

**Atf İçin:** Oğuz ZA, 2021. Hidrotermal Olarak Yaşlandırılmış Hibrit Aramid/Cam/Epoksi Kompozitlerin Su Emme Davranışlarının İncelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 2255-2267

**To Cite:** Oğuz ZA, 2021. Investigation of the Water Absorption Behavior of Hydrothermally Aged Hybrid Aramid/Glass/Epoxy Composites. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(3): 2255-2267

## Hidrotermal Olarak Yaşlandırılmış Hibrit Aramid/Cam/Epoksi Kompozitlerin Su Emme Davranışlarının İncelenmesi

Zeynal Abidin OĞUZ<sup>1\*</sup>, Ahmet ERKLİĞ<sup>2</sup>

**ÖZET:** Bu çalışmada hidrotermal yaşlanmaya maruz bırakılan hibrit aramid/cam/epoksi kompozit numunelerinin su emilim davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARIM) ile üretilen kompozit numuneler saf su ve deniz suyunda 25°C ve 70°C sıcaklıkta 1000 saat boyunca kontrol edilebilir bir yaşlandırma kabini içinde bekletilmiştir. Farklı uzunluk genişlik<sup>-1</sup> (L w<sup>-1</sup>) oranlarında, 10 ve 15, hazırlanan hibrit kompozitlerin su emilim özellikleri su tipi, sıcaklık ve kompozit katman dizilimi gibi faktörlere göre değerlendirilmiştir. Hibrit kompozit numunelerin su emilim sonuçları, sıcaklığın su emiliminde etkili olduğunu, sıcaklık artışının daha fazla su emilimine neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca, her iki sıcaklıkta saf su ile kıyaslandığında, deniz suyunda yaşlandırılan numuneler genellikle daha fazla su emmiştir. Su alım deneyleri, hibrit kompozit numunelerde katman dizilim şeklinin maksimum su alım oranında son derece etkili olduğunu göstermiştir. Numunelerin L w<sup>-1</sup> oranının artması her iki sıcaklık ve su tipinde de daha fazla su emilimine sebep olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrotermal Yaşlanma, Saf Su, Deniz Suyu, Hibrit Kompozit, Cam, Aramid

### Investigation of the Water Absorption Behavior of Hydrothermally Aged Hybrid Aramid/Glass/Epoxy Composites

**ABSTRACT:** In this study, water absorption behaviors of hybrid aramid/glass/epoxy composite samples exposed to hydrothermal aging were experimentally investigated. Composite samples produced by vacuum assisted resin infusion method (VARIM) were kept in distilled water and sea water at 25°C and 70°C for 1000 hours in a controllable aging cabin. The water absorption properties of hybrid composites prepared at different length width-1 (L w-1) ratios, 10 and 15, were evaluated according to factors such as water type, temperature and composite layer sequence. The water absorption results of the hybrid composite samples showed that temperature is effective in water absorption and the increase in temperature causes more water absorption. Also, samples aged in seawater generally absorbed more water than distilled water at both temperatures. Water intake experiments have shown that the stacking sequence of composites is extremely effective at the maximum water intake ratio in hybrid composite samples. It has been determined that the increase in the L w-1 ratio of the samples causes more water absorption in both temperatures and water types.

**Keywords:** Hydrothermal Aging, Distilled Water, Sea Water, Hybrid Composite, Glass, Aramid

<sup>1</sup>Zeynal Abidin OĞUZ ([Orcid ID: 0000-0002-8566-2331](https://orcid.org/0000-0002-8566-2331)), Devlet Su İşleri 203. Şube Müdürlüğü, Adıyaman

<sup>2</sup> Ahmet ERKLİĞ ([Orcid ID 0000-0003-3906-3415](https://orcid.org/0000-0003-3906-3415)), Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Zeynal Abidin OĞUZ, e-mail: oguzeynal02@gmail.com

## GİRİŞ

Polimer tabanlı kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre yüksek mukavemet, hafiflik, korozyona karşı mükemmel direnç, titreşim sönümlenme gibi üstün özellikleri nedeniyle ileri mühendislik alanlarından günlük kullanım gibi çok geniş alanlarda tercih edilmektedir, (Ramesh ve ark., 2013; Durgun ve ark., 2014; Jesthi ve Nayak, 2019; Özbek ve ark., 2020; Özbek, 2021). Doğal kompozitlerin yanı sıra üstün mekanik özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında kullanılan cam, aramid, karbon ve bazalt gibi malzemeler sentetik kompozitlere örnek verilebilir. Sentetik kompozitler tek başlarına kullanıldığı gibi hibrit halinde de kullanılmaktadır. Hibrit fiber kompozitler, daha iyi özelliklere sahip bir kompozit elde etmek için bir matris ile iki veya daha fazla farklı fiberden oluşur. Birçok araştırmacı, malzemenin mekanik performansının fiber hibridizasyonu ve matris modifikasyonu ile önemli ölçüde iyileştirildiğini belirtmiştir, (Doğan ve ark., 2019; Erklığ ve Doğan, 2020).

Mekanik özellikleri diğer malzeme sınıflarından üstün olmakla birlikte, polimer kompozitlerin nem ve su emilimi mekanik özelliklerinin ve fiber/matris ara yüzeyinin bozulmasına neden olur. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin farklı çevre koşullarından nasıl etkilendiğini görmek amacıyla yapılan literatürdeki çalışmaların çoğunda su emme eğilimleri incelenmiştir.

Tanaka ve ark. (2002) aramid/epoksi kompozitlerin hidrotermal yaşlanmanın ara yüzey yapışma davranışına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, aramid/epoksi numuneler 4, 7, 10 ve 13 hafta boyunca 80°C sıcaklıkta saf suda yaşlandırılmıştır. İlk 4 hafta numunelerde hızlı bir su emilimi gözlenmiş ve numunelerdeki su emilimi 10. haftaya kadar devam etmiş, 10-13 haftaları arasında numunelerin ağırlığında bir değişim olmadığı görülmüştür. Aramid/epoksi kompozitlerin su alım oranları 4, 7, 10 ve 13 haftalık yaşlandırma döneminden sonra sırasıyla %1.9, %2.0, %2.1 ve %2.1 olarak bulunmuştur.

