Araştırma Makalesi / Research Article

BAMBU/POLYESTER KARIŞIMLI DOKUMA KUMAŞLARDA TERMOFİZYOLOJİK KONFOR ÖZELLİKLERİNİN BOX-BEHNKEN DENEYSEL TASARIMIYLA OPTİMİZASYONU VE PERMETEST ÖLÇÜMLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Güler ÖNCÜ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil Bölümü, Isparta, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 30.06.2025
Kabul Tarihi / Accepted: 14.12.2025

***ÖZ*:** Bu çalışmada, bambu/polyester karışımlı dokuma kumaşların termofizyolojik konfor özellikleri, çözgü sıklığı, atkı sıklığı ve elyaf karışım oranı gibi yapısal parametreler açısından değerlendirilmiştir. Deneysel tasarım yöntemi olarak Box-Behnken yaklaşımı benimsenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda ısıl direnç (Rct) ve su buharı direnci (Ret) değerleri analiz edilmiştir. Ölçümler, buhar geçirgenliği ve ısı iletimine dair parametreleri eşzamanlı olarak değerlendirme yeteneğine sahip, sensör temelli bir test cihazı olan Permetest sistemiyle gerçekleştirilmiştir. ANOVA sonuçları, özellikle çözgü ve atkı sıklığının Ret ve Rct üzerinde anlamlı etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bambu oranının artırılmasının kumaşın nem yönetimi kapasitesini iyileştirdiği, polyester oranının ise ısı yalıtım performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Bulgular, farklı iklim koşulları ve giyim ihtiyaçlarına uygun fonksiyonel kumaşların geliştirilmesinde yapı-parametre optimizasyonunun kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Termofizyolojik konfor, Bambu/polyester kumaş, Box-Behnken tasarımı, Su buharı direnci, Permetest cihazı

OPTIMIZATION OF THERMOPHYSIOLOGICAL COMFORT PROPERTIES OF BAMBOO/POLYESTER BLENDED WOVEN FABRICS USING BOX-BEHNKEN EXPERIMENTAL DESIGN AND EVALUATION WITH PERMETEST MEASUREMENTS

***ABSTRACT*:** In this study, the thermophysiological comfort properties of bamboo/polyester blended woven fabrics were evaluated based on structural parameters such as warp density, weft density, and fiber blend ratio. The Box-Behnken design approach was employed as the experimental method, and the resulting thermal resistance (Rct) and water vapor resistance (Ret) values were statistically analyzed. Measurements were conducted using the Permetest device, a sensor-based system capable of simultaneously assessing water vapor permeability and thermal conductivity under controlled laboratory conditions. ANOVA results indicated that warp and weft densities significantly influenced both Rct and Ret values. Moreover, increasing the bamboo content enhanced the fabric's moisture management capability, while higher polyester ratios contributed to improved thermal insulation. The findings highlight the critical importance of structural optimization in designing functional textile surfaces suitable for various climatic conditions and wearer comfort requirements.

Keywords: Thermophysiological comfort, Bamboo/polyester fabric, Box-Behnken design, Water vapor resistance, Permetest device

Sorumlu Yazarlar/Corresponding Authors: *guleroncu@isparta.edu.tr*
DOI: *https://doi.org/10.7216/teksmuh.1730746* *www.tekstilvemuhendis.org.tr*

1. GİRİŞ

Tekstil materyallerinin kullanıcı üzerindeki konfor algısı, yalnızca estetik boyutlarla sınırlı olmayıp, hava geçirgenliği, nem yönetimi ve ısı yalıtımı gibi termofizyolojik parametrelerle doğrudan ilişkilidir [1]. Termofizyolojik konfor, insan cildi ile çevre arasındaki ısı ve nem transferinin dengeli biçimde sağlanması olarak tanımlanmakta ve giysi performansının belirleyici unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, elyaf kompozisyonu, iplik özellikleri ve dokuma parametreleri gibi yapısal faktörlerin konfor performansı üzerinde kritik rol oynadığı literatürde açıkça ortaya konmuştur [2-3].

Sürdürülebilirlik anlayışının önem kazandığı günümüzde, yenilenebilir ve çevre dostu kaynaklara dayalı doğal liflere yönelik ilgi artmıştır. Bambu lifi, biyobozunur yapısı, nem tutma kapasitesi ve yumuşak tuşesi sayesinde fonksiyonel tekstil ürünlerinde alternatif bir hammadde olarak öne çıkmaktadır [4-5]. Bununla birlikte, bambu lifinin polyester gibi sentetik liflerle karıştırılarak kullanılması durumunda, karışım oranlarının ve yapısal parametrelerin konfor özellikleri üzerindeki etkileri yeterince incelenmemiştir. Özellikle çözgü ve atkı sıklığı gibi dokuma parametreleri, kumaşın gözenekliliğini ve lif yerleşimini doğrudan etkileyerek, termal iletkenlik ve buhar transferi mekanizmalarını belirgin biçimde değiştirmektedir [6-7].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, konfor analizlerinde yalnızca makro düzeydeki fiziksel parametrelerin değil, aynı zamanda mikro-yapısal düzenlemelerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [8–9]. Bu doğrultuda, lif, iplik ve kumaş düzeyini esas alan modelleme yaklaşımları; nemin yayılması ve buharın aktarılması süreçlerini daha gerçekçi biçimde açıklayarak giysi performansını değerlendirmeye yeni bir bakış getirmektedir. Bu nedenle bambu/polyester karışımlı kumaşların farklı yapısal düzenlemeler altında sistematik olarak araştırılması, hem akademik hem de uygulamalı tekstil çalışmaları için önemli bir katkı sunmaktadır.

Önceki araştırmalar, bambu lifinin nem yönetimi ve termal konfora katkısını ortaya koymuş; ancak bambu/polyester karışımlarında farklı dokuma yoğunluklarının ve elyaf oranlarının etkileşimli etkileri sistematik biçimde ele alınmamıştır. Bu eksiklik, özellikle karışım kompozisyonu ile yapısal parametrelerin birlikte değerlendirilmesi açısından literatürde önemli bir boşluk oluşturmaktadır. Ayrıca, bu tür kumaşların spor giyim, medikal tekstiller ve sürdürülebilir moda tasarımlarında kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, elde edilecek sonuçların yeni nesil fonksiyonel tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlaması beklenmektedir. Bununla birlikte, Box-Behnken deneysel tasarımı, sınırlı deney sayısıyla çoklu faktörlerin bireysel ve etkileşimli etkilerini istatistiksel olarak ortaya koyabilmesi sayesinde tercih edilmiştir. Bu yöntem, klasik yaklaşımlara göre daha verimli veri üretmekte ve yapı–performans ilişkisini yüksek doğrulukla açıklamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bambu/polyester karışımlı dokuma kumaşlarda çözgü sıklığı, atkı sıklığı ve elyaf karışım oranı gibi yapısal parametrelerin termofizyolojik konfor özelliklerine (ısıl direnç ve su buharı direnci) etkilerini Box-Behnken deneysel tasarımı kullanarak analiz etmektir. Çalışmada, elde edilen veriler Permetest cihazıyla ölçülmüş, varyans analizi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve bulgular literatürdeki önceki çalışmalar ışığında tartışılmıştır. Bu sayede, hem sürdürülebilir hammaddelerin tekstil yüzeylerinde kullanımına yönelik yeni veriler sunmak hem de fonksiyonel tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine katkı sağlamak hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Malzemeler

Örnek kumaşlar, %100 bambu Nm 40/2 çözgü ipliği ve %100 bambu Nm 40/2 ve %100 polyester Nm 40/2 olmak üzere iki farklı atkı ipliği kullanılarak şablon el dokuma makinesinde dokunmuştur. Metrekare başına gram olarak ölçülen kumaş numunelerinin ağırlığı, 120 g/m² ila 170 g/m² aralığında standart bir test makinesi kullanılarak belirlendi. Sonuç olarak, hafif, gözenekli ve gevşek dokunmuş kumaş numuneleri termal direnç ve su buharı direnci özelliklerinin araştırılması için bilinçli olarak seçilmiştir.

