

## İdeaport Kompozit Geri Dönüşümü Çalışma Grubu Çıktısı

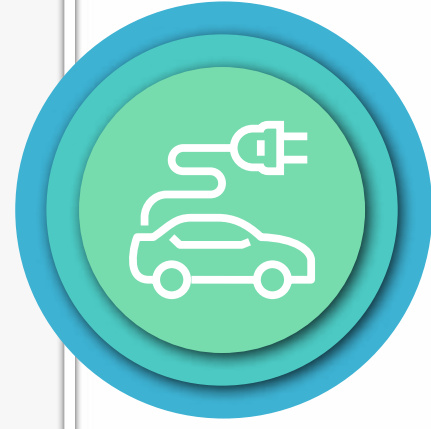
Ocak 2021



Bu çalışma, TTGV İdeaport Komünite üyesi ve teknoloji profesyoneli 5 uzmandan oluşan İdeaport – Atık Kompozit Geri Dönüşümü Çalışma Grubu tarafından hazırlanmıştır. Farklı sektörleri temsil eden uzmanlarımız; "Atık Kompozitlerin Geri Dönüşümü ve Döngüsel Ekonomiye Etkileri" başlığı altında bir araya gelerek karşılıklı deneyim ve fikirlerini paylaştıkları ortak bir çalışma gerçekleştirdiler. Çalışma Grubumuz; yaptıkları haftalık toplantılarda geri dönüşüm konusunda uzman sanayi temsilcilerini konuk ederek, kompozit geri dönüşüm konusunda kendilerinden bilgi aldılar. 8 haftalık çalışmalarının sonucu olarak hazırladıkları bu çıktı; tüm dünyada giderek önem kazanan "kompozit geri dönüşümü" konusunun ülkemizdeki ve dünyadaki güncel durumunu farklı örneklerle özetlemektedir.

### Çalışma Grubu Üyeleri

**Alında Öykü Akar, Alp Sütçüler, Melek Duygu Uykun, Emre Demirtaş,** ve Çalışma Grubu Lideri **Kübra Örseoğlu Çelik.** Konuk Üyeler; **Fatih Yaşar** ve **Beril Yeşilirmak**'a paylaşımları için teşekkür ederiz.



