

Kompozit Malzemelerin Mühendislik Uygulamaları: Sınıflandırılması, Mekanik Hesaplamaları, Üretim Yöntemleri ve Kullanım Alanları

Cebrail Ölmez¹

Zehra Sever²

Serkan Güneş³

Özet

Günümüzde hızla gelişen teknolojilere bağlı olarak endüstrinin ihtiyacını karşılayacak malzemelerden beklenen nitelikler hızla artmaktadır. Yüksek dayanım kabiliyeti, imal edilebilirlik, işlenebilirlik, şekillendirilebilirlik, hafiflik ve maliyet gibi birçok etkenden oluşan bu nitelikler sürekli iyileşme ve gelişme göstermektedir. Bundan dolayı istenilen özellikleri elde etmek için malzeme teknolojileri ve üretim yöntemleri hızla gelişmektedir. Bu bağlamda iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu üstün spesifik özelliklere sahip kompozit malzemeler endüstride ön plana çıkmaktadır. Kompozit malzemeler ilkel çağlarda toprak, su ve saman gibi malzemelerden üretilirken, günümüzde yüksek teknoloji mühendislik malzemeleri kullanılarak üretilmektedirler ve her alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada kompozit malzemenin tanımı ve sınıflandırılmasına, mekanik özelliklerine, üretim yöntemlerine ve farklı mühendislik alanlarında kullanımlarına yer verilmiştir. Kompozit malzemelerin sınıflandırma içerisindeki en önemli ve temel konu kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye fazlarıdır. Matris ve takviye elemanları bir araya gelerek kompozitin genel fiziksel ve mekaniksel özelliklerini ortaya koyar. Matris ve takviye fazları

- 1 Öğretim Görevlisi, cebrail.olmez@ostimteknik.edu.tr, Ostim Teknik Üniversitesi, 0000-0001-9111-0325
- 2 Öğretim Görevlisi, zehra.sever@ostimteknik.edu.tr, Ostim Teknik Üniversitesi, 0000-0002-2928-1323
- 3 Öğretim Görevlisi, serkan.gunes@ostimteknik.edu.tr, Ostim Teknik Üniversitesi, 0000-0003-3976-0771

olarak kullanılabilir metal, seramik, polimer, fiber gibi malzemelerin ve bu malzemelerin kullanımındaki boyutsal etkileri ve yapı içerisinde dağılımları detaylı şekilde incelenmiş ve yorumlanmıştır. Mühendislik uygulamalarında kullanılacak malzemelerin seçilmesinde en önemli etken malzemelerin mekanik özellikleridir. Kompozit malzemelerde farklı mühendislik alanlarında kullanımının yaygın olması nedeniyle kompozitlerin mekanik özelliklerinin ortaya konulması kaçınılmazdır. Bu bakımda çalışmamızda malzemenin mekanik davranışını etkileyen elastik modül, malzeme yüzey alanı, uygulanan kuvvet gibi faktörlerin etkileri detaylı bir şekilde incelenerek, kompozit malzemelerin mühendislik hesaplarına yer verilmiştir. Bunun yanı sıra bir malzemenin üretim yöntemi de malzeme özelliklerine etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda, özellikle fiber kompozitlerde kullanılan elle serim, püskürtme, elyaf sarma, reçine transfer kalıplama, vakumlu paketleme yöntemleri açıklanarak avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Sınıflandırılması, mekanik özellikleri ve üretim yöntemleriyle açıklanan kompozit malzemelerin günümüzde farklı mühendislik yaklaşımlarıyla savunma, uzay ve havacılık, otomotiv, inşaat, elektrik ve elektronik gibi endüstride kullanım alanları örneklerle açıklanmıştır.

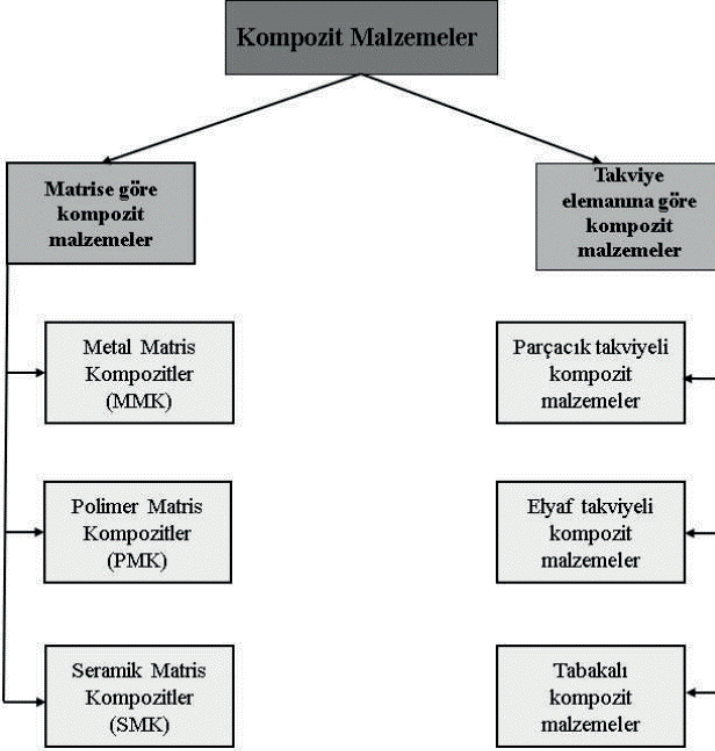
1. Kompozit Malzeme Nedir?

Fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturulan benzersiz özelliklere sahip malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelere kıyasla akma/kopma dayanımı, rijitlik, kırılma tokluğu, kütle hacim oranları, yüksek sıcaklıklara dayanım gibi özelliklerde spesifik kombinasyonlar sağlamaktadır [1]. Bu malzeme kombinasyonları sayesinde kompozit malzemeler uzay ve havacılık, otomotiv, savunma, spor, ulaştırma ve inşaat gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün artmaktadır. Kullanım alanları son yüzyılda artmasına rağmen kompozit malzemelerin kullanımı antik çağlara kadar uzanmaktadır. Kırılgan malzemelere güçlü hayvansal ve bitkisel katkı malzemeleri eklenerek ana yapının mekanik özelliklerinin iyileştirildiği yapı inşasında kullanılan kerpiçler ve savunma amaçlı kullanılan yaylar örnek verilebilir.

Kompozit malzemeler bileşimleri bakımından matris ve takviye fazı olmak üzere iki ana temel bileşimlerden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin endüstride kullanımına uygun mekanik özellikleri bu temel iki faz sayesinde verilmektedir. Matris fazları takviye elemanları bir arada tutarak malzeme bütünlüğünü sağlar. Bunun yanı sıra kompozit malzemeye uygulanacak kuvvetleri, takviye elemanına ileterek malzemenin tahribata uğramasını engeller [2]. Takviye fazları ise matris malzemelerine göre nispeten daha sert ve dayanımı yüksek malzemeler olduğu için kompozit malzemelere akma/kopma dayanımı, kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri kazandırır [3].

2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, belirtildiği gibi matris ve takviye fazları tarafından kazandırılır. Bu bakımdan kompozit malzemeleri Matrise ve Takviye Elemanlarına göre sınıflandırılmaktadır [4]. Matris ve Takviye malzemeleri ise Şekil 1'de belirtildiği gibi alt başlıklara ayrılmaktadır [5].



Şekil 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

2.1. Matrise Göre Kompozit Malzemeler

Matris malzemeleri kompozitlere genel görünümünü veren yapılarıdır. Yapı içerisinde bütünlüğü sağlayarak darbelerle karşı direnç gösterir. Kompozit malzemelerde kullanılan malzemelerin türleri kompozitlerin sınıflandırılmasında en temel tanım olarak belirtilebilir. Bu bağlamda bakıldığında matrislerine göre kompozit malzemeler Metal Matris Kompozitler (MMK), Polimer Matris Kompozitler (PMK) ve Seramik Matrisli Kompozitler (SMK) olarak üç grup altında incelenebilir [6].