Bağımsız değişkenler çözgü sıklığı (çözgü/cm), atkı sıklığı (atkı/cm) ve bambu/ polyester (%) oranıdır. Bu faktörlerden bambu/polyester oranı Tablo 1'de ana hatlarıyla belirtilmiştir. %25 oranının kullanılması, üç atkı bambu ipliğinin bir atkı polyester ipliğine birleştirildiği anlamına gelir; %50 oranı bir atkı bambu ipliğinin bir atkı polyester ipliğine eşit oranını içerirken, %75 oranı üç atkı polyester ipliğinin bir atkı bambu ipliğine eşit oranını içerir. Bu nedenle, kumaş yapısında atkı ipliğinde %25, %50 ve %75 oranlarında polyester içeriğine sahip örnekler üretilmesi hedeflenmiştir. Santimetre başına atkı ve çözgü ipliği numarasındaki farklılıklar nedeniyle kumaş ağırlıklarının numuneler arasında farklılıklar gösterdiğini belirtmek yerinde olacaktır.

2.2. Yöntemler

2.2.1. Test Yöntemleri

Kumaşların fiziksel özellikleri, iplik numarasını (AS/NZS 2001.1.2:1998), santimetre başına atkı/uçları (AS2001.2.5 -1991) ve birim alan başına kütle (AS2001.2.13-1987 Avustralya standart yöntemleriyle değerlendirildi Testten önce, kumaş numuneleri standart çevre koşulları altında, özellikle %65±3 bağıl nemde (RH) ve 20±2°C sıcaklıkta, AS 2001.1 -1995'te belirtilen yönergelere bağlı kalarak 24 saat süreyle şartlandırmaya tabi tutuldu. Kumaşların termo-fizyolojik analizi Permetest cihazı (Sun Tekstil AŞ./İzmir-Türkiye) kullanılarak gerçekleştirildi.

2.2.2. Box-Behnken deney tasarımı

İkinci dereceden üç faktörlü ve terimli sistemlerin incelenmesi için çeşitli özel deneysel tasarım metodolojileri geliştirilmiştir; bunların arasında Box-Behnken istatistiksel deneysel tasarım

yaklaşımı öne çıkmaktadır [11]. Araştırma çerçevesi ve numune planlaması, Tablo 1'de verilen her bir kontrol faktörü için ayrıntılı spesifikasyonlarla birlikte Box-Behnken deney tasarımını benimsemiştir. Dokuma numuneleri, bambu ve polyester gibi elyaf özelliklerini içeren Nm 40/2 atkı ipliği kullanılarak üretilmiştir. Kumaşların tamamı 1/1 Bezayağı dokuma ile dokunmuştur. Çalışmada birim uzunluk başına atkı ipliği sayısı olarak ifade edilen çözgü sıklığı, atkı sıklığı (yoğunluğu) ve bambu /polyester oranı değişkenler olarak ele alındı.

Bu araştırmada, operasyonel parametrelerin, özellikle çözgü sıklığı, atkı sıklığı ve Bambu/Polyester (B/P) oranının termal konfor üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Box-Behnken istatistiksel deneysel tasarım yöntemi kullanıldı. Bu deneylerde dikkate alınan bağımsız değişkenler; çözgü sıklığı (1 cm kumaş üzerindeki çözgü ipliği sayısıyla temsil edilir ve X_1 = 10–20 aralığında gösterilir), atkı sıklığı (santimetre başına iplik sayısı olarak ifade edilir ve X_2 = 12–20 aralığında gösterilir) ve bambu/polyester (B/P) oranı (yüzde olarak ifade edilir ve X_3 = %25–75 aralığında gösterilir) olarak belirlenmiştir. Sırasıyla -1, 0 ve +1 olarak temsil edilen her değişken için atanan düşük, orta ve yüksek seviyeler, Box-Behnken istatistiksel deney tasarımında malzeme hazırlama için kontrol faktörlerini ve bunlara karşılık gelen seviyeleri tanımlayan Tablo 1'de sunulmaktadır.

Box-Behnken istatistiksel deney tasarımında toplam 17 farklı test grubu oluşturulmuş ve merkez noktası beş kez tekrarlanmıştır. Deneysel veriler ve katsayılar, Stat-Ease Design Expert 8.0 Trial bilgisayar programı kullanılarak regresyon analizi yoluyla elde edildi. Daha sonra veriler aşağıda sunulan ikinci dereceden polinom denklemi kullanılarak doğrulandı;

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1xX_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad [1]$$

burada y sırasıyla tahmin edilen tepki, b 0 dengeleme terimi, b i doğrusal etki, b ij kare ve etkileşim etkileri ve x bağımsız değişkenlerdir

Tablo 1. Box-Behnken istatistiksel deney tasarımında bağımsız değişkenlerin seviyeleri

Kontrol faktörleri	Sembol	Seviyeler			Parametre türü
		Düşük	Orta	Yüksek	
		-1	0	1	
Çözgü sıklığı (çözgü/cm)	X_1	10	15	20	Nicel
Atkı sıklığı(atkı iplik/cm)	X_2	12	16	20	Nicel
Bambu/polyester oranı (%)	X_3	25	50	75	Nicel

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Isıl Konfor Özelliklerinin Değerlendirilmesinde Deneysel Optimizasyon

Gerçek ve kodlanmış bağımsız değişkenlerin deneysel tasarıma bağlı olarak temsili Tablo 2'de özetlenmiştir.

Isıl konfor özelliklerinin Şekil 1. (a) ısıl direnç (m².K/W), (b) su buharı direnci (m².Pa/W), değerlendirilmesinde gerçek ve tahmin edilen deneysel sonuçların yer aldığı Box-Behnken deneysel istatistiksel tasarımı Şekil 1'de gösterilmektedir.

Şekil 1'de yer alan grafikler, bambu/polyester karışımlı kumaşların ısıl direnç (m²·K/W) ve su buharı direnci (m²·Pa/W) değerlerine ilişkin deneysel bulgular ile model tahminleri arasındaki uyumu göstermektedir. Şekil 1a'da, ısıl direnç için deneysel ve model tarafından öngörülen değerlerin karşılaştırmasını sunmaktadır. Noktaların renk skalasına göre dağılımı 0.0199 m²·K/W ile 0.0485 m²·K/W arasında değişmektedir. Grafik yüzeyinde noktaların doğrusal çizgi üzerinde ve çevresinde homojen bir şekilde yerleşmesi, modelin deneysel ısıl direnç verilerini yüksek doğrulukla temsil ettiğini ve sistematik bir sapmanın olmadığını göstermektedir.

Benzer biçimde, Şekil 1b su buharı direnci için deney ve model değerlerini karşılaştırmakta ve değerlerin 3.3 m².Pa/W ile 4.6 m².Pa/W aralığında değiştiğini göstermektedir. Noktalar tahmin çizgisine yakın bir dağılım sergileyerek, modelin su buharı direncini değişen yapısal ve malzeme parametreleri doğrultusunda güvenilir şekilde öngördüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle orta ve uç değerlerdeki tutarlılık, tahmin performansının yüksek olduğunu ve istatistiksel modelin anlamlı sonuçlar ürettiğini doğrulamaktadır.

