

BAZALT ELYAF / TERMOPLASTİK TABAKALI KOMPOZİTLERİN BURKULMA DAVRANIŞI

Özgür YALÇIN¹, Mustafa PEÇEN², Abdulkadir ŞİMŞEK³, Tolga MERDAN⁴, Mesut UYANER⁵
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

Orçun ÖZGÜN⁶
Yalova Üniversitesi, Yalova

ÖZET

Bu proje sektörde kullanılan kompozit türlerinin doğaya verdikleri zararlara dikkat çekerek, çevreci kompozitlerin burkulma dayanımını, çevreci olmayanlar ile karşılaştırmaktadır. Alternatif ürün olarak doğal kayalardan üretilen Bazalt elyafa ve geri dönüştürülebilir termoplastik Elium reçinesine sahip bir kompozit sistemi oluşturulmuştur. Bazalt/Elium kompozitlerin burkulma dayanımları Cam/Epoksi ve Grafit Epoksi ile karşılaştırılmış ve Bazalt/Elium kompozit sisteminin aynı koşullarda daha yüksek burkulma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir.

GİRİŞ

Son yıllarda çevre sorunlarına olan ilginin artması, polimer bazlı kompozitlerde doğal liflerin kullanımını teşvik etmiştir. Birçok türde doğal lif incelenmiş olup, bunlar arasında bitkisel lifler, termal ve higroskopik yüklere karşı çok hassas olup sınırlı mekanik özellikler göstermektedir. Bitkisel liflerin dezavantajlarını aşarken çevresel sorunları da göz önünde bulunduran olası bir çözüm, bazalt gibi doğal mineral liflerin kullanılmasıdır.

Gerçekten de bazalt lifleri seçilmiş erimiş bazalt kayalarından yüksek sıcaklıklarda eğrilir ve üretimleri, cam liflerinde olduğu gibi ikincil ham bileşenlerin eklenmesini gerektirmez. Bu nedenle, son yıllarda sürekli veya kısa bazalt lifleri, polimer matrisli kompozitlerdeki potansiyel uygulamaları açısından incelenmiştir. Kayaların özel doğasına bağlı olarak, farklı kimyasal bileşimler ve mekanik özelliklere sahip farklı bazalt lifi kategorileri elde edilebilir. Son nesil bazalt lifleri, mükemmel ses yalıtımı özellikleri, camdan daha yüksek ısı direnci ve birçok kimyasala karşı iyi direnç ile karakterizedir (Kompozit malzeme nedir? - çeyrek mühendis, n.d.). Bitkisel liflere kıyasla, bazalt lifleri cam liflerine benzer, bazı durumlarda ise daha yüksek mekanik performanslar gösterir. Diğer yandan, bazalt liflerinin maliyeti, E-cam liflerinden daha yüksek olmasına rağmen, S-cam liflerinden daha düşüktür, bu da bu malzemeyi çeşitli endüstriyel alanlarda cam liflerinin yerine geçmeye uygun hale getirir. Bazalt liflerinin polimer matrisli kompozitlerdeki uygulamalarının yanı sıra, biyonik petek paneller ve ahşap-plastik kompozitler gibi başka yeni uygulama alanları da bulunmaktadır.

¹ Öğrenci, Uçak Müh. Böl., E-posta: ozgurvalcin2858@gmail.com

² Öğrenci, Uçak Müh. Böl., E-posta: mustafapcn6@icloud.com

³ Öğrenci, Uçak Müh. Böl., E-posta: abdulkadirsimsek56@gmail.com

⁴ Öğrenci, Uçak Müh. Böl., E-posta: tolgamerdanhotmailcom58@gmail.com

⁵ Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: muyaner@erbakan.edu.tr

⁶ Yüksek Lisans Öğrencisi, Polimer Malzeme Müh. Böl. E-posta: orcun.ozgun@gmail.com

Termoplastik matrisli kompozitlere özel önem verildiğinde, farklı çalışmalar bu liflerin cam liflerinin yerine geçme potansiyelini göstermiştir. Bununla birlikte, etkin bir güçlendirme sağlamak için matris ve bazalt lifleri arasındaki yapışma özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiği gösterilmiştir. Bu, liflerin yüzey modifikasyonu ile, ki bu termal veya kimyasal işlemle gerçekleştirilebilir veya polimer matrisinin çeşitli uyumlaştırıcıların eklenmesi ile hacimsel modifikasyonu ile yapılabilir. Bunlar arasında maleik anhidritle aşılınmış polipropilen (PPgMA) en yaygın kullanılanıdır. Bazalt lifleri söz konusu olduğunda, genellikle karbon lifleri için benimsenen termal işlem, uygun bir çözüm teşkil etmez, çünkü sıcaklığın 300°C'nin üzerine çıkması, liflerin kristal yapısındaki bir değişime bağlı olarak ciddi şekilde zayıflamasına yol açar.

