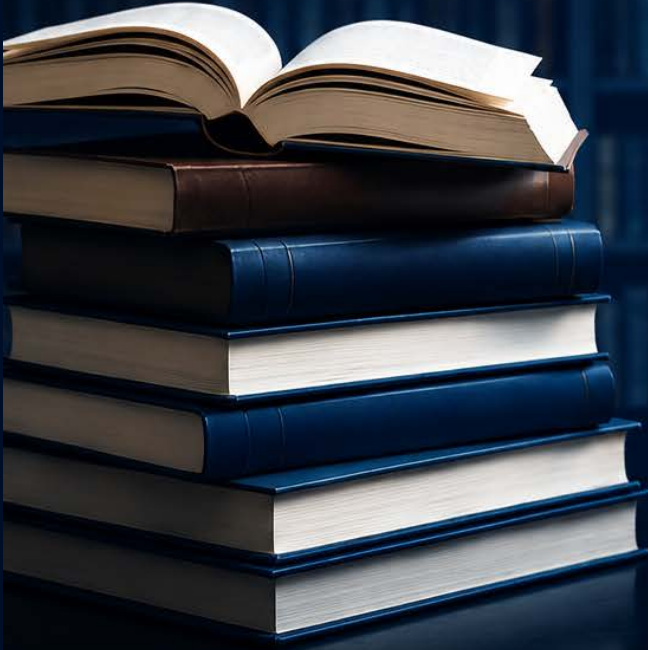


TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Beyza BUZOL MÜLAYİM



yaz
yayınları

**Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Beyza BUZOL MÜLAYİM

yaz
yayınları

2026

**Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği
Alanında Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Beyza BUZOL MÜLAYİM

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-94-1

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Tıbbi Tekstillerde Kullanılan Dokuma Yüzeyler: Yapısal Özellikler, Kullanım Alanları ve Performans Gereksinimleri Üzerine Bir Derleme.....	1
<i>Beyza BUZOL MÜLAYİM</i>	
Yara Bakımında Tekstil Esaslı Yara Örtüleri: Temel İlkeler, Malzemeler ve Güncel Gelişmeler.....	41
<i>Şennur ASMA DELEN</i>	
Kompozit Malzemelerde İleri Tekstil Takviyeleri: 2B Kumaşlardan 3B Tekstil Preformlarına	68
<i>Gül SEVENCAN TOPAL</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

TIBBİ TEKSTİLLERDE KULLANILAN DOKUMA YÜZEYLER: YAPISAL ÖZELLİKLER, KULLANIM ALANLARI VE PERFORMANS GEREKSİNİMLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Beyza BUZOL MÜLAYİM¹

1. GİRİŞ

Tekstil malzemeleri; esnek yapıları, farklı geometrilere üretilibilmeleri ve fiziksel, mekanik ve yüzey özelliklerinin kullanım amacına göre düzenlenebilmesi nedeniyle sağlık ve tıp alanında önemli bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. Tıbbi tekstiller genel olarak sağlık, hijyen, tedavi ve bakım uygulamalarında kullanılan tekstil esaslı ürünleri kapsamakta; implant edilemeyen ürünler, implant edilebilir ürünler, sağlık ve hijyen ürünleri ile ekstrakorporeal uygulamalar gibi farklı gruplarda değerlendirilmektedir. Yara örtüleri ve bandajlardan cerrahi giysi ve örtülere, hastane tekstillerinden vasküler greftlere ve doku mühendisliği yapılarına kadar uzanan geniş ürün çeşitliliği bu kapsam içerisinde yer almaktadır (Anand vd., 2010).

