



## **Kesikli Cam Liflerinden Oluşturulmuş Dokusuz Kumaşların Sıkıştırılabilirliği.**

### **Compressibility of Nonwoven Fabrics from Chopped Glass Strands.**

**Mehmet Erdem İNCE** 

Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, P.K. 27310, Şehitkâmil, Gaziantep, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author : [eince@gantep.edu.tr](mailto:eince@gantep.edu.tr); [meince@ncsu.edu](mailto:meince@ncsu.edu)

Geliş Tarihi / Received: 17.02.2019

DOI:10.21205/deufmd.2019216314

Kabul Tarihi / Accepted: 14.04.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

Atıf şekli/ How to cite: İNCE, M. E. (2019). Kesikli Cam Liflerinden Oluşturulmuş Dokusuz Kumaşların Sıkıştırılabilirliği. DEUFMD, 21(63), 845-857

#### **Öz**

Kompozit takviye kumaşlarının sıkıştırılabilirliği; kalıp tasarımı, reçine akışının modellenmesi ve nihai ürünün lif içeriğinin belirlenmesi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Maliyetlerinin düşük ve kolay işlenebilir olmalarından ötürü, cam lifinden üretilmiş dokusuz kumaşlar kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kesikli cam liflerinden üretilmiş dokusuz kumaşlarda; katman sayısının (1, 2 ve 3), sıkıştırma/rahatlama sürecinin, ıslaklık/kuruluk durumunun ve basıncın (2-200 kPa) lif içeriğine etkileri incelenmiştir. Bitişik kumaş katları arasında birbiri içine geçme (yuvalanma) olmadığı tespit edilmiştir. Kumaş kat sayısı lif hacimsel oranı üzerinde önemli bir etki gösterememiştir. Bu bulgu dokusuz kumaşlardaki lif yerleşiminin örgü ve dokuma kumaşlardan farklı olmasına dayandırılmıştır. Reçinenin yağlayıcı etkisinden dolayı, ıslak kumaşlar kuru kumaşlara nazaran daha düşük kalınlık ve buna karşılık daha yüksek lif hacimsel oranı sergilemişlerdir. Sıkıştırma süreçlerinin sertleştirme etkisinden ötürü, takip eden rahatlama süreçlerinde kumaşlar önemli seviyede daha yüksek lif hacimsel oranı sergilemişlerdir.

**Anahtar Kelimeler:** cam lifi, cam lifli dokusuz kumaş, sıkıştırılabilirlik, rahatlama, lif takviyeli kompozit

#### **Abstract**

Compressibility of composite reinforcement fabrics plays important role on the design of mold, the modelling of resin flow, and the fiber content determination of end-product. Due to their low costs, and easy-to-handle structures; nonwoven fabrics from glass fibers are widely-used by the composite industry. In this study; the effects of layer number (1, 2, and 3), compression/relaxation period, dry/wet status of the fabric, and the pressure (2-200 kPa) on the fiber content of nonwoven fabrics from chopped glass strands were investigated. The lack of nesting was detected between adjacent fabric layers. Number of layer did not affect the fiber volume fraction significantly. This finding was attributed to fiber placement of nonwoven fabric that is different than woven and knitted fabrics. Due to lubrication effect of the resin, wet fabrics exhibited lower thickness and correspondingly higher fiber volume fraction than dry fabric. Owing to stiffening effect of the compression periods, fabrics displayed significantly higher fiber volume fraction in the following relaxation periods.

**Keywords:** glass fiber, nonwoven glass fabric, compressibility, relaxation, fiber reinforced composite

## 1. Giriş

Yüksek ve isteğe göre tasarlanabilen özgül mukavemet ve esneklik modülü özelliklerinden ötürü; lif takviyeli polimer (LTP) malzemelerin, hayatımızın her alanındaki kullanımı her geçen gün artmaktadır. LTP'ler denizcilik (gemi tekne ve güvertesi üretiminde), havacılık (uçak ana gövdesi ve kanatlarında), taşımacılık (arabaların çarpmaya maruz bölgelerinde) ve savunma alanlarında (zırhlı araç imalatında) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yüksek lif içeriğine sahip kompozit parçalar elde etmek için, kompozit üretim sistemlerinin belli aşamalarında takviye malzemesi kalınlığı yönünde sıkıştırma basıncına maruz bırakılır. Takviye kumaşın kuru ve reçine ile ıslatılmış halde iken sıkıştırılma ve sıkıştırılma sonrası rahatlatma esnasında verdiği tepki, kalıbın kelepçelenmesinde (kalıp kapatıldıktan sonra mengenelerle sıkıştırılmasında) gerekli olan kuvvetleri belirlemektedir. Kumaşın sıkıştırılabilirliğini bilmek; reçine emdirme işleminin başarısında da önemli bir rol oynayarak; tamamen ıslatılmış, boşluk ve reçine mahrumu bölgeler içermeyen bir kompozit parçasının üretilmesini mümkün kılmaktadır [1-4]. Takviye kumaşın sıkıştırılabilirlik davranışı hakkında bilgi sahibi olmaksızın, sadece deneme yanılmaya dayalı olarak geliştirilen bir üretim sistemi değersiz (artık) malzeme miktarını arttırmaktadır [5]. Nihai kompozit malzeme ürününün mekanik özelliklerini kontrol eden lif hacimsel oranı da yine takviye kumaşın sıkıştırılabilme davranışı tarafından belirlenmektedir. Araştırmacılar sıkıştırma ve rahatlatma süreçlerini etkileyen parametreleri: takviye malzemesinin kumaş mimarisi, kumaş katman sayısı, kumaş istifleme dizilimi (sırası), yağlayıcı madde (reçine) varlığı, sıkıştırma hızı, maksimum sıkıştırma basıncı, sıkıştırma çevrim (döngü) sayısı (kalıbın kaç defa sıkıştırılıp akabinde rahatlatıldığı rakam); olarak sıralamıştır [6]. Bu çalışmada polimer reçine varlığının ve kumaş katman sayısının, kesikli cam liflerinden üretilmiş dokusuz takviye kumaşların çok katmanlı sıkıştırılmasına ve sıkıştırılma sonrası rahatlatılmasına olan etkisi ele alınmıştır. Bu bağlamda gözden geçirilen önceki çalışmaların özeti aşağıda verilmektedir.

Pearce ve Summerscales [7]; cam ipliğinden dokunmuş bez ayağı dokuma kumaşların tek ve çok katmanlı formda sıkıştırılma davranışını ölçmüştür. Tek kat kumaşlar, çok katmanlı

kumaşlara nazaran daha kolay sıkıştırılarak daha yüksek lif hacimsel oranı sergilemişlerdir. Komşu kumaş katları arasında yuvalanma (biri içine geçme) olmadığı gözlemlenmiştir. Tekrarlamalı sıkıştırma işlemi lif hacimsel oranını arttırmıştır.

Bir başka çalışmada; Lekakou, Johari ve Bader [8] geliştirdiği sıkıştırma modelini istiflenmiş iki boyutlu dokunmuş cam bez ayağı kumaşlarla doğrulamaya çalışmıştır. Araştırmacılar ayrıca sıkıştırma basıncının reçine akma geçirgenliğine etkisini de incelemişlerdir. Kumaş kat sayısının artmasıyla birlikte reçine akma geçirgenliğinin düşmesi, dokuma kumaş katmanları arasında yuvalanma olduğunu ortaya koymuştur.

Robitaille ve Gauvin [6]; cam lifinden ticari amaçlı olarak üretilen, rastgele lif yerleşimli dokusuz ve dokuma kumaş takviye malzemelerinin sıkıştırılma ve rahatlatma davranışlarının teorik ve deneysel olarak incelendiği, yayınlanmış (basılı) çalışmaları gözden geçirmiştir. Sıkıştırılma eğrilerinin analizi sonucu elde edilen bulgular şöyle sıralanmıştır; 1) kumaş katman sayısının artması ile birlikte kumaş yığının sıkıştırılma sertliği artmış (çok katlı kumaşlar daha zor sıkıştırılabilir bir hal almış), ve kumaş kat sayısı maksimum lif hacimsel oranını (lif içeriğini) düşürmüştür, 2) kumaş yığına uygulanan ardışık sıkıştırma ve rahatlatma süreçleri çevrim sayısının artırılması, kumaş yığının sertliğini ve maksimum lif hacimsel oranını (lif içeriğini) arttırmıştır. Kumaş yığınının sıkıştırılma sertliğini ve lif içeriğini arttırmak için yinelenmeli sıkıştırma ve rahatlatma süreçlerinin yapılmasının önemine vurgu yapılmıştır.