Bazalt lifleri ile termoplastik matris arasındaki yapışma özelliklerinin iyileştirilmesi genellikle darbe direnci, akma mukavemeti veya kısa kırış kayma mukavemeti gibi dolaylı ölçümlerle belirlenir. Öte yandan, tek lif parçalanma testleri (SFFT) gibi doğrudan ölçümler, matris ve takviye arasındaki arayüz kayma mukavemetinin (IFSS) doğrudan ölçümünü sağlar.

YÖNTEM

Bazalt Elyaf

Bazalt, silika içeren ve ince taneli yapıya sahip olan magmatik bir kaya türüdür. Dayanıklı yapısı ve dünyanın en yaygın ham maddelerinden biri olması nedeniyle çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazalt elyafın ham maddesi ise volkanik püskürük kaya hâlinde bulunur ve doğal termal ve kimyasal kararlığa sahiptir. Bu sayede kullanımı esnasında sağlığı riske atacak olumsuz bir durumda meydana gelmemektedir (Bazalt Elyaf Nedir? | Carbonier, n.d.).



Şekil 1: Magmatik Bazalt Kaya Taneleri (Bazalt Elyaf Nedir? | Carbonier, n.d.)

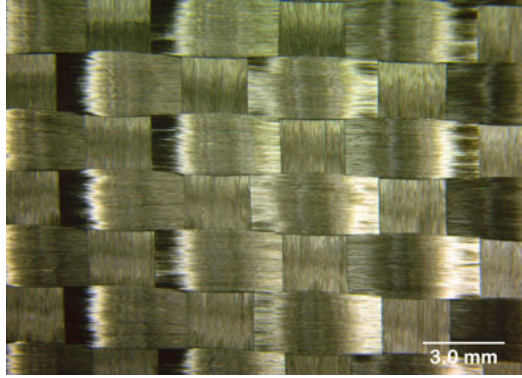
Tablo 1: Bazalt Elyaf Özellikleri

Özellik	Değer	
Termo-Fiziksel		
Çalışma Sıcaklığı	-296-700 C°	
Bağ Sıcaklığı	1050 C°	
Termal İletkenlik	0.03 ~ 0.038	
Fiziksel		
Filaman Çapı	7 ~15	
Yoğunluk	2650	
Elastikiyet Katsayısı	10.000 ~11.000	
Kimyasal Kararlılık		
2N HCl	2,20%	
2N NaOH	6,00%	
H ₂ O	0.2%	

Bazalt Elyafın Avantajları

Bazalt elyaf cam elyafa kıyasla üstün mekanik özellikleri, karbon elyafı ile karşılaştırıldığında düşük fiyatı ve aynı zamanda çevreye duyarlı olması nedeniyle son yıllarda oldukça tercih edilmektedir. Bazalt elyaf sahip olduğu yeşil üretim ve kolay geri dönüşüm, kimyasallara karşı yüksek direnç ve geniş çalışma sıcaklığı gibi özellikleri ile asbestin yerine kullanılacak bir alternatif olarak görülmektedir.

Bazalt fiber kompozitlerinin en önemli özelliği, yüksek sıcaklık dayanımıdır. Bu özellikleri sayesinde, uçak motorları, egzoz sistemleri ve termal koruyucu kaplamalar gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır.



Şekil 2: Bazalt elyaftan yapılmış dokuma bir kumaş (Chawla, 1998)

Bazalt fiber kompozitlerinin bir diğer avantajı da yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonudur. Bu malzemeler mukavemet olarak en az çelik kadar iyi olmasına rağmen daha hafiftirler. Bu özelliği sayesinde, otomotiv endüstrisinde yakıt verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan hafif ve dayanıklı parçaların üretiminde kullanılır. Ayrıca, havacılık sektöründe uçak gövdeleri, kanatlar ve iç mekân bileşenleri gibi parçaların üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bazalt fiber kompozitlerinin kimyasal direnci de dikkate değerdir. Bu malzemeler, çeşitli kimyasallara karşı dayanıklılık gösterir ve korozyona karşı dirençlidir. Bu özellikleri sayesinde, kimyasal endüstrilerde boru kaplamaları, tanklar ve depolama sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Elium Reçinesi

Elium reçinesi sürekli cam, karbon veya doğal elyaflarla güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin üretimine yönelik kullanılabilir. Elium termosetlere benzer mekanik özelliklere sahip kompozit parçaların üretimi için tasarlanmış sıvı termoplastik bir reçinedir. Elium reçinesinin en büyük avantajı ise termoplastik gibi davranmasıdır. Bu özelliği sayesinde ısıyla şekillendirme ve geri dönüşüm amacıyla kullanılabilir (Elium® Liquid Thermoplastic Resin for Arkema | UL Prospector, n.d.).

