

Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemelerde Yorulma Davranışı

Oğuzhan Taş¹

Aslıhan Hayırkuş²

Adem Onat³

Murat Yazıcı⁴

Özet

Otomotiv endüstrisi ve havacılık sanayisinde ağırlık azaltma çalışmalarının hız kazanması ile üretimde hafif yapıların kullanımı artmaktadır. Bu gibi yapıların kullanılabilirliği için ağırlık azaltılırken mukavemet değerlerinin düşmemesi ve işlenebilirlik, geri dönüşüm, maliyet gibi parametrelerin de istenilen özelliklerde olması gerekmektedir. Kompozit malzemeler özgül mukavemet özelliklerinin yüksek olması hafif malzemeler arasında en çok tercih edilen malzemelerdendir. Termoplastik matrisli kompozit malzemeler ise geri dönüştürülebilir özellikleri sebebiyle kompozit malzemeler arasında en çok tercih edilen polimer malzemelerdir. Termoplastik matrisli kompozit malzemelerin birçok üstün özelliğinin bulunması kullanım alanı genişliği sağlamaktadır. Bu kullanım alanlarından birisi de sürekli yük altında çalışma durumudur. Sürekli yük altında çalışan termoplastik matrisli kompozit malzemelerde yorulma davranışı önemli bir konudur. Bu çalışma durumunda malzemede oluşan moleküler düzeyinde iç sürtünmeye bağlı olarak artan sıcaklık malzeme üzerinde olumsuz etkilere neden olarak malzemenin yorulma ömrünün düşürür. Bu durumun çözülebilmesi açısından malzemeye nano boyutta katkı malzemeleri katarak termal iletkenliğin artırılması ve artan termal iletkenlik sayesinde de yorulma ömrünün uzatılmasına

- 1 Doktora öğrencisi, UMİMAG Lab., Bursa Uludağ Ü., oguzhantas2967@gmail.com, 0000-0002-5726-3368
- 2 Doktora öğrencisi, UMİMAG Lab., Bursa Uludağ Ü., aslihanhayirkus@gmail.com, 0000-0003-2818-3198
- 3 Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ademonat@subu.edu.tr, 0000-0003-4834-0648
- 4 Prof. Dr., UMİMAG Lab., Bursa Uludağ Ü., myazici@uludag.edu.tr, 0000-0002-8720-7594

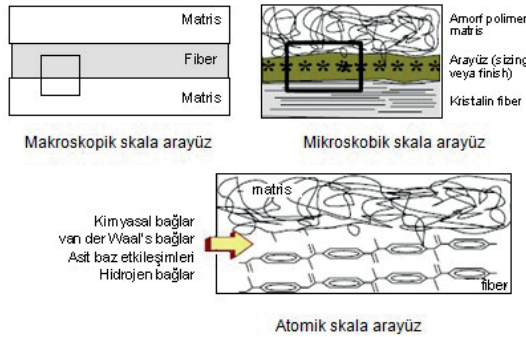
yönelik çalışmalar günümüzde devam edilmektedir. Bu çalışmada kompozit malzemelerde yorulma davranışı konusunda temel bilgilendirme yapmak amaçlanmıştır.

1. Giriş

Günümüzde birçok alanda hafif yapılara yönelik çalışmalar artmaktadır. Yeni yapılan bu çalışmalarda düşük ağırlığın yanında düşük maliyet ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olan malzemeler kullanılmaktadır. Termoplastik matrisli kompozit malzemeler bu talepleri karşılayabilecek formdadır. Ayrıca termoset kompozitlerle karşılaştırıldıklarında benzer mekanik özellikler gösterebilirler de geri dönüşüme elverişli olmalarıyla endüstriyel kullanımlarda daha cazip hale gelmektedirler.

Termoplastik matrisli kompozit malzemeler ile elde edilmek istenen özellikler genellikle eğilme rijitliği, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve yalıtkanlıktır [1,2]. Kompozit malzemede kalıcı yapısal gerilmelerin oluşmaması için, takviye elemanı ile matris elemanının ısıl genleşme katsayıları arasında da uyum olması zorunludur. Aynı zamanda kullanılacak takviye elemanından, yüksek elastik modül, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyum, üretim kolaylığı ve ısıl direnç gibi özellikler istenmektedir. [3,4]

Kompozit bir malzemede, matris ve takviye elemanlarının fiziksel, kimyasal veya mekanik olarak etkileştiği, gerilimi matristen takviye elemana transfer eden ara faz da denilen bir arayüzey bulunmaktadır (Şekil 1). Bir kompozitte arayüzey bölgesi, kompozitin son özelliklerinin belirlenmesinde son derece önemlidir. Matris ve fiber arasındaki yükün aktarımında arayüz kuvvetli bağlanma olmalı, aşındırıcı veya çözücü kimyasalların girişini azaltmalı ve bağlanmanın kopmasını kontrol edebilmelidir. Kompozitin kesilmesi, rijitliği, darbe direnci, kırılmanın ilerlemesi ve fiberlerin dizilişleri gibi özellikler üzerinde de arayüzün önemli katkıları bulunur. [4,5]



Şekil 1. Değişik skalalarda arayüzler [5]