2.1.1. Metal Matris Kompozitler (MMK)

Metal Matris Kompozit Malzemelerde matris yapısını oluşturan malzemeler Alüminyum (Al), Bakır (Cu), Magnezyum (Mg), Nikel (Ni) ve Titanyum (Ti) gibi gelişmiş malzemeler ve bu malzemelerin alaşımlarıdır [7]. Bu malzemelerin MMK'lerde yaygın olarak kullanılması aşınma dirençlerinin yüksek, gelişmiş mekanik ve termal özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyum ve alaşımları hafif olmalarının yanı sıra işlenebilirlikleri, korozyon dirençleri ve yüksek özgül mukavemetleri nedeniyle MMK'lerde matris elemanı olarak kullanılmaktadır [8]. Alüminyum MMK'ler oluşturulurken özellikle üretim sürecinde matris ve takviye fazının bağlanmasındaki sorunlar göz önüne alındığında ıslanabilirlikleri yüksek takviye malzemelerin kullanılması önemlidir [9]. Bunun yanı sıra Alüminyumun sünek bir malzeme olması sertliği yüksek takviye malzemelere olan ilgiyi artırır. Bu nedenlerden dolayı, Alüminyum MMK'lerde takviye olarak Al_2O_3 , TiB_2 , TiO_2 , SiC, TiC, B_4C gibi karbürler, oksitler veya boritler yaygın bir şekilde endüstride kullanılmaktadır [10]. Alüminyum MMK'lerin yüksek mukavemetleri, düşük maliyetleri ve hafiflikleri nedeniyle başta uzay ve havacılık sanayisi olmak üzere savunma, otomotiv, demiryolu ve deniz taşımacılığı, elektrik ve elektronik, hobi ve spor endüstrisinde kullanımı yaygındır [11-16]. Bakır ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı MMK'lere bakıldığında, özellikle son yıllarda önem kazanmışlardır. Bu önem Bakır ve alaşımlarının sahip olduğu elektrik iletkenlikleri, yüksek korozyon dirençleri, yorulma dayanımları ve yüksek özgül ağırlıkları gibi üstün özelliklerinden kaynaklanmaktadır [17]. Bakır esaslı MMK'lerin üretimde özellikle SiC gibi aşınmaya karşı dirençli seramik malzemelerin kullanılması ile fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş kompozitler üretmek mümkündür [18]. Bakır malzemesinin üstün elektrik iletkenliği özelliğine sahip olmasından kaynaklı Bakır esaslı MMK'ler özellikle elektrik ve elektronik sektöründe kullanımı yaygındır. Bunun yanı sıra termal özellikleri, yüksek mekanik özellikleri ve yoğunlukları nedeniyle demiryolu raylarında, diş implant ve medikal cihazlarında, ısı eşanjörlerinde, deniz taşımacılığı ve havacılık yapılarında kullanımı mevcuttur [19]. Magnezyum ve alaşımları endüstride yaygın kullanılan diğer metallere göre yoğunluklarının düşük olması, üstün mekanik özellikleri, korozyon ve aşınma dirençlerinin yüksek olması ve düşük ısıl genleşme katsayıları gibi özellikleri bünyesinde bulundurmasından dolayı MMK'lerde matris elemanı olarak kullanımı artmıştır. Magnezyum esaslı MMK'lerin üretimde Al_2O_3 , SiC, B_4C ve Metalik camlar takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır [20]. Bu takviyelerin varlığı Magnezyum esaslı MMK'lerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır [21-23]. Titanyum

ve alaşımaları biyoyouyumlu malzeme olmalarının yanı sıra spesifik mekanik özelliklere, aşınma ve korozyon direncine sahiptirler ve bu özellikleri sayesinde endüstride kullanım alanları yaygındır. Titanyum esaslı MMK'lerin üretimi sırasında bağlanma özelliklerinde meydana gelebilecek kayıplar önlenmesi için özellikle Titanyum Borür (TiB) ve Titanyum Karbür (TiC) malzemeleri takviye elemanları olarak kullanılmaktadır [24]. Bu takviye malzemeleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilen Titanyum esaslı MMK'ler, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyetlerini arttırmaktadır ve çok yüksek spesifik mekanik özelliklere sahiptir [25]. Titanyum MMK'ler başta biyomedikal endüstrisi olmak üzere otomotiv, uzay ve havacılık sektöründe kullanımı oldukça yaygındır [26].

2.1.2. Polimer Matris Kompozitler (PMK)

Matris yapısını termoset ve termoplastik malzemelerin, takviye fazının ise cam, karbon ve aramid gibi elyafların oluşturduğu kompozit malzemelere Polimer Matrisli Kompozit (PMK) denir [27]. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak gelişen elyaf üretimi ve alaşım metal malzemelerin yoksunluklarının ortaya çıkışı, üretim kolaylığı ve maliyetlerinin düşük olması PMK'lerin mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Elyaf takviyelerinin de varlığı ile beraber PMK'lerin genel mekanik özelliklerine bakıldığında; yüksek çekme mukavemetine, yüksek sertlik ve kırılma tokluğuna, iyi korozyon, aşınma ve delinme direncine sahip olduğu söylenebilir [28]. Bunun yanı sıra düşük termal dirençlere ve yüksek termal genişleme katsayısına sahiptirler. Lifli bir takviye yapıya sahip olması nedeniyle yük altında lifler tarafından kırılmalar meydana gelir ancak polimer matrisler donatılara yükleri ileterek kırılmaların yüzey bölgesine taşınmasını engellerler ve ani yüklemelere karşı mukavemetli bir yapı sergilerler [29]. Bu durum matris malzemesinin iyi bir sönümleyici olmasını sağlar ve rezonans gibi istenmeyen etkileri ortadan kaldırır [30]. Bu özellikleri sayesinde özellikle Uzay ve Havacılıkta iskelet ve kabuk yapılarında sıkça kullanılmaktadır. Yüksek spesifik mekanik özellikleri, hafiflikleri, korozyona karşı göstermiş oldukları dirençler sayesinde endüstride ve sosyal hayatta kullanımları yaygındır [31]. Uzay ve havacılık, medikal cihazlar, otomobil sektörü, karayolu yapıları, demiryolu ve deniz taşımacılığı, ahşap ve mobilya sektörü, kapı panelleri, kaplama yapıları, spor ve hobi aletleri kullanım alanları ve sektörleri örnek verilebilir [32-37].

2.1.3. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler yüksek sıcaklığa dayanabilen, sertlik değeri yüksek, hafif, kimyasal kararlılığı yüksek, aşınmaya karşı dirençli ve üstün basma

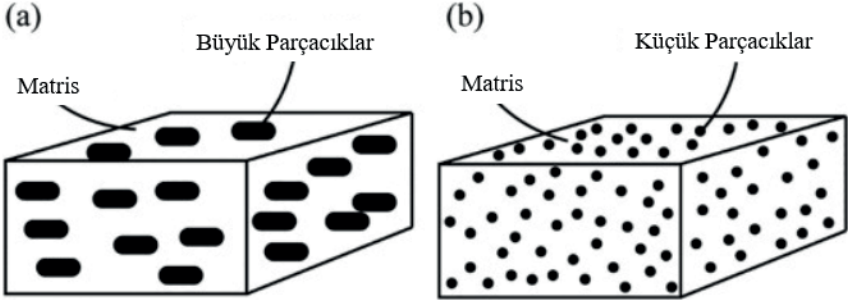
mukavemetine sahip malzemeler olmasına rağmen düşük tokluğa sahip malzemelerdir [38]. Bu nedenle özellikle yapısal uygulamalarda kullanım alanı kısıtlıdır. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliğine sahip tokluğu yüksek malzemelere olan ihtiyaçtan dolayı SMK'ler endüstrinin ihtiyacını karşılamaktadır. SMK'lerin üretimi sırasında matris fazı olan seramiklere sürekli ve süreksiz lifler takviye edilmektedir [39]. Lifler ile kompozit içerisinde çevresel dirençler sağlanarak özellikle yüksek sıcaklıklarda yüklenmeler karşısında kompozit yapısının bozulmaması sağlanmış olur [40]. Kesici takımlar, ısı motorları, tank güç aktarma organları, denizaltı salmastraları, rulmanlar ve türbinler SMK'lerin uygulama alanlarının örneklerindedir [41].

