



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

Yapay Deniz Suyu Ortamında Yaşlandırılan Kompozit Plakanın Düzlem içi Çekme ve Basma Davranışının Sonlu Elemanlar Metodu ile Nümerik Analizi

Numerical Analysis of In-Plane Tensile and Compression Behavior of Composite Plate Aged in Artificial Seawater Environment by Finite Element Method

Yazar(lar) (Author(s)): Ersan KIRAR¹, Murat KISA², Mustafa ÖZEN³, Gökhan DEMİRCAN⁴

¹ ORCID ID: 0000-0002-7980-4815

² ORCID ID: 0000-0001-7015-2198

³ ORCID ID: 0000-0002-0282-9387

⁴ ORCID ID: 0000-0002-9579-6878

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): KIRAR E., KISA M., ÖZEN M., DEMİRCAN G., “Yapay Deniz Suyu Ortamında Yaşlandırılan Kompozit Plakanın Düzlem içi Çekme ve Basma Davranışının Sonlu Elemanlar Metodu ile Nümerik Analizi”, ***Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi***, 8(1): 17-26, (2023).

DOI: 10.46578/humder.1148379



Yapay Deniz Suyu Ortamında Yaşlandırılan Kompozit Plakanın Düzlem içi Çekme ve Basma Davranışının Sonlu Elemanlar Metodu ile Nümerik Analizi

Ersan KIRAR^{1,*}, Murat KISA², Mustafa ÖZEN³, Gökhan DEMİRCAN⁴

¹Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 63000, Eyyübiye/Şanlıurfa

^{2,3,4}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 63050, Haliliye/Şanlıurfa

Öz

Günümüzde sıkça kullanılan kompozit malzemeler birçok bozucu etkilere sahip çevre şartları sebebiyle zamanla yaşlanmaya maruz kalır ve malzeme özelliklerinde kayıplar meydana gelir. Kompozit malzemelerin güvenli kullanımları için yaşlanma sonucu mekanik özelliklerinde meydana gelecek değişimlerin tespit edilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle yaşlandırmaya maruz kalan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için standartlara uygun testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada vakum infüzyon yöntemiyle üretilen örgü S2 cam/epoksi kompozit plakaların yarısı 120 gün yapay deniz suyu ortamında yaşlandırılmış diğer yarısı da yaşlandırılmamıştır. Yaşlandırma işlemi ağırlıkça % 3,5 tuz içerecek şekilde hazırlanan yapay deniz suyu içinde uygulanmıştır. Yaşlandırmaya maruz kalan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için standartlara uygun olarak çekme ve basma testleri yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen deneysel veriler kullanılarak bulunan parametreler ile yeni bir malzeme modeli oluşturulmuştur. Bu malzeme modeli kullanılarak, kompozit plakaların çekme-basma testlerinde uygulanan sınır şartlarına uyumlu sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar, deneysel test sonuçları ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortaya konan basitleştirilmiş modelleme yöntemiyle, çevre şartlarına maruz kalan kompozit malzemelerin hasar analizleri başarıyla yapılmıştır. Bunun sonucunda da pahalı ve zaman alan deneysel yöntemler yerine kullanılabilecek bir malzeme modeli elde edilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 25/07/2022

Yayın: 28/04/2023

Anahtar Kelimeler

Kompozit malzeme
Mekanik özellik
Sonlu elemanlar analizi
Yaşlandırma

Keywords

Composite material
Mechanical property
Finite element analysis
Aging

Numerical Analysis of In-Plane Tensile and Compression Behavior of Composite Plate Aged in Artificial Seawater Environment by Finite Element Method

Abstract

Composite materials, which are frequently used today, are exposed to aging over time due to environmental conditions with many degrading effects and losses occur in material properties. For the safe use of composite materials, it is important to determine the changes in their mechanical properties as a result of aging. For this reason, it is necessary to perform tests in accordance with the standards in order to determine the mechanical properties of composite materials exposed to aging. In this study, half of the woven S2 glass/epoxy composite plates produced by vacuum infusion method were aged for 120 days in artificial seawater environment and the other half were not aged. The aging process was applied in artificial sea water prepared to contain 3.5% salt by weight. Tensile and compression tests were carried out in accordance with the standards to determine the mechanical properties of composite materials exposed to aging. A new material model was created with the parameters found by using the experimental data obtained as a result of the tests. By using this material model, finite element models compatible with the boundary conditions applied in the tensile-compression tests of composite plates were created. The results obtained by the finite element analysis were compared with the experimental test results and it was observed that there was a good agreement between the obtained results. In addition, damage analyzes of composite materials exposed to environmental conditions were successfully carried with the simplified modeling method presented. As a result, a material model was obtained that can be used instead of expensive and time-consuming experimental methods.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler benzer ya da farklı türdeki malzemelerin makro seviyede birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Kompozit malzemelerde takviye malzemesi matris rijitliğinin ve dayanımının artırılması ayrıca malzeme üzerindeki yükün taşınmasının sağlanması amacıyla kullanılmaktadır [1]. Takviye malzemesi olarak yaygın olarak elyaf kullanılmaktadır. Cam elyaf bu tür kompozit malzemelerde en çok tercih edilen takviye malzemesidir [2-3]. Matris malzemesi ise elyaf takviye elemanını bir arada tutarak ona rijitlik kazandırmaktadır [4]. Elyaf esaslı kompozit malzemeler mühendislikte üstün özgül sertlik (mukavemet/ağırlık oranı) ve mukavemetin yanı sıra mükemmel hasar direnci ve iyi işleme özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda örgü tipte kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin ve hasar mekanizmalarının deneysel, teorik ve numerik olarak değerlendirilmesine ait çalışmalara artan bir ilgi bulunmaktadır [5-9]. Mekanik özelliklerin deneysel olarak tespiti güvenilir olmasına rağmen uzun süren ve maddi olarak da pahalı olan birçok test gerektirmektedir [10]. Deneysel olarak belirlenmesi zor olan mekanik özelliklerin sonlu elemanlar analizi ile doğru, hızlı ve zamandan tasarruf sağlanarak tespit edilmesi avantaj sağlamaktadır [8].