Elium reçinesi günlük üretilecek parça sayısına ve parçanın özelliklerine bağlı olarak RTM (reçine transfer kalıplama), infüzyon, el ile yatırma ve pultrüzyon yöntemleriyle işlenebilir. Elium reçinesi günümüzde termoset kompozitler için kullanılanlara benzer ekipmanlarla, benzer polimerizasyon döngü süreleri ve koşullarıyla işlenebilir. Ayrıca tamamen geri dönüştürülebilir olmasının yanı sıra, düşük viskozite, uzun reaktivite ve düşük ekzotermik reaksiyon özellikleriyle büyük parçaların reçine infüzyon prosesine uyarlanabilir (Arkema Elium® 150 Thermoplastic Resin for Composites, n.d.).

Elium düşük viskozitesi sayesinde oda sıcaklıklarında iyi seviyede elyaf emprenyesi sunabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda termoform prosesine uygundur. Güç, dayanıklılık ve darbe direnci bakımından epoksi ile yakın özelliklere sahiptir. Elium stiren içermemektedir. Stiren, yanıcı, akut toksisitesi olan bir maddedir. Fazla miktarda maruz kalındığında santral sinir sistemi irritasyonu yapabilen sıvı özellikli bir maddedir. Tatlı bir kokuya sahip olan stiren; polistyrene plastikler, cam elyafı, kauçuk ve lateks yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Tablo 2 Elium reçinesinin geleneksel epoksi ile karşılaştırmalı özelliklerine yer vermektedir.

Tablo 2: Reçine Özellikleri

Özellikler	Epoksi	Elium
Çekme Dayanımı (MPa)	250	343
Elastisite Modülü (GPa)	9	11
Yüzde Uzama (%)	4.8	> 20

Ayrıca Elium reçinesi ile imal edilen kompozit yapılar delaminasyon onarımı gerektiren durumlarda ısıyla şekillendirilerek tamir gerçekleştirilebilmektedir. Elium reçinesi sonradan şekillendirmeye izin vermektedir. Ayrıca iyi seviyede yüzey kalitesi sunmaktadır.

Laminaların Mikromekanik Analizi

Laminaların mikromekanik analizi yapılırken sırasıyla elyaf ve matris hacim oranlarına ihtiyaç vardır. Elyaf ve matris hacim oranlarını ve arasındaki ilişkiyi veren bağıntılar:

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} \quad V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad V_f + V_m = 1 \#(1)$$

Boylamasına ve enine elastisite modülü (E_1 & E_2): Kompozit lamina üzerine gelen yükün fiber ve matris tarafından paylaşılacağı düşüncesinin Hooke yasası ile harmanlanması ile boyuna elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Burada hesaplamada yapılan temel kabul birim uzamaların eşit olmasıdır (Kaw, 1997).

$$\varepsilon_{f1} = \varepsilon_{m1} = \varepsilon_1 \#(2)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \#(3)$$

Enine doğrultuda gerilmeye maruz kompozitlerde ise kompozitteki gerilme fiber ve matristeki gerilmelere eşittir.

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \#(4)$$

Bu durumda kompozitteki enine uzama fiber ve matrisin enine uzamalarının toplamına eşittir.

$$\Delta_c = \Delta_f + \Delta_m \#(5)$$

Bu kabuller Hooke Yasası ile birleştirildiğinde Enine Elastisite Modülü belirlenir.

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \#(6)$$

Major/Minör Poisson oranı: Major Poisson oranı, boylamasına (1 yönünde) normal yük uygulandığında enine (2 yönünde) normal şekil değiştirmenin boylamasına (1 yönünde) normal şekil değiştirmeye oranının negatifi olarak tanımlanır. Enine doğrultudaki (2 yönündeki) kompozit deformasyonu, aynı doğrultudaki fiber ve matris deformasyonlarının toplamına eşittir (Kaw, 1997).

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \#(7)$$

Denklem normal şekil değiştirme tanımı kullanılarak son haline getirilir.

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \#(8)$$

Bir ortotropik kompozit tabakacığın direngenlik matrisinin simetrik olması koşulundan Minör Poisson oranı için aşağıdaki bağıntı yazılır:

$$v_{21} = v_{12} \frac{E_2}{E_1} \#(9)$$

Kayma modülü: Kompozitin kayma deformasyonu, fiber ve matrisin kayma deformasyonlarının toplamına eşittir.

