T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT KÖŞE BAĞLANTILARININ MUKAVEMETİNİN ARTTIRILMASI

TUĞÇE İŞGÜZAR

DANIŞMAN
DR. ÖĞR.ÜYESİ LÜTFİ EMİR SAKMAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

İSTANBUL-2019

T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT KÖŞE BAĞLANTILARININ MUKAVEMETİNİN ARTTIRILMASI

TUĞÇE İŞGÜZAR

DANIŞMAN
DR. ÖĞR.ÜYESİ LÜTFİ EMİR SAKMAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 01.07.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Dr.Öğr.Üyesi Lütfi Emir Sakman
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Fakültesi

Prof. Dr. Erol Uzal
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI
Konya Teknik Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

ÖNSÖZ

Malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, kompozit malzemelerin otomotiv, yapı, uzay, mobilya ve birçok alanda kullanımı yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. Bunun yanında farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi yardımcı donanım olarak da kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, uzun ömürlülük, hafiflik, yüksek kimyasal ve mekanik dayanım, ısıl iletkenlik ve estetiklik özellikleri yönüyle klasik malzemelere kıyasla birçok avantaja sahiptir. Pek çok sektörde yaygın şekilde kullanılan kompozit malzemeler üzerindeki bilimsel çalışmalar da günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmayla, cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden oluşan köşe bağlantılarının mukavemetinin arttırılması konusunu inceleyerek önemli bir bilgi elde edinileceğine inanmakta ve gelecekte bu alandaki çalışmalar için faydalı olacağını umut etmekteyim.

Yükseklisans tezimi kompozit malzemeler üzerine yapmaya karar verdiğim günden, araştırmalarımın sonuçlandığı zamana kadar geçen sürede bilgi birikimi ve tecrübesiyle desteğini eksik etmeyen başta tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Lütfi Emir Sakman'a, laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Arş. Gör. Mehmet Güçlü'ye ve hiçbir zaman manevi desteklerini eksik etmeyen çok kıymetli hocalarıma ve aileme teşekkür ederim.

Haziran, 2019 Tuğçe İŞGÜZAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİL LİSTESİ iii
TABLO LİSTESİ v
ÖZET vii
SUMMARY vii
1. GİRİŞ 1
2. GENEL KISIMLAR 3
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHÇESİ 3
2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI 4
2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJLARI 5
2.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN DEZAVANTAJLARI 6
2.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI 6
2.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI 9
2.7. KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN TEMEL MADDELER 11
2.8. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ 15
2.9. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ 19
2.10. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 23
3. MALZEME VE YÖNTEM 29
4. BULGULAR 388
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 599
KAYNAKÇA 622
ÖZGEÇMİŞ 666

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Kaynak, perçin ve yapıştırıcı ile meydana gelen gerilme yığılmaları 2
Şekil 2.1: Kompozit bir yapının temel elemanları 5
Şekil 2.2.: A380 yolcu uçağının malzeme bileşimi 8
Şekil 2.3.: Elyaf türlerinin çekme yükü altındaki birim uzamaları 12
Şekil 2.4.: Elle yatırma yöntemi 15
Şekil 2.5.: Püskürtme yöntemi 16
Şekil 2.6.: Elyaf sarma yöntemi 17
Şekil 2.7.: Enjeksiyon üretim yöntemi 17
Şekil 2.8.: Vakum altında şekillendirme. 18
Şekil 2.9.: Pultruzyon yöntemi. 18
Şekil 2.10.: Yapışma olayının kesiti 20
Şekil 2.11: Yapışma süresi 22
Şekil 2.12.: Kalın yapıştırıcı seçimi. 22
Şekil 2.13.: Yapıştırılan malzeme yüzeyinin temizliği 22
Şekil 3.1.: Deney numunelerinin hazırlanması. 31
Şekil 3.2.: Mekanik bağlantı tipleri 31
Şekil 3.3.: Köşe yapıştırma hattındaki gerilme dağılımı. 32
Şekil 3.4.: Köşe yapıştırma hattındaki gerilme dağılımı grafiği 32
Şekil 3.5.: Mekanik bağlantı konumlandırılması. 33
Şekil 3.6.: Mekanik bağlantı numune tipleri 35
Şekil 3.7.: Mekanik bağlantı tiplerinin ölçüleri 36
Şekil 3.8.: Çekme deneyi 37
Şekil 4.1.: Çekme yükü altında malzemede meydana gelen gerilme dağılımı. 38
Şekil 4.2.: Basma yükü altında malzemede meydana gelen gerilme dağılımı 39
Şekil 4.3.: Yapıştırma bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 39
Şekil 4.4.: I1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 40
Şekil 4.5.: I2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği. 31
Şekil 4.6.: I12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 42
Şekil 4.7.: K1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği. 43
Şekil 4.8: K2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 44
Şekil 4.9.: K12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği. 45
Şekil 4.10.: U1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 46
Şekil 4.11.: U2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 47
Şekil 4.12.: U12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği 48
Şekil 4.13.: Yapıştırma bağlantılı numuneye ait basma grafiği 49
Şekil 4.14.: I1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği. 50
Şekil 4.15.: I2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 51
Şekil 4.16.: I12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 52
Şekil 4.17.: K1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 53
Şekil 4.18.: K2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 54

Şekil 4.19.: K12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 55
Şekil 4.20.: U1 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 56
Şekil 4.21.: U2 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 57
Şekil 4.22.: U12 şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği 58
Şekil 5.1.: Minimum çekme yükü karşılaştırma grafiği 59
Şekil 5.2.: Maksimum çekme yükü karşılaştırma grafiği 60
Şekil 5.3.: Minimum basma yükü karşılaştırma grafiği 60
Şekil 5.4.: Maksimum basma yükü basma grafiği 61

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1.: Kompozit malzemeleri kullanım alanlarına göre dağılımı.....7
Tablo 2.2.: Termoplastik ve termoset malzemelerin karşılaştırılması..... 11
Tablo 2.3.: Elyaf türlerine ait mekanik özellikler..... 14
Tablo 3.1.: Pultruzyon Yöntemi ile Üretilmiş Olan Kompozit Profillerin Mekanik Özellikleri 30

ÖZET

Kompozit malzemeler ve üretim yöntemlerinde özellikle son yıllarda önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Havacılık ve uzay sanayi, otomotiv, inşaat, elektrik-elektronik, deniz taşıtları, biyomedikal, spor ekipmanları vb. gibi çeşitli uygulama alanlarında kendilerine yer bulmuşlardır. Kompozit malzemelerde meydana gelen bu hızlı gelişim, yapısal elemanların birleştirme yöntemlerinde etkili ve güvenilir ilerlemelerin ortaya çıkmasını, dolayısıyla yapıştırma, dikiş ve mekanik birleştirme yöntemlerinin incelenmesini gerekli kılmıştır. Geleneksel malzemeleri birleştirmek kadar kolay olmayan kompozit malzemeleri birleştirmede mekanik ve kimyasal birleştirme teknikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Mekanik olarak cıvata, pim vb. bağlantılar, kimyasal olarak çeşitli yapıştırma teknikleri ve bunların dışında yapıştırma-dikiş teknikleri de uygulanmıştır.

Bu tez çalışmasında pultruzyon yöntemi ile üretilen; yüksek mukavemet, iyi kalıplama ve düşük maliyet özelliklerine sahip %50 cam elyaf takviyeli kompozit lamaların hem kimyasal birleştirmenin hem de kimyasal ve mekanik birleştirmelerin ikisinin de bir arada kullanıldığı bağlantı şekli kullanılmıştır. Yapıştırma için iki komponentli epoksi yapıştırıcı tercih edilmiştir. Yapıştırıcı ile birlikte I şekilli *(I)*, kırlangıç şekilli *(K)* ve dikdörtgen şekilli *(U)* metal parçalar kullanılarak *L* tipi köşebağlantısı oluşturulmuştur. Bu numunelere çekme ve basma yükleri uygulanıp, bu bağlantıların mukavemeti incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, referans numunesi olarak kabul edilen yapıştırmalı bağlantılı numunelerle, farklı geometrik şekillere sahip mekanik bağlantılı numunelerin çekme ve basma yükü altında gösterdikleri mukavemet karşılaştırıldığında önemli derecede artış gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: kompozit malzeme, yapıştırmalı bağlantı, mekanik bağlantı, pultruzyon, L tipi bağlantı.

SUMMARY

Significant improvements have occurred in composite materials and production methods in recent years. They have established a market presence. For example, aerospace industry, automotive, construction, electrical-electronics, watercraft, biomedical, sports equipment and various application areas. This rapid development of composite materials has resulted in effective and reliable advances in the connecting methods of structural elements and thus required the examination of bonding, sewing and mechanical joint methods. Connecting composite materials is not as easy as traditional materials therefore, research has been made on mechanical and chemical connecting techniques to connect composite materials. Bolts and pins in mechanical joints, various bonding techniques in chemical connections, as well as bonding-stitching techniques have been applied.

In this thesis, it was produced by pultrusion method; high strength, good molding and low cost properties of 50% fiberglass reinforced composite corner joints used both chemical bonding and chemical and mechanical bonding are used together. Two component epoxy adhesive was preferred for bonding. Together with the adhesive, I-shaped *(I)*, dovetail-shaped *(K)* and rectangular-shaped *(U)* metal parts are formed using the *L*-type corner joint. Tensile and compression loads were applied to these samples and the strength of these connections were examined and compared. As a result, the bonded samples which reference samples and mechanical jointed samples of different geometrical shapes were compared and a significant increase in strength was observed..

Key words: composite material, bonding joint, mechanical joint, pultrusion, corner joint.

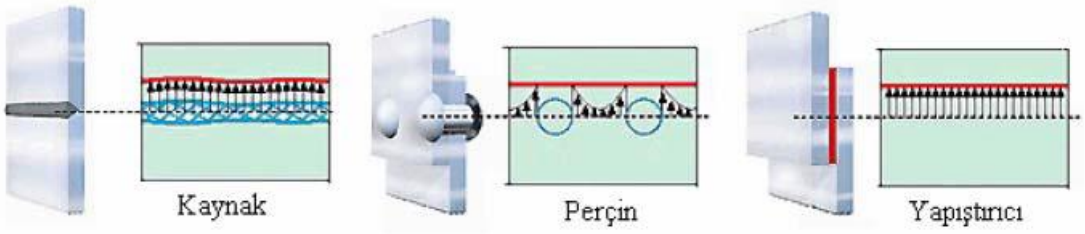
1. GİRİŞ

Know-how (Yapabilme bilgisi), teknikler, bilimsel prensipler, donanım ve organizasyon bileşenlerinden oluşan teknoloji, birçok aşamadan geçmekte ve gün geçtikçe hızlı bir gelişim göstermektedir. [1] Gelişen bilim ve teknolojiyle birlikte birçok alanda üstün özelliklere sahip, yeni malzeme ihtiyacı da ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyaca yönelik ortaya çıkan malzeme türlerinden biri de metalik, polimerik, seramik malzemelerin birleşimiyle oluşan ve üst malzeme grubu olarak kabul edilen kompozit malzemelerdir. [2]

Tek başına istenilen özellikleri sağlayamayan iki ya da daha çok malzemeyi belirli şartlar ve oranlarda bir araya getirip, istenen özellikleri sağlayacak şekilde elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir. Bir başka deyişle, kompozitler malzemeler iki ya da daha çok bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan, bir bileşenin çekmeye ve kopmaya karşı yüksek mukavemet göstermesini sağlayan bir lif, diğer bileşenin ise bu lifleri bir arada tutmayı sağlayan bir matris olarak isimlendirildiği malzemelerdir. [3]

İstenilen amaca yönelik farklı özellikler kazandırılabilen kompozit malzemelerin, özellikle elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanım alanları önemli ölçüde artış göstermiştir. Her geçen artan talep ve üretim doğrultusunda maliyeti düşen kompozit malzemeler, geleneksel endüstriyel malzemelerle kıyaslandığında, sağladığı fiziksel ve kimyasal avantajlar sebebiyle, geleceğin malzemesi olması konusunda güçlü bir adaydır. Kompozit malzemelerde meydana gelen bu hızlı gelişim, bu yapı elemanlarının birleştirme yöntemlerinin de ortaya çıkmasını zorunlu hale getirmiştir.

Kompozit malzemelerde birleştirme yöntemi olarak yapıştırıcıların kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Yapıştırma; cıvata, pim, perçin vs. yanında endüstriyel bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya başlandığından beri, iyi bir yapıştırma için en önemli parametreleri bulmak amacıyla birçok araştırma yapılmıştır. Birleştirme elemanı olarak yapıştırıcının kullanılması, Şekil 1.1 ’de de görüldüğü gibi, yük ve gerilmeleri birleşim yüzeyine yayar ve statik-dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar. Bununla beraber imalat kolaylığı, tasarım esnekliği, hafiflik, sızdırmazlık gibi özelliklere de sahiptir.



Şekil 1.1: Kaynak, perçin ve yapıştırıcı ile meydana gelen gerilme yığılmaları.

Mekanik birleştirme yöntemleri ise, cıvata, vida, perçin ve pim iledir. Bunlardan cıvata ve vida sökülebilen birleştirme tiplerindendir. Kolay ve sık sökülebilmenin gerektiği yerlerde cıvata ve vida kullanımı daha uygun ve genellikle de güvenilir bir birleştirme yöntemidir. Ama cıvata veya perçin kullanmak için açılan delik, kompozit malzemeyi zayıflatır ve böylece birleşme bölgesi yük altına girdiğinde, açılan deliklerin etrafında gerilme yoğunlaşması meydana gelir. Bu durum malzemenin erken yorulmasına sebep olabilir. [4] Bu nedenle, mekanik bağlantı elemanları kullanıldığında istenen dayanımın sağlanabilmesi için malzeme kalınlığının arttırılması gerekmektedir.

Bu çalışmadaki amaç, referans numunesi olarak kabul edilen yapıştırmalı bağlantılı kompozit malzemeye, farklı geometrilerdeki mekanik bağlantıları yapıştırıcı yardımıyla da ekleyerek malzeme mukavemetinin arttırılmasını sağlamaktır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHÇESİ

Antik çağlardan beri insanlar, geleneksel malzemelere bitkisel veya hayvansal esaslı lifler ekleyerek malzemeleri güçlendirmeye amaçlamışlardır. Bilindiği üzere kerpiç bunun bilinen en yaygın ve eski örneğidir. Çamurun içine karıştırılan saman ve saplar bu malzemeye dayanım kazandırmış ve insanoğluna daha sağlam barınak yapma imkânı sağlamıştır. Ayrıca yayın belirli bir kuvvetten sonra kırılmasını engellemek amacıyla Moğollar, yayın esneyen kısımlarında hayvan tendonları kullanarak bu soruna çözüm bulmuştur.[5] Çimento ve kumun çelik çubuklarla takviyelenmesinden meydana gelen beton ise, günümüzde en sık kullanılan kompozit malzemelerden biridir. [6]

1900'lü yılların başında ilk modern sentetik plastiklerin geliştirilmesinden sonra, plastik malzemeler her geçen gün diğer malzemelerin yerini almaya başlamıştır. [6] Plastik malzemelerin yükselişe geçmesinin başlıca sebepleri yüksek yüzey kalitesi, kolay biçim verilebilir olması, korozyona karşı gösterdiği mukavemet, metallerle kıyaslandığında daha düşük yoğunluklara sahip olmasıdır. Bu özelliklere karşın sert olmaları ve dayanıklılığının düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesini gerektirmiştir. Çeşitli matrisler kullanıldıktan sonra 1938 yılında epoksinin keşfedilmesiyle daha yüksek performans gösteren matrisler kullanılmaya başlamıştır. Kendine gün geçtikçe yeni bir uygulama alanı bulan kompozit malzemeler, II. Dünya Savaşı'nda daha fazla uçak imal edilmesi ve yapısal parçalarda tercih edilmeye başlanmasıyla birlikte daha da yükselişe geçmiş ve denizcilik sektöründe de kullanılmaya başlamıştır.

Tüm bu gelişmelerin ardından 1950'li yıllarında başlarında, yenilikçi üretim yöntemleri denenmiş ve filaman sarma, pultruzyon, vakumla kalıplama yöntemleriyle malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve püskürtme tekniğiyle, elle yatırma yöntemine hız kazandırılmıştır. Bu dönemde kompozit malzemelerin üretiminde ve yaygınlaşmasında meydana gelen ilerlemelerden ötürü, Ralph (1997), 20. yüzyıldan sonrasını "Kompozit Çağı" olarak isimlendirmiştir. [7]

1960 ve 1970'li yıllarda, karbon lifinin kompozit malzemelerinin popülerliğini arttırması, ardından bor fiberlerin ve aramid fiberlerin kompozit sektörüne katılmasıyla beraber, spor ekipmanları, tıbbi araç-gereçler, uzay endüstrisi, denizcilik ve inşaat sektörü gibi birçok alanda tercih edilmesi sebebiyle önemli birçok gelişmeye öncülük etmiştir.

Zaman içinde imalat teknolojisinde meydana gelen ilerlemeler sayesinde azalan hammadde maliyetleri ve kompozit malzemeler hakkında artan teknik bilgiler, kompozit malzemelerin kullanımını daha da yaygınlaştırmıştır.

2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI

İki veya daha fazla malzemenin, malzemeye yeni bir özellik kazandırmak ya da her bir malzemedeki üstün özellikleri tek bir malzemede bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapay malzemeler, kompozit malzeme olarak adlandırılır. Kompozit yapıyı oluşturan bileşenler, kimyasal olarak farklılık göstermektedir. [8] Kompozit malzeme, bir başka deyişle, iki veya daha fazla malzemenin bazı bağlar yardımıyla birleştirilmesiyle meydana gelen yeni malzemelerdir. [9] Kompozit malzemeler temel olarak, direngenlik (rijitlik), mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklığa dayanım, korozyon direnci, sertlik ve ısı-elektrik iletkenliği gibi mekanik ve fiziksel özelliklere ulaşmak amacıyla tercih edilmektedir. [10]

Bir malzemenin kompozit malzeme olarak adlandırılabilmesi için aşağıdaki dört özelliği taşıması gerekmektedir:

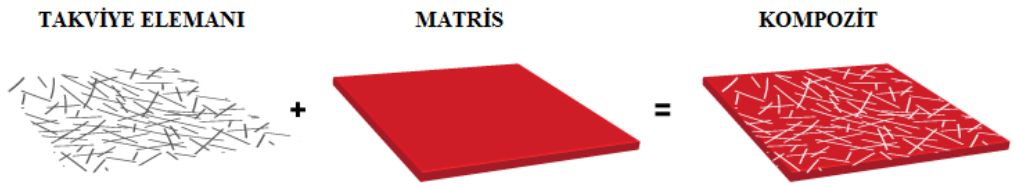
1. Doğal bir malzeme olmaması, insan ürünü olması,

2. Kimyasal özellikleri birbirinden farklı, en az iki malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulması,

3. Kimyasal özellikleri farklı bu malzemelerin üç boyutlu olarak bir araya getirilmesi,

4. Malzemeyi meydana getiren bileşenlerin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması. [11]

Kompozit malzemeler yapısal olarak homojendir. Bu yapı çekirdek olarak isimlendirilen takviye elemanı ve takviye elemanını yük altında bir arada tutabilmek için kullanılan matris malzemesidir. Ayrıca istenilen niteliklerin kazandırılması amacıyla eklenen dolgular, kimyasallar ve katkılar da bu yapı içerisinde bulunmaktadır.



Şekil 2.1: Kompozit bir yapının temel elemanları.

2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJLARI

Kompozit malzemeler, diğer malzemelere göre taşıdığı üstün özelliklerden dolayı sanayide ve teknolojide birçok avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin belli başlı avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı
- Hafiflik
- Tasarım esnekliği
- İyi derecede termal ve ısıl iletkenlik
- Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanım
- Kalıplamada kolaylık
- Renk çeşitliliği ve estetik görünüm
- Şeffaflık
- Kırılma tokluğu
- Beton, ahşap ve demir yüzeylere uygulanabilirlik
- Yanmazlık
- Yüksek sıcaklığa karşı direnç
- Titreşim sönümleme

Taşınması istenilen karakteristik özellikleri elde edebilmek için, uygun koşullar; gerekli takviye elemanı ve matris çifti, üretim yöntemi, malzemeyi meydana getiren bileşenlerin mekanik özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılmaktadır.

2.4. KOMPOZİT MALZEMELERİN DEZAVANTAJLARI

Kompozit malzemelerin avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu zayıflıkları iyileştirmek adına günümüzde çalışmalar devam etmektedir. Başlıca dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Delaminasyon (Kompozit malzemeyi oluşturan tabakaların birbirinden ayrılması)
- Üretim zorluğu
- Yüksek maliyet
- Hasar kontrolü
- Kopma anındaki uzamanın az olması
- Yüksek yüzey kalitesini sağlamada güçlük
- Farklı doğrultularda aynı mekanik özelliği göstermemesi
- Tüm bu belirtilen özelliklerin yanından, kompozit malzemelerin kullanım alanlarını sınırlayan en önemli etkenlerden birisi de geri dönüştülebilirliğinin düşük olmasıdır. [12]

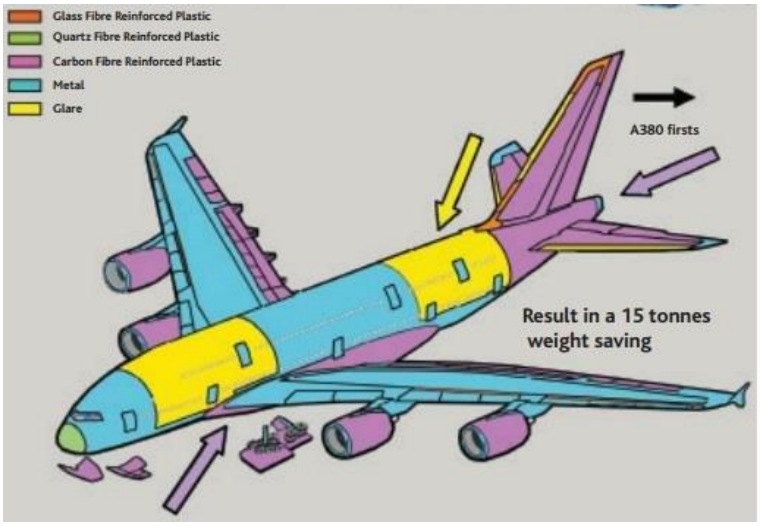
2.5. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI

İlk yıllarda havacılık sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzemeler, son yıllarda sanayileşme ve teknolojideki ilerlemeyle birlikte, kendisine farklı uygulama alanları edinmiştir.

SEKTÖRLER	DÜNYA (%)	AVRUPA (%)	TÜRKİYE (%)
Yapı ve İnşaat	24.5	18	18
Taşımacılık ve Otomotiv	21	30	20
Elektrik ve Elektronik	19	14	3
Tüketim Malları	6	3	2
Rüzgâr Enerjisi	7	12	5
Boru ve Tank	14	13.5	45
Uzay ve Havacılık	0.5	0.5	-
Denizcilik	4	5	2
Diğer	4	2	1

Tablo 2.1.: Kompozit malzemeleri kullanım alanlarına göre dağılımı.

2.5.1. Havacılık ve Uzay Sanayi: Kompozit malzemelerin havacılık ve uzay sanayisindeki uygulama alanları oldukça geniştir. Hafifliklerinin yanısıra taşıdıkları üstün mekanik özellikler sayesinde helikopterlerde, uçaklarda ve uzay araçlarında hem iç mekân bileşenlerinde hem de yapısal parçalarda kullanımı tercih edilmektedir. Uçaklarda; kanatlar, gövde panelleri, motor kaplamaları, korkuluk ve çamurluklar, kuyruk konisi, roketlerde; roket kılıfları, pervaneler, roket motorları, uzay araçlarında ise ana çatıda kullanılmaktadır. Ayrıca, B2 bombardıman uçağının gövde panellerinde, A380 yolcu uçağının kanat panelleri, burun ve kuyruk bölgesinde, NH 90 askeri nakliye helikopterinin de gövdesinin ön kısmında karbon fiber-epoksi kompozit kullanılmıştır.