2.2. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozitlerin Termal ve Mekanik özellikleri takviyenin mikro yapısı, takviye tipi ve aşındırıcı yapısı, arayüzey bağlantısı, hacim oranı ve parçacık boyutundan etkilenmektedir [42]. Genel kullanım amaçları kompozite gelen kuvvetleri taşımak ve matrisin rijitliğini ve mukavemetini iyileştirmek [43]. Bu bağlamda bakıldığında takviye elemanına göre de kompozitlerin sınıflandırılması yapılmaktadır. Takviye elemanına göre kompozit malzemelere bakılacak olursa parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve tabakalı kompozit malzemeler olmak üzere üç alt başlıkta incelenmesi gerekmektedir.

2.2.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

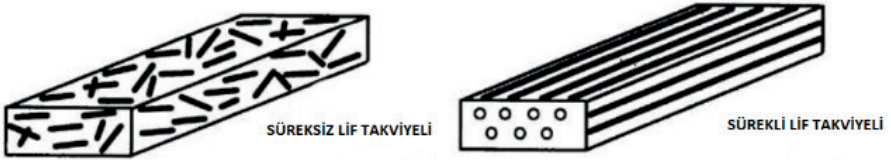
Yapı içeriğinde, sünek matris elemanına bağlanarak tokluğu ve dayanımı arttırmayı amaçlayan, sertliği yüksek küçük gevrek parçacıkların takviye malzeme olarak kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Takviye fazı boyut olarak makro boyutlara sahiptir. Düzenli ya da düzensiz boyutta genellikle seramik parçacıklar bu tip kompozitlerde kullanılmaktadır. Toz metalürjisi, difüzyon ile bağlama, mekanik alaşımlama ve döküm yöntemleri Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemlerdir [44]. Kompozitin üretimi sırasında parçacıkların matris fazının her bölgesinde eşit oranlarla sağlanması en temel unsurlardan biridir çünkü parçacığın matris içinde düzensiz dağılımı yük altında bölgesel çatlaklara yol açarak kompozit bütünlüğün çatlama, çarpılma, kırılma, kopma gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilir [45]. Parçacık takviyeli bir kompozit malzemeye ait görüntü Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Parçacık takviyeli kompozit türleri (a) Büyük parçacık (b) Dispersiyon - güçlendirilmiş [45].

2.2.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf Takviyeli kompozitler en yaygın kullanılan ve üretilen kompozit türleridir. Yüksek mukavemet, üretilebilirlik ve esneklik gibi üstün özelliklere sahip lifli yapıları elyaf kullanılır [46]. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid başlıca takviye elemanlarına örnek verilebilir. Bu kompozitlerin mekanik davranışı elyaf/matris arayüzey bağlanmasına, liflerin yönlendirilmesine ve lif boyutlarına bağlıdır [47-48]. Elyaf takviyeleri elyafın tiplerine göre süreksiz lif takviyeli ve sürekli lif takviyeli olmak üzere üçe ayrılır (Şekil 3).

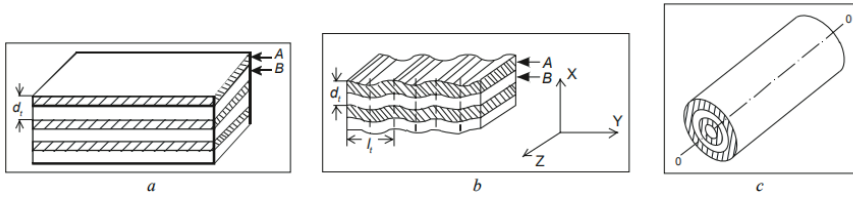


Şekil 3. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler [49].

2.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Aynı ya da farklı doğrultularla iki ya da daha fazla malzemenin üst üste gelerek katmanlar şeklinde oluşturduğu kompozit malzemelere denir. Bu katmanlar cam, ahşap, metal, plastik malzemelerinden oluşabilmektedir. Üretimi sırasında katmanlar aynı ya da farklı malzemelerden seçilebilmektedir. Korozyona ve ısıya karşı dirençli olmaları, yüksek mukavemet özelliklerine sahiplikleri ve hafif yapıları itibarıyla Uzay ve havacılıkta araç bileşenleri, otomobil parçaları, rüzgâr türbin kanatları, tekne gövdeleri ve hobi

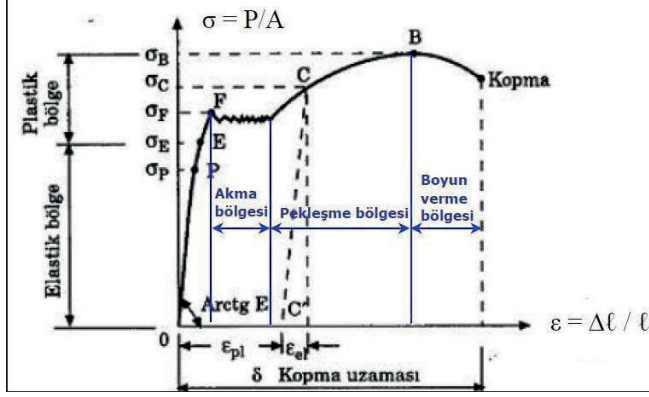
araçları gibi uygulamalarda kullanımı bulunmaktadır [50]. Genel mekanik özelliklerine bakıldığında düşük yoğunluğa, yüksek mukavemet ağırlık oranlarına, mükemmel korozyon dirençlerine, yüksek çentik dayanımına, iyi darbe ve yorulma direncine, üretim ve onarım kolaylığına, yüksek spesifik statik özelliklere sahip olduğu ifade edilir [51-52]. Bu özellikler genel olarak takviyenin yönelim açlarına bağlı olarak değişkenlik gösterilir. Tabakalı kompozitler Şekil 4'de de görüldüğü üzere düz, dalgalı ve dairesel yapılarla üretilebilirler.



Şekil 4. Tabakalı Kompozitlerin düz (a), dalgalı (b) ve dairesel (c) şekillerde görünümleri [53].

3. Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları

Bir mekanizma, ürün tasarlanırken en önemli etkenlerden bir tanesi malzemenin mekanik özellikleridir. Her malzemenin üzerine uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre gösterdiği tepki farklıdır bunlara malzemelerin mekanik özellikleri denir ve o malzemenin çalışma koşullarını belirler. Elastik ve Plastik özellikler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Elastik bölgede malzemeye uygulanan kuvvet karşısında malzeme şekil değiştirmeden iç yapısını koruyabiliyorken, Plastik bölgede malzeme kalıcı hasarlar ve deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu hasarların başladığı noktaya Akma Noktası denilmektedir ve uygulanan kuvvet arttıkça malzeme kalıcı hasarlardan sonra kopma meydana gelir bu noktaya Kopma Noktası denilmektedir.



Şekil 5. Malzeme Gerilme-Şekil Değişimi Grafiği.

Kompozit malzemelerin mekanik davranışını incelerken tek bir malzemenin mekanik davranışını izlemek yanlış bir yöntem olacaktır. Kompozit malzemelerde fiber matrislerin oryantasyonu, hacimsel oranları, birbirleri ile olan yüzey alanları bu malzemelerin mekanik özellikleri hakkında bilgi verecektir.

Bir malzemeye etki eden bir P yükü altındaki şekil değiştirmesine x denilirse en basit şekilde;

$$x = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \text{ Olarak verilebilir,}$$

Burada P uygulanan kuvvet, L kuvvetin uygulandığı uzunluk, A kesit alanı ve E young modülüdür.

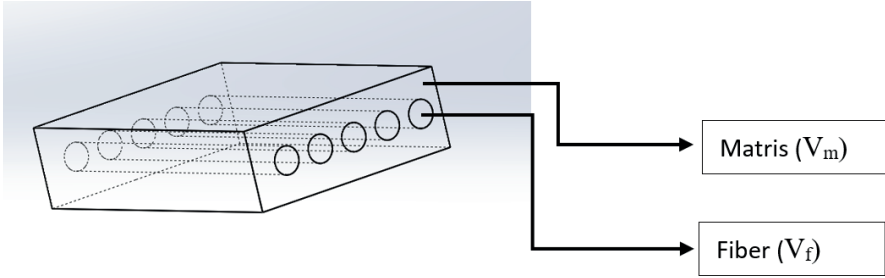
Tablo 1: Bazı Fiber ve Matrislerin Young Modülleri.