Kompozit malzeme kuvvete maruz kaldığında, yük matris fazından yükü esas taşıyacak olan takviye fazına sağlam bağlanmış bir arayüz vasıtasıyla aktarılır. Malzeme bu bölgede ne matris fazı gibi ne de takviye fazı gibi davranır. Bu bölge her iki elemandan da farklı davranış sergiler. Yapıda kullanılan elyafların çapının küçülmesiyle arayüz bölgesi daha fazla önem kazanmaktadır.[6]

2. Termoplastik Kompozit Malzemeler

Termoplastikler ısıtılarak yumuşatılıp şekil verilebilir hale geçen, soğutulduklarında katılaşsalar dahi tekrar ısıtıldıklarında yine kullanılabilen plastik malzemelerdir. Termosetlerin aksine, ısıtma ve soğutulma işlemleri yapılarında sadece fiziksel değişim meydana getirir. Bu özellikleri sayesinde geri dönüştürülebilir üretim özelliği gösterirler.

Günümüzde hafif konstrüksiyonlara yönelik uygulamalar arttırılmak istenmektedir. Yüksek yük taşıma kapasitesiyle birlikte, hafif ve düşük maliyetli malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır. Bu noktada termoplastik kompozitler, metallerin çoğundan ve termosetlerden daha hafif bir yapıya sahip oldukları için otomotiv endüstrisi ve havacılık sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Termoplastik matrisli kompozitler, termoset kompozitlerle benzer mekanik özellikler göstermelerinin yanında üstün kimyasal dirence sahiptirler ve maliyetleri de daha uygundur. PP, PBT, PPS, PA, POM, vb. birçok uygulamada tercih edilen başlıca termoplastik matris malzemeleridir. Bu matris malzemeleri cam ve karbon gibi çeşitli fiberlerle ve tercihen özel uyumlaştırıcı ilaveleriyle takviyelendirilebilmektedir. [5,23,24]

Bu termoplastik matris malzemeleri arasından PP (polipropilen); düşük fiyatı, iyi yorulma ve darbe mukavemeti ve iyi kimyasal direnci ile özellikle tercih edilmektedir. Günümüzde homopolimer, blok-kopolimer ve rasgele-kopolimer olmak üzere PP' nin üç temel çeşidi kullanılmaktadır. [1,6,8]

Tüm bu avantajlarının yanında termoplastiklerin iki temel dezavantajı vardır. Bu dezavantajlar üretiminde ısı ve basınç uygulamalarının yapılabilmesi için kaliteli donanım gerektirmesi ve elyafların termoset kompozit malzemelere oranla daha zor ıslanmasıdır. [3,5,23,24]

Termoplastik kompozit malzemelerin üretimi sürekli fiber takviyeli kompozitler ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır. Sürekli fiber takviyeli kompozit üretim teknikleri termo şekillendirme, şerit sarma, basınçlı döküm, otoklav ve diyafram şekillendirme, süreksiz fiber takviyeli termoplastik kompozitler ise enjeksiyonla döküm ve üfleli döküm teknikleriyle üretilir. [2,6]

2.1. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Termoplastik malzemeler, mühendislik amaçlı termoplastikler ve genel amaçlı termoplastikler olarak ikiye ayrılırlar. Çizelge 1 ve Çizelge 2'de bu termoplastiklerden bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Genel amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri [1]

Malzeme	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Darbe Dayanımı (Izod)	Dielektrik Gücü	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz)
	(g/cm ³)	(MPa)	(J/m)	(V/mm)	(°C)
Polietilen (düşük yoğunluk)	0,92-0,93	6,2-17,2		18912	82-100
Polietilen (yüksek yoğunluk)	0,95-0,96	20-37,2	21,35-747,3	18912	80-120
Bükülmez PVC	1,49-1,58	51,7-62,1	53,38-298,9		110
Genel maksatlı PP	0,90-0,91	33-38	21,35-117,4	25610	107-150
Stiren akrilonitril (SAN)	1,08	69-82,8	21,35-26,69	69935	60-104
Genel maksatlı (ABS)	1,05-1,07	40,7	320,28	15169	71-93
Genel maksatlı akrilik	1,11-1,19	75,9	122,7	17730-19700	54-110
Selüloz, asetat	1,2-1,3	20,7-55,2	133,45-213,52	9850-23640	60-104
Plitetrafloretillen	2,1-2,3	6,9-27,6	64,05-362,98	15760-19700	288

Çizelge 2. Mühendislik amaçlı termoplastiklerin bazı özellikleri [1]

Malzeme	Yoğunluk	Çekme Dayanımı	Darbe Dayanımı	Dielektrik Gücü	Maksimum Kullanım Sıcaklığı (Yüksüz)
	(g/cm ³)	(MPa)	(J/m)	(V/mm)	(°C)
Naylon 6.6	1,13-1,15	62,1-82,8	106,76	15169	82-150
Poliasetat	1,42	69	74,73	12608	90
Polikarbonat	1,2	62,1	640,56-854,08	14972	120
Polyester (PET)	1,37	71,7	42,7		80
Polyester (PBT)	1,31	55,2-56,5	64,05-69,39	23246-27580	120
Polifenilen oksit	1,06-1,10	53,8-66,2	266,9	15760-19700	80-105
Polisülfon	1,24	70,3	64,05	16745	150