Şekil 2.2.: A380 yolcu uçağının malzeme bileşimi [13].

2.5.2. Denizcilik: Havacılık ve uzay sanayisinden sonra ilk olarak denizcilik sektöründe kullanılmaya başlayan kompozit malzemeler, yelkenli-motorlu tekne gövdelerinde (CTP), yat ve tekne platformlarında, basamaklarında (CTP) ve yelken direklerinde (Kevlar-epoksi), dubalarda, iskelelerde, sal ve kanolarda kullanılmaktadır. Özellikle kano ve yatlarda meydana gelen malzeme yoğunluğundan kaynaklanan deformasyonlar ve darbeye karşı gösterdiği dirençten dolayı tercih edilmektedir.

2.5.3. Spor ve Eğlence Ekipmanları: Kompozit malzemelerin yaygınlaştığı sektörler arasında yerini alan spor ve eğlence ekipmanları her geçen gün ilerleme göstermektedir. Hafiflik ve dayanıklılık konusunda göstermiş olduğu üstün özelliklerden dolayı tercih edilen kompozit malzemeler, golf sopası (Karbon fiber-epoksi), tenis raketi, sörf tahtaları (CTP), bisiklet (Karbon-poliamid6), kasklar, su kaydırakları, lunapark gereçlerinde kullanılmaktadır.

2.5.4. Otomotiv: Daha çabuk hızlanan ya da duran, hareket için daha küçük motora ve yakıta ihtiyaç duyan otomobile sahip olmak isteyen müşteriler, otomobil üreten firmaları kompozit malzemeye yönlendirmiştir. Başta otomobil kaputu, kamyonet kabinleri, fren balataları, pedallar, dikiz aynaları gibi birçok alanda kendisine yer bulan kompozit malzemeler, gelişen teknolojiyle bu sektördeki uygulama alanlarını arttırmaya devam etmektedir.

2.5.5. Şehirleşme ve Yapı Sektörü: Kompozit malzemelerin en çok kullanıldığı sektörlerden biri de yapı sektörüdür. Özellikle üretim süresinin kısa olması, kolay montaj edilebilirlik, düşük maliyet, yüksek mukavemet, hafiflik ve yalıtım kapasitesi konusunda göstermiş olduğu üstün özelliklerden dolayı tercih edilmektedir. Çevre güzelleştirmede kullanılan heykeller, banklar, metro istasyonlarındaki iç duvar süslemeleri, köprü, yürüyüş yolları, aydınlatma direkleri,

küvet, lavabo, kapı ve saydamlık istenilen çatı kaplamalarının kullanıldığı kapalı yüzme havuzları spor salonlarında kullanılmaktadır.

2.5.6. Elektrik ve Elektronik Sanayi: Kompozit malzemeler iyi bir yalıtkan olması sebebiyle elektrik-elektronik sektöründe yerini almıştır. Yer altı kablo döşemelerinde kullanılan kılavuzlarda, iç ve dış mekanlarda kullanılan armatürlerde, antenler, devre panellerinde, son yıllar da ise rüzgâr jeneratörlerinde hem kanatlarda hem de taşıyıcı gövdede kullanılmaktadır.

2.5.7. Diğer Uygulama Alanları: Bunların dışında, su taşıma ve kanalizasyon hatlarında kullanılan borular, hacimli su depoları, silolar, şehir içinde kullanılan çöp kutuları, otobüs durakları, büfeler, pazar yerleri, korozif ortamlardaki yürüme platformları, stadyum, çocuk bahçesi ve parklar, plajlar ve tatil beldelerinde kullanılan ekipmanlar, telefon kabinleri, asit tankları ve kaplamaları, tıbbi cihazların dış muhafazaları ve tekerlekli sandalyeler, seralar, balık yetiştirme havuzları, dekoratif eşyalar, balistik koruyucu paneller, silah parçaları, miğferler gibi birçok alanda kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

2.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler kullanılan matris ve takviye elemanına göre iki ana başlık altında sınıflandırmaktadır. Matris türüne göre;

- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler

Takviye elemanına göre;

- Elyaf takviyeli kompozitler,
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır.

2.6.1. Metal Matrisli Kompozitler

Kompozit malzemelerde metal matrislerin sıkça tercih edilme sebebi, sağladığı iyi mekanik özellikler, korozyon dayanımının yüksek olması, hafiflik ve yüksek sıcaklıklarda kırılganlaşan metal ve alaşımlarının aksine yüksek sıcaklıkta yüksek dayanım göstermesidir. Metal matrisli kompozitlerin üretimi için başta alüminyum olmak üzere, titanyum, çinko, nikel, magnezyum metalleri ve bunların alaşımları kullanılmaktadır. Metal malzemelerle karşılaştırıldığında, metal matrisli kompozitler önemli üstün özelliklere sahiptir [14,15]:

- Yüksek dayanım
- Düşük yoğunluk
- Yüzey çatlaklarına ve sıcaklık değişimlerine gösterdiği düşük hassasiyet
- Daha iyi darbe dayanımı ve aşınma direnci
- Yüksek ısı ve elektrik iletimi [16]

2.6.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya elverişli yapıları ve düşük yoğunlukları sebebiyle hafif olmalarından dolayı, metal ve polimer matrisli kompozitlerle kıyaslandığında üstün özellikler göstermektedir. Ayrıca iyi bir yalıtkan olması sebebiyle de birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarından bazıları, ısı değiştirici tüpleri, sıcak gaz filtreleri ve çeşitli motor parçalarıdır. SiC, Al2O3 ve Si3N4 yaygın olarak kullanılan seramik matrislere örnektir. Seramik matrisli kompozitler iki ayrı grupta toplanmaktadır:

- Sürekli fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler
- Süreksiz takviyeli seramik matrisli kompozitler

2.6.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerin çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilme sebebi üretim tekniklerinin kolaylığı, düşük maliyet ve yüksek mukavemetli olmalarıdır. Sertlik derecesi ayarlanabildiğinden ve insan dokularıyla uyum sağladığından sağlık sektöründe de tercih edilmektedir. Bunlardan başka, plastik malzemeler iyi bir yalıtkan olduğundan, elektrik-elektronik sektöründe kullanılmaya da elverişli yapıdadır. Yüksek sıcaklıklarda çalışmaması ve elastiklik özelliğinin düşük olması (belirli yönlerde) gibi olumsuz özellikleri olsa da sağladığı

avantajlardan dolayı, her geçen gün yeni bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Günümüzde bilinen en yaygın polimer matrisli kompozit malzeme fiberglastır. Plastik malzemeler yapılarındaki kimyasal bağlar dikkate alınarak iki gruba ayrılır:

- Termoplastik matrisli kompozitler
- Termoset matrisli kompozitler.[17]

TERMOPLASTİKLER	TERMOSETLER
Isı altında yumuşama gösterme ve kolay tamir edilebilme	Isıyla ayrıştırılmama
Yüksek kopma şekil değiştirmeleri	Düşük kopma şekil değiştirmeleri
Sınırsız raf ömrü	Sınırlı raf ömrü
Yeniden işlenebilirlik	Tekrar işlenememe
Yapışkan olmama	Yapışkan
Kısa kür süresi	Uzun kür süresi
Yüksek üretim sıcaklığı	Düşük üretim sıcaklığı
Yüksek çözücü direnci	Düşük çözücü direnci

Tablo2.2.: Termoplastik ve termoset malzemelerin karşılaştırılması.

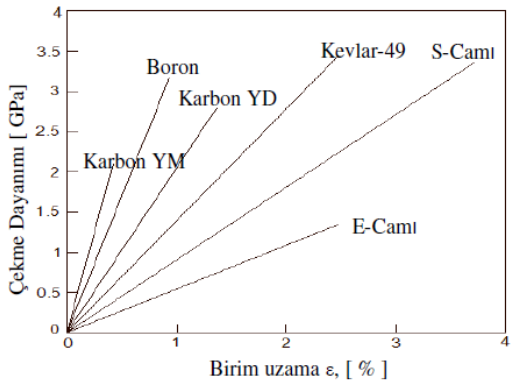
2.7. KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN TEMEL MADDELER

2.7.1. Elyaf Türleri

Takviye elemanı olarak kullanılan elyaflar, kompozit malzemelerdeki mekanik özellikleri belirleyen ve aynı zamanda yük taşıma görevini üstlenen bileşendir. Elyaflar aynı zamanda lif olarak da isimlendirilirler. Kullanılan başlıca elyaf çeşitleri:

- Karbon (Grafit) elyaflar,
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyaflar, (Ticari ismi: Kevlar)

- Boron elyaflar
- Cam elyaflar ve diğer elyaflardır.



Şekil 2.3.: Elyaf türlerinin çekme yükü altındaki birim uzamaları [18].

***2.7.1.1. Karbon (Grafit) Elyaf*:** Cam elyaf ve aramid elyaflara göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler, korozyona karşı yüksek dirençli, sağlam ve serttirler. Havacılıkta, sağlık sektöründe ve spor ekipmanlarında kullanılmaktadır. Karbon elyaflar iyi bir iletken olmakla beraber, polimer esaslı matrisler içerisinde yüksek ıslanabilme özelliği göstermektedir. Avantajlarının yanında sahip olduğu dezavantajlar da şu şekilde sıralanabilir: [19]

- Darbe dayanımına karşı direnci düşüktür.
- Etkili bir bağlayıcı malzemesi yoktur.
- Yüksek sıcaklıklarda oksitlenmektedir.
- Üretim maliyetleri yüksektir.
- Elektrik iletim özelliği avantaj olsa da bazı kullanım alanlarında bu özelliğinden dolayı tercih edilmemektedir.

2.7.1.2. Aramid Elyaf (Kevlar): Aramid elyaf ticari ismi olan Kevlar olarak bilinmektedir. Yüksek darbe dayanımı, aşınmaya, yorulmaya ve kimyasal korozyona karşı gösterdiği direnç ve düşük ağırlık en önemli özellikleri arasındadır. Cam elyaflı kompozitlerle kıyaslandığında %35 daha hafiftir ve spesifik çekme dayanımı aşağı yukarı çelikten beş kat daha fazladır. Elyaf doğrultusuna dik yönde iken mekanik özellikleri karbon elyaflarda olduğu gibi oldukça zayıftır. Aşınma, çekme ve sürtünmede yüksek performans sergileyen aramid elyaflar basma yükü

altında aynı performansa sahip değildir. Ayrıca depolama süreçlerinde nem almaları sebebiyle, üretim esnasında ıslanma zor gerçekleştirilmektedir.

2.7.1.3. Boron Elyaf: Boron elyaflar kendi içlerinde de kompozit yapıda olan elyaf çeşididir. Genellikle üretimi esnasında tungsten telinin üzerinde bor buharının yoğunlaştırılması ile elde edildiği gibi çekirdek olarak karbon kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur.[20] Üstün mekanik özelliklere sahip olduğundan başta uçak ve uzay sanayisinde olmak üzere, gaz türbin kanatlarında da kullanılmaktadır. Sağlam ve dayanıklı olan boron elyafların, yoğunluklarının ve üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kullanım alanları sınırlıdır.

2.7.1.4. Cam Elyaf: Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde en sık kullanılan elyaf çeşidi cem elyaflardır. Düşük maliyet, üretim kolaylığı, kolay temin edilebilme ve bunların yanında sahip olduğu yüksek mukavemetten dolayı geçmişten günümüze çok geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. [21] Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir [22]:

- Kimyasal korozyona karşı yüksek direnç gösterirler.
- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler.
- Yanmazlar ama yüksek sıcaklıklarda yumuşama gösterirler.
- Elektriği iletmezler. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler elektrik yalıtımının gerekli olduğu yerlerde bu özelliklerden dolayı tercih edilmektedir.

İstenilen özellikler doğrultusunda farklı kimyasallarla bir araya getirilerek dört tür cam elyaf elde edilir:

1. A (Alkali) Camı: En yaygın cam türlerinden biridir ve kimyasal direnci yüksektir. Pencere ve şişelerde kullanılmaktadır ve kompozit malzemelerde çok tercih edilememektedir.

2. C (Korozyon) Camı: Depolama tanklarında kullanılan C camının kimyasal korozyona karşı gösterdiği dayanım yüksektir.

3. E (Elektrik) Camı: Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan en yaygın elyaf türüdür. Ekonomiklik, ısıya ve kimyasala karşı mukavemet ve iyi elektrik yalıtımı avantajları arasındadır.[23]

4. S (Mukavemet) Camı: E camı ile kıyaslandığında çekme dayanımı daha yüksektir. Çekme dayanımının yanında sıcaklığa karşı dayanımının da oldukça yüksek olmasından dolayı havacılık ve uzay sanayisinde sıkça kullanılmaktadır.

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık	Özellikler
Cam	3000- 5000	72- 82	2.48- 2.60	Yüksek mukavemet, iyi kalıplama özelliği, düşük maliyet
Karbon	2500- 3000	200- 700	1.75- 1.96	Elektriksel iletkenlik, yüksek maliyet
Aramid	2750- 3000	82- 124	1.44	İyi mekanik özellikler
Boron	3500	400	2.55	Yüksek mukavemet, yüksek maliyet

Tablo 2.3.: Elyaf türlerine ait mekanik özellikler.

2.7.2. Matris Türleri

2.7.2.1. Epoksiler: Epoksi matrisler sıvı halde ve berrak renktedir. Aşınma ve kimyasal dirençleri yüksektir. Elyaf takviye elemanıyla birleştirilirse, yüksek bağ mukavemeti sağlamaktadır ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir yapıdadır. Polyester matrislerle kıyaslandığında hem daha düşük viskoziteli hem de pahalı bir malzemedir.

2.7.2.2. Polyesterler: Matrislerin en sık ve en eski kullanılan türüdür. Genellikle cam elyaf takviyeli plastiklerin üretiminde tercih edilmektedir. Üretim teknikleri kolay ve düşük maliyetlidir. Çevresel etkilere karşı dayanımları yüksektir ama yapıları gevrekleşmeye yatkındır. Planörler ve küçük uçaklarda kullanılmaktadır.

2.7.2.3. Vinilesterler: Polyester matrislerle mekanik özellikleri benzerlik göstermektedir. Birleştirildiği elyafla arasındaki bağ kuvvetlidir. Korozyona karşı mukavemetlidir. Özellikle kimyasal dayanımının yüksek olması sebebiyle kimyevi tesislerde tercih edilmektedir.

2.7.2.4. Metal Matrisler: Hafif ve aynı zamanda yüksek mukavemetli metaller, kompozit malzemelerin üretiminde birleştirici eleman kullanılmaktadır. Alüminyum, titanyum ve magnezyum en sık kullanılan metal matrislerdir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımlarının yüksek olmasından dolayı havacılık sanayisinde kullanımı yaygındır. [24]

2.8. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit malzemelerin başlıca üretim yöntemleri şu şekildedir [25]:

1. Elle Yatırma Yöntemi (Hand Lay-Up)

2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up)

3. Elyaf Sarma Yöntemi

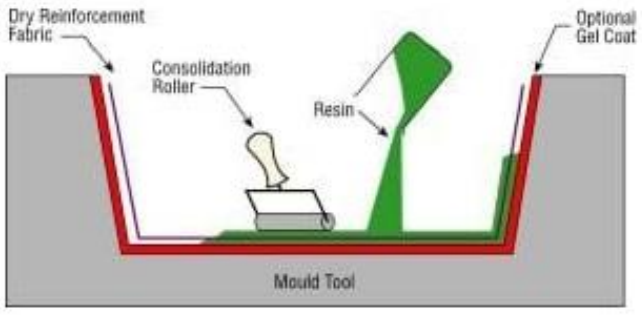
4. Enjeksiyon Üretim Yöntemi (RTM)

5. Vakum Altında Şekillendirme

7. Profil Çekme (Pultruzyon) Üretim Yöntemi

2.8.1.Elle Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi

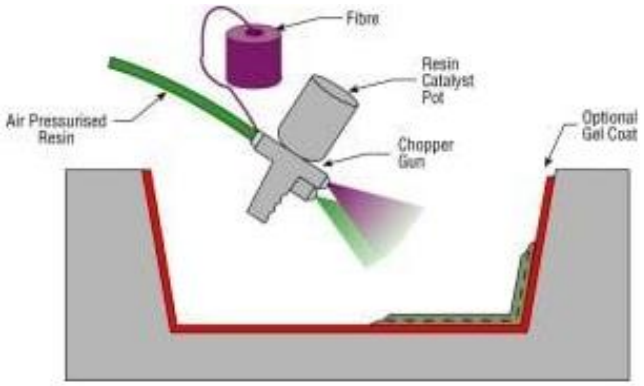
Bu üretim yönteminde kalıplama işlemi tamamen elle yapılmaktadır. Kalıp ayırıcı (vaks) hazırlandıktan sonra, polyester matris türlerinden biri olan jelkot, yüzeyde cam elyaf görülmesini engellemek ve yüzey pürüzlülüğünü gidermek amacıyla uygulanmaktadır. Jelkot sertleştikten sonra dokuma ya da kırpılmış elyaflardan hazırlanmış olan takviye elemanı, fırça veya rulo yardımıyla yatırılmaktadır. Son işlem olarak matris malzeme sürülmektedir ve bu işlemde matrisin elyafa iyice emdirilmesi gerekmektedir. Kalıplamanın elle yapılması, oluşturulan kompozit malzemenin yapısında hava kabarcıklarının oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden yapısal elemanlarının kullanılacağı alanlarda elle yatırma yöntemiyle malzeme kalıplanmamaktadır.[26] Genellikle az sayıda üretim gerektiren yerlerde tercih edilmektedir.



Şekil 2.4.: Elle yatırma yöntemi.

2.8.2. Püskürtme (Spray-Up) Yöntemi

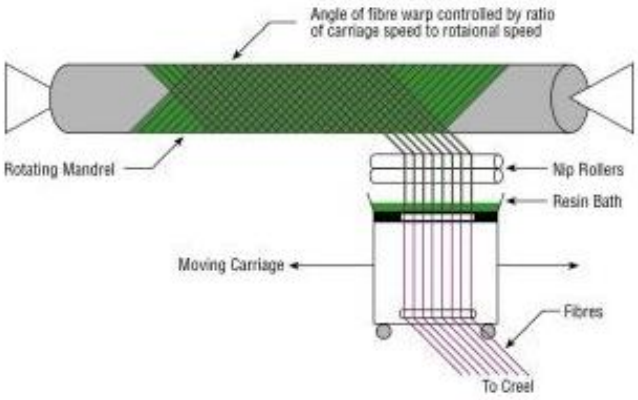
Elle yatırma yönteminin daha hızlı uygulamasını sağlayan açık kalıplama yöntemlerinden biridir. Elle yatırma yönteminde meydana gelen hava kabarcıkları ve karışım oranı hataları bu yöntemde azaltılmaktadır. Sertleştirici eklenmiş matris ile birlikte takviye elemanı, özel bir tabanca yardımıyla kalıp üzerine püskürtülmektedir. Bu işlem sonrasında yüzeyin rulo yardımıyla düzeltilmesiyle üretim tamamlanmaktadır. İşçilik maliyetlerinin azaltıldığı, geniş yüzeylerde hızlı üretim imkânı sağlayan bu yöntemdeki püskürtme tabancası, basınçlı hava ile çalışan basit bir pompa sistemidir. Matris bir hortum aracılığıyla aktarılırken, takviye elemanlarını kırpan mekanizma aynı anda işleme başlamakta ve karışımı kalıba püskürtmektedir.



Şekil 2.5.: Püskürtme yöntemi.

2.8.3. Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi

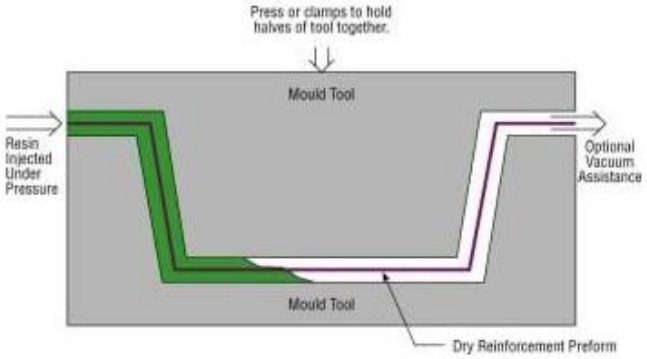
Genellikle bu yöntem silindirik malzemelerin üretimi için kullanılmaktadır. Sürekli elyaf liflerinin bağlayıcı malzeme olarak kullanılan matrisle ıslatılıp, bir makara ile çekilerek, dönen kalıp üzerine belirli açılarla sarılmasıyla elde edilen bir kompozit malzeme üretim yöntemidir. Gerekli miktarda elyaf tabakasını sarılmasıyla ürün sertleşmekte de sonrasında dönen kalıp malzemeden ayrılmaktadır. Kullanılan ikinci yöntem ise, sarımdan önce bağlayıcı malzeme ile yarı sertleştirilmiş takviye elemanının (Prepreg) kalıp üzerine sarılmasıdır. İkinci yöntem maliyet ve depolama açısından avantaj sağlasa da prepreg adı verilen parçaların istenilen ölçülerde ebatlandırılması, yoğun miktarda toz oluşumuna sebep olmaktadır.[27]



Şekil 2.6.: Elyaf sarma yöntemi

2.8.4. Enjeksiyon Üretim Yöntemi (RTM)

Elle yatırma ve püskürtme yöntemlerindeki üretim hızının ve ürün kalitesinin düşüklüğü sebebiyle geliştirilen ve iki parçalı kalıpla üretimin gerçekleştirildiği üretim yöntemidir. Takviye malzemesi kalıp içine yerleştirilmekte ve diğer kalıp kapatılmaktadır. Matris, bir kanal aracılığıyla kalıp içine enjekte edilip, bağlayıcı malzemenin kalıp içerisinde daha iyi yayılmasını sağlamak ve kalıp içerisindeki havayı dışarı çıkarmak için vakum uygulanmaktadır. Karmaşık parçaların üretiminde kullanılmaktadır ve özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir.

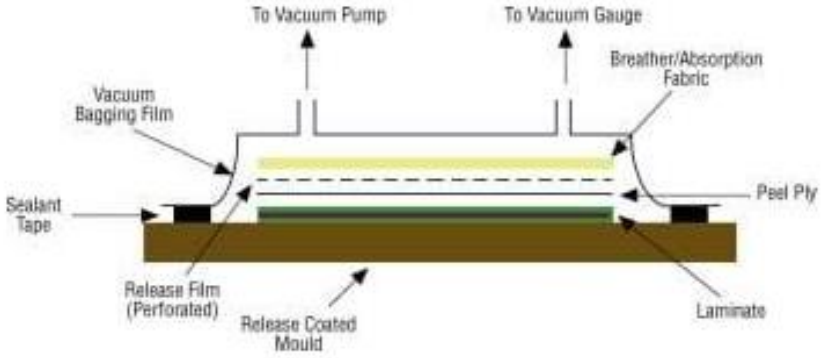


Şekil 2.7.: Enjeksiyon üretim yöntemi

2.8.5. Vakum Altında Şekillendirme

Genellikle sandviç yapılı geniş kompozit malzemelerin üretiminde, elle yatırma ve elyaf sarma üretim yöntemleriyle birlikte kullanılmaktadır. Kalıba yerleştirilen malzemenin üst katmanına

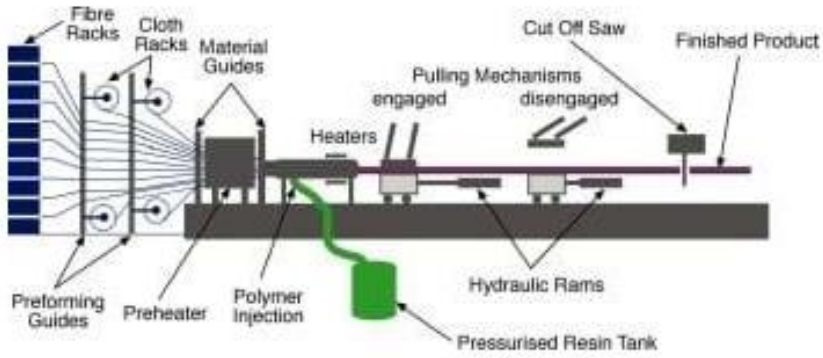
konumlandırılan bir vakum torbası, kalıp içerisindeki havayı emdikten sonra malzeme üzerine 1 atm 'lik basınç uygulamaktadır. Sonrasında elde edilen bu yapı, fırında ısıtılmakta ve malzeme içerisindeki bağlayıcı matrisinin kürleşerek üretim tamamlanmaktadır.



