

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ÜRÜNLERİN TAHRİBATSIZ MUAYENESİ

Pınar KÖYMEN ÇAĞAR¹, Alperen DOĞRU²
Ege Üniversitesi, İzmir

H. Erdem YALKIN³
Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir

ÖZET

Teknolojinin gelişimi beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamış, ileri malzeme türleri ve bunların üretim yöntemleri çeşitlenmiştir. Özellikle havacılık sektöründe hafif, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanımlı ileri malzemeler önem taşımakta ve yapısal malzeme olarak kompozitin kullanımı artmaktadır. Bu çalışmada; havacılık sektöründe kullanılan polimer matrisli kompozitlerin genel özelliklerinin tanıtılması, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen, yapısında süreksizlikler bırakılan ve süreksizlik bulunmayan kompozit ürünlerin üretilmesi ve bu kompozit ürünlerin tahribatsız muayene yöntemi ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Sonuç olarak vakum infüzyon ile üretilen polimer matrisli kompozit ürünlerin süreksizliklerinin yerleri tahribatsız muayene yöntemi ile belirlenmiştir. Ardından söz konusu ürünlerden çıkartılan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Mekanik test sonuçları, tahribatsız muayene ile elde edilen verileri doğrular nitelik taşımaktadır.

GİRİŞ

Günümüzde teknoloji hızla gelişmekte, bununla birlikte yeni teknolojinin ihtiyaçlarına ve çalışma koşullarına, taleplerine uygun yeni malzeme ve alaşım gelişimi de söz konusu olmaktadır. İleri malzemeler endüstrinin tüm kollarını beslemekte, böylece çevrimsel döngü şeklinde teknoloji de bir üst basamağa taşınabilmektedir. Metaller, polimerler, seramikler gibi ana malzeme gruplarının yanında son yıllarda kompozit malzeme grubu hızla yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. Takviye ve matris olmak üzere iki veya daha fazla malzemenin kimyasal reaksiyona girmeden bir araya gelerek oluşturdukları malzeme grubuna kompozit malzeme denir. Matris ve takviye birbirlerinden farklı fiziksel özelliklere sahiplerdir. Bu iki yapıdan meydana gelen kompozit ise her ikisinden farklı özelliklere kavuşur. Kompozitin mekanik dayanımını takviye fazı sağlar. Matris ise takviyeyi dış etkilerden korur ve bir arada tutar [Vatangül, 2008].

Kompozitlerin metallere göre dayanım/ağırlık oranları diğer bir deyişle spesifik mukavemetleri yüksektir ki bu özellik uçak ve uzay teknolojisi için büyük önem taşımaktadır. Spesifik mukavemeti yüksek olan malzeme güçlü ancak hafif malzemedir [Abrate, 1991], [Turan, 2007]. Hafiflik ve sağlamlık özellikleri sayesinde kompozit malzemeler havacılık sektöründe hızla yaygınlaşmakta ve son yıllarda uçak yapısal malzemesi olarak büyük bir oranda kullanılmaktadır. Böylece daha az

¹ Öğr. Gör., Uçak Teknolojisi Prg., E-posta: pinar.koymen.cagar@ege.edu.tr

² Öğr. Gör., Uçak Teknolojisi Prg., E-posta: alperen.dogru@ege.edu.tr

³ Öğrenci, Fen Bilimleri Enstitüsü, E-posta: erdem.yalkin@ogr.deu.edu.tr

yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimlilik artışı amaçlanmaktadır. Ayrıca titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde kompozit malzemelerin önemini arttırmaktadır.

Vakum İnfüzyon yöntemiyle yüksek kaliteli kompozit parçalar üretilebilmektedir. Otoklav kullanılmaması orta hacimli üretimler için uygundur ve maliyeti oldukça düşürür. Büyük karmaşık şekilli parçalar iyi yüzey kalitesiyle üretilebilmektedir ve büyük karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesi son ürünlerdeki parça sayısını azaltmaktadır. [Hexcel].