Wan ve ark. (2006) hibrit olmayan Kevlar/epoksi, karbon/epoksi ve hibrit Kevlar/karbon/epoksi kompozitlerin yaşlanma sonrası eğilme davranışları üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Tüm numuneler Hank'ın dengeli tuz çözeltisinde 37°C sıcaklıkta 1700 saat boyunca yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Araştırma sonunda, hibrit ve hibrit olmayan numunelerin Fickian difüzyon karakteri sergilediği bulunmuştur. En yüksek su emme oranı %2.18 ile hibrit olmayan Kevlar/epoksi kompozit grubunda görülmüştür. Ayrıca, hibrit olmayan Kevlar/epoksi numunelerinin toplam su alım oranı, hibrit olmayan karbon/epoksi ve hibrit karbon/ Kevlar/epoksi numunelerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Poodts ve ark. (2013) deniz suyunun cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin yarı statik ve yorulma davranışına etkisini araştırmıştır. Kompozit numuneler deniz suyunda 15°C sıcaklıkta 22 hafta boyunca yaşlandırılmıştır. 22 hafta sonunda maksimum su alım oranı %0.35 olarak tespit edilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmalara ile kıyasla su alım oranının düşük olması ortam sıcaklığının düşük olması ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, su emilim grafiği deneysel ağırlık ölçüm sonuçlarının Fick modeli ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

Larbi ve ark. (2016) cam/vinil ester kompozitlerin su emme davranışı üzerindeki deniz suyu ve damıtılmış suyun yaşlanma etkisini incelemiştir. Kompozit numuneler her iki su türünde 40°C'de 3000 saat boyunca yaşlandırılmıştır. Deniz suyunda yaşlandırılan kompozitlerin suyu emme oranının damıtılmış suda yaşlandırılan kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin maksimum su kazanım oranları, deniz suyu ve damıtılmış su yaşlandırması için sırasıyla yaklaşık %1.3 ve %0.8 olarak bulunmuştur.

Mourad ve ark. (2010) farklı reçine sistemleri kullanarak deniz suyunun cam kompozitler üzerindeki hidrotermal yaşlanma etkisini değerlendirmiştir. Cam/epoksi ve cam/poliüretan kompozit

numuneleri deniz suyunda oda sıcaklığında ve 65°C sıcaklıkta 12 ay boyunca yaşlanmaya tabi tutulmuştur. Yaşlanma süresinin artmasıyla her iki kompozit sistemin su emme oranının arttığı bildirilmiştir. Oda sıcaklığında ve 65°C sıcaklıkta yaşlandırılan cam/epoksi kompozitler için maksimum su kazanım oranları sırasıyla %2.5 ve % 5 olarak bulunmuştur. Ayrıca oda sıcaklığında ve 65°C sıcaklıkta yaşlandırılan cam/poliüretan kompozitler için maksimum su alım oranları sırasıyla %3.2 ve % 4.7 olarak bulunmuştur.

Salleh ve ark. (2012) hibrit kenaf/cam kompozitlerin su emilim karakterini ve kırılma tokluğunu araştırmıştır. Hibrit kompozitler yağmur suyunda, saf suda ve deniz suyunda oda sıcaklığında 4 hafta boyunca bekletilmiştir. Hibrit kompozitler maksimum ağırlıklarına 3 haftalık yaşlandırma sonrası ulaştığı tespit edilmiştir. Kenaf/cam kompozitlerin maksimum nem oranları 3 haftalık yaşlanma sonrası yağmur suyu, saf su ve deniz suyu için sırasıyla %10.95, %9.99 ve %9.01 olarak rapor edilmiştir. Ayrıca, 3 haftalık yaşlanma periyodu sonrası tüm yaşlandırma ortamları için numunelerde su kaybı tespit edilmiştir.

Wang ve ark. (2020) hidrotermal olarak yaşlandırılmış hibrit keten/karbon epoksi kompozitlerin yaşlanma parametrelerini incelemiştir. Numuneler, 6 hafta boyunca % 80 bağıl nem oranında 40°C ve 70°C sıcaklıklarda potasyum bromür solüsyonuna tutulmuştur. Hibrit olmayan keten/epoksi kompozitler, 40°C ve 70°C sıcaklıkta sırasıyla %4.02 ve %4.5 ile her iki sıcaklık için en yüksek absorpsiyon oranlarını göstermiştir. Hibrit numunelerin su emme oranlarının hibrit olmayan keten numunelerine göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hibrit kompozitlerde, karbon kumaşlar dışarıya yerleştirildiğinde, numunelerin daha az su emdiği gözlenmiştir. 40°C ve 70°C sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit kompozitlerin maksimum su emme oranları sırasıyla, karbon kumaşlar hibrit konfigürasyonunda dış yüzeydeyken %2.26 ve %2.68, karbon kumaşlar hibrit konfigürasyonunda merkezdeyken %2.35 ve %3.06 olarak ölçülmüştür. Ayrıca keten kumaşlar dışarıya yerleştirildiğinde hibrit kompozitlerin difüzyon katsayılarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Aquino ve ark. (2007) hibrit jüt/cam kompozitlerin gerilme tepkisi üzerindeki su emme etkisini incelemiştir. Hibrit numuneler, doymunluk elde edilene kadar damıtılmış suda yaşlandırılmıştır. Numuneler ilk 30 günde hızlı bir su emilimi gerçekleştirmiş, sonrasında ise bu hız düşmeye başlamıştır. Hibrit kompozitlerin %7.64 su kazanım oranıyla 330 günde doymun hale ulaştığı tespit edilmiştir. Yazarlar, su kazanım oranının yüksekliğini hibrit kompozit içerisindeki jüt kumaşların varlığı ile ilişkilendirmiştir.

Gupta ve Deep (2018) su emme ve kompozit kumaş diziliminin hibrit sisal/cam elyaf takviyeli polyester kompozit özelliklerine etkisini incelemiştir. Hibrit olmayan sisal/polyester ve farklı dizilimlere sahip hibrit sisal/cam/polyester numuneler arıtılmış suda 30°C sıcaklıkta doymunluğa ulaşmaya kadar yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Periyodik olarak kontrol edilen ağırlık değişimleri suyu en çok emen grubun %5.72 oranı ile hibrit olmayan sisal/polyester olduğunu göstermiştir. Hibrit kompozit yapı içerisindeki cam elyaf katmanlar su emilimini azalttığı raporlanmıştır. Ayrıca, kumaş dizilimleri dikkate alındığında sisal kumaşların hibrit konfigürasyonda yüzeye yaklaşması su emilimini arttırdığı fark edilmiştir. Sisal kumaşların dizilimde yüzeyden merkeze doğru değişmesi su emiliminin %2.92' den %1.57' e düşmesine sağlamıştır.

El-Baky ve ark. (2018) hibrit jüt/cam/karbon kompozitlerin hidrotermal yaşlanma parametrelerini araştırmıştır. Numuneler deniz suyu ve saf suda 60°C sıcaklıkta 60 gün boyunca yaşlandırılmıştır. Deniz suyuna kıyasla numunelerin saf suyu daha fazla emdiği tespit edilmiştir. Ayrıca hibrit olmayan jüt kompozitlerin diğer hibrit gruplara göre daha fazla su emdiği görülmüştür. Hibrit olmayan jüt kompozitlerin su kazanım oranları, saf su ve deniz suyu için sırasıyla %17.44 ve %16.5 olarak ölçülmüştür. Hibrit kompozitlere cam ve karbon ilavesinin su emme oranında azalmaya neden olduğu

bildirilmiştir. Hibrit olmayan cam ve hibrit cam-karbon kompozitler, her iki su türü için de en az su emme oranını göstermiştir. Hibrit olmayan cam ve hibrit cam/karbon kompozitlerin su emme oranları, saf su için sırasıyla %7.17 ve %6.02, deniz suyu için %5.93 ve %4.85 olarak ölçülmüştür.