3. Yorulma Davranışı

Yorulma, değişken gerilme ve şekil değiştirme altındaki malzemelerdeki her geçen döngüde hasar biriktirme işlemi olarak tanımlanır. Yorulmanın en önemli özelliği, yükün ani bir arızaya neden olacak kadar büyük olmamasıdır. Yorulma çatlakları genellikle bir bileşenin, kristalografik kayma düzlemlerinde kesme çatlaklarının başladığı yorulma hasarının olduğu yüzeyden başlar. Daha sonra çatlaklar ilerleyerek yorulma kırılmasının oluşmasına neden olur. Mühendisliğin bütün alanlarında birçok mekanik hasar gerçekleşmektedir. Yorulmadan kaynaklanan hasarlar, örneğin tekrarlanan yüklemeler, multidisipliner ve çok yaygın mekanik hasarlardır. Yorulma davranışı ve yorulma tasarım prensipleri, Wöhler'in ilk çalışmasından beri yaklaşık 150 yıldır açık ve kesin olarak belirtilmektedir. Bu prensipler, pek çok yerde ve disiplinde bilim adamları tarafından geliştirilmiş, kullanılmış ve test edilmiştir. Günümüzde ise gelişmiş olanaklarla birlikte incelenmeye devam edilmektedir. [8,21,22]

3.1. Yorulmanın Temel Prensipleri

Yorulma olayının açıklanmasında kullanılan temel prensipler aşağıda belirtilmiştir:

- **Stres Konsantrasyonu:** Malzemenin veya yapının belirli bölgelerinde stres konsantrasyonları oluşabilir. Bu bölgelerde gerilme yoğunluğu daha yüksektir ve çatlakların başlamasına yol açabilir.
- **Gerilme Döngüleri:** Yorulma çatlakları, gerilme dalgalanmalarının tekrarlanmasına bağlı olarak büyür. Her gerilme döngüsü, çatlak büyümesine katkıda bulunabilir.
- **Çatlak Büyüme Hızı:** Çatlak büyüme hızı, malzemenin özelliklerine, stres düzeyine ve çevresel faktörlere bağlıdır. Bu hız, yorulma mukavemetini etkiler.
- **Ömür Tahmini:** Yorulma ömrü, yorulma testleri ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilebilir. Bu, mühendislerin yapıların veya malzemelerin ne kadar süre dayanabileceğini değerlendirmelerine yardımcı olur.

3.2. Yorulma Mekanizmaları

Yorulma, çeşitli mekanizmalar tarafından tetiklenebilir. Bunlar şunları içerir:

3.2.1. Kırılma Yorulması (Crack Growth Fatigue)

Yorulma çatlaklarının başlangıcı, malzemenin yüzeyinde meydana gelir ve zaman içinde büyüyerek malzeme içinde ilerler. Bu, gerilme dalgalanmalarının tekrarlanması ve malzeme içinde gerilme yoğunluğunun odaklanmasından kaynaklanır.

3.2.2. Yüzey Yorulması (Surface Fatigue)

Malzemenin yüzeyinin yorulması, sürtünme, aşındırma veya çizilme gibi dış etkenlere maruz kaldığında meydana gelir. Bu, malzemenin yüzeyinin yıpranması ve nihayetinde çatlamaıyla sonuçlanır.

3.2.3. Yorulma Kırılması (Fatigue Fracture)

Yorulma kırılması, malzemenin veya yapının yorulma altındayken çatlayarak kırılması durumunu ifade eder.

3.3. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

Yorulma, tekrarlanan yüklemeye maruz kalan bir bileşenin zarar görmesine neden olan bir olaydır. Periyodik yüklemeye maruz kalan parçaların mukavemeti azalır ve bu olay sonunda malzemenin kopma ve akma sınırlarının çok altında bile hasar meydana gelebilir. Yorulma olayı

farklı faktörlerin rol oynadığı bir olaydır. Mikroskobik seviyede doğru şekilde tanımlanması ve modellenmesi zor olan karmaşık bir metalürjik işlem olup yapıların ya da bileşenlerinin tasarımları için yorulma hasarı değerlendirmesi mutlaka yapılmalıdır. Bu değerlendirme sentez, analiz ve testi içermelidir. [27,28,29]

Günümüzde tasarım aşamasında bilgisayar destekli analizlerden faydalanılmaktadır. Fakat bu analizlerle sıcaklık, korozyon, artık gerilmeler gibi faktörler incelenememektedir. Bu nedenle yapılan analizler test sonuçları ile doğrulanmalıdır. Çalışma durumunda bileşenlerin yorulma performansını etkileyen birçok etken vardır. Yorulma mukavemetine etkileyen faktörler, temel faktörler ve ek faktörler olarak başlıca iki grupta incelenebilir.[8,21,22]

a) Temel faktörler

- Yeterince yüksek değerlere sahip maksimum çeki gerilmesi
- Uygulanan gerilmenin büyük miktarda değişmesi
- Uygulanan gerilmenin çok sayıda tekrar edilmesi