### Kompozitlerin Geri Dönüştürülmesi Neden Önemli?

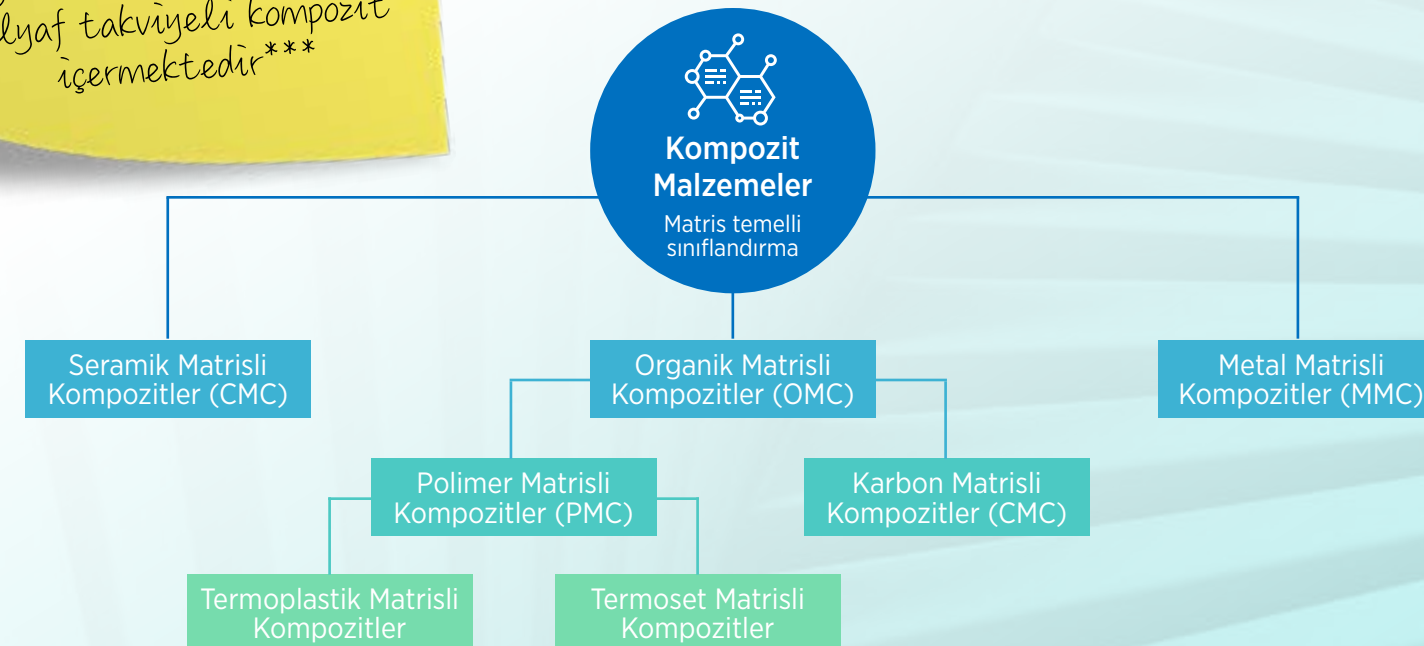
Kompozitlerin en geniş kullanım alanı otomotiv sektörü olup, araçlarda gövde, kaput, iç kısımlar, şasi ve elektrik aksamları gibi parçalarda kompozit kullanımı yaygındır. Otomotiv uygulamasının ardından havacılık ve inşaat sektörleri gelmektedir. Özellikle savunma ve havacılık sektörü kompozit malzeme kullanımında öncü rol almaktadır. Günümüzde hava araçlarının ağırlıkça 50%'den fazlasını kompozit malzemeler oluşturur. Kompozit uygulamalarının başlıca sektörlerle göre dağılımına bakıldığında; uygulamaların %32'sini otomotiv, %23'ünü havacılık ve uzay, %14'ünü inşaat, % 11'ini spor malzemeleri, %9'unu elektrik-elektronik endüstrisinin oluşturduğu görülebilir. Kompozit malzemelerin Avrupa'daki pazar payı dağılımına bakıldığında Almanya'nın en büyük paya sahip olduğu görülür, onu İtalya ve Fransa takip eder. Bu üç ülkenin toplam payı Avrupa pazarının yaklaşık %60'ı kadardır. Buradan çıkarılacak sonuç; otomotiv ve havacılık sektörlerinin bu ülkelerdeki ana sektörleri oluşturduğu ve bu ülkelerin bu anlamda Avrupa pazarında başı çektikleridir\*\*.

Günümüzde farklı sektörlerde karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanımı günden güne artış göstermektedir. Bu sektörlerin başında ticari havacılık, rüzgar enerjisi, savunma, uzay, otomotiv, inşaat ve diğer endüstriyel alanlar gelmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde termoset ve termoplastik reçineler kullanılıyor olsa da günümüzde bu kullanımın yaklaşık %85'ini termoset reçineler oluşturmaktadır. Günden güne artan yüksek performanslı kompozit malzeme kullanımı, ömrü dolan veya değiştirilmeye gerek duyulan malzemelerin, geri dönüştürülme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

Termoset reçineli kompozitler, mekanik özellikler açısından birçok avantaja sahip olsalar da Kuzey Amerika ve Avrupa'da yıllık 3000 ton atık meydana getirmektedirler. Tarihi geçmiş ve kullanılmamış prepreg malzemeler, test için kullanılan kompozitler, üretimde verilen fireler ve kullanım ömrü dolan son ürün halindeki kompozitler bu atık miktarını oluşturan başlıca kalemlerdir.



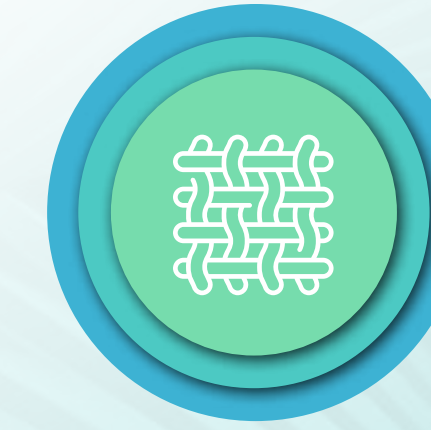
2025 yılına kadar yaklaşık 8500 adet ticari uçağın kullanımından kaldırılması beklenmektedir ve her uçak yaklaşık 20 ton karbon elyaf takviyeli kompozit içermektedir\*\*\*