Örgü kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar incelemelerinde numerik modelleme yaygın olarak kullanılmaktadır. Numerik modelleme için literatürde farklı stratejiler bulunmaktadır [9, 11, 12]. Realff vd. [6], kompozit malzemeyi mikro mekanik teorik hesaplamalar ile analiz etmiş ve iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Literatür araştırmasında özellikle kompozit malzeme modellemesi için mikro mekanik sonlu elemanlar modellemesi yapan pek çok çalışmaya rastlanmıştır. Bai vd. [5], kompozit malzemelerde farklı takviye elemanları için mikro mekanik teorik incelemeleri yapmış ve farklı takviye elemanlarını karşılaştırmışlardır. Cai vd. [9], benzer şekilde farklı cam/epoksi örgü kompozit malzemelerin hasar incelemesini hem mikro seviyede hem de makro seviyede incelemişler ve iki yöntemin de olumlu sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada ise, Naik vd. [13], farklı takviyeli kompozit malzemelerin basma testini mikro mekanik teorik hesaplama ile inceleyerek, modelleme sonuçlarını test sonuçları ile doğrulamışlardır. Bai vd. [7] kompozit malzemelerin çekme ve kesme dayanımını incelemek için mikro mekanik teorik modelleme uygulamış ve olumlu sonuç tespit etmişlerdir. Barbero vd. [14], çeşitli örgü takviyeli kompozitlerin mikro mekanik modellemesi için katı modelleme yapmışlardır. Sonrasında mikro katı modellere sonlu elemanlar analizi uygulanarak modelin doğruluğunu göstermişlerdir. Bai vd. [5], dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemenin mikro mekanik sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Test sonuçlarına yakın sonuçlar elde etmişler ve bu modelin ileriki modellemeler için başarıyla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde De Carvalho vd. [11], aynı modelleme tekniğini kullandığı çalışmada kompozit malzemedeki takviye elemanı olarak farklı örgü şekilleri için inceleme yapmışlardır. İncelemede takviye elemanları mikro düzeyde katı modellenmiş ve katı modellenen birim hücre ile sonlu elemanlar analizi yapılarak mikro inceleme yapmışlardır. Bai ve ark. [8], örgü takviyeli kompozit malzemenin çekme testi için mikro mekanik sonlu elemanlar analiz modeli kullanmışlardır. Modellemede testle paralel sonuçlar elde edilmesi neticesinde çekme testini incelemişlerdir. Qiu vd. [12], örgü takviyeli kompozit malzemenin lineer olmayan malzeme modelini kullanılarak mikro mekanik sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Gasser vd. [15], çalışmalarında farklı örgü takviyeli malzemeler üretmiş ve mikro mekanik sonlu elemanlar analizini yaparak karşılaştırmışlardır. Sridharan [16] ve Brown [17] çalışmalarında kompozit malzemenin mikro mekanik sonlu elemanlar analiz modellemesinin dışında makro seviyede tek eleman kullanımı ile de sonlu elemanlar analizlerini yapmışlardır. Gama vd. [18], başka bir çalışmada da yine makro tek eleman kullanarak sonlu elemanlar analizi yapmışlar ve çalışmada ilk hasar sonrasında incelemişlerdir. İlk hasar sonrasında analizinde etkili olan malzeme parametrelerinin gerilme-gerinim'e etkisini incelemişlerdir.