Tıbbi tekstillerden beklenen performans özellikleri kullanım alanına göre önemli ölçüde değişmektedir. Yara bakım ürünlerinde eksüdanın uzaklaştırılması, uygun nem ortamının korunması ve yara yüzeyinin dış etkilere korunması önem taşırken; cerrahi giysi ve örtülerde sıvı ve mikroorganizma geçişinin sınırlandırılması, yeterli mekanik dayanım ve kullanım

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Moda Tasarımı Programı, ORCID: 0000-0001-5224-3934.

konforunun sağlanması ön plana çıkmaktadır (Aibibu vd., 2003; Rajendran, 2009). İmplant edilebilir tekstillerde ise biyouyumluluk ile gözenek yapısı, mekanik özellikler ve tekstil yapısının çevre dokularla etkileşimi önem kazanmaktadır. Bu nedenle bir tıbbi tekstil ürününün performansı yalnızca kullanılan lif hammaddesiyle değil, iplik özellikleri ve tekstil konstrüksiyonu ile birlikte değerlendirilmelidir (Bartels, 2011).

Tıbbi uygulamalarda dokuma, örme ve dokusuz yüzey üretim tekniklerinin yanı sıra farklı özel tekstil konstrüksiyonlarından yararlanılmaktadır. Dokuma yapılar, çözgü ve atkı ipliklerinin belirli bir düzen içerisinde bağlantı oluşturması nedeniyle yapısal parametrelerin kontrollü biçimde değiştirilebildiği tekstil yüzeyleridir. Örgü türü, çözgü ve atkı sıklıkları, iplik özellikleri, gramaj, kalınlık ve gözeneklilik gibi parametrelerdeki değişimler kumaşın fiziksel ve mekanik davranışını etkileyebilmektedir. Bu yapısal değişkenlerin kullanım amacına göre düzenlenebilmesi, dokuma konstrüksiyonlarının farklı tıbbi uygulamalara uyarlanmasına olanak sağlamaktadır (Subramanian ve Muthumanickam, 2024).

Dokuma yüzeylerin tıbbi kullanımı oldukça geniş bir ürün grubunu kapsamaktadır. Gazlı bez ve yara örtüleri, destek ve kompresyon bandajları, cerrahi giysi ve örtüler ile hastane tekstilleri implant edilemeyen uygulamalarda yer alırken, vasküler greftler ve doku mühendisliğine yönelik tekstil yapıları daha ileri kullanım alanları arasında bulunmaktadır. Çoğunlukla gevşek dokunmuş pamuk ipliklerinden üretilen geleneksel cerrahi gazlı bezler, dokuma konstrüksiyonunun en eski tıbbi uygulamaları arasında yer almaktadır (Rajendran, 2009). Buna karşılık günümüzde dokuma teknolojisi, geleneksel yara bakım ürünlerinin yanı sıra farklı mekanik ve geometrik gereksinimlere sahip biyomedikal yapıların geliştirilmesinde de değerlendirilmektedir.

Dokuma yüzeylerin özelliklerini belirleyen temel konstrüksiyon değişkeni örgü yapısıdır. Bezayağı, dimi ve saten temel örgülerinin yanı sıra leno, çift ve çok katlı, üç boyutlu ve tübüler konstrüksiyonlar; bariyer gerektiren cerrahi tekstillerden yük taşıyan implantlara ve vasküler greftlere kadar farklı gereksinimlere yanıt verebilmektedir. Bu nedenle dokuma konstrüksiyonu, tıbbi tekstillerde yalnızca yüzey geometrisini belirleyen bir unsur değil, ürün performansını belirleyen temel tasarım değişkenlerinden biri olarak ele alınmalıdır (Eriksson ve Sandsjö, 2015; Doersam vd., 2022).

Tıbbi dokuma yüzeylerin işlevselliği yalnızca konstrüksiyon tasarımıyla sınırlı değildir. Lif ve iplik özelliklerinin yanı sıra antimikrobiyal, sıvı itici veya benzeri fonksiyonel işlemlerle kumaşa kullanım amacına yönelik ilave özellikler kazandırılabilir. Pamuk ve polyester/pamuk dokuma kumaşlar üzerinde gerçekleştirilen antimikrobiyal uygulamalar, tekstil yüzeylerinin sağlık ve hijyen gereksinimlerine göre fonksiyonelleştirilebildiğini göstermektedir (Sun vd., 2001). Bu nedenle tıbbi dokuma yüzeylerde performans değerlendirilirken malzeme, iplik yapısı, konstrüksiyon ve uygulanan fonksiyonel işlemlerin birbirinden bağımsız değişkenler olarak ele alınmaması gerekmektedir.

