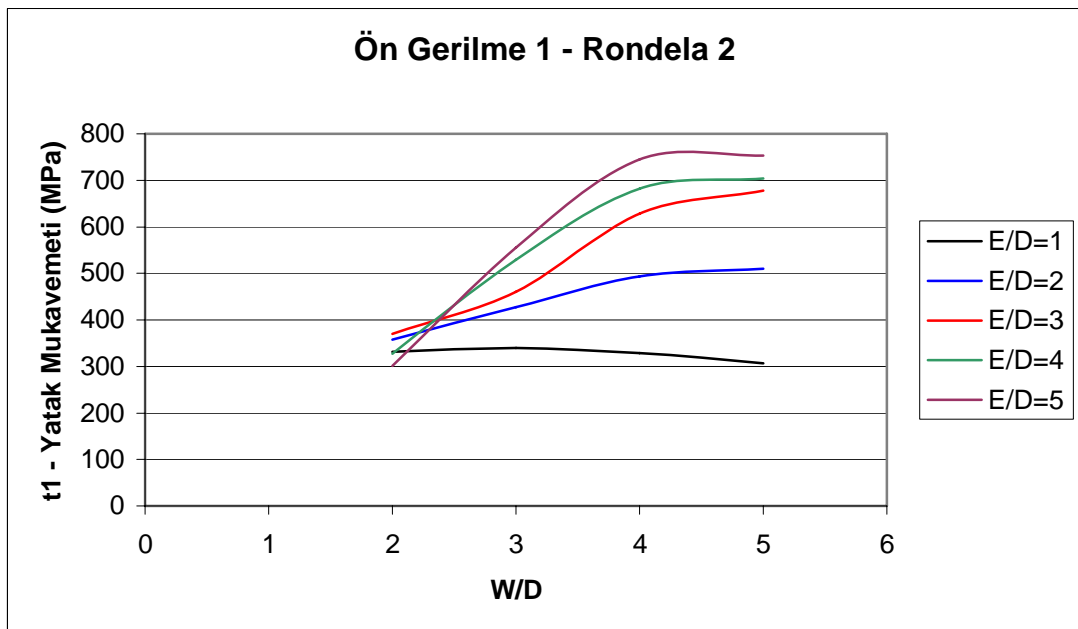
- Ön gerilme uygulanmayan numunelerin yatak(yuva) mukavemetlerindeki değişim incelendiğinde $E/D=1$ hariç tüm E/D değerleri için W/D deki artışın yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olduğu görülmüştür. (Şekil 4.29)
- Ön gerilme uygulanmayan numunelerin yatak(yuva) mukavemetlerindeki değişim incelendiğinde, $E/D=1$ dışında kalan E/D değerlerinin artması tüm W/D değerleri için yatak(yuva) mukavemetinde artışa sebep olmuştur. (Şekil 4.34)
- R_1 veya R_2 çaplı rondela kullanılarak ön gerilme momenti (M_1 , M_2) uygulanan numuneler üzerinde inceleme yapıldığında; $E/D=1$ hariç diğer tüm E/D değerleri için W/D 'nin artması yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur. (Şekil 4.30-33)
- R_1 çaplı rondela veya R_2 çaplı rondela ile M_1 ve M_2 ön gerilme momentleri, uygulanan numuneler üzerinde inceleme yapıldığında; E/D 'nin artması $W/D=2$ hariç diğer tüm W/D değerleri için yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur. (Şekil 4.35-38)



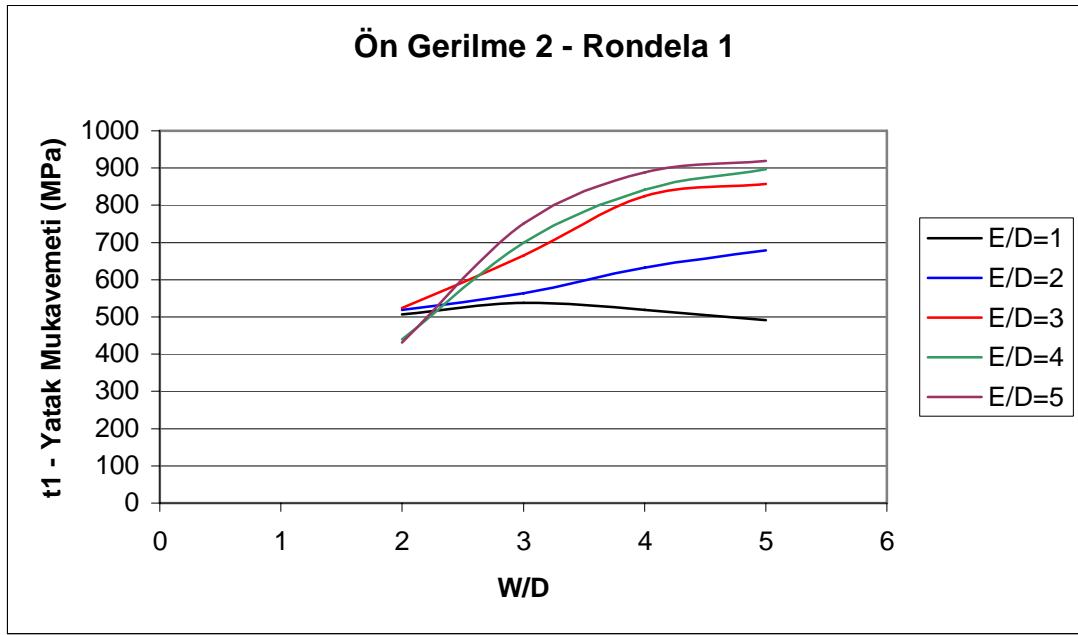
Şekil 4.29 $t=1\text{mm}$, ön gerilmesiz numunelerdeki E/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



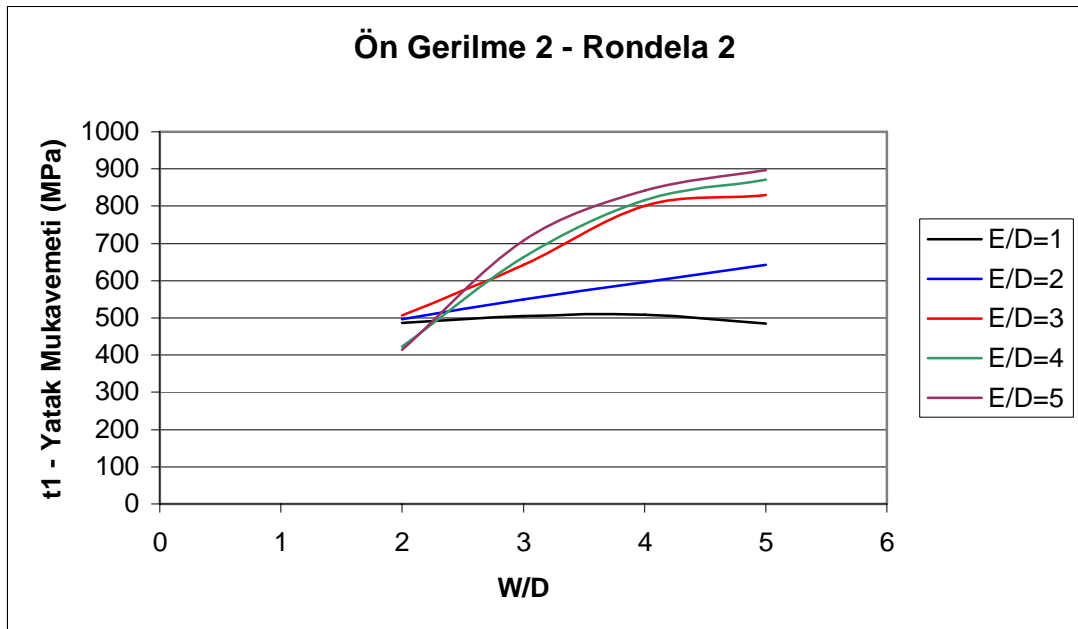
Şekil 4.30 $t=1\text{mm}$, ön gerilme 1 – rondela 1 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



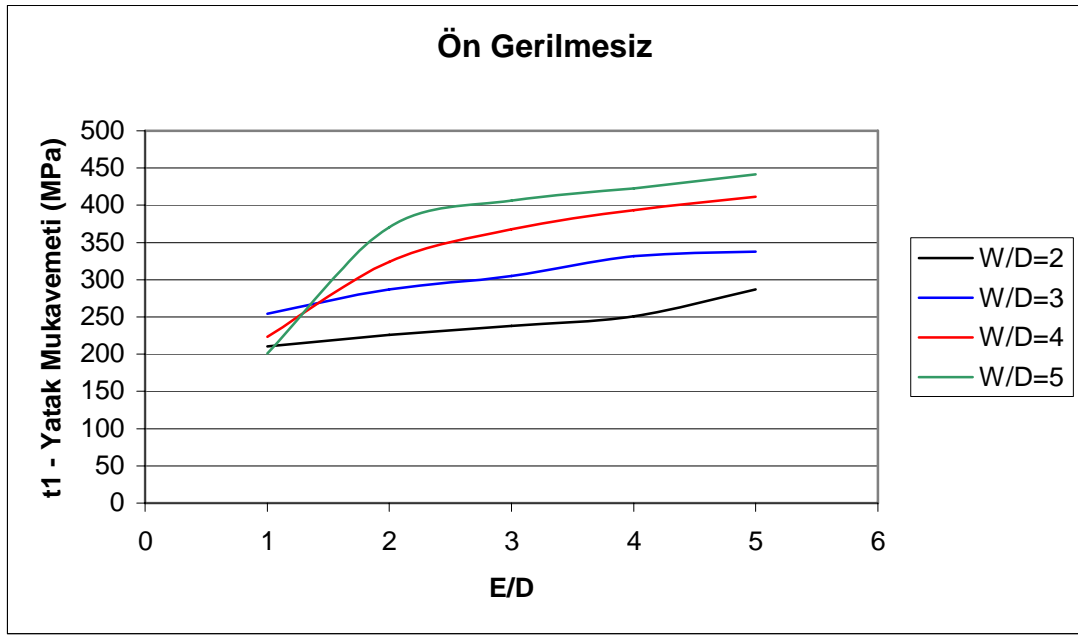
Şekil 4.31 $t=1\text{mm}$, ön gerilme 1 – rondela 2 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