Ulus (2021) deniz suyu yaşlandırmasının bazalt/grafen nanolevha-epoksi kompozitlerin dinamik ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Farklı oranlarda grafen takviyeli bazalt kompozitlerin deniz suyu yaşlandırması sonucunda kısa kiriş kayma testine maruz bırakılmıştır. Kompozit numunelerin tümünde kayma gerilmeleri yaklaşık %70 oranında düşmüştür. Yaşlandırılmamış grup ile kıyaslandığında grafen takviyesi, bazalt kompozitlerde kayma gerilmesinde artışa sebep olduğu bulunmuştur.

Ulus ve ark. (2020) halloysite nanotüp takviyeli bazalt kompozitlerin deniz suyu yaşlandırması sonucu mekanik özelliklerini araştırmıştır. Kısa kiriş kayma testine maruz bırakılan parçacık takviyeli bazalt kompozitlerin deniz suyu yaşlandırmasıyla mukavemetlerinin düştüğü gözlenmiştir. Yaşlandırma süresinin artması düşüş oranlarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca parçacık takviyesinin, deniz suyunda yaşlandırılan bazalt kompozitlerin kayma mukavemetlerindeki düşüşü azalttığı bulunmuştur.

Kompozit malzemeler, geleneksel malzemeler ile kıyaslandığında üstün mekanik özelliklere sahip olsa da su emilimi polimer tabanlı kompozitlerin dezavantajlarından biridir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin farklı çevre koşullarından nasıl etkilendiğini görmek amacıyla literatürde yapılan çalışmaların çoğunda su emme eğilimleri incelenmiştir. Çalışmalarda kompozit numunelerin su emilimi üzerindeki nem seviyesi, su tipi, sıcaklık, yaşlanma süresi gibi kriterlerin etkileri araştırılmıştır. Ancak, numune boyutlarına dayalı bir araştırma netleştirilmemiştir. Bununla birlikte, sadece emilen suyun sahip olabileceği sonuçları değil, aynı zamanda su emmenin nasıl azaltılabileceğini de tahmin etmek için su emme davranışını araştırmak önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada, farklı koşullarda yaşlandırılmış hibrit aramid/cam/epoksi kompozitlerin su emme davranışları üzerine boyut etkisi incelenmiştir. 10 ve 15 gibi farklı  $L w^{-1}$  (uzunluk genişlik<sup>-1</sup>) ( $mm mm^{-1}$ ) oranlarına ve farklı dizilime sahip iki hibrit kompozit grup, 6 hafta (1000 saat) boyunca saf su ve deniz suyunda yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Hibrit aramid/cam/epoksi kompozitlerin su emme parametreleri,  $L w^{-1}$  oranına dayalı olarak sıcaklık, su tipi ve kompozit kumaşların sıralanışı gibi kriterlerle değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

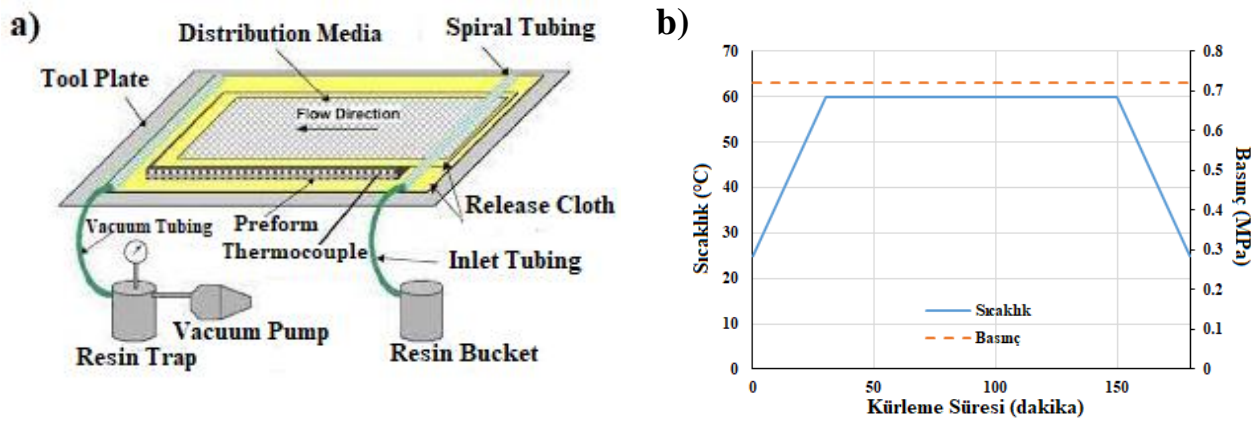
### Malzeme ve Üretim Metodu

Bu çalışmada, takviye olarak  $173 g m^{-2}$  ve  $202 g m^{-2}$  alan yoğunluğuna sahip dokuma aramid kumaş ve düz dokuma S-cam kumaş, matris sistemi olarak MGS L 285 epoksi reçine ve MGS H 285 sertleştirici 100:40 ağırlık oranında kullanılmıştır. Kompozit kumaş ve reçine sistemi elemanlarının fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Tüm malzemeler Dost Kimya (İstanbul, Türkiye) firmasından temin edilmiştir.

Kompozit plakalar vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Reçine sisteminin girişi tek bir vakum kanalı ile yapılmıştır. Reçinenin kompozit kumaşlardan homojen geçişini sağlamak için, Şekil 1 (a) 'da gösterildiği gibi 2 vakum borusu, vakum torbasının her iki tarafına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca, üretim metodunun şematik gösterimi Şekil 1 (a) 'da gösterilmektedir. Vakum pompasından hava kaçağı kontrolü yapıldıktan sonra reçine-sertleştirici karışımının geçişine izin verilmiştir. Kumaşlarda tam ıslanma sağlandıktan sonra reçine girişi kapatılmış ve kompozit plakalar  $60^{\circ}C$  sıcaklıkta 2 saat boyunca kütleleme işlemine tabi tutulmuştur (Özkan ve ark., 2020) Daha sonra plakalar oda sıcaklığında soğutulmaya bırakılmıştır. Üretim metodunun şematik gösterimi ve üretim prosesi Şekil 1'de gösterilmiştir.