Şekil 2.8.: Vakum altında şekillendirme.

2.8.6. Profil Çekme (Pultruzyon) Üretim Yöntemi

Sürekli sisteme beslenen takviye elemanının, matris malzeme banyosundan geçirildikten sonra, 120-150ºC 'ye ısıtılmış kalıp içerisinden çekilmesiyle elde edilen, düşük maliyetli bir seri üretim yöntemidir. Üretilen kompozit malzeme çok yüksek mekanik özellikler göstermekte ve kolay işlenebilmektedir.



Şekil 2.9.: Pultruzyon yöntemi.

Bu yöntemin başlıca avantajları şu şekilde sıralanmaktadır:

- Karmaşık geometrili parçaların üretimi kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.
- Üretim kolaylığından dolayı, maliyetler düşüktür.
- Takviye elemanını yönlendirebilme imkânı sağlamaktadır.

- Prosesin büyük bir kısmı otomatiktir ve bu yüzden işçilik maliyetleri düşüktür.

Dezavantajları ise,

- Takviye elemanının yerleştirilmesi, çekme dayanımı boyunca olduğu için, çapraz uygulanan kuvvetlere karşı daha düşük mukavemet göstermektedir.
- Katmanlar arasında düşük kesme dayanımına sahiptir.
- Kırılgan oldukları için, kolay deforme olurlar ve onarımları zordur.

2.9. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Kompozit malzemelerin kompozit malzemelerle ya da diğer malzemelerle birleştirilmesinde iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler sökülebilir bağlantı elemanları (pim, cıvata vb.) ile olan mekanik birleştirme ve yapıştırma ile birleştirmedir.

2.9.1. YAPIŞTIRMA

Cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra, yapıştırma da kabul gören bir birleştirme tekniğidir. İki malzemenin, genellikle sentetik esaslı bir malzemeyle bir araya getirilmesiyle meydana gelen, çözülemeyen bir birleştirme yöntemidir. Yapıştırma bağlantılarının başlıca avantajları şu şekilde sıralanmaktadır:

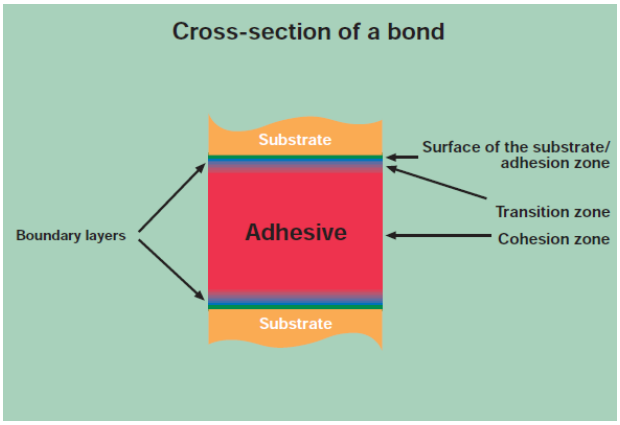
- Kolay uygulanabilir ve düşük maliyetlidir.
- Delik ya da çentik olmadığı için gerilme yığılması meydana gelmez.
- İnce veya kalın hemen hemen her tür malzemeye uygulanabilir.
- Sürekli mukavemette her noktada oluşan gerilmeler yaklaşık aynı olduğu için yorulmadan kaynaklı hasar çok azdır.
- Conta görevi görür, sızdırmazlık sağlar.

Dezavantajları ise,

- Çalışma sıcaklığı artarsa mukavemet düşer.
- Yapıştırılacak yüzeylerde temizlik gerektirir.
- Eğilme ve çekme kuvvetlerine karşı dayanımları düşüktür.

- Çevre koşullarından olumsuz etkilenir.
- Bazı solventlere karşı dayanıksızdır.

Yapıştırma olayı, adezyon ve kohezyon kuvvetleri etkisi ile meydana gelmektedir. Adezyon, yapıştırıcı molekülleri ile kompozit malzeme molekülleri arasında oluşan, kohezyon ise yapıştırıcının kendi molekülleri arasında oluşan çekim kuvvetidir.



Şekil 2.10.: Yapışma olayının kesiti.

Şekil 2.10' daki kesitte görüldüğü gibi yapışma bölgesinde birbirinden ayırt edilebilen farklı bölgeler meydana gelmektedir. Bu bölgeler adezyon bölgesi, sınır bölgesi, geçiş bölgesi ve kohezyon bölgesidir.

- *Adezyon Bölgesi:* Adezyon bölgesinde yapıştırıcı ile malzeme yüzeyi arasındaki moleküler etkileşim sonucu bir bağ oluşmuştur. Moleküller arası oluşan bu kimyasal bağlar çok sağlam olup yapışma olayında meydana gelen kuvvetlerin %50 'sini oluşturur. Ayrıca, yapıştırıcının yapıştırılan yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Yapıştırma işleminin kuvveti hem yüzeyin ıslatılmasına (maksimum temas için) hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Yapıştırma işleminin kalitesi, ıslatmaya, yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır.
- *Geçiş Bölgesi:* Yapıştırıcının kimyasal, mekanik ve optik özelliklerinin çok küçük aralıklarla (nm veya mm mertebelerinde) değişiklik gösterdiği bölgedir. Bu kalınlık malzemenin yapışma yüzeyinin özelliklerine bağlıdır.
- *Sınır Bölgesi:* Sınır bölgesi, adezyon bölgesi ile geçiş bölgesini kapsayan bölgedir.

- *Kohezyon Bölgesi:* Bu bölgede yapıştırıcının spesifik özellikleri kendini göstermektedir ve yapıştırıcı bünyesinde çeşitli kuvvetler meydana gelmektedir. Yapıştırıcıdaki moleküller arası bu bağlar, Wan der Waals bağları ve hidrojen bağlarıdır ve zayıf bağlardır.

2.9.1.1. Yapıştırıcı Çeşitleri: Yapıştırıcıların temel fonksiyonu yüzey teması sağlayarak malzemeleri bir arada tutmaktır. Yapıştırıcının cinsi, kompozit malzeme ile yapışma kabiliyeti, yapıştırıcının kendi içinde oluşturduğu bağın mukavemeti, yapıştırma yönteminin ve süresinin doğru uygulanması yapışma sisteminin özelliklerini belirler. Yapıştırıcının ana elemanı, bağlantıda "koheziv" ve "adeziv" mukavemeti sağlayan yapıştırma maddesidir. Bu madde çoğunlukla organik reçinedir. Yapıştırıcıyı oluşturan diğer elemanlar bağlantı mukavemetine ilave olarak istenen diğer özelliklerin elde edilmesi için kullanılırlar. Yapıştırıcının yük taşıma kapasitesi maruz kalacağı zorlamaları karşılayacak değerde olmalıdır. Yapıştırma işleminde o iş için en uygun yapıştırıcı seçilmelidir. Yapıştırıcıları farklı şekillerde sınıflandırılmak mümkündür. Ana elemanının kimyasal türüne göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1- Epoksiler

2-Poliüretan

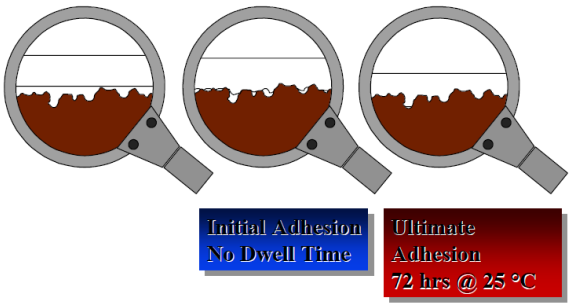
3-Akrilikler

6-Silikonlar

7-Fenoliklerdir.

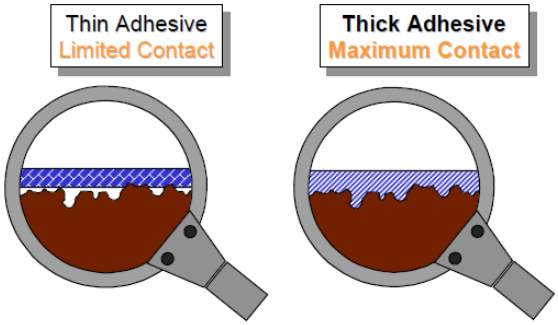
Yapışmayı etkileyen faktörler ise şu şekilde açıklanabilir:

Yapıştırıcının yapışma süresinin uzunluğuna bağlı olarak malzeme yüzeyine temas miktarı artmaktadır. Mikro seviyede bakıldığında malzeme yüzeyindeki pürüzlü yüzeye zaman ilerledikçe yapıştırıcı temasının arttığı görülmektedir.



Şekil 2.11: Yapışma süresi.

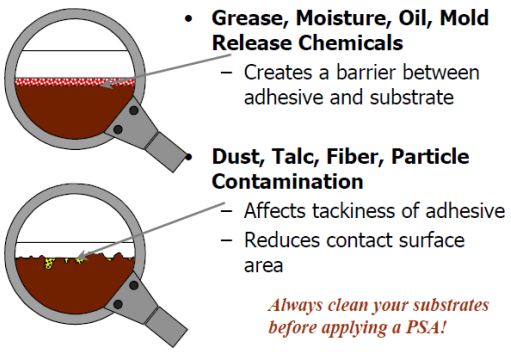
Kaba yüzeyler için daha kalın yapıştırıcı seçilmelidir.



Şekil 2.12.: Kalın yapıştırıcı seçimi.

Kavisli yüzeylerde ince ve sert yapıştırıcı kullanılması iç gerilmelere ve uç kısımların malzemeden ayrılmasına sebep olabilir. Kalın ve yumuşak yapıştırıcı uygulandığında ise maksimum yüzey teması ve bunun sonucu daha kuvvetli bağ oluşmaktadır.

Malzeme yüzeyinin kirli olması zayıf bağ oluşmasına sebep olur. Yapıştırma işlemi uygulaması yapılmadan önce malzeme yüzeyi yağ, nem, toz gibi olumsuz maddelerden arındırılmalıdır.



Şekil 2.13.: Yapıştırılan malzeme yüzeyinin temizliği

Düşük sıcaklıklar, yapıştırıcı yapısını olumsuz etkilemektedir. Yapışkanın sert ve kırılgan hale gelmesine, yapıştırıcılık özelliğinin azalmasına ve duyarlılığının artmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıklar ise, yapıştırıcının yumuşamasına, kesme dayanımının azalmasına, yapışkanlığın azalmasına sebep olmaktadır. Uygulamanın sıcaklık değerini bilerek bu değere uygun yapıştırıcı seçilerek düşük ve yüksek sıcaklıktan kaynaklanan olumsuz etkiler en aza indirilmelidir. Uygulamalar genellikle oda sıcaklığında yapılmaktadır.

Yapıştırma işleminin yeterli basınç altında uygulanması, yapıştırıcının akıcılığını hızlandırır. Bu durum yapışma kuvvetini artırıcı yönde etki yapar.

2.9.2. MEKANİK BİRLEŞTİRME

Cıvata pim ya da farklı geometrilere sahip mekanik bağlantıların kullanımı, sık ve kolay sökülebilmenin gerekli olduğu yerlerde ideal ve güvenilir bir birleştirme yöntemidir. Bunun yanında mekanik bağlantıda çekme yükü altında meydana gelen uzamadan dolayı, malzeme hemen kendini bırakmamakta ve dayanım göstermektedir. Bu tür bağlantılar için delik delinmesi gerekmekte, bu da malzemeyi zayıflatmaktadır. Aynı zamanda açılan deliklerin etrafında, malzeme yük altına girdiğinde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle malzemede yorulma ve ardından kopmalar meydana gelmektedir. Mekanik bağlantılarla birleştirme sağlandığında, malzeme kalınlığının artırılması gerekmektedir. Ayrıca, mekanik bağlantılar çevresel faktörlerden etkilenmekte ve korozyon tehlikesini arttırmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için yüzey koruma işlemlerine gerek duyulmaktadır.

2.10. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

"Adhezyon ve Yapıştırıcılar" adlı yayında Kinloch [28], adezyon olayının tek bir teori ile açıklanmasının yeterli olmadığı sonucuna varılmış ve ancak bu olayın açıklanmasının birkaç teorinin bir araya gelmesiyle sağlanabileceği belirtilmiştir. Bu yayında yapıştırıcıların sertleşme özellikleri hakkında bilgiler verilirken, yapıştırma yüzeylerinin nasıl hazırlanacağı, yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları, kırılma mekaniği, yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik yükleme durumları ve servis ömürleri ile ilgili de açıklamalar yapılmıştır.

Chang ve Chang [29] çalışmalarında, cıvata bağlantılı kompozit levhalar için bir hasar ilerleme modeli geliştirmiş ve bu hasar modelinde yırtılma, net kopma ve ezilme olarak üç ana hasar sekli olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışmalar ve araştırmalar sonucunda kompozit

levhalardaki yırtılmanın ve kopmanın iki boyutlu (düzlemsel) olduğu, ezilmenin ise üç boyutlu olduğu görülmüştür. Çalışmalarında sadece ilk iki hasar şekli olan kompozit levhanın yırtılması ve net kopması incelenmiştir.

Karadeniz [30] elyaf doğrultusunu çekme yönüne paralel seçtiği çalışmasında, elyaf takviyeli plastik kompozitlerin mekanik özelliklerinden olan çekme mukavemetini deneysel olarak incelemiştir. Kompozit malzemedeki bağlayıcı oranının artmasının çekme mukavemetini arttırdığını tespit etmiştir.

Qiu ve Fan [31], 4 pim ile bağlanmış T300-648 kompozit levhaların, pim deliklerindeki toleransın ve delik ile pim arasındaki sürtünme katsayısının, deliklerdeki tepki kuvvetlerinin dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hesaplamalar, birinci ve dördüncü pimlerin sıkı geçtiği, ikinci ve üçüncü pimlerin boşluklu geçtiği varsayılarak yapılmıştır.

Shokrieh ve Lessard [32], çalışmalarında pim bağlantılı karbon-epoksi malzemelerde pim deliği/kenar uzaklığı ve pim deliği/plaka genişliği oranlarının kompozit levhanın mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Ayrıca doğrusal olmayan malzeme davranışının etkilerini de incelemişlerdir. Çalışmalarında iki boyutlu hasar ilerleme modeli geliştirmişler ve bu geliştirdikleri modeli sonlu eleman analizlerinde uygulamışlar, elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır.

Wang ve diğ. [33] çalışmasında, mekanik olarak bağlantı elemanıyla bağlanmış grafit-epoksi kompozit levhaların bağlantılarının yatak yorulmalarını incelemişlerdir. Bağlantı şeklinin, cıvata ve pim rijitliğinin, pul boyutunun yatak mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında cıvata ve pim bağlantıları ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuç olarak pim bağlantılı levhalarda kırılmanın aniden gerçekleştiği, civara bağlantılı levhalarda ise kırılmanın aşamalı olarak ilerlediği görülmüştür.

Farklı oranlarda cam elyaf kullanarak, takviye malzemesinin oranının mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bir çalışmada Mısıroğlu [34], numuneler çekme, eğme, darbe ve sertlik deneylerine tabi tutulmuş ve cam elyaf miktarının artmasıyla malzeme mukavemetinin arttığı ve sünekliğinin azaldığı sonucuna varmıştır.

"Mühendislikte Yapıştırıcılar" adlı yayında Kinloch [35], yapıştırıcıların kullanım alanlarının genişlediği belirtilmiş, havacılık ve otomotiv sektöründe kompozit malzeme yapımında kullanımı üzerinde özellikle durulmuştur. Ayrıca adezyon, kohezyon, sertleşme olayları açıklanmaya çalışılmış ve yapıştırıcıların kullanılma nedenleri ile birlikte kullanımını kısıtlayan

faktörler vurgulanmış, çevre şartlarının yapıştırma bağlantılarının ömrü üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

Ramani ve Zhao [36] çalışmalarında, yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı arasındaki mekanik özelliklerin farklılığı, birleştirme boyunca maruz kaldığı basınç, yapıştırma yüzeyinin hazırlanma yöntemi gibi özelliklerle bir araya gelince yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı arasında artık gerilmeler meydana geleceği ve yapıştırma bağlantısının performansı üzerinde etki oluşturabileceği sonucu saptanmıştır.

Lee ve Lee [37] 'nin çalışmalarında, yapıştırıcı olarak epoksi reçinesi kullanılan bir çalışmada yüzey pürüzlülüğü, yapıştırma uzunluğu gibi birkaç yapıştırma parametresi açısından yapıştırıcılar gözlemlenmiş ve geleneksel yapıştırma bağlantıları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak maksimum yük taşıma kapasitesi, yapıştırma boşluğu 0.1-0.2 mm ve Ra=2μm olan kompozit-çelik bağlantısında elde edilmiştir.

Camanho ve Matthews [38] mekanik bağlantılı cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin mukavemeti üzerine yapılmış araştırmaları incelemiş ve bu araştırmaları derleyerek bir makale hazırlamışlardır.

Araştırmalara bakıldığında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek taraflı bindirme bağlantılarının kullanımı deneysel çalışmalarda yaygındır. Yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışının saptandığı farklı deneysel yöntemler olmasına rağmen, geometrilerinin ve üretim süreçlerinin basit oluşu sebebiyle araştırmacılar tarafından bu yöntem tercih edilmiştir. ASTM D3165, ASTM D1002, ISO 4587 gibi birçok yapıştırma bağlantı modeli tek taraflı bindirme bağlantıları kullanılarak geliştirilmiştir. [39]

Mazumdar ve Mallick [40], iki kompozit plakanın, kompozitlerin yapıştırma bağlantıları ile ilgili yapılan bir araştırmada, epoksi yapıştırıcı ile birleştirilerek, statik ve yorulma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda, statik kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı kadar bindirme uzunluğuna da bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 0,33 mm yapıştırıcı kalınlığında maksimum kesme kuvveti bulunmuştur.

Pfeiffer ve Shakal [41]' ın yaptığı deneysel bir çalışmada, yapıştırma yüzeyi genişletildiğinde yapıştırma bağlantısındaki kesme mukavemetinin önemli oranda düştüğü saptanmıştır. Küçük alanlarda oluşan deformasyona olan direncin, büyük alanlarda oluşandan daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Kim ve Hwang [42], çalışmalarında pim bağlantılı, elyaf takviyeli kompozit levhaların mukavemetini değerlendirmek için sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz yapmışlardır. Pim ve delik arasındaki sürtünme katsayısı sabit kabul edilmiş ve kompozit tabakalar simetrik olarak yerleştirilmiştir. Pim ve delik arasındaki temas modellenmiş ve delik iç yüzeyindeki yük dağılımı hesaplanmıştır. Bu analizlerde Hashin hasar kriteri uygulanmıştır. Modellemede ezilme, ayrılma ve kopma hasar şekilleri incelenmiştir.

Ciba [43] 'nın epoksi ile yaptığı deneysel bir çalışmada, 0.05-0.15 mm aralığı optimum yapıştırma kalınlığı olarak elde edilmiştir ve 0.1-0.5 mm yapıştırma aralığında kesme mukavemetinde düşüş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yapıştırıcı kalınlığı arttıkça kesme mukavemeti azalmaktadır. Yapıştırma kalınlıklarının çok ince olduğu yerlerde, yapıştırıcının yüzeylere teması çok mümkün olmayabilir. Bu yüzden yapıştırma bağlantılarında, yapıştırma yüzeylerinin tamamıyla kullanılmasına dikkat edilmelidir.

Eğilme momentine maruz kalan yapıştırma bağlantılarında, bağlantının dayanımını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle elostoplastik gerilme analizi yapan Liu ve Sawa [44] tarafından, yapıştırılan malzemelerin elastisite modülü arttıkça bağlantı dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir.

Zhang ve diğ. [45], araştırmalarında mekanik bağlantı olarak pim kullanılan kompozit levhaların, pim bağlantılarının bulunduğu delik yüzeyinde meydana gelen sürtünmenin, üç boyutlu temas gerilmesine olan etkisini incelemişlerdir. Bu araştırmalar sayısal ve analitik olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sürtünme katsayısının, delik çevresindeki üç boyutlu temas gerilmesini önemli bir şekilde etkilediği görülmüştür. Ayrıca iki boyutlu modellemelere dayanan önceki araştırmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışma yenilikçidir. Mevcut çalışmalarda göz ardı edilen düzlem dışı etkiler (yani kenar etkileri), bu çalışmada göz önünde bulundurulmuştur.

Sawa ve diğ. [46], çekme yükü altında tek taraflı bindirme bağlantısı ile yapıştırılarak oluşturulmuş malzemeleri iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak, malzeme kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı gibi birkaç parametresinin etkilerini analiz etmişlerdir. Elastisite modülünün ve yapıştırılan malzemenin kalınlığının gerilme dağılımları üzerindeki etkisinin önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Okutan ve diğ. [47], 120 °C 'de kalıplar vasıtasıyla basınç altında, dokuma cam elyaf-epoksi malzemeden üretilen, pim bağlantılı kompozit levhaların, levha genişliğinin delik çapına oranının

(W / D) ve delik merkezinin plaka kenarına uzaklığının delik çapına oranının (E / D) malzeme mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada (W / D) oranı 2 ile 5 arasında ve (E / D) oranı da 1 ile 5 arasında değiştirilerek elde edilen levhalar çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda kompozit levhalarda oluşan hasar şekilleri kıyaslanmıştır.

Mekanik bağlantı elemanlı olarak pim kullanan İçten ve Karakuzu [48], çalışmalarında karbon-epoksi levhaların hasar dayanımlarını sayısal ve deneysel olarak iki aşamada incelemişlerdir. Dokuma kompozit levha kullandıkları çalışmalarında, E/D (delik merkezinin plaka kenarına uzaklığı/delik çapı) ve W/D (plaka genişliği/delik çapı) oranlarının kompozit yapının mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Kuvvet-pim yer değiştirme grafikleri çekme deneyleri ile elde edilmiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak, çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Analizlerde Hashin ve Hoffman hasar kriterleri kullanılmış ve deney sonuçları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Okutan [49], mekanik olarak bağlanmış, cam elyaf takviyeli epoksi levhalarda, bağlantılardaki hasarı belirlemek için sayısal ve deneysel bir çalışma yapmıştır. Kompozit levhalara ait mekanik özellikleri deneysel olarak elde etmiştir. $[0/90/0]_s$ ve $[90/0/90]_s$ levha kompozitlerin tek tutturulmuş bağlantılarında çekme testleri yapılmış, kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri çıkarılmıştır. Bağlantı elemanı olarak pim kullanılan levhalardan elde edilen veriler, çalışmanın ikinci aşamasında oluşturulan iki boyutlu sonlu elemanlar modelinden elde edilen verilerle Hashin hasar kriteri uygulanarak karşılaştırılmıştır.