Yapılan araştırmalar sonucunda kompozit malzemelerin basma ve çekme testlerinin sonlu elemanlar analizi modellemesi aşamasında tek eleman kullanımının gayet hızlı ve iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Literatürde yapay deniz suyu ortamında yaşlandırılan kompozit malzemenin çekme ve basma testinin sonlu elemanlar analizi modellemesi üzerine yapılan çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında yapay olarak deniz suyunda 120 gün yaşlandırılan ve yaşlandırılmayan S2 cam-epoksi örgü kompozit malzemenin çekme ve basma testleri standartlara göre yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile bulunan parametreleri kullanan yeni bir malzeme modeli oluşturularak sonlu elemanlar

analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile çekme ve basma testinin sonuçları karşılaştırılarak yeni malzeme modelinin doğru ve güvenilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

2.MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Kompozit Malzemenin Hazırlanması ve Yapay Yaşlandırma İşlemi

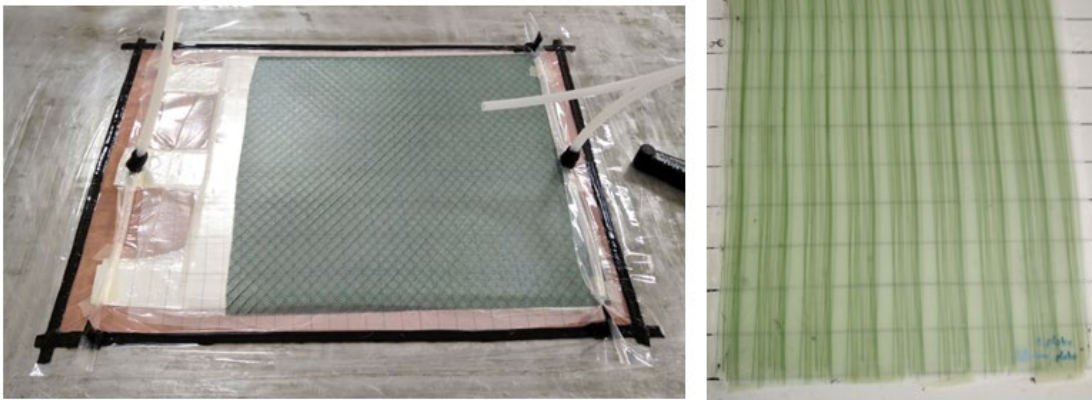
Kompozit Malzemenin Hazırlanması

Çalışmada S2 cam/epoksi malzeme kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak teknik özellikleri Tablo 1’ de verilen S2 Cam Fiber, matris malzemesi olarak MGS LR285 reçine ve sertleştirici olarak ta MGS LH285 kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan S2 cam teknik özellikleri

	S2 Cam Fiber takviye malzemesi
Dokuma şekli	Örgü
Metrekare ağırlığı (g/m ²)	190

Çekme ve basma testi için standart gereği 3,2 mm kalınlık kullanılmıştır. 3,2 mm kalınlıkta kompozit plaka elde etmek için 20 kat tabakanın yeterli olacağı tespit edilmiştir. 20 kat S2 cam fiber kumaş 425x500 mm ölçülerinde kesilmiştir. Ayrıca kompozit plakanın üretimi için gerekli olan yardımcı elemanlar (Kalıp ayırıcı film, Soyma kumaşı, İnfüzyon filesi ve Vakum poşeti) tabaka ölçülerine uygun şekilde kesilmiştir. Numune üretimi için gerekli olan tüm kesme işlemleri bittikten sonra üretim işlemine geçilmiştir. Bu aşamada öncelikle kesilen S2 cam kumaşlar üst üste hizalı olarak Şekil 1’deki gibi düzenlenmiştir. Üretimin ilk aşamasında kalıp ayırıcı film sıcaklık kontrollü tezgâha vakum macunu ile yapıştırılmıştır. Daha sonra üzerine S2 cam fiber kumaş tabakalar yerleştirilmiştir. Kumaşın üzerine üretim işlemi sonrası soymayı kolaylaştıracak olan soyma kumaşı koyulmuştur. Soyma kumaşının üzerine de reçinenin kolayca akması için infüzyon filesi yerleştirilmiştir. Filenin üzerine borulama sistemi yerleştirilmiştir. Bu aşamada en son olarak plaka üzerine vakum poşeti yerleştirilmiştir. Vakum poşeti yanlardaki vakum macunu sayesinde zemine yapıştırılmıştır. Yanlardaki vakum macunu iyice sıkıştırılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Sonra da vakum hattı için dış borulama sistemi yerleştirilmiştir. Şekil 1’deki tezgâh üretime hazır hale getirilmiştir. Sonrasında numunelere verilecek epoksi miktarı elyaf takviyelere göre hesaplanmıştır. Karışımda ağırlıkça % 40 sertleştirici ve % 60 epoksi olacak şekilde kullanılmıştır. Tüm üretim işlemleri sonrası plaka 80 °C ve 15 saat kürlenmeye tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Mekanik testler için kompozit plaka üretimi ve üretilmiş plaka

Üretimde ebat olarak büyük plakalar üretilmiş ve sonrasında da çekme test numunesi için 250x25x3,2 mm ve basma test numunesi için de 140x13x3,2 mm boyutlarında kesim planlanmıştır. Belirlenen ölçülerde kesme işlemi ile mekanik test numuneleri Şekil 2’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Stadartlara göre kesilmiş çekme ve basma test numuneleri