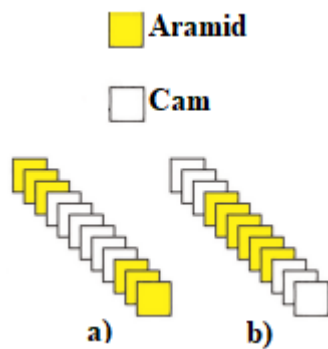
Çizelge 1. Kompozit numuneleri oluşturan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Malzeme	Özellik	Ölçü
Cam Kumaş	Yoğunluk	202 g m <sup>-2</sup>
	Fiber Kalınlığı	0.15 mm
Aramid Kumaş	Yoğunluk	173 g m <sup>-2</sup>
	Fiber Kalınlığı	0.27 mm
Epoksi Reçine MGS L 285	Yoğunluk	1.18-1.23 g m <sup>-3</sup>
	Viskozite	600-900 mPas
	Çekme Mukavemeti	70-80 N mm <sup>-2</sup>
	Eğilme Mukavemeti	110-120 N mm <sup>-2</sup>
	Darbe Mukavemeti	45-55 kJ mm <sup>-2</sup>
	Elastisite Modülü	3.0-3.3 kN mm <sup>-2</sup>



Şekil 1. a) Üretim metodunun şematik gösterimi b) Üretim prosesi

Cam/aramid/epoksi hibrit kompozit lamineler, iki farklı katman diziliminde üretilmiştir. Bunlardan birincisinde 6 adet cam kumaş merkeze, üçer adet aramid kumaş dışarıya yerleştirilmiş ve AGA olarak isimlendirilmiştir. İkincisin 6 adet aramid kumaş merkeze, üçer adet cam kumaş ise dışarıya yerleştirilmiş ve GAG olarak isimlendirilmiştir. Kompozit plakalar 350\*500 (mm<sup>2</sup>) olarak üretilmiştir. Test numuneleri, iki farklı L w<sup>-1</sup> oranına göre CNC router yardımı ile kesilmiştir. Kompozit numuneler, uzunluk ölçüsü (L) sabit tutularak 2 farklı genişlikte, L w<sup>-1</sup> oranı 10 ve 15 olacak şekilde, kesilmiştir. Numunelerin kalınlık farkını minimuma indirmek için hibrit kompozitler aynı anda üretilmiştir. İki kompozit grubun şematik gösterimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Üretilen kompozitlerin kalınlıkları Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Lamine hibrit kumaş kompozitler a) AGA b) GAG

Çizelge 2. Kompozit numune kalınlıkları

Lamine Kodu	Kalınlık (mm)
[G <sub>3</sub> A <sub>3</sub> ]s (GAG)	2.46±0.02
[A <sub>3</sub> G <sub>3</sub> ]s (AGA)	2.67±0.03

### Hidrotermal Yaşlanma

Hidrotermal yaşlanma işlemi üzerinde ayarlanabilir ısıtıcı takılı ve tarafımızca tasarlanıp imal edilen ısıya dayanıklı bir kabinde yapılmıştır. Kabin içerisinde homojen ısı dağılımını sağlamak amacıyla 300 L saat<sup>-1</sup> kapasiteli devir daim pompası kullanılmıştır. Yaşlandırma kabini ve elemanları Şekil 3'te gösterilmiştir.

Hibrit GAG ve AGA numuneler saf su ve deniz suyunda 25°C ve 70°C sıcaklıkta 1000 saat boyunca yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Her bir ortam için 5 numune kabine yerleştirilmiştir. Tüm numuneler periyodik olarak kabinde çıkarılmış, yüzeylerindeki su damlacıkları silinmiş ve hassas bir terazi yardımıyla hızlıca tartılıp tekrar kabine yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Yaşlandırma kabini ve komponentleri

Hidrotermal yaşlanma testi su alım oranı,  $M_t$  aşağıdaki gibi ASTM D5229/D5229M-14 standardına göre hesaplanmıştır.

$$M_t = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Burada,  $m_t$  ve  $m_i$  sırasıyla numunenin t anında ve kuru haldeki ağırlığıdır.

Bu çalışmada hibrit kompozit numunelerin su emme eğilimi teorik olarak Fick yasasına dayalı olarak da hesaplanmıştır.  $h$  kalınlığındaki bir numune tarafından emilen su miktarı Fick kanununa göre aşağıdaki denklem ile bulunabilir (Jost, 1960):

$$\frac{M_t}{M_s} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{h^2} \right] \quad (2)$$

Burada  $M_t$  ve  $M_s$  sırasıyla t zamanındaki su alımı ve denge platosundaki maksimum su alımıdır.  $D$  ise difüzyon katsayısıdır.

Shen ve Springer (1976) 2 numaralı eşitliği  $Dt h^{-2}$  oranına bağlı olarak basitleştirmiştir.

$$\frac{M_t}{M_m} = \begin{cases} \frac{4}{h} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}, & \frac{Dt}{h^2} < 0.05 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{M_t}{M_m} = \begin{cases} 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ -\frac{\pi^2 Dt}{h^2} \right], & \frac{Dt}{h^2} > 0.05 \end{cases} \quad (4)$$

Difüzyon katsayısı,  $D$ , ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$D = \pi \left( \frac{h}{4M_m} \right)^2 k^2 \quad (5)$$

Burada  $k$ , zamanın kareköküne karşı  $M_t$  grafiğinin başlangıç eğimidir.

Su difüzyon deneylerinde kompozit numunelerinin tüm yüzeylerinden su emilimi gerçekleştiğinden, denklem (5) 'ten elde edilen  $D$  değeri hataya yol açabilmektedir El-Baky (2018). Bu nedenle gerçek difüzyon katsayısı için, kenar etkisi hesaba katılarak bir düzeltme faktörü kullanılır. Düzeltilmiş difüzyon katsayısı  $D_c$  ise şu şekilde hesaplanır;

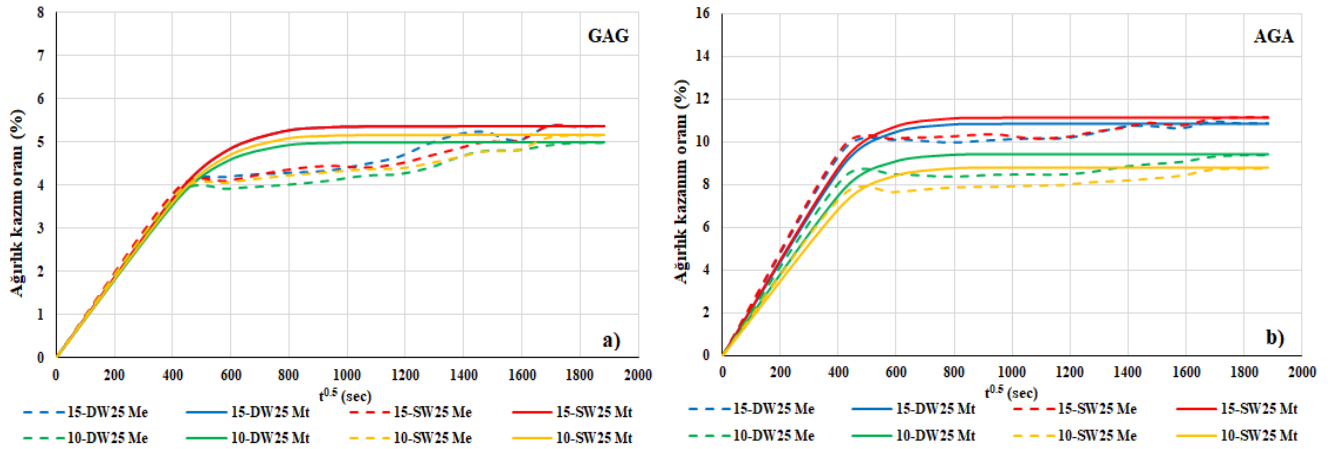
$$D_c = D \left(1 + \frac{h}{L} + \frac{h}{w}\right)^{-2} \quad (6)$$