Luo ve Verpoest [9] sandviç kumaş ve bileşenlerinin (atıklı örme ve dokusuz yüzey cam elyaf kumaşın) sıkıştırma ve rahatlatma davranışlarını incelemiş ve sonuçlarını dokuma kumaş ile karşılaştırmıştır. Örgü kumaşın diğer kumaşlardan bir hayli daha geç rahatladığı gözlemlenmiştir. Kumaş katman sayısı; sandviç kumaşın, dokusuz kumaşın ve dokuma kumaşın sıkıştırılabilirliğini etkilemez iken; tekil örgü kumaşın sıkıştırılabilirliğini (dolayısıyla hacimsel lif oranını) olumlu yönde etkilemiştir. Bu sonuç örgü kumaşın, komşu katmanların birbiri içine geçmesine imkân sağlayan iç içe geçmiş, gözenekli ilmek yapısına dayandırılmıştır.

Potluri ve Sagar [10] ipliğin sıkıştırılma ve eğilme davranışlarını hesaba katarak bir kumaş

sıkıştırma modeli geliştirmiş ve bu modeli dokunmuş bez ayağı cam kumaşlar kullanarak doğrulamaya çalışmıştır. Araştırmacılar kumaş katmanları arasındaki yuvalanmanın önemine vurgu yaparak, iki boyutlu dokunmuş kumaşlardan oluşturulmuş kumaş istiflerinde komşu katlar arasındaki yuvalanmayı tespit etmişlerdir.

Wu ve diğerleri [11] cam ipliğinden çok eksenli üretilmiş, dikiş bağlantılı takviye kumaşa reçine varlığı ve sıcaklığın kumaşın sıkıştırılması üzerine olan etkisini incelemiştir. Reçinenin varlığı kumaşın sıkıştırılmasını önemli ölçüde arttırmıştır. Sıcaklığın artması ile birlikte eriyen reçine yağlama etkisi göstererek kumaşın sıkıştırılmasını kolaylaştırmış ve kalınlığı düşürerek lif hacimsel oranını yükseltmiştir.

Lomov ve Molnár [12]: nano lif tabakası varlığının, kumaş katman sayısının ve tekrarlı sıkıştırma çevriminin, iki boyutlu bez ayağı dokunmuş karbon iplikli kumaşların sıkıştırılabilirliğine etkisini incelemiştir. Kumaş katmanları arasında yuvalanma (kumaş kat sayısının artması ile birlikte lif hacimsel oranının artması) gözlemlenirken; sıkıştırma çevrim sayısı ile birlikte kumaş yığınının hızlı bir şekilde sertleşip, lif içeriğinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yousaf, Potluri ve Withers [13] kumaş mimarisinin (bez ayağı, dimi ve saten dokularının) ve katman sayısının cam ipliğinden dokunmuş kumaşların sıkıştırılabilirliği üzerine etkisini incelemiştir. Eğilme deformasyonuna daha az izin veren sıkı yapısından dolayı, bez ayağı mimarisi sıkıştırma basıncına karşı en fazla direnci (buna karşılık en düşük lif hacimsel oranını) sergilemiştir. Kumaş katman sayısının artması ile birlikte tüm mimariler katmanlar arası yuvalanmaya izin verirken, en fazla yuvalanma bez ayağında tespit edilmiştir. Bu sonuç bez ayağı kumaş yüzeyinde ipliklerin daha kısa mesafelerde kumaşa dalıp çıkmasına bağlanmıştır.

Literatür taraması; hatasız (boşluksuz, her noktasındaki lif ve reçine içeriği aynı olan) ve hedeflenen mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretiminin, ancak bu üretimde kullanılan takviye kumaşının kuru ve ıslak haldeki çok katmanlı sıkıştırılabilirlik davranışını bilmekle mümkün olacağını açıkça göstermiştir. Takviye kumaşlarının çok katmanlı sıkıştırılabilirliğinin incelenmesinin ortaya çıkardığı bir başka bulgu ise; komşu

kumaş katları arasındaki birbirine geçmenin (yuvalanmanın) lif içeriğini (kompozit malzemenin birim hacmindeki lif miktarını) ve katmanlar-arası özellikleri iyileştirdiğidir. Bu çalışmada, yaygın bir kullanım alanına sahip olan kesikli cam elyafının rastgele serilmesiyle üretilmiş dokusuz kumaşların tek ve çok katmanlı, kuru ve polyester reçine ile ıslatılmış halde, sıkıştırılma ve sıkıştırılma sonrası rahatlama davranışları, kapsamlı istatistiksel veri analizleri ve açıklayıcı görsel grafikler ile desteklenerek ele alınmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalarda takviye kumaşların sıkıştırılabilirlik davranışını ölçmek için yükü veya yer değiştirmeyi kontrol edebilen ve bu iki fiziksel büyüklüğün zamana bağlı değişimini takip edebilen tam donanımlı cihazlar kullanılmıştır. Bu tip cihazlar maliyetlerinden ötürü her vakit el altında olmayabilir. Bu çalışmada kullanılan kalınlık ölçer ve pasif ağırlıkları ise hemen hemen her laboratuvarında olup, makul fiyatlı donanımlar sınıfındadır. Bu çalışmada bu tip ekonomik bir teçhizattan elde edilen veriler detaylı bir veri analizine tabi tutularak, dokusuz takviye kumaşın sıkıştırılabilirlik davranışı karakterize edilmiştir. Çalışmayı özgün kılan faktörlerden biri de budur.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada Şişecam Cam Elyaf Sanayi A.Ş. tarafından üretilen ve kesilmiş cam elyaf ipliklerinin sıvı asıltı ile birbirine bağlandığı dokusuz kumaşın (Şekil 1) sıkıştırılabilirlik davranışı karakterize edilmiştir. İlgili kumaşın teknik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Camelyaf Reçine A.Ş. tarafından tedarik edilen ve tahmini akma direnci 450 cP olan polyester reçine de kumaşların ıslatılmasında kullanılmıştır.



Şekil 1. Kesikli cam liflerinden üretilmiş dokusuz kumaş

**Tablo 1.** Dokusuz cam elyaf kumaşın teknik özellikleri

| Özellik                                        | Değeri    |
|------------------------------------------------|-----------|
| Cam elyaf tipi                                 | E         |
| Kumaş birim alanının kütlesi, g/m <sup>2</sup> | 450 ± 7%  |
| İtibari lif çapı, mikron                       | 13        |
| Kıymık tex numarası, g/1000m                   | 35        |
| Kıyılmış liflerin uzunluğu, mm                 | 50        |
| Lif-reçine bağlayıcı maddesi                   | Silane    |
| Reçine uyumu                                   | Polyester |

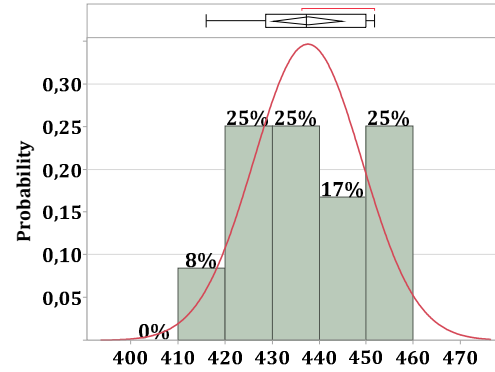
Tabakalı (laminasyon metodu ile) kompozit malzeme üretiminde hedeflenen kalınlığa ulaşmak amacıyla, öncelikle takviye kumaşlar birbiri üzerine kalıp içinde istif edilir ve sonrasında istifin kalınlığı istikametinde sıkıştırma basıncı uygulanır. Bu nedenle kumaş kat sayısının kumaş istifinin sıkıştırılabilirliği üzerine olan etkisi önemlidir. Buradan hareketle, bu çalışma kapsamında kumaş kat sayısı bir bağımsız girdi değişkeni olarak

deneysel çalışma planına dâhil edilmiştir. Ayrıca takviye kumaşlar lifleri ve iplikleri arasında reçinenin var olup olmamasına bağlı olarak farklı sıkıştırılma ve rahatlatma davranışları göstermektedirler. Bu nedenle bu çalışmada bir diğer bağımsız girdi değişkeni olarak kumaşın ıslaklık/kuruluk durumu seçilmiştir. Takviye kumaşları viskoz-elastik doğalarından dolayı sıkıştırma ve rahatlatma süreçlerinde farklı davranışlar sergilemektedirler. Bu nedenle bu süreç tipleri birer bağımsız değişken olarak düşünülmüştür. Son bağımsız girdi değişkeni olarak da değeri 2 ila 200 kPa arasında değişen sıkıştırma basıncı hesaba katılmıştır. Tablo 2’de bu çalışmanın deneysel planı verilmektedir. Tablo 2’de ayrıca girdi değişkenlerinin analizde kullanılacak veri tipleri ve model denklem geliştirmede kullanılacak modelleme tipleri de verilmektedir.