Genel olarak her iki grafik de, uygulanan Box-Behnken deneysel tasarım ve oluşturulan regresyon modellerinin, kumaşların termofizyolojik konfor parametrelerini yansıtmakta güçlü ve dengeli bir yapı sergilediğini kanıtlamakta kumaşların ısıl ve nem geçirgenliği davranışlarını açıklamada yeterli duyarlılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

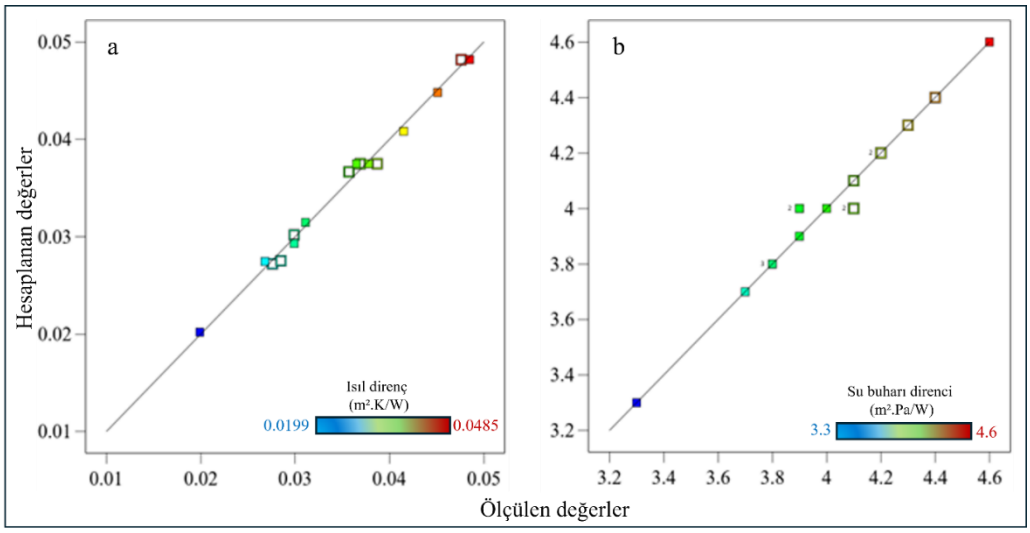
3.2. Isıl direnç (m².K/W) Değerlendirmesinde Deneysel Optimizasyon

Deneysel verilerin etkin bir şekilde değerlendirilmesi ve deney sayısının en aza indirilerek sürecin optimize edilmesi amacıyla Box-Behnken istatistiksel deney tasarımı uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçları doğrultusunda, termal iletkenlik (ThC) parametresine ilişkin çözüm fonksiyonu, deneylerden hesaplanan katsayılar kullanılarak oluşturulmuştur.

$$ThC = 0.0375 + 0.0059x_1 - 0.0081x_2 - 0.0014x_3 - 0.0024x_1x_2 - 0.0027x_1x_3 + 0.0023x_2x_3 - 0.0037x_1^2 - 0.0020x_2^2 + 0.0010x_3^2 \quad [2]$$

Tablo 1. Box-Behnken istatistiksel deney tasarımında bağımsız değişkenlerin seviyeleri

	Gerçek ve kodlanmış bağımsız değişkenler		
Sıra numarası	X_1 Çözgü sıklığı (çözgü/cm)	X_2 Atkı sıklığı(iplik/cm)	X_3 Bambu/Polyester oranı (%)
1	15 (0)	20 (+1)	75 (+1)
2	10 (-1)	20 (+1)	50 (0)
3	20 (+1)	16 (0)	25 (-1)
4	10 (-1)	16 (0)	75 (+1)
5	15 (0)	16 (0)	50 (0)
6	15 (0)	20 (+1)	25 (-1)
7	15 (0)	16 (0)	50 (0)
8	15 (0)	16 (0)	50 (0)
9	20 (+1)	16 (0)	75 (+1)
10	15 (0)	12 (-1)	25 (-1)
11	15 (0)	16 (0)	50 (0)
12	15 (0)	16 (0)	50 (0)
13	10 (-1)	12 (-1)	50 (0)
14	20 (+1)	20 (+1)	50 (0)
15	10 (-1)	16 (0)	25 (-1)
16	15 (0)	12 (-1)	75 (+1)
17	20 (+1)	12 (-1)	50 (0)



Şekil 1. Isıl konfor özelliklerinin (a) ısıl direnç (m².K/W), (b) su buharı direnci(m².Pa/W), değerlendirilmesinde Box-Behnken deneysel istatistiksel tasarımı ile hesaplanan deneysel sonuçlar.

Yanıtlardaki eğriliğin önemini %95 güven aralığında değerlendirmek amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Isıl iletkenliğin incelenmesinde modelin ve deney sonuçlarının sunumu Tablo 3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel tasarım programı kullanılarak analiz için quadratic bir model önerilmiş ve sonraki analizler, ısıl direnç ile karşılaştırmalı değerlendirme için önerilen quadratic model tercih edilerek gerçekleştirilmiştir.

Modelin F-değeri 108.73 olarak bulunmuştur; bu değer, modelin genel olarak anlamlı olduğunu ve varyansın büyük bir kısmının model tarafından açıklandığını göstermektedir. Bu bağlamda, söz konusu F-değerinin yalnızca %0.01 olasılıkla tesadüfen (gürültü kaynaklı) oluşabileceği ifade edilebilir.

Modelde yer alan değişkenlerin anlamlılığı p-değerleriyle değerlendirilmiş; $p < 0.0500$ kriteri doğrultusunda X_1, X_2, X_3, X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3, X_1^2, $X3^2$ terimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, $p > 0.1000$ olan model terimleri anlamlı bulunmamış ve bu tür terimlerin (modelin hiyerarşik yapısını destekleyenler hariç) modelden çıkarılması, model sadeleştirmesi yoluyla iyileştirme olasılığına işaret etmektedir.

Modelin uyumunun değerlendirilmesinde kullanılan Lack of Fit (uyumsuzluk) F-değeri ise 1.86 olarak hesaplanmış ve bu değerin %27.69 olasılıkla yalnızca rastlantısal etkilerden kaynaklanabileceği belirlenmiştir. Bu sonuç, modelin deneysel verilere iyi uyum sağladığını göstermekte olup; uyumsuzluğun

istatistiksel olarak anlamlı olmaması, model geçerliliği açısından olumlu bir bulgudur.

3.2.1. Isıl direnç (m².K/W) değerlendirmesinde atkı sıklığı ile çözgü sıklığı arasındaki etkileşim

Şekil 2'de sunulan üç boyutlu yüzey grafiği, çözgü sıklığı (X_1) ve atkı sıklığı (X_2) değişkenlerinin, sabit tutulan bambu/polyester oranı (X_3 = %50) altında kumaşın ısıl direnç (m²·K/W) performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Deneysel bulgulara göre, çözgü ve atkı sıklıklarının artırılması genel olarak termal direnci olumlu yönde etkilemektedir; ancak maksimum ve minimum değerler bu artışların simetrik bir noktada olmadığını göstermektedir. En düşük ısıl direnç değeri olan 0.0199 m²·K/W, çözgü sıklığının 10 çözgü/cm ve atkı sıklığının 20 atkı/cm olduğu koşullarda elde edilmiştir. Buna karşılık, en yüksek ısıl direnç değeri olan 0.0485 m²·K/W, çözgü sıklığı 20 çözgü/cm ve atkı sıklığı 12 atkı/cm olduğunda elde edilmiştir. Bu sonuç, sık dokunmuş ama aşırı dolgun olmayan yapıların hava geçişini dengeleyerek daha yüksek termal izolasyon sağladığını ve dolayısıyla ısıl direnci artırdığını göstermektedir [12-13]. Ayrıca grafik yüzeyindeki eğim incelendiğinde, çözgü sıklığı (X_1) faktörünün ısıl direnç üzerinde daha düzenli ve belirgin bir etki oluşturduğu; atkı sıklığının (X_2) ise daha kompleks ve doğrusal olmayan bir etki sergilediği gözlemlenmiştir[14]. Bu durum, istatistiksel modelleme sonuçlarında X_1'in daha güçlü bir ana etken olarak ortaya çıkmasıyla da örtüşmektedir. Elde edilen bulgular, kumaşın termal performansını optimize etmek amacıyla çözgü ve atkı yoğunluklarının birlikte ancak dengeli bir şekilde düzenlenmesinin kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır [15].