Tıbbi tekstillerdeki gelişmeler, tekstil esaslı sensörler ve hasta takibine yönelik giyilebilir sistemler gibi daha ileri işlevlere sahip yapılara da uzanmaktadır (Büyükgöze, 2019). Dokuma yapılar, fonksiyonel liflerin çözgü veya atkı sistemine kontrollü biçimde yerleştirilebilmesi nedeniyle bu tür sistemler için uygun bir taşıyıcı platform sunmaktadır (Oguz, Cochrane, Mordon vd., 2016).

Tıbbi tekstillere ilişkin literatürde lif ve polimer türleri, yara bakım ürünleri, cerrahi tekstiller, implantlar, fonksiyonel bitim işlemleri ve ileri sağlık tekstilleri farklı yönleriyle ele

alınmaktadır. Buna karşın tıbbi uygulamalarda kullanılan dokuma yüzeylerin örgü ve konstrüksiyon özellikleri temelinde birlikte değerlendirilmesi ve farklı dokuma yapılarının kullanım alanları ile performans gereksinimleri arasındaki ilişkinin ortaya konulması daha sınırlı kalmaktadır. Bu derlemenin amacı, tıbbi ve sağlık tekstillerinde kullanılan dokuma yüzeyleri yapı-kullanım alanı-performans ilişkisi çerçevesinde incelemek; bezayağı, dimi ve saten temel örgülerinin yanı sıra leno, çift ve çok katlı, üç boyutlu ve tübüler dokuma konstrüksiyonlarının yapısal özelliklerini ve bildirilen tıbbi uygulamalarını değerlendirmektir. Ayrıca mevcut çalışmaların karşılaştırmalı olarak incelenmesiyle farklı dokuma yapılarının sağladığı olanakların, uygulamaya bağlı sınırlılıkların ve ileri tıbbi tekstiller açısından geliştirilmesi gereken alanların ortaya konulması amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, tıbbi ve sağlık tekstillerinde kullanılan dokuma yapıların yapısal özellikleri, kullanım alanları ve performans gereksinimlerini kapsamlı biçimde değerlendiren anlatı (narrative) türünde bir literatür derlemesidir. Tarama; Web of Science, Scopus, ScienceDirect ve Google Scholar veri tabanlarında "medical textiles", "woven structures", "leno weave", "3D woven", "tubular weaving" ve "tissue engineering scaffold" anahtar kelimeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kapsam dahilinde hakemli araştırma ve derleme makaleleri, kitap bölümleri ile ilgili tez çalışmaları değerlendirilmiş; dokuma teknolojisiyle doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar (örme, dokusuz yüzey vb.) kapsam dışı bırakılmıştır. Belirli bir yıl sınırlaması uygulanmamış, 1991–2026 yılları arasında yayımlanan toplam 42 kaynak incelenmiştir;

bunların yaklaşık %67'si 2015 ve sonrasında yayımlanmış olup literatürün güncel eğilimlerini yansıtmaktadır (Şekil 1).