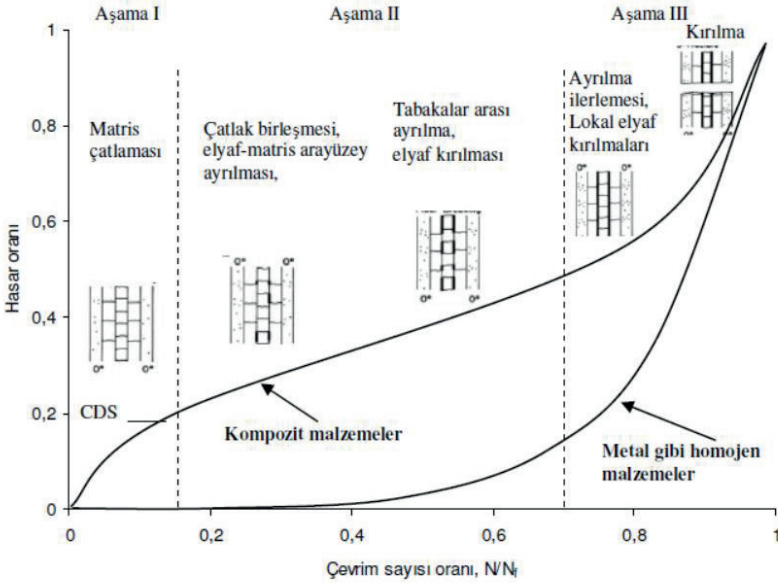
b) İlave Faktörler

- Sıcaklık
- Korozyon
- Mikro Yapı
- Yüzey İşleme Kalitesi
- Çentik Etkisi
- Soğuk Deformasyon

3.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma

Tekrarlı yükler altındaki malzemeler, uygulanan yüke karşılık malzemenin güvenli gerilme sınırının altındaki gerilmelere maruz kalsa da; uygulanan yükün tekrarlı dinamik karakterine bağlı olarak başlayan çatlak oluşumu ve ilerlemesi, malzemede meydana gelen yorulma hasarlarının başlıca nedenidir. Sürekli elyaf polimerik kompozitler, elyaflar doğrultusunda, metallerle karşılaştırıldığında üstün performans göstermektedir. Fakat, kompozit malzemeler anizotrop ve heterojen özelliklerinden ötürü homojen ve izotrop malzemelerden daha karmaşık elyaf uyumları ve yükleme yönüne göre hasar mekanizmalarında değişik özellikler sergilemektedir.[9,10,13,21]

Şekil 2’de, kompozit ve metal malzemeler için yorulma ömrü süresince meydana gelen hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü süresince meydana gelen hasar çeşitleri şematik olarak gösterilmektedir.



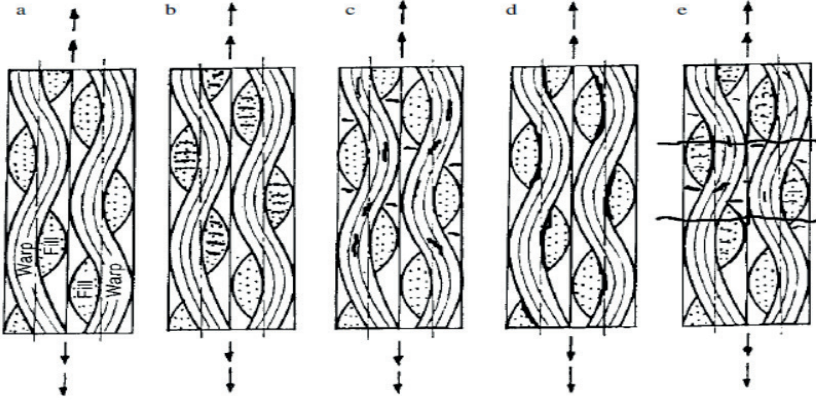
Şekil 2. Kompozit malzemeler ve metal gibi homojen malzemeler için yorulma ömrü boyunca oluşan hasar miktarı/boyutu ve kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca oluşan hasar tipleri [9]

Metal parçalarda yorulma hasarları, ilk olarak düşük hızda ortaya çıkıp daha sonra genel olarak tek bir çatlak biçiminde çevrimsel yüklemeye eksenine dik olarak ilerlemektedir. Kompozit malzemelerde ise ilk olarak çeşitli hasar tipleri (elyaf kırılması, matris çatlama, tabaka ayrılması, elyaf-matriks ara yüzey ayrılması vb.) daha hızlı bir biçimde meydana gelmekte ve bu hasarlara parçanın bütününde rastlanabilmektedir.

Hasar oluşumu, kompozit malzemelerde yorulma ömrünün bir işlevi olarak üç farklı fazda incelenmektedir: İlki daha çok matriks çatlaklarından meydana gelen hasar, yorulma ömrünün yaklaşık %10-25’inde oluşmaktadır. Bu süreçte malzeme mukavemetindeki düşüş göz ardı edilebilir seviyede azdır. Fakat, rijitlik azalması, malzeme rijitliğinin yaklaşık %8’i düzeyindedir. Süregelen yük çevrimlerinde oluşacak hasar süreci ilk olarak oluşan bu matriks çatlaklarına bağlıdır. İkinci aşamada, elyaf matris ara yüzey ayrılması, tabakalar arası ayrılma başlangıcı, çatlakların birleşmesi ve elyaf kırılması gibi

birçok sayıda hasar çeşidi oluşmaktadır. Bu evrede hasarların oluşumu ve ilerlemesi ilk aşamaya nazaran çok yavaştır ve yorulma ömrünün yaklaşık %70-80'i harcanmaktadır. Son aşamada ise tabaka ayrılmaları ve elyaf kırılmalarının meydana geldiği üçüncü aşamadır. Hasar bu bölümde hızlı bir biçimde ilerlemekte ve parça kırılmaktadır. [9,26,28]