3.2.2. Isıl direnç (m².K/W) değerlendirmesinde B/P oranı ile çözgü sıklığı arasındaki etkileşim

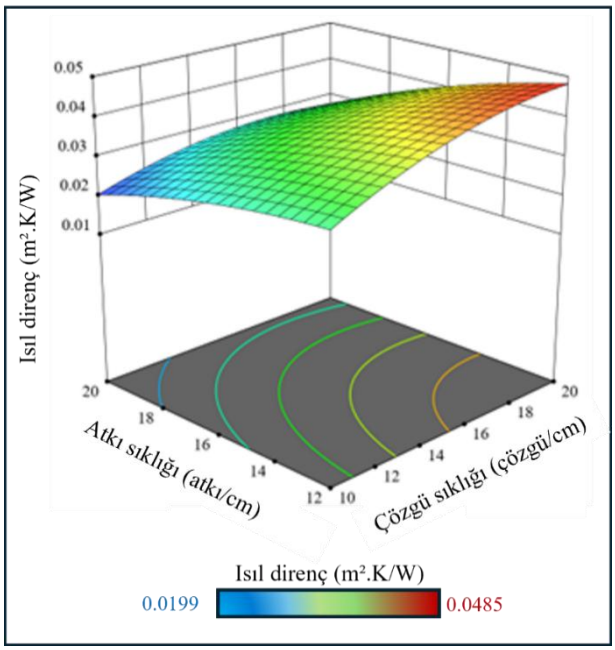
Şekil 3'de ki üç boyutlu yüzey grafiği, sabit tutulan atkı sıklığı (X_2 = 16 atkı/cm) altında, çözgü sıklığı (X_1) ve bambu/polyester oranı (X_3) değişkenlerinin kumaşın ısıl direnç özelliği üzerindeki ortak etkisini göstermektedir. Grafik yüzeyi genel olarak yukarı doğru eğilim göstermekte olup, her iki değişkenin artışına bağlı olarak termal direnç değerlerinde anlamlı bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle çözgü sıklığının 10 çözgü/cm'den 20 çözgü/cm'ye ve polyester oranının yükseltilmesiyle birlikte, ısıl direnç değeri değeri düşmektedir. Bambu oranının düşük ve çözgü sıklığının yüksek olduğu noktada ısıl direnç yükselmiştir. Polyester oranındaki artış termal direnci düşürmektedir [16].

Bu durum, daha sık çözgü sıklığına sahip ve polyester oranı yüksek kumaş yapılarının, hava geçirgenliğini sınırlayarak daha iyi bir ısıl izolasyon sağladığını ve böylece termal direnç performansını artırdığını ortaya koymaktadır [17]. Yüzey grafiğindeki eğim analizi, her iki faktörün de etkili olduğunu ancak çözgü sıklığı (X_1) değişkeninin daha baskın ve doğrusal bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, bambu oranı arttıkça, ısıl direnç değerindeki yükseliş daha kademeli ve eğrisel bir karakter sergilemektedir [18].

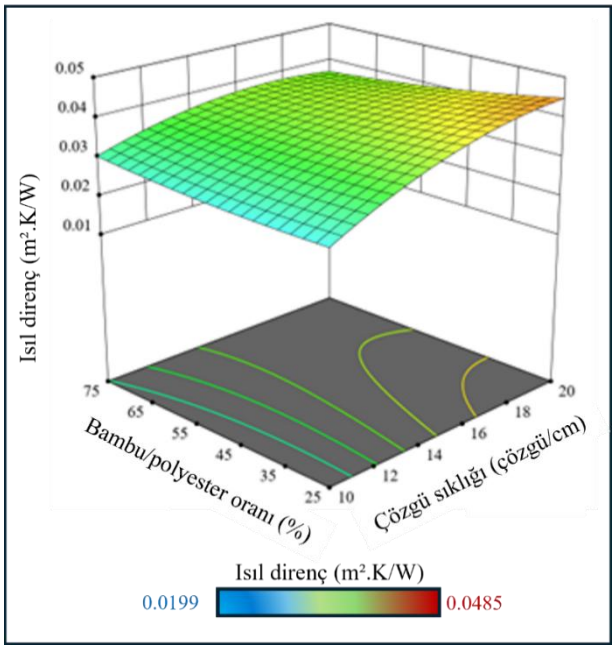
Bu bulgular, çevresel açıdan sürdürülebilir olan bambu lifinin ısıl performansa katkı sağladığını ve özellikle yüksek çözgü yoğunluğuyla birlikte kullanıldığında termal konfor özelliklerini optimize edebileceğini göstermektedir. Bambu lif oranındaki artış kumaşların mikroyapısal gözenekliliğini artırarak ısı iletimini sınırlandırmakta ve buna bağlı olarak ısıl direnç değerlerini yükseltmektedir. Bu durum, bambu lifinin doğal gözenekli yapısı ve yüksek nem yönetim kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir [19]. Özellikle düşük tex değerine sahip ince ipliklerin kullanımı, kumaş içerisinde daha fazla hava boşluğu oluşmasına neden olarak ısı transferini azaltmakta ve böylece tekstil yüzeyinin termal izolasyon kabiliyetini belirgin şekilde artırmaktadır. Bu bağlamda, bambu esaslı kumaşların yüksek ısıl direnç gerektiren konfor odaklı tekstil uygulamaları için uygun bir alternatif sunduğu söylenebilir [20].

Tablo 3. Isıl iletkenlik değerlendirmesi için model denklemlerindeki varyans analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	Df	Ortalama Kare	F değeri	p değeri	
Model	0.0010	9	0.0001	108.73	< 0.0001	önemli
X_1-Çözgü sıklığı	0.0003	1	0.0003	284.16	< 0.0001	
X_2-atkı sıklığı	0.0005	1	0.0005	523.96	< 0.0001	
X_3-bambu/polyester oranı	0.0000	1	0.0000	15.24	0.0059	
X_1X_2	0.0000	1	0.0000	23.70	0.0018	
X_1X_3	0.0000	1	0.0000	29.38	0.0010	
X_2X_3	0.0000	1	0.0000	21.32	0.0024	
X_1^2	0.0001	1	0.0001	57.69	0.0001	
X_2^2	0.0000	1	0.0000	17.61	0.0041	
X_3^2	4.10^{-6}	1	4.106E-06	4.14	0.0814	
Hata Terimi	6.947E-06	7	9.925E-07			
Uyumsuzluk Hatası	4.047E-06	3	1.349E-06	1.86	0.2769	önemsiz
Saf Hata	2.900E-06	4	7.250E-07			
Toplam Düzeltme Varyansı	0.0010	16				



Şekil 2. Isıl direnç (m².K/W) değeri değişimleri: atkı sıklığı ile çözgü sıklığı arasındaki ilişki



Şekil 3. Isıl direnç (m².K/W) değeri değişimleri: B/P oranı ile çözgü sıklığı arasındaki ilişki

3.2.3. Isıl direnç (m².K/W) değerlendirmesinde B/P oranı ile atkı sıklığı arasındaki etkileşim

Şekil 4'de verilen üç boyutlu yüzey grafiği, sabit tutulan çözgü sıklığı (X_1 = 15 çözgü/cm) altında, atkı sıklığı (X_2) ve bambu/polyester oranı (X_3) değişkenlerinin kumaşın ısıl direnç (m²·K/W) performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Yüzey eğrisi, atkı sıklığı azaldıkça ve bambu oranı arttıkça ısıl direnç değerinin yükseldiğini göstermektedir [21]. Özellikle düşük atkı sıklığı (12 atkı/cm) ve yüksek bambu oranı kombinasyonunda, ısıl direnç değeri yaklaşık olarak 0.0485 m²·K/W ile maksimum düzeye ulaşmaktadır. Buna karşılık, bambu oranının ve atkı sıklığının yüksek (20 atkı/cm) olduğu durumlarda, minimum ısıl direnç değeri olan 0.0199 m²·K/W seviyelerine gerilemektedir [22]. Bu bulgu, daha seyrek atkı sıklığına sahip ve bambu lifi oranı yüksek kumaşların, daha fazla hava boşluğu ve lifin doğal yalıtım özelliği sayesinde ısıyı daha iyi tuttuğunu göstermektedir. Ayrıca yüzeyin eğimi, bambu oranı (X_3) faktörünün ısıl direnç üzerindeki etkisinin belirgin arttığını; buna karşın atkı sıklığı (X_2) faktörünün etkisinin daha karmaşık ve doğrusal olmayan bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır.

Yüksek atkı sıklıkları kumaş yapısını sıkılaştırmakta ve bu durum ısıyı geçirecek mikro kanallar oluşturarak termal direnci azaltabilmektedir [23].

Sonuç olarak, kumaşların ısıl performansını artırmak için bambu lifi oranının artırılması önerilirken, atkı sıklığının da optimal düzeyde tutulması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu etkileşim, hem malzeme kompozisyonunun hem de yapısal parametrelerin birlikte optimize edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır [24].