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \#(10)$$

Fiber, matris ve kompozitteki kayma gerilmelerinin eşit olduğu kabulü yapılarak ve Hooke yasası Denklem 8'deki eşitlikle birlikte kullanılarak kayma modülü elde edilir.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \#(11)$$

Klasik Laminasyon Teorisi

Klasik laminasyon teorisi, bir tek laminaya ait olan özellikler olan [Q], [S] vb. matrislerin de kullanımıyla bir laminata ait olan mekanik özelliklerini belirtildiği matrisler olan [A], [B] ve [D] matrislerinin bulunması için kullanılmaktadır. Bu matrisler sırasıyla uzama direngenlik matrisi, bağlantı direngenlik matrisi ve eğilme direngenlik matrisi olarak adlandırılır.

Burkulma hesabı için [D] eğilme matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Eğilme matrisinin hesaplanabilmesi için sırasıyla [Q] direngenlik matrisi ve $\overline{[Q]}$ indirgenmiş matrisinin hesaplanması gerekmektedir.

[Q] Direngenlik Matrisi Hesabı: Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında işlemleri kolaylaştırmak için Gevşeklik Matrisi ve Direngenlik Matrisi gibi matrisler türetilmektedir. Q Matrisi indirgenmiş hale getirildiğinde [A], [B],[D] matrislerinin ana yapı taşını oluşturmaktadır (Kaw, 1997).

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \#(12)$$

Bu eşitlikteki bilinmeyenler mikromekanik analizler ile hesaplanan malzeme özellikleri kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

$$[Q_{11}] = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \#(13)$$

$$[Q_{12}] = \frac{\nu_{12}E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \#(14)$$

$$[Q_{22}] = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \#(15)$$

$$[Q_{66}] = G_{12} \#(16)$$

[\bar{Q}] İndirgenmiş Matrisinin Hesabı: İndirgenmiş [\bar{Q}] Matrisindeki değişken fiber yönlerinin açısı olmuştur. [Q] matrisini hesaplanırken yalnızca lamina hesabı yapıldığının bu açı işleme alınmamaktadır. İndirgenmiş [\bar{Q}] Matrisi fiber yönelim açılarını da dikkate alarak bu matrisi laminatlarda kullanıma uygun hale getirir.

$$[\bar{Q}] = \left[\bar{Q}_{11} \quad \bar{Q}_{12} \quad \bar{Q}_{16} \quad \bar{Q}_{12} \quad \bar{Q}_{22} \quad \bar{Q}_{26} \quad \bar{Q}_{16} \quad \bar{Q}_{26} \quad \bar{Q}_{66} \right] \#(17)$$

[Q] matrisinin [\bar{Q}] matrisine dönüştürülebilmesi için ise trigonometrik gerilme, gerilme dönüşümleri kullanılmaktadır.

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \#(18)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \#(19)$$

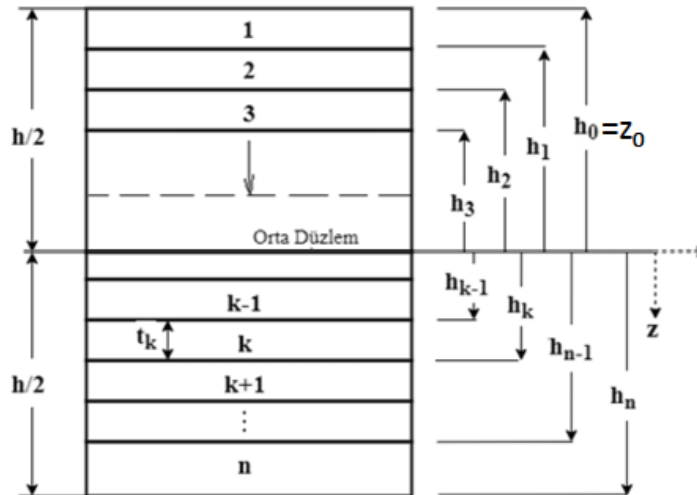
$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(s^4 - c^4) \#(20)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 \#(21)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 \#(22)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \#(23)$$

Tabakalı Yapının Kodlanması: Eğilme matrisinin hesaplanabilmesi için laminat tabakalarının doğru bir biçimde kodlanması gerekmektedir. Orta düzleme göre yapılacak olan hesaplarda tabakaların orta düzleme olan uzaklıkları önemli rol oynamaktadır. Şekil 3'te gösterildiği üzere her tabakanın alt yüzeyinin orta düzleme olan uzaklığı bize o tabakanın yüksekliğini vermektedir (Kaw, 1997).



Şekil 3: Tabakalı Yapıların Kodlanması

Tabakalama işleminde sıralama yukarıdan aşağıya yapılmalı ve 1. Tabakanın üst yüzeyinin orta düzleme uzaklığı h_0 olmalıdır. Orta düzlem aynı zamanda yapının z eksenini olduğundan h değerleri z koordinatına karşılık gelmektedir. Orta düzlem 2 tabaka arasında olabileceği gibi bir tabakanın içerisinden geçiyor da olabilir.