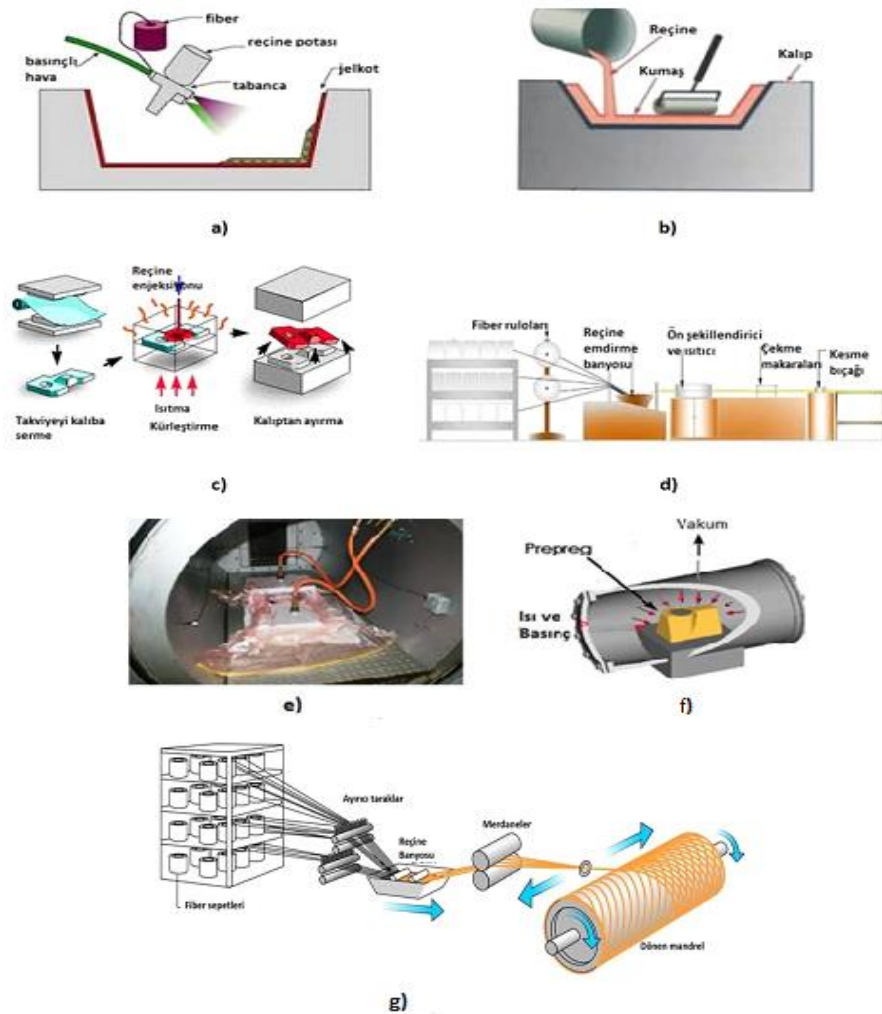
Kompozitler matris türüne göre sınıflandırıldığında polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli olmak üzere üçe ayrılırlar. Havacılık sektöründe polimer matrisli kompozitler kullanılmaktadır ve Boeing 787 Dreamliner için “plastik uçaklar” söyleyişi de buradan ortaya çıkmıştır. Polimer matrisli kompozitlerin püskürtme (spray-up), elle serme (hand layup), enjeksiyon kalıplama, profil çekme (pultrüzyon), reçine transfer kalıplama (RTM), vakum infüzyon, filaman sarma, pultrüzyon, otoklav kalıplama gibi pek çok farklı üretim yöntemi vardır. Bunların bir kısmı yüksek yatırım maliyeti gerektirirken diğer bir kısmı az maliyetle laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmektedir [Töre, 2011] , [Vatangül, 2008]. Bu yöntemler içerisinde alt yatırım maliyeti düşük olan elle serme ve vakum infüzyon yöntemleri Ege Üniversitesi Havacılık MYO, kompozit laboratuvarımızda uygulanmaktadır.