Higuchi ve diğ. [50], epoksi yapıştırıcıyla alından yapıştırılan T şeklindeki alüminyum malzemeye darbe eğilme momenti uygulanarak, gerilme dağılımı deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Bu gerilme değerlerine yapıştırılan malzemelerin kalınlığının ve elastisite modülünün, yapıştırma uzunluğunun ve kalınlığının etkileri tespit edilmiştir. Maksimum gerilme değeri, yapıştırıcı kalınlığı azalırken ve yapıştırılan malzemenin kalınlığı artarken artmıştır. Bu çalışmayla deneysel sonuçlar ve sayısal değerler birbirine yakın bulunmuştur. (

Aydın [51] tarafından yapılan bir çalışmada, alüminyum alaşımlı malzemelerin tek etkili bindirme bağlantısında, yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları göz önünde bulundurularak, iki farklı yükleme durumu için (eğme ve çekme) davranışları, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İki durum için, deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analiziyle tahmin edilen hasar yükleri kıyaslandığında, sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu kanaatine varılmıştır.

Yüksek dayanımlı E-cam lifleri kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye elemanıdır. Vaidya ve diğ. [52] mevcut toplu taşıma araçlarında kullanılan geleneksel metal-kontrplak zemin malzemesi yerine, sıcak eritmeli bir emprenye işlemi ile geliştirilen PP dokuma bant ve E-camı takviyeli kompozit malzemeyi kullanmış ve %40 ağırlık tasarrufu sağlamışlardır.

Whitworth ve diğ. [53], çalışmalarında pim bağlantılı kompozit levhalarda delik çevresinde meydana gelen gerilme dağılımını değerlendirmek için iki boyutlu sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Bu çalışmada Yamada-Sun hasar kriterini kullanmışlardır. Delik çevresinde oluşan hasarı belirlemek için karakteristik uzaklık hesaplarını analitik olarak yapmışlar ve elde edilen sonuçları mevcut deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlardır.

Cıvata bağlantılı karbon-epoksiden oluşan kompozit malzemelerde cıvata ile delik arasında meydana gelen boşluğun mukavemete olan etkisini inceleyen Kelly ve Hallström [54], çalışmalarını iki aşamada gerçekleştirmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlar ve yaptıkları analizler deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Cıvata ile delik arasındaki boşluk arttıkça, temas alanının azaldığı ve böylece bu durumun da bağlantıyı zayıflattığı tespit edilmiştir.

S. Feih, H.R. Shercliff [55] çalışmasında, farklı açılarla hazırlanmış L tipi kompozit düz plakaların birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcının dayanım performansını, bükülme deformasyonu altında incelemişlerdir. Hasar yükü ve konumu sayısal olarak tahmin edilip, deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Hasar dayanımının moment koluna ve uygulanan yer değiştirmeye bağlılığı araştırılmıştır Uygulanan yöntemin deneysel sonuçları tahmin etmede çok yönlü ve başarılı olduğu gösterilmiştir.

Demircioğlu [56] sıkıştırmalı kalıplama yöntemi kullanılarak, kırpılmış cam elyafların epoksi matrisle birleştirilmesiyle imal edilen kompozit malzemelerde, değişkenlik gösteren cam elyaf boynunun ve oranının kompozit yapı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Artan elyaf oranı ile eğilme ve çekme uzaması değerlerinin azaldığı ve artan elyaf boyu ile arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Cam elyaf takviyesinin malzeme içerisindeki oranı, kompozit malzemenin mekanik özelliğinin belirleyicisidir. Turhan [57], cam elyaf takviyeli plastik esaslı kompozit malzemelerde, cam elyafının farklı oranlarda kullanılmasının mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. Profil çekme yöntemiyle üretilen numuneler, toplam 9 farklı elyaf hacim oranına sahiptir ve bu malzemelerden 90 adet deney yapılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda CTP malzeme içinde

elyaf oranı arttıkça elastisite modülünün ve malzemenin mukavemetinin arttığını, poisson oranının azaldığını tespit etmiştir.

Jeong ve diğ. [58] çelik ve beton gibi mevcut liman sistemleriyle cam elyaf takviyeli plastik kompozitten üretilen sistemlerin uygulama ve güvenliklerini kıyaslamak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Laboratuvar ortamında statik testler ve yorulma testleri yapmışlar ve sonuç olarak cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin, geleneksel sistemlerini yerini alabilecek kadar dayanıklı olduğunu belirlemişlerdir. Bu yeni kompozit sistemin liman yapım süresi, işçilik ve daha az malzeme kullanımı gibi avantajları olduğu da vurgulanmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada pultruzyon yöntemiyle üretilen lamaların kimyasal ve mekanik bağlantıları deneysel olarak incelenmiştir. Bağlantı çeşidi 10 farklı şekilde yapılmış ve her bir bağlantı şekli için 4 adet numune test edilmiştir. Bu deneyler neticesinde bağlantılara çekme ve basma kuvveti uygulanarak mukavemeti en iyi olan bağlantı şekli saptanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmaların aşamaları aşağıdaki gibidir:

3.1. KOMPOZİT LAMA PROFİLLERİN PULTRUZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ

Tek yönlü mekanik özellik gerektiren alanlarda tercih edilen, cam elyaf lif takviye malzemesinin bir reçine ile birleştirilerek sıcak bir kalıptan çekilmesi prensibine dayanan kompozit malzeme sürekli üretim yöntemine pultruzyon adı verilmektedir. Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) lamalar 50x6 mm kesitinde ve 200 mm uzunluğunda olup, pultruzyon metodu ile Pull-Tech firmasında üretilmiştir. Malzeme %30 polyester + sertleştirici, %30 $CaCO_3$ (Kalsit), %40 fiber içermektedir. Malzemede 4800 tex filaman fiber kullanılmıştır. Ayrıca malzemenin yüzeyinin düzgünlüğünü sağlamak için 300 g /m^2 kırpık lif kumaş (mat) kullanılmıştır. Malzeme önce, fiberlerin kalsit + polyester + sertleştirici ve kalıp ayırıcı (PVA) dan oluşan banyodan, sonra kılavuzluk eden yönlendiriciden ve en sonunda sıcak kalıptan

geçirilmesiyle elde edilmiştir. Kalıbın başlangıç sıcaklığı 120^o, orta sıcaklığı 160^o ve çıkış sıcaklığı 120^o olarak ayarlanmıştır. Kalıp uzunluğu 1,2 m' dir. Tablo 3.1 'de üretici Pull-Tech firmasından elde edilen cam elyaf takviyeli plastik profile ait fiber doğrultusundaki ve fibere dik doğrultudaki özellikler gösterilmektedir.

Özellik	**Birim**	**Fiber Yönü**	**Fibere Dik Yön**
Çekme Dayanımı	MPa	240	50
Çekme Modülü	GPa	23	7
Basma Dayanımı	MPa	240	70
Eğilme Dayanımı	MPa	240	100
Elastisite Modülü	GPa	25	8,5

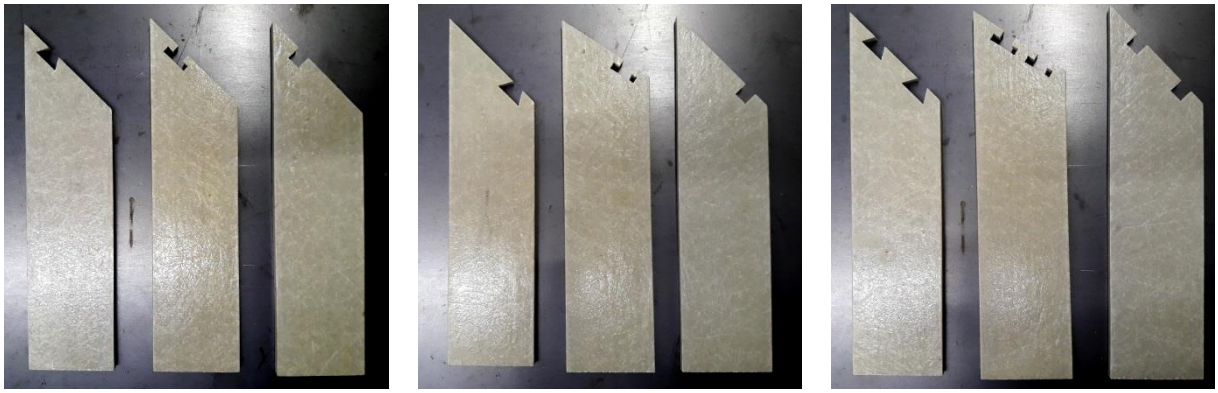
Tablo 3.1.: Pultruzyon Yöntemi ile Üretilmiş Olan Kompozit Profillerin Mekanik Özellikleri

3.2 YÜZEY HAZIRLAMA

Yapıştırma bağlantılarında en önemli faktörlerden biri, yapıştırma yüzeyinin durumudur. Yapışmanın sağlanabilmesi için yapıştırılacak yüzeylerin tam temasının sağlanması gerekmektedir. Kompozit malzemelerde yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemi, temiz ve iyi bir yüzey oluşturabilmek için zımparalama ve herhangi bir solvent, mineral alkolleri veya aseton türü ürünlerle temizleme şeklindedir. Temizleme işleminde solvent kullanıldığında, solventin kendi kendine kurumasını beklemeden temiz bir bez yardımıyla kurutulması gerekmektedir. Bu çalışmada, yüzey hazırlama işlemi zımparalama ile başlamaktadır. Daha sonra aseton ile yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece yapıştırma yüzeyinin toz, kir ve yağdan arındırılması sağlanmaktadır. Son işlem olarak temiz bir bez yardımıyla lamalar kurulanmakta ve yapıştırma için hazır hale getirilmektedir.

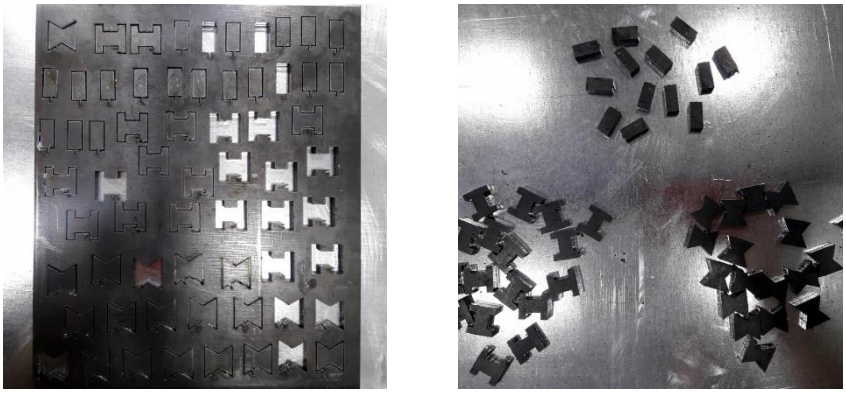
3.3 DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Pull-Tech firması tarafından üretilen lamalar öncelikle köşe birleştirmesi tek taraflarının 45^o lik açıyla ve istenilen mekanik bağlantılı profil şeklinde, iyi yüzey kalitesi sağlayan ve mikro çatlaklara sebebiyet vermeyen su jeti kesim makinesiyle Majet Su Jeti Kesim Sanayi firmasında kesilmiştir. Kesilmiş lamalara ait resimler Şekil 3.1.' de verilmiştir.



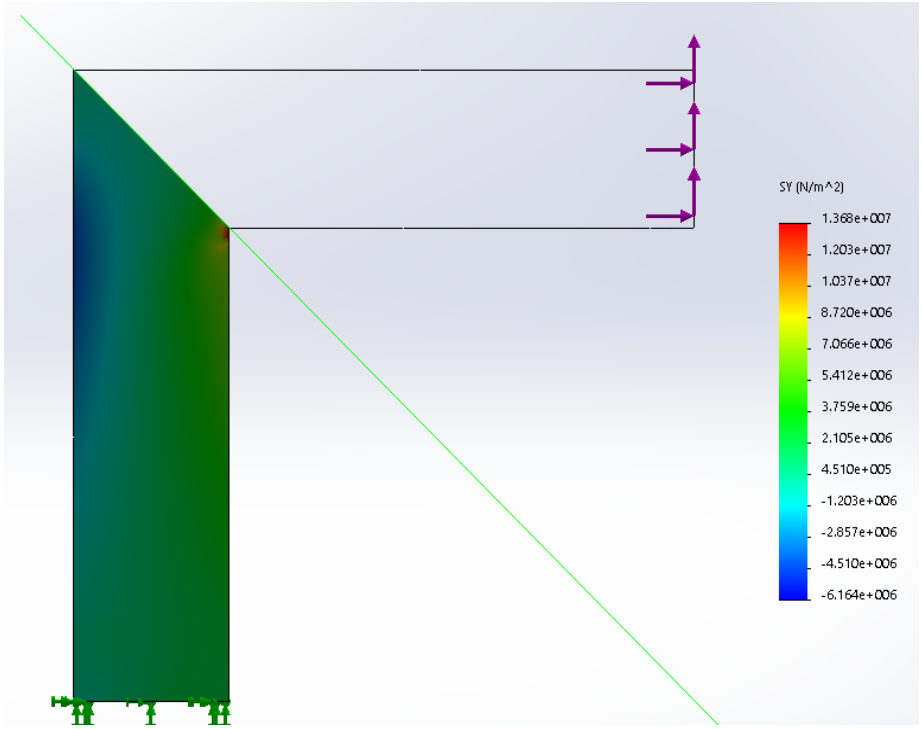
Şekil 3.1.: Deney numunelerinin hazırlanması.

Eşzamanlı olarak mekanik bağlantılarda kullanacağımız *I, K* ve *U* şekilli metallerin kesimi ST-37 isimli, sanayide siyah sac olarak bilinen inşaat çeliğinden LB Lazer firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Mekanik bağlantılara ait resimler Şekil 3.2.' de verilmiştir. Kesilen kompozit lamaların *L* Tipi köşe bağlantılarında kullanılacak olan iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ise, Akfix firmasının E340 kodlu ürünüdür. Bu epoksi yapıştırıcı 1:1 oranında reçine ve sertleştirici karışımı ile iyi boşluk doldurma yeteneği ve aynı zamanda yüksek dayanım özelliğine sahiptir. Yüzeyi asetonla temizlenip kurulanan lamalarla, yapıştırıcı yardımıyla *L* tipi köşe bağlantısı oluşturulmuş ve oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek deneye hazır hale getirilmiştir.



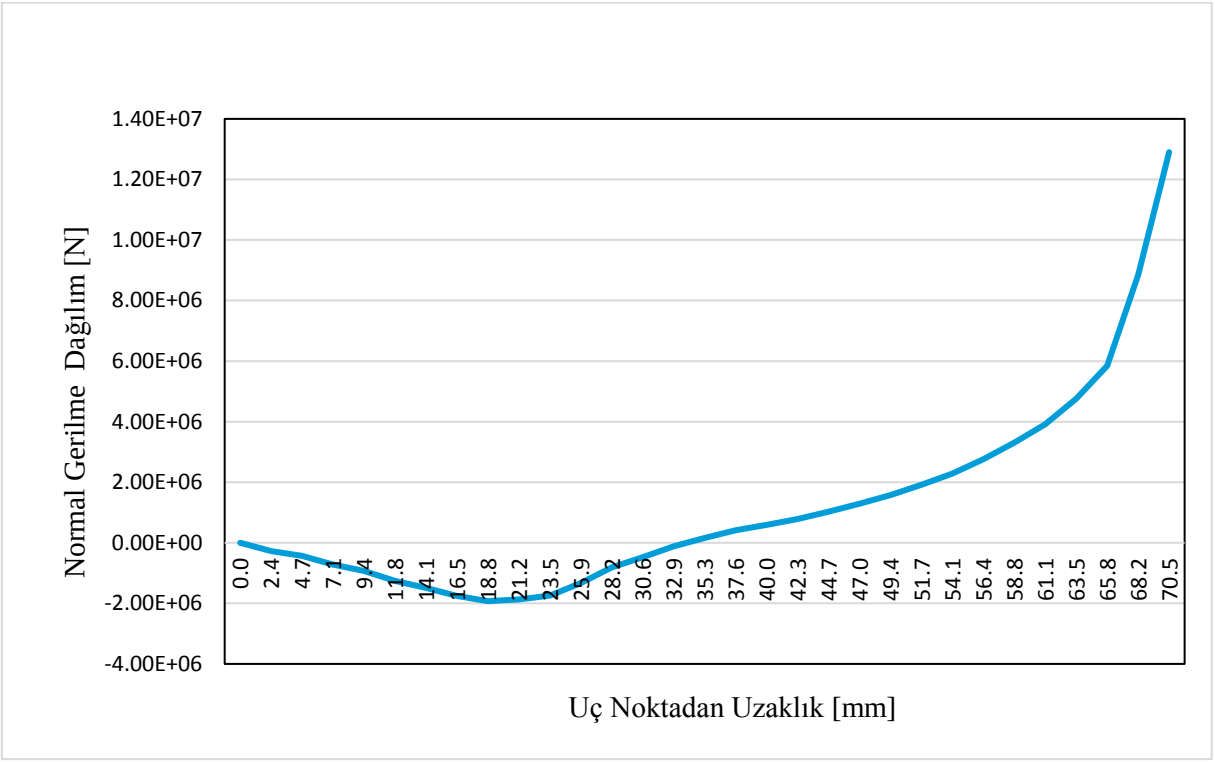
Şekil 3.2.: Mekanik bağlantı tipleri.

Köşe yapıştırma bölgesindeki gerilme dağılımını incelemek için Solidworks yazılımı ile analiz yapılmıştır. 70.5 mm uzunluğundaki köşe hattındaki normal gerilmeler, numunenin bir ucu sabit tutulup diğer ucuna 170 N'luk kuvvet uygulanarak saptanmıştır. Gerilme dağılımı Şekil 3.3' te verilmiştir.



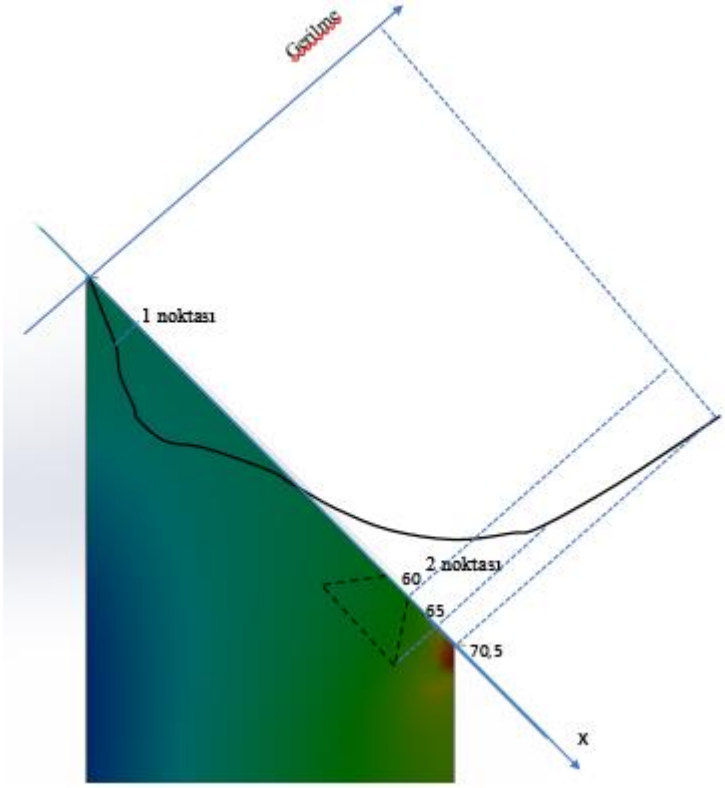
Şekil 3.3.: Köşe yapıştırma hattındaki gerilme dağılımı.

Yapılan analizin ardından yapıştırma hattındaki gerilme dağılımı grafik olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4.: Köşe yapıştırma hattındaki gerilme dağılımı grafiği.

Şekilde de görüldüğü gibi çekme durumunda iç bölgede maksimum çekme gerilmesi, dış bölgede ise maksimum basma gerilmesi oluşmaktadır. Mekanik bağlantının konumlandırılması için en uygun yer 70.5 mm uzaklığıdır. Bağlantının buraya konumlandırılması mümkün olmadığı için çekme gerilmesinin hızla arttığı bölge olan 65 mm'lik bölge, konumlandırma için seçilmiştir. Basma bölgesindeki hasar durumunun karşılaştırılabilmesi için ise, mekanik bağlantı diğer uçtan da aynı uzaklığa yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5.: Mekanik bağlantı konumlandırılması.

Deney numuneleri 10 farklı tipte hazırlanmıştır:

1.tip – Yapıştırma (N): Birinci tip numune, 200x50x6 mm boyutundaki, tek tarafları 45^{o} 'lik açıyla kesilmiş, hiçbir mekanik bağlantı bulunmayan, sadece lamaların yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle oluşan numune çeşididir. Numune, yaklaşık 70 mm uzunluğunda bir yapışma bölgesine sahiptir. Bu bağlantı tipi, mukavemetin arttırılmasına yönelik yapılan bu deneysel çalışmada referans bağlantı tipidir ve *N* olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.6.' da bağlantı tipleri gösterilmektedir.

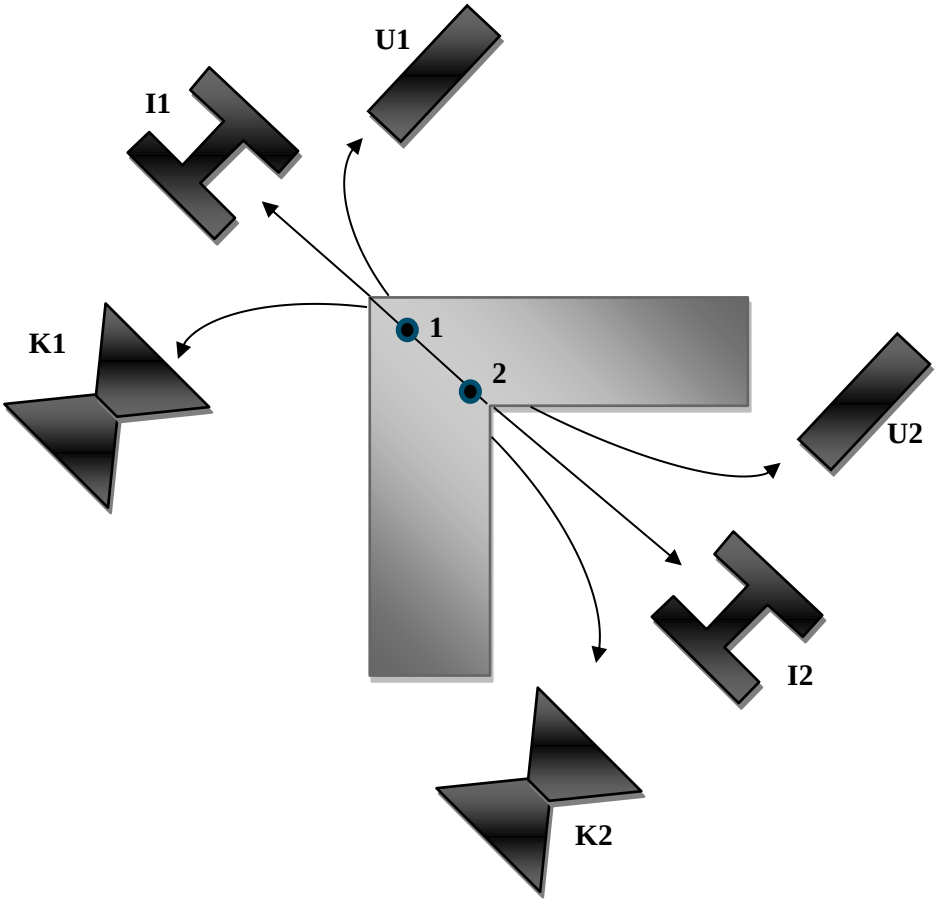
2. tip – I Şekilli Mekanik Bağlantı (I1): İkinci tip numune, lamaların yapıştırıcı ile birleştirilmesinin ardından, *I* şekilli mekanik bağlantı ile desteklendiği numune çeşididir. Bu

bağlantı tipinde, mekanik bağlantı *1* noktasında bulunduğu için *I1* olarak adlandırılmıştır. 15 mm uzunluğunda hazırlanan mekanik bağlantıyla desteklenmiş numunelerin hazırlanması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle birinci tip bağlantıda olduğu gibi lamaların yapıştırıcı ile birleştirilmesi, ardından destek elemanı olarak kullanılan mekanik bağlantının plastik çekiç yardımıyla çakılması ile numuneler hazır hale gelmiştir. Mekanik bağlantılara ait ölçüler Şekil 3.4' te verilmiştir.