	Yoğunluk ρ	Young Modülü E	E/ ρ	E_{12}/ρ	E_{13}/ρ
Graphite Fiber	1,80	230	0,1278	266,4	3,404
Kevlar Fiber	1,40	124	0,0857	251,5	3,562
GlassFiber	2,50	85	0,034	116,6	1,759
Unidirection graphite/epoxy	1,60	181	0,1131	265,9	3,535
Unidirection glass/epoxy	1,80	38,6	0,02144	109,1	1,878
Cross-ply graphite/epoxy	1,60	95,98	0,06	193,6	2,862
Cross-ply glass/epoxy	1,80	23,58	0,021	85,31	1,593
Quasi isotropic graphite/epoxy	1,60	69,64	0,04353	164,9	2,571
Quasi isotropic glass/epoxy	1,80	18,96	0,01053	76,5	1,481
Steel	7,80	206,84	0,02652	58,3	0,758
Aluminum	2,60	68,95	0,02662	101	1,577

Tablo1’de bazı fiber matrislerin young modülleri verilmiştir. Kompozit malzemenin young modülünü hesaplamak için bir fonksiyon oluşturmak gerekirse bu fonksiyon fiberin young modülü, matrisin young modülü, katmandaki fiber ve matris oranları ve geometrik değerlere bağlı olacaktır. Tabloda da görüldüğü gibi fiberlerin young modülü oldukça yüksektir kompozit malzemede fiber yönü doğrultusu malzemenin young modülünü önemli ölçüde etkilemektedir.

3.1. Kompozit Tabakanın Elastik Davranışı: Mikro Mekanik

Tabaka (lamina, ply) bir matris veya kumaşta tek yönlü liflerden oluşan bir tabakaya verilen isimdir. Bir tabaka hacmi fiber ve matrisin toplam hacmine eşittir [55].

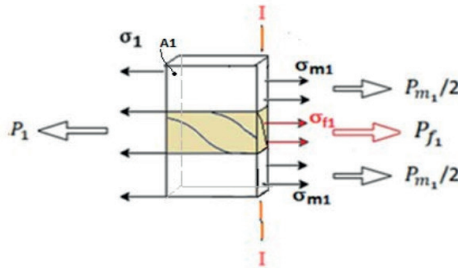


Şekil 6. Bir Tabakanın Yapısı

$$V_f + V_m = 1$$

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \text{ olarak hesaplanır.}$$

Tabakada uygulanan kuvvet fiber doğrultusunda ise;

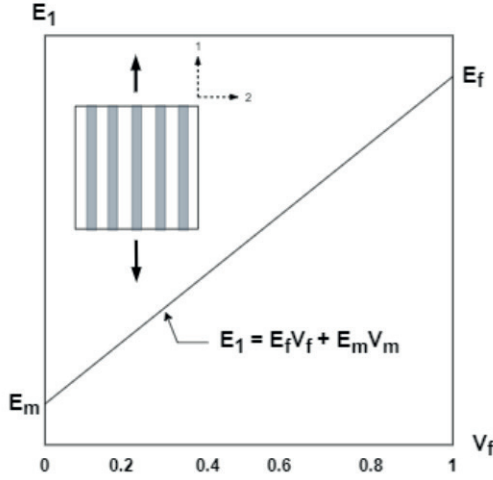


Şekil 7. Fiber Doğrultusunda Yükleme Durumu [54].

$$P = P_{f1} + P_{m1} = \sigma_1 \cdot A_1 = \sigma_{f1} \cdot A_{f1} + \sigma_{m1} \cdot A_{m1}$$

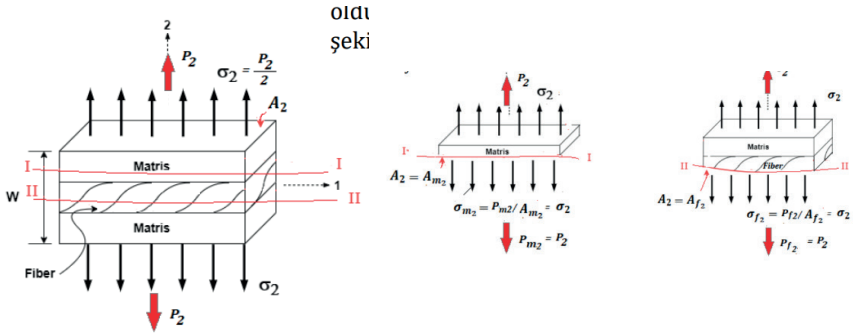
$$\sigma_1 = \sigma_{f1} \frac{A_{f1}}{A_1} + \sigma_{m1} \frac{A_{m1}}{A_1}$$

$\sigma_1 = \sigma_{f1} V_f + \sigma_{m1} V_{m1}$ olarak hesaplanabilir.



Şekil 8. Fiber doğrultusunda yükleme durumunda: Fiber oranının E değerine etkisi [54]

Tabakaya uygulanan kuvvet fiber doğrultusuna dik ise;

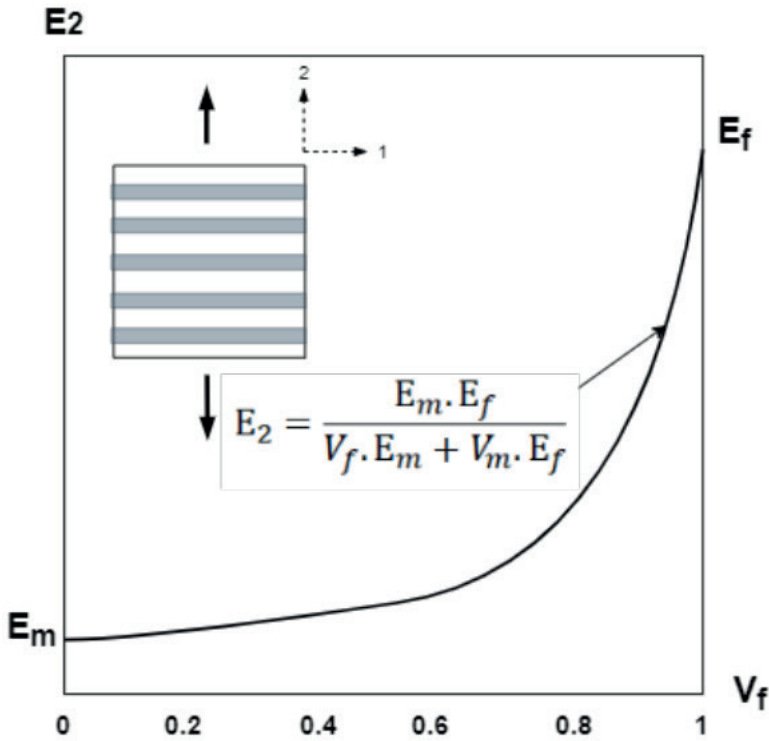


Şekil 9. Şekil: Fiber Doğrultusuna Dik Yükleme Durumu [54]

$$P = P_{f1} = P_{m1} = \sigma_1 \cdot A_1 = \sigma_{f1} \cdot A_{f1} = \sigma_{m1} \cdot A_{m1}$$

$\sigma_2 = \sigma_{f2} = \sigma_{m2}$ olarak yazılabilir buradan young modülü,

$$E_2 = \frac{E_m E_m}{V_f E_m + V_m E_f} \text{ olarak hesaplanır.}$$



Şekil 10. Fiber doğrultusuna dik yükleme durumunda: Fiber oranının E değerine etkisi [54].