[D] eğilme matrisinin hesabı: [A], [B], [D] matrisleri temelde birleşmiş genel bir 6×6 matris oluşturur. Bu matris tabakalı kompozit yapının şekil değiştirmesi ve eğriliklerinin, yapıya etkiyen kuvvetler sonucu oluşan iç kuvvetler ve iç momentlerin değerlerini vermektedir. Bu genel matris Denklem 24'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} N_x & N_y & N_{xy} & M_x & M_y & M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & A_{12} & A_{22} & A_{26} & A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & B_{12} & B_{22} & B_{26} & B_{16} & B_{26} & B_{66} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & B_{12} & B_{22} & B_{26} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$$

Eşitlikteki bilinmeyen olan [A], [B], [D] matrisleri, $[\bar{Q}]$ indirgenmiş matrisi ve tabakalı yapının h yükseklikleri kullanılarak bulunabilmektedir.

$$[A] = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (h_k - h_{k-1}) \quad \#(25)$$

$$[B] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad \#(26)$$

$$[D] = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad \#(27)$$

Bazı özel durumlarda bu matrislerin hesaplanmasına gerek duyulmaz. Bu matrislerin hesaplanmasından önce bu özel durumlar kontrol edilmelidir:

1. Malzeme, geometri, yük, fiber dizilişi gibi özellikleri orta düzleme simetrik olan yapılarda $[B]=0$ olur.
2. Simetrik olan yapılarda iç momentlerin hepsi sıfır olursa malzemelerin eğrilikleri de sıfır olacaktır.

$$M_x = M_y = M_z = 0 \Rightarrow \kappa_x = \kappa_y = \kappa_{xy} = 0 \quad \#(28)$$

Bu durumda [D] matrisi işlemlere katılmayacağından hesaplanması gerekli olmamaktadır.

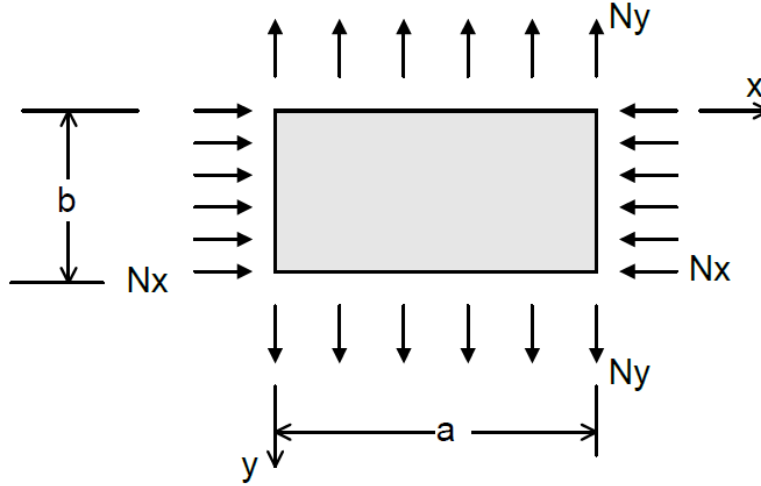
3. Tabakalı yapılarda orta düzlemde meydana gelen gerilmeler ve şekil değiştirmeler incelendiğinde orta düzlemin z koordinatı sıfır olacağından tüm eğrilik değerleri de sıfır olacaktır. Eğrilik değerleri olmadığından [D] matrisi hesaplamaya gerek duyulmamaktadır.

Burkulma Yükü Hesabı

Kompozit plakalar, sıkıştırma ve/veya kesme yükü altında burkulma arızalarına karşı oldukça hassastır. Kirişlerde burkulma genellikle nihai kırılmaya yakınken, plakalar önemli ölçüde burkulma sonrası kapasiteye sahip olabilir. Ancak, kompozit levhaların burkulma sonrası davranışını, olası çökme modlarını ve bu modların etkileşimlerini doğru bir şekilde anlamak gerekir. Pekiştirilmiş bir panelde, burkulma sonrası sertleştirilmiş panellerde kabuk-pekiştirici ayrılması modu oldukça yaygın olup, erken arızalara sebep olabilir. Uygulama bazında, burkulmayı göz önünde bulundurarak tasarım yapmak ve burkulma sonrası kapasiteyi ekstra güvenlik payı olarak kullanmak olası yaklaşımlardan biridir. Farklı yükleme kombinasyonları ve sınır koşulları için

burkulma yükünün doğru hesaplanması, burkulma sonrası panellerde bile tasarım açısından büyük önem taşır (Kassapoglou, 2013).

İki Eksenli Yükleme Altında Dikdörtgen Kompozit Plakanın Burkulması: Burkulma denkleminin türetilmesi ve temel hesaplamalar Whitney tarafından belirtilen yaklaşımları baz almaktadır. İki eksenli basma ve çekme yüklerine maruz kalan plaka gösterimi Şekil 4'de yapılmaktadır (Kassapoglou, 2013).