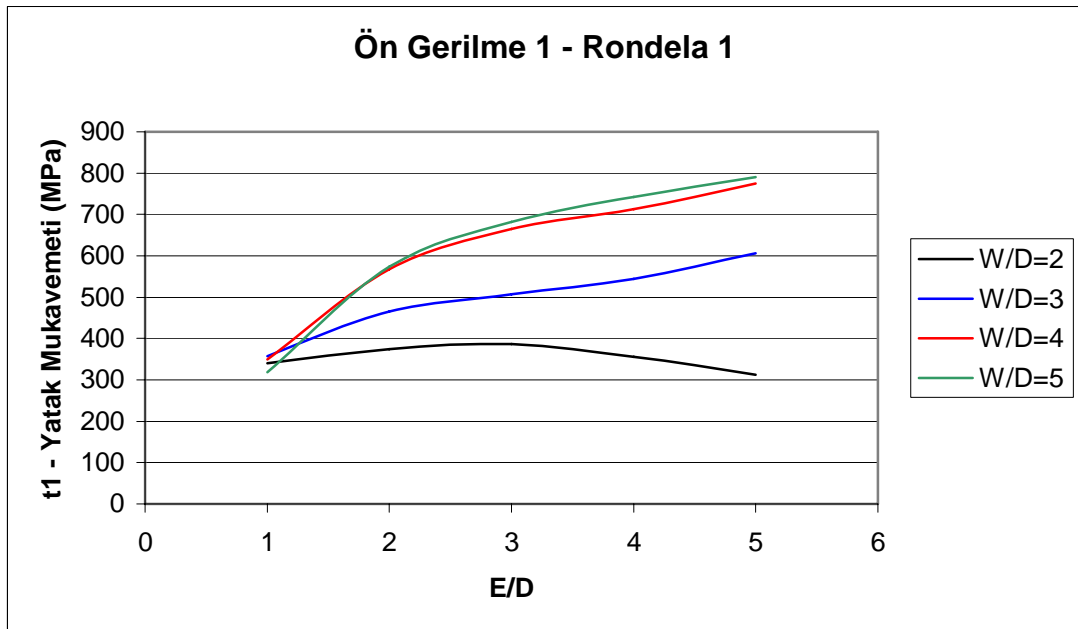
Şekil 4.32 $t=1\text{mm}$, ön gerilme 2 – rondela 1 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



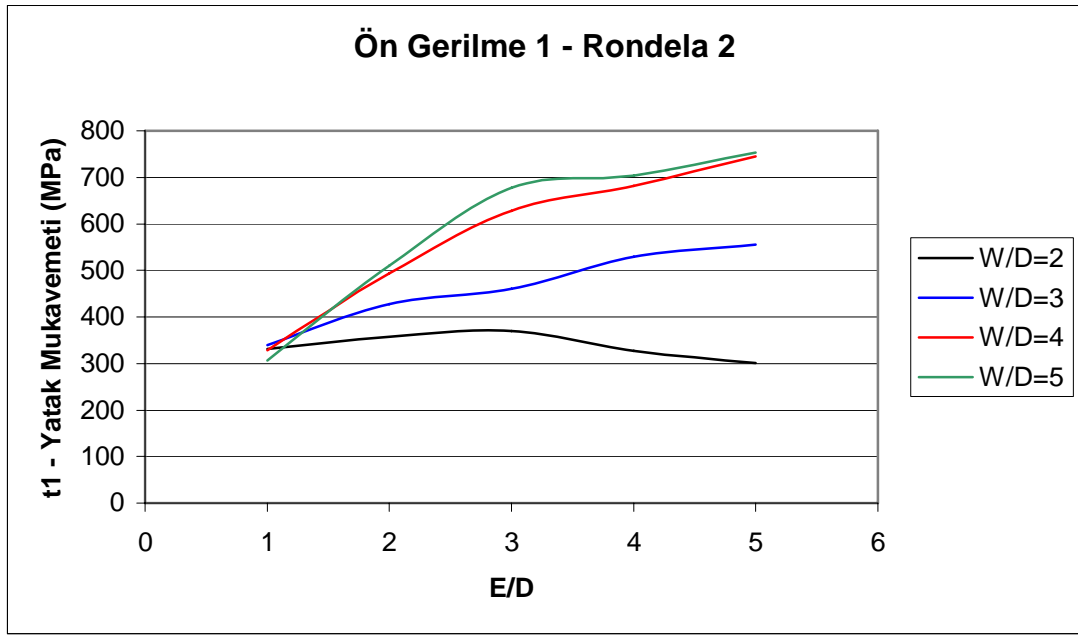
Şekil 4.33 $t=1\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 2 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



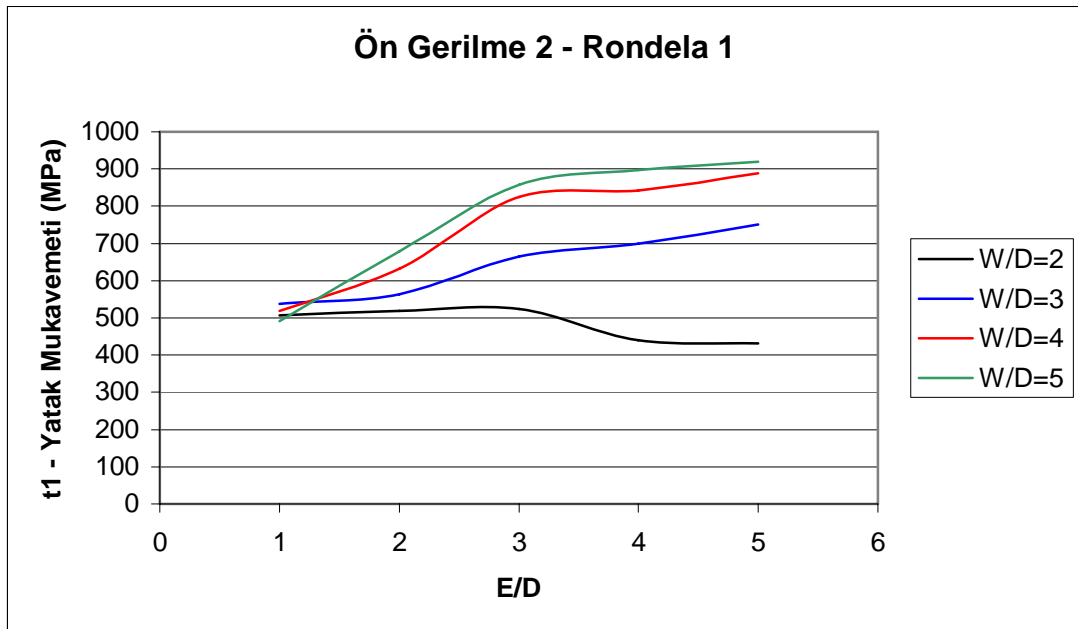
Şekil 4.34 $t=1\text{mm}$, ön gerilmesiz numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



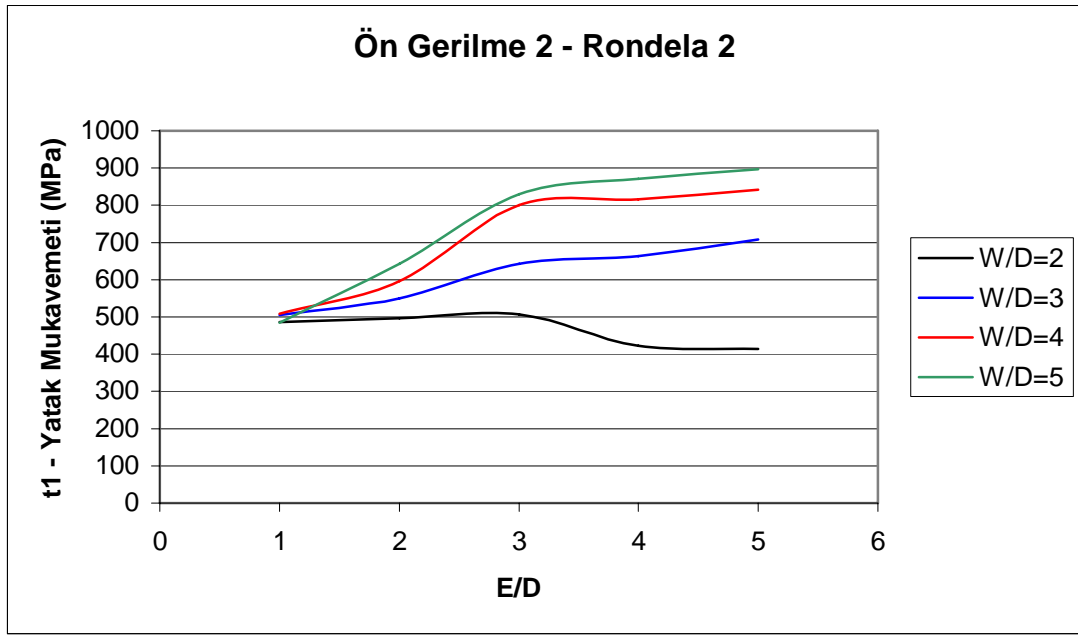
Şekil 4.35 $t=1\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 1 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



Şekil 4.36 $t=1\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 2 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



Şekil 4.37 $t=1\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 1 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