**Tablo 2.** Deneysel çalışma planı

| Değişkenler:       | Kumaş kat sayısı | Islaklık durumu | Süreç tipi | Basıncı, kPa      |
|--------------------|------------------|-----------------|------------|-------------------|
| Seviyeleri:        | 1                | Kuru            | Sıkıştırma | 2, 5, 10, 20, 50, |
|                    | 2                | Islak           | Rahatlama  | 100, 150, 200     |
|                    | 3                |                 |            |                   |
| Veri tipleri:      | sayısal          | sınıfsal        | sınıfsal   | sayısal           |
| Modelleme tipleri: | sırasal          | itibari         | itibari    | süreklî           |

Kumaş rulosundan 20x25 cm<sup>2</sup> boyutlarında kesilen tek kat kumaş parçalarının ağırlıkları hassas terazide ölçülmüş ve alansal yoğunluk (gramaj) değerleri hesaplanmıştır. Dokusuz kumaşın ölçülen alansal yoğunluk değerlerinin dağılımını gösteren histogram Şekil 2’de verilmektedir. Dokusuz kumaşın alansal yoğunluğu normal bir dağılım gösterip, 12 adet yapılan ölçüm üzerinden: ortalama alansal yoğunluk değeri 437.52 g/m<sup>2</sup>, standart sapma 11.50 g/m<sup>2</sup> ve % 95’lik güven seviyesine göre oluşturulan güven aralığı ise [430.22; 444.83] olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama alansal yoğunluk değeri (437.52 g/m<sup>2</sup>), tek ve çok katlı kumaşların farklı basınçlar altında sergiledikleri lif hacimsel oranlarının hesaplanmasında tek kat kumaşın alansal yoğunluğu olarak kullanılmıştır. Bir başka deyişle, daha önceki çalışmalara da paralel olarak [6,7], sıkıştırma ve rahatlatma süreçlerinde kumaş formunun kumaş düzlemi içinde değişmediği, yani kumaşın alansal yoğunluğunun sabit kaldığı kabul edilmiştir.

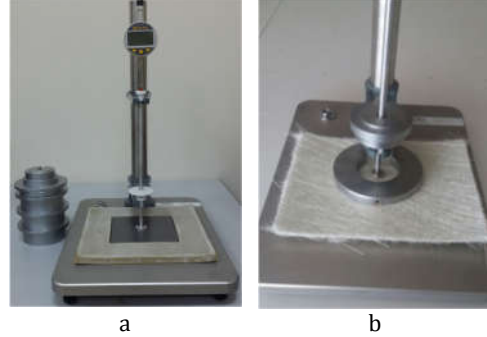
**Şekil 2.** Kumaş alansal yoğunluk (g/m<sup>2</sup>) değerlerinin dağılımı

Daha sonra, alansal yoğunluğu ölçülen kumaş parçaları, baskı ayağı çapı 21.15 mm olan dijital kalınlık ölçme cihazının altlık (mesnet) yüzeyine serilmiştir (Şekil 3). Kendi ağırlığından dolayı, temas ettiği yüzeye 2 kPa değerinde bir basınç uygulayan baskı ayağı kumaş yüzeyine indirilmiştir. 30 saniyelik bir bekleme süresinin ardından, kalınlık ölçüm cihazının ekranı değişmez hale geldiğinde, ekranda görülen kalınlık değeri, 2 kPa basınçta sıkıştırma kalınlığı olarak kaydedilmiştir. Daha sonra sırasıyla 5, 10, 20, 50, 100, 150 ve 200

kPa sıkıştırma basıncı değerlerine ulaşmak için ek ağırlıklar kademe kademe baskı ayağı üzerine eklenmiştir. Her ağırlık eklendikten sonra, kalınlık ölçüm cihazı ekranının değişmez hale gelmesi için 30 saniye beklenmiş ve sonrasında ekranda görülen sabit değer kayıt altına alınmıştır. Sıkıştırma süreci 200 kPa sıkıştırma basıncında sonlandırıldıktan sonra, baskı ayağı üzerindeki ağırlıklar kademe kademe kaldırılmaya başlanmış, rahatlama kalınlık değerleri 150 kPa rahatlama basıncından başlamak üzere 2 kPa rahatlama basıncına kadar, sıkıştırma basıncı kalınlıklarında olduğu gibi, kayıt altına alınmıştır. Bu süreç, her bir kumaş kat sayısı seviyesi için, kumaş istif yüzeyinin rastgele seçilmiş beş farklı noktada tekrar edilmiştir. Böylelikle, tek, iki ve üç katlı kumaşların sıkıştırılma ve rahatlama davranışları ölçülmüştür.

Yüzey alanı test kumaşı parçasının yüzey alanından (20x25 cm<sup>2</sup> den) daha büyük olan, mavi renk, bir naylon film yüzeyi kesilmiş ve bu yüzey kalınlık ölçme cihazının altlık (mesnet) yüzeyine serilerek, ıslak kumaş kalınlık ölçümlerinde, altlık yüzeyinin reçine tarafından kirletilmesinin önüne geçilmiştir. Tek kat kuru kumaşa uygulanan alansal yoğunluk (gramaj) ve kalınlık testlerinin sonuçlarından hareketle ve malzemelerin (cam lifi ve reçinenin) yoğunluk değerlerini de hesaba karatarak; 1 mililitre hacminde reçinenin, kalınlık ölçme cihazı baskı ayağının yüzey alanından daha geniş bir alanda, tek kat dokusuz kumaşı ıslatabileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle her bir kumaş katını ıslatmak için 1 mililitre hacminde reçine kullanılmıştır. Kalınlık ölçme cihazı baskı ayağının reçine tarafından kirletilmesinin önüne geçmek için, kumaş istifinin en üst yüzeyi de mavi naylon film ile kapatılmıştır. Kuru kumaşın sıkıştırılması ve rahatlatılması esnasında uygulanan sürecin aynısı ıslak kumaşlara da uygulanmıştır. Aynen kuru kumaşlarda ölçüldüğü gibi, iki kat mavi naylon filmin sıkıştırma ve rahatlama basınçlarındaki kalınlıkları beş farklı noktadan ölçülmüş ve elde edilen ortalama kalınlıklar, yaş kumaşların kalınlık ölçümlerinin ilgili basınca karşılık gelenlerinden çıkarılmıştır. Böylece mavi naylon filmin, kumaş kalınlığına olan etkisi devre dışı bırakılmıştır. Toplamda 450 adet kalınlık ölçümü yapılmış, bunlardan 240 tanesi sıkıştırma basınçlarında (süreçlerinde) gerçekleşirken, 210 tanesi rahatlama basınçlarında (süreçlerinde) gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'de kalınlık ölçüm cihazı ve kuru kumaş kalınlık ölçüm fotoğrafları görülmektedir.



**Şekil 3.** Kalınlık ölçüm cihazı (a), kuru kumaş kalınlık ölçümü (b)

Ortalama alansal yoğunluk değeri olan 437.52 g/m<sup>2</sup> değeri, kumaş kat sayısı ve ölçülen kalınlık değeri aşağıda verilen 1 numaralı denkleme yerine konarak, lif hacimsel oranı hesaplanmıştır. Cam lifinin hacimsel yoğunluğu 2.5 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

$$\text{Lif hacimsel oranı, \%} = \frac{437.52 \cdot (\text{Kumaş kat sayısı})}{100 \cdot 100 \cdot \frac{2.5}{10} \cdot (\text{Kalınlık, mm})} \cdot 100 \quad (1)$$

### 3. Bulgular

Grafiklerin çiziminde, yapılan ölçümlerin kapsamlı istatistiksel analizinde, model tahminleme denkleminin geliştirilmesinde JMP® 14 istatistiksel yazılım paketinin deneme sürümü kullanılmıştır.