Bu çalışmamızın amacı, uçak yapısal malzemesi olarak kullanım oranı artmakta olan polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozitlerin vakum infüzyon yöntemiyle imal edilmesi, üretim aşamalarının anlatılması ve yapısında süreksizlik bırakarak üretilen kompozit ürünlerin tahribatsız muayene yöntemiyle yerlerinin belirlenmesidir.

Karbon fiberlerden üretilen kompozitler, 1020 çeliğinden beş kat fazla dayanıma ve aynı zamanda beş kat hafifliğe sahiptirler. Benzer şekilde karbon fiber kompozitler 6061 alüminyumundan yedi kat fazla dayanıma ve iki katı sertliğe sahip olup bir buçuk kat daha hafiftirler. Ayrıca karbon fiberler uygun reçinelerle kompozit haline getirildiklerinde metallerden daha yüksek yorulma dayanımına ve korozyon direncine sahip olan malzemeler haline gelirler [Mağdala, 2009]. Polimer matrisli karbon fiber kompozitler;

- Düşük yoğunluk (alüminyumdan % 40 daha düşük yoğunluğa sahiptirler)
- Yüksek mukavemet (yüksek mukavemetli çelikler kadar)
- Yüksek rijitlik (titanyum kadar)
- İyi yorulma ve sürünme dayanımı
- Düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma dayanımı(karbon fiber-naylon kompozitleri teflon kadar düşük sürtünme katsayısına sahiptirler)
- Tokluk ve darbe toleransı(metallerden daha iyi darbe toleransına sahiptirler)
- İyi kimyasal ve korozyon dayanımı
- Boyut kararlılığı(karbon fiberin termal genleşme katsayısı sıfırdır)
- Metallerle oranla mükemmel vibrasyon azaltma özelliği
- Düşük elektriksel direnç
- Yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahiptirler [Dokur, 2009].

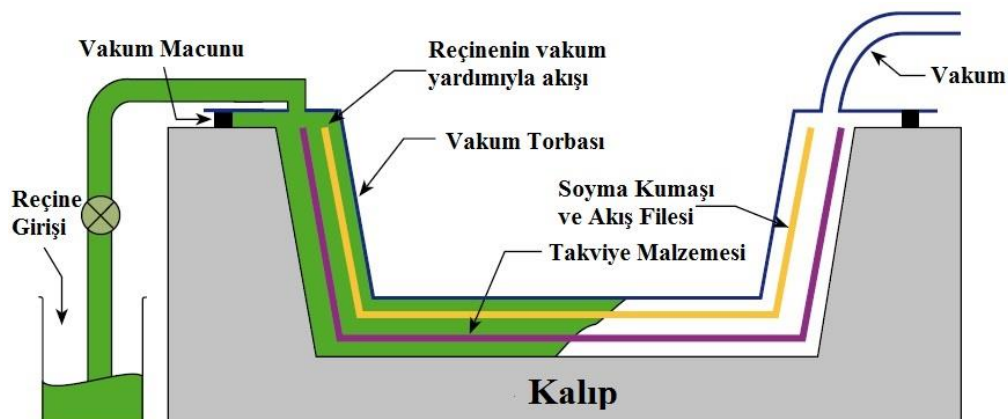
Polimer matrisli kompozit üretim yöntemleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada vakum infüzyon yöntemi kullanıldığı için yöntem Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Polimer Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

a) Püskürtme (Spray up), b) Elle serme (Hand layup), c) Reçine transfer kalıplama
d) Pultrüzyon, e - f) Otoklav kalıplama g) Filaman sarma [Köymen Çağar, 2015]