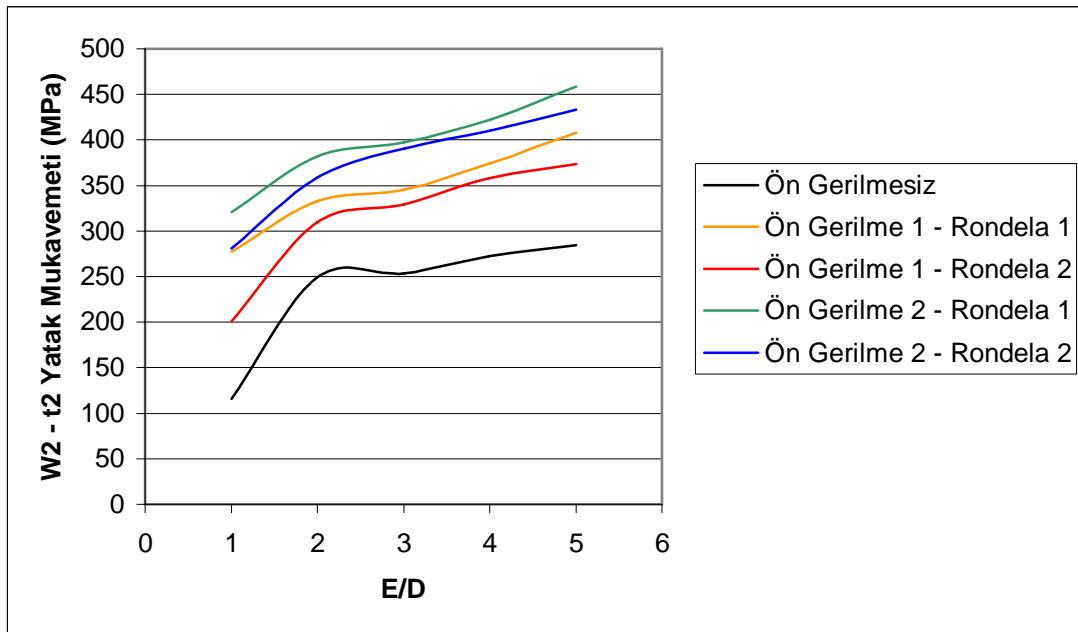
Şekil 4.38 $t=1\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 2 numunelerdeki W/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.

4.3.2 $t=2\text{mm}$ Kalınlığındaki Numunelerden Elde Edilen Deney Sonuçları

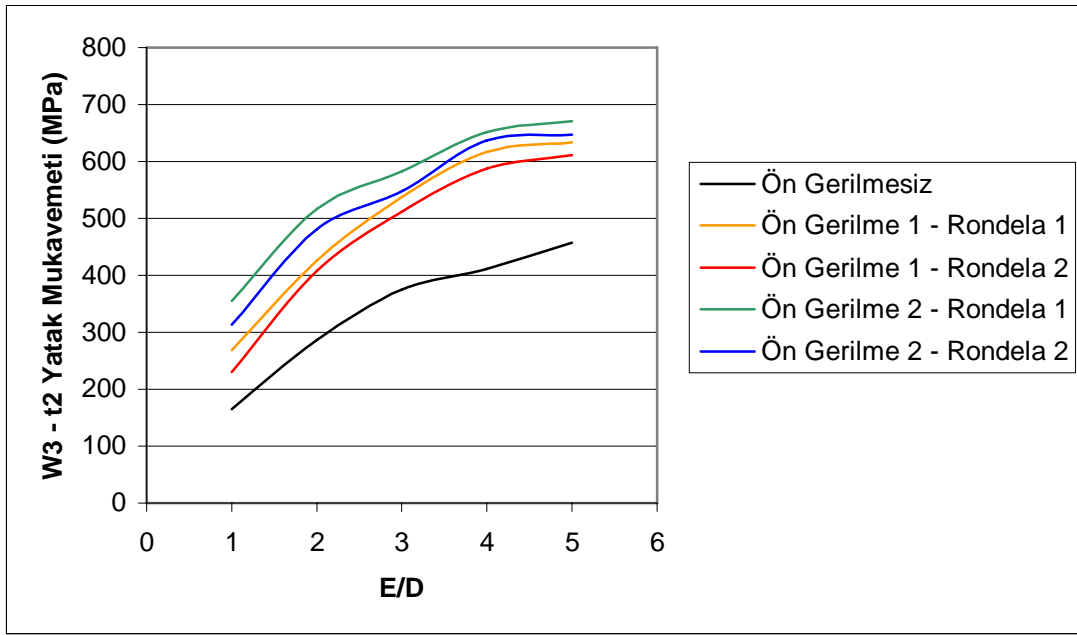
Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır; (Şekil 4.39 – 47)

- Tüm W/D değerleri için E/D'nin artmasıyla, yatak(yuva) mukavemetinde de bir artış görülmüştür.
- Tüm W/D oranları için kritik E/D noktası ise 2 noktasıdır. Bu noktadan sonra yatak(yuva) mukavemeti artışındaki lineerlik azalmıştır.
- $E/D = 1$ hariç diğer tüm E/D oranlarında W/D deki artış, yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur.
- $E/D = 1$ için kritik W/D noktası 3 noktasıdır. Bu noktadan sonra yatak(yuva) mukavemetinde genel olarak bir azalma görülmüştür. W/D oranının artması ile rijitlik artmış ve şekil değiştirme oranı düşmüştür. Bu yüzden malzeme düşük kuvvetlerde kopmuştur.
- Tüm E/D oranları için W/D kritik noktası 3 noktasıdır. $E/D = 1$ hariç diğer E/D oranlarında bu noktadan sonra yatak(yuva) mukavemeti artışındaki lineerlik azalmıştır.

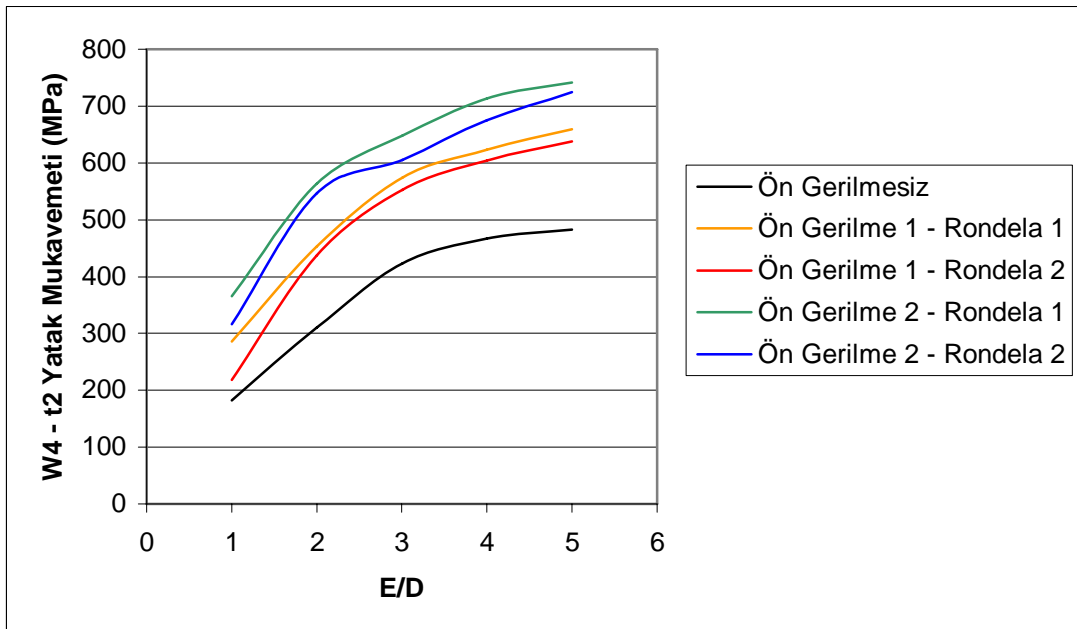
- Ön gerilme momentleri M_1 ve M_2 'nin etkileri incelendiğinde ön gerilme momentinin artışı yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur ($M_2 > M_1$)
- Rondela çapının etkisi incelendiği zaman ($R_2 > R_1$) R_1 çaplı rondela üzerinden uygulanan ön gerilme momentleri ile yapılan birleştirmelerin yatak(yuva) mukavemetlerinin R_2 çaplılara göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Büyük çaplı rondela (R_2) üzerine gelen normal kuvvetin numune üzerinde geniş bir alana yayılması sonucunda numune daha düşük kuvvetlerde kopmuştur. Tam tersi etki küçük çaplı rondela üzerinde oluşmuş ve numune daha yüksek kuvvetlere dayanabilmiştir. Nedeni büyük çaplı rondela ile yapılan birleştirmelerde normal kuvvetin küçük olması nedeni ile sürtünme kuvvetinin de küçük olması ve çekme kuvvetinin sürtünme kuvvetini kolayca yenerek bağlantının kuvveti civata delik cidarı üzerinden aktarmaya erken başlamasıdır.



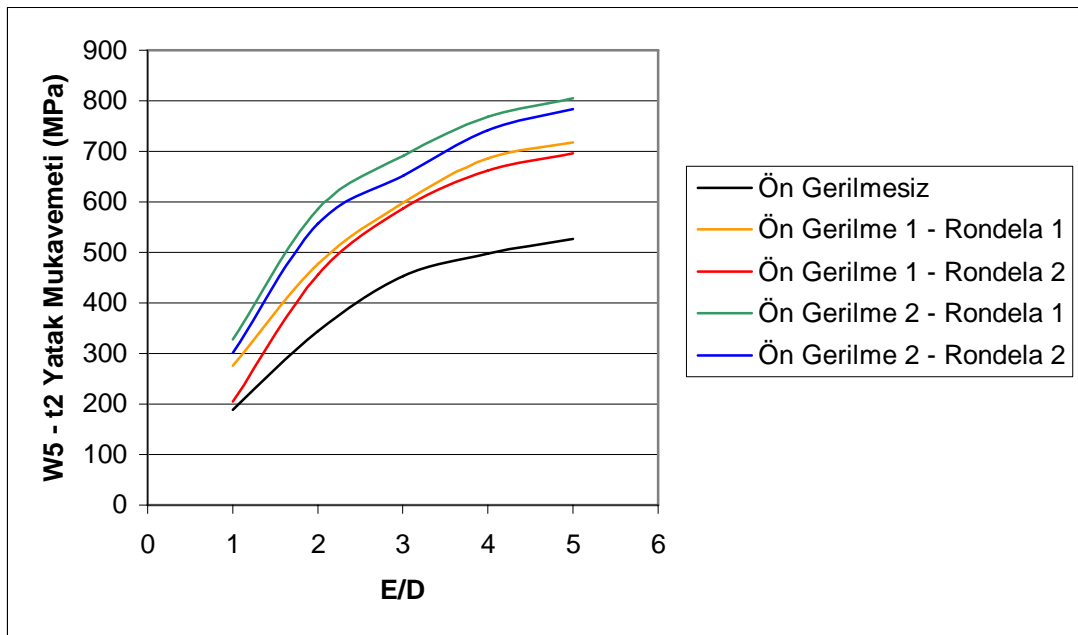
Şekil 4.39 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $W/D=2$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