İncelenen çalışmalar, ele alınan dokuma yapı türüne (bezayağı, dimi, saten, leno, çift/çok katlı, üç boyutlu ve tübüler) göre sınıflandırılmış; her yapı için kullanım alanı, materyal/konstrüksiyon özellikleri ve bildirilen performans sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



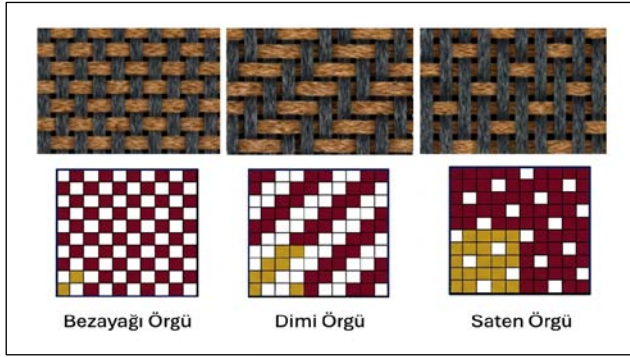
Şekil 1. Literatür tarama, kapsam belirleme ve sınıflandırma süreci

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Tıbbi Tekstillerde Kullanılan Temel Dokuma Örgüleri

Dokuma kumaşların yapısal ve performans özelliklerinin belirlenmesinde örgü türü temel konstrüksiyon parametrelerinden biridir. Dokuma teknolojisinde bezayağı, dimi ve saten üç temel örgü yapısını oluşturmakta; bu yapılar ipliklerin bağlantı ve

atlama düzenlerindeki farklılıklar nedeniyle kumaşın yüzey karakteri, gözenekliliği, mekanik özellikleri ve geçirgenlik davranışı üzerinde etkili olmaktadır (Şekil 2). Tıbbi ve sağlık tekstillerinde dokuma yapının seçimi, kullanım alanının gerektirdiği bariyer özelliği, sıvı ve hava geçirgenliği, mekanik dayanım, boyutsal kararlılık ve kullanım konforu gibi performans gereksinimleri doğrultusunda önem kazanmaktadır. Literatürde bezayağı, dimi ve saten örgüler ile bunların türevlerinin farklı sağlık tekstili uygulamalarında değerlendirildiği bildirilmektedir.



Şekil 2. Dokuma kumaş üretiminde üç temel örgü yapısı

3.1.1. Bezayağı Örgülü Tıbbi Tekstiller

Bezayağı, çözgü ve atkı ipliklerinin birbiri üzerinden ve altından ardışık olarak geçmesiyle oluşturulan, en yüksek bağlantı sayısına sahip temel dokuma örgüsüdür. Kısa iplik atlamaları ve sık bağlantı düzeni nedeniyle yapısal bütünlük ve boyutsal kararlılık sağlayabilmekte; kumaş sıklığının değiştirilmesiyle oldukça açık yapılardan sık ve kompakt yüzeylere kadar farklı konstrüksiyonlarda üretilabilmektedir. Bu özellik, bezayağı örgüsünün tıbbi tekstillerde farklı performans gereksinimlerine uyarlanmasına olanak sağlamaktadır. Nitekim yara bakımında kullanılan dokuma kumaşların en basit yapısının bezayağı olduğu ve bu yapıların gözenekliliğinin gazlı bez gibi oldukça açık yüzeylerden daha sık yapılara kadar değiştirilebildiği belirtilmektedir (Rajendran, 2009).

Literatürde bezayağı örgülü kumaşların standart yara bakım gazlı bezlerinden hastane tekstillerine, yeniden kullanılabilir cerrahi önlüklere ve fonksiyonel antimikrobiyal tekstillere kadar farklı tıbbi ve sağlık uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte aynı örgü yapısının kullanım amacına göre farklı lif, iplik, sıklık ve bitim özellikleriyle tasarlanması, bezayağının tıbbi tekstillerdeki işlevinin yalnızca örgü türü üzerinden değil, bütün konstrüksiyon parametreleriyle birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Tablo 1. Tıbbi tekstillerde bezayağı dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