3. Tip – I Şekilli Mekanik Bağlantı (I2): Üçüncü tip numune, ikinci tip numunedeki gibi, iki aşamada hazırlanan, yapıştırma ve *I* şekilli mekanik bağlantının bir arada bulunduğu numune çeşididir. *I* şekilli mekanik bağlantı *2* noktasında konumlandırıldığı için *I2* olarak adlandırılmıştır. Bu tip köşe bağlantısı ile referans numunesine kıyasla mukavemetin arttırılmasının incelenmesinin yanı sıra, aynı tip destek elemanın, destek mesafesinin değiştirilmesiyle, bağlantı performansına etkisi de incelenmiş olacaktır.

4. Tip – I Şekilli Mekanik Bağlantı (I12): Dördüncü tip numune, ikinci ve üçüncü tip numuneler gibi hem yapıştırıcı hem de mekanik bağlantının bulunduğu, *1* ve *2* noktasında birer adet *I* şekilli metal parçanın olduğu numune çeşididir. Bu sebeple *I12* olarak adlandırılmıştır. Aynı tip destek elemanın mesafesinin değiştirilmesinin yanı sıra her ikisinin de bulunduğu bir numune çeşidi olarak, mukavemetin arttırılmasındaki etkisi saptanmış olacaktır.

5. Tip – Kırlangıç Şekilli Mekanik Bağlantı (K1): Beşinci tip numune, yapıştırıcı uygulanmış, aynı zamanda kırlangıç geometrisine sahip kırlangıç şekilli mekanik bağlantı ile desteklenmiş numune çeşididir. Destekleme elemanının *1* noktasında olması sebebiyle *K1* olarak adlandırılmıştır. Kullanılan destekleme elemanı 15x15x6 mm ölçülerindedir. Bu tip bağlantıyla, referans numunesine kıyasla mukavemetin arttırılması incelenmiş ve bununla beraber farklı geometrideki mekanik bağlantının dayanıma etkisi, *I* tipi bağlantıyla karşılaştırılmış olacaktır.



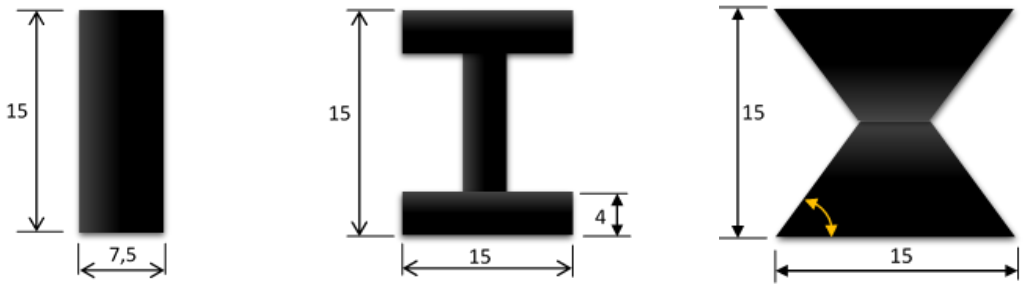
Şekil 3.6.: Mekanik bağlantılı numune tipleri

6. Tip – Kırlangıç Şekilli Mekanik Bağlantı (K2): Altıncı tip numune, *I2* bağlantısında olduğu gibi, *2* noktasında mekanik bağlantı bulundurduğu için *K2* olarak adlandırılmıştır. Bağlantının kırlangıç şekilli olması sebebiyle *K* ile sembolize edilmiştir. Hem yapıştırıcı hem de metal parça ile desteklenmiştir. Bu tip bağlantıyla, mekanik bağlantı mesafesinin mukavemeti arttırmadaki etkisi incelenmiş olacaktır.

7. Tip – Kırlangıç Şekilli Mekanik Bağlantı (K12): Yedinci tip numune, lamaların yapıştırıcı ile birleştirilmiş, ardından kırlangıç şekilli metal parçayla desteklenmesiyle elde edilen numune çeşididir. Hem *1* hem de *2* noktasında metal parçayla desteklendiğinden *K12* olarak adlandırılmıştır.

8. Tip – Dikdörtgen Şekilli Mekanik Bağlantı (U1): Sekizinci tip numune, yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiş, sonrasında dikdörtgen şekilli mekanik bağlantı ile desteklemiş numune çeşididir. *U1* olarak adlandırılmasındaki sebep, *1* noktasında destek elemanın olmasındandır. *I* ve *K* şekilli mekanik bağlantıların yanında, farklı geometriye sahip bir diğer

bağlantıdır. Referans numunesiyle karşılaştırıldıktan sonra, diğer *(I1 ve K1)* bağlantı tipleriyle kıyaslanarak mukavemete etkisi incelenmiş olacaktır



Şekil 3.7.: Mekanik bağlantı tiplerinin ölçüleri [mm].

9. Tip – Dikdörtgen Şekilli Mekanik Bağlantı (U2): Dokuzuncu tip numune hem yapıştırma hem de dikdörtgen şekilli mekanik bağlantı olmak üzere iki aşamada birleştirilen numune türlerinden biridir. *2* noktasında destekleme elemanı bulundurması sebebiyle *U2* olarak adlandırılmıştır. *U1* ile mekanik bağlantının mesafesinin; *I2* ve *K2* ile bağlantı geometrisinin mukavemete etkisi tespit edilmiş olacaktır.

10. Tip – Dikdörtgen Şekilli Mekanik Bağlantı (U12): Onuncu ve son tip numune, diğer mekanik bağlantılarda olduğu gibi yapıştırıcı ile birleştirme ve sonrasında mekanik bağlantı ile destekleme ile elde edilmiştir. *1* ve *2* noktasında mekanik bağlantı olması sebebiyle *U12* olarak adlandırılmıştır.

3.4. BAĞLANTI PERFORMANSLARININ TESPİTİ

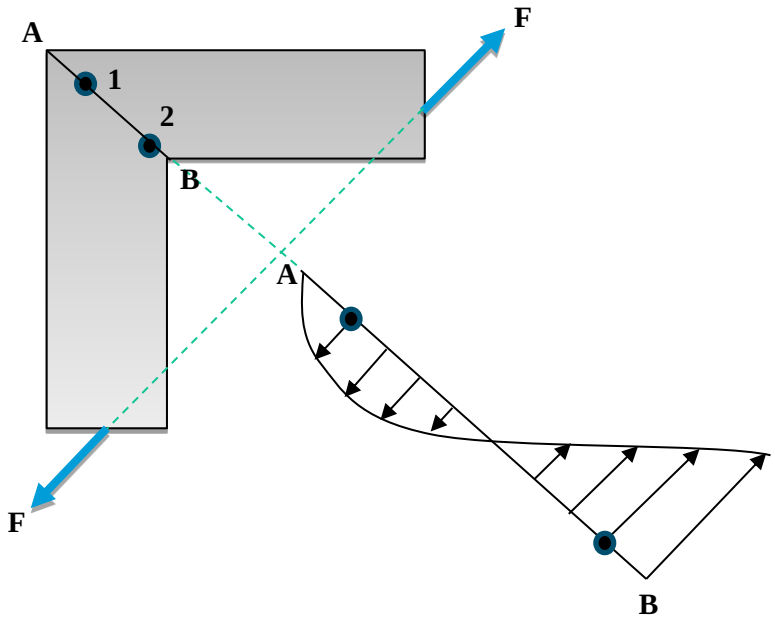
Statik çekme ve basma deneyleri ile *L* tipi köşe bağlantılarının kimyasal ve mekanik bağlantı performansı tespit edilmiştir. Bu deneyler İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 100 kN 'luk Instron marka çekme cihazıyla, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ortamdaki nemin bağlantı özelliklerine etkisi ihmal edilmiştir. Çekme deneylerinde alt çenenin sabittir ve 1.5 mm/dk. hızla, üst çenenin hareketiyle tüm numunelerde tamamen hasar meydana gelinceye kadar çekme işlemi devam etmiştir. Uygulanan kuvvete karşılık meydana gelen uzama miktarları bilgisayara kaydedilmiştir. Her tip numuneden 4 adet olmak üzere, toplamda 80 adet numune çekme ve basma deneyine tabi tutulmuştur. Birinci tip

olan sadece yapıştırma ile birleştirilen numuneye ait köşe bağlantısına ait çekme deneyi Şekil 3.8.' te görülmektedir.

Şekil 3.8.: Çekme deneyi.

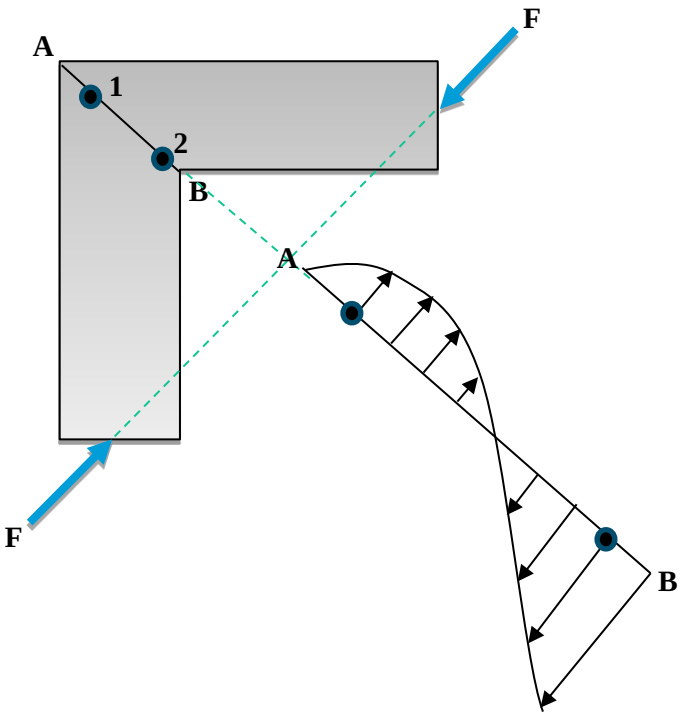
4. BULGULAR

L tipi köşe bağlantısı çekme durumundayken, meydana gelen gerilme dağılımı ve hasar mekanizması Şekil 4.1.' de gösterilmektedir. Köşenin iç tarafı *(B)* yük altında maksimum gerilmeye sahipken, uç kısmındaki *(A)* noktasında gerilme sıfırdır. Bu da çekme durumunda *2* bölgesinin yüksek gerilmeye maruz kaldığını, buraya koyulacak takviyenin malzeme mukavemetini yüksek oranda arttıracağını göstermektedir. *1* bölgesinde ise, gerilmeler küçük ve basma bölgesi olduğundan mukavemete çok bir etkisi olmayacağı görülmektedir.



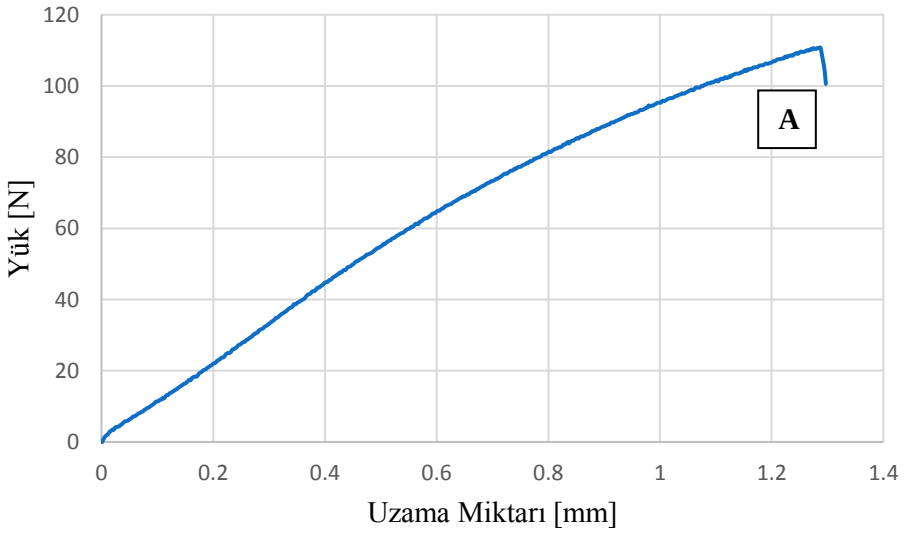
Şekil 4.1.: Çekme yükü altında malzemede meydana gelen gerilme dağılımı.

Şekil 4.2.' de *L* tipi köşe bağlantısının basma durumundaki gerilme dağılımı ve hasar mekanizması gösterilmektedir. Köşenin iç tarafı *(B)* noktası yük altında maksimum basma gerilmesine sahipken, uç kısmındaki *(A)* noktasında gerilme sıfırdır. Bu durumda *1* bölgesi çekme gerilmelerine sahiptir ve bunlar küçük gerilmelerdir. *2* bölgesinde ise, gerilmeler büyük ve basma bölgesinde olduğundan, bu bölgede malzemenin çatlamasına etkisi olmayacaktır. Sonuç olarak bu durumda dikkat edilmesi gereken bölge, çekme bölgesi olacaktır. Bu bölgede kullanılacak herhangi bir takviye, az da olsa malzemenin mukavemetinin arttırılmasını sağlayacaktır. *2* bölgesindeki gerilmelerin basma gerilmesi olması sebebiyle, burada kullanılacak takviyenin malzemenin mukavemetinde bir artış sağlamayacağı görülecektir.

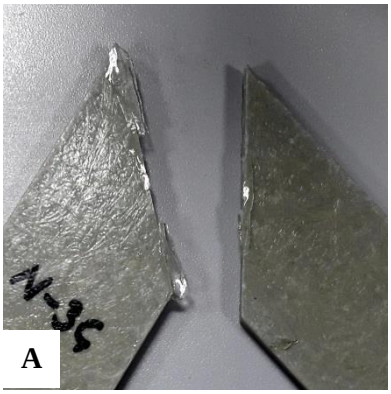


Şekil 4.2.: Basma yükü altında malzemede meydana gelen gerilme dağılımı

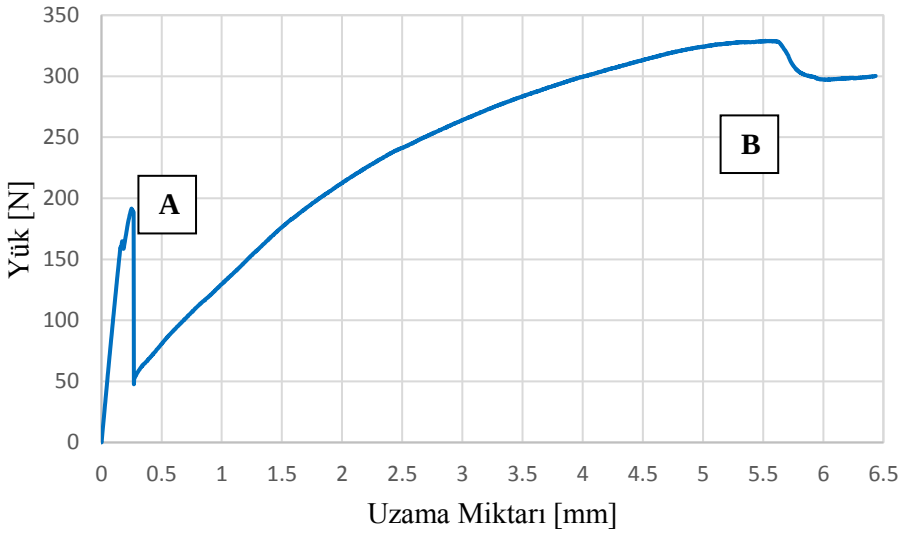
4.1. ÇEKME DENEYİ GRAFİKLERİ



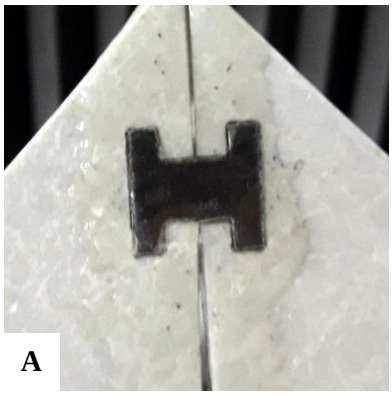
Şekil 4.3.: Yapıştırma bağlantılı numuneye ait çekme grafiği

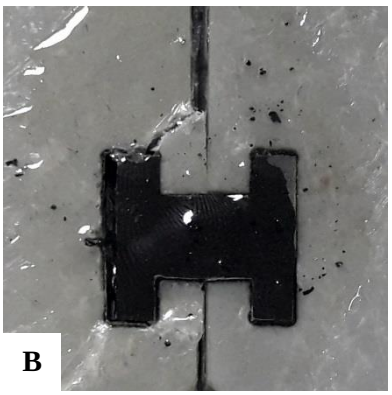


Yapıştırılan numunede uygulanan yük 110 N' ye ulaştığında malzemede katastrofik etki görülüp, birden malzeme kendini bırakmış ve bağlantı kopmuştur *(A noktası)*. Mekanik bağlantılara kıyasla, en zayıf bağlantının yapıştırma bağlantısı olduğu görülmüştür.

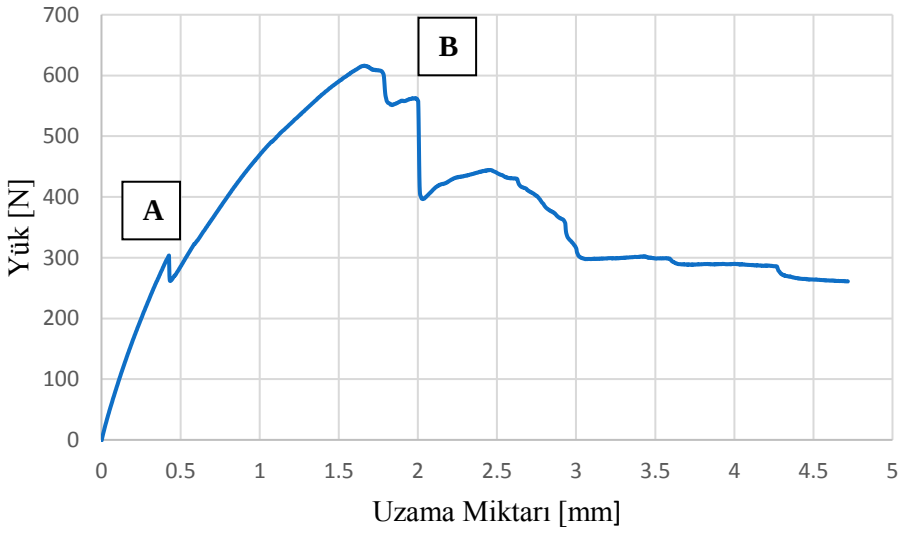


Şekil 4.4.: *I1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.

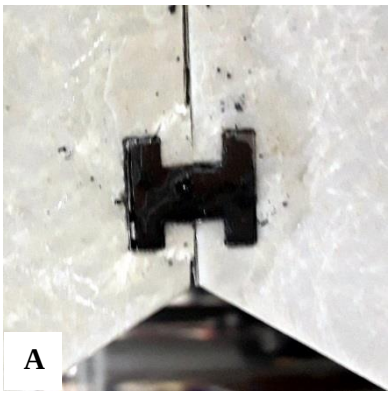


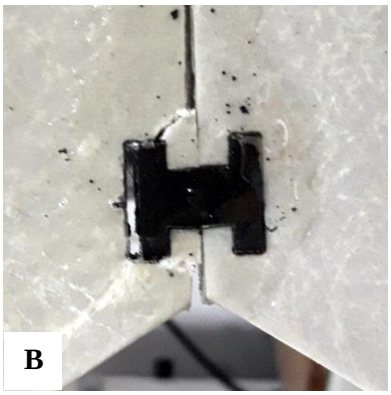


I1 şekilli mekanik bağlantıyla desteklenmiş numunede ilk çatlama, grafik üzerindeki *A* noktasında görüldüğü gibi 180 N' luk yük altında gerçekleşmiştir. Yapıştırılan yüzey kendini hemen bırakmış ve sonrasında sadece *I* şekilli bağlantı ayrılmaya karşı mukavemet göstermeye başlamıştır ve böylece grafik tekrar yükselişe geçmiştir. Uygulanan yük, maksimum yük olan 325 N 'ye ulaştığında ise, mekanik bağlantıda da lokal çatlamalar ve sonrasında ayrılma meydana gelmiş ve sonuç olarak malzemeyi bırakmıştır. *I1* şekilli mekanik bağlantıda, yapıştırılan bölgenin çekme bölgesinde bulunmasından dolayı, çekmeye karşı direnç zayıftır ve bu yüzden *I2* şekilli mekanik bağlantıya göre dayanım daha düşük çıkmıştır. Ayrıca yapılan deney neticesinde, referans numunesine *(Yapıştırma-N)* kıyasla, mukavemette %195 artış gözlemlenmiştir.

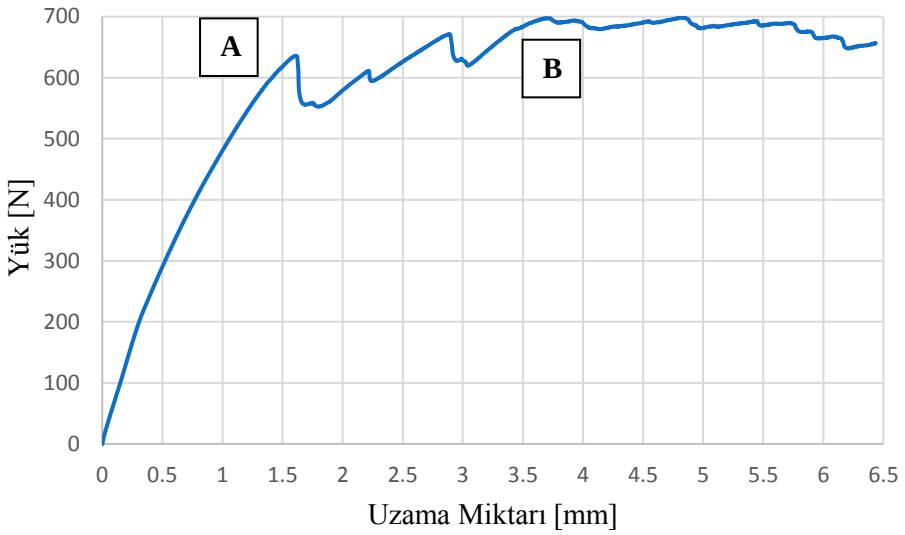


Şekil 4.5.: *I2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.