#### 3.1. Kumaş kat sayısının: kalınlık, normleştirilmiş kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine etkileri

Şekil 4 ve Tablo 3 kumaş kat sayısının: kalınlık, normleştirilmiş kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine olan etkilerini göstermektedir. Beklenildiği üzere kumaş kat sayısının artması ile birlikte kalınlık artmıştır (Şekil 4 - a ve Tablo 3 - ilk satır bloğu). Ancak, burada göz önüne alınması gereken, eklenen her kumaş katının kalınlık üzerinde aynı miktarlarda artışa sebep olup olmadığıdır. Tek kat kumaşların kalınlık ortalaması 0.54 mm olarak ölçülmüştür. İkinci kumaş katının eklenmesi kalınlığı (1.07 - 0.54 = ) 0.53 mm arttırırken, üçüncü kumaş katının eklenmesi (1.70 - 1.07 ⇒) 0.63 mm arttırmıştır. Bu sonuç kabaca, kumaş katları arasında birbiri içine geçme olmadığını göstermektedir. Bir başka önemli sonuç ise, kumaş kat sayısının artışı ile birlikte kalınlık ölçümlerindeki varyasyonun (standart sapmanın) artmasıdır. Bu varyasyon artışının sebebi; dokusuz kumaşın

eğilme sertliğinin fazla olup, normal tekstil kumaşlarına nazaran daha az dökümlü, sert karton mukavva tutumunu arz eden bir yapıya sahip olmasına atfedilmiştir. Bu sert, eğilmez, esnemez yapıda olan kumaşlar üst üste istiflendiğinde kumaş katları düşük basınçta birbiri ile yüzey yüzeye tam olarak örtüşmemekte ve bu durum da kalınlık varyasyonlarının artmasına neden olmaktadır.

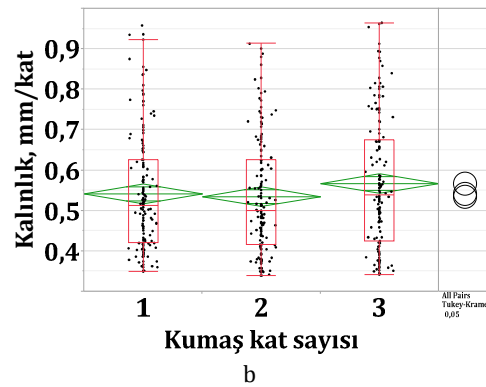
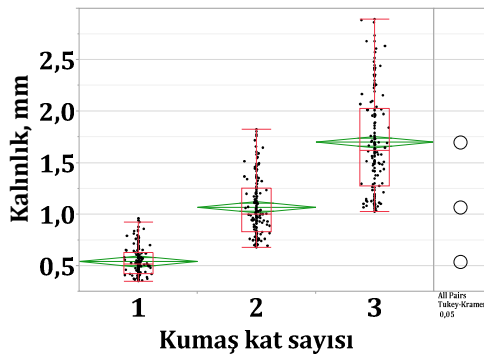
Bitişik kumaş katları arasında yuvalanma (birbiri içine geçme) olup olmadığını istatistik olarak ortaya çıkarmak amacıyla; tüm kalınlık ölçüm değerleri, ölçümün yapıldığı ilgili kumaş kat sayısı ile bölünerek normalleştirme yapılmış ve kumaş kat sayısı ile normalleştirilmiş kalınlık (mm/kat) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik çizilmiştir (Şekil 4 - b). Bu grafik kumaş kat sayısının normalleştirilmiş kalınlık değerleri üzerinde, 0.05 önem seviyesi esas alındığında, istatistik anlamda bir etkisinin olmadığını göstermiştir (Tablo 3 - ikinci satır bloğu). Bu sonuç bitişik dokusuz kumaş katları arasında birbiri içine geçme, yuvalanma olmadığını kanıtlamıştır. Liflerin kumaş yüzeyinde gelişigüzel yerleşimi, dokusuz kumaş yığı

komşu katları arasında yuvalanma olmasını engellemiştir. Kumaş kat sayısı ile lif hacimsel oranı arasındaki ilişki de yine aynı şekilde kumaş katmanları arasında yuvalanma olmadığını, kumaş kat sayısının lif hacimsel oranı üzerine bir etkisinin olmadığını göstermiştir (Şekil 4 - c, Tablo 3 - üçüncü satır bloğu). Liflerin rastgele yüzeye serildiği dokusuz kumaşlar; ipliklerin belli bir düzende konum aldığı dokuma ve örme kumaşlardan oldukça farklı bir mimariye sahiptirler. Dokuma ve örme kumaşlardaki tekrar eden bu düzen (doku tekrarı), kumaş yüzeyinde sürekli ve düzenli çukur ve tümsekler oluşturur ve bu yüzey yapısı kumaşlar arasında yuvalanmaya imkân sağlar. Literatür çalışmalarının incelenmesi dokuma [12, 13] kumaşlarda ve özellikle örme kumaşlarda [9] yuvalanmanın daha kolay meydana geldiğini göstermiştir. Ancak kibrit çöplerinin rastgele üst üste istiflenmesine benzer bir lif yerleşime sahip dokusuz kumaşlarda katmanlar arası yuvalanma çok daha zordur veya anlamlı bir yuvalanmanın gerçekleşmesi için daha yüksek sıkıştırma basınçlarına çıkılması gerekir.

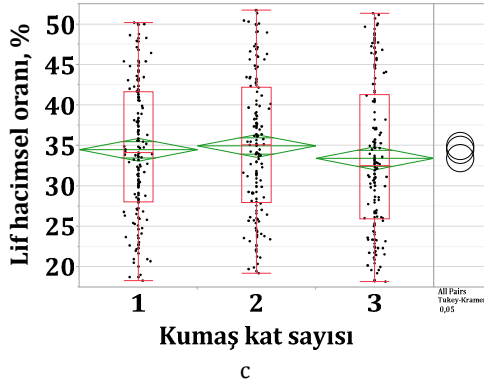
**Tablo 3.** Kumaş kat sayısının: kalınlık, normalleştirilmiş kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine etkileri

| Ölçülen özellik                    | Kumaş kat sayısı | n   | Ortalama | SS   | AL    | ÜL    |
|------------------------------------|------------------|-----|----------|------|-------|-------|
| Kalınlık, mm                       | 3 A              | 150 | 1.70     | 0.49 | 1.62  | 1.78  |
|                                    | 2 B              | 150 | 1.07     | 0.28 | 1.02  | 1.12  |
|                                    | 1 C              | 150 | 0.54     | 0.15 | 0.52  | 0.56  |
| Normalleştirilmiş kalınlık, mm/kat | 3 A              | 150 | 0.57     | 0.16 | 0.54  | 0.59  |
|                                    | 1 A              | 150 | 0.54     | 0.15 | 0.52  | 0.56  |
|                                    | 2 A              | 150 | 0.53     | 0.14 | 0.51  | 0.56  |
| Lif hacimsel oranı, %              | 2 A              | 150 | 34.96    | 8.64 | 33.56 | 36.35 |
|                                    | 1 A              | 150 | 34.48    | 8.36 | 33.14 | 35.83 |
|                                    | 3 A              | 150 | 33.43    | 9.35 | 31.92 | 34.94 |

**Not:** Aynı büyük harfle birleştirilmeyen kumaş kat sayısı seviyeleri birbirinden önemli seviyede farklıdır. n: toplam ölçüm sayısı, SS: standart sapma, AL: alt limit, ÜL: üst limit. Alt ve üst limitler % 95'lik güven seviyesine göre tesis edilmiştir.