Burada  $L$ ,  $h$  ve  $w$  sırasıyla numunenin uzunluk, kalınlık ve genişliğidir.

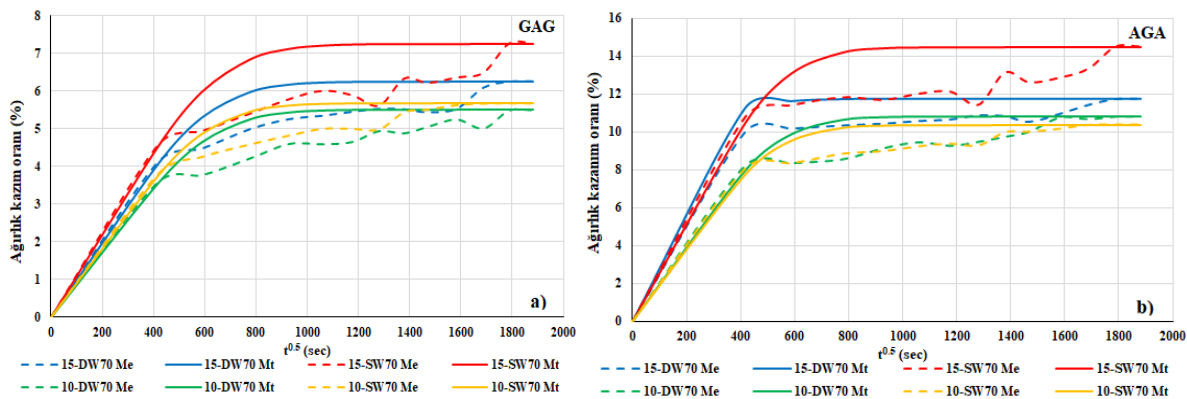
Zımparalama işleme su emilimine engel olduğu için kompozit numunelerin kenarlarının zımparalanması yapılmamıştır. Bunun yerine, kesimden kaynaklanan kumaş püskülleri yaşlanma sırasında fazla su emilimine sebep olacağı ve ağırlık tartımlarında yanlış yorumlamaya sebep olacağı için kompozit numuneler hidrotermal yaşlanma kabineye yerleştirilmeden önce, bir kesici yardımıyla kesilmiştir. Numunelere incelenen parametreleri gösteren bir isimlendirme yapılmıştır. Örneğin, 15-DW25, 15 L w<sup>-1</sup> oranı ile üretilmiş 25°C sıcaklıkta saf suda yaşlandırılmış bir numunedir, 10-SW70 ise 10 L w<sup>-1</sup> oranı ile üretilmiş 70°C sıcaklıkta deniz suyunda yaşlandırılmış bir numunedir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Hidrotermal yaşlanmaya maruz bırakılan hibrit GAG ve AGA kompozit numunelerin ağırlık kazanım oranlarının 25°C ve 70°C sıcaklıktaki sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Hibrit numunelerin deneysel ağırlık değişim değerleri ( $M_e$ ) ve teorik ağırlık değişim değerleri ( $M_t$ ) yaşlanma süresinin kareköküne karşı çizilmiştir.



Şekil 4. 25°C sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit a) GAG b) AGA kompozitler

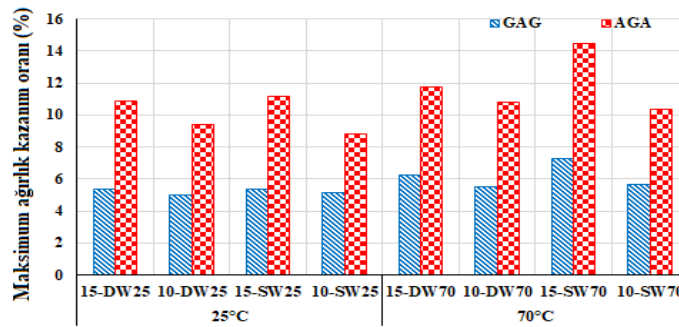


Şekil 5. 70°C sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit a) GAG b) AGA kompozitler

Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi, iki kompozit grubunun ağırlık kazanım davranışları her iki sıcaklıkta da zamana bağlıdır. Yaşlanma periyodunun ilk zamanlarında hızlı bir su emilimi gözlenmesine rağmen artan yaşlanma süresi ile su emilim hızı azalmaya başlamıştır. 1000 saatlik yaşlanma periyodunun sonuna doğru, özellikle hibrit GAG numuneleri için, ağırlık değişim oranları neredeyse sabit hale gelmiştir. İlk zamanlardaki hızlı su emilimi, kompozit numuneler ile yaşlanma ortamı arasındaki konsantrasyon farkından kaynaklanabilmektedir. Ayrıca, hem yüzeyde hem de fiber/matris ara yüzünde bulunan boşluklar da başlangıçta hızlı su emilimine neden olabilir (Bian ve ark., 2012).

Hibrit kompozitlerin deneysel ve teorik su emme davranışları incelendiğinde, iki yöntemin benzer bir eğilime sahip olduğu ve deneysel ağırlık değişim oranlarının Fick yasasına uygun olduğu gözlenmiştir. Deneysel ve teorik ağırlık değişim çizgilerindeki küçük farklılıklar, numunelerin yüzeyinde bulunan mikro boşluklar ve fiber/matris ara yüzeyindeki yapışma hatalarından kaynaklanabilmektedir (Jiang ve ark., 2014) Ayrıca, deneysel ağırlık değişim grafiğindeki küçük dalgalanmalar iki sebep ile ilişkilendirilebilir. Bunlardan birincisi, periyodik ağırlık değişimi ölçümlerinin kısa aralıklarla yapılması, diğeri ise ağırlık değişim ölçümlerinin manuel yapılmasıdır. Daha uzun aralık seçimi ve otomatik bir ölçüm yapılabilmesi durumunda dalgalanmalar azalacaktır.