Sıvı gıdaların muhafazası için tercih edilen kompozit ambalajlar, plastik, alüminyum ve kağıt malzemelerin katmanlı yapıdaki formudur. Meyve suları, sütler gibi farklı sıvı içecek türlerinde kullanılmaktadır. Bu ürünlerden milyonlarca adet satıldığı düşünüldüğünde, ortaya çok büyük miktarda kompozit ambalaj atığı çıkmaktadır. Türkiye'nin en kalabalık nüfusa sahip ili olan İstanbul'un, 14.000 ton/gün katı atık hacmi mevcuttur. İçecek ambalajı olarak düşünüldüğünde ise, 33.264 ton/yıl atık ambalaj kompoziti ortaya çıkmaktadır. Türkiye geneline bakıldığında ise, oluşan kompozit içecek kartonu miktarı 100.000 ton/yıl olarak tahmin edilmektedir



Aramid fiberler ve Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) fiberler özellikle yüksek mekanik performansları ve mükemmel darbe sönümlenme özellikleri sebebiyle balistik sektörde kullanılan kompozitlerde en fazla tercih edilen kompozit bileşenlerdir. Bu malzemeler balistik sektörünün yanında pek çok sektörde de hızla artan şekilde yaygınlaşmaktadır. Bu kullanım artışı, çevre için olumlu bir gelişme değildir. Bu malzemelerin hem kompozitin doğası gereği ortaya çıkan ayrıştırma sorunundan hem de fiberlerin özelliklerinden kaynaklı olarak geri dönüştürülmeleri çok zordur. Geri dönüşümleri için kullanılan metotlar mevcut olmakla ve halen konu üzerine çalışmalar sürdürülüyor olmakla birlikte, şu anki metotlar çok maliyetli olduğundan, sektör tarafından çok fazla tercih edilmemektedir.



Aramid takviyeli kompozitlerdeki geri kazanılan fiberler, çok sayıda yüksek son uygulamalarda, asbest yerine kullanılabilir hamura dönüştürülür. Bu tür geri dönüştürülmüş aramid elyafları, başka uygulamalar için eğrilmiş ipliklere de dönüştürülebilir. Aramid elyafların ve kumaşların geri dönüştürülmesine yönelik başka bir yöntem de, binek otomobiller için fren balatalarına kalıplanmaları için kırılarak, fenolik reçine ile karıştırılmasıdır.

Aramid elyafların piroliz ile geri dönüşümü de mümkündür ancak bu çevreye zararlı bir metottur. Bu işlemin daha çevre dostu şekilde gerçekleştirilebilmesi için yapılan bir çalışmada, aramid elyaflar / "Neoprene" kompozit malzemenin piroliz ve mekanik yıkama işlemlerinin birlikte kullanıldığı bir ayrıştırma prosesi geliştirilmiştir.

Farklı kompozit türleri için kullanılan geri dönüşüm işlemleri farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, termoplastik kompozitler gerektiğinde tekrar eritilip kalıplanarak şekillendirilebilirken, termoset polimerler için öğütme gibi mekanik yöntemler ve yakma haricinde imkânlar kısıtlıdır ve deneysel kimyasal çözümler de henüz geliştirme aşamasındadır. Ayrıca, polimer matrisli kompozitlerde kullanılan fiber/katkı maddelerine yönelik işlemler de mevcuttur; ancak piyasada pek talep görmediğinden yaygın olarak uygulanmamaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ise ürünün temizlik durumuna göre farklı metotlar izlenebilmektedir. Malzemenin durumuna göre gerektiğinde kompozit yapı eritilerek çeşitli yöntemlerle metal içeriği geri kazanılabilmektedir.





## Termoset Reçineli Karbon Elyaf Kompozit Geri Dönüşümü

Termoset reçineli kompozit malzemelerin kompleks yapılarından dolayı geri dönüşüm işlemleri oldukça zordur. Termoset reçineli kompozit malzeme içeriğinde karbon elyaf, termoset reçine ve çeşitli katkı maddeleri bulunmaktadır.