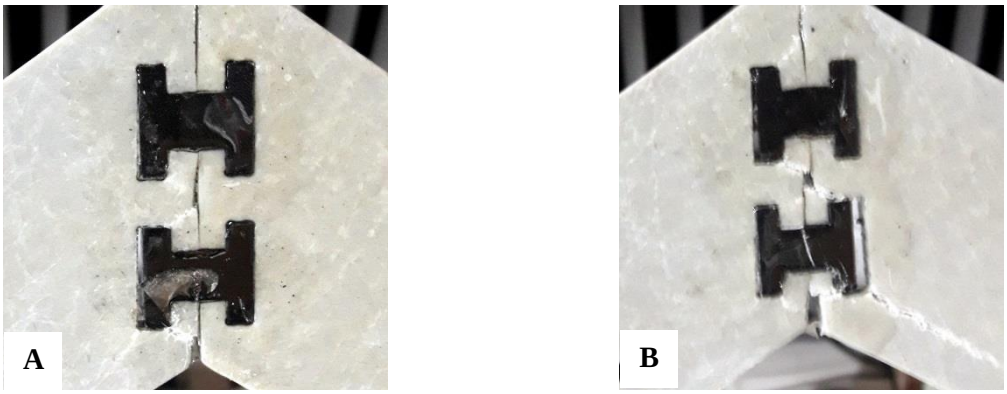




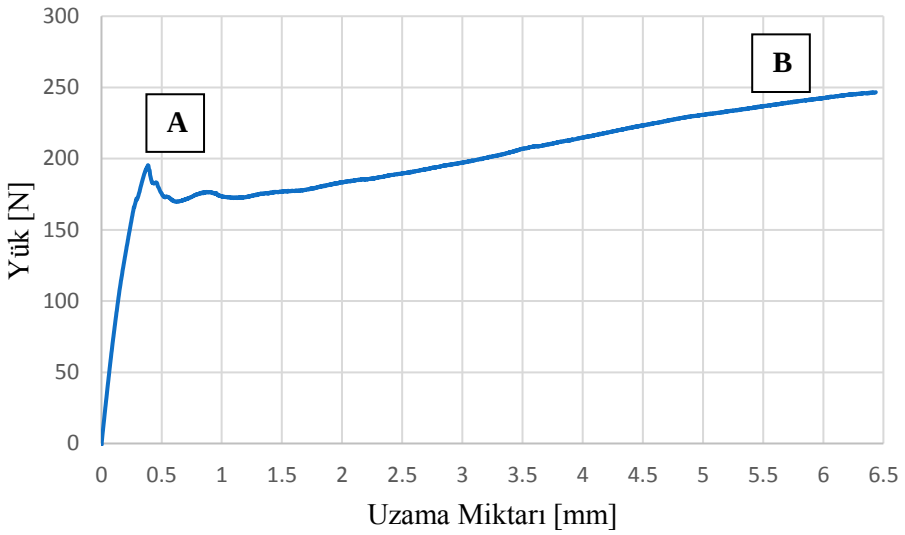
I2 şekilli mekanik bağlantının destek elemanı olarak kullanıldığı numunede, 300 N' lik yük altında ilk ayrılma gerçekleşmiştir. Bağlantının geometrik şeklinden dolayı, kompozit malzeme *I* 'nın köşeleri tarafından tutulduğundan, ayrılmaya karşı direnç gösterilmiştir ve grafik yükselmeye devam etmiştir. 600 N olan maksimum yüke ulaştığında, *B* şeklinde görüldüğü gibi ayrılmalar ve kopmalar meydana gelmiştir.



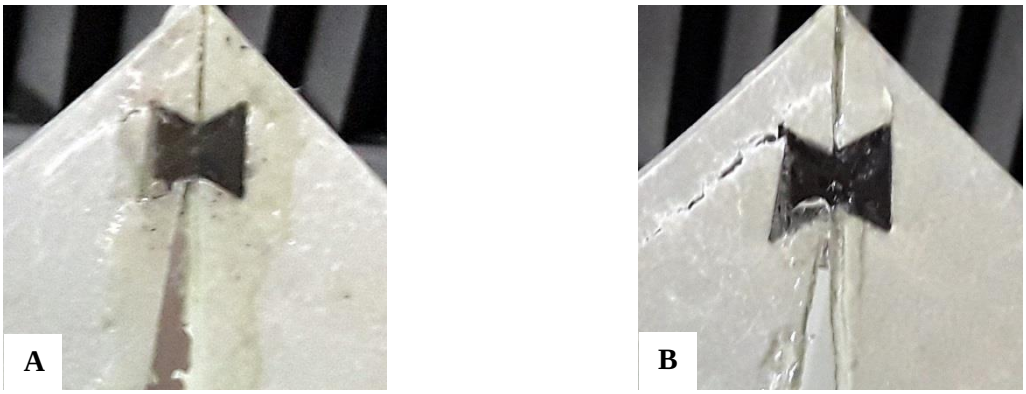
Şekil 4.6.: *I12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



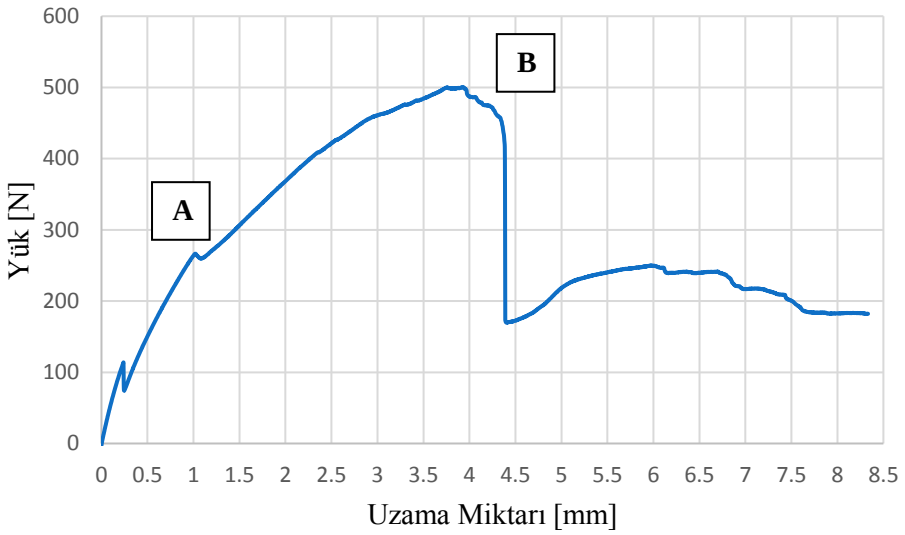
I12 şekilli mekanik bağlantılı numuneler, *I1* ve *I2* bağlantılılara kıyasla uygulanan yüke daha yüksek direnç göstermiştir. 700 N 'luk yük uygulandığında malzemede *B* şeklinde görüldüğü üzere *I*' nın köşelerinden malzemenin iç kısımlarına doğru çatlaklar, yarılmalar ve kopmalar meydana gelmiştir. Çatlakların doğrultusunun o yönde oluşmasının sebebi, fiberlerin de o yönde olmasındandır.



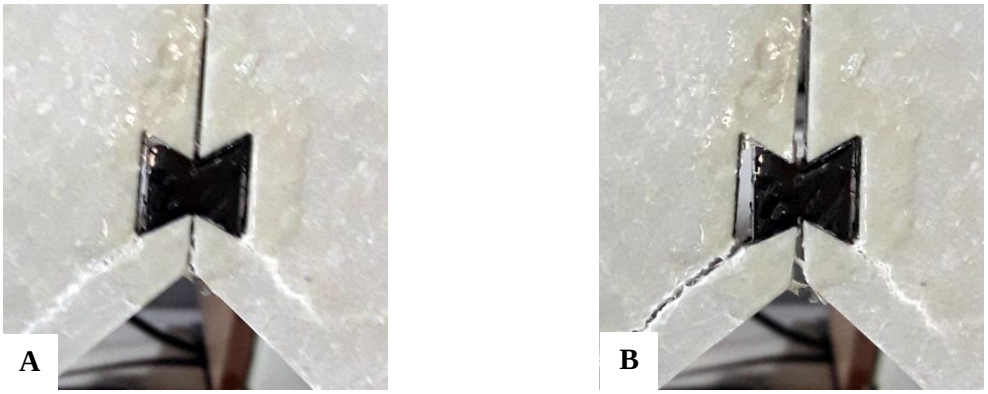
Şekil 4.7.: *K1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



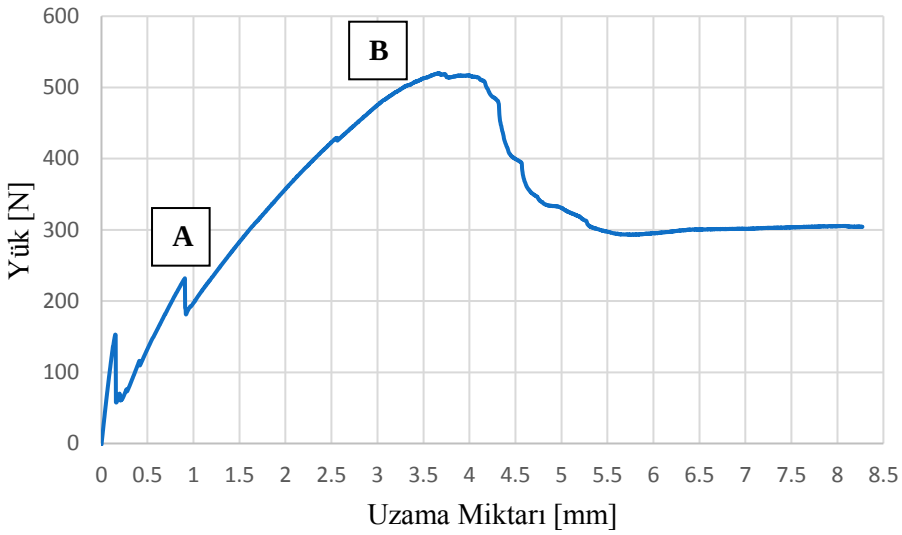
K1 şekilli mekanik bağlantıyla desteklenmiş numune, *I1* şekilli mekanik bağlantıyla desteklenmiş numune ile karşılaştırıldığında, ilk ayrılmada %8, referans numunesiyle karşılaştırıldığında %77 artış göstermiştir. Ama uygulanan maksimum yüke geldiğimizde, *K* şeklinin geometrisinden ötürü malzemeye tutunma gerçekleşmeyip, lokal sıyrılma meydana geldiğinden, *I* şekilli bağlantı kadar mukavemet göstermemiş ve daha düşük çıkmıştır.



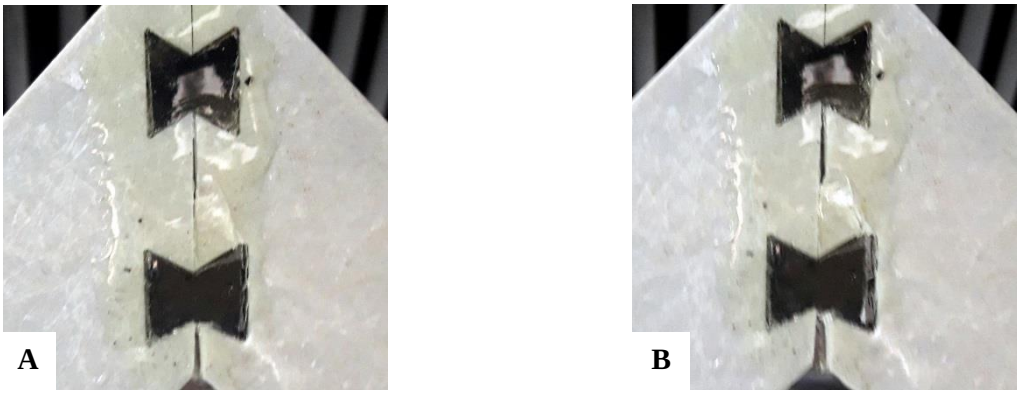
Şekil 4.8: *K2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



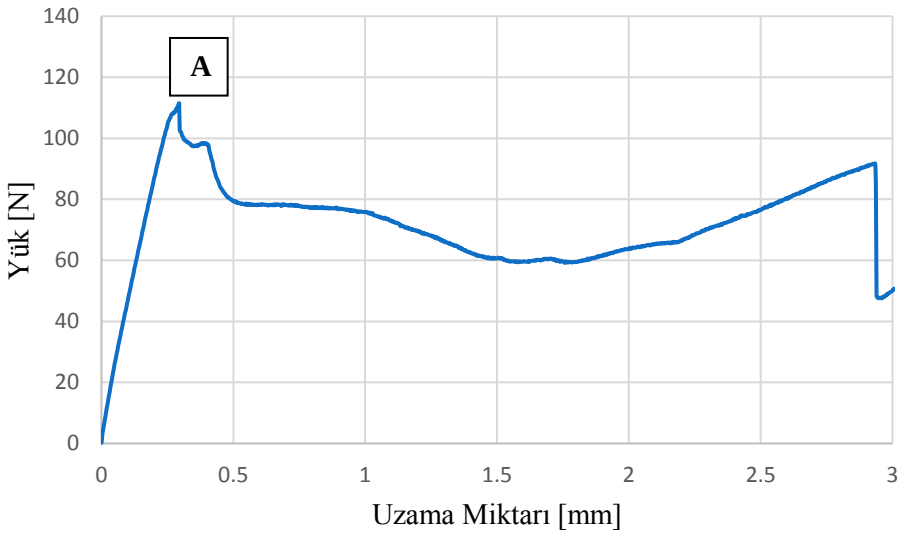
Grafikte görüldüğü üzere, 110 N ve 280 N olmak üzere iki noktada kırılma gerçekleşmiştir. İlk çatlama yapıştırma bölgesine ait olup 110 N 'de gerçekleşmiştir. 280 N' de oluşan ikinci çatlama ise, mekanik bağlantı köşelerinde meydana gelen ilk çatlaklardan dolayıdır. Destek elemanın çekme bölgesinde olması sebebiyle, *K1* şekilli mekanik bağlantıya göre, yüke karşı gösterilen mukavemet bir buçuk kat artmıştır. Referans numunesi ile kıyaslandığında ise, %400 artış göstermiştir. Bunun sebebi ise, mekanik bağlantının geometrisidir.



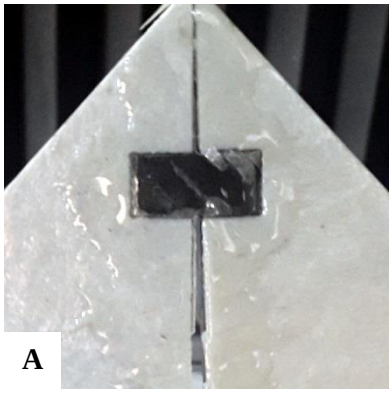
Şekil 4.9.: *K12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



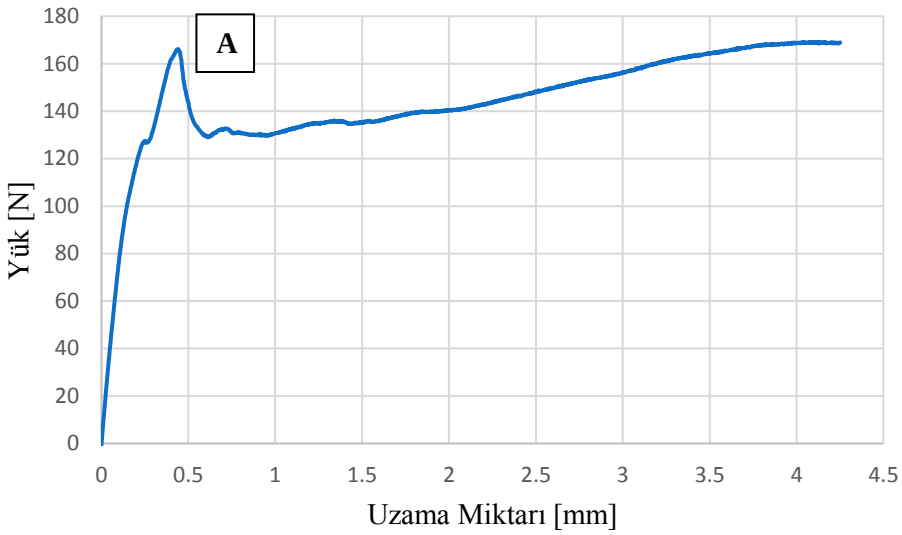
K2 şekilli mekanik bağlantılı numunenin çekme grafiğinde de olduğu gibi, burada da 150 N ve 220 N olmak üzere iki adet kırılma görülmüştür. *K12* mekanik bağlantılı numune, *K2*' ye benzerlik göstermiştir ve *K1* mekanik bağlantısının etkisinin az olduğu gözlemlenmiştir. *I12* mekanik bağlantısına göre, maksimum yüke mukavemette %27 azalma göstermiştir



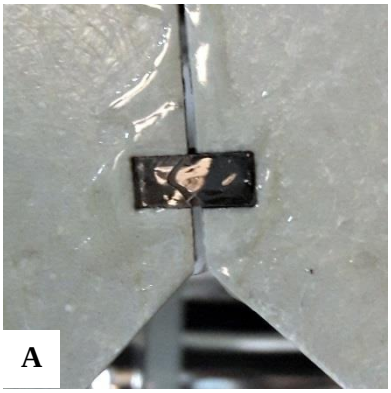
Şekil 4.10.: *U1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



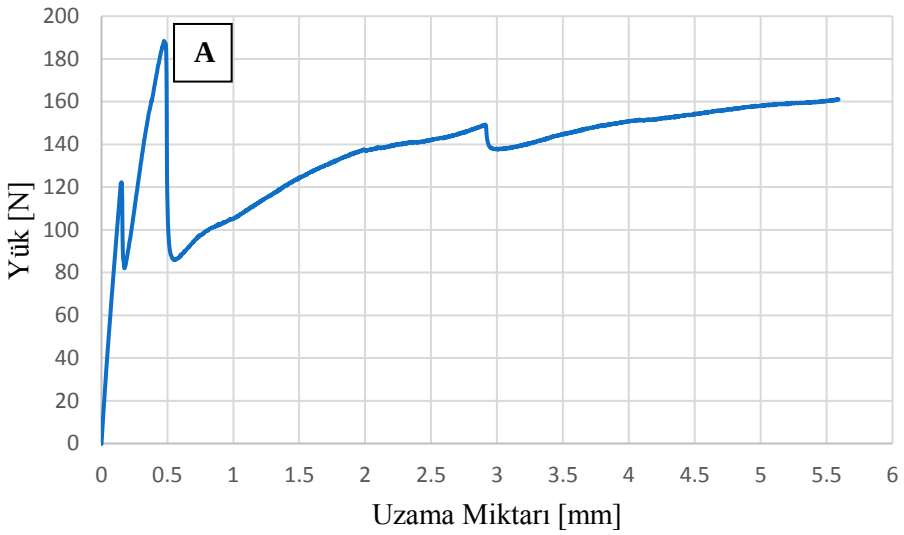
İlk çatlama değeri, referans numunesi ile aynı değerdedir. 110 N yük uygulandığında yapıştırma bölgesinde ayrılma gerçekleşip, malzeme kendini bırakmıştır. Mekanik bağlantının geometrisinden ötürü, herhangi bir direnç göstermemiştir ve sıyrılmıştır.



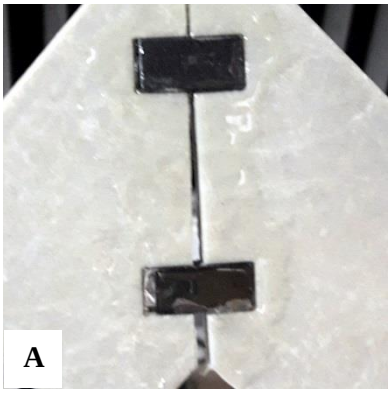
Şekil 4.11.: *U2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.



U1 mekanik bağlantısının basma bölgesinde bulunması sebebiyle ilk çatlama yükü düşüktür. *I2* ve *K2* mekanik bağlantılı numunelerle karşılaştırıldığında, diğerlerine göre daha zayıf bir bağlantı tipidir. *U1* mekanik bağlantılı numunedeki gibi, yapıştırma bölgesinde kopma gerçekleştikten sonra, mekanik bağlantı herhangi bir mukavemet göstermemiş, malzeme kendini bırakmıştır.

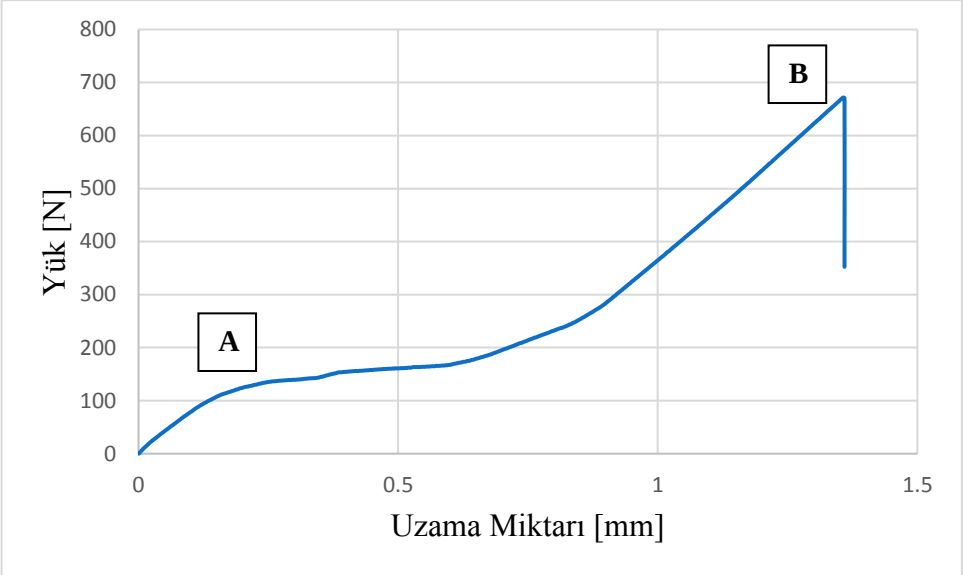


Şekil 4.12.: *U12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait çekme grafiği.

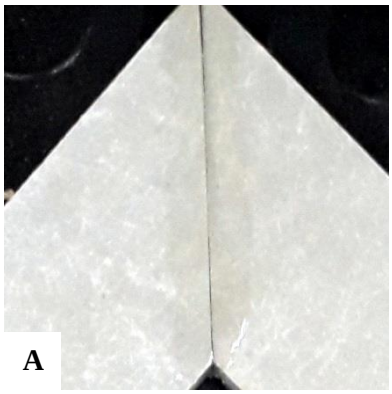


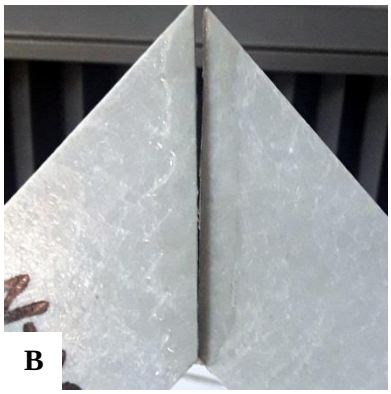
Referans numunesine göre mukavemette %72 artış gözlenmesine rağmen, diğer mekanik bağlantılarla kıyaslandığında, zayıf bir bağlantı olduğu görülmüştür.