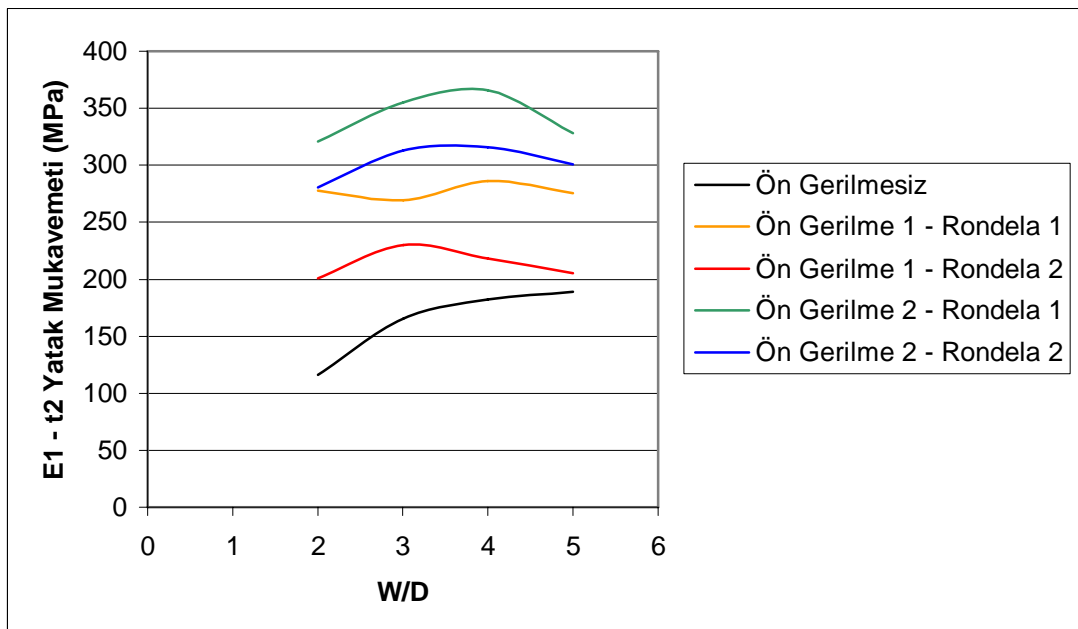
Şekil 4.40 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $W/D=3$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



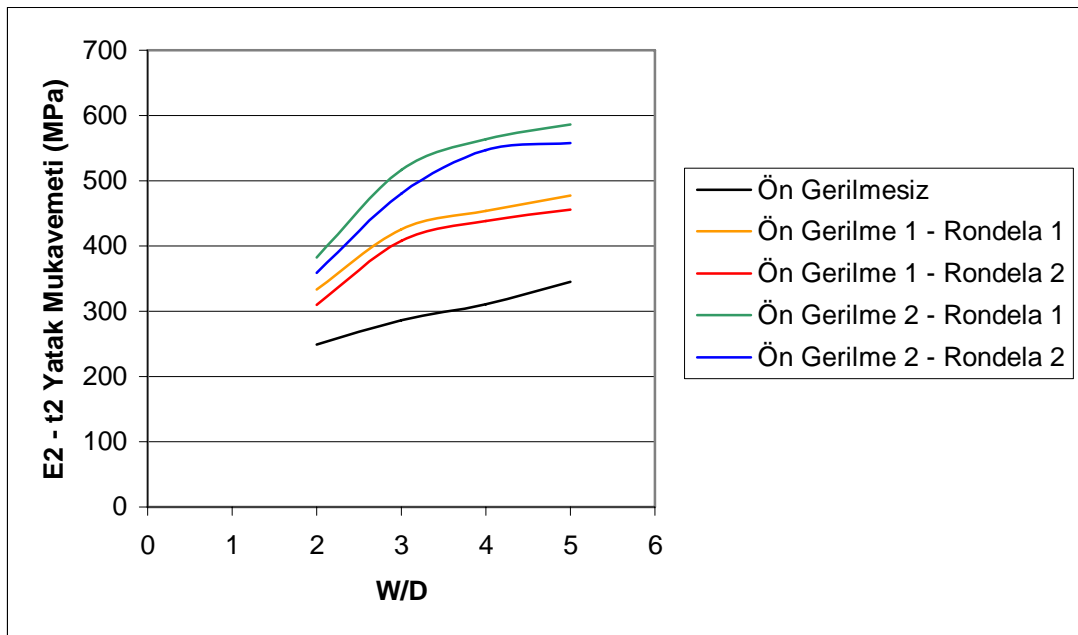
Şekil 4.41 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $W/D=4$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



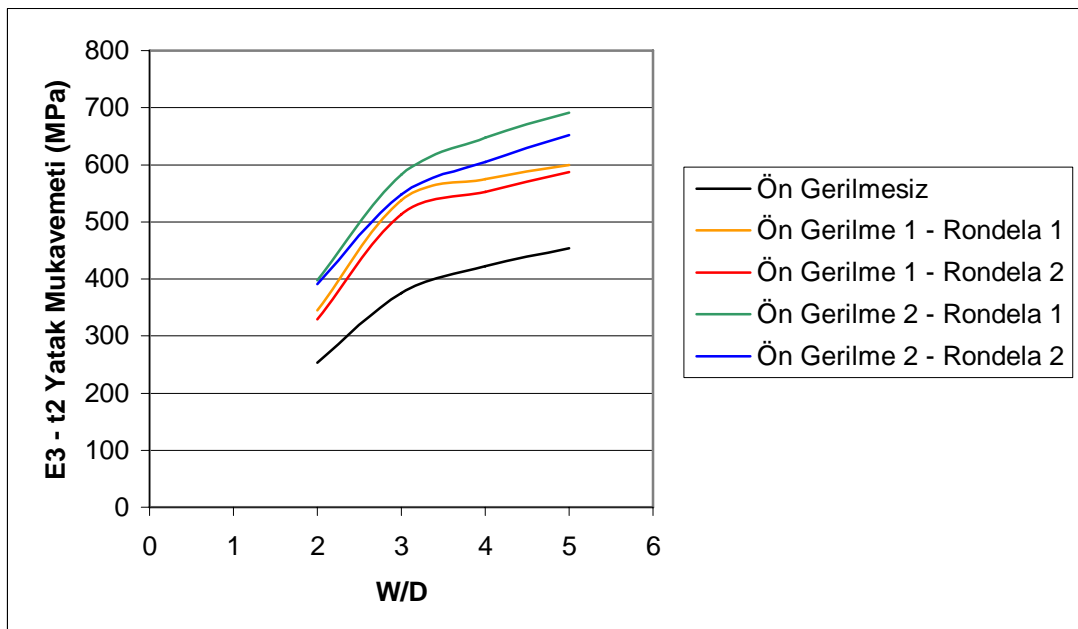
Şekil 4.42 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $W/D=5$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin E/D oranına göre değişimi.



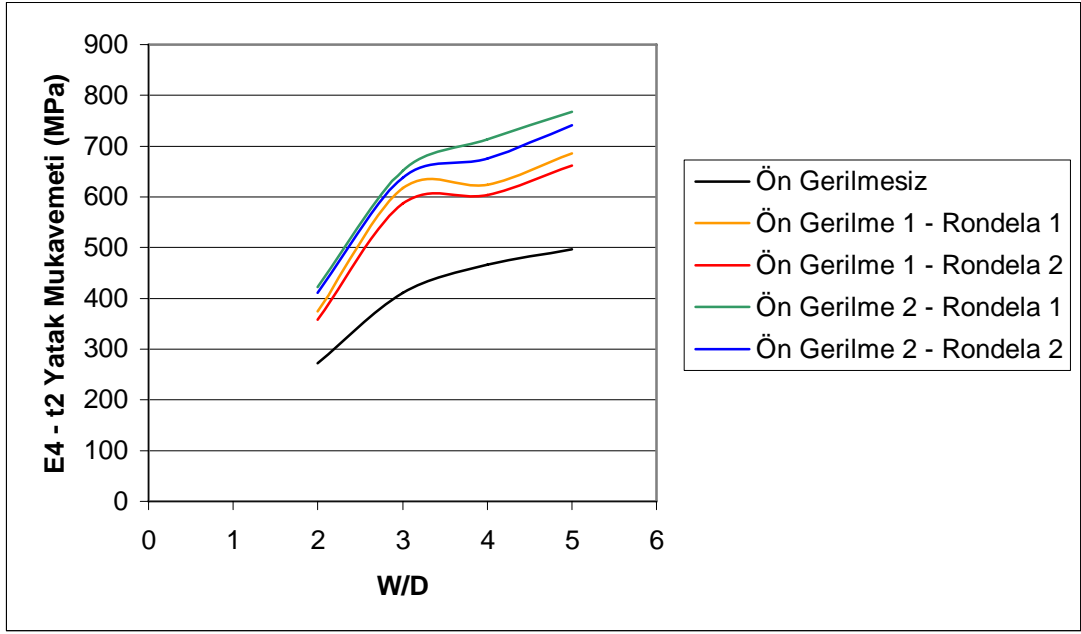
Şekil 4.43 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $E/D=1$ 'iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