İlk işlem ile reçinenin fazla oranda olduğu toz malzeme ve karbon elyafın fazla oranda olduğu bileşen elde edilebilmektedir ancak geri kazanılan karbon elyaf hem boyutları değiştiğinden hem de modül değerleri düştüğünden dolayı yalnızca alternatif uygulamalarda katkı maddesi olarak kullanılabilir. İkinci proses ile elde edilen karbon elyafın ise yüzeyinde yanma sonucu oluşan kül kalıntıları bulunduğu için, yeterli performansı göstermesi oldukça zordur. Ayrıca termal prosesler altında piroliz tekniği diğer teknolojilere kıyasla en gerçekçi geri dönüşüm stratejisine sahiptir. Yöntem oksijensiz yakmaya dayalı olup karbon ve cam liflerinin ayrımında pratik olarak uygulanabilmektedir. Kimyasal proses ile daha saf ve ilk özelliklerine daha yakın karbon elyaflar elde edilebilmektedir. Süperkritik akışkanların kullanımı bu alanda öne çıkmıştır. Eğer çevresel etki ve maliyet sorunları çözümlenebilirse oldukça umut verici bir potansiyele sahiptir.

Mekanik proseslerin piyasada endüstriyel ölçüğe uyarlanabilmiş 2 adet örneği bulunmaktadır. Bunlardan biri Ercom şirketinin prosesi olup mobil parçalayıcı ve çekiç öğütme kullanırken; diğeri Phoenix Fiberglass firmasının prosesidir ve iki aşamalı parçalama ve ezerek öğütme yöntemine dayanmaktadır. Hâlihazırda her iki firma da aktif faaliyette faaliyette değildir, bu da geri dönüşüm sebebi geri dönüşüm sonucu açığa çıkan ürünlerin düşük katma değerli olmasına yorumlanabilir. Bu prosesler de elde edilen geri dönüştürülmüş fiberler birincil kullanıma uygun olmayıp, ancak dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilecek kalitede elde edilebilmektedirler.

Geri dönüşüm prosesleri başlıca üç farklı proses üzerine kurgulanmaktadır:

- 1) Mekanik
- 2) Termal
- 3) Kimyasal



## Aramid ve UHMWPE Kompozitlerin/ Elyafın Geri Dönüşümü

Bu malzemelerin geri dönüşümleri için genel olarak kompozit geri dönüşümleri için de uygulanan öğütme ve yakma/piroliz yöntemleri uygulanabilmektedir. Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) içeren kumaşların/elyafın/kompozitlerin yakılması veya piroliz işlemi uygulanması doğa dostu bir metottur çünkü bu işlem sırasında toksik bir gaz ya da artık tozlar oluşmaz. Bu proses ile elde edilen ısı, güç türbinlerine güç sağlamak veya elektrik üretimi gibi amaçlarla değerlendirilmektedir.

Kompozit sektöründe elyafların kırılarak, farklı malzemelere eklenmesi şeklinde değerlendirilmesi de yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde kırılmış olan elyaflar, Sac kalıplama bileşiği (Sheet Molding Compound - SMC) veya Dökme kalıplama bileşiği (Bulk Moulding Compound - BMC) malzeme olarak, presle üretimi yapılan kompozit üretim metotlarında değerlendirilebilmektedir. Kırık fiberlerin değerlendirilmesi için diğer bir alternatif yöntemde dökme kalıplama elemanlarına takviye edilerek kullanılmasıdır. UHMWPE kumaşlar ve kaplamasız/reçinesiz elyaflar kırılarak, bu şekilde değerlendirilebilmektedir.

Bir matris ile birleştirilmiş olan kumaşlar içinse, matrisin ayrıştırılması sonrası aynı metotla geri kazanılması mümkündür. Polimerlerin geri dönüşümlerinde yaygın olarak kullanılan metotlardan biri, eritilerek tekrar granül hale getirilerek uygun sektörlere satılmasıdır. Ancak UHMWPE, yüksek moleküler ağırlığa ve yüksek eriyik viskoziteye sahip olduğu için ekstruderler veya enjeksiyon kalıplama makineleri gibi geleneksel ekipmanlarda işlenmesi zordur. Bu problem çözmek için çift vidalı gibi farklı ekstruder tasarımları yapılması ya da toz polimerler ile karıştırılarak tekrar değerlendirilmesi gibi farklı metotlar içeren çalışmalar yürütülmektedir. Aramid elyafların ve kumaşların geri dönüştürülmesine yönelik başka bir yöntem de, binek otomobiller için fren balatalarına kalıplanmaları için kırılarak, fenolik reçine ile karıştırılmasıyla sağlanır.

Aramid elyafların piroliz ile geri dönüşümü de mümkündür ancak bu çevreye zararlı bir metottur. Bu işlemin daha çevre dostu şekilde gerçekleştirilebilmesi için yapılan bir çalışmada, aramid elyaflar / Neoprene kompozit malzemenin piroliz ve mekanik yıkama işlemlerinin birlikte kullanıldığı bir ayrıştırma prosesi geliştirilmiştir.