**Şekil 4.** Kumaş kat sayısının: kalınlık (a), normalleştirilmiş kalınlık (b) ve lif hacimsel oranı (c) üzerine etkileri

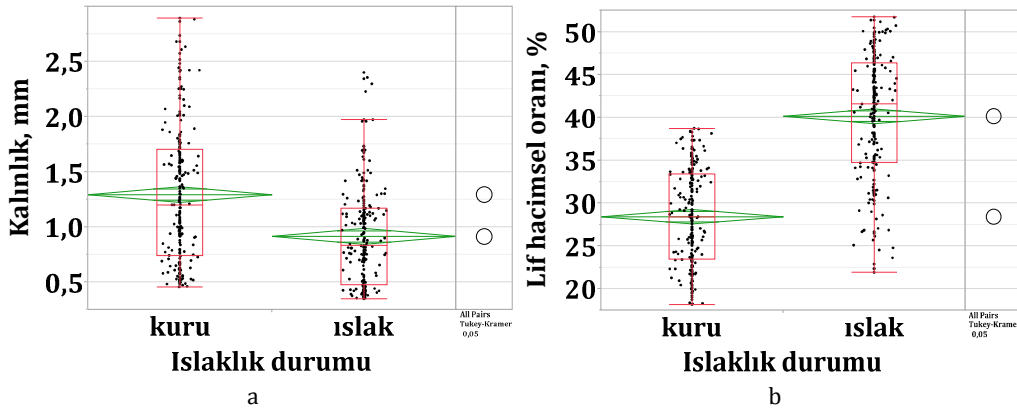
**Not:** Yeşil renkteki elmasların alt ve üst köşeleri arasındaki mesafe, elmasın ait olduğu kumaş kat sayısı için ölçülen kalınlık değerlerinin % 95'lik güven seviyesinde güven aralığını temsil etmektedir. Sağ taraftaki sütunlarda her bir kumaş kat sayısı seviyesinin kalınlık ortalaması için bir adet karşılaştırma dairesi verilmektedir. Kalınlık ortalamaları farklı olan kumaş kat sayılarını temsil edilen karşılaştırma daireleri ya kesişmemekte ya da hafifçe kesişmektedir. Varyasyonun sayısal bir ifadesi olan kırmızı kutuların yüksekliği, çeyrekler arası aralık olarak da ifade edilmektedir.

### 3. 2. Reçine varlığının (kumaşın ıslak veya kuru olma durumunun) kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine etkileri

Islak kumaşlar, kuru kumaşlara nazaran, istatistiki olarak önemli seviyede, daha düşük kalınlık sergilemişlerdir (Şekil 5 - a, Tablo 4 - ilk satır bloğu). Kuru kumaşlar ıslatıldıklarında ortalama olarak kalınlıkları % 29.46 oranında

düşmektedir (Tablo 4). Kıyılmış cam iplikleri ve bu cam ipliklerinin bireysel lifleri arasındaki reçine varlığı bir yağlama etkisi yaratarak cam iplikleri ve cam liflerinin birbiri üzerinde kaymalarını arttırmıştır. Bir başka deyişle, reçine varlığı kumaşın sıkıştırılabilirliğini arttırmıştır. Islak kumaşlar ayrıca, kuru kumaşlara oranla, daha düşük bir kalınlık varyasyonu sergilemişlerdir. Reçine varlığı dokusuz kumaşı kaba tabiriyle yumuşatmış, daha esnek, daha eğilir hale getirerek, komşu kumaş katlarının birbiri ile olan yüzey örtüşmesini arttırarak, kalınlık varyasyonunu düşürmüştür.

Kalınlığı daha düşük olan ıslak numuneler, kuru numunelere nispeten, birim hacimde daha fazla lif barındırarak, istatistiki olarak önemli seviyede daha yüksek lif hacimsel oranı sergilemişlerdir (Şekil 5 - b, Tablo 4 - ikinci satır bloğu). Kumaşların ıslatılması ortalama olarak lif hacimsel oranını % 41.22 oranında arttırmıştır. Bu sonuç bize kumaşların tam olarak reçine ile ıslatıldıktan sonra kalınlık istikametinde sıkıştırılmalarının lif hacimsel oranını, dolayısıyla nihai kompozit malzemenin mekanik özelliklerini, artırma adına ne kadar önemli bir uygulama olduğunu açıkça göstermektedir. Literatürde incelenen çalışmalar da bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla paralellik gösterip; dokuma kumaşlarda [11] ve fitil formundaki materyallerde [6] reçine varlığının malzemeyi sıkıştırmayı kolaylaştırdığını göstermiştir.



**Şekil 5.** Reçine varlığının (ıslaklık durumunun) kalınlık (a) ve lif hacimsel oranı (b) üzerine etkileri

**Tablo 4.** Reçine varlığının (ıslaklık durumunun) kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine etkileri

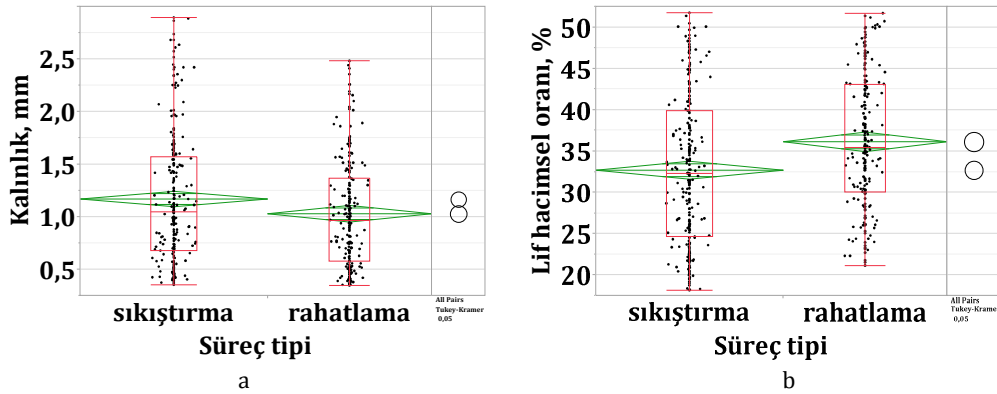
| Ölçülen özellik       | Islaklık durumu | n   | Ortalama | SS   | AL    | ÜL    | p-değeri |
|-----------------------|-----------------|-----|----------|------|-------|-------|----------|
| Kalınlık, mm          | kuru            | 225 | 1.29     | 0.63 | 1.21  | 1.38  | <0.0001  |
|                       | ıslak           | 225 | 0.91     | 0.46 | 0.85  | 0.97  |          |
| Lif hacimsel oranı, % | ıslak           | 225 | 40.15    | 7.35 | 39.19 | 41.12 | <0.0001  |
|                       | kuru            | 225 | 28.43    | 5.66 | 27.68 | 29.17 |          |

**Not:** p-değeri tek taraflı hipotez kurulumuna göre hesaplanmıştır. Önem seviyesi ( $\alpha$ ) 0.05 olarak alınmıştır. 0.05'den daha küçük olan p-değerleri istatistiki olarak önemli bir farkın ifadesi olup kırmızı renge boyanmıştır.

### 3.3. Sıkıştırma ve rahatlama süreç tiplerinin kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine etkileri

Sıkıştırma ve rahatlama süreçlerine göre gruplandırılmış kalınlık değerlerinin karşılaştırılması, rahatlama süreçlerinde ölçülen kalınlık değerlerinin, sıkıştırma süreçlerinde ölçülen kalınlık değerlerine nazaran, istatistiki olarak önemli seviyede daha düşük olduğunu göstermiştir (Şekil 6 - a, Tablo 5 - ilk satır bloğu). Sıkıştırılmış durumdaki dokusuz kumaşların üzerindeki basınç uzaklaştırıldığına kumaşlar ilk kalınlıklarına dönememektedir. Kumaşların tam olarak ilk kalınlıklarına dönememesi kompozit üretimi açısından düşünüldüğünde avantajdır. Çünkü çoğu kompozit üretim sisteminde, öncelikle kuru kumaş kalınlık yönünde sıkıştırılır, devamında gerçekleşen reçine içitimi esnasında, kumaş üzerindeki bu sıkıştırma basıncı reçine

tarafından dengelenir. Reçinenin yağlayıcı etkisi ve kumaşın sıkıştırma sonrası rahatlaması esnasında tam olarak ilk kalınlığına dönememesi nihai kompozit malzemenin kalınlığını düşürür. Kalınlıktaki bu düşüş de lif hacimsel oranını (lif içeriğini) arttırarak (Şekil 6 - b, Tablo 5 - ikinci satır bloğu) nihai kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirir. Sıkıştırma süreçlerinde ölçülen ortalama kalınlık değeri, ardı sıra gelen rahatlama süreçleri esnasında yaklaşık % 12 oranında düşerken, kalınlıktaki bu düşüş kendini lif hacimsel oranında yaklaşık % 10.5 oranında artış olarak göstermiştir. Bu bulgu daha önceki çalışmaların bulguları [6, 7, 12, 13] ile paralel olup; tekrarlamalı sıkıştırma ve rahatlama süreçlerinin kumaş istifinin lif hacimsel oranını (lif içeriğini) arttırdığını açıkça desteklemektedir.