Kullanım alanı	Bezayağı yapısının/ürünün özelliği	Literatürde bildirilen uygulama	Kaynak
Yara bakım gazlı bezi	Düşük sıklıklı, açık yapılı pamuklu bezayağı	Standart pansuman gazlı bezlerinde kullanılan temel yapı	(Wilk, 2001; Rajendran, 2009)
Standart pansuman materyali	Hafif, ağartılmış pamuklu bezayağı	Yara bakımında kullanılan geleneksel gazlı bez	(Wilk, 2001)
Cerrahi önlükler	Bezayağı dokuma; gözenek boyutu ve iplik yapısı bariyer performansı açısından önemli	Yeniden kullanılabilir ameliyathane cerrahi önlükleri	(Aibibu vd., 2003)
Hastane yatak tekstilleri	%100 pamuk bezayağı; antimikrobiyal bitim uygulanmış	Hastane yatak çarşafı/nevresimleri	(Rajendran ve Anand, 2001)
Hasta giysileri	Antimikrobiyal işlem görmüş %100 pamuk bezayağı	Hasta önlükleri	(Rajendran ve Anand, 2001)
Sağlık personeli giysileri	Antimikrobiyal işlem görmüş %100 pamuk bezayağı	Personel önlükleri	(Rajendran ve Anand, 2001)
Antimikrobiyal tıbbi tekstiller	Pamuk ve polyester/pamuk (65/35) bezayağı kumaşlar	Antibakteriyel fonksiyon kazandırılmış tekstil yüzeyleri	(Sun vd., 2001)

Bununla birlikte bezayağı örgüsünün tıbbi uygulamalardaki kullanımı bazı yapısal sınırlılıklar da taşımaktadır. Bu durum özellikle düşük sıklıklı ve açık konstrüksiyonlu geleneksel gazlı bezlerde belirginleşmektedir. Wilk (2001), standart pamuklu bezayağı gazlı bezlerde yapısal ve boyutsal kararsızlık, kenarlarda saçaklanma ve serbest lif oluşumu gibi problemlerin görülebildiğini belirtmektedir. Özellikle serbest liflerin yara yüzeyine tutunabilmesi, pansuman

materyalleri açısından istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Ayrıca açık bezayağı konstrüksiyonlarında ipliklerin yapı içerisindeki hareketliliği, kullanım sırasında kumaş geometrisinin bozulmasına neden olabilmektedir (Wilk, 2001). Bu sınırlılıklar, yara bakım ürünlerinde ipliklerin daha kararlı biçimde sabitlendiği alternatif dokuma konstrüksiyonlarının kullanılmasını gerekli kılabilir.

3.1.2. Dimi Örgülü Tıbbi Tekstiller

Dimi örgü, çözgü ve atkı ipliklerinin belirli bir düzen içerisinde kademeli olarak yer değiştiren bağlantıları sonucunda kumaş yüzeyinde karakteristik diyagonal yolların oluştuğu temel dokuma örgülerinden biridir. Bezayağına göre daha uzun iplik atlamalarına ve daha düşük bağlantı sayısına sahip olması, dimi yapıların daha esnek ve daha az rijit bir yüzey oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Nitekim tıbbi tekstillerin deri ile temas özelliklerini değerlendiren Bartels (2011), dimi dokuma kumaşların genel olarak bezayağı yapılara göre daha düşük rijitlik gösterebildiğini; ayrıca 2/1, 2/2 ve 3/1 gibi farklı dimi konstrüksiyonlarının kendi aralarında da rijitlik açısından farklılaşabildiğini belirtmektedir (Bartels, 2011). Bu özellikler, dimi örgünün özellikle mekanik dayanım ile esneklik ve kullanım konforunun birlikte önem taşıdığı tıbbi ve sağlık tekstillerinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde dimi örgülü dokuma yüzeylerin yeniden kullanılabilir cerrahi önlüklerde, hastane ve kurumsal yatak tekstillerinde ve kompresyon uygulamalarına yönelik elastik dokuma yapılarda kullanıldığı görülmektedir. Cerrahi önlüklerde bezayağı ve dimi dokuma yapıların kullanıldığı ve mikrofilament polyester ipliklerle birlikte dokuma yapısındaki gözenek boyutunun kontrol edilmesiyle mikrobiyal bariyer etkisinin geliştirilebildiği bildirilmiştir (Aibibu vd., 2003). Hastane ve kurumsal yatak tekstillerinde ise sık dokunmuş 2/2 dimi yapılar