Şekil 4: Kompozit Plaka Üzerinde İki Eksenli Yükleme

Kompozit plakaların iki eksenli yük altında burkulma yükünü veren bağıntı Denklem 29'da verilmiştir.

$$N_0 = \frac{\pi^2 [D_{11}m^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})m^2n^2(AR)^2 + D_{22}n^4(AR)^4]}{a^2(m^2 + kn^2(AR)^2)} \quad \#(29)$$

Burada AR en/boy oranı olup $AR=a/b$ dir. İki eksenli yükleme oranı da k ile belirtilmiş olup $k=N_y/N_x$ eşitliği ile verilmektedir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bazalt/Elium kompozitlerin burkulma hesaplamalarının yapılabilmesi için laminaların makromekanik analizleri ve mikromekanik analizleri hesaplanmalıdır. Elde edilen veriler ve belirlenen yükleme ile laminatların makromekanik hesaplamaları klasik laminasyon teorisi kullanılarak yapılmalı ve eğilme esneklik matrisleri (D matrisi) hesaplanmalıdır. D matrisi kullanılarak malzemenin burkulma yükü N_0 hesaplanır.

Bazalt / Elium Temel Özellikleri

Literatürden elde edilen veriler ışığında Bazalt fiberler ve Elium matris mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kabul edilen veriler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3: Fiber Matris Mekanik Özellikleri

Malzeme Özelliği	Bazalt Fiber	Elium Reçine
Elastisite Modülü (E) [GPa]	85	3,17
Poisson Oranı (ν)	0,2	0,37
Çekme Mukavemeti $\sigma_{T(ult)}$ [MPa]	3000	66
Kayma Kopma Mukavemeti $\tau_{(ult)}$ [MPa]	35	34
Basma Mukavemeti $\sigma_{C(ult)}$ [MPa]		116

Laminaların Mikromekanik Analizi

Laminaların mikromekanik analizleri yapılmadan önce elyaf hacim oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sektörde çok kullanılan fiber hacim oranları kullanılacaktır. Belirlenen elyaf hacim oranları 50%, 60% ve 70%'tir.

1 ve 2 yönündeki Elastisite Modülü, Majör ve Minör Poisson Oranları ve Kayma Modülü Denklem 3, 6, 8, 9 ve 11 kullanılarak hesaplanmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4: Bazalt / Elium Kompozitin Farklı Fiber Hacim Oranlarında Mekanik Özellikleri

Fiber Oranı	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	ν_{12}	ν_{21}	G_{12} [GPa]
50%	44,1	6,11	0,285	0,0395	2,24
60%	52,3	7,51	0,268	0,0385	2,76
70%	60,5	9,72	0,251	0,0404	3,58

Tek yönlü laminanın maksimum mukavemet değerleri hesaplanmış ve sonuçları Tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 5: Bazalt/Elium Laminanın Maksimum Mukavemetleri

Fiber Oranı	$\left(\sigma_1^T\right)_{ult}$	$\left(\sigma_1^C\right)_{ult}$	$\left(\sigma_2^T\right)_{ult}$	$\left(\sigma_2^C\right)_{ult}$	$\left(\tau_{12}\right)_{ult}$
50%	1555,9	746,8	29,6	51,9	15,02
60%	1844,8	643,8	24,8	43,5	12,5
70%	2133,6	457	18,4	32,4	12,5

Kuvvetler ve Tabakalama Kabulleri

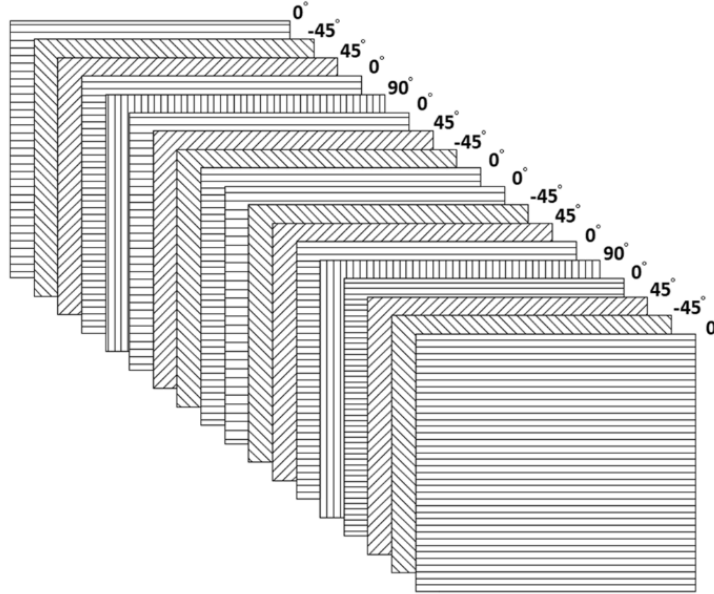
Burkulma hesaplamalarının yapılabilmesi için kompozit plakanın ölçülerinin belirlenmesi ve yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple bazı kabuller yapılmıştır. Belirlenen yükler ve boyutlandırma Tablo 6'da verilmiştir. Bu iki bileşenin hesaplanması sonucu hesaplanan iç kuvvetler Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 6: Kuvvet ve Boyutlandırma