Elde edilen bulgular, bambu/polyester oranı ile çözgü ve atkı sıklığı gibi temel yapısal parametrelerin kumaşların termal konfor özellikleri üzerinde birbirinden bağımsız olmayan, ancak birlikte değerlendirildiğinde belirgin etkileşimler ortaya koyduğunu göstermektedir. Termal direnç değerlerindeki farklılıklar, özellikle mikro yapısal açıklıklar, liflerin higroskopik kapasitesi ve kumaşın hava geçirgenliğini düzenleyen parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Çözgü sıklığının artışı genellikle daha öngörülebilir ve doğrusal bir ısıl yalıtım artışı sağlarken, atkı sıklığı ve elyaf bileşimi daha kompleks ve eğrisel yanıtlar oluşturmaktadır [25]. Lif morfolojisi açısından değerlendirildiğinde, bambu lifinin yüksek nem tutma kapasitesi ve doğal gözenekli yapısı sayesinde ısı transferini sınırlandırıcı bir rol üstlendiği, buna karşılık polyesterin yapısal kompaktlığı nedeniyle ısı geçirgenliğini artırabildiği anlaşılmaktadır. Bu parametrelerin birbiriyle etkileşimli katkılarıyla geliştirilen kumaş yapıları, farklı çevresel şartlara uyum sağlayabilen yüksek performanslı tekstil uygulamaları açısından dikkate değer bir olanak sunmaktadır.

3.3. Su Buharı Direnci Deneysel Optimizasyon (m².Pa/W) Değerlendirmesi

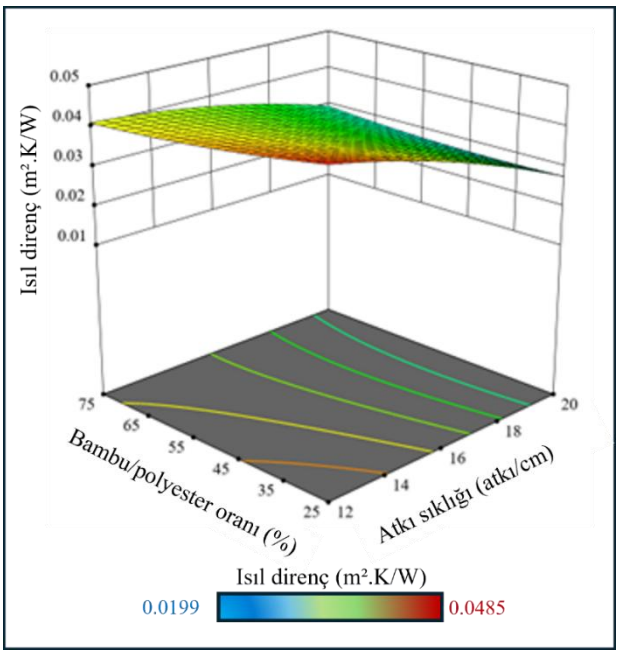
Deneysel verilerden elde edilen katsayılar kullanılarak termal iletkenlik (ThC) için elde edilen çözüm fonksiyonu belirlendi.

$$ThC = 4.00 - 0.1500x_1 - 0.3250x_2 + 0.0750x_3 + 0.0000x_1x_2 + 0.1000x_1x_3 - 0.0250x_2x_3 - 0.1625x_1^2 - 0.0875x_2^2 + 0.2625x_3^2 + 0.5750x_1^2\,x_2 - 0.0250x_1^2\,x_3 + 0.3500x_1x_2^2 \quad [3]$$

Yanıtlardaki eğriliğin önemini %95 güven aralığında değerlendirmek üzere varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Isıl iletkenliğin incelenmesinde modelin ve deney sonuçlarının sunumu Tablo 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel tasarım programı kullanılarak analizinin ardından doğrusal modelin en uygun olduğu ortaya çıktı. Kübik bir model önerilmiş ve sonraki analizler, su buharı direnci ile karşılaştırmalı değerlendirme için önerilen kübik model tercih edilerek gerçekleştirilmiştir.

Modelin F-değeri 11.75 olarak hesaplanmış olup, bu değer modelin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu büyüklükte bir F-değerinin yalnızca %1.46 olasılıkla rastlantısal (gürültü kaynaklı) olarak meydana gelmesi beklenmektedir.

Bağımsız değişkenlerin modele etkisi p-değerleri üzerinden değerlendirilmiş; $p < 0.0500$ kriteri doğrultusunda X_1, X_2, X_1^2, X_3^2, $X_1^2X_2$ ve $X_1X_2^2$ terimlerinin model açısından anlamlı olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, $p > 0.1000$ olan etkileşim ya da polinomial terimlerin modelde anlamlı katkı sağlamadığı görülmüştür.



Şekil 4. Isıl direnç (m².K/W) değeri değişimleri: B/P oranı ile atkı sıklığı arasındaki ilişki

Tablo 4. Su Buharı Direnci değerlendirmesi için model eşdeğerlerindeki varyans analizi.

Kaynak	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F değeri	P değeri	
Model	1.41	12	0.1175	11.75	0.0146	önemli
X_1-Çözgü sıklığı	0.0900	1	0.0900	9.00	0.0399	
X_2-atkı sıklığı	0.4225	1	0.4225	42.25	0.0029	
X_3-bambu/polyester oranı	0.0225	1	0.0225	2.25	0.2080	
X_1X_2	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
X_1X_3	0.0400	1	0.0400	4.00	0.1161	
X_2X_3	0.0025	1	0.0025	0.2500	0.6433	
X_1^2	0.1112	1	0.1112	11.12	0.0290	
X_2^2	0.0322	1	0.0322	3.22	0.1470	
X_3^2	0.2901	1	0.2901	29.01	0.0057	
$X_1^2X_2$	0.6613	1	0.6613	66.13	0.0012	
$X_1^2X_3$	0.0012	1	0.0012	0.1250	0.7415	
$X_1X_2^2$	0.2450	1	0.2450	24.50	0.0078	
Saf Hata	0.0400	4	0.0100			
Toplam Düzeltme Varyansı	1.45	16				

3.3.1. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değerlendirmesinde atkı sıklığı ile çözgü sıklığı arasındaki etkileşim

Su Buharı Direnci, bir kumaşın su buharına karşı gösterdiği dirençtir ve terin buhar halinde dış ortama atılmasını engelleyip engellemediğini belirler. Şekil 5'de sunulan üç boyutlu yüzey grafiği, çözgü sıklığı (X_1) ve atkı sıklığı (X_2) faktörlerinin, sabit bambu/polyester oranı (X_3 = %50) altında kumaşın su buharı direnci üzerindeki etkileşimini ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyi, merkez noktada belirgin şekilde çukurlaşmakta olup, bu durum hem X_1 hem de X_2 orta seviyelerdeyken su buharı direncinin minimuma indiğini göstermektedir. Özellikle çözgü ve atkı sıklıklarının orta düzeylerde olduğu koşullarda (yaklaşık 15 çözgü/cm ve 15 atkı/cm), su buharı direnci değeri minimum düzey olan yaklaşık 3.3 m²·Pa/W'ye düşmektedir [26].

Buna karşılık, çözgü ve/veya atkı sıklıklarının hem düşük hem de yüksek düzeylerinde (10 veya 20 çözgü/cm, 10 veya 20 atkı/cm), su buharı direncinin arttığı ve maksimum yaklaşık 4.6 m²·Pa/W seviyelerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu eğilim, kumaş yapısında çok sık dokuma yapılarının su buharı geçirgenliğini sınırladığını göstermektedir. Çok sık yapılarda ise lifler arası hava ve buhar geçişi sınırlanmakta ve bu durumda da su buharı direnci değeri artmaktadır [27].

Ayrıca grafik yüzeyinin simetrik ve eğrisel yapısı, çözgü ve atkı sıklıkları arasında çift yönlü (kuadratik) bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Bu durum, modelde X_1^2, X_2^2 gibi ikinci dereceden terimlerin ve X_1X_2 etkileşimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu destekleyici niteliktedir.