**Şekil 6.** Süreç tipinin, kalınlık (a) ve lif hacimsel oranı (b) üzerine etkileri**Tablo 5.** Süreç tipinin, kalınlık ve lif hacimsel oranı üzerine olan etkileri

| Ölçülen özellik       | Süreç tipi | n   | Ortalama | SS   | AL    | ÜL    | p-değeri |
|-----------------------|------------|-----|----------|------|-------|-------|----------|
| Kalınlık, mm          | sıkıştırma | 240 | 1.17     | 0.62 | 1.09  | 1.25  | 0.0057   |
|                       | rahatlama  | 210 | 1.03     | 0.52 | 0.96  | 1.10  |          |
| Lif hacimsel oranı, % | rahatlama  | 210 | 36.12    | 8.10 | 35.02 | 37.22 | <0.0001  |
|                       | sıkıştırma | 240 | 32.69    | 9.08 | 31.54 | 33.84 |          |

### 3.4. Lif hacimsel oranını tahminleme denkleminin geliştirilmesi

Girdi değişkenlerini kullanarak lif hacimsel oranını tahmin etmek ve lif hacimsel oranının girdi değişkenleri (kumaş kat sayısı, kumaş ıslaklık durumu, süreç tipi ve basınç) tarafından

hangi derecede etkilendiğini genel bir perspektifle üç boyutlu olarak gözler önüne sermek amacıyla bir tahminleme denklemi (model) geliştirilmiştir. Girdi değişkenlerinin veri tipleri ve modellemede kullanılacak olan modelleme tipleri daha önce Tablo 2'de verilmiştir. Denenen birçok modelleme



yaklaşımları arasında en yüksek kararlılık katsayısı ( $R^2 = 0.882$ ) değerini veren ve artık (ölçülen - tahminlenen) değerlerinin dağılımı en çok normale yakın olan yaklaşım ikinci derece çok terimli model tipi olmuştur. Bu modelde  $R^2$  değerinin 0.882 çıkmasının anlamı: ölçülen lif hacimsel oranlarındaki çeşitliliğin (varyasyonun) % 88.2'sinin geliştirilen model tarafından açıklanabiliyor olmasıdır. Modelin varyans analizi (ANOVA) sonucunda p-değerinin 0.0001'den küçük çıkması modelin lif hacimsel oranını tahminleme noktasında yeterli ve güçlü olduğunu göstermiştir. Siyah dairesel ölçüm noktalarının, eğimi bir olan doğrusal kırmızı çizgiye olan yakınlık durumları (Şekil 7 - a); lif hacimsel oranı

artık değerlerinin: mavi, kesikli, yatay, sıfır çizgisinin her iki tarafında simetrik olarak dağılımları (Şekil 7 - b), modelin güvenilirliğini perçinlemektedir. Artık değerler normale yakın bir dağılım (Şekil 7 - c) takip edip, ortalamaları ve standart sapmaları sırasıyla  $-1.84 \cdot 10^{-15}$  ve 3.02 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç da modelin güvenilirliğini arttırmıştır. 2 numaralı denklem lif hacimsel oranı tahmin etmek için geliştirilen denklemi göstermektedir. Kumaş katsayısı hariç, denklemde geçen tüm faktör ve faktörlerin katsayıları istatistiki olarak önemlidir (p-değerleri 0.05'den küçüktür): bir başka deyişle denklemin tahminleme yetisine katkıları ihmal edilemez seviyededir (Tablo 6)

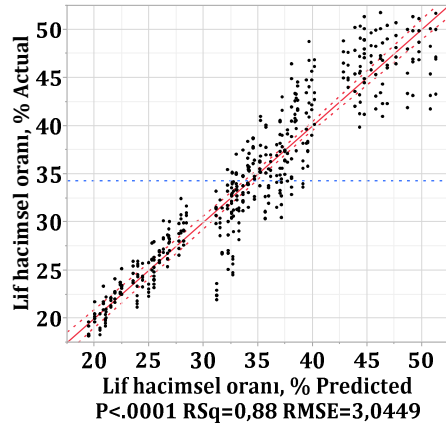
Lif hacimsel oranı, %

$$\begin{aligned}
 &= 30.12 + (\text{Kumaş kat sayısı}) \begin{pmatrix} 1 \Rightarrow 0 \\ 2 \Rightarrow 0.47 \\ 3 \Rightarrow -1.05 \end{pmatrix} \\
 &+ (\text{Islaklık durumu}) \begin{pmatrix} \text{kuru} \Rightarrow -5.86 \\ \text{Islak} \Rightarrow 5.86 \end{pmatrix} \\
 &+ (\text{Süreç tipi}) \begin{pmatrix} \text{sıkıştırma} \Rightarrow -2.22 \\ \text{rahatlama} \Rightarrow 2.22 \end{pmatrix} + 0.12 * (\text{Basınç, kPa}) \\
 &+ (\text{Basınç, kPa} - 58.27) * (\text{Basınç, kPa} - 58.27) * (-0.0005467) \quad (2)
 \end{aligned}$$

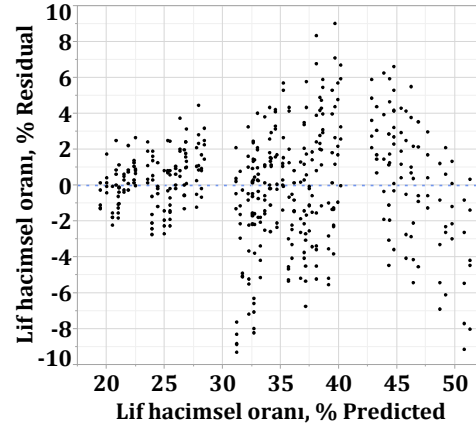
**Tablo 6.** Model bileşenlerinin etki seviyeleri

| Model bileşeni              | n | df | SS        | F oranı  | p-değeri |
|-----------------------------|---|----|-----------|----------|----------|
| Islaklık durumu             | 1 | 1  | 15469.261 | 1668.456 | <.0001   |
| Basınç, kPa                 | 1 | 1  | 10106.641 | 1090.064 | <.0001   |
| Süreç tipi                  | 1 | 1  | 2099.082  | 226.3990 | <.0001   |
| (Basınç, kPa)*(Basınç, kPa) | 1 | 1  | 1335.983  | 144.0941 | <.0001   |

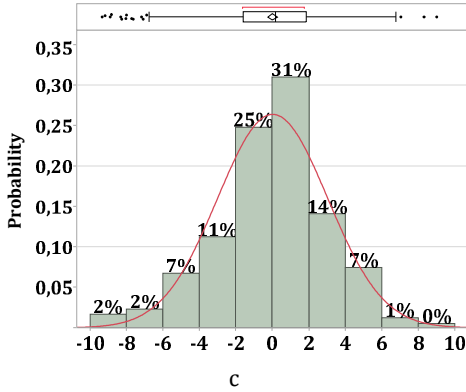
Not: n: parametre sayısı, df: serbestlik derecesi, SS: kareler toplamı.