3.2. Tabakalı Kompozit Elastik Davranışı: Makro Mekanik

Tabakalı kompozit, iki veya daha fazla tabakadan tek yönlü ya da farklı yönlerde işlenerek birleştirilerek oluşturulan kompozit malzemelerdir. Katmanlar aynı ya da matris içerisinde bulunan fiberlerin farklı yönlerde kullanılarak elde edilmek istenen farklı dayanım özellikleri elde edilebilir. Fiberlerin referans eksen takımına göre yaptığı açılar $[\theta_1 / \theta_2 / \theta_3, \dots]$ şeklinde gösterilir [55]. Tabakalı bir kompozitte en basit haliyle gerilemeler;

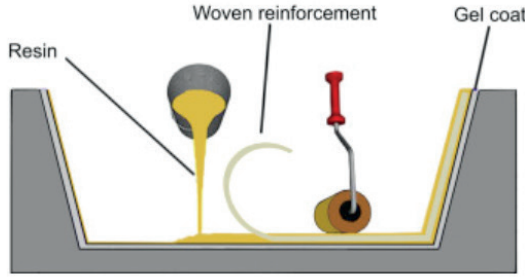
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Şeklinde yazılabilir. Burada Q matrisi malzeme özelliklerine göre bulunan malzemenin elastik modülü ve poisson oranından hesaplanan değerlerden oluşan matristir. \emptyset matrisinin değişkenlerini fiber dizilim yönü, katman sayısı gibi etmeler belirlemektedirler.

4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

4.1 Elle Serim Yöntemi

En temel üretim yöntemidir. Kumaş veya keçe olarak hazırlanmış fiber malzemenin üzerine bir fırça yardımı ile matris malzemenin sürülmesidir. Oda sıcaklığında ya da istenilen sıcaklık ve basınç değerinde malzeme kürlenmeye bırakılır. Bir kat kumaş üzerine bir kat reçine sürüldükten sonra bir kat kumaş daha sürülüp reçine sürülerek hazırlanabilir ya da malzemenin istenilerine göre birkaç kat kumaş serilip üzerine reçine eklenebilir. En yaygın ve en ucuz üretim yöntemlerinden biridir. Pürüzlü, değişik geometriye sahip özel parçaların üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır.



Şekil 11. Elle Serim İşlemi [56].

Elle serim üretim yöntemi avantajları;

Kalıplama ucuzdur, sistem düşük maliyetlidir,

Üretilen parçalarda geometrik sınırlandırma gereksinimi yoktur,

Üründe tasarım güncellemesi yapmanın kolaydır,

İstenilen yerde üretim yapılabilir.

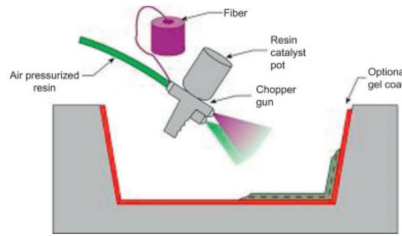
Elle serim üretim yönteminin dezavantajları;

İnsan işçiliğine ve yeteneğine bağlıdır,

Üretim süresinin uzundur.

4.2. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme üretim yönteminde reçine ve kırılmış elyaf parçaları bir sprey tabancası yardımı ile kalıbın içerisine püskürtülür. Düzgün bir dağılım elde etmek için tabanca açısı ve yönü oldukça önemlidir. Ayrıca hava kabarcıklarını temizlemek düzgün dağılımı sağlamak için yardımcı ekipmanlar kullanılmalıdır.



Şekil 12. Sprey Püskürtme Yöntemi [57].

Püskürtme yöntemi avantajları;

Kısa sürede düşük maliyetli üretim vardır,

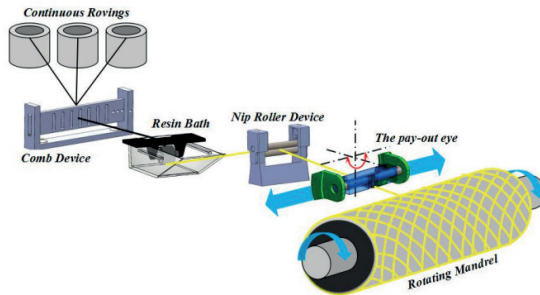
Uygulama kolaydır.

Püskürtme yöntemi dezavantajları;

Malzemenin mekanik özellikleri elyaf ve reçine dağılımına bağlıdır.

4.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yönteminde elyaf reçine banyosuna batırıldıktan sonra iki tarafından tamburlar yardımı ile dönen kalıp üzerine sarılır. Filament sarma tekniği, esas olarak depolama tankları, gemiler, füzeler ve roket motosikletleri gibi boru şeklindeki yapıları üretmek için kullanılan otomatik bir kompozit imalat tekniğidir.



Şekil 13. Elyaf Sarma Yöntemi [58].

Elyaf sarma yöntemi avantajları;

Püskürtme ve elle serim yöntemine göre daha hızlıdır ve malzeme oranları daha kontrol edilebilirdir,

Matris ve fiberler aynı anda birleştirilerek hem kalıplama hem kompozit malzeme üretimi gerçekleşmiş olmaktadır buda maliyeti düşürmektedir,

Elyaf sarma yöntemi dezavantajları;

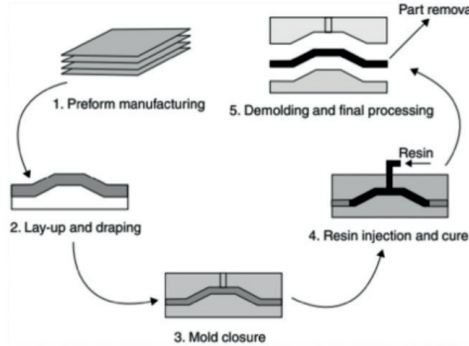
Sadece boru tipindeki malzemelerin üretimi için uygundur,

Kalıp maliyeti parça büyüdükçe yükselmektedir,

Parçalar üretim sonrası ikincil işlemlere ihtiyaç duyabilmektedirler.

4.4 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Bu yöntemde üretim kalıbının içerisine elyaf malzeme yerleştirilir. Kalıp kapatılır, kapatıldıktan sonra kalıp ısıtılır ve belirli bir basınçta reçine enjekte edilir. Reçine sertleşene kadar kalıp kapalı halde kalır.



Şekil 14. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi [59].

Reçine transfer kalıplama yönteminin avantajları;

Üretim hızı yüksek,

İstenilen parçalarda istenilen tolerans değerlerinde üretim yapılabilir,

Üretilen parçaların hepsi aynı kalitededir,

İnsan işçiliği ve yeteneğinden bağımsızdır.

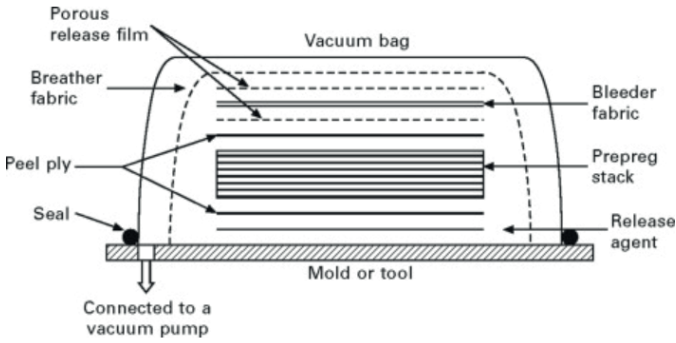
Reçine transfer kalıplama yöntemi dezavantajları;

Kalıp maliyetleri ve tasarımları yüksektir buda geometrik sınırlandırmalar getirir,

Reçine nüfus etmemiş bölgeler kalabilir.

4.5. Vakumlu Paketleme Yöntemi

Vakumlu paketleme yönteminde üretim pre-preg malzemelerden yapılır. Geometrik sınırlamalar ve tasarımlara göre kesilen pre-preg malzemeler el ile ya da makineler yardımı ile üst üste dizilir. Bu yarı ham mamul kalıp üzerine serilir ve vakum torbası ile kaplanır. Bir vakum pompası ile malzeme dış ortamdaki izole edilir ve ürün pişmeye bırakılır.



Şekil 15. Vakumlu Presleme Yöntemi [60].

Vakumlu paketleme yönteminin avantajları;

Ürün dış ortamdaki izole olduğu için malzeme içinde hava kabarcıkları gibi istenmeyen durumlar olmaz,

Vakum sayesinde reçine ve elyaf oranı istenilen düzeyde olur buda mekanik özelliklerde artış sağlar.

Vakumlu paketleme yönteminin dezavantajları;

Üretim maliyeti nispeten yüksektir,

Kalifiye iş gücüne ihtiyaç vardır.

5. KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİNİN SAVUNMA, HAVACILIK VE UZAY ENDÜSTRİSİNDEKİ GELİŞİMİ VE UYGULAMALARI

Gelişen teknoloji ile beraber ürün ve sistemlerde kullanılan malzemelerden beklenen nitelikler de artmaktadır. Özellikle savunma, havacılık, uzay gibi kritik alanlarda bu nitelikler son derece üst seviyelerdedir. Yüksek dayanım kabiliyeti, imal edilebilirlik, işlenebilirlik, şekillendirilebilirlik,

hafiflik ve maliyet gibi birçok etkenden oluşan bu nitelikler uygulama alanına ve isterlere bağlı olarak hem ayrı ayrı hem de beraber büyük önem arz etmektedir. Tam da bu noktada yeni malzeme teknolojileri devreye girmektedir. Özellikle yukarıda belirtilen sektörler başı çekmekle beraber birçok farklı sektör ve uygulama için malzeme geliştirme çalışmaları hızla devam etmektedir. Kompozit malzemelere ait sektörel uygulamalar da bu geliştirme çalışmalarında ön plana çıkmaktadır. Bu bölümde kompozit malzeme teknolojisinin kritik sayılabilecek alanlarda ki uygulamaları ve bu alanlarda ki gereksinimleri üzerinde durularak teori-pratik arasındaki entegrasyon örnekler ile açıklanacaktır.

Havacılık ve uzay sanayinde gelişmiş kompozit malzemelerin kullanımı, kompozitlerin metallere göre hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci, üstün yorulma ve kırılma gibi çeşitli üstünlüklerinden dolayı giderek artmaktadır. Artan yakıt maliyetiyle birlikte, hava araçlarında daha hafif malzemelere olan talep artmaktadır ve buna bağlı olarak daha hafif kompozit malzemelerin geliştirilmesi, havacılık ve uzay endüstrisinde kompozit malzemelerin geleceğinin parlak olduğunu göstermektedir. Yeni nesil büyük uçakların tamamen kompozit malzemelerden tasarlanması, kompozit yapı ve malzemelerin kapsamlı ve detaylı bir şekilde çalışılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Boeing, kompozit bazlı tüm uçak malzemelerinin geri dönüşümünü sağlayarak uçakların çevresel performansını iyileştirmektedir. İşlevselliği ve uygulanabilirliği sağlamak için, kompozit kullanımının kullanıcı ve tasarımcı arasında işbirliğine dayalı bir uygulama ve çalışma gerektirdiğini kabul etmek çok önemlidir.

Kompozitlerin ilk kullanımı askeri ve havacılık uygulamalarında görülmektedir. Yüksek üretim maliyeti nedeniyle sivil uçaklarda kullanılmamış, kullanımları yapısal olmayan amaçlarla sınırlı kalmıştır. Güncel uygulamalarda ise kompozitler; sıcak hava balonları ve planörlerden yolcu jetlerine, savaş uçakları ve Uzay Mekiği'ne kadar çok çeşitli uçak ve uzay araçlarında hem yapısal hem de bileşen amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde, yakıt tasarruflu uçakların %50'sinden fazlası güvenlik standartları ve düzenlemelerine uygun olarak karbon takviyeli plastik kompozitlerden üretilmektedir [61,62]. Airbus, Boeing, Bombardier, BAE Systems, Raytheon, GE Aviation ve Lockheed Martin gibi birçok şirket de uçaklarında ve savunma ile ilgili sistemlerinde termoplastik ve kompozit kullanmaya yönelmiştir. Eklemeli imalat (3D baskı), farklı malzeme gruplarının kullanımına uygun olması, karmaşık geometrilerin fikstür ve kalıplar olmadan üretilmesine olanak sağlaması, hafif ve işlevsel olarak daha iyi tasarımlara imkan vermesi gibi özellikleriyle havacılık endüstrisinde önemli

faydalar sağlamaktadır. Katmanlı üretim özellikle havacılık sektöründe sıkça görülen düşük hacimli üretim için oldukça faydalı ve verimlidir. [63].

Sivil havacılık sektörü artan petrol fiyatlarına ve çevresel kısıtlamalara tepki verebilme noktasında zorlandığında ise kompozitlerin kullanımına yönelik senaryo büyük ölçüde değişmiştir. Metalin yerini kompozitin almasıyla elde edilen daha hafif uçak yapıları daha düşük yakıt maliyetleri hem hedeflenen ağırlık değerlerine hem de istenilen emisyonlara erişilmesine olanak sağlamıştır. Örneğin günümüzün tercih edilen sivil uçaklarından Boeing 777'nin %12'si, Boeing 787'nin ise %50'den fazlası ağırlık olarak kompozit yapılardan oluşmaktadır.

Geçen birkaç yıl içinde hafif malzemeler ve tasarımlar; güvenlik, çevre, rekabet ve maliyet konularında talepleri artıran bir dizi mühendislik zorluğundaki önemli avantajları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Kompozit yapılar, farklı malzemelerin kendine özgü işlevlerini ve benzersiz özelliklerini kullanmayı ve aynı zamanda her bir malzemenin verimliliğini artırmayı amaçlayan başarılı bir uygulamadır. Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler, alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları gibi çeşitli hafif malzemeler arasında ileri derecede yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve tasarımsal uygulama çok yönlülüğü nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmüştür [64,65,66,67]

Kompozit malzemeler hava araçlarının ağırlık azaltımında önemli bir rol oynamıştır ve günümüzde ise hafif olma işlevselliğinin yanı sıra değişen koşullara en efektif cevabı verebilmek amacı da bu malzemelere algılama, kendi kendini iyileştirme ve yenileme gibi gelişmiş akıllı özellikler de kazandırılmıştır.

Bir hava aracının ağırlığı, taşınmasının ne kadar mal olacağını etkiler ve yakıt, toplam harcamaların yaklaşık %30'unu oluşturur. Uzun ve havacılık sektöründe enerji ihtiyacı oldukça yüksektir, bu nedenle maliyeti azaltmak amacıyla hava taşıtının toplam ağırlığını azaltmak iyi bir yöntemdir ve bunun için hafif malzemelerin kullanımı önemli bir uygulama olarak ön plana çıkmaktadır.

Sonuç olarak, küresel havacılık trafiğinin 1977'den bu yana her 15 yılda bir ikiye katlandığı ve bu eğilimin gelecekte de artmaya devam edeceği dikkate alındığında, hafif yapısal malzemelerin benimsenmesinin ileriye dönük avantaj olduğu su götürmez bir gerçek olarak görülebilmektedir. [68,69,70]

Metalik malzemeler ile karşılaştırıldığında, kompozitler üstün özelliklere sahip bir konuma ulaşmıştır. Yakıt maliyetlerinin artması ile birlikte havacılıkta

daha hafif malzemelere olan talep, kompozit malzeme kullanımına olan eğilimi de arttırmıştır. Günümüzde üstün niteliklere sahip elyafların geliştirilmesi, kompozitlerin yüksek performans gerektiren uygulamalar için yapılan inovatif faaliyetlerde önemli bir itici güç olmasını sağlamıştır. Bu sebeple havacılık ve uzay endüstrisi bu temel gereksinimi karşılayabilmek amacı ile ileri kompozit malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. 1930'ların sonlarından itibaren kompozit malzemelerin kullanıldığı uçaklar mevcut olduğu görülmektedir. Bunların en bilineni ve ünlü örneği ise örneği Duramold'dan (fenolik reçine ile ıslatılmış ve 280° F'de birbirine kaynaştırılmış huş ağacı) yapılmış Hughes H-4 Hercules adlı hava aracıdır. Duramold alüminyuma oranla daha hafif ve % 80 daha güçlü bir malzemedir.

Fiberglas uygulamalarının (fiber takviyeli plastik) ilk kez 1939 yılında uçaklarda kullanıldığı bilinmektedir. Elyaf takviyeli reçine matrisleri, cam, karbon veya bor gibi elyaflarla güçlendirilmiş polyester, vinil ester ve epoksi gibi reçinelerden oluşur. Airbus A350, %52 oranında karbon fiber takviyeli polimerden (CFRP) oluşmaktadır. En popüler kompozit malzeme, bir reçine matrisine gömülü cam elyaflardan oluşan ve 1950'lerde Boeing 707 yolcu uçağının yapımıyla öne çıkan fiberglastır. 1960'larda, lifli kompozit malzemeler askeri uçaklarda az sayılabilecek oranlarda kullanılmıştır. Karbon elyaf 1961 yılında havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bir para-aramid elyaf olan Kevlar ise ilk kez 1966 yılında balistik ve dayanıklı vücut zırhlarında kullanılmıştır. Kompozitler 1980'lerden bu yana çoğunlukla kanat firar kenarı panelleri ve dümenler gibi ikincil kanat ve kuyruk bileşenleri için kullanılmaktadır. 2000 yılında kullanıma sunulan ve 300'den fazla yolcu kapasiteli uzun menzilli çift motorlu jet yolcu uçağı Boeing 777'de %11 oranında kompozit malzeme kullanılmıştır.