F_x [Kn]	F_y [kN]	F_{xy} [kN]	x yönündeki uzunluk [mm]	y yönündeki uzunluk [mm]
16	-8	6	400	400

Tablo 7: İç Kuvvetler

N_x [N/mm]	N_y [N/mm]	N_{xy} [N/mm]
40	-20	15



Şekil 5: Yarı-izotrop laminat (Uyaner et al., 2023)

Tabakalar arasındaki açılar ise literatürde bulunan yarı-izotrop (Quasi-isotropic) laminat yönelimleriyle Şekil 5'de görüldüğü gibi [0/-45/45/0/90/0/45/-45/0] yerleştirilmiş ve tabaka kalınlıkları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Tabaka Açıları ve Kalınlıkları

Tabaka Açısı [derece]	Tabaka Kalınlığı [mm]
0	0,2
-45	0,2
45	0,2
0	0,2
90	0,2
0	0,2
45	0,2
-45	0,2
0	0,2
Toplam Kalınlık: 1,8	

Klasik Laminasyon Teorisi Kullanılarak Eğilme Matrisi Hesaplanması

Klasik laminasyon teorisi ile tabakalı kompozit hesabı yapıldığında [D] Eğilme matrisi belirlenmiştir. D eğilme matrisinin değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9: Eğilme Matrisi Terimleri

D_{11}	69764	[MPa]	D_{16}	1561,3	[MPa]
D_{12}	22322,4	[MPa]	D_{26}	1561,3	[MPa]
D_{22}	58543,7	[MPa]	D_{66}	23205,8	[MPa]

Kritik Burkulma Yükünün Hesaplanması

Kritik burkulma yükü hesabı yapılırken burkulma modlarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple burkulma yükü hesabı yapılırken farklı modlarda hesaplama yapılmalı ve en düşük burkulma yükü belirlenmelidir. Bu modlar her iki yükleme olan yönde de değerlendirmeye alınarak x yönünde “m” adet burkulma modu (burkulma noktası), y yönünde ise “n” adet burkulma modu bulunmaktadır.

Denklem 29'daki burkulma yükü denklemini kullanılarak yapılan farklı modlardaki hesaplama sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

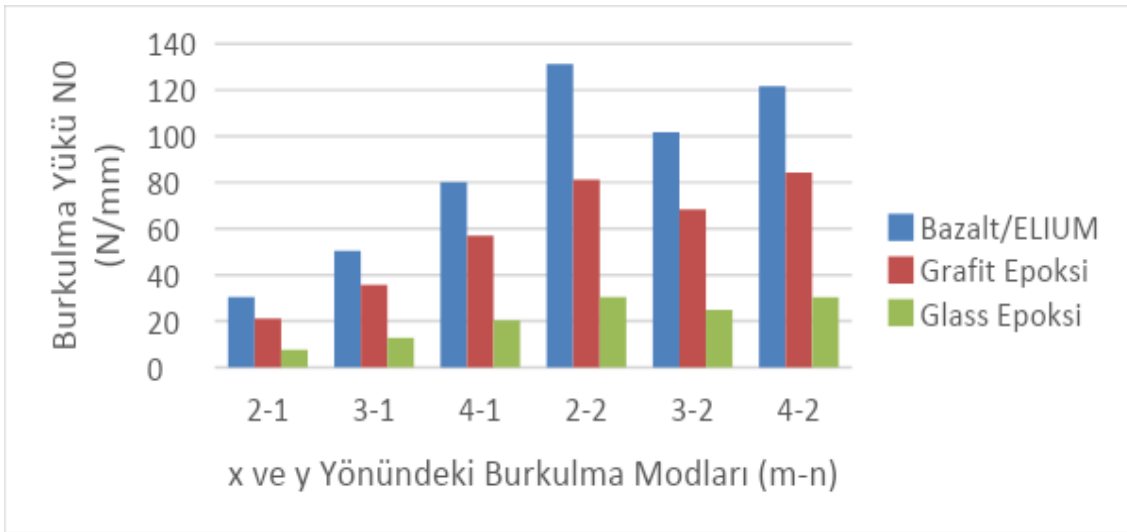
Tablo 10: Farklı Modlarda Burkulma Yükü Değerleri

m	2	3	4	2	3	4
n	1	1	1	2	2	2
N₀ [N/mm]	30,3956	50,4122	80,0617	131,155	101,661	121,582

SONUÇ

Bu çalışmada Bazalt Elyafı, Elium Reçine Matrisli bir tabakalı kompozitin burkulma hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda farklı kompozitlerle karşılaştırılacak düzeyde veriler teorik hesaplamalarla elde edilmiştir. Bazalt/Elium kompozitlerin diğer kompozitlerden temel farkı olan geri dönüştürülebilir olması ve çevre dostu kompozitler olarak bilinen Yeşil Kompozit kategorisine giriyor olmasıdır.