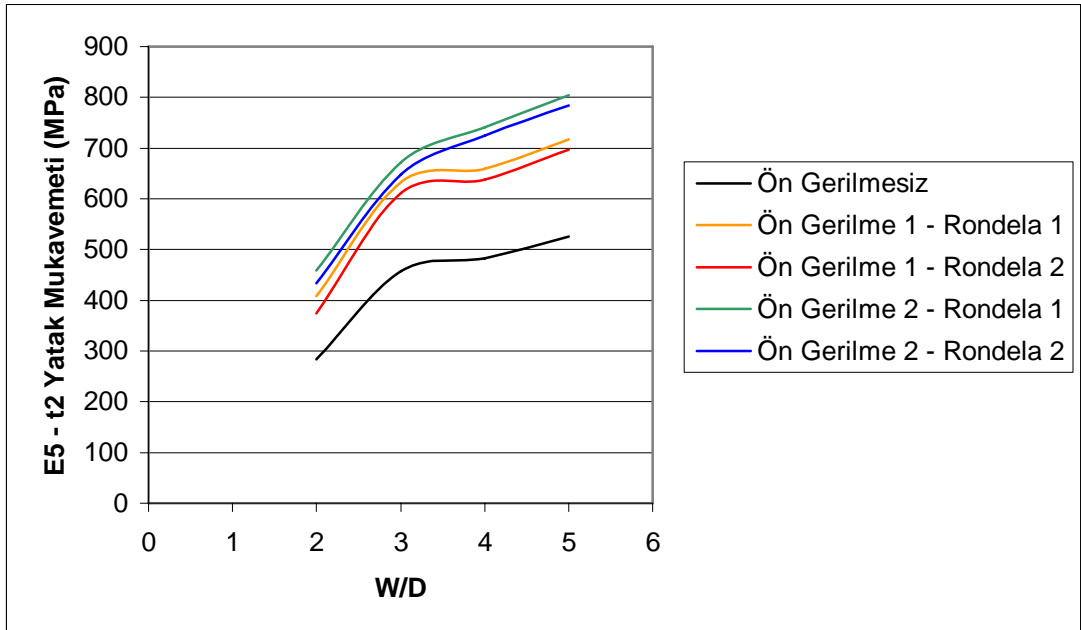
Şekil 4.44 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $E/D=2$ ' iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



Şekil 4.45 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $E/D=3$ ' iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.



Şekil 4.46 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $E/D=4$ ' iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.

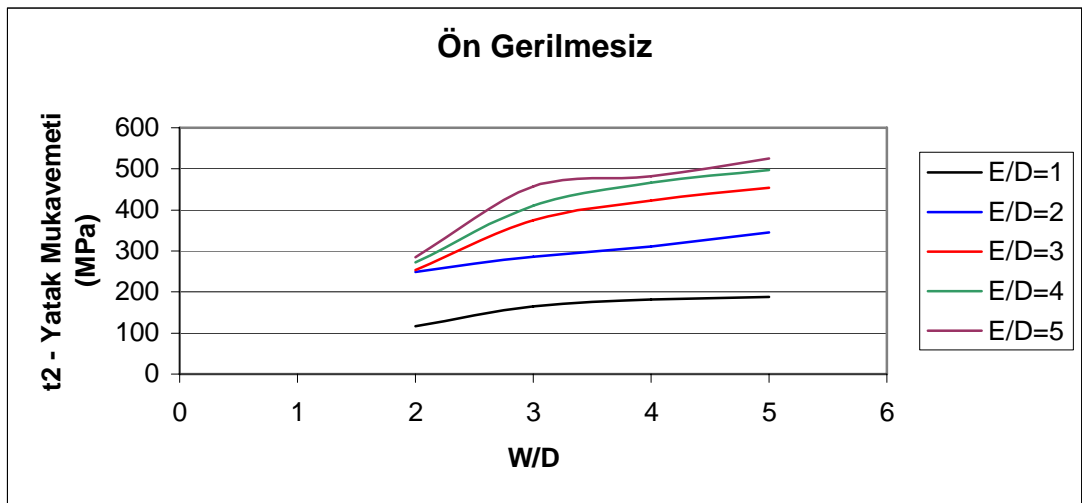


Şekil 4.47 $t=2\text{mm}$ kalınlığında $E/D=5$ ' iken 0° 90° yönlenme açısına sahip cam lifi – epoksi kompozit plakaların yatak mukavemeti değerlerinin W/D oranına göre değişimi.

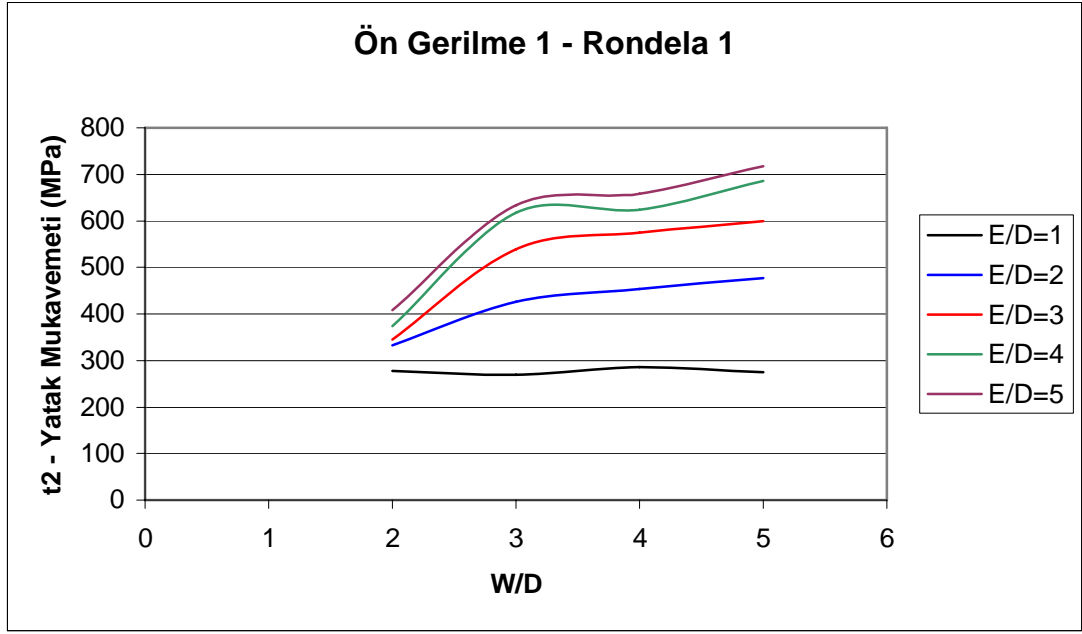
4.3.2.1 Ön Gerilme Değişiminin, Rondela Çapı Değişiminin $t=2\text{mm}$ Kalınlığındaki Deney Numunelerinde Yuva Hasarına Etkisi

Yapılan deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır; (Şekil 4.48 – 57)

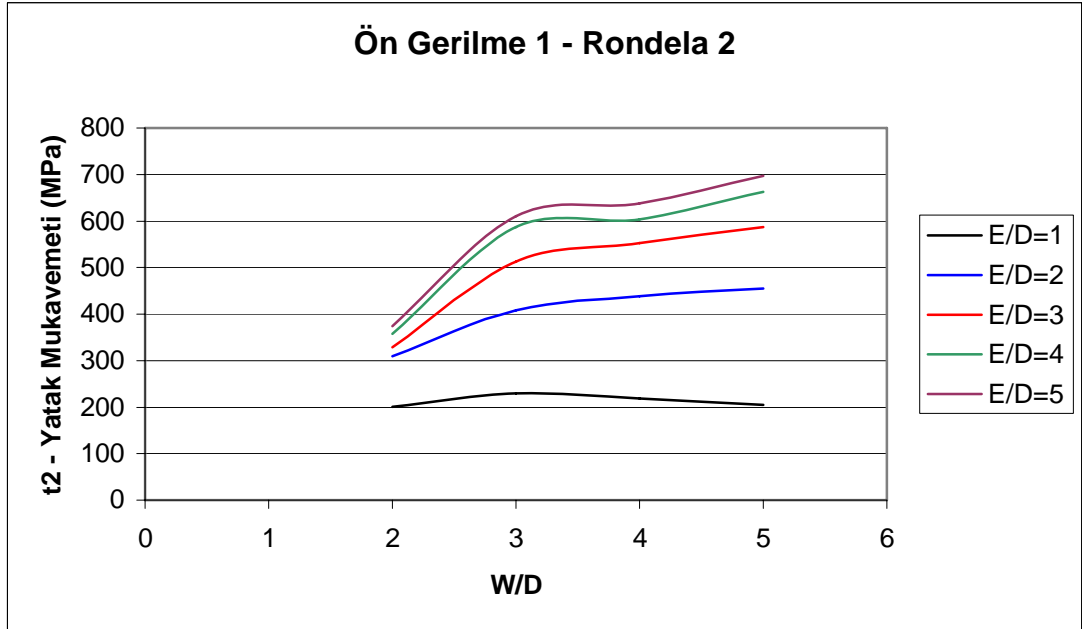
- Ön gerilme uygulanmayan numunelerin yatak(yuva) mukavemetlerindeki değişim incelendiğinde, W/D 'nin artması tüm E/D değerleri için yatak(yuva) mukavemetinde artışa sebep olmuştur. (Şekil 4.48)
- Ön gerilme uygulanmayan numunelerin yatak(yuva) mukavemetlerindeki değişim incelendiğinde, E/D 'nin artmasıyla tüm W/D değerleri için yatak(yuva) mukavemeti değerleri de artmıştır. (Şekil 4.53)
- R_1 veya R_2 çaplı rondela kullanılarak ön gerilme momenti (M_1 , M_2) uygulanan numuneler üzerinde inceleme yapıldığında; $E/D=1$ hariç diğer tüm E/D değerleri için W/D 'nin artması yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa sebep olmuştur. (Şekil 4.49-52)
- R_1 çaplı rondela ile M_1 ve M_2 ön gerilme momentleri, R_2 çaplı rondela ile M_1 ve M_2 ön gerilme momentleri, uygulanan numuneler üzerinde inceleme yapıldığında; tüm E/D değerleri için W/D değerinin artması yatak(yuva) mukavemetinde de bir artışa neden olmuştur. (Şekil 4.54-57)