Yapay Yaşlandırma İşlemi

Deniz suyunda yaşlandırma işlemi için oda sıcaklığında yapay yaşlandırma tercih edilmiştir. Tüm numuneler son bir kez temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerde kalan kesim çapakları alınmıştır. Sonrasında numuneler yaşlandırma işlemi için gruplandırılmıştır. Numuneler 120 gün oda sıcaklığında yapay deniz suyunda yaşlandırılmıştır. Ayrıca yaşlandırma işlemine tabi olmayan numuneler için de bir grup ayarlanmıştır. Yapay yaşlandırma işlemi için kullanılacak çözelti hazırlanırken literatüre uygun şekilde ağırlıkça % 3,5 iyotlu kaya tuzu çeşme suyuna eklenerek hazırlanmıştır [19]. Şekil 3’de görülen tuzlu su çözeltisi hazırlanan numunelerin kabına dökülmüştür. Numuneler tam olarak çözeltiye batana kadar ekleme yapılarak yaşlandırma işlemi hazırlığı yapılmıştır. Yaşlandırmaya bırakılan numuneler 120 gün bekletilmiştir. Süre dolunca çıkarılarak en kısa sürede testleri yapılmıştır.



Şekil 3. Numunelerin yaşlandırma işlemine bırakılması

2.2. Yaşlandırılmamış ve 120 Gün Yaşlandırılmış Kompozit Malzemenin Mekanik Testleri

Çalışma kapsamında üretilen yaşlandırılmamış ve 120 gün yaşlandırılmış S2 cam/epoksi kompozit malzeme için çeşitli mekanik testler uygulanmıştır. Kompozit malzemenin sonlu elemanlar analizi için gerekli tüm mekanik özellikler tespit edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizi çalışmasında yeni malzeme modeli kullanılarak çalışma kapsamında sadece düzlem içi çekme ve basma testleri incelenmiştir.

1-2 yönü (düzlem içi lif yönü) çekme testi ASTM D3039 standardına göre yapılmıştır. 1-2 yönü basma testi ise ASTM D6641 standardına göre yapılmıştır. Testlerin uygulanmasında Tablo 2’deki standart test bilgileri kullanılmıştır.

Tablo 2. 1-2 yönü çekme ve basma testi

	1-2 yönü çekme testi	1-2 yönü basma testi
Standart	ASTM D3039	ASTM D6641
Test hızı (mm/dk)	2	1,3

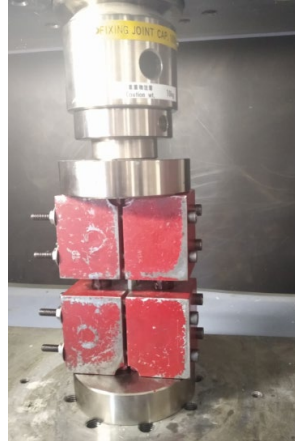
1-2 yönü çekme testi standarda göre numuneler kesilerek elde edilmiş ve çapakları alınmıştır. Test öncesinde standardın belirttiği şekilde kulakçıklar hazırlanıp, numuneye yapıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 4' deki gibi çekme çenelerine bağlanmıştır.



Şekil 4. 1-2 yönü çekme testi

Test işlemimde iki çene arasına bağlanan numune 2 mm/dk sabit hızla çekme testine tabi tutulmuştur. Boyuna uzama ölçümü için video ekstansometre kullanılmıştır.

1-2 yönü basma testi için Tablo 2'deki veriler kullanılmıştır. Numuneler ASTM D6641'e göre özel basma aparatı ile basma testine tabi tutulmuştur. Basma test aparatına civatalar ile sabitlenen numune biri hareketli diğeri sabit olan iki vurucu arasına yerleştirilmiş ve 1,3 mm/dk sabit hızla Şekil 5'de görüldüğü şekilde basma testi uygulanmıştır.