a



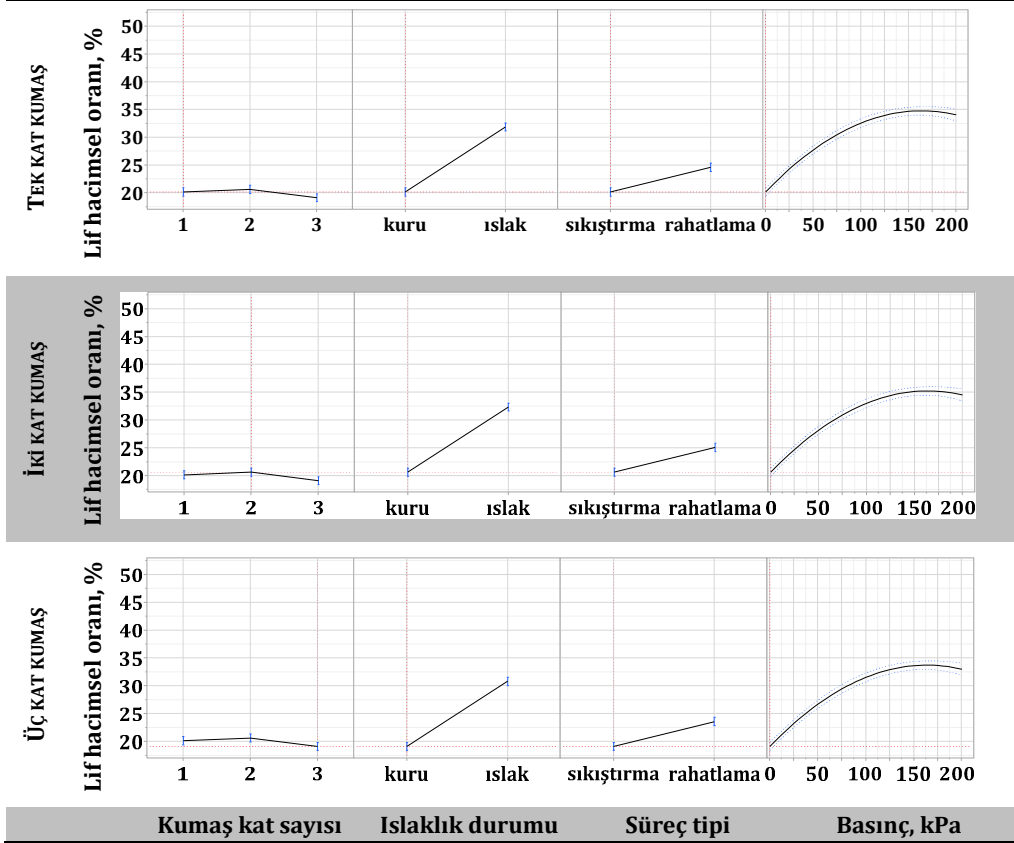
b



**Şekil 7.** Tahminlenen & ölçülen lif hacimsel oranı (a), tahminlenen & artık lif hacimsel oranı (b) ve lif hacimsel oranı artık değerlerinin dağılımı (c)

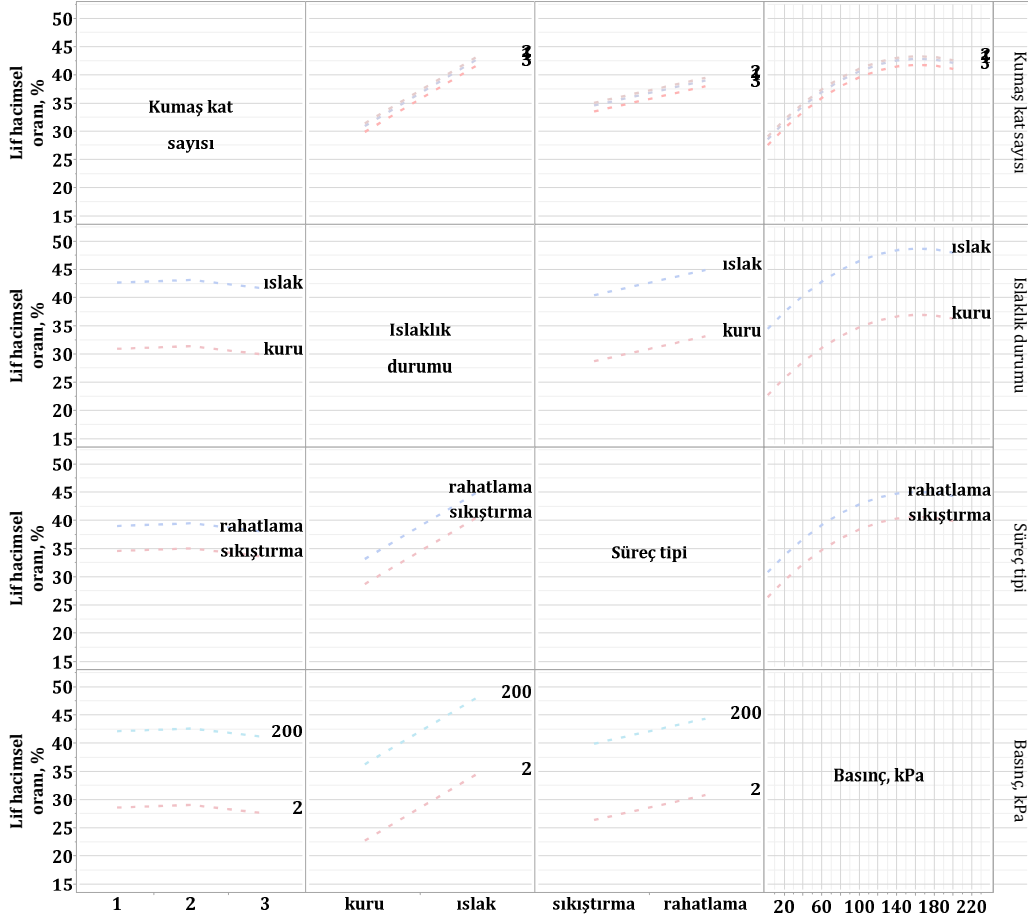
Şekil 8'de verilen tahminleme kesiti, farklı kumaş kat sayıları için; ıslaklık durumu, süreç tipi ve basıncın lif hacimsel oranına olan etkilerini göstermektedir. Tüm kumaş kat sayı seviyeleri

için, diğer değişkenler lif hacimsel oranını aynı şekilde etkilemişlerdir. Kumaş kat sayısı lif hacimsel oranı üzerinde etkilik gösterememiştir. Kumaşların ıslatılması kumaşların sıkıştırılabilirliğini kolaylaştırarak, lif hacimsel oranını önemli derecede arttırmıştır. İlk sıkıştırmanın kumaş istifi üzerinde yarattığı sertleştirme etkisinden ötürü, ardı sıra gelen rahatlama süreçlerinde daha yüksek lif hacimsel oranları gözlemlenmiştir. Basınç ile lif hacimsel oranı arasında üstel fonksiyon ilişkisi saptanmıştır. Düşük basınçlarda lif hacimsel oranı dikine bir şekilde artarken, yüksek basınçlarda bu artış düşerek neredeyse bir düzlüğü takip etmektedir. Etkileşim grafikleri matrisinde (Şekil 9) görülen paralellikler; girdi değişkenleri arasında bir etkileşim olmadığını göstermektedir. Şekil 10; kumaş kat sayısı, ıslaklık durumu, süreç tipi ve basıncın; lif hacimsel oranı üzerine olan etkilerini üç boyutlu olarak göstermektedir.