Yapılan çalışma sonucunda, kumaşın yüzey gözenekliliği ve sıkılığı gibi temel yapısal parametrelerinin; ter emilimi, sıvı yayılımı, kapillarlık, buharlaşma ve hava/nem geçirgenliği gibi nem yönetimiyle ilişkili performans göstergeleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Özellikle kumaş sıkılığının artmasıyla birlikte atkı yönünde gelişen kapiler yapıların güçlendiği ve bu durumun sıvı drenaj etkinliğini artırarak nemin daha hızlı uzaklaştırılmasını sağladığı saptanmıştır. Bu bulgular, kumaşın nem buharlaşmasını ve ter kayma hızını dengeleyerek giyen kişiye yönelik termofizyolojik konforun iyileştirilmesine katkı sunduğunu göstermektedir [28].

3.3.2. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değerlendirmesinde B/P oranı ile çözgü sıklığı arasındaki etkileşim

Şekil 6'da yer alan üç boyutlu yüzey grafiği, sabit atkı sıklığı (X_2 = 16 atkı/cm) koşulunda, çözgü sıklığı (X_1) ve bambu/polyester oranı (X_3) faktörlerinin kumaşın su buharı direnci su buharı direnci üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik yüzeyinden elde edilen verilere göre, özellikle polyester oranının artışı ve çözgü sıklığının yüksek olduğu durumunda su buharı direnci artış göstermektedir. En yüksek su buharı direnci değeri yaklaşık 4.6 m²·Pa/W seviyesinde olup, bu değer düşük çözgü sıklığı ($X_1 \approx 16$ çözgü/cm) ve yüksek polyester oranı ($X_3 \approx$ %75) kombinasyonunda ortaya çıkmaktadır.

Buna karşılık, çözgü sıklığının düşük (yaklaşık 10 çözgü/cm) ve bambu oranının yüksekliği ile birlikte su buharı direnci değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük çözgü sıklığının kumaş yapısında daha geniş gözenekler oluşturması ve yüksek bambu oranının liflerin doğal nem emme ve iletme kapasitesini artırmasıyla açıklanabilir [29]. Böylece, kumaş daha nefes alabilir bir yapıya kavuşmakta ve ter buharının ortamdan uzaklaştırılması kolaylaşmaktadır. Sonuç olarak, bu yapı özelliklerinin bir araya gelmesiyle kullanıcıya yönelik termal konfor açısından daha elverişli bir mikroklima sağlandığı söylenebilir.

Grafik yüzeyinin eğim ve kontur yapısı incelendiğinde, polyester oranının artışı su buharı direncinin artışı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir [30]. Ancak çözgü sıklığı bu etkiyi kısmen dengelemekte veya yönünü değiştirmektedir. Özellikle orta ve yüksek çözgü sıklıklarında su buharı direnci değeri daha düşük kalmakta, bu da dokuma yapısındaki açıklıkların buhar geçişini kolaylaştırdığını göstermektedir [31].

Elde edilen bulgular, su buharı direnci üzerinde özellikle polyester oranının artırılmasının belirgin bir yükseltici etki oluşturduğunu göstermiştir. Ancak, çözgü sıklığının düşürülmesi ve bambu oranının artırılmasıyla, daha açık ve gözenekli kumaş yapılarının elde edilmesi sayesinde su buharı direnci azalmış, dolayısıyla kumaşın nefes alabilirliği artmıştır [32]. Bu durum, bambu lifinin higroskopik özellikleri ile yapısal açıklıkların birlikte çalışarak nem yönetimini optimize ettiğini ortaya koymaktadır [33]. Grafik yüzeyinde gözlemlenen kontur eğilimleri, polyesterin su buharı direncini artırıcı etkisinin, özellikle orta ve yüksek çözgü sıklığı koşullarında dokuma yapısının geçirgenliği tarafından kısmen dengelendiğini ortaya koymaktadır. Literatürde belirtilen benzer sonuçlarla uyumlu olarak bu çalışma, optimum termal konfor sağlanması açısından bambu/polyester oranı ile çözgü sıklığı arasındaki etkileşimin dikkatle dengelenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

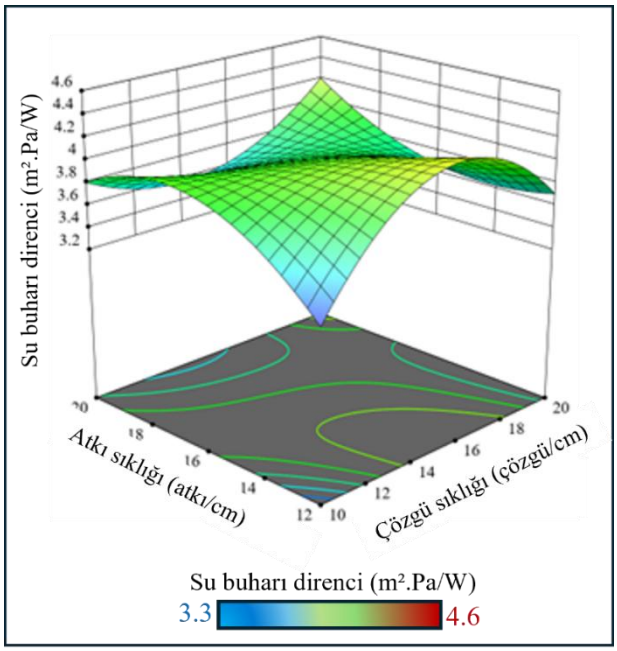
3.3.3. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değerlendirmesinde B/P oranı ile atkı sıklığı arasındaki etkileşim

Şekil 7'de verilen üç boyutlu yüzey grafiği, sabit çözgü sıklığı (X_1 = 15 çözgü/cm) altında, atkı sıklığı (X_2) ve bambu/polyester oranı (X_3) değişkenlerinin kumaşın su buharı direnci üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Yüzey grafiği, su buharı direncinin hem atkı sıklığı hem de elyaf bileşimine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük atkı sıklığı (12 atkı/cm) ve yüksek bambu oranı kombinasyonunda su buharı direnci değerinin yüksek düzeye, yaklaşık 4.4 m²·Pa/W seviyesine ulaşmaktadır [34].

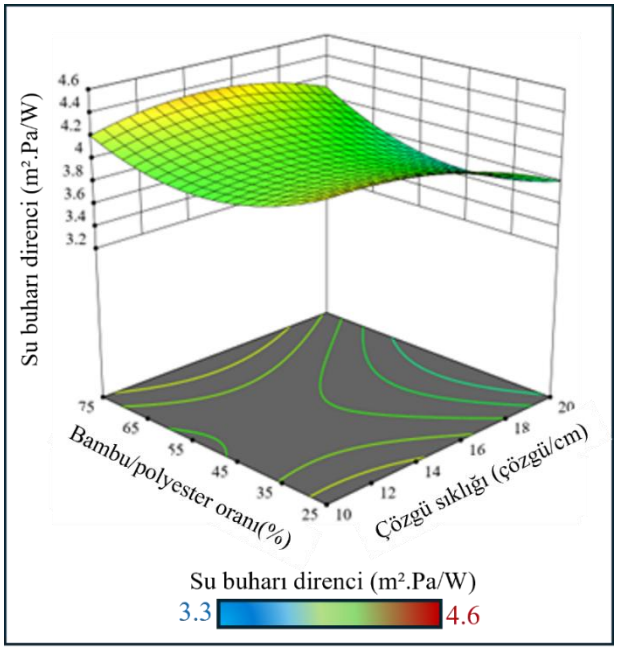
Bu durum, yüksek bambu oranının lif yapısında daha yoğun su tutumu ve daha düşük buhar geçişine neden olduğunu göstermektedir [35]. Öte yandan, polyester oranını yükseldikçe ve atkı sıklığı arttıkça su buharı direncinin değeri düşmektedir [36]. En düşük su buharı direnci değeri ise, bambu oranının düşük (%50) ve atkı sıklığının yüksek (20 atkı/cm) olduğu bölgede yaklaşık 3.3 m²·Pa/W olarak gözlemlenmiştir.

Grafik yüzeyinin konturları incelendiğinde atkı sıklığı, daha karmaşık ve eğrisel bir karakter sergilemektedir. Sık atkı yapılarının hava geçirgenliğini artırarak buhar transferini kolaylaştırdığı, dolayısıyla su buharı direnci değerini düşürdüğü söylenebilir. Buna karşın seyrek atkı yapıları, kumaşta daha fazla hava boşluğu oluşturarak buharın difüzyonunu zorlaştırmakta ve su buharı direnci değerini artırmaktadır.