Hibrit kompozitlerin maksimum ağırlık kazanım oranları Şekil 6'da gösterilmiştir. Hem hibrit GAG hem de hibrit AGA kompozitler ayrı ayrı değerlendirildiğinde, her iki  $L w^{-1}$  oranında da numunelerin emdikleri su miktarlarında sıcaklığın son derece etkili olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışı iki hibrit grubunda ve iki  $L w^{-1}$  oranında emilen su miktarının artışına neden olmuştur. Yüksek sıcaklık, hem matris hem de fiber-matris ara yüzündeki bozulmalara ve boşluk sayısının artmasına neden olur. Yüksek sıcaklığın sebep olduğu mikro bozulmalar, boşluklara suyun daha fazla dolmasına sebep olur ve su difüzyonunun artmasına sağlar (Boukhoulde ve ark., 2011; Soykok ve ark., 2013; Atas ve Doğan, 2015).



Şekil 6. Kompozit grupların maksimum ağırlık kazanım oranları

Hibrit kompozit numunelerin saf su ve deniz suyu yaşlandırma sonunda kazandıkları maksimum ağırlık oranları Şekil 6'da gösterilmiştir. Deneysel ölçümler, farklı su tiplerinin hibrit kompozitlerin su emiliminde son derece etkili olduğunu göstermiştir. Hibrit GAG kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları incelendiğinde iki  $L w^{-1}$  oranında da deniz suyu emiliminin saf su emiliminden fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum iki sıcaklık için de paralel sonuçlar vermiştir. 25°C sıcaklıkta yaşlandırılan,  $L w^{-1}$  oranı 10 ve 15 olan GAG kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları 10-DW25, 10-SW25, 15-DW25 ve 15-SW25 için sırasıyla % 4.995, % 5.167, % 5.357 ve % 5.370 olarak bulunmuştur. Ayrıca, 70°C sıcaklıkta yaşlandırılan,  $L w^{-1}$  oranı 10 ve 15 olan GAG kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları 10-DW70, 10-SW70, 15-DW70 ve 15-SW70 için sırasıyla % 5.499, % 5.679, % 6.247 ve % 7.261 olarak ölçülmüştür. Hibrit AGA kompozitlerin her iki sıcaklık için maksimum ağırlık kazanım oranları incelendiğinde durumun hibrit GAG numunelerdeki kadar uyumlu olmadığı fark edilmiştir.  $L w^{-1}$  oranı 10 olan hibrit AGA kompozitlerin maksimum emdikleri su miktarı, ihmal edilebilir farklar ile saf su yaşlanmasında görülmüştür.  $L w^{-1}$  oranı 15 olan hibrit AGA kompozitlerin maksimum emdikleri



su miktarı, hibrit GAG kompozitlerde olduğu gibi, deniz suyu yaşlanmasında daha fazla olmuştur. 25°C sıcaklıkta yaşlandırılan, L w<sup>-1</sup> oranı 10 ve 15 olan AGA kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları 10-DW25, 10-SW25, 15-DW25 ve 15-SW25 için sırasıyla % 9.413, % 8.785, % 10.861 ve % 11.157 olarak bulunmuştur. Ayrıca, 70°C sıcaklıkta yaşlandırılan, L w<sup>-1</sup> oranı 10 ve 15 olan AGA kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları 10-DW70, 10-SW70, 15-DW70 ve 15-SW70 için sırasıyla % 10.779, % 10.370, % 11.764 ve % 14.490 olarak ölçülmüştür.

Daha fazla deniz suyu absorpsiyonu Larbi ve ark. (2016) tarafından, deniz suyunun pH seviyesinin matris ve epokside oluşturduğu mikro çatlak formundaki bozunmaların fazlalığıyla yorumlanmıştır. Ayrıca, deniz suyunun mikro boşluklara daha fazla dolması, saf suya göre daha fazla su emilimine neden olduğu Chu ve ark. (2004); ve Abanilla ve ark. (2005) tarafından da bulunmuştur. Ayrıca, saf su absorpsiyonunun deniz suyundan daha fazla olması da literatürdeki bazı çalışmalarda tespit edilmiştir (Zafar ve ark., 2012, Yan ve Chouw, 2015; Bal ve Saha, 2015). Bu çalışmalarda araştırmacılar, deniz suyu içerisindeki su taneciklerinin su moleküllerinin aktivitesini azalttığını savunmuştur. Bu azalma deniz suyu emiliminin saf sudan daha az emilimine sebep olduğu rapor edilmiştir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, her iki L w<sup>-1</sup> oranında hibrit GAG ve AGA kompozit numunelerinin çoğunda deniz suyu emiliminin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Tüm numunelerin küçük bir grubunda ise saf su emiliminin fazla olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, tüm numuneler her iki su tipi ve sıcaklıkta 1000 saat boyunca yaşlanmaya tabi tutulmuştur. Rapor edilen su emilim oranları kesin sonuçlar değildir. Dolayısıyla, saf su emiliminin daha fazla olduğu gruplarda ileri yaşlanma süreleri sonuçlar deniz suyu emiliminin daha fazla olma durumuna dönüşebilir.

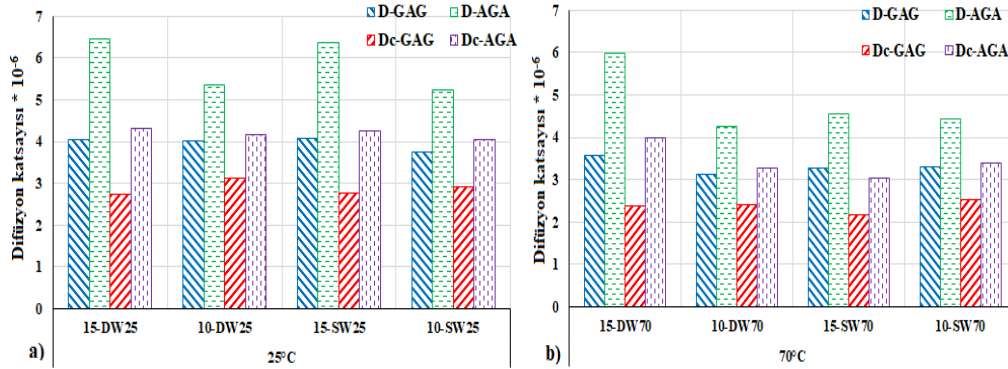
Bu çalışmada cam ve aramid kumaşların farklı dizilişleri ile hibrit kompozitlerin su emilim davranışları da incelenmiştir. Maksimum ağırlık kazanım oranları dikkate alındığında kompozit kumaşların sıralanışının su emiliminde kritik bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Hibrit GAG ve AGA kompozitlerin emdikleri su miktarları sıcaklık, su tipi ve L w<sup>-1</sup> oranları gibi kriterler tabanında incelendiğinde, her durumda AGA kompozitlerin emdiği su miktarının GAG kompozitlerinden fazla olduğu fark edilmiştir. Kumaşların katman diziliminin su emilimi üzerindeki etkisi El-baky ve Attia (2018) tarafından incelenmiştir. Hibrit kompozitte daha az su emici materyalin varlığının bir bariyer etkisine neden olduğu ve daha az su absorpsiyonuna neden olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada ise hibrit kompozit numunelerin dış yüzeyinde bulunan cam kumaşlar hibrit kumaşların daha az su emilimine sebep olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, su emme potansiyeli cam kumaşlardan daha fazla olan aramid kumaşların hibrit konfigürasyonunda dış yüzeyde bulunması, AGA kompozitlerinin GAG kompozitlerden daha fazla su emmesine neden olmuştur. Bu çalışmanın sonuçları su emiliminde hibridizasyon etkisi açısından literatürdeki çalışmalar ile (Ramesh ve ark., 2013; Srivastav ve ark., 2017; El-Baky, 2018; El-Baky ve Attia, 2018).