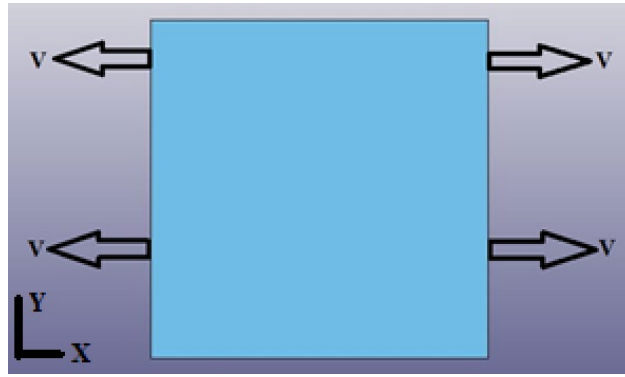
Şekil 5. 1-2 yönü basma testi

2.3. Yaşlandırılmamış ve 120 Gün Yaşlandırılmış Kompozit Malzemenin Mekanik Testlerinin Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar analizinde zamana bağlı çözüm yaparken küçük zaman aralıklarıyla adım adım çözüm yapılarak tam çözüme ulaşılmaktadır. Analizi yapılacak toplam sürenin belirlenen küçük zaman adım değerine bölünmesiyle analizin çözümü için gereken analiz adım sayısı elde edilmektedir. Ayrıca zamana bağlı analizlerde kullanılan küçük zaman adımlarının sonlu elemanlar analizi çözümleme süresi analizde kullanılan modele bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla analizi yapılacak test süresi fazla ve adımın zaman değeri küçükse gerekli adım sayısı artmaktadır. Buna bağlı olarak, adım sayısı artan analizin tam çözüm süresi de artmaktadır. Mevcut çalışmada da kullanılan kompozit malzemenin mekanik testlerinin test hızlarının da düşük olması nedeniyle analiz sürelerinin fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında

test numunelerinin hasarlı halleri analiz sonucu ile karşılaştırılmayacağı için literatürdeki tek eleman kullanımı ile analiz yapılması [16-18] tercih edilmiştir. Analizlerde tek eleman kullanılması ile sadece her bir adımın çözüm süresi kısalarak toplam analiz süresi de azalmaktadır. Böylece analiz denemeleri daha rahat bir şekilde yapılabilmektedir.

Sonlu elemanlar analizi modellemesi için Ls Dyna 971 sürümlü yazılım kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ile modellemede düzgün sekiz yüzlü tek eleman tercih edilmiştir. Kullanılan tek eleman boyutu 1x1x1 mm'dir. Bu ölçünün seçiminde kompozit malzemeyi iyi ifade edebilmek için gerekli minimum ölçü olan elyaf örgü genişliği baz alınmıştır. Kullanılan ölçünün minimum örgü genişliğinin üzerinde bir değer olmasına dikkat edilmiştir. Sonrasında malzeme modeli olarak da tabakalı kompozit malzeme hasarı analizinde kullanılan Mat 162 malzeme modeli tercih edilmiştir. Kullanılan malzeme modeli sayesinde kompozit malzemenin hasar incelemeleri yapılabilmektedir. Mat 162 malzeme modeli için gerekli 27 tanesi temel mekanik özellik ve 8 tanesi de ilk hasar sonrası analizinde kullanılan malzeme mekanik özellikleri yaşanmamış ve 120 gün yaşlandırılan kompozit malzemeye uygulanan mekanik test sonuçlarından elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinden belli bir kısmı literatürden alınmıştır. Literatürden alınan malzeme özellikleri sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırılarak kalibre edilmiştir. Elde edilen tüm malzeme özellikleri yazılama aktarılmıştır. Sonrasında analizde kullanılan tek elemana Şekil 6'da ki gibi x eksenindeki yüzeylerinde bulunan noktalardan aksel test hızları uygulanmıştır. Analizlerde 1-2 yönü için sabit 2 mm/dk çekme test hızı ve 1-2 yönü için de sabit 1,3 mm/dk basma testi hızı uygulanmıştır. Analiz süresi ve gerilme-gerinim grafiği sonuçlarının alınabilmesi için gerekli sonuç parametreleri de yazılama girilerek modelleme tamamlanmıştır.



Şekil 6. Çekme testi sonlu elemanlar analizinde kullanılan önden görünüş tek eleman ve modelleme sınır şartları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Çekme ve Basma Testi Bulguları

Çalışmada kompozit malzeme numunelerine standartlara uygun şekilde çekme testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 3'de sunulmuştur. Tablo 3'de elastisite modülü ve çekme dayanımı değerleri 5 numunenin ortalama değeri alınarak verilmiştir.

Tablo 3. 1-2 yönü çekme testi sonuçları

Çekme Testi	Yaşlandırılmamış numuneler	120 gün yaşlandırılmış numuneler
Çekme dayanım ($X_{1T} = X_{2T}$)	448,05 MPa	406,54 MPa
Çekme elastisite modülü ($E_1 = E_2$)	20,76 GPa	20,47 GPa

Tablo 3' de verilen çekme testi sonuçlarında 120 gün yaşlandırılan numunelerde beklenildiği gibi düşüş gözlemlenmiştir. Literatür ve mevcut test sonuçlarından da görüleceği üzere elastisite modülündeki düşüş miktarı azdır [20].