Çevrimsel yükleme esnasında dokuma kumaş kompozitlerde hasar oluşum sırası Şekil 3'te gösterilmiştir. Dokuma kumaş kompozitler, enine elyaf demeti, boyuna elyaf demeti ve reçine zengin alan olarak isimlendirilen 3 yapısal eleman ihtiva etmektedir. Çevrimsel yükleme esnasında reçine zengin alanlarda enine çatlaklar, enine elyaf demetinde (weft) çatlak meydana gelmesi, boyuna elyaf demetinde (warp) kesme hasarları, tabakalar arası ayrılma, enine ve boyuna elyaf demeti arasında ayrılma, elyaf demetlerinin kopması ve son olarak kırılma oluşmaktadır. [10,11,12]



Şekil 3. Çevrimsel yükleme sırasında dokuma kumaş kompozitlerde oluşan hasarlar; a) test başlangıcı (hasarsız), b) enine elyaf demetinde (weft) çatlak oluşumu, c) boyuna elyaf demetinde (warp) kesme hasarları ve reçine zengin bölgelerde enine çatlaklar, d) enine ve boyuna elyaf demeti arasında ayrılma, e) tabakalar arası ayrılma ilerlemesi ve elyaf demetlerinin kopması [10].

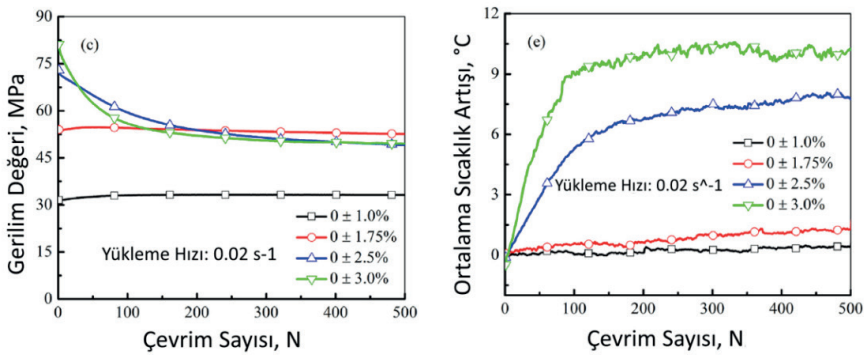
3.5. Döngüsel Yüklemler Altında Polimer Matrisli Kompozitlerin Yorulma Davranışı

Döngüsel yüklemeler altında polimer matrisli kompozitlerde yorulma davranışı sırasında parça içinde bir ısı oluşur ve buna self-heating (kendi kendini ısıtma) denilir. Bu ısı sürekli çalışma sırasında parçayı ısıtarak parçanın yorulma ömrünü olumsuz etkiler. Self-heating (kendi kendini ısıtma) etkileyen faktörler ise;

- ✓ S-N (Stress-Number of cycles)
- ✓ Histerezis döngüsü (Histeretik ısınma)
- ✓ Fiber-matris arasındaki iç sürtünme

3.5.1. S-N Eğrisi

Döngüsel deformasyon sırasında, polimerin viskozitesinden dolayı önemli bir içsel ısı üretimi meydana gelebilir ve bu, yükleme frekansı veya yükleme hızı yeterince yüksekse polimerde bir sıcaklık artışına neden olur (Şekil 4).



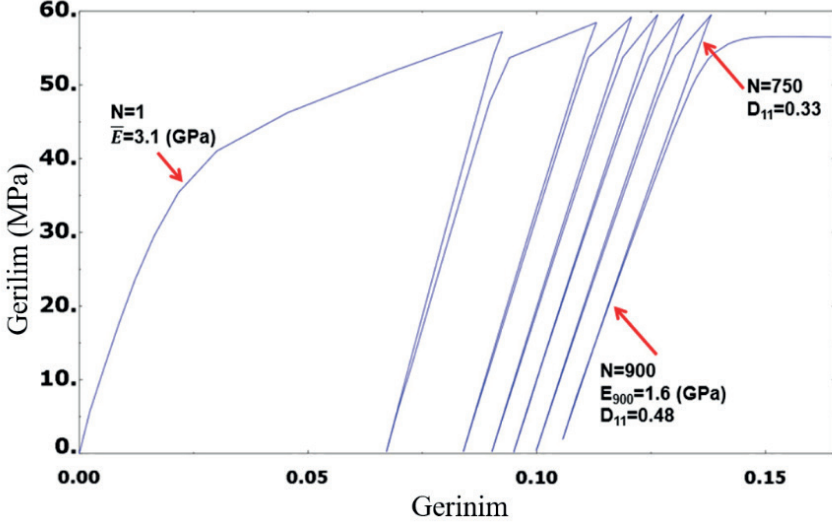
Şekil 4. Farklı gerilim genliklerinde S-N grafiği ve sıcaklık artışı [13]

Malzemenin ısınmasını engellemek için; yükleme modu, yükleme seviyesi, yükleme hızı (yükleme frekansı), döngü sıklığı değiştirilmesi şeklinde çalışmalar yapılmıştır.[13,14,15]

3.5.2. Histerezis Döngüsü

Gerilim ve gerinim arasındaki faz gecikmesinin bir sonucu olarak her döngü sırasında bir histeretik döngü oluşturulur. Döngü içinde bulunan mekanik enerji kısmen mikro yapıya depolanır ve kısmen ısı olarak dağılır. Bir döngü sırasında malzeme tarafından absorbe edilen toplam iş W , gerilim-gerinim eğrisindeki histerezisten belirlenebilir (Şekil 5).