Kompozit malzemeler uçaklarda başlangıçta sadece ikincil yapılarda kullanılmıştır. Örneğin McDonnell Douglas F-15 Eagle Savaş Uçağı imalatında kullanılan kompozitlerin toplam yapısal ağırlığa göre yüzdesi yaklaşık %2 gibi çok düşüktü bir oranda olmuştur. Bunun temel sebepleri ise; zamanın üretim teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilebilen üretim ve modelleme uygulamalarının zorlayıcı ve kısıtlayıcı olması ile beraber kompozitlerin alüminyuma kıyasla daha yüksek üretim maliyetlerine sahip olmasıdır.

Son zamanlarda fiber takviyeli kompozitler (FRC) ve fiber metal laminantlar havacılık ve uzay uygulamalarında daha fazla ilgi görmektedir. Çeşitli FRC'ler arasında karbon fiber takviyeli kompozitler, kanat kutuları, kontrol yüzeyleri gibi yapısal bileşenleri geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [71]. Cam elyaf takviyeli kompozitler yarı yapısal, aramid

elyaf takviyeli kompozitler ise yüksek darbe dayanımı gerektiren yerlerde kullanılmaktadır [72]. Öte yandan, fiber metal laminantlar ve hibrit fiber kompozitler, düşük yoğunlukları, yüksek sertlikleri ve yorulma dirençleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrilerinde devrim yaratmaktadır, bu nedenle Airbus A380'de gövde kaplaması olarak kullanılmaktadır [73].

Geleneksel el yatırması olarak bilinen kompozit uygulaması, küçük yolcu uçaklarından Boeing 787'ye kadar değişen havacılık bileşenlerinin yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, malzeme bilimi ve teknolojisi geliştikçe, havacılık endüstrisinde roket motoru döküm parçaları, anten çanakları, motor kaportaları, yatay ve dikey stabilizatörler, orta kanat kutuları, uçak kanatları, basınç perdeleri, iniş takımı kapıları, motor kaportaları, zemin kirişleri, uzun koniler, flap panelleri, dikey ve yatay stabilizatörler gibi birincil ve ikincil yapısal parçalarda kullanılmış ve yüzde olarak oranı artmıştır. Günümüzde ise Avrupa menşeli çok uluslu çift motorlu bir uçak olan Eurofighter Typhoon'ın kanat kaplamaları, ön gövde ve dümeni kompozitten yapılmıştır. Sertleştirilmiş epoksi kaplamalar dış alanın yaklaşık %75'ini kaplamaktadır. Karbon fiber takviyeli kompozit malzeme Eurofighter'ın yapısal ağırlığının yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır.

Havacılık ve uzay kompozitlerini devreye alırken güncel bir uygulama ise uçaklardan arta kalan parçaları geri dönüştürmektir. Boeing, tüm kompozit bazlı uçak malzemelerinin geri dönüşümünü uygulayarak uçakların çevresel performansını artırma yönünde bir eğilimin gelişeceğini de göstermiştir. Kompozitlerin geri dönüşüm süreci, kompozitlerin bir hava aracının görev ömrünün sona ermesi sırasında diğer uçak malzemelerinden ayrılması ve havacılık ve uzay üretiminde bir malzeme kaynağı olarak yeniden kullanılmak üzere iyi kalitede liflerin geri kazanılması olarak iki aşamada ele alınabilecek bir süreçtir. Giderek karmaşıklaşan görevler boyunca emniyet ve güvenilirlik sağlayabilecek teknolojilerin geliştirilmesi, geleceğin havacılık araçları için önemli bir sorundur.

Anlaşılabacağı üzere, kompozit teknolojisinin uzay ve havacılık endüstrisinde kullanımı güvenlikten taviz vermeden daha hafif malzemelerin kullanılmasına olanak sağlayacaktır. Artan yakıt maliyetleri nedeniyle ticari havacılık üreticileri, ağırlığı azaltmayı da içeren uçak performansını iyileştirme baskısı altındadır. Kompozit yapı teknolojisinde kaydedilen ilerlemeye dayanarak, geleceğin uçağının kompozit malzemelerden oluşması son derece muhtemeldir. Havacılık ve uzayda kompozitler söz konusu olduğunda ne kadar ileri gidebileceğinin sınırı mevcut teknoloji ile kısıtlı kalmaktadır ve yeni nesil üretim teknikleri bu sınırın genişletilmesinde çarpan etkisi yapmaktadır. Sonuç olarak daha hafif ve daha mukavemetli malzemelere duyulan ihtiyaç her geçen gün giderek artacaktır. Uçaklar daha yükseğe ve daha hızlı uçtukça kompozit malzemeler de gelişmeye devam edecektir.

Kaynaklar;

- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
- Bever, M. B., & Duwez, P. E. (1972). Gradients in composite materials. *Materials Science and Engineering*, 10, 1-8.
- Cantor, K. M., & Watts, P. (2011). Plastics processing. In *Applied plastics engineering handbook* (pp. 195-203). William Andrew Publishing.
- Rogov, VA, Shkarupa, MI ve Veliz, AC (2012). Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. *RUDN Mühendislik Araştırmaları Dergisi*, (2), 41-49.
- Altenbach, H., Altenbach, J., Kissing, W., Altenbach, H., Altenbach, J., & Kissing, W. (2004). Classification of composite materials. *Mechanics of composite structural elements*, 1-14.
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1559-1562.
- Menachery, N., Thomas, S., Deepanraj, B., & Senthilkumar, N. (2023). Processing of nanoreinforced aluminium hybrid metal matrix composites and the effect of post-heat treatment: a review. *Applied Nanoscience*, 13(6), 4075-4099.
- Gao, Y., Li, H., Zhao, D., Wang, M., & Fan, X. (2023). Cryogenic friction behavior of aluminum alloys sheets under dry contact condition. *Tribology International*, 108227.
- Shankar, G., Jayashree, P. K., Shetty, R., Kini, A., & Sharma, S. S. (2013). Individual and combined effect of reinforcements on stir cast aluminium metal matrix composites-a review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3(3), 922-934.
- Saikrupa, C., Reddy, G. C. M., & Venkatesh, S. (2021, February). Aluminium metal matrix composites and effect of reinforcements—A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1057, No. 1, p. 012098). IOP Publishing.
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1559-1562.
- Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite structures*, 53(1), 21-42.,
- Dokšanović, T., Džeba, I., & Markulak, D. (2017). Applications of aluminium alloys in civil engineering. *Tehnički vjesnik*, 24(5), 1609-1618.