YÖNTEM - VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ



Şekil 2: Vakum İnfüzyon şematik gösterimi

Vakum infüzyon prosesi, kompozitin içerdiği tüm takviye katmanları arasında kalan havanın uzaklaştırılması ve takviyenin tamamen reçine ile doyuruması işlemidir. [Köymen Çağar, 2015] Kumaşlar kuru olarak kalıba yerleştirilir. Kumaşların üzerine soyma kumaşı ve akış filesi yerleştirilir. Tüm sistem hava almayacak biçimde vakum torbasına alınır. Hava kaçakları engellendikten sonra, hazırlanan reçine sisteme verilir. Akış filesinin yardımıyla ilerleyen reçinenin kumaşların tamamını ıslatması sağlanır.

Avantajları;

- Tek taraflı açık kalıp yeterlidir,
- Tüm kalıp vakuma alınmadığından kalıplama maliyeti düşüktür.
- Çok büyük parçalar yüksek elyaf oranıyla ve düşük boşluk içeriğiyle üretilebilmektedir.
- Standart el yatırma kalıpları kullanılabilir.
- Çekirdek malzemeleri de kullanılarak tek seferde üretilebilir (bal peteği yapıları hariç).

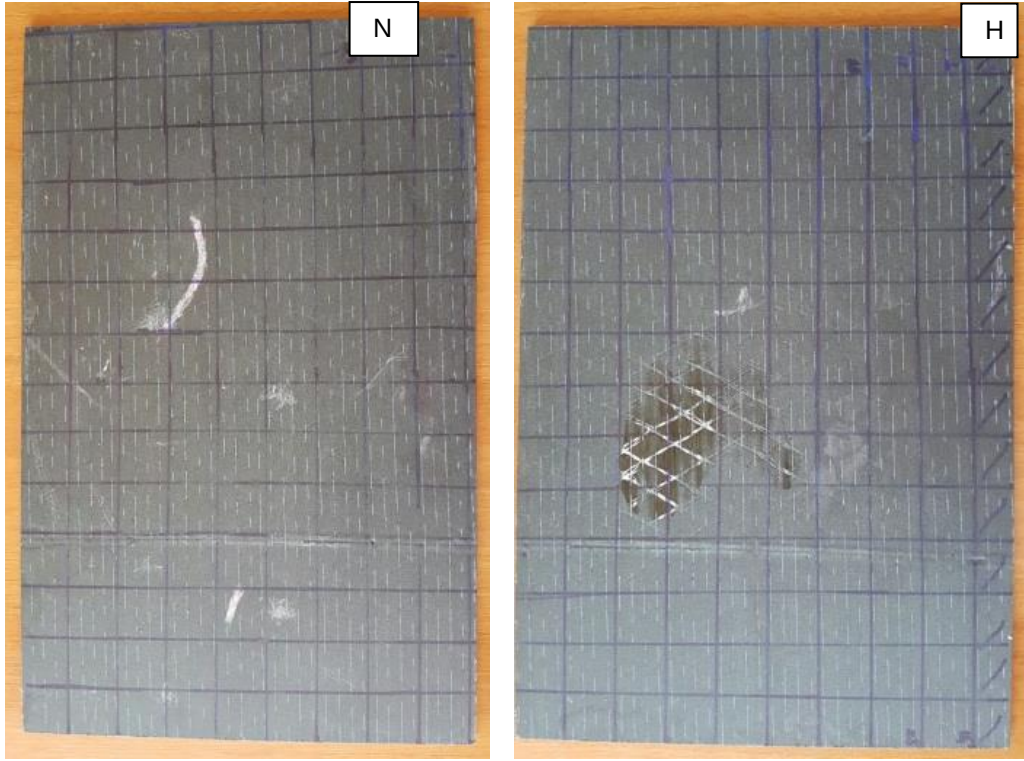
Dezavantajları

- Kısmen karmaşık bir prosestir.
- Reçinenin viskozitesi düşük olmalıdır.
- Reçine ile ıslanmayan bölgeler pahalı atıklara yol açabilir.