Döngüsel yüklemeye tabi tutulan polimerlerin, yükleme ilerledikçe kendi kendine (histeretik) ısınma geliştirmesinin nedeni, malzemenin ister elastik ister plastik olsun, viskoz yapısıdır. Tipik olarak, gerilimler ve gerinim aynı fazda değildir, bu nedenle kapalı bir döngü üzerinde bir histerezis döngüsü oluşturur. Döngü içinde bulunan mekanik enerjinin bir kısmı modifiye edilmiş mikro yapıya depolanırken kalan kısmı ısı olarak salınır.[18,19]



Şekil 5. Gerilim kontrollü tek eksenli dögüsel yükleye altında histerezis eğrilerinin evrimi [18]

3.5.3. Moleküler İç Sürtünme (MIF)

Saf termoplastikler için, sıcaklık artışı yalnızca matristeki histerezis ısınmasından kaynaklanır. Güçlendirilmiş termoplastikler için, fiberlerin ve fiber-matris arayüzlerinin varlığı, fiber uçlarındaki stres konsantrasyonu etkisi ve fiber ile matris arasındaki sürtünme nedeniyle kompozitlerde üretilen ısıyı artırır. Sabit bir malzeme hacminde, düşük sayıda ortalama lif uzunluğuna sahip bir kompozit, yüksek sayıda ortalama lif uzunluğuna sahip bir kompozit ile karşılaştırıldığında daha fazla sayıda lif ucuna sahiptir. Sonuç olarak, lif uzunluğu daha kısa olan kompozitte, lif uzunluğu daha uzun olan kompozite göre sürtünme ısınmasından dolayı daha yüksek sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. [19,20]

3.5.3.1. Termoplastik Malzemelerde Moleküler İç Sürtünme

Moleküler iç sürtünme, dögüsel yüke maruz kaldığında termoplastik malzemelerin moleküler yapısında meydana gelen enerji dağılımını ifade eder. Polimer zincirleri ile malzemenin diğer bileşenleri arasındaki etkileşimlerden kaynaklanır, bu da ısı oluşumuna ve potansiyel malzeme bozulmasına neden olur. [21,22]

3.5.3.2. Moleküler İç Sürtünmenin Termoplastik Malzemelerin Yorulma Ömrüne Etkisi

Moleküler iç sürtünme, termoplastik malzemelerin yorulma ömrünün belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Daha yüksek iç sürtünme seviyeleri, döngüsel yüklenme sırasında artan enerji kaybına yol açarak zarar verici stres ve gerilme birikimini azaltabilir. Bu ilişkiyi anlamak, araştırmacıların gelişmiş yorulma direncine ve daha uzun çalışma ömrüne sahip termoplastikler tasarlamasına olanak tanır. [21,22]

3.5.3.3. Termoplastik Malzemelerde Moleküler İç Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Evet, termoplastik malzemelerde moleküler iç sürtünmeyi çeşitli faktörler etkileyebilir. Bunlar, polimerin moleküler ağırlığını, kristallik derecesini, sıcaklığı ve katkı maddelerinin veya dolgu maddelerinin varlığını içerir. Araştırmacılar, bu faktörleri manipüle ederek iç sürtünmeyi modüle edebilir ve ardından termoplastik malzemelerin yorulma direncini artırabilir. [21,22]

3.5.3.4. Moleküler İç Sürtünme ile Yorulma Ömrü Arasındaki İlişkinin Nicel Olarak Ölçülmesi

Termoplastik malzemelerde moleküler iç sürtünme ve yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi ölçmek için deneysel yöntemler geliştirildi. Dinamik mekanik analiz (DMA) ve yorulma testi gibi teknikler, malzemenin mekanik özelliklerini ölçmek, iç sürtünme davranışını belirlemek ve çeşitli döngüsel yüklenme koşulları altında yorulma ömrünü değerlendirmek için kullanılabilir. Bu nicel ölçümler, termoplastik malzemelerin performansını anlamak ve optimize etmek için değerli veriler sağlar. [21,22]

3.6. Yorulmaya Dayanıklı Termoplastik Malzemelerin Tasarımı ve Geleceği

Malzeme bilimcileri, iç sürtünmenin neden olduğu enerji dağılımını en aza indirerek, malzemenin döngüsel yüklemeye dayanma yeteneğini artırabilir ve yorulma ömrünü uzatabilir.