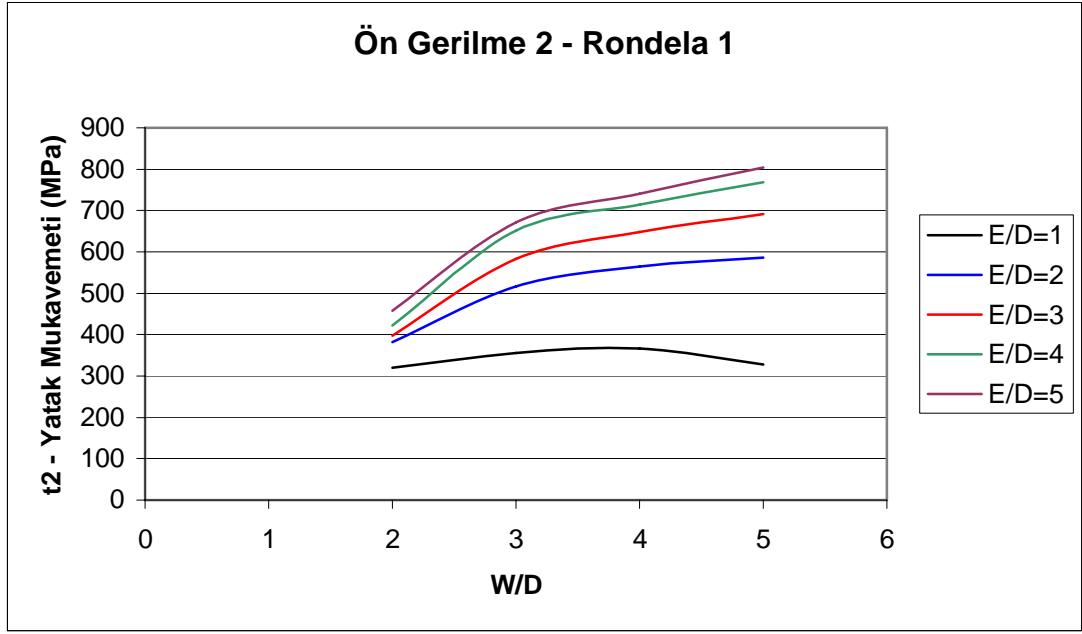
Şekil 4.48 $t=2\text{mm}$ ön gerilmesiz numunelerdeki E/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



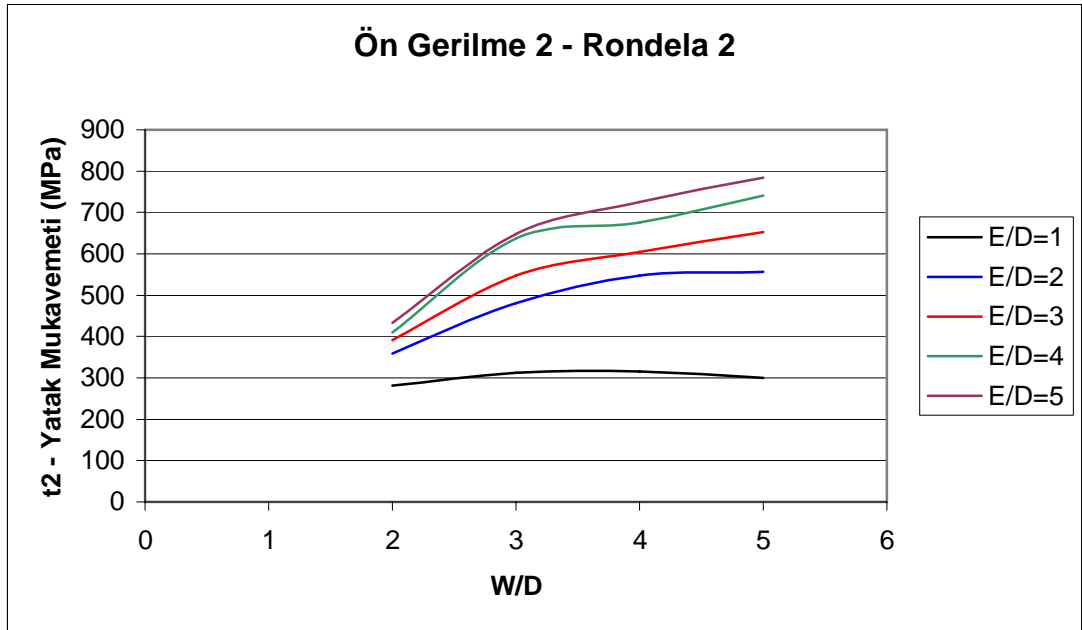
Şekil 4.49 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 1 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



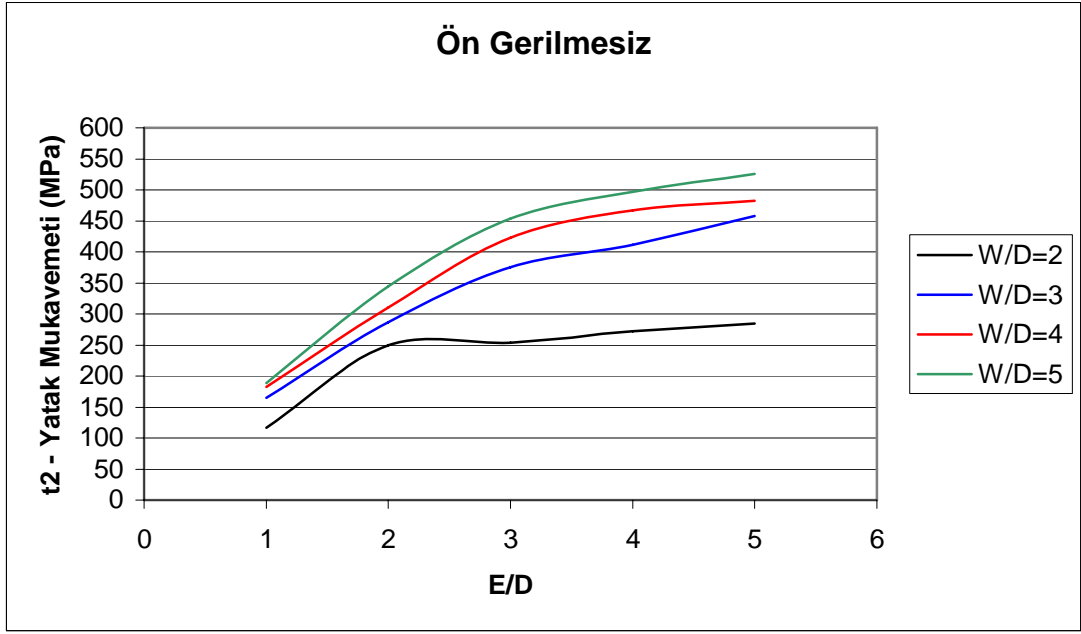
Şekil 4.50 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 2 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



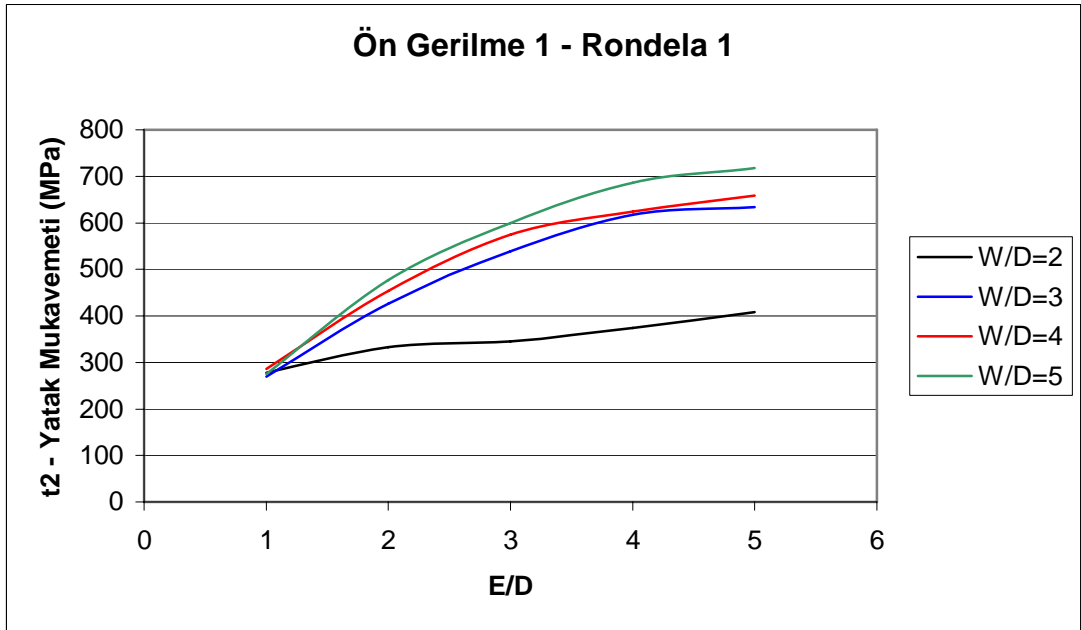
Şekil 4.51 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 1 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



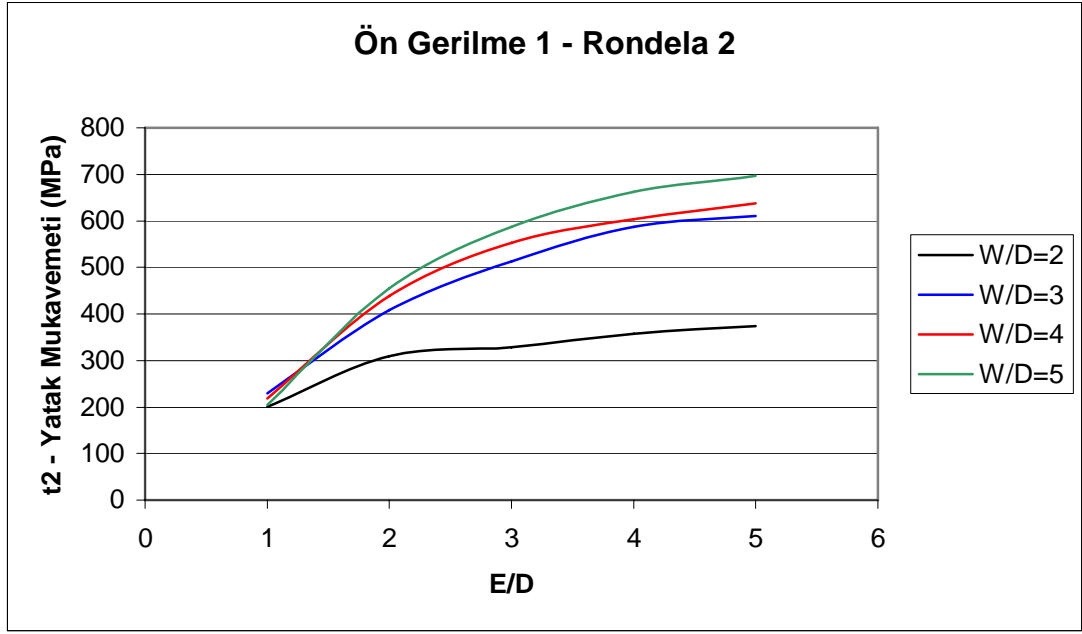
Şekil 4.52 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 2 numunelerdeki E/D'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının W/D oranlarına göre değişimleri.