Bazalt/Elium kompozitlere yarı-izotrop laminat serimine uygun laminat yapılarında laminasyon yapılmış ve burkulma için gerekli veriler mikromekanik analizler ve klasik laminasyon teorisi hesaplamaları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak burkulma yükü hesabı gerçekleştirilmiştir. Burkulma yükünün hesaplanmasında x ve y yönündeki değişken mod sayılarına göre birim uzunluktaki burkulma yükleri hesaplanmıştır ve düşük burkulma yükünü veren modlar değerlendirilmiştir.



Şekil 6: Değişik Mod Sayıları İçin Elde Edilen Burkulma Yüğü

Şekil 6'da aynı mod değerlerinde farklı fiber/matris yapılarına sahip kompozitler Bazalt/Elium kompozit ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu karşılaştırmalarda kompozitlerin laminasyon özellikleri birebir aynı tutulmuş ve yalnızca burkulma özelliklerinin kıyaslanması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda minimum burkulma yükü kabulü yapılmalıdır. Bunun sebebi yükleme esnasında ilk ulaşılan yük değerinin burkulma yükü olmasıdır.

Şekil 6 incelendiğinde aynı mod indislerinde Bazalt/Elium kompozitlerin burkulma yükü dayanımlarının Grafit/Epoksi ve Cam/Epoksi kompozitlerine oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu bağlamda burkulma ihtimali olan parçaların tasarımlarında Grafit/Epoksi ve Cam/Epoksi alternatifi olarak Bazalt/Elium kompozitlerin kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği öngörülmektedir (Kassapoglou, 2013).

Bazalt/Elium kompozitleri diğer kompozitlerden ayıran en temel farklar hem fiber hem de matris malzemelerinin organik tabanlı ve çevreci bir yapıda olmasıdır. Bazalt fiberler volkanik kayalardan üretilmektedir ve tamamen doğaldır. Elium reçine ise bir termoplastik polimer olduğundan dolayı geri dönüştürülebilmektedir. Diğer kompozitlerin hem fiber ve matris üretimi esnasında hem de laminasyon işlemi esnasında doğaya zararlı gazlar salınmasına sebep olması ve bu kompozitlerden oluşan atık ürünlerin geri dönüştürülebilmesi Bazalt/Elium kompozitleri ön plana çıkartmaktadır.

Bazalt/Elium kompozitin çevreci etkilerinin yanı sıra aynı zamanda diğer kompozitlere göre burkulma dayanımının daha yüksek olması dikkat çekmektedir. Sektörde birçok kullanım alanı bulunan bu çevreye zararlı kompozitler yerine tamamen çevreci özellikleri ve yüksek burkulma dayanımı sağlaması sebebiyle Bazalt/Elium kompozitlerin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Kaynaklar

- Arkema Elium® 150 Thermoplastic Resin for Composites. (n.d.). Retrieved June 21, 2024, from <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=0e1933aada544b1ca8c05dfe4b93f24e>
- Bazalt Elyaf Nedir? | Carbonier. (n.d.). Retrieved June 21, 2024, from <https://www.carbonier.com/teknik-donatilar/bazalt-elyaf-nedir>
- Chawla, K. K. (1998). *Composite Materials : Science and Engineering*. 483.
- Elium® Liquid Thermoplastic Resin for Arkema | UL Prospector. (n.d.). Retrieved June 21, 2024, from <https://www.ulprospector.com/plastics/en/datasheet/403765/elium-c-445>

- Kassapoglou, C. (2013). Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures: Second Edition. *Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures: Second Edition*, 1–390. <https://doi.org/10.1002/9781118536933>
- Kaw, A. K. (1997). *Mechanics of composite materials*. 329.
- Kompozit malzeme nedir? - çeyrek mühendis*. (n.d.). Retrieved June 22, 2024, from <https://www.ceyrekmuhendis.com/kompozit-malzeme-nedir/>
- Uyaner, M., Kara, M., Kepir, Y., & Gunoz, A. (2023). Virtual Testing of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, 47(2), 595–610. <https://doi.org/10.1007/S40997-022-00527-8/METRICS>