Farklı katkı maddelerini, polimer yapılarını ve işleme tekniklerini keşfetmek, moleküler iç sürtünmeyi azaltmaya ve termoplastik malzemelerin yorulma direncini artırmaya yardımcı olabilir. Optimize edilmiş moleküler düzenlemelere ve daha düşük iç sürtünme özelliklerine sahip malzemeler tasarlamak, uzun ömürlü ve güvenilir ürünler geliştirmede hayati önem taşıyacaktır. [21,22]

Geleceğe baktığımızda, gelişmiş yorulma direncine sahip termoplastik malzemeler tasarlamak için umut verici stratejiler ortaya çıkmaktadır. Karbon nanotüpler veya cam elyaflar gibi takviye edici dolgu maddelerinin polimer matrisine dahil edilmesi, malzemenin mekanik özelliklerini ve dolayısıyla yorulma performansını iyileştirebilir.

Ek olarak, eriyik karıştırma ve kockstrüzyon gibi gelişmiş işleme teknikleri, özel moleküler yapılar ve azaltılmış iç sürtünmeye sahip malzemelerin üretilmesine yardımcı olabilir. Bu teknikler, diğer arzu edilen özelliklerden ödün vermeden gelişmiş yorulma direnci sergileyen termoplastik malzemeler oluşturmak için fırsatlar sunar.

Araştırmacılar, moleküler iç sürtünme ve yorulma ömrü arasındaki ilişkiye dair anlayışımızı derinleştirmeye devam ederek, daha dayanıklı, güvenilir ve yorulmaya dayanıklı termoplastik malzemelerin geliştirilmesinin önünü açabilirler. Bu da çeşitli endüstrilerde çok sayıda ürün ve uygulamanın performansının ve uzun ömürlülüğünün iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Genel olarak, termoplastik kompozit malzemelerde moleküler iç sürtünme ile yorulma ömrü arasında güçlü bir ilişki vardır. Nano katkı maddeleri, MIF'yi azaltarak termoplastik kompozit malzemelerin yorulma ömrünü uzatmak için kullanılabilir. Nano katkı maddeleri, MIF'yi azaltmak için aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli şekillerde hareket edebilir:

- Matrisin sertliğinin artırılması
- Matris ve takviye lifleri arasındaki arayüzey yapışmasının artırılması
- Serbest radikalleri temizlemek
- Nem ve diğer zararlı maddelerin yayılmasına karşı bir bariyer sağlamak

Bir dizi çalışma, nano katkı maddelerinin termoplastik kompozit malzemelerin yorulma ömrünü iyileştirmede etkili olabileceğini göstermiştir. Örneğin, bir çalışma, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitine karbon nanotüplerin eklenmesinin yorulma ömründe %50'lik bir artışa yol açtığını göstermiştir. [27]

Başka bir çalışma, karbon fiber takviyeli bir polikarbonat kompozitine grafen nanoplatelet eklenmesinin yorulma ömründe %30'luk bir artışa yol açtığını göstermektedir. [28,29]

Termoplastik kompozit malzemelerin yorulma ömrünü artırmak için nano katkı maddelerinin kullanılması umut verici yeni bir araştırma alanıdır. Bununla birlikte, belirli uygulamalar için nano katkı sistemleri geliştirmek

ve optimize etmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Termoplastik kompozit malzemelerin yorulma ömrünü iyileştirmek için nano katkı maddelerinin nasıl kullanılabileceğine dair bazı örnekler:

- Karbon nanotüpler, epoksi matrislerin sertliğini ve arayüzey yapışmasını artırmak için kullanılabilir. Bu, MIF'de bir azalmaya ve yorulma ömründe bir artışa yol açabilir.
- Grafen nanoplateletler, polikarbonat matrislerin sertliğini ve arayüzey yapışmasını artırmak için kullanılabilir. Bu aynı zamanda MIF'de bir azalmaya ve yorulma ömründe bir artışa yol açabilir.
- Silika nanopartikülleri, serbest radikalleri temizlemek ve nem ve diğer zararlı maddelerin difüzyonuna karşı bir bariyer sağlamak için kullanılabilir. Bu, MIF'yi azaltmaya ve yorulma ömrünü iyileştirmeye yardımcı olabilir.

Sonuç olarak, moleküler iç sürtünmenin ve bunun termoplastik malzemelerde yorulma ömrü ile ilişkisinin incelenmesi, malzeme bozunma ve kırılma mekanizmaları hakkında değerli bilgiler sağlar. Araştırmacılar ve mühendisler, moleküler iç sürtünmenin etkilerini anlayarak ve kullanarak, daha uzun ömürlü ve daha güvenilir bileşenlere yol açan, gelişmiş yorulma direncine sahip termoplastikler tasarlayabilir. Bu ilişkinin daha fazla araştırılması, gelişmiş deneysel tekniklerin geliştirilmesiyle birlikte, çeşitli uygulamalar için termoplastik malzemelerin gelecekteki tasarımı ve optimizasyonu için umut vaat etmektedir. Bu alanda devam eden araştırmalarla, modern endüstrilerin taleplerini karşılayan daha güvenli ve daha dayanıklı ürünlerin önünü açabiliriz. [21,22,28,29]

Teşekkür

Bu çalışma, TÜbitak-Teydeb 1505 programı tarafından desteklenen 5220011 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, verdiği destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür etmektedir.