- Hihara, L. H. (2010). Corrosion of metal matrix composites. reference Module in materials science and materials Engineering. *Shreir's Corrosion.*, 3, 2250.
- Kar, K. K. (Ed.). (2016). *Composite materials: processing, applications, characterizations*. Springer.
- Nturanabo, F., Masu, L., & Kirabira, J. B. (2019). Novel applications of aluminium metal matrix composites. *Aluminium alloys and composites*.
- Gautam, Y. K., Somani, N., Kumar, M., & Sharma, S. K. (2018, September). A review on fabrication and characterization of copper metal matrix composite (CMMC). In *AIP conference proceedings* (Vol. 2018, No. 1, p. 020017). AIP Publishing LLC.
- Bahador, A., Umeda, J., Yamanoglu, R., Ghandvar, H., Issariyapat, A., Bakar, T. A. A., & Kondoh, K. (2020). Deformation mechanism and enhanced properties of Cu-TiB₂ composites evaluated by the in-situ tensile test and microstructure characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, 847, 156555.
- Mittal, P., Mehta, J., Mahto, S., & Mehta, S. (2022). Copper Matrix Composites: Synthesis and Applications. In *Metal Matrix Composites* (pp. 47-62). CRC Press.
- Dash, D., Samanta, S., & Rai, R. N. (2018, June). Study on fabrication of magnesium based metal matrix composites and its improvement in mechanical and tribological properties-a review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 377, No. 1, p. 012133). IOP Publishing.
- Jayalakshmi, S., Kailas, S. V., & Seshan, S. (2002). Tensile behaviour of squeeze cast AM100 magnesium alloy and its Al₂O₃ fibre reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8), 1135-1140.
- Lim, C. Y. H., Lim, S. C., & Gupta, M. (2003). Wear behaviour of SiCp-reinforced magnesium matrix composites. *Wear*, 255(1-6), 629-637.
- Jiang, Q. C., Wang, H. Y., Ma, B. X., Wang, Y., & Zhao, F. (2005). Fabrication of B₄C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 386(1-2), 177-181.
- Abkowitz, S., Weihrauch, P. F., Abkowitz, S. M., & Heussi, H. L. (1995). The commercial application of low-cost titanium composites. *JOM*, 47, 40-41.
- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of materials processing technology*, 106(1-3), 58-67.
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium matrix composites* (pp. 367-382). Springer Berlin Heidelberg.

- Sedláček, B. (Ed.). (2019). *Polymer Composites: Proceedings, 28th Microsymposium on Macromolecules, Prague, Czechoslovakia, July 8–11, 1985*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Plueddemann, E. P. (Ed.). (2016). *Interfaces in Polymer Matrix Composites: Composite Materials, Vol. 6* (Vol. 6). Elsevier.
- Chohan, J. S., Boparai, K. S., Singh, R., & Hashmi, M. S. J. (2022). Manufacturing techniques and applications of polymer matrix composites: a brief review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1), 884-894.
- Scheirs, J. (1998). Polymer recycling: science, technology and applications. *John! Wiley & Sons Ltd, Journals, Baffins Lane, Chichester, Sussex PO 19 1 UD, UK, 1998. 591*.
- Alvarez, V. A., Fraga, A. N., & Vazquez, A. (2004). Effects of the moisture and fiber content on the mechanical properties of biodegradable polymer–sisal fiber biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(6), 4007-4016.
- Cui, Y. H., Wang, X. X., Xu, Q., & Xia, Z. Z. (2011). Research on moisture absorption behavior of recycled polypropylene matrix wood plastic composites. *Journal of thermoplastic composite materials*, 24(1), 65-82.
- Gowda, T. M., Naidu, A. C. B., & Chhaya, R. (1999). Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 30(3), 277-284.
- Holbery, J., & Houston, D. (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *Jom*, 58(11), 80-86.
- Zah, R., Hischer, R., Leão, A. L., & Braun, I. (2007). Curauá fibers in the automobile industry—a sustainability assessment. *Journal of cleaner production*, 15(11-12), 1032-1040.
- Alvarez, V. A., Fraga, A. N., & Vazquez, A. (2004). Effects of the moisture and fiber content on the mechanical properties of biodegradable polymer–sisal fiber biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(6), 4007-4016.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2014). Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26.
- Kalemtaş, A. (2015). Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler. *Bursa: Putech and Composites*.
- Donald, I. W., & McMillan, P. W. (1976). *Ceramic-matrix composites. Journal of materials Science*, 11, 949-972.
- Chawla, K. K., & Chawla, K. K. (2012). Ceramic matrix composites. *Composite Materials: Science and Engineering*, 249-292.

- Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of materials processing technology*, 175(1-3), 364-375.
- Campbell, F. C. (2010). Chapter 1: Introduction to Composite Materials. *Campbell, FC: Structural Composite Materials. Metals Park: ASM International*, 1-30.
- Ergun, A. T. E. Ş., & Aztekin, K. (2011). Parçacık Ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Ve Basma Dayanımı Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2).
- Kösedag, E., & Ekici, R. (2019). Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Bir Derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 384-393.
- Egbo, M. K. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 33(8), 557-568.
- Fu, S. Y., & Lauke, B. (1996). Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers. *Composites Science and Technology*, 56(10), 1179-1190.
- Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03), 2-6.
- Alam, S., Habib, F., Irfan, M., Iqbal, W., & Khalid, K. (2010). Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 32(3), 265-269.
- <http://kompozithayalleri.com/takviye-nedir/>
- Muliana, A., Nair, A., Khan, K. A., & Wagner, S. (2006). Characterization of thermo-mechanical and long-term behaviors of multi-layered composite materials. *Composites Science and Technology*, 66(15), 2907-2924.
- Biliz, İ., & Çelik, Y. H. Investigation of Mechanical Properties of Layered Composites Formed from Glass, Carbon and Aramid Fibers and Aluminum Plates. *European Journal of Technique (EJT)*, 12(2), 117-122.
- Kayrak, M. A. (2006). Düzlemsel gerilmeler etkisindeki Arall ve Glare kompozit plakaların rijitlik analizleri.
- Skorokhod, V. V. (2003). Layered composites: structural classification, thermo-physical and mechanical properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 42, 437-446.
- Zor, M (2022), Kompozit Malzeme Mekaniği, [Power Point Slides]
- Kassapoglou, C. (2013). *Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures*. John Wiley & Sons.
- Jawaid, M., Thariq, M., & Saba, N. (Eds.). (2018). *Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing.

- Balasubramanian, K., Sultan, M. T., & Rajeswari, N. (2018). Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. In *Sustainable composites for aerospace applications* (pp. 55-67). Woodhead Publishing.
- Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Zhang, B., & Kumar, N. M. (2019). Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors. *SCIREA Journal of Mechanical Engineering*, 3(1), 1-25.
- Razali, N., Mansor, M. R., Omar, G., Kamarulzaman, S. A. F. S., Zin, M. H., & Razali, N. (2021). Out-of-autoclave as a sustainable composites manufacturing process for aerospace applications. In *Design for Sustainability* (pp. 395-413). Elsevier.
- Mallick, P. K. (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles* (pp. 229-263). Woodhead Publishing.
- Ganhi S, Lyon RE. Health hazards of combustion products from aircraft composite materials. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION TECHNICAL CENTER ATLANTIC CITY NJ; 1998.
- Wright MT, Luers AC, Darwin RL, Scheffey JL, Bowman HL. Composite materials in aircraft mishaps involving fire: a literature review. 2003.
- Poyraz EO, Kus, han MC. Design for additive manufacturing with case studies on aircrafts and propulsion systems. In: The 21st edition of the international conference AFASES 2019, scientific research and education in the air force; 2019, January.
- Sun G, Chen D, Zhu G, Li Q. Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: a state-of-the-art review and outlook. *Thin-Walled Struct* 2022;172:108760.
- Fleischer J, Teti R, Lanza G, Mativenga P, Moehring HC, Caggiano A. Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals* 2018;67(2):603e26.
- Khosravani MR. Composite materials manufacturing processes. In: *Applied mechanics and materials*, vol. 110. Trans Tech Publications Ltd; 2012. p. 1361e7.
- Mallick PK. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press; 2007.
- Scelsi L, Bonner M, Hodzic A, Soutis C, Wilson C, Scaife R, Ridgway K. Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. *Express Polym Lett* 2011;5(3).
- Rubio EM, Blanco D, Marín MM, Carou D. Analysis of the latest trends in hybrid components of lightweight materials for structural uses. *Procedia Manuf* 2019;41:1047e54.
- Timmis AJ, Hodzic A, Koh L, Bonner M, Soutis C, Sch€afer AW, Dray L. Environmental impact assessment of aviation emission reduction throu-

gh the implementation of composite materials. *Int J Life Cycle Assess* 2015;20(2):233e43.

Van Grootel A, Chang J, Wardle BL, Olivetti E. Manufacturing variability drives significant environmental and economic impact: the case of carbon fiber reinforced polymer composites in the aerospace industry. *J Clean Prod* 2020;261:121087.

Rajak DK, Wagh PH, Linul E. Polymers manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: a review. 2021.

Boyer RR, Cotton JD, Mohaghegh M, Schafrik RE. Materials considerations for aerospace applications. *MRS Bull* 2015;40(12):1055e66.