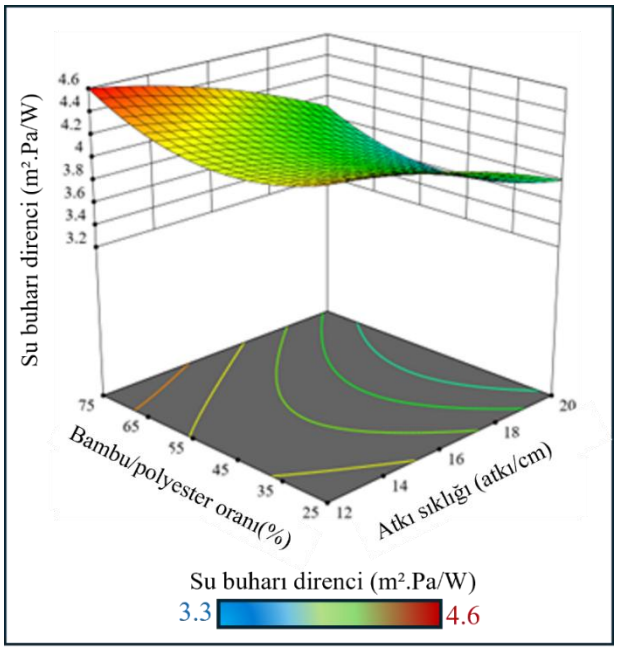
Bu bulgular, su buharı geçirgenliği açısından kumaş yapısının yalnızca lif kompozisyonuna değil, aynı zamanda atkı yoğunluğu gibi yapısal parametrelere de son derece duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bambu oranının artışı ile birlikte liflerin nem tutma kapasitesi yükselmekte ve bu durum su buharı direncini artırarak, kumaşın daha fazla nemi bünyesinde tuttuğunu göstermektedir. Ancak bu etki, atkı sıklığının artırılmasıyla belirli ölçüde dengelenebilmekte; sık dokulu yapılar, aralarındaki mikrokanallar vasıtasıyla buharın dış ortama geçişini kolaylaştırmakta ve böylece direnç düzeyini azaltmaktadır [37]. Dolayısıyla, bambu ve polyesterin farklı oranlarda kullanılmasıyla birlikte atkı sıklığı gibi parametrelerin de optimize edilmesi, hem nem yönetimi hem de termal konfor açısından kullanıcı ihtiyaçlarına uygun, dengeli ve fonksiyonel tekstil yüzeylerinin tasarımı açısından kritik bir strateji olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değeri değişimleri: çözgü sıklığı ile atkı sıklığı arasındaki ilişki



Şekil 6. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değeri değişimleri: B/P oranı ve çözgü sıklığı arasındaki ilişki



Şekil 7. Su Buharı Direnci (m².Pa/W) değeri değişimleri: B/P oranı ve atkı sıklığı arasındaki ilişki

Tablo 5. Isıl konfor değerine ait özet istatistik değerler

Analiz	Tahmin Edilen Ortalama	Tahmin Edilen Medyan	Gözlenen	Standart Sapma	n (Örnek Sayısı)	Tahminin Standart Hatası	%95 Güven Aralığı (Alt)	Gözlem Ortalaması	%95 Güven Aralığı (Üst)
Termal Direnç	0.0375	0.0375		0.0009962	0.00044	0.03644	0.03855	0.03204	0.04295
Su buharı direnci	4	4		0.1	0.0447	3.87583	4.12417	3.29358	4.70642

Tüm değerlendirmeler doğrultusunda, elyaf bileşimi ile dokuma parametreleri arasındaki çok yönlü ilişkiler, tekstil yüzeylerinin buhar geçirgenliği ve termal yalıtım kabiliyetleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bambu ve polyester gibi farklı lif özelliklerine sahip materyallerin değişen oranlarda kullanımı ile birlikte çözgü ve atkı sıklığının dikkatli biçimde yapılandırılması, kumaşın kullanıcıyla temas eden yakın çevresindeki mikro ortam koşullarını dengeleyerek hem terleme yönetimini hem de ısı tutma performansını optimize etmeye olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, hem konfor düzeyi yüksek hem de çevresel etkilere karşı fizyolojik ihtiyaçlara yanıt verebilen tasarım özellikleri sunan tekstil yüzeylerinin geliştirilmesi, yalnızca malzeme seçimine değil, aynı zamanda yapısal tasarım stratejilerinin bütüncül ve veriye dayalı olarak kurgulanmasına bağlıdır.

Tablo 5'de verilen tahmin sonuçları, kumaşın termal konfor performansına ilişkin iki temel parametre olan ısıl direnç ve su buharı direnci açısından oldukça tutarlı ve dar bir varyans aralığına sahip değerlere işaret etmektedir. Tahmin edilen ortalama ve medyan değerlerin birbirine eşit olması, dağılımın simetrik bir yapıda olduğunu ve parametrik modellemenin istatistiksel açıdan uygunluk taşıdığını göstermektedir.

Termal direnç için elde edilen düşük standart sapma (0.000996) ve dar %95 güven aralığı (0.0364–0.0386 m²·K/W), ölçüm hassasiyetinin yüksek ve modelin öngörücü kapasitesinin güçlü olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, su buharı direnci verileri için gözlemlenen düşük standart hata (0.0447) ve %95 güven aralığı (3.875–4.124 m²·Pa/W), modelin bu parametre için de güvenilir çıktılar sağladığını ortaya koymaktadır.

Gözlem ortalamalarının, tahmin edilen değerlerle oldukça uyumlu olması, deneysel verilerin model varsayımlarıyla yüksek derecede örtüştüğünü desteklemektedir. Bu bulgular, tekstil yüzeylerinin fizyolojik konfor açısından optimize edilebilmesi için yapılan deneysel tasarımların bilimsel doğruluğunu pekiştirmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bambu/polyester karışımlı dokuma kumaşların termofizyolojik konfor özellikleri; çözgü sıklığı, atkı sıklığı ve elyaf karışım oranı dikkate alınarak sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Box-Behnken deneysel tasarımı kullanılarak minimum deney sayısı ile bu parametrelerin ısıl direnç ve su buharı direnci üzerindeki etkileri istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, çözgü sıklığındaki artışın ısıl direnç üzerinde düzenli ve pozitif bir etki yarattığını, atkı sıklığının ise daha karmaşık ve eğrisel bir davranış sergilediğini göstermiştir.

Bambu lif oranının artırılması, kumaş yapısındaki mikrogözenekli yapıyı geliştirerek ısıl direnç değerlerinde artışa ve su buharı direncinde azalmaya neden olmuştur. Buna karşılık polyester oranının yükselmesi, kumaş yapısının daha kompakt hâle gelmesine yol açarak su buharı direncini artırmış ve nefes alabilirliği sınırlamıştır. Atkı sıklığının yüksek değerlere ulaşması, kumaşın sıkılaşmasına bağlı olarak ısı transferine katkı sağlayan mikro kanalların azalmasına ve buna bağlı olarak ısıl dirençte düşüşe neden olmuştur. Düşük atkı sıklığı ile yüksek bambu oranının birlikte kullanıldığı yapıların ise en yüksek ısıl direnç değerlerini sağladığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, çözgü sıklığının orta düzeylerde tutulması, buhar geçişine izin veren açıklıklar sağlayarak nemin etkin şekilde uzaklaştırılmasını kolaylaştırmıştır.