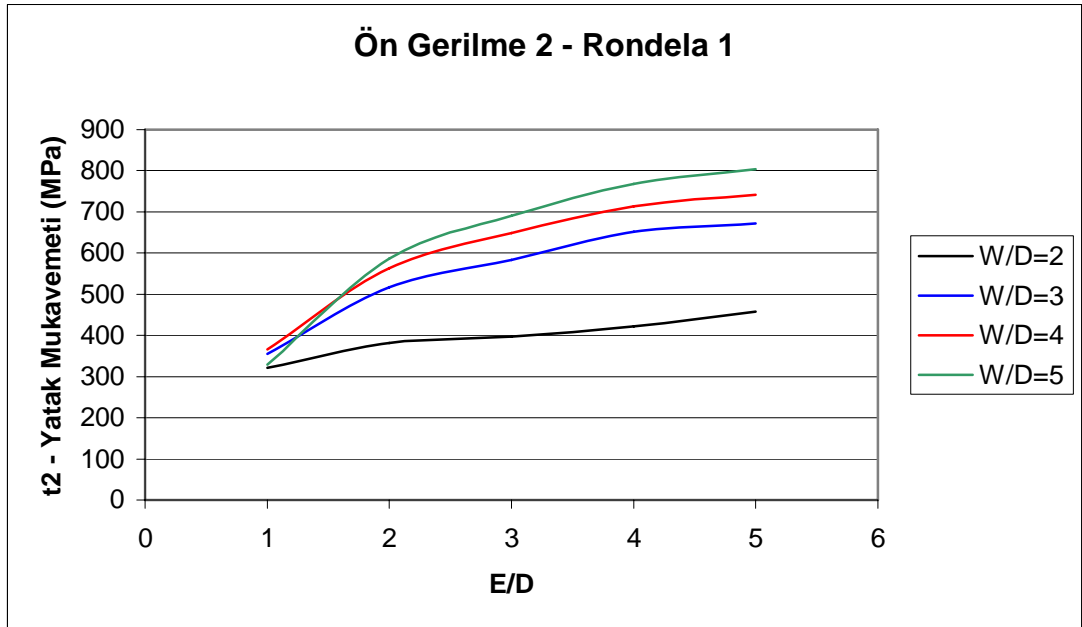
Şekil 4.53 $t=2\text{mm}$ ön gerilmesiz numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



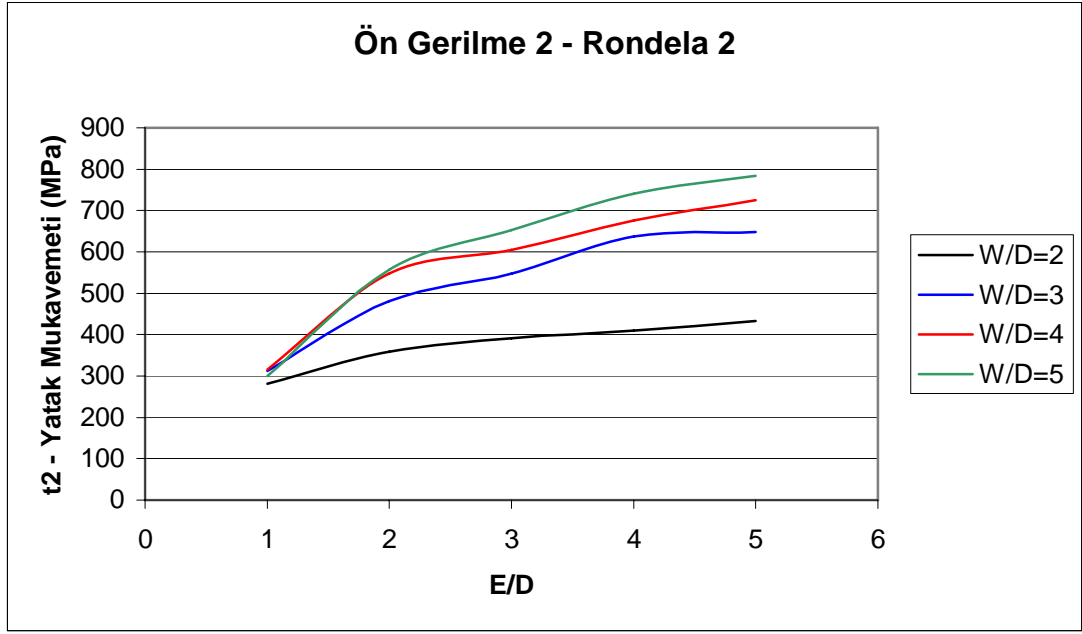
Şekil 4.54 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 1 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



Şekil 4.55 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 1 – rondela 2 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



Şekil 4.56 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 1 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.



Şekil 4.57 $t=2\text{mm}$ ön gerilme 2 – rondela 2 numunelerdeki W/D 'ye göre yatak mukavemetleri oranlarının E/D oranlarına göre değişimleri.

BÖLÜM BEŞ

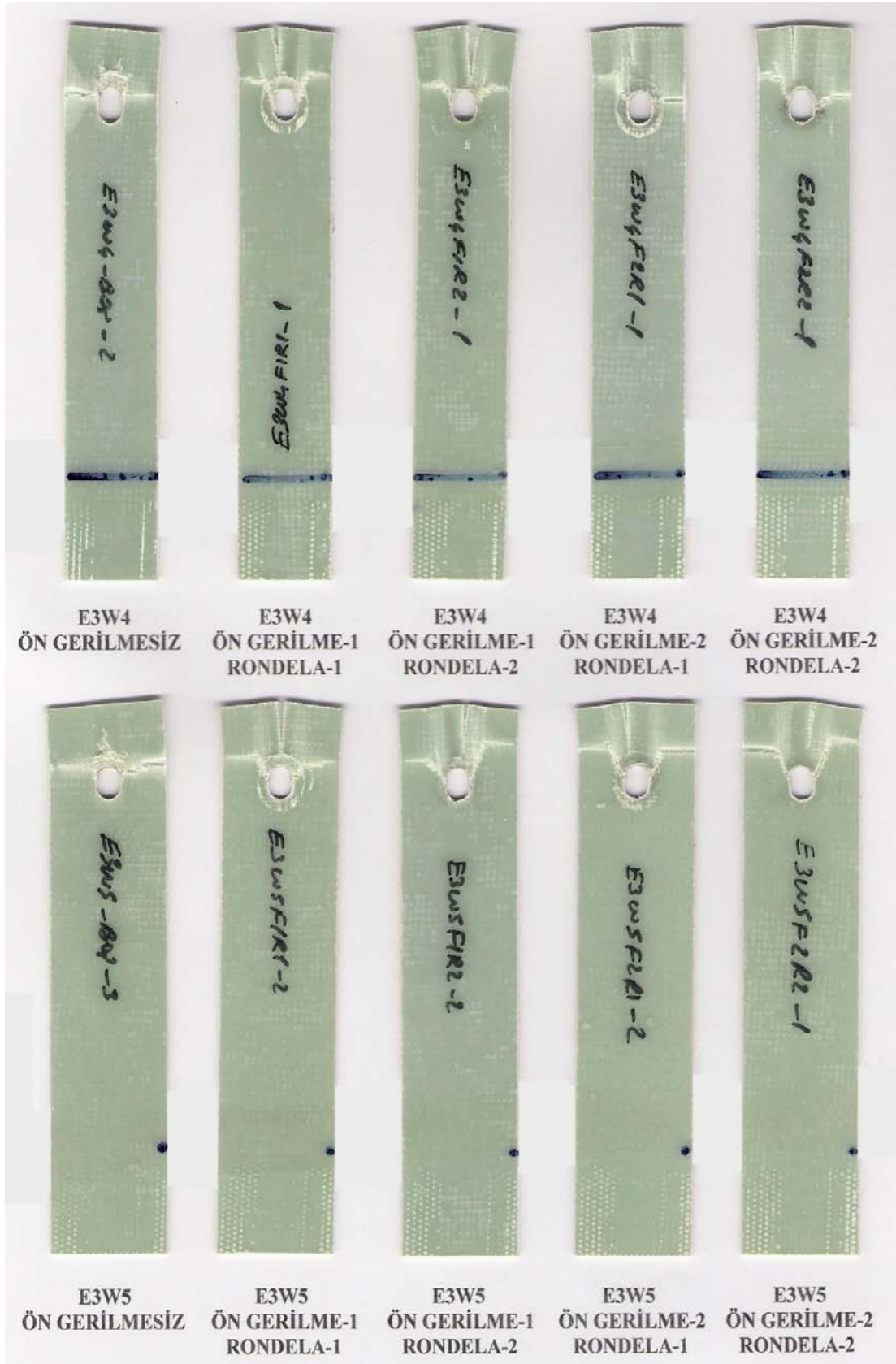
SONUÇLAR

Yapılan deneylerden üç değişik hasar türü de görülmüştür. Bu hasar türleri bazen bileşik olarak meydana gelmişlerdir. Genellikle çeki hasar türü oluşmaktadır. Bileşik hasar türlerinde bile sonuç olarak hep çeki hasarı meydana gelmiştir. Genellikle bu tür bağlantılarda oluşması istenen yatak hasarı ön yüklemeli numuneler üzerinde oluşmamış sadece ön yüksüz numuneler üzerinde oluşmuştur. Bu hasarların görüldüğü numunelerden bazı örnekler Şekil 5.1-4 de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