UYGULAMALAR- DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Ege Üniversitesi Havacılık Meslek Yüksekokulu Kompozit Laboratuvarının mevcut olan alt yapı imkanlarını kullanıp vakum infüzyon yöntemiyle polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit üretilmiştir. İlk olarak üretimin gerçekleştirileceği kalıp yüzeyi silinerek temizlenmiş ve üzerine kalıp ayırıcı film vakum macunu yardımıyla yapıştırılmıştır. Ardından kalıba göre kesilmiş tek yönlü 1000 g/m² 'lık karbon elyaf kumaş 4 kat olarak [0°]₄ yerleştirilmiştir. Son kat kumaşın üzerine soyma kumaşı ve akış filesi serilmiştir. Süreksizlik bırakılmak istenen bölgeye akış filesi uygulanmamıştır. Ardından bir reçine girişi bir de vakum çıkışı kısmına T bağlantı içeren spiral hortumlar yerleştirilmiştir. Vakum poşeti serilip vakum macunu ile sistem kapatılıp vakuma alınmıştır. Sistemde hava kaçağı olmadığına emin olunduktan sonra epoksi reçine hazırlanıp sisteme verilmiştir. Kalıp alttan ısıtılarak kürlenme sağlanmıştır. Kürlenmiş karbon elyaf - epoksi kompozit plaka, vakum infüzyon sarf malzemelerinden ayrılmıştır. Üretilen plakaların fotoğrafları Şekil 3'de verilmiş ve bu plakalar, yapısal atölyesinde pnömatik el aletleri ile istenen boyutlarda kesilmiştir.

Kompozit üretimi tamamlandıktan sonra süreksizliklerin kontrolü tahribatsız muayene yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız muayene ile kompozit parça üzerindeki veya iç yapısındaki kusurların, süreksizliklerin tespiti, parçadan kesit almadan ve parçaya herhangi bir hasar vermeden gerçekleştirilebilir. Polimer matrisli kompozitlerin tahribatsız muayenesinde ultrasonik muayene, radyografik muayene ve yüzeye açık hasarlar için sıvı penetrant ile muayene yöntemleri kullanılır [Hassen, 2016] , [Meola, 2015]. Bu çalışmada ultrasonik muayene yöntemi kullanılmıştır. Ultrasonik muayene yöntemi ile iletken olan veya olmayan tüm malzeme gruplarının yüzey altı ve iç yapısındaki süreksizlikleri ile malzeme kalınlıkları tespit edilebilir [Kayrak, 2012]. Üretilen sesüstü dalgalar, transducer'ın malzeme yüzeyine teması sayesinde malzemenin içine yayındırılır. Bu dalgalar elektrik sinyallerine dönüştürülüp parçanın alt ve üst yüzeyinden alınan pikler ekran üzerinde görüntülenir. Pikler arası mesafe ile parça kalınlığı belirlenir. Söz konusu iki pik arasında görüntülenebilecek herhangi bir pik, malzemenin iç yapısında bir süreksizlik olduğunu, bu süreksizliğin derinliğini ve boyutunu ifade eder. Kompozit malzemelerde türüne bakılmaksızın tüm süreksizlikleri başarı ile tespit edilebildiği için bu çalışmada ultrasonik yöntem seçilmiştir [Hassen].