Elde edilen bulgular spor giyim, medikal tekstiller ve sürdürülebilir moda alanlarında, bambu/polyester karışımlarının uygun yapısal düzenlemelerle fonksiyonel kumaşların geliştirilmesine katkı sağlayabileceği ortaya koymuştur. Böylece, çevresel açıdan sürdürülebilir hammaddelerin kullanımına dayalı kumaşların endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği desteklenmiştir. Bu çalışma, bambu/polyester karışımlı kumaşlarda yapısal parametrelerin etkilerine ilişkin literatürdeki boşluğu doldurarak, yeni nesil fonksiyonel tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine hem bilimsel hem de endüstriyel düzeyde özgün katkılar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, bambu/polyester karışımlı dokuma kumaşlarda lif kompozisyonu ve yapısal parametrelerin termofizyolojik konfor üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, konfor özelliklerinin geliştirilmesinde yapı–malzeme etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Gelecek araştırmalarda, kumaşın yapısal özelliklerinin fonksiyonel giysi tasarımına dahil edilmesi öncelikli hedeflerden biri olmalıdır. Bu doğrultuda elde edilecek bulgular, sürdürülebilir hammaddelere dayalı, konfor performansı yüksek ve yenilikçi tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine yönelik güçlü bir bilimsel temel sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Tian, M., Qi, N., Jiang, Q., Su, Y., Li, J., (2025), Addressing localized thermal comfort needs of the human body through advanced personal thermal management garments design and evaluation, Textile Research Journal, 95(3–4), 429–449.
2. Tadesse, M. G., Loghin, C., Dulgheriu, I., Loghin, E., (2021), Comfort evaluation of wearable functional textiles, Materials, 14(21), 6466.
3. Hunter, L., Fan, J., (2015), Improving the comfort of garments, In Textiles and Fashion, Woodhead Publishing, 739–761.
4. Amjad, A. I., (2024), Bamboo fibre: A sustainable solution for textile manufacturing, Advances in Bamboo Science, 100088.
5. Borowski, P. F., Patuk, I., Bandala, E. R., (2022), Innovative industrial use of bamboo as key "Green" material, Sustainability, 14(4), 1955.
6. Stanković, S. B., Popović, D. M., Poparić, G. B., (2019), Thermal properties of directionally oriented polymer fibrous materials as a function of fibre arrangement at mesoscopic level, Thermal Science, 23(5 Part B), 3117–3127.
7. Jalil, M. H., (2025), Weaving a greener tomorrow: A mini review of bamboo fiber, textiles and hand-woven techniques for sustainable innovation, Pertanika Journal of Science & Technology, (3).
8. Mao, A., Dong, W., Xie, C., Wang, H., Liu, Y. J., Li, G., He, Y., (2022), Yarn-level simulation of hygroscopicity of woven textiles,

IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 29(12), 5250–5264.

9. Zhang, G., Liu, J., Miao, Y., Ge, S., Rezakazemi, M., Chang, R., Fan, W., (2025), Advances in controllable water transport of textile porous materials: mechanism, structure design, fabrication and application, Advanced Fiber Materials, 1–29.
10. Alshukur, M., (2025), Review of optimisation of advanced textiles using the design of experiment methodology: part II: fibre-reinforced polymer composites and advanced treatments of textiles, Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 8(1), 1–19.
11. Pamukoglu, M. Y., Kirkan, B., Senyurt, M., (2017), Removal of thorium (IV) from aqueous solution by biosorption onto modified powdered waste sludge: experimental design approach, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 314, 343–352.
12. Ukponmwan, J. O., (1993), The thermal-insulation properties of fabrics, Textile Progress, 24(4), 1–54.
13. Shaker, K., Umair, M., Jabbar, M., Baitab, D. M., Nawab, Y., Afzal, A., Ahmad, S., (2019), Effect of fabric structural design on the thermal properties of woven fabrics, Thermal Science, 23(5 Part B), 3059–3066.
14. Asayesh, A., Talaei, M., Maroufi, M., (2018), The effect of weave pattern on the thermal properties of woven fabrics, International Journal of Clothing Science and Technology, 30(4), 525–535.
15. Ullah, M., Fiaz, H., Abbas, A., Shaker, K., Nawab, Y., Umair, M., (2024), Thermal comfort and mechanical analysis of vigorous diamond and diaper weaves; warp, weft and balanced float fabrics with equal thread densities, International Journal of Thermal Sciences, 204, 109235.
16. Prakash, C., Ramakrishnan, G., Koushik, C. V., (2013), A study of the thermal properties of bamboo knitted fabrics, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 111, 101–105.
17. Tausif, M., Ahmad, F., Hussain, U., Basit, A., Hussain, T., (2015), A comparative study of mechanical and comfort properties of bamboo viscose as an eco-friendly alternative to conventional cotton fibre in polyester blended knitted fabrics, Journal of Cleaner Production, 89, 110–115.
18. Majumdar, A., Mukhopadhyay, S., Yadav, R., (2010), Thermal properties of knitted fabrics made from cotton and regenerated bamboo cellulosic fibres, International Journal of Thermal Sciences, 49(10), 2042–2048.
19. Kim, H. A., (2021), Moisture vapor permeability and thermal wear comfort of ecofriendly fiber-embedded woven fabrics for high-performance clothing, Materials, 14(20), 6205.
20. Hussain, U., Younis, F. B., Usman, F., Hussain, T., Ahmed, F., (2015), Comfort and mechanical properties of polyester/bamboo and polyester/cotton blended knitted fabric, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 10(2), 155892501501000207.
21. Chidambaram, P., Govindan, R., Venkatraman, K. C., (2012), Study of thermal comfort properties of cotton/regenerated bamboo knitted fabrics, African Journal of Basic & Applied Sciences, 4(2), 60–66.
22. Aruchamy, K., Subramani, S. P., Palaniappan, S. K., Pal, S. K., Mylsamy, B., Chinnasamy, V., (2022), Effect of blend ratio on the thermal comfort characteristics of cotton/bamboo blended fabrics, Journal of Natural Fibers, 19(1), 105–114.
23. Slater, K., (1977), Comfort properties of textiles, Textile Progress, 9(4), 1–70.
24. Karthikeyan, G., Nalankilli, G., Shanmugasundaram, O. L., Prakash, C., (2016), Thermal comfort properties of bamboo tencel knitted fabrics, International Journal of Clothing Science and Technology, 28(4), 420–428.
25. Ullah, M., Fiaz, H., Abbas, A., Shaker, K., Nawab, Y., Umair, M., (2024), Thermal comfort and mechanical analysis of vigorous diamond and diaper weaves; warp, weft and balanced float fabrics with equal thread densities, International Journal of Thermal Sciences, 204, 109235.
26. Patti, A., Acierno, D., (2023), Materials, weaving parameters, and tensile responses of woven textiles, Macromol, 3(3), 665–680.
27. Williams, J. T. (Ed.), (2017), Waterproof and water repellent textiles and clothing, Woodhead Publishing.
28. Dong, Z., Ding, Y., Cong, H., Chen, C., Ma, P., (2024), Research on plated structure design in weft knitting seamless fabric and sweat management, Textile Research Journal, 94(1–2), 36–48.
29. Kulkarni, S. R., (2020), Thermal Comforts Properties of Knitted Fabrics Produced from Bamboo Blended Yarns, Ashok Yakkaldevi.
30. Jhanji, Y., Gupta, D., Kothari, V. K., (2015), Thermo-physiological properties of polyester–cotton plated fabrics in relation to fibre linear density and yarn type, Fashion and Textiles, 2(1), 16.
31. Kiš, A., Brnada, S., Kovačević, S., (2020), Influence of fabric weave on thermal radiation resistance and water vapor permeability, Polymers, 12(3), 525.
32. Karthikeyan, G., Nalankilli, G., Shanmugasundaram, O. L., Prakash, C., (2016), Thermal comfort properties of bamboo tencel knitted fabrics, International Journal of Clothing Science and Technology, 28(4), 420–428.
33. Liu, D., Song, J., Anderson, D. P., Chang, P. R., Hua, Y., (2012), Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties, Cellulose, 19(5), 1449–1480.
34. Kim, H. A., (2021), Water/moisture vapor permeabilities and thermal wear comfort of the Coolmax®/bamboo/tencel included PET and PP composite yarns and their woven fabrics, The Journal of The Textile Institute, 112(12), 1940–1953.
35. Akcam, O., Karaca, E., (2013), Development of water vapor resistance feature of polyester woven fabrics by using perlite additive, Journal of Textile & Apparel / Tekstil ve Konfeksiyon, 23(3).
36. Shabaridharan, Das, A., (2012), Study on heat and moisture vapour transmission characteristics through multilayered fabric ensembles, Fibers and Polymers, 13(4), 522–528.
37. Qian, J., Li, Y., Xiang, Z., Cai, H., Zhang, P., (2022), Effect of weave structure and yarn fineness on the coolness and thermal-wet comfort properties of woven fabric, Textile Research Journal, 92(19–20), 3782–3796.