KAYNAKÇA

- [1]. Hayırkuş, A.(2021). Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzeme Esaslı Çok Hafif Sandviç Plakların Sonlu Elemanlar Analiz Yöntemi Ve Deneysel Olarak İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [2]. Özer, H. (2015). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [3]. Asi, D. (2008). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performanslarının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [4]. İşlek, H. İ. (2020). Takviye Nedir?. Erişim adresi: <http://kompozithayalleri.com/takviye-nedir/>
- [5]. Beşergil, B. (2016). Kompozitler. Erişim adresi: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/kompozitler_18.html
- [6]. Türkoğlu, İ. K. (2020). 3boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrilik Sandviç Yapıların Statik Ve Dinamik Yükler Altında Davranışının İncelenmesi (Doktora tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [7]. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit Malzemeler ve Özellikleri. Erişim: <https://abs.mehmetakif.edu.tr>
- [8]. Zerkin, D. (2019). Binek Araçlardaki Rot Başlarında Yorulma Davranışının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [9]. İmak, A. (2015). Tabakalı Hibrit Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışlarının Analizi (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [10]. Karcı, A. (2009). Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran,2009 Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr>
- [11]. Naik, N.K., “Woven-fibre thermoset composites,” Fatigue in Composites- Science and Technology of The Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics, (Ed: Harris, B.), CRC press, 296-313, 2003.
- [12]. Gdoutos, E.E., Pilakoutas, K., & Rodopoulos, C.,A., (2000). “Failure analysis of industrial composite materials”, New York :McGraw-Hill.
- [13]. Chen, Kaijuan, Guozheng Kang, Fucong Lu, Jia Chen, ve Han Jiangb. “Effect of relative humidity on uniaxial cyclic softening/hardening and intrinsic heat generation of polyamide-6 polymer.” *Polymer Testing*, 2016: 19-28.

- [14]. Mortazavian, Seyyedvahid, ve Ali Fatemi. “Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: A literature review”. *International Journal of Fatigue*, 2015: 297-321.
- [15]. Almajid, Klaus Friedrich. «Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications.» *Applied Composite Materials*, 2012: 107-128.
- [16]. K.Shojaei, Amir, ve Pieter Volgers. «Fatigue damage assessment of unfilled polymers including self-heating effects.» *International Journal of Fatigue*, 2017: 367-376.
- [17]. Moisa, S., G. Landsberg, D. Rittel, ve J.L. Halary. “Hysteretic thermal behavior of amorphous semi-aromatic polyamides”. *Polymer*, 2005: 11870-11875.
- [18]. Rittel, D., N. Eliash, ve J.L. Halary. “Hysteretic heating of modified poly(methylmethacrylate)”. *Polymer*, 2005: 2817-2822.
- [19]. Shojaei, Amir K., ve Pieter Volgers. “Fatigue damage assessment of unfilled polymers including self-heating effects”. *International Journal of Fatigue*, 2017: 367-376.
- [20]. Steinberger, R., T. I. Valadas Leitão, E. Ladstätter, G. Pinter, W. Billinger, ve R.W. Lang. “Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing”. *International Journal of Fatigue*, 2006: 1340-1347.
- [21]. Fatemi, A., Mortazaviana, S., Khosrovaneh, A. “Fatigue behavior and predictive modeling of short fiber thermoplastic composites”. 6th Fatigue Design Conference, Fatigue Design 2015.
- [22]. Katunin, A. “Thermal fatigue of polymeric composites under repeated loading”. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31(15) 1037-1044
- [23]. Sommer, J., Hajikazemi, M., De Baere, I., Van Paepegem, W. “Experimental and numerical fatigue damage characterization in multidirectional thermoplastic glass/polypropylene laminates based on in-situ damage observations” *Composites Part B*, 2023.
- [24]. Sioutis, I., Tserpes, K. “A mixed-mode fatigue crack growth model for co-consolidated thermoplastic joints”. *International Journal of Fatigue*, 2023.
- [25]. Almushaikeh, A., Alaswad, S., Alshuhbani, M. “Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review”. *Polymer Testing*, 2023.
- [26]. Sharma, A., C. Joshi, S. “Enhancement in fatigue performance of FRP composites with various fillers: A review”. *Composite Structures*, 2023.
- [27]. Ding, J., Cheng, L., Chen, X., Chen, C., Liu, K. “A review on ultra-high cycle fatigue of CFRP”. *Composite Structures*, 2020.

- [27]. Brüll, R., Gries, T. “Using Nanoscale Fillers To Improve The Thermal Properties Of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites Regarding Processing Times” 2. Lehrstuhl für Innovation, Strategie und Organisation (ISO) der RWTH Aachen University Conference, 2015.
- [28]. Shokrieh, MM ; Esmkhani, M .; Şahverdi, HR ; Vahedi, F “Effect of Graphene Nanosheets (GNS) and Graphite Nanoplatelets (GNP) on the Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites”. Science of Advanced Materials, Volume 5, Number 3, March 2013
- [29]. Zanjani, J.S.M.; Okan, B.S.; Pappas, P-N.; Galiotis, C.; Menciloglu, Y.Z.; Yildiz, M. “Tailoring viscoelastic response, self-heating and deicing properties of carbon-fiber reinforced epoxy composites by graphene modification”. Compos. Part A 2018, 106, 1–10.