Şekil 3: Vakum İnfüzyon Yöntemi ile üretilen karbon elyaf epoksi plakalar. (N: Normal görünümlü plaka. H: Hasar bırakılan plaka, üretim esnasında bölgesel olarak reçine emdirilmemiş olan plaka)

Şekil 3'te görülen plakalar ultrasonik muayene öncesinde bölmelendirilmiş ve her bir bölgeden Tru-Test markalı ultrasonik test cihazı kullanılarak alınan muayene (Bknz. Şekil 4.) sonuçları ile kalınlık matrisi oluşturulmuştur. Böylece süreksizlik içeren bölgelerin tespiti ve bu bölgelerden çekme numunesi çıkartılması kolaylaştırılmıştır. Çizelge 1.a ve 1.b'de görülen matrislerde plakaların kalınlıklarında değişme, dalgalanma olduğu, ayrıca hasarlı bölgelerden alınan kalınlık ölçümlerinin çok daha ince olduğu, hasar bırakılan plakada kalınlığın bölgesel olarak 3,2 cm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4: Kompozit plakaların ultrasonik muayene örnekleri

- a) Hasar bırakılan parçanın süreksizlik bölgesi
- b) Normal görünümlü parçanın maksimum kalınlık bölgesi

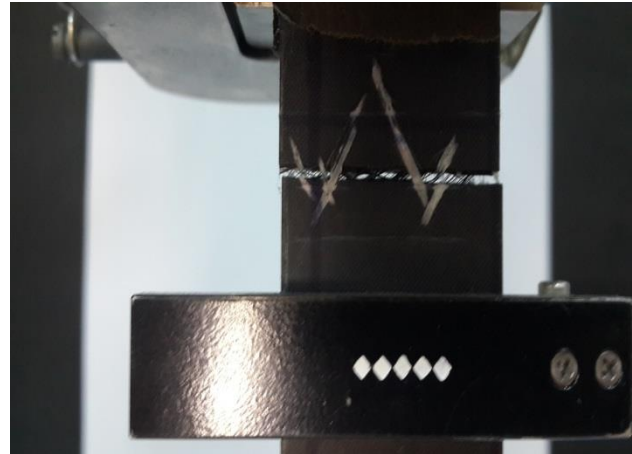
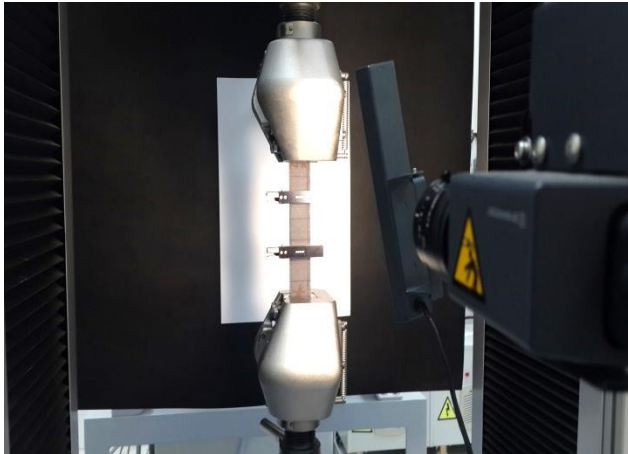
Çizelge 1:a. Şekil 3.N'de yer alan karbon elyaf epoksi plakanın ultrasonik muayenesi sonucunda elde edilen kalınlık matrisi

Sütun No		N1	N2	N3	N4
Satır No	1	4.1	4.1	4	4
	2	4.2	4.3	4.2	4.3
	3	3.8	4.4	4.4	4.5
	4	4.4	4.4	4.4	4.5
	5	4.5	4.6	4.6	4.7
	6	4.8	4.8	4.9	4.8
	7	4.5	4.5	4.7	4.5
	8	4.4	4.4	4.5	4.4
	9	4.7	4.8	4.8	4.8

Çizelge 1:b. Şekil 3.H'de yer alan hasarlı karbon elyaf epoksi plakanın ultrasonik muayenesi sonucunda elde edilen kalınlık matrisi

Sütun No		H1	H2	H3	H4
Satır No	1	4.3	3.9	4	3.5
	2	4.4	4.5	4.5	4.4
	3	4.5	4.5	4.5	4.6
	4	4.5	4.6	3.2	3.8
	5	4.7	4.7	4.6	4.7
	6	4.5	4.6	4.7	4.7
	7	4.6	4.7	3.8	3.2
	8	4.9	4.9	4.9	5.2
	9	4.6	4.7	4.6	3.2