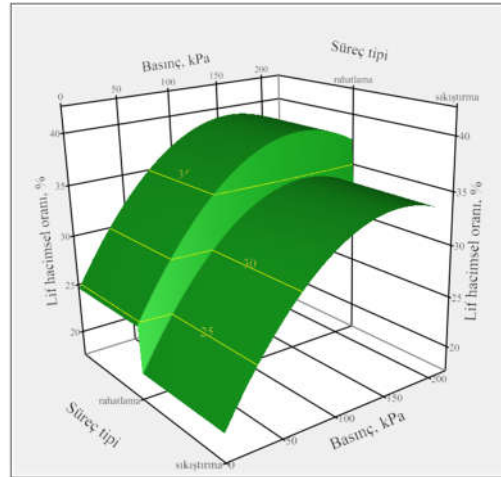
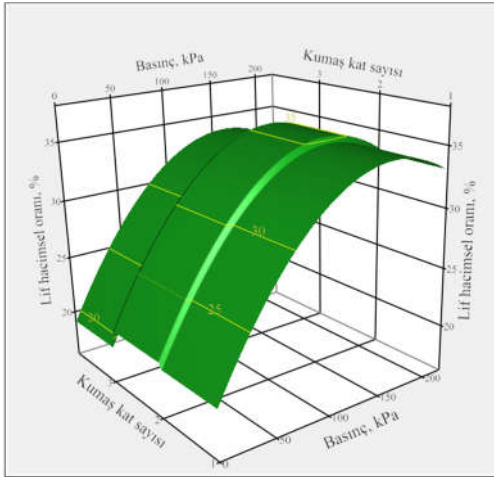


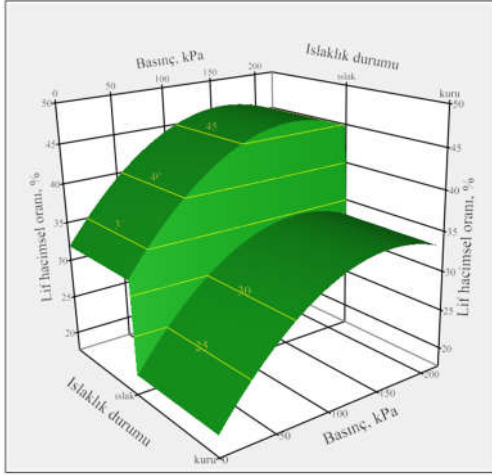
**Şekil 8.** Lif hacimsel oranı tahminleme kesiti

**Not:** Kırmızı dikey kesikli çizgiler, her bir girdi değişkeninin hâlihazırda seçilen değerini gösterir. Kırmızı yatay kesikli çizgi ise hâlihazırda yatay eksenlerde seçili olan girdi değişkenleri birleşimine karşılık gelen lif hacimsel oranını göstermektedir.



Şekil 9. Etkileşim grafikleri matrisi





**Şekil 10.** Kumaş kat sayısı, basınç, süreç tipi ve ıslaklık durumunun lif hacimsel oranına etkileri

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, çok katmanlı dokusuz cam lifli kumaşların, kuru ve ıslak halde, sıkıştırma ve sıkıştırma sonrası rahatlama davranışları, sıvı kompozit kalıplama uygulamaları ışığında ele alınmıştır. 50 mm uzunluğunda kesilmiş, esnek olmayan cam iplik kıymıklarının dokusuz kumaş yüzeyi üzerinde rastgele yerleşiminden ötürü; komşu kumaş katları birbiri içinde yuvalanamamıştır. Dolayısıyla kumaş kat sayısının artması lif hacimsel oranını etkilememiştir.

Kıymıklar arası ve kıymık içi bölgelerdeki reçine varlığı yağlama etkisi yaparak, ıslak kumaş kalınlığını, kuru kumaş kalınlığına nispetle istatistiksel olarak önemli seviyede düşürmüştür. Kalınlıktaki bu düşüş, lif hacimsel oranında % 41.22'lik gibi önemli bir artışa neden olmuştur. Bu sonuç ıslak-kalıp kompozit uygulamalarında, kumaş istifinin reçine ile ıslatıldıktan sonra sıkıştırılmasının lif hacimsel oranının arttırılmasına (dolayısıyla nihai kompozit ürünün mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine) etkisinin önemini açıkça ortaya koymuştur.

Sıkıştırma süreçlerinin kumaşı sertleştirme etkisinden dolayı, ardı sıra gelen rahatlama süreçlerinde kumaşlar daha düşük kalınlık ve buna karşılık daha yüksek lif hacimsel oranı sergilemişlerdir. Bu sonuç kompozit üretimlerinde tekrarlı sıkıştırma ve rahatlama süreçlerinin lif içeriğini arttırdığını ve bu uygulamanın pratik üretim esnasında yapılması gerektiğini göstermiştir. Daha önceki literatür çalışmalarında basınç ile lif hacimsel oranı

arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla eksenler önce doğal logaritma dönüşümüne tabi tutulmuş ve akabinde bu ilişki üstel fonksiyon ile modellenmiştir. Bu çalışmanın ikinci kısmında, her bir sıkıştırma ve rahatlama ölçümü üstel fonksiyon ile modellenecek ve girdi değişkenlerinin (kumaş kat sayısının, kumaşın ıslaklık durumunun ve süreç tipinin) üstel fonksiyonun bileşenlerine olan etkisi açık bir şekilde detaylı istatistiksel analizlerle ortaya konulacaktır.

Sıkıştırma süreçlerinde ölçülen kalınlık değerlerine nispeten, rahatlama süreçlerinde ölçülen düşük kumaş kalınlıkları, rahatlama esnasında bir miktar enerjinin kaybedildiğini (dağıldığını, boşa harcandığını) göstermiştir. Bu çalışmanın ikinci kısmında tek ve çok katlı kuru ve ıslak kumaşların sıkıştırılma ve rahatlama eğrileri matematiksel olarak modellenip; ilgili sıkıştırma, rahatlama ve dağıtılan (sıkıştırma - rahatlama) enerjileri hesaplanarak; bu enerjilerin kumaş kat sayısı ve reçine varlığından nasıl etkilendiği istatistiksel olarak ele alınacaktır.

Bu çalışma ve takip eden ikinci çalışma, takviye kumaşlarından ıslak-kalıp metoduyla kompozit malzeme üretiminde göz önüne alınması gereken hususları çıplak bir şekilde sunmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmanın sonuçları kompozit üreticileri için faydalı olacaktır.

#### Kaynakça

- [1] Chawla, K.K. 1998. Composite materials: science and Engineering. 2nd edition. Springer, Newyork, 483s.
- [2] Correia, N.C., Robitaille, F., Long, A.C., Rudd, C.D., Simacek, P., Advani, S.G. 2004. Use of Resin Transfer Molding Simulation to Predict Flow, Saturation, and Compaction in the VARTM Process, Journal of Fluids Engineering, Cilt. 126, s. 210-215. DOI: 10.1115/1.1669032
- [3] Govignon, Q., Bickerton, S., Morris, J., Kelly, P.A. 2008. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion Process, Journal of Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Cilt. 39, s. 1412-1426. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.05.005
- [4] Hammami, A., Gebart, B.R. 2000. Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process, Journal of Polymer Composites, Cilt. 21, s. 28-40. DOI: 10.1002/pc.10162
- [5] Mazumdar, S.K. 2001. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. 1st edition. CRC Press, Boca Raton Fla, 416s.
- [6] Robitaille, F., Gauvin, R. 1998. Compaction of Textile Reinforcements for Composite Manufacturing. I: Review of Experimental Results, Journal of Polymer Composites, Cilt. 19, s. 198-216. DOI: 10.1002/pc.10091

- [7] Pearce, N., Summerscales, J. 1995. The compressibility of a reinforcement fabric, *Journal of Composites Manufacturing*, Cilt. 6, s. 15-31. DOI: 10.1016/0956-7143(95)93709-S
- [8] Lekakou, C., Johari, M.A.K.B., Bader, M.G. 1996. Compressibility and flow permeability of two-dimensional woven reinforcements in the processing of composites, *Journal of Polymer Composites*, Cilt. 17, s. 666-672. DOI: 10.1002/pc.10658
- [9] Luo, Y., Verpoest, I. 1999. Compressibility and Relaxation of a New Sandwich Textile Preform for Liquid Composite Molding, *Journal of Polymer Composites*, Cilt. 20, s. 179-191. DOI: 10.1002/pc.10345
- [10] Potluri, P., Sagar, T.V. 2008. Compaction modelling of textile preforms for composite structures, *Journal of Composite Structures*, Cilt. 86, s. 177-185. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.03.019
- [11] Wu, W., Jiang, B., Xie, L., Klunker, F., Aranda, S., Ziegmann, G. 2013. Effect of compaction and preforming parameters on the compaction behavior of bindered textile preforms for automated composite manufacturing, *Applied Composite Materials*, Cilt. 20, s. 907-926. DOI: 10.1007/s10443-012-9308-1.
- [12] Lomov, S.V., Molnár, K. 2016. Compressibility of carbon fabrics with needleless electrospun PAN nanofibrous interleaves, *Express Polymer Letters*, Cilt. 10, s. 25-35. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2016.4.
- [13] Yousaf, Z., Potluri, P., Withers, P. J. 2017. Influence of tow architecture on compaction and nesting in textile preforms, *Applied Composite Materials*, Cilt. 24, s. 337-350. DOI: 10.1007/s10443-016-9554-8.