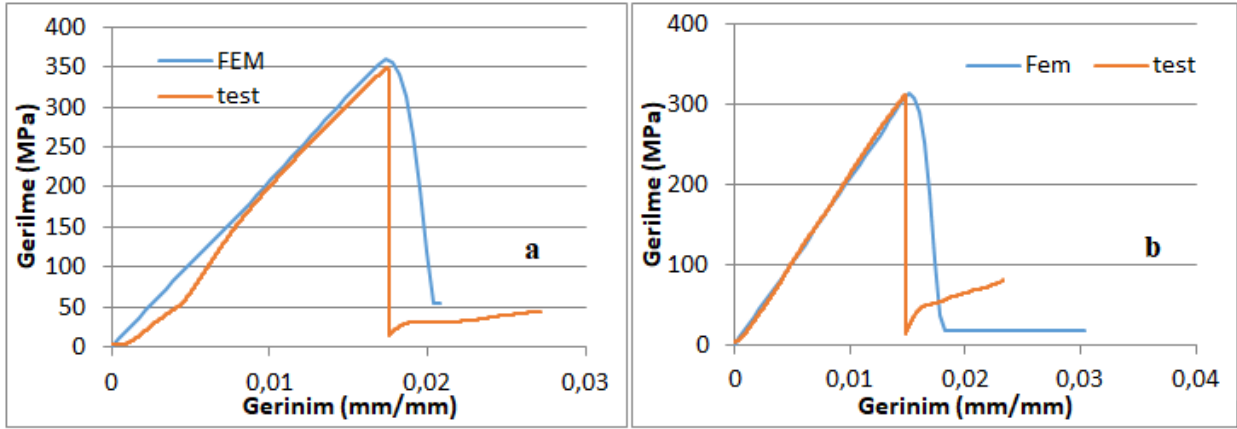
Numunelere uygulanan basma testi de standarda uygun şekilde yapılmıştır. Kompozit malzemenin basma testi sonucunda Tablo 4’deki veriler elde edilmiştir. Basma testinde standart gereği beş tekrar olacak şekilde yapılmış ve maksimum basma dayanımı test ortalaması alınarak elde edilmiştir. Basma testi sonucunda 120 gün yaşlandırılan numunelerin basma dayanımında yaşlandırmaya bağlı bozulma sebebi düşüş tespit edilmiştir.

Tablo 4. 1-2 yönü basma testi sonuçları

Basma Testi	Yaşlandırılmamış numuneler	120 gün yaşlandırılmış numune
Basma dayanımı ($X_{1c} = X_{2c}$)	360,15 MPa	314,66 MPa
Basma elastisite modülü	21,98	21,81 GPa

3.2. Sonlu Elemanlar Analizi Bulguları

120 gün yaşlandırılmış ve yaşlandırılmayan numunelere uygulanan sonlu elemanlar analizi sonuçları hem çekme testi hem de basma testi için gerilme-gerinim değerleri açısından deneysel test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Mekanik testlerden elde edilen değerler ile nümerik model sonuçları arasında iyi bir uyum görülmüştür.



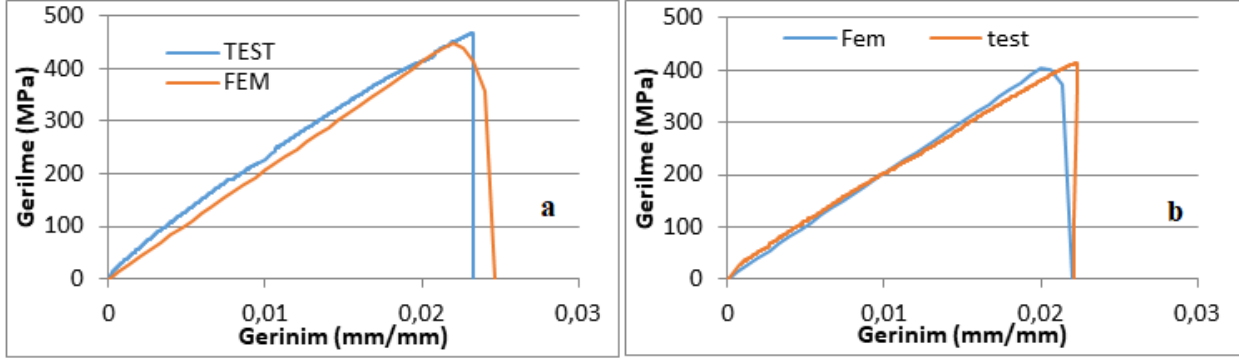
Şekil 7. a) Yaşlandırılmamış numunelerin 1-2 yönü basma testi sonucu ve sonlu elemanlar analizi gerilme-gerinim karşılaştırması b) 120 gün yaşlandırılmış numunelerin 1-2 yönü basma testi sonucu ve sonlu elemanlar analizi gerilme-gerinim karşılaştırması

Basma testinin gerilme-gerinim sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları birlikte Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere deney ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Basma testi sonucunda elde edilen ortalama maksimum gerilme-gerinim ve elastisite modülü değerleri Tablo 5’de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tablo 5. Basma testinin sonlu elemanlar analizi ve test sonuçlarının karşılaştırması

	Değerlendirme Kriteri	Test sonucu (ortalama değer)	Sonlu elemanlar analizi sonucu	Hata Miktarı (%)
Yaşlandırılmamış Numunelerin sonuçları	Basma dayanımı (MPa)	360,15	359,98	0,05
	Maximum gerinim (mm/mm)	0,0175	0,0173	1,14
	Basma elastisite modülü (GPa)	21,98	21,50	2,18
120 Gün Yaşlandırılmış Numunelerin sonuçları	Basma dayanımı (MPa)	314,66	314,55	0,03
	Maximum gerinim (mm/mm)	0,0148	0,0152	2,70
	Basma elastisite modülü (GPa)	21,81	20,88	4,26