Çizelge 1.a ve 1.b'de'de matris içerisinde, ultrasonik cihaz ile süreksizlik belirlenen kısımlara ait veriler bulunmaktadır. Tahribatsız muayenenin ardından tahribatlı muayene de yapılarak hem ultrasonik test sonuçları doğruluğu kontrol edilmiş hem de süreksizlik içeren ve içermeyen numunelerdeki mekanik dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Kompozit plakaların farklı kalınlıklardaki bölgelerinden çekme numunesi çıkarmak için çizelgelerdeki verilerden yararlanılmıştır. Çekme testi, Shimadzu universal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerinin çekme testi öncesi ve sonrası fotoğrafı Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5: Çekme numunelerinin çekme testi öncesi ve sonrası fotoğraflarından birer örnek.

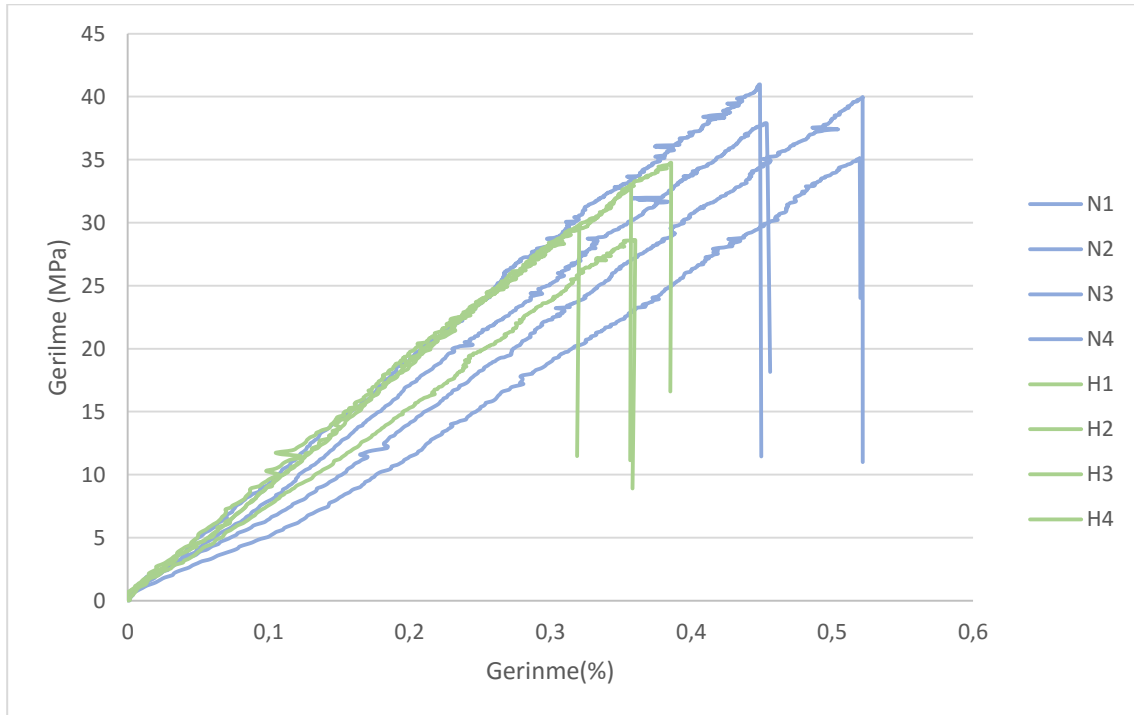
Şekil 5'de örneği görüldüğü gibi; her iki kompozit plakadan çıkarılan 4'er farklı numuneye elyaf yönüne dik yönde çekme testi uygulanmış ve tüm numunelerin plastik uzama göstermeden gevrek kırıldığı gözlemlenmiştir (Bknz Şekil 6). Normal numunelerin hasarlı numunelere göre çekme mukavemetinin %18 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak hasarlı numunelerin elastisite modülü değerleri normal numunelere göre %9 daha fazla bulunmuştur. Üretim sırasında meydana gelen reçinenin ıslatmadığı bölge ile reçineyle tam ıslanmış numuneler arasında mekanik özelliklerin farklı olduğu ve bu durumun tahribatsız muayane ile tespit edilebileceği gösterilmiştir.