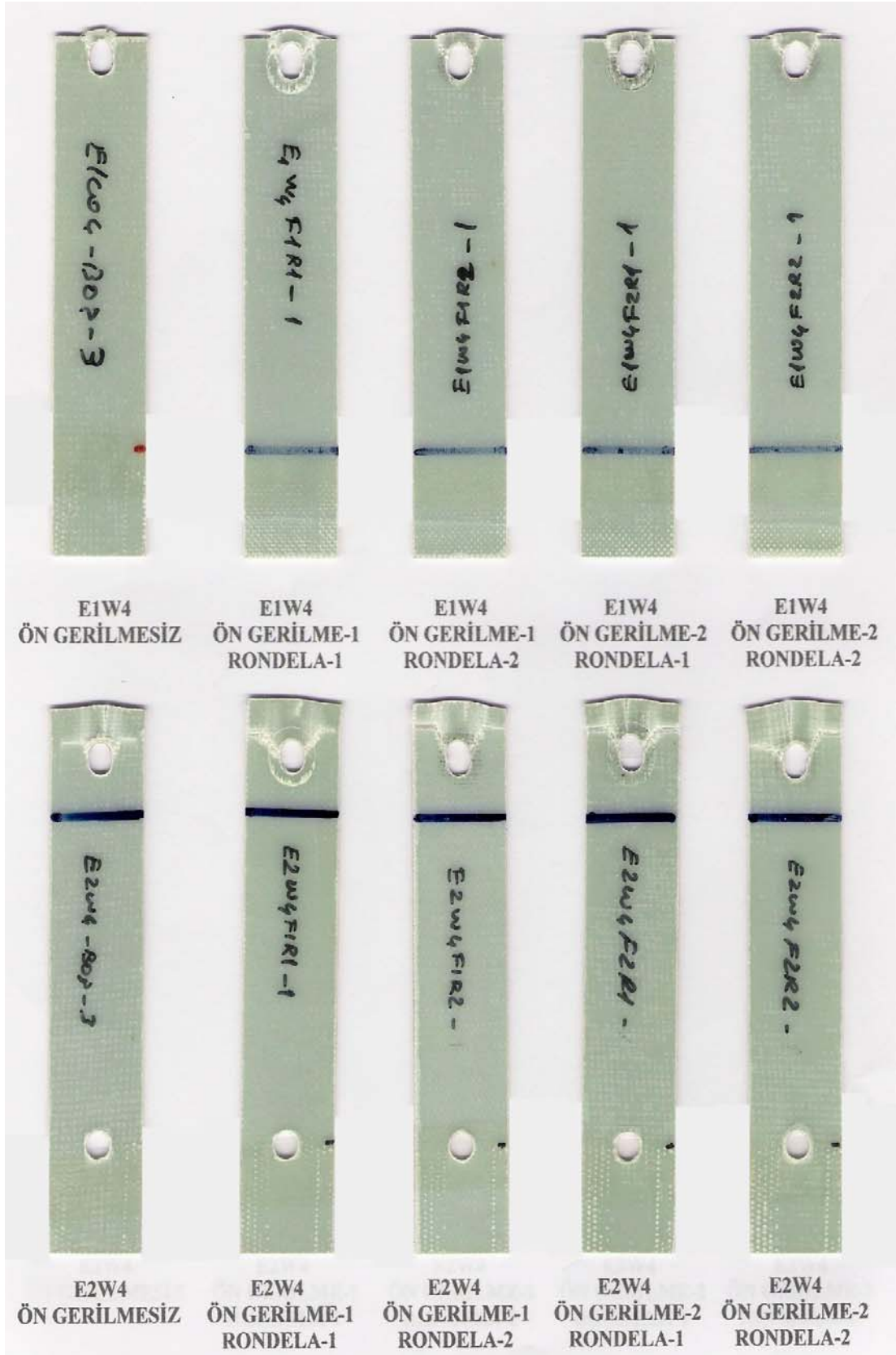
- $W/D=2$ iken diğer parametreler ne olursa olsun çeki hasarı oluştuğu görülmüştür.(Şekil 5.1 & Tablo 5.1)
- W/D değerinde ki artış $E/D=2$ iken hasar türünün çeki hasarından kayma hasarına doğru değiştiği saptanmıştır. (Tablo 5.1)
- W/D değeri ile birlikte E/D değerinin de artışı çeki hasarının bileşik hasarlara doğru değiştiği görülmektedir. Ama bileşik hasarlar sonucunda genelde yine çeki hasarı meydana gelmektedir.(Tablo 5.1)
- Deneylerden, yatak hasarının sadece ön gerilme uygulanmayan numuneler üzerinde oluştuğu görülmektedir.(Şekil 5.1-4)
- Rondela çapının etkisi incelendiği zaman ($R_2 > R_1$) R_1 çaplı rondela üzerinden uygulanan ön gerilme momentleri ile yapılan birleştirmelerin yatak(yuva) mukavemetlerinin R_2 çaplılara göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.
- Ön gerilme momentinin büyümesi ile yatak(yuva) mukavemetinde artış olduğu görülmüştür.
- Yapılan deneylerde, deneyde kullanılan civatanın daha yüksek yüklemelerde deforme olmasından dolayı kısıtlı bir ön yükleme yapılabilmektedir. Ama ön yükleme momentinin artışı ile birlikte rondela çapının da artırılması ile daha yüksek yatak mukavemetlerine ulaşılabilirliği kanısına varılmıştır.



Şekil 5.1 Ön gerilme değişiminin, rondela çapı değişiminin $t=1\text{mm}$ kalınlığındaki E3W2 – E3W3 boyutlu deney numuneleri üzerindeki hasar şeklinin görünüşü.



Şekil 5.2 Ön gerilme değişiminin, rondela çapı değişiminin $t=1\text{mm}$ kalınlığındaki E3W4 – E3W5 boyutlu deney numuneleri üzerindeki hasar şeklinin görünüşü.



Şekil 5.3 Ön gerilme değişiminin, rondela çapı değişiminin $t=1\text{mm}$ kalınlığındaki E1W4 – E2W4 boyutlu deney numuneleri üzerindeki hasar şeklinin görünüşü.



Şekil 5.4 Ön gerilme değişiminin, rondela çapı değişiminin $t=1\text{mm}$ kalınlığındaki E4W4 – E5W4 boyutlu deney numuneleri üzerindeki hasar şeklinin görünüşü.

Tablo 5.1 Deneylemler sonucunda elde edilen hasar türleri

M=0Nm		E/D				
		1	2	3	4	5
W/D	2	K	Ç	Ç	Ç	Ç
	3	K	Y-Ç	Y-Ç	Y-Ç	Y-Ç
	4	K	Y-K	Y-Ç	Y	Y
	5	K	Y-K	Y-Ç	Y	Y

R₁=10mm M=5Nm		E/D				
		1	2	3	4	5
W/D	2	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç
	3	K	Ç	Ç	Ç	Ç
	4	K	K	K-Ç	Y-Ç	Y-Ç
	5	K	K	K-Ç	Y-Ç	Y-Ç

R₂=16mm M=5Nm		E/D				
		1	2	3	4	5
W/D	2	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç
	3	K	Ç	Ç	Ç	Ç
	4	K	K	K-Ç	K-Ç	Y-Ç
	5	K	K	K-Ç	K-Ç	Y-Ç

R₁=10mm M=10Nm		E/D				
		1	2	3	4	5
W/D	2	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç
	3	K	Ç	Ç	Ç	Ç
	4	K	K	K-Ç	Y-Ç	Y-Ç
	5	K	K	K-Ç	Y-Ç	Y-Ç

R₂=16mm M=10Nm		E/D				
		1	2	3	4	5
W/D	2	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç
	3	K	Ç	Ç	Ç	Ç
	4	K	K	K-Ç	K-Ç	Y-Ç
	5	K	K	K-Ç	K-Ç	Y-Ç

Ç : Çekme hasarı

K : Kayma hasarı

Y: Yuva hasar

KAYNAKLAR

- Akkuş A. (2005) Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading. *Composite Structures* 67, 485-489. Available online April 10, 2004, from <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- Dano M.L , Gendron G. , Picard A. (2000) and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates. *Composite Structures* 50 (2000) 287-296. from <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>
- İçten B.M. , Karakuzu R. (2002) Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates. *Composite Science and Technology* 62, 1259-1271. Accepted April 22, 2002, from <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>
- Jones, R.M. (1998) *Mechanics of Composite Materials* (2nd edition) Taylor&Francis Inc.
- Kelly G. , Hallström S. (2004) Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance. *Composites, Part B* 35, 331-343. Accepted November 12, 2003, from <http://www.elsevier.com/locate/compositesb>
- McCarthy M.A. , Lawlor V.P , Stanley W.F , McCarthy C.T (2002) Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints *Composite Science and Technology* 62 1415-143. Accepted May 16, 2002, from <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>
- Okutan B. (2002) The effects of geometric parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminate. *Composites, Part B* 33, 567-578. Accepted July 28, 2002, from <http://www.elsevier.com/locate/compositesh>

Okutan B., Karakuzu R. (2003) The strength of pinned joints in laminated composites. *Composite Science and Technology* 63,893-905. Accepted November 28, 2002, from <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>

Sayman, O. ve Aksoy, S. (1980), *Kompozit Malzemeler*. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Whitworth H.A , Othieno M. , Barton O. (2003) Failure analysis of composite pin loaded joints. *Composite Structures* 59 (2003) 261-266. from <http://www.elsevier.com/locate/compstruct>