4.2. BASMA DENEYİ GRAFİKLERİ

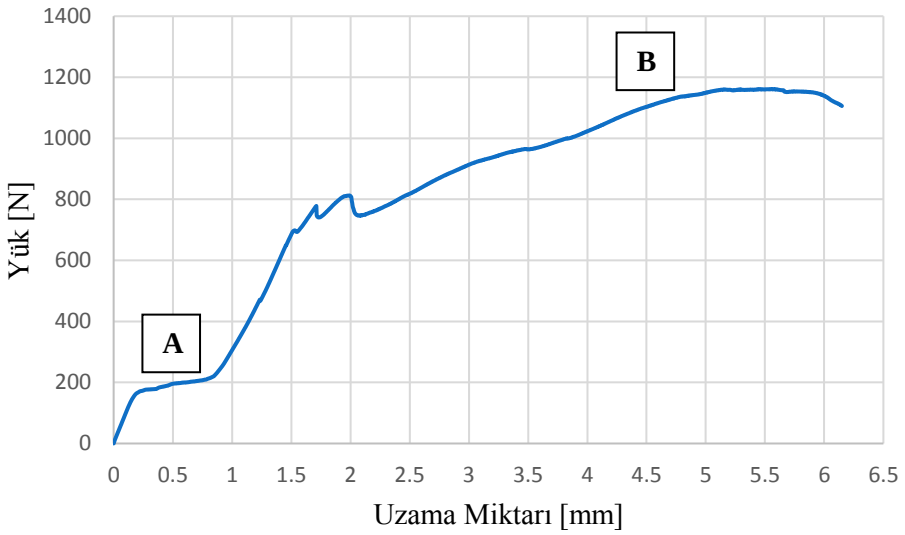


Şekil 4.13.: Yapıştırma bağlantılı numuneye ait basma grafiği.

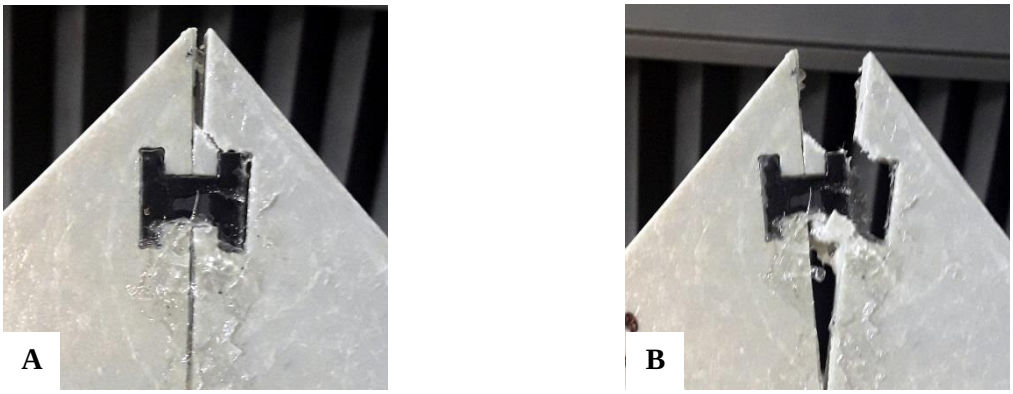




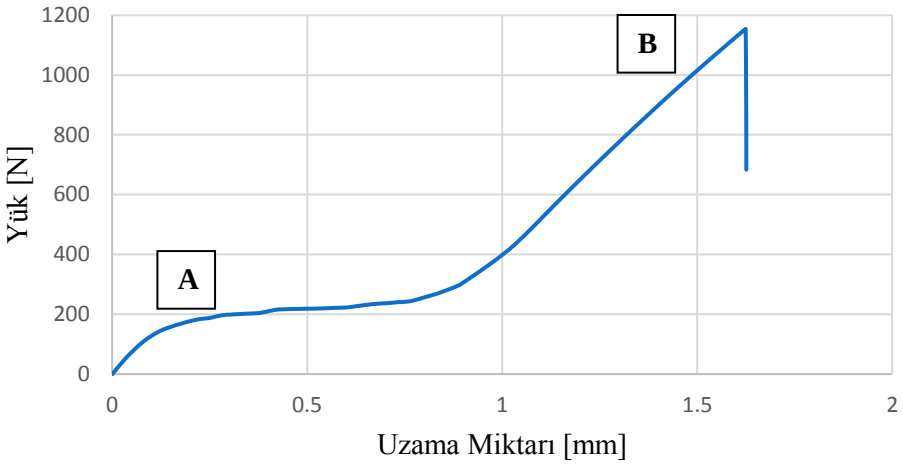
Yapıştırma bağlantılı referans numunesinde minimum yük 150 N'dir. Maksimum dayanılan yüke bakıldığında ise, grafik bize yaklaşık 700 N 'yi göstermektedir. Mekanik bağlantılı numunelerle kıyaslandığında, beklenildiği gibi en zayıf bağlantı şekli bu tiptir.



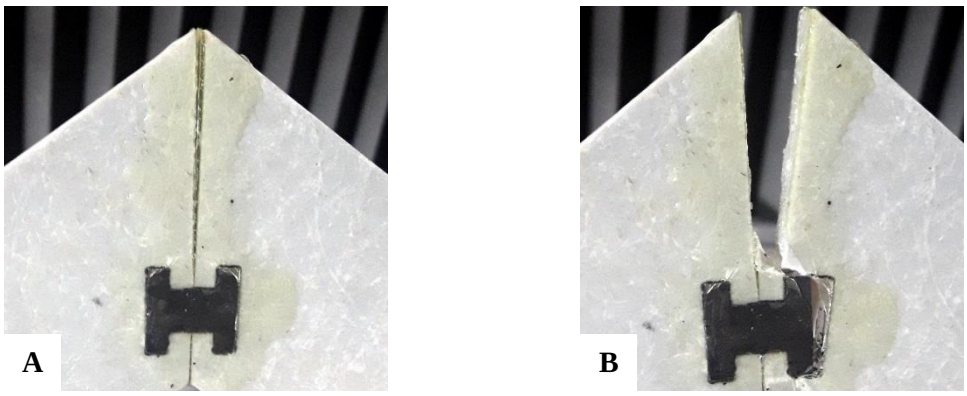
Şekil 4.14.: *I1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.



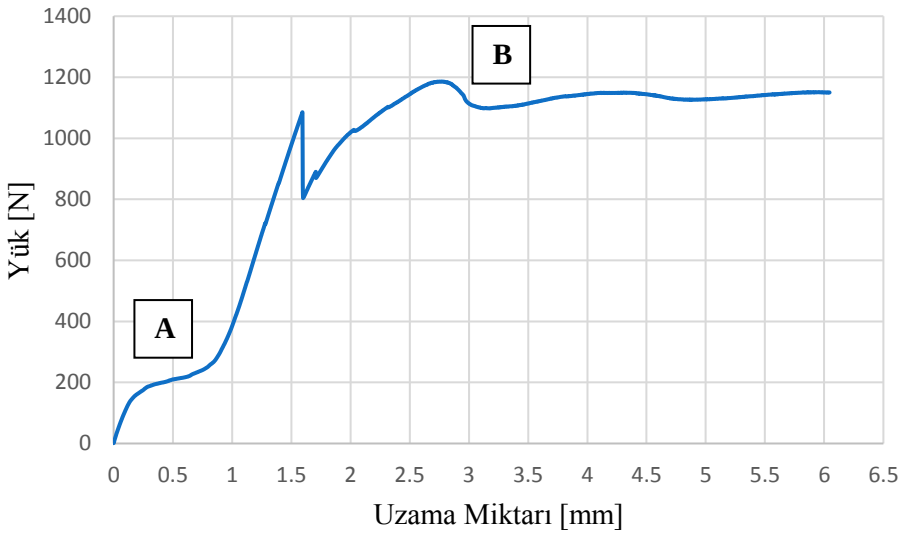
I1 şekilli mekanik bağlantıda, çekmeye maruz kalan, uç noktadan mekanik bağlantıya kadar olan bölgedeki ayrılmadan dolayı 200 N' de ilk kırılma oluşmuştur. Sonrasında mekanik bağlantının malzemeye tutunmasından dolayı grafik yükselmeye başlamış ve yaklaşık 1100 N 'ye geldiğinde malzemeden ayrılmıştır. Çekme grafikleriyle kıyaslandığında, basma grafiklerinin maksimum dayanım yükü daha yüksek çıkmıştır. Basma bölgesinde küçük gerilmeler oluştuğundan, o bölgede bir kopma meydana getirebilmek için daha yüksek kuvvetler uygulanması gerekmektedir.



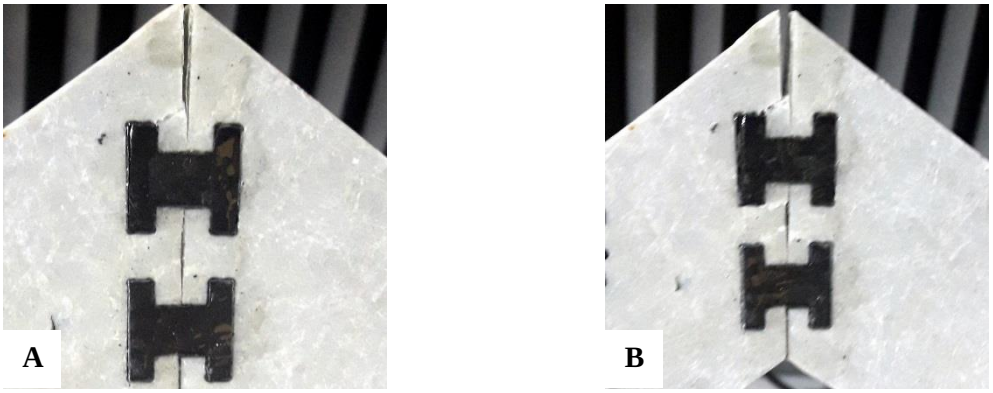
Şekil 4.15.: *I2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.



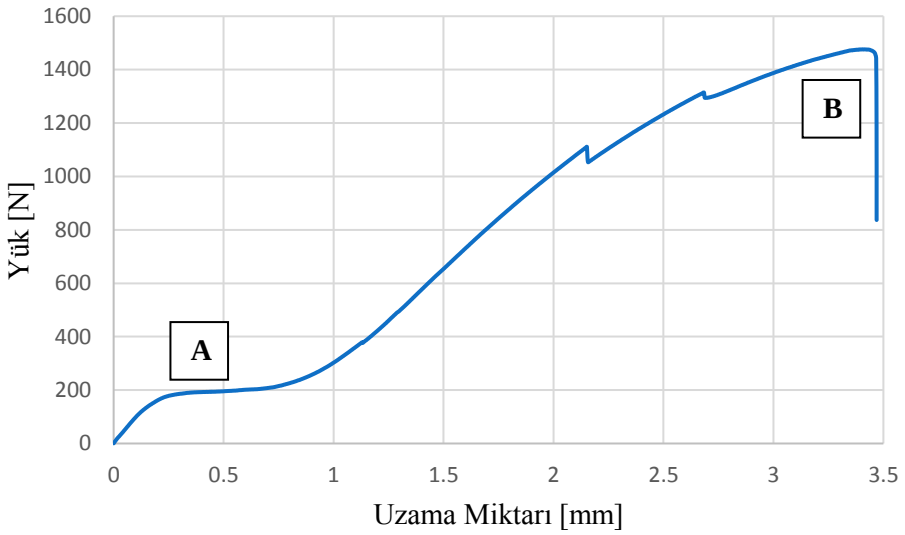
I1 şekilli mekanik bağlantıyla kıyaslandığında minimum ve maksimum yük değerleri yaklaşık değerlerdir. *I* şekilli mekanik bağlantıda, basma kuvveti altında, destekleme elemanının uç noktaya olan mesafesinin bir önemi olmadığı görülmüştür.



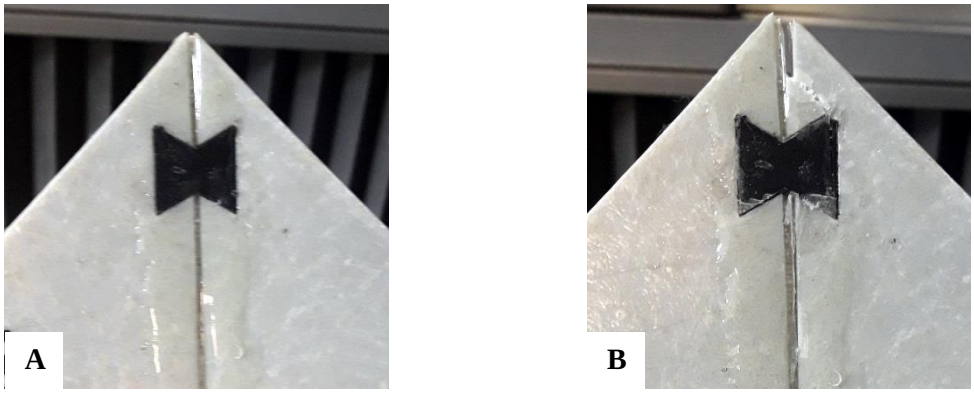
Şekil 4.16.: *I12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.



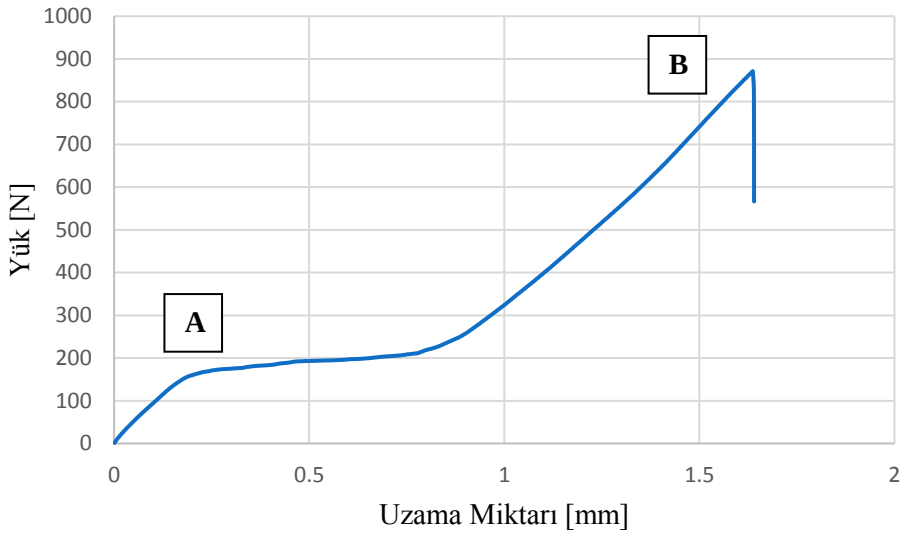
I12 destekleme elemanının kullanıldığı numunelerde, minimum ve maksimum değerlere bakıldığında, diğer *I* şekilli bağlantılara kıyasla önemli bir fark oluşmamıştır. Burada ve diğer numunelerde oluşan küçük çoklu kırılmaların mikro çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. *I1* profilli bağlantıların, geometrisinden ötürü çekmede sağladığı avantajı, basmada sağlamadığı görülmüştür.



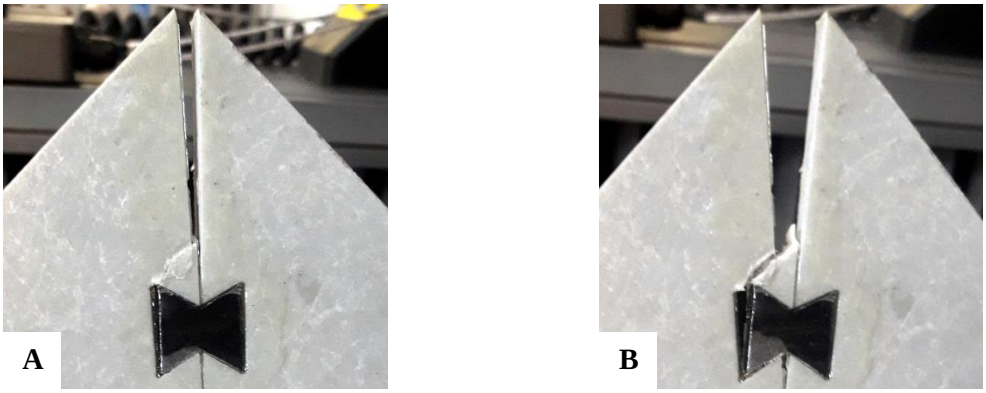
Şekil 4.17.: *K1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.



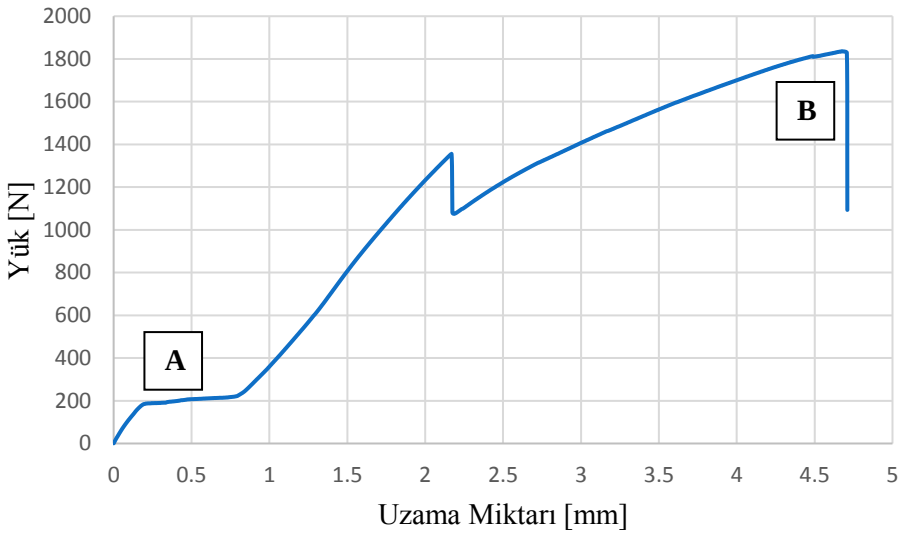
I şekilli mekanik bağlantılarda maksimum uygulanan yük 1200 N 'ye ulaştığında kopma meydana gelmesine rağmen, *K1* bağlantısında dayanım artmış ve bu değer 1500 N 'ye yükselmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, ilk önce yapıştırma bölgesi ayrılmış ve ardından zorlanmaya maruz kalan malzemede çatlamalar meydana gelip, sonrasında kopma şeklinde son bulmuştur.



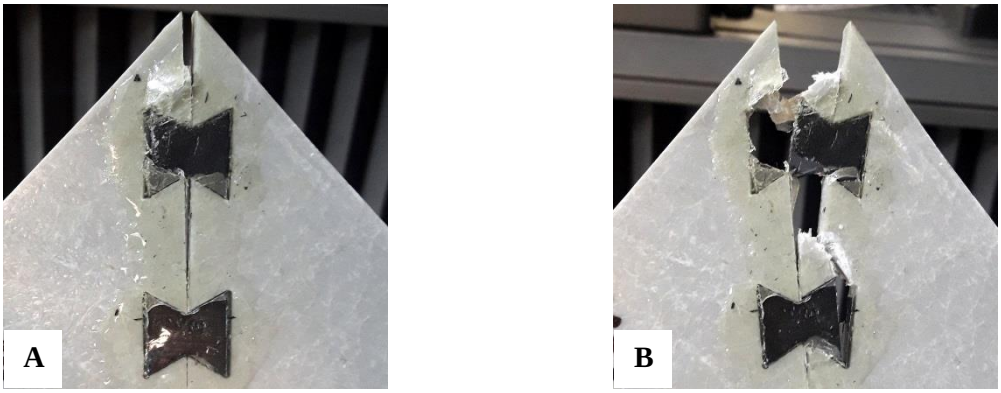
Şekil 4.18.: *K2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.



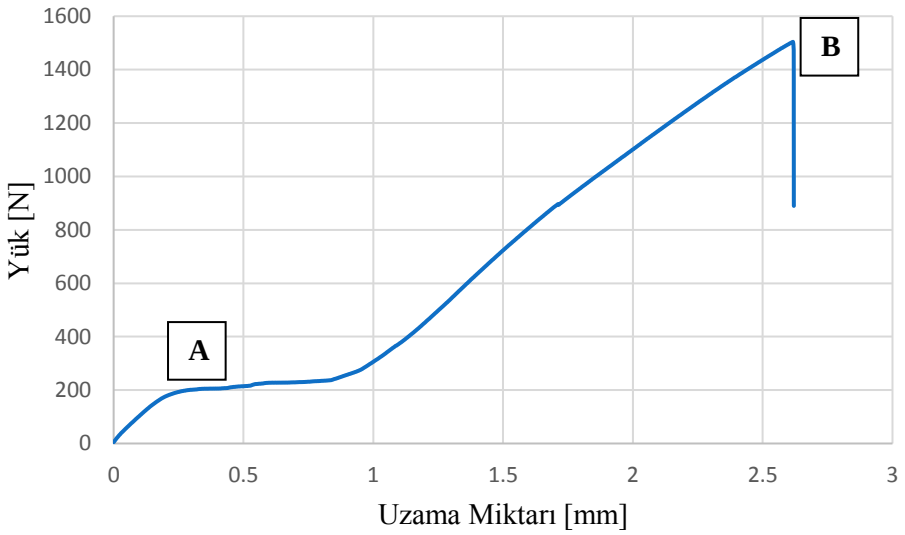
K2 mekanik bağlantılı numunede, maksimum uygulanan yük 850 N'dir. Çekme kuvvetine maruz kalan yapıştırma bölgesi hemen ayrılmış, mekanik bağlantılı bölge 850 N'ye kadar direnç göstermiş ve kopmuştur. Mekanik bağlantı çekme bölgesinde yer almadığı için gerilmeler *K1* mekanik bağlantılı numuneye göre daha düşük çıkmıştır.



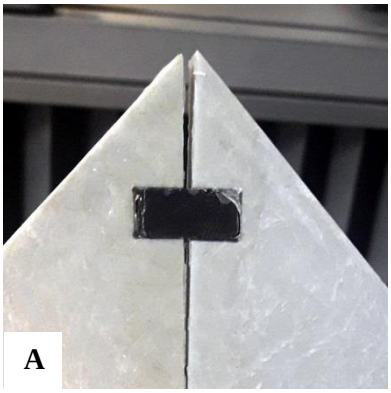
Şekil 4.19.: *K12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.

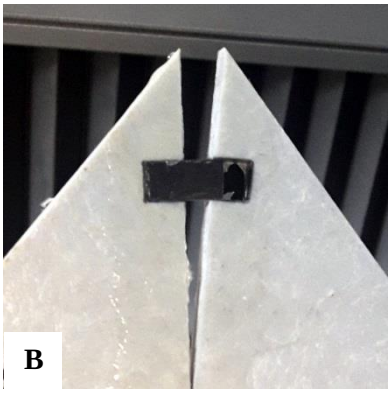


K12 bağlantılı numunelerde, *I12* bağlantılı numunelerde görüldüğü gibi iki kademeli kırılma gerçekleşmiştir. İlk kırılma yapıştırma bölgesinin ayrılması, ikinci kırılma ilk mekanik bağlantıdaki çatlama, sonuncu kırılma ise bağlantının kopma değeridir. *K12* bağlantısının göstermiş olduğu mukavemet, *I12* bağlantısına göre %50 artış göstermiştir.

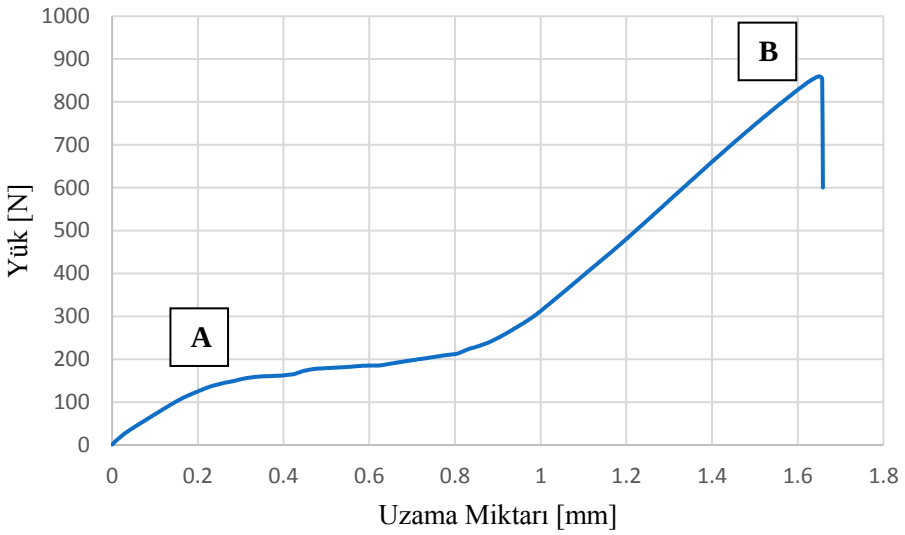


Şekil 4.20.: *U1* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.