Ahşap bazlı kompozit panellerin geri dönüşümü için malzemenin öncelikle küçük parçalara ayrıştırılması gerekir. Panellerin parçalanması için Mekanik, termohidrolik & kimyasal ve bunların kombinasyonları olacak şekilde üç farklı yöntem uygulanabilir. Tüm bu süreçlerin hedefi, daha sonra yeniden kullanım için mümkün olan en yüksek miktarda yüksek kaliteli geri dönüşüm malzemesini toplayabilmektir. Ahşap kompozitlerin geri dönüşüm prosesleri, mevcut proseslerden genellikle farklılık göstermektedir. Üretimde payet makinası (flaker) teknolojisi yerine, çekiçli değirmen teknolojisinin kullanılması nedeniyle kullanılan hammadde (yonga) daha kısa ve kalın olmaktadır. Mekanik parçalama yoluyla yonga levhalardan geri kazanılan yongalar, ormanlardaki işlenmemiş ağaçtan elde edilenlere kıyasla daha düşük kalitede olma eğilimindedir. Geri dönüşüm prosesi sonucu tekrar mobilya yapımında kullanılacak olan ürünün istenen kalite standartlarını yakalayabilmesi için, ahşap kompozit yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>) yüksek çalışılmaktadır.

Kompozit ambalajlar, temel olarak beş farklı yöntemle geri dönüştürülebilirler. Bu yöntemler; ambalajın bileşenleriyle birlikte değerlendirilmesi, bileşenlerinin ayrıştırılarak değerlendirilmesi ve termal yöntemlerle yok edilmesi esaslarına dayanmaktadır. Bileşenlerin ayrı ayrı değerlendirilmesi yönteminde, kalan alüminyum ve plastik karışımının geri dönüşümü için ikinci bir işlem uygulanmalıdır. Bu kompozitlerin, mekanik yöntemlerle ayrıştırılıp geri kazanımı mümkün değildir. Ambalaj kompozitlerinin geri kazanım yöntemlerini aşağıdaki şekilde 5 farklı yöntemle açıklayabiliriz:

### 1 Termal Sıkıştırma

Bu yöntem, kompozit ambalajların bileşenleriyle birlikte değerlendirilmesine örnektir. Yonga levha olarak da bilinen bu yöntemde, kartonlar 5 mm'lik parçalar halinde kesilir ve ısıtılır. Isınma etkisiyle eriyen Polietilen (PE) malzeme kağıt ve alüminyum parçaları arasında bağlayıcı görevi görür. Tabaka formundaki malzeme soğutulur ve preslenir.

### 2 Sulu Hamurlaştırma

Bu yöntemde, kompozit ambalaj küçük parçalar halinde kesilir ve sıcak su içeren bir tank içerisinde sulu hamur haline getirilir. Elde edilen hamur elekten geçirilir ve süzülür. Elekte kalan selüloz lifleri, kağıt üretiminde kullanılır.

### 3 PE ve Alüminyum Geri Dönüşümü

Alüminyum içeren Polietilen malzeme, temizlenir ve kurutulur. Sonrasında ekstrüzyon prosesiyle işlenerek, alüminyum içeren polietilen kompozit malzeme olarak granül formda üretilir. Bu granül hammaddeler, yeni plastik parça üretiminde kullanılırlar.

### 4 Piroliz

Piroliz yönteminde, fırınlarda düşük oksijen yüzdesi ile alüminyumun okside olması engellenerek polietilenin oksijenle tepkimeye girmesi sağlanır ve enerji üretilir.