Ayrıca, hibrit olmayan cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozit numunelerin su emilim davranışlarının incelendiği doktora tezinde (Oğuz, 2021) hibrit GAG kompozitlerin su emilim karakterinin cam/epoksi benzeri bir eğilim gösterdiği, hibrit AGA kompozitlerin su emilim karakterinin ise aramid/epoksi benzeri bir davranış sergilediği rapor edilmiştir.

DeneySEL su kazanım ölçümleri L w<sup>-1</sup> oranlarına dayalı olarak incelendiğinde, numune ölçülerinin tüm yaşlandırma şartları için önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Aynı şartlarda yaşlandırılan hem hibrit GAG hem de hibrit AGA numunelerinde maksimum ağırlık kazanım oranlarının, L w<sup>-1</sup> oranının düşmesiyle azaldığı bulunmuştur. 25°C sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit GAG kompozitlerin maksimum ağırlık kazanım oranları 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25 ve 10-SW25 için sırasıyla % 5.357, % 4.995, % 5.370 ve % 5.167 olarak ölçülmüştür. 70°C sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit GAG kompozitler de benzer bir eğilim sergilemiştir. GAG kompozitlerin maksimum ağırlık kazanım oranları 15-DW70,

10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla % 6.247, % 5.499, % 7.261 ve % 5.679 olarak tespit edilmiştir. Her iki sıcaklıkta yaşlandırılan hibrit AGA kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları incelendiğinde, sonuçların hibrit GAG kompozitlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrotermal yaşlanmaya tabi tutulan hibrit AGA kompozitlerin maksimum ağırlık kazanımları 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25, 10-SW25, 15-DW70, 10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla % 10.861, % 9.413, % 11.157, % 8.785, % 11.764, % 10.779, % 14.490 ve % 10.370 olarak ölçülmüştür.

Kompozit yapıya ne kadar su molekülünün nüfuz edebileceğini gösteren difüzyon katsayısı, Fick'in modelinin en önemli parametrelerinden biridir. Hibrit kompozitlerin difüzyon ( $D$ ) ve düzeltilmiş difüzyon ( $D_c$ ) katsayıları, 25°C ve 70°C sıcaklıklar için sırasıyla Şekil 7 (a) ve (b) de gösterilmiştir.



Şekil 7. Difüzyon katsayıları a) 25°C b) 70°C

Hibrit kompozitlerin düzeltilmiş difüzyon katsayıları ( $D_c$ ) beklendiği gibi kenar etkisi faktöründen dolayı difüzyon katsayılarından ( $D$ ) daha düşük çıkmıştır. Kompozit numunelerin difüzyon katsayıları incelendiğinde, hibrit AGA kompozitlerinin difüzyon katsayıları GAG kompozitlerden büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca,  $L w^{-1}$  oranının artması, maksimum ağırlık kazanım oranlarında olduğu gibi, difüzyon katsayılarının artmasına sebep olmuştur. Hibrit GAG kompozit numunelerin difüzyon katsayıları ( $D * 10^{-6} mm^2 s^{-1}$ ) 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25, 10-SW25, 15-DW70, 10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla 4.047, 4.018, 4.084, 3.753, 3.562, 3.121, 3.263 ve 3.290 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, hibrit GAG kompozit numunelerin düzeltilmiş difüzyon katsayıları ( $D_c * 10^{-6} mm^2 s^{-1}$ ) 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25, 10-SW25, 15-DW70, 10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla 2.729, 3.111, 2.754, 2.914, 2.369, 2.400, 2.170 ve 2.531 olarak hesaplanmıştır. GAG kompozitlerinin difüzyon katsayılarındaki  $L w^{-1}$  etkisi AGA kompozitlerde de görülmüştür. Hibrit AGA kompozit numunelerin difüzyon katsayıları ( $D * 10^{-6} mm^2 s^{-1}$ ) 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25, 10-SW25, 15-DW70, 10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla 6.475, 5.351, 6.382, 5.246, 5.985, 4.256, 4.561 ve 4.426 olarak hesaplanmıştır. Hidrotermal yaşlanmaya maruz bırakılan hibrit AGA kompozitlerin düzeltilmiş difüzyon katsayıları ( $D_c * 10^{-6} mm^2 s^{-1}$ ) 15-DW25, 10-DW25, 15-SW25, 10-SW25, 15-DW70, 10-DW70, 15-SW70 ve 10-SW70 için sırasıyla 4.307, 4.156, 4.245, 4.054, 3.981, 3.273, 3.034 ve 3.404 olarak bulunmuştur.

## SONUÇ

Bu çalışmada, hibrit cam/aramid/epoksi kompozit numunelerin su emilim davranışları, numunelerin uzunluk genişlik<sup>-1</sup> ( $L w^{-1}$ ) oranlarına göre sıcaklık, su tipi ve hibridizasyon gibi etkenler değerlendirilerek incelenmiştir. Deneysel ve teorik ağırlık ölçümlerinin de karşılaştırıldığı çalışmanın sonuçları şunlardır:

- Deneysel ağırlık ölçümleri, hibrit kompozitlerin Fick kanununa uyumlu bir su emilim davranışı sergilediğini göstermiştir.