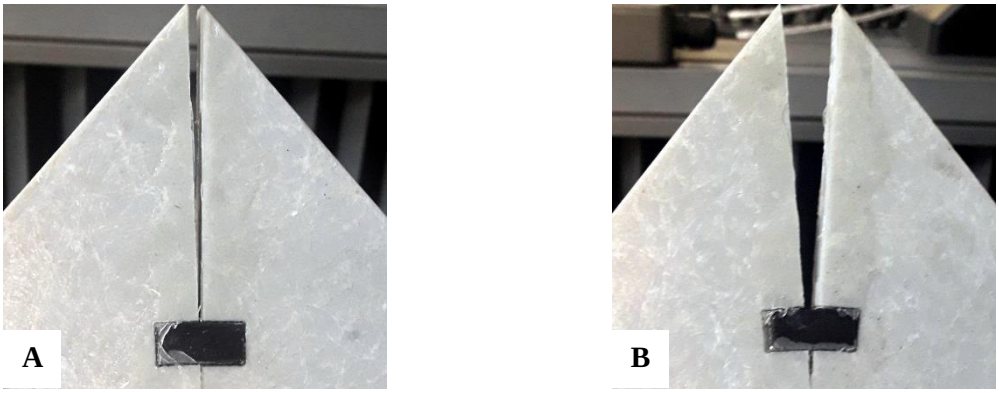




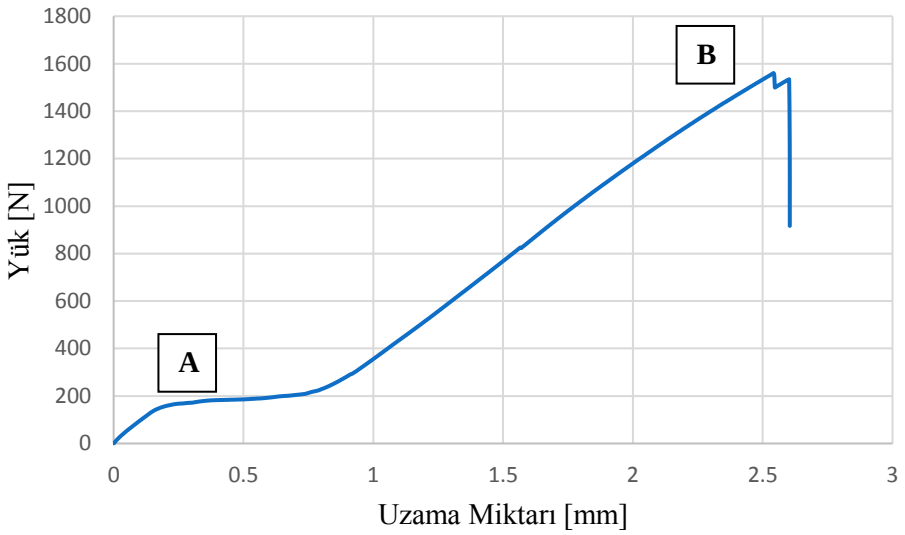
U1 mekanik bağlantıyla desteklenmiş numunede, mekanik bağlantı çekme kuvvetinin uygulandığı bölgede yer almaktadır. Bu tip bağlantılarda, daha önceki örneklerde de gördüğümüz gibi herhangi bir çatlak meydana gelmemekte, malzemeye tutunamayan mekanik bağlantı sıyrılmaktadır. Referans numunesi ile karşılaştırıldığında, mukavemet önemli oranda artış göstermiştir. *I1* ve *K1* mekanik bağlantılı numunelere bakıldığında ise, mekanik bağlantının çekme bölgesinde yer aldığı numunelerde, mekanik bağlantı geometrisinin basmada bir etkisi olmadığı görülmüştür



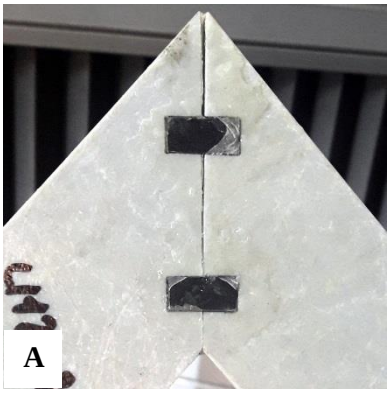
Şekil 4.21.: *U2* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.

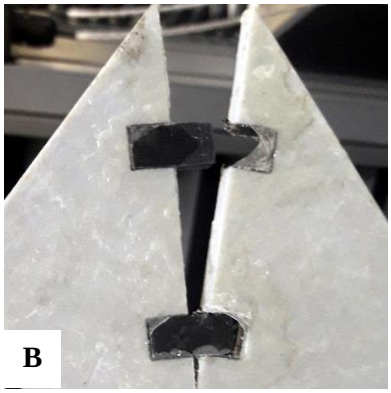


U2 bağlantılı numuneler, *K2* bağlantılı numuneyle basmaya karşı dayanımda benzer davranış göstermektedir. K2 ile desteklenmiş numunede olduğu gibi burada da maksimum uygulanan yük 850 N 'ye ulaşmıştır. Yapıştırma bölgesinde 200 'N ye ulaşıldığında ayrılma meydana gelmiş ve mekanik bağlantılı bölgeye gelindiğinde bağlantı dayanım göstermiştir ve grafik yükselmeye başlamıştır. 850 N' ye ulaşıldığında ise sıyrılmıştır. *I2* ve *K2* bağlantılı numunelerdeki çatlak, bağlantı elemanın geometrisinden dolayı bu numunelerde meydana gelmemiştir.



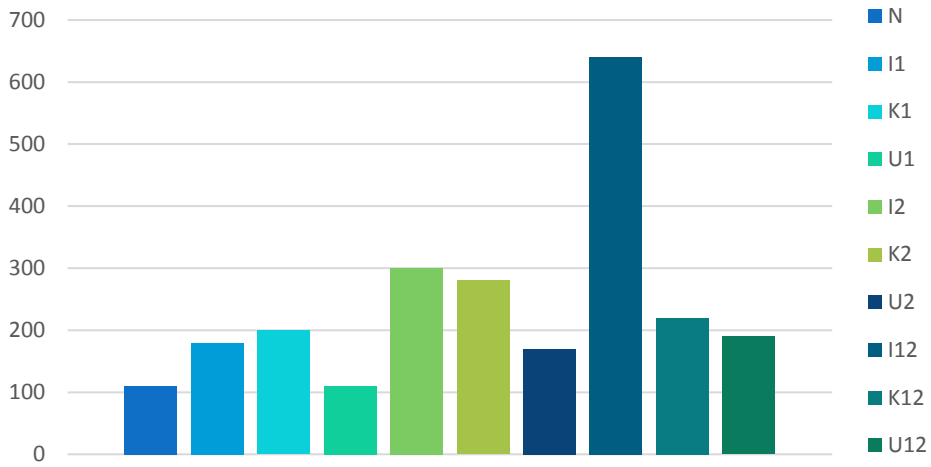
Şekil 4.22.: *U12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye ait basma grafiği.





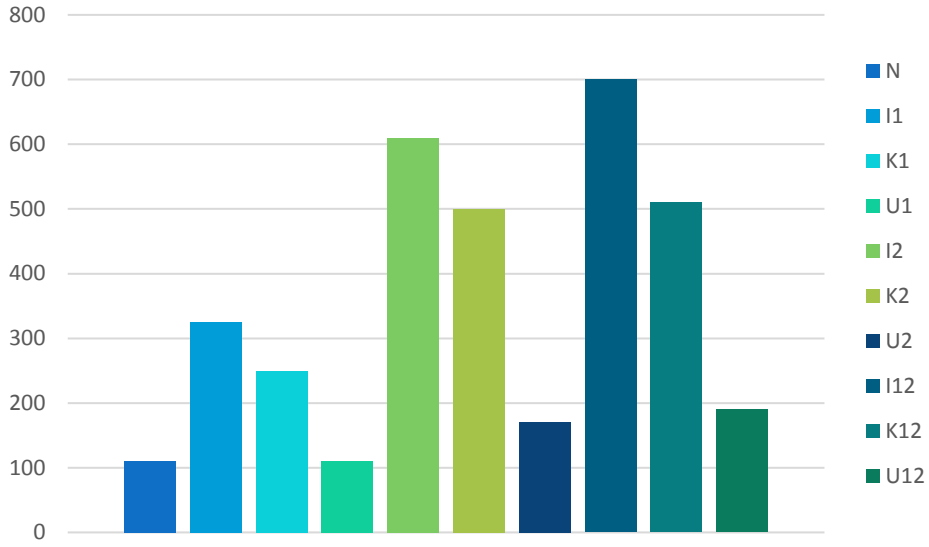
I12 bağlantıyla desteklenmiş numunelerde referans numunesine kıyasla %33 oranında artış gözlemlenmiştir. *I12* bağlantısından daha kuvvetli, *K12* bağlantısından daha güçsüz olduğu görülmüştür. Basma işlemi sırasında herhangi bir lokal çatlak meydana gelmemiş, bağlantı malzemeden sıyrılmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ



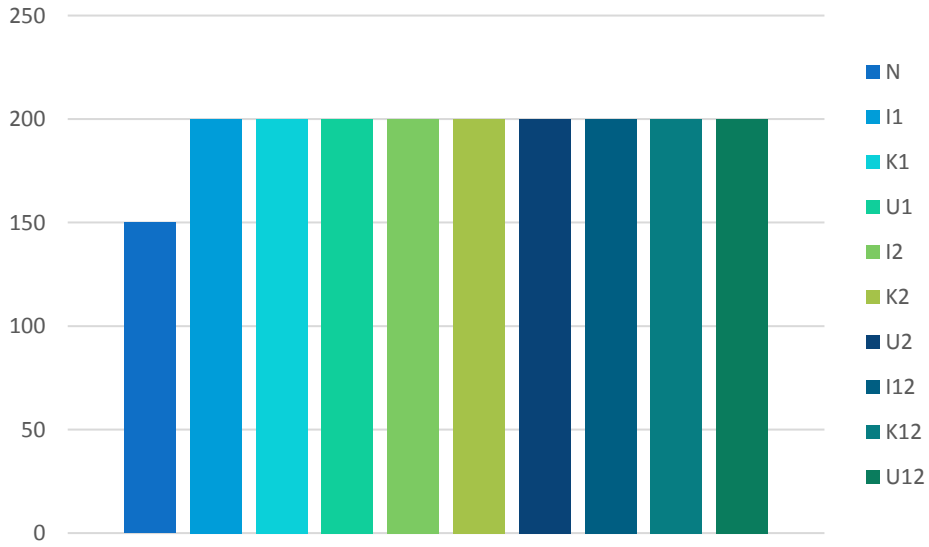
Şekil 5.1.: Minimum çekme yükü karşılaştırma grafiği.

Test edilen numunelerin minimum çekme yükü değerlerine bakıldığında, referans numunesi olan yapıştırma bağlantılı 110 N'de ayrılmıştır. *U1* şekilli mekanik bağlantılı numune de yapıştırmalı bağlantılı numune ile benzerlik göstermiş ve fazla dayanım uygulayamamış, geometrisinden dolayı malzemeden sıyrılmıştır. *I1* ve *K1* şekilli mekanik bağlantılarda minimum çekme yüküne gösterilen direnç, sırayla %63 ve %81 artış göstermiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, minimum çekme yükü altında en yüksek mukavemeti *K12* şekilli mekanik bağlantılı numuneye aittir.



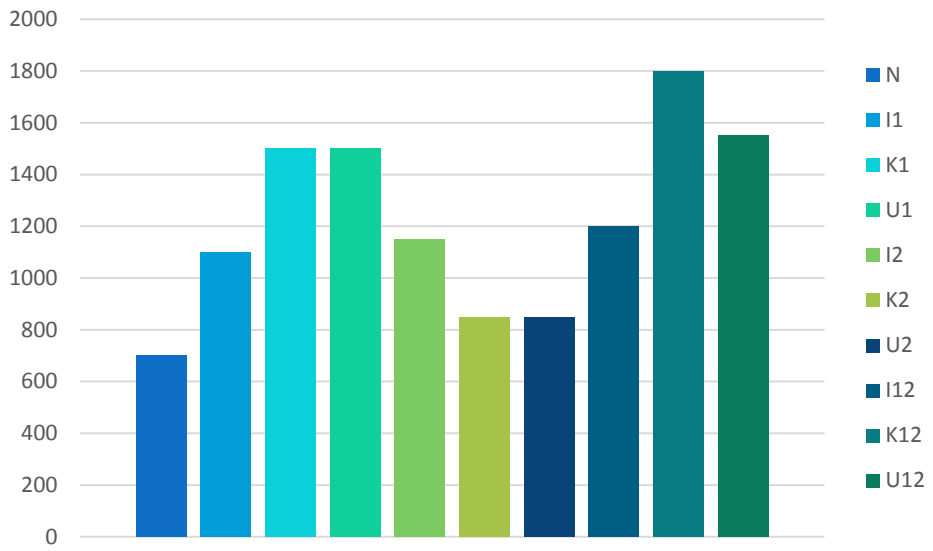
Şekil 5.2.: Maksimum çekme yükü karşılaştırma grafiği.

Yapıştırma bağlantılı ve *U* şekilli mekanik bağlantılı numunelerde minimum ve maksimum çekme yükleri eşittir. Uygulanan yük neticesinde malzeme direnç göstermeyip kopmuştur. Maksimum çekme yükü altında en yüksek dayanımı *I12* şekilli mekanik bağlantılı numune göstermiştir ve *I2* ile *K2* mekanik bağlantılı numunelerde de dayanım yüksektir. Dayanım %600' e kadar arttırılmıştır.



Şekil 5.3.: Minimum basma yükü karşılaştırma grafiği.

Minimum basma yükleri tüm deney numunelerinde eşitlik, referans numunesine göre de biraz artış göstermiştir. Bu durumun sebebi, basma anında mekanik bağlantılı numunelerin, bağlantıya kadar olan bölgesindeki yapıştırmanın ayrılmasıdır.



Şekil 5.4.: Maksimum basma yükü basma grafiği.

Maksimum basma yükü altında ise, en yüksek mukavemeti *K12* mekanik bağlantılı numune göstermiştir. Referans numunesiyle kıyaslandığında %157 oranında mukavemette artış gözlemlenmiştir. *U12, K1* ve *U1* mekanik bağlantılı numunelerde de mukavemette önemli bir artış görülmüştür.

Özetle, çekme ve basma deney sonuçlarına bakıldığında, yapıştırmalı bağlantılı numunedeki düşük mukavemet değerleri, eklenilen farklı geometrilerdeki mekanik bağlantılar ile önemli bir artış göstermiştir.

KAYNAKÇA

[1]. Erdal, M., 2003, Yüksek Teknoloji ve Bilişim Pazarlaması, İstanbul, Filiz Kitapevi.

[2]. Mazumdar, S. K., (2001), Composites Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering CRC Press, USA.

[3]. Cuffaro, D. ,(2006), Process Materials Measurement.

[4]. Loctite Corporation, (1998), Loctite Worldewide Design Handbook (Second Edition). Munich: Published by Loctite European Group.

[5]. Hull. D., and Clyne, T.W., 1996, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Pres, Cambridge, UK.

[6]. Arıcasoy, O., 2006, Kompozit Sektör Raporu, İstanbul Ticaret Odası.

[7]. Ralph, B., Yuen, H. C., Lee, W. B., 1997, The Processing of Metal Matrix Composites - an overview, Journal of Materials Processing Technology, 63, 339-353.

[8]. Callister, W.D., 1990, Materials Science and Engineering, Second Edition, John Wiley ve Sons Inc., Singapore,

[9]. Attwood, J., Labert, B. ve Neal, P., 2009, Edexcel A Level Design and Technology: Product Design, p.30,31,32.

[10]. Bulut, Y. ve Erdoğan, H., 2011, Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı, The Journal of Textiles and Engineer, vol. 82, s. 27.

[11]. Broutman, L.J., Krock, R.H., 1967, Modern Compozite Materials, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

[12]. Dai, H., 2001, Material, Process and Product Design of Thermoplastic Composite Materials, Prude University, Proquest Information and Learning.

[13]. https://www.researchgate.net/figure/Airbus-A380-material-composition21_fig1_2699232497, [Ziyaret tarihi: 29 Mayıs 2019].

[14]. Mazumdar, S.K., 2002, Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press LLC, A.B.D.

[15]. Akbulut, H., 1995, Alümina Fiber Takviyeli Al–Si Metal Matrisli Kompozit Üretimi ve Mikroyapı Özellik İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

[16]. Lesko, J., 1998, Industrial Design Materials and Manufacturing Guide, pg. 228-231.
[17]. Smith, W. F., 2009, Material Science and Engineering, çev. Kınıkoglu, N. G., McGraw – Hill.

[18]. Yüksel, M., Çakmakçı, A.T., 1998, Plastik Türlerinin Deneysel Yollarla Belirlenmesi, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi 3.Mühendislik Haftası Bildirileri.

[19]. Hancox, N. L. ve Mayer, R. M., 1994, Design Data for Reinforced Plastics, Chapman & Hall, London.

[20]. Schwartz, M. M., 1984, Compoosite Materials Handbook, McGraw-Hill Inc., 1-26.

[21]. Wrıght,R.E., 2000, Reinforcet Plastics and Compozites Chartes 2, Harper C.A., Modern Plastic Handbook.

[22]. Ersoy, H. Y., 2001, Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, No.66, İstanbul, 28-74.

[23]. Autor, K., 2006, Mechanics of Composite Materials, Taylor and Francis Group, 38-54.

[24]. Kayrak, M. A., 1999, Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, Eskişehir. 1-30.

[25]. Beylergil, B., 2010, Yapıştırılarak Bağlantı Sağlanan Kompozit Plakaların Bağlantı Performansının Artırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.

[26]. Şişecam, El Yatırması Yöntemi ile CTP Kalıplama, CTP Rehberi 2,1992b.

[27]. Şişecam, Cam Elyaf Sanayi A.S., Bülten,7,1996b.

[28]. Kinloch, A.J., 1987, Adhesion and Adhesives Science and Technology. Chapman and Hall, London, 441p.

[29]. 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.

[30]. Karadeniz E., 1989, Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Mukavemeti. (Y. Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü.İstanbul.

[31]. Fan W. X. ve Qiu, C. T., 1993, Load Distribution of Multi-Fastener Laminate Composite Joints, International Journal of Solids and Structures, 30 (21), 3013- 23.

[32]. Lessard, L. B. ve Shokrieh, M. M., 1995, Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure, Journal of Composite Materials, 29 (5), 671-697.

[33]. 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.

[34]. Mısıroğlu M., 1996, Cam Elyaf Takviyenin Mekanik Özelliklere Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[35]. Kinloch, A.J., 1997, Adhesives in Engineering. Proc. Instn. Mech. Engrs., s307-335.

[36]. Ramani, K., & Zhao, W., 1997, The Evaluation of Residual Stresses in Thermoplastic Bonding to Metal, International Journal of Adhesion and Adhesives, 17, 353-357.

[37]. Lee, W.S., & Lee, D.G., 1997, Static and Dynamic Torque Characteristics of Composite Cocured Single Lap Joints, Journal of Composite Materials., 31, 2188-2201.

[38]. Camanho, P. P. ve Matthews, F. L., 1997, Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP: a Review, Composites Part A, 28, 529-547.

[39]. Anduret, R.H., 1998, Special 2-D and 3-D geomtrically non-linear finite elements for analysis of adhesively bonded joints. Doktora Tezi, The Faculyt of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia, 135s.

[40]. Mazumdar, S.K., & Mallick, P.K., 1998, Static and Fatigue Behaviour Of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites. Polymer Composites., 19, 139-146.

[41]. Pfeiffer, P., & Shakal, M., 1998, Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strength and Durability of Adhesively Bonded Joints, J. Of Adhesion Sci. Technology, 12, 339-348.

[42]. 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.

[43]. Ciba., 1999, Ciba User's Guide to Adhesive, Surface Preparation andPretreatment. Ciba Specalty Chemicals, Switzerland, 40s.

[44]. Liu, J., & Sawa, T., 2000, Stress Analysis and Strength Evaluation of Single Lap Band Adhesive of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moment. J. Of Adhesion Science and Technology., 14, 67-92.

[45]. 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.

[46]. Sawa, T., Liu, J., Nakano, K., Tanaka, J., 2000, A Two-Dimensional Stress Analysis of Single Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to Tensile Loads, Journal of Adhesion Science and Technology, 14: 43–66.

[47]. 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.

[48]. 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.

[49]. Okutan, B., 2002, The effects of geometrical parameters on the failure strength for pin-loaded multi directional fiber-glass reinforced epoxy laminate, Composites Part B, 33, 567-578.

[50]. Higuchi, I., Sawa, T., Suga, H., 2002, Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Subjected to Impact Bending Moments. J. Of Adhesion Sci. Technology, 16, 1327-1342.

[51]. Aydın, M.D., 2003, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 180s.

[52]. Vaidya UK, Samalot F, Pillay S, Janowski GM, Husman G, 2003, Design and Manufacture Of Woven Reinforced Glass/Polypropylene Parts. J. Manuf Sci Eng 125: 333–43.

[53]. Whitworth, H. A., Othieno, M. ve Barton, O., 2004, Failure analysis of composite pin-loaded joints, Composite Structures, 59, 261-266.

[54]. Kelly, G. ve Hallström, S., 2004, Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effect of bolt-hole clearance, Composites : Part B, 35, 331-343.

[55]. S. Feih, Shercliff H.R., 2004, Composite Failure Prediction of Single-L Joint Structures Under Bending, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, p.381–395.

[56]. Demircioğlu G., 2006, Kısa Cam Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi. (Y. Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[57]. Turhan M., 2007, CTP'lerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması. (Y. Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

[58]. Jeong J., Lee Y.H., Park K.T., Hwang Y.K., 2007, Field and Laboratory Performance Of A Rectangular Shaped Glass Fiber Reinforced Polymer Deck. Composite Structures, 81: 622–628.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Tuğçe İşgüzar
Doğum Yeri	Diyarbakır
Doğum Tarihi	01.03.1991
Uyruğu	T.C.
Telefon	-
E-posta Adresi	tugceisguzar@gmail.com
Web Adresi	-

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Karabük Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölüm	Makine Mühendisliği (İng.)
Mezuniyet Yılı	2015

Makale ve Bildiriler
1.Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler: İşgüzar, T., Uysal, C., Arslan, K., Kurt, H., "Numerical Investigation of Convective Heat Transfer Characteristics of TiO2/Water Nanofluid in a Trapezoidal Microchannel", ICENS 2015 International Conference on Engineering and Natural Science, 15-19, May, 2015, Skopje, Macedonia. 2. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler: İşgüzar, T., Uysal, C., Arslan, K., Kurt, H., "İkizkenar Yamuk Kesitli Bir Mikrokanalda Zno-Su Nanoakışkanının Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Nümerik Olarak İncelenmesi", ULIBTK'15 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 02-05 Eylül 2015, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.