Çizelge 2:a. Normal görünümlü kompozit plakadan çıkarılan numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen veriler

Numune	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
N1	9.7	41.0
N2	9.1	38.3
N3	8.2	40.0
N4	7.4	35.2
Ortalama	8.6	38.6

Çizelge 2:b. Hasarlı görünümlü kompozit plakadan çıkarılan numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen veriler

Numune	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
H1	9.8	33.0
H2	9.5	34.8
H3	8.4	28.6
H4	10	29.8
Ortalama	9.4	31.5



Şekil 6: Numunelerin çekme testi sonunda elde edilen gerilme - gerinme eğrileri

SONUÇ

Bu çalışmada karbon elyaf kumaş ve epoksi reçine kullanılarak polimer matrisli kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretim esnasında plakada bırakılan süreksizliğin yeri ve boyutu, malzemelerin tahribatsız muayenesinde kullanılan ultrasonik yöntem ile tespit edilmiştir. Bu yöntem özellikle darbe hasarının tespitinde yüzey ve iç yapı bozuklukları, mikron altı boyutlu hataların görülebilmesi amacıyla hava araçlarının bakımlarında yaygın olarak kullanılan bir muayene yöntemidir. Tahribatsız muayene ile elde edilen verilerden yararlanarak çıkarılan numunelere çekme testi uygulanarak süreksizlik içeren ve içermeyen kompozit numuneler arasındaki mekanik dayanım farkı incelenmiştir. Tahribatlı ve tahribatsız muayene sonuçlarının örtüştüğü, numunelerin süreksizlik tespit edilen bölgelerinde mekanik dayanımlarının düşük olduğu görülmektedir.

İleriki süreçte farklı elyaflar ve farklı açılarda serim yapılarak üretilen plakalar incelenebilir. Ayrıca diğer yöntemler ile üretilen numuneler de kıyaslanabilir.

Kaynaklar

- Abrate, 1991. *Impact on laminated composite materials*, "Appl Mech Rev", 44(4):155–90
- Dokur, 2009. *Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Müh. Ana Bilim Dalı, Seramik Programı Yüksek Lisans Tezi
- Hassen, Taheri, Vaidya, 2016. *Non-destructive investigation of thermoplastic reinforced composites*, Composites Part B 97 244-254
- Hexcel websitesi; <http://www.hexcel.com/products/aerospace/ainfusion-resins>
- Karcı, 2009. *Uçak Yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksikompozit malzemelerin yorulma davranışı*, Anadolu Üniv, Fen Bilimleri Enst, Sivil Havacılık Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi
- Kayrak, 2012. *Uçak Bakımında Darbe Hasarının Tahribatsız Kontrolü*, TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 629, s. 34-39
- Meola, Boccardi, Carlomagno, Boffa, Monaco, Ricci, 2015. *Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics*, Composite Structures 134 845–853
- Töre, 2011. *Kompozit Malzeme Temelleri Polimer Matrisli*, TMMOB, Yayın No: MMO/552
- Turan, 2007. *Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı*, Mühendis ve Makina, Cilt 48, Sayı 575
- Turgut, Kayran, Alemdaroğlu ve Ceylan, 2007. *Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemedeki Yapı Üretimi Örenk Bir Havacılık Uygulaması*, Mühendis ve Makina, Cilt 48, Sayı 566
- Vatangül, 2008. *Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi*, DEÜ Makine Müh. Bölümü, Bitirme Projesi