Tablo 5’de 120 gün yaşlandırılmış numunelerin basma testi sonuçları ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırılmıştır. Basma dayanımı için yaşlandırılmamış numune için % 0,05 hata ile ve 120 gün yaşlandırılmış numune içinde % 0,03 hata ile sonuçlar benzerlik göstermektedir. Bu düşük hata miktarı, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modeli parametrelerinin doğru bir şekilde tespit edildiğini göstermektedir. Maksimum gerinim incelemesinde ise yaşlandırılmamış numune için % 1,14 hata ile ve 120 gün yaşlandırılmış numune içinde % 2,7 hata ile sonuçlar arasında benzerlik görülmüştür. Basma elastisite modülleri karşılaştırıldığında yaşlandırılmamış numune için % 2,18 ve 120 gün yaşlandırılmış numune için de % 4,26 hatayla kabul edilebilir bir fark olduğu görülmüştür. Tüm incelemeler sonucunda en fazla % 4,26 hata miktarı görülmüş olup bu da sonlu elemanlar analizi için oluşturulan malzeme modeli parametrelerinin doğru olarak tespit edildiğini ve güvenle kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 8. a) Yaşlandırılmamış numunelerin 1-2 yönü çekme testi sonucu ve sonlu elemanlar analizi gerilme-gerinim karşılaştırması b) 120 gün yaşlandırılmış numunelerin 1-2 yönü çekme testi sonucu ve sonlu elemanlar analizi gerilme-gerinim karşılaştırması

Şekil 8’de yaşlandırılmayan ve 120 gün yaşlandırılmış numunelerin çekme testi gerilme-gerinim sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları aynı grafikte verilmiştir. Basma testi sonucunda elde edilen ortalama maksimum gerilme-gerinim ve elastisite modülü değerleri Tablo 6’da karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tablo 6. Çekme testinin sonlu elemanlar analizi ve test sonuçlarının karşılaştırması

	Değerlendirme Kriteri	Test sonucu (ortalama değer)	Sonlu elemanlar analizi sonucu	Hata Miktarı (%)
Yaşlandırılmamış Numunelerin sonuçları	Çekme dayanımı (MPa)	448,05	447,70	0,08
	Maximum gerinim (mm/mm)	0,0220	0,0219	0,45
	Çekme elastisite modülü (GPa)	20,76	20,40	1,73
120 Gün Yaşlandırılmış Numunelerin sonuçları	Çekme dayanımı (MPa)	406,54	403,83	0,67
	Maximum gerinim (mm/mm)	0,018	0,019	5,56
	Çekme elastisite modülü (GPa)	20,47	20,10	1,81

Çekme testi sonucunda ortalaması alınarak elde edilen mekanik özellikler ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda yaşlandırılmamış numune için çekme dayanımında % 0,08, maksimum gerinimde % 0,45 ve çekme elastisite modülünde % 1,73 hata oranları görülmüştür 120 gün yaşlandırılan numune için de çekme dayanımında % 0,67, maksimum gerinimde % 5,56 ve çekme elastisite modülünde % 1,81 hata oranları görülmüştür.

Çekme ve basma testinin sonlu elemanlar analizi incelemelerinde gerilme değerinin maksimum olduğu hasar noktasına kadar inceleme yapılmıştır. Test sonuçlarında ve analiz sonuçlarında maksimum nokta sonrası değerleri Şekil 7 ve 8’ de verilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında hasar sonrası sonlu elemanlar analizi incelemesi yapılmadığı için bu kısma değinilmemiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında yapay deniz suyu ortamında 120 gün süre ile yaşlandırılan ve yaşlandırmaya maruz kalmayan kompozit numunelerin düzlem içi çekme ve basma testleri deneysel olarak yapılmış ve bu numunelerin sonlu elemanlar modellemesi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Elde edilen yaşlandırılmış numunenin deney sonuçlarından faydalanarak kompozit numunenin sonlu elemanlar metodu ile hasar analizinde kullanılacak olan Mat 162 malzeme modeli için gerekli parametreler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen malzeme modeli parametreleri kullanılarak yaşlandırılmış kompozit numunelere ait çekme ve basma testleri sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir.

Yaşlandırmaya maruz kalmayan numunelerin sonlu elemanlar analizinde Mat 162 malzeme modeli kullanılmış olup, yaşlandırılmayan numunelerin analizlerinde parametreleri mevcut çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarından elde edilmiş olan yeni Mat 162 malzeme modeli kullanılmıştır.

Yaşlandırılmış ve yaşlandırma işlemine maruz kalmamış olan kompozit numunelere ait çekme testi deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında en fazla % 5,56 hata ile iyi bir uyum gözlenmiştir.