### 5 Gazlaştırma

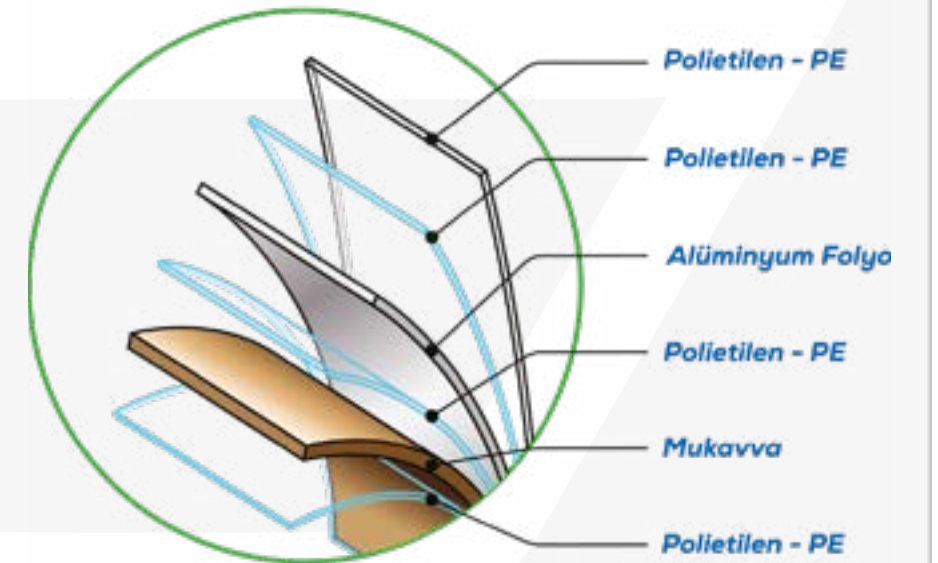
Bu yöntemde, atık kompozit ambalajdaki polietilen yakılır ve gaz halindeki temel bileşenlerine ayrılıp enerji olarak kullanılır. Alüminyum ise granül forma dönüştürülür ve metal sanayiinde kullanılır.



## Ahşap Kompozit Geri Dönüşümü



## Kompozit Ambalajların Geri Dönüşümü



## İdeaport Kompozit Geri Dönüşümü Çalışma Grubu Çıktısı

Ocak 2021



### Kaynaklar

- \*\*\*Y. Yanga, R. Boom, B. Irion, D. J. Heerden, P. Kuiper, H. Wit. Recycling of composite materials, Chemical Engineering and Processing 51 (2012) 53– 68.
- \*\*\*Growth Opportunities in Global Prepreg Market: 2016-2021, Lucintel
- Kumar, S., Krishnan, S. Recycling of carbon fiber with epoxy composites by chemical recycling for future perspective: a review. Chem. Pap. 74, 3785–3807 (2020).
- Ayrlimis, N. – Candan, Z. – Hiziroglu, S. (2008). "Physical and mechanical properties of cardboard panels made from used beverage carton with veneer overlay", Materials and Design.
- Pietikäinen, V. (2008). "Collection and recycling of beverage cartons at AIT" Project report.
- Tam, T., & Bhatnagar, A. (2016). High-performance ballistic fibers and tapes. In Lightweight Ballistic Composites (pp. 1-39). Woodhead Publishing.
- González, J., Rosales, C., González, M., León, N., Escalona, R., & Rojas, H. (2017). Rheological and mechanical properties of blends of LDPE with high contents of UHMWPE wastes. Journal of Applied Polymer Science, 134(26)
- Dabkiewicz, I., Marcuzzo, J. S., & Contini, R. D. C. M. S. (2016). Study of Aramid Fiber/Polychloroprene Recycling Process by Thermal Degradation. Journal of Aerospace Technology and Management, 8(3), 373-377.
- N. Vijay, V. Rajkumara, P. Bhattacharjee. Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries, Procedia Environmental Sciences 35 ( 2016 ) 563 – 570.



### DÖNGÜSEL EKONOMİYE DAHA FAZLA KATKI SUNABİLMEK İÇİN NELER YAPILABİLİR?

Eğer kompozit geri dönüşümünde somut adımlar atılacaksa, bu ancak disiplinler arası uyumlu çalışmalar sonucu başarılı olacaktır. Malzeme tasarımı, ürün tasarımı, üretim ve geri dönüşüm aşamaları arasında ahenk yaratılması bu konuda başarı sağlamak için en önemli faktördür. Geri dönüşümü kolay kompozit malzemelerin kullanımı endüstride yaygınlaşırsa, geri dönüşüm çabaları da daha başarılı olabilir, malzeme kullanımı ve maliyetlerde düşüş sağlanabilir.