- Hibrit kompozitlerin su emiliminde sıcaklığın önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sıcaklık artışının, numunelerin maksimum ağırlık kazanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir.
- Saf su ve deniz suyunda yaşlandırılan hibrit kompozit numunelerin su emilim davranışları benzer olsa da deniz suyu emilimi genellikle daha fazla olmuştur.
- Tüm yaşlandırma şartlarında hibrit GAG kompozitler hibrit AGA kompozitlerden daha az su emmiştir.
- Numune ölçüleri dikkate alındığında, numunelerin uzunluk genişlik<sup>-1</sup> (L w<sup>-1</sup>) oranlarının azalması, hibrit GAG ve AGA kompozitlerinin daha az su emmesine neden olmuştur.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gaziantep Üniversitesi – Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından MF.DT.19.08 proje numarasıyla desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

**Zeynal Abidin OĞUZ:** Metodoloji, özgün taslak hazırlama, yazma; **Ahmet Erklığ:** Yazma, inceleme ve düzenleme.

## KAYNAKLAR

- Abanilla MA, Li Y, Karbhari VM, 2005. Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening, *Composites Part B: Engineering*, 37(2-3): 200-212.
- Abd El-baky MA, 2018. Experimental investigation on impact performance of glass-polypropylene hybrid composites: Effect of water aging, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-16.
- Abd El-baky MA, Attia MA, 2018. Water absorption effect on the in-plane shear properties of jute-glass-carbon-reinforced composites using losipescu test, *Journal of Composite Materials*.
- Aquino EMF, Sarmiento LPS, Oliveira W, Silva RV, 2007. Moisture effect on degradation of jute/glass hybrid composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(2): 219-223.
- ASTM D5229 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.
- Atas C, Dogan A, 2015. An experimental investigation on the repeated impact response of glass/epoxy composites subjected to thermal ageing, *Composites Part B*, 75: 127-134.
- Bal S, Saha S, 2015. Effect of sea and distilled water conditioning on the overall mechanical properties of carbon nanotube/epoxy composites, *International Journal of Damage Mechanics*, 26(5): 758-770.
- Bian L, Xiao J, Zeng J, Xing S, 2012. Effects of seawater immersion on water absorption and mechanical properties of GFRP composites. *Journal of Composite Materials*, 46(25): 3151–3162.
- Boukhoulda FB, Guillaumat L, Lataillade JL, Adda-Bedia E, Lousdad A, 2011. Aging-impact coupling based analysis upon glass/polyester composite material in hygrothermal environment, *Materials and Design*, 32: 4080–4087.
- Chu W, Wu L, Karbhari VM, 2004. Durability evaluation of moderate temperature cured E-glass/vinyl ester systems, *Composite Structures*, 66: 367-376.
- Collings TA, Copley SM, 1983. On the accelerated ageing of CFRP, *Composites*, 14(3): 180–188.
- Doğan NF, Bulut M, Erklığ A, Bozkurt ÖY, 2019. Mechanical and low velocity impact characterization of carbon/glass hybrid composites with graphene nanoplatelets. *Materials Research Express*.

- Durgun İ, Vatansever O, Ertan R, Yavuz N, 2014. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması, *Mühendis ve Makina*, 55(649): 58-63.
- Erkliğ A, Doğan NF, 2020. Nanographene inclusion effect on the mechanical and low velocity impact response of glass/basalt reinforced epoxy hybrid nanocomposites, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(83).
- Gupta MK, Deep V, 2018. Effect of water absorption and stacking sequences on the properties of hybrid sisal/glass fibre reinforced polyester composite, *Journal of Materials: Design and Application*.
- Jesthi DK and Nayak RK, 2019. Improvement of mechanical properties of hybrid composite through interply rearrangement of glass and carbon woven fabrics for marine applications. *Composites Part B: Engineering*, 168:467–475.
- Jiang X, Kolstein H, Bijlaard F, Qiang X, 2014. Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics, *Composites: Part A*, 57: 49-58.
- Jost W, 1960. *Diffusion in solids, liquids, gases*, New York: Academic Press.
- Larbi S, Bensaada R, Djebali S, Bilek A, 2016. Experimental and Theoretical Study on Hygrothermal Aging Effect on Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Plastic Laminates. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 10(7): 1239-1242.
- Mourad AHI, Abdel-Magid BM, El-Maaddawy T, Grami M.E, 2010. Effect of seawater and warm environment on glass/epoxy and glass/polyurethane composites. *Applied Composite Materials*, 17(5): 557-573.
- Oguz ZA, 2021 Hydrothermal aging effect on mechanical properties of hybrid composites, Gaziantep University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis.
- Özbek Ö, 2021. Axial and lateral buckling analysis of Kevlar/epoxy fiber-reinforced composite laminates incorporating silica nanoparticles, *Polymer Composites*, 42: 1109-1122.
- Özbek Ö, Bozkurt ÖY, Erkliğ A. 2020 Low velocity impact behaviors of basalt/epoxy reinforced composite laminates with different fiber orientations, *Turkish Journal of Engineering*, 4(4): 197-202.
- Özbek Ö, Doğan NF, Bozkurt ÖY, 2020. An experimental investigation on lateral crushing response of glass/ carbon intraply hybrid filament wound composite pipes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42:389.
- Poodts E, Minak G, Zucchelli A, 2013. Impact of sea-water on the quasi static and fatigue flexural properties of GFRP, *Composite Structures*, 97: 222–230.
- Ramesh C, Arumugam V, Stanley J, 2013. Effects of hydrolytic aging on glass/epoxy, kevlar/epoxy, and hybrid (glass/kevlar/epoxy) composites. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(5): 1589–1596.
- Salleh Z, Taib YM, Hyie KM, Mihat M, Berhan MN, Ghani MAA, 2012. Fracture Toughness Investigation on Long Kenaf/Woven Glass Hybrid Composite due to Water Absorption Effect, *Procedia Engineering*, 41: 1667-1673.
- Shen, CH, Springer GS, 1976. Moisture absorption and desorption of composite materials, *Journal of Composite Material*, 10: 2-20.
- Soykok I, Sayman O, Pasinli A, 2013. Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints, *Composites: Part B*, 54: 59–70.

- Srivastav PA, Wangikar KS, Kale DJ, 2017. Mechanical characterization and effects of hydrolytic aging on glass kevlar hybrid composites, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(9): 12-17.
- Tanaka K, Minoshima K, Grela W, Komai K, 2002. Characterization of the aramid/epoxy interfacial properties by means of pull-out test and influence of water absorption, *Composites Science and Technology*, 62: 2169-2177.
- Ulus H, Kaybal HB, Eskizeybek V, Avcı A, 2020. Halloysite nanotube reinforcements endows ameliorated fracture resistance of seawater aged basalt/epoxy composites, *Journal of Composite Materials*.
- Ulus H. 2021. The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1): 412-419.
- Wan YZ, Wang YL, Huang Y, Luo HL, He F, Chen GC, 2006. Moisture absorption in a three-dimensional braided carbon/Kevlar/epoxy hybrid composite for orthopaedic usage and its influence on mechanical performance, *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9): 1480-1484.
- Wang A, Wang X, Xian G, 2020. Mechanical, low-velocity impact, and hydrothermal aging properties of flax/carbon hybrid composite plates, *Polymer Testing*, 90: doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106759.
- Yan L, Chouw N, 2015. Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications, *Construction and Building Materials*, 99: 118-127.
- Zafar A, Bertocco F, Schjødt-Thomsen J, Rauhe JC, 2012. Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites, *Composite Science and Technology*, 72: 656–666.