Benzer şekilde, yaşlandırılmış ve yaşlandırma işlemine maruz kalmamış olan kompozit numunelere ait basma testi deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise en fazla % 4,26'lık bir fark görülmüştür.

Sonuçlar, çalışma kapsamında elde edilen malzeme modellerinin doğruluğunu ortaya koymuştur. Mevcut çalışma geliştirilerek, belirli bir zaman aralığı için (120 günlük) yaşlandırılan kompozit malzemeye ait malzeme modeli parametreleri zamana bağlı olarak tanımlanarak çok daha uzun süreler için yaşlandırmaya maruz kalan kompozit malzemelerin hasar analizlerinin yapılabilmesi düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 19353 proje nosuyla desteklenmiştir. HÜBAP biriminin 19353 numaralı projesi kapsamındaki desteği için teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Demircan, M. Kısa, M. Özen, B. Aktaş, Surface-modified alumina nanoparticles-filled aramid fiber-reinforced epoxy nanocomposites: preparation and mechanical properties, *Iranian Polymer Journal*, 29(3) (2020) 253-264.
- [2] M. Özen, G. Demircan, M. Kısa, A. Açıköz, G. Ceyhan, Y. Işiker, Thermal properties of surface-modified nano-Al₂O₃/kevlar fiber/epoxy composites, *Materials Chemistry and Physics*, 278 (2022) 125689.
- [3] İ. Dursun, Cam Elyaf Takviyeli Polimerlerin Değişik Sıcaklıklarda Mekanik Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [4] G. Demircan, M. Kısa, M. Özen, A. Açıköz, Quasi-Static Penetration Behavior of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Nanocomposites, *Mechanics of Composite Materials*, 57(4) (2021) 503-516.
- [5] J. B. Bai, J. Xiong, R. A. Sheno, Q. Wang, A micromechanical model for predicting biaxial tensile moduli of plain weave fabric composites, 52-5 (2017) 333-343.
- [6] M. L. Realf, M. C. Boyce, S. Backer, A Micromechanical Model of the Tensile Behavior of Woven Fabric, *Textile Research Journal*, 67-6 (1997) 459-464.
- [7] J. Bai, J. Xiong, M. Liu, Z. Man, Analytical Solutions for Predicting Tensile and Shear Moduli of Triaxial Weave Fabric Composites, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29-1 (2016) 60-77.
- [8] J. Bai, Z. Wang, A. Sobey, A. Sheno, Micromechanical model for rapid prediction of plain weave fabric composite strengths under biaxial tension, *Composite Structures*, 255 (2021) 112888.

- [9] D. Cai, J. Tang, G. Zhou, X. Wang, C. Li, V. Vadim, Silberschmidt, Failure analysis of plain woven glass/epoxy laminates: Comparison of off-axis and biaxial tension loadings, *Polymer Testing*, S0142-9418(2017)30261-1.
- [10] G. Hivet, P. Boisse, Consistent mesoscopic mechanical behaviour model for woven composite reinforcements in biaxial tension, *Composites: Part B*, 39 (2008) 345–361.
- [11] N.V. De Carvalho, S.T. Pinho, P. Robinson, Numerical modelling of woven composites: Biaxial loading, *Composites: Part A*, 43 (2012) 1326–1337.
- [12] Z. Qiu, W. Chen, C. Gao, Y. Hub, Experimental and numerical study on nonlinear mechanical properties of laminated woven fabrics, *Construction and Building Materials*, 164 (2018) 672–681.
- [13] N.K. Naik, S.I. Tiwari, R.S. Kumar, An analytical model for compressive strength of plain weave fabric composites, *Composites Science and Technology*, 63 (2003) 609–625.
- [14] E. J. Barbero, J. Trovillion, J. A. Mayugo, K.K. Sikkil, Finite element modeling of plain weave fabrics from photomicrograph measurements, *Composite Structures*, 73 (2006) 41–52.
- [15] A. Gasser, P. Boisse, S. Hanklar, Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements 3D simulations versus biaxial tests, *Computational Materials Science*, 17 (2000) 7-20.
- [16] S. Sridharan, Performance Evaluation of Two Progressive Damage Models for Composite Laminates under High Velocity Projectile Impact, Master of Science, 2017.
- [17] K. A. Brown, Finite Element Modelling Of The Static and Dynamic Impact Behaviour of Thermoplastic Composite Sandwich Structures, Doctorat thesis, 2007.
- [18] B. A. Gama, T. A. Bogetti, J. W. Gillespie, Progressive Damage Modeling of Plain-Weave Composites using LS-Dyna Composite Damage Model MAT162, 7th European Ls-DYNA Conference, Salzburg (Austria), 2009.
- [19] P. Ghabezi, N. Harrison, Mechanical Behavior and long-term life prediction of carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates under artificial seawater environment, *Materials Letters*, 261 (2020) 127091.
- [20] H. LÍ, K. Zhang, X. Fan, H. Cheng, G. Xu, H. Suo, Effect of seawater ageing with different temperatures and concentrations on static/dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B*, 173 (2019) 106910.