Bu geri dönüşüm çabaları ile alakalı 3 önemli nokta bulunmaktadır. Bunlar;

- 1 Kompozit ve bileşenlerinin geri dönüşüm teknolojilerinde daha yetkin hale gelmek**  
Yeni ve daha etkili ayrıştırma proseslerinin geliştirilmesi, endüstri ve üniversiteler arası çalışmalara gereken önemin verilmesi
- 2 Kompozit geri dönüşümüne ürün tasarım aşamasında gereken önemi vermek**  
Ürün dizaynı sırasında geri dönüşümü daha kolay olan ürünlere daha sık başvurmak, yeni materyal geliştirilirken sadece performans veya maliyetini değil, aynı zamanda geri dönüştürülebilirliğini de göz önünde bulundurmak
- 3 Geri dönüştürülmüş son materyallerin kalitesini arttırmak**  
Geri dönüştürme sonucu açığa çıkan materyallerin kalitesini arttırmak için ya geri dönüşüm prosesleri daha hassas olmalı ya da bu ürünlerin kullanım alanlarındaki spesifikasyon aralıkları genişletilmelidir.

Bu malzemelerin atıklarının/iskartalarının değerlendirilmesi çevre açısından önemli olduğu kadar, dögüsel ekonomi açısından da oldukça önemli bir konudur.

### GELECEĞE BAKIŞ

Otomobil ve havacılık gibi sektörlerde geri dönüşümdeki eksiklikler genelde kompozit yapılardan kaynaklanmaktadır. Eğer bu materyaller etkili bir şekilde geri dönüştürülüp tekrar kullanıma yönelik tasarlanabilirse, bu endüstri kollarındaki geri dönüşüm oranları %100'lere yaklaşabilecektir. Bu hedeften yola çıkarak; şirketler ve ham madde üretimi yapan firmalar için çeşitli kamu teşvikleri sunulması bu alanda olumlu gelişmelere zemin hazırlanabilir.

Gelecek yıllarda ülkemizde de dünyada olduğu gibi havacılık ve savunma alanlarında gerçekleşmesi beklenen hızlı büyüme, kompozit kullanım miktarındaki artışı da beraberinde getirecektir. Dünya'da karbon elyaf kompozit geri dönüşümü için farklı yöntemler bulunmuş ve kullanılmaya başlanmış olsa da bu alanda hala başlangıç aşamasında olduğu bilinmelidir. Henüz başlangıç aşamalarında olan bir sektöre ülkemizde de yatırım yapılabilirse, geri dönüşüm sonucu elde edilecek ve özelliklerini büyük oranda koruyabilmiş karbon elyafın hala oldukça katma değerli bir ürün olması kaçınılmazdır.

Karbon ve cam fiberler, Aramid ve Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen'e (UHMWPE) göre çok daha yaygın kullanılan fiberlerdir. Bu sebeple geri dönüşümleri üzerine çok daha fazla çalışma yürütülmüş ve çözümler bulunmuştur. Özellikle UHMWPE kırık fiberlerin kullanımı adına çok kısıtlı çalışmalar mevcuttur. Hem aramid hem UHMWPE malzemeler çok pahalı ve değerli malzemelerdir. Bu malzemelerin atıklarının/iskartalarının değerlendirilmesi çevre açısından önemli olduğu kadar, dögüsel ekonomi açısından da oldukça önemli bir konudur. Bu malzemeleri kullanan firmaların kompozit geri dönüşümünü kendi içlerinde değerlendirmek veya başka firmalara girdi olmasını sağlama konusunda girişimlerde bulunması gerekmektedir. Geri dönüşüm firmalarının bu konuda öncülük etmesi, atık kompozitlerini alacağı firma ile girdi sağlayacağı firmalar arasında köprü görevi görmesi ve ara prosesleri üstlenmesi gerekmektedir. Konuda firmaların birbirlerinden haberdar olması için, kompozit çalışan firmaları bir araya getiren platformlarda, iskartası olan firmaların ellerindeki malzemeleri tanıtması, kırık elyaf kullanan kompozit firmalarının bu malzemeleri değerlendirmesi bir çözüm olabilir. Bu sayede hem iskartalara bir girdi sağlanacak sektörler keşfedilecek, hem de girdi sağlanacak firmalar çok daha farklı ürünler ile ürün yelpazesini genişletebilir.

Türkiye'de öncelikle kompozit hammadde toplama merkezlerinin kurulması gerekmektedir. Bu merkezlerde atıkların toplanması için, çeşitli teşvikler getirilebilir. Ortaya çıkan kompozit atıkların da, geri dönüşüm firmaları tarafından uygun maliyetlerle tedarik edilmesi ve son tüketicilerin de bu geri dönüşüm zincirinden uygun fiyatlandırma ile payını alabilmesi gerekir.