kullanılabilmekte; bu ürünlerde bakım kolaylığı ve dayanıklılık amacıyla penye pamuk/polyester karışımları veya %100 polyester ipliklerin tercih edilebildiği belirtilmektedir. Morris ve Murray (2021) tarafından verilen tipik yatak tekstili konstrüksiyonu, dimi yapının sağlık tekstillerindeki kullanımına ilişkin oldukça somut bir örnek oluşturmaktadır. Kaynakta 2/2 dimi örgülü bir yatak tekstili için çözgü ve atkı sıklıkları sırasıyla 24 ve 28 iplik/cm, çözgü ve atkı iplik numaraları ise 21 ve 37 tex olarak verilmiştir. İlgili konstrüksiyonun çözgü ve atkı örtme faktörleri ($K = n \cdot \sqrt{\text{Tex}} / 10$; n: iplik/cm) sırasıyla 11,0 ve 17,0'dır (Morris ve Murray, 2021).

Kompresyon uygulamaları, dimi örgünün kullanıldığı bir diğer dikkat çekici alandır. Kompresyon amacıyla geliştirilen *bi-stretch* dokuma yapılarında 2/1, 3/1 ve 4/1 dimi örgüler ile *core-spun* elastan ipliklerin kullanıldığı bildirilmektedir. Bu yapılar da basınç oluşturma kapasitesi, hava geçirgenliği ve esneklik özellikleri farklı yıkama döngülerinden sonra değerlendirilmiş; 15 yıkama sonrasında basınç kaybının 2/1, 3/1 ve 4/1 dimi yapılar için sırasıyla %16,6, %14,1 ve %17,1 olduğu belirlenmiştir (Maqsood vd., 2017). Bu bulgular, dimi örgü raporunun kompresyon tekstillerinde basınç performansının korunmasında dikkate alınması gereken yapısal parametrelerden biri olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Tıbbi tekstillerde dimi dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

Kullanım alanı	Örgü/konstrüksiyon	Materyal/kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Yeniden kullanılabilir cerrahi önlük	Dimi dokuma	Mikrofilament polyester	Gözenek boyutunun kontrolüyle mikrobiyal bariyer oluşturulması	(Aibibu vd., 2003)
Hastane/kurumsal yatak tekstilleri	24 × 28 iplik/cm; 21 × 37 tex	Penye pamuk/polyester veya %100 polyester	Dayanıklılık, bakım kolaylığı ve sık dokuma yüzey	(Morris ve Murray, 2021)
Kompresyon tekstilleri	2/1, 3/1 ve 4/1 dimi bi-stretch dokuma	Core-spun elastan iplik	Basınç oluşturma ve tekrarlı yıkamalardan sonra basıncın korunması	(Maqsood vd., 2017)

Dimi örgünün daha uzun iplik atlamaları ve bezayağına göre daha düşük bağlantı sayısı esneklik ve düşük rijitlik açısından avantaj sağlayabilmekle birlikte, tıbbi kullanımda performansın yalnızca örgü türüne bağlı olmadığı dikkate alınmalıdır. Dimi raporunun değişmesi dahi kumaşın rijitlik ve geçirgenlik davranışını değiştirebilmektedir; örneğin 2/1, 2/2 ve 3/1 dimi yapıların rijitliklerinin birbirinden farklı olabileceği bildirilmektedir (Bartels, 2011). Elastan içeren dimi yapılarda ise konstrüksiyonun performansı elastan çekim oranı, atkı sıklığı ve dimi raporuyla birlikte değişmektedir. Özellikle 3/1 dimi yapılarda 2/2 dimiye kıyasla daha düşük hava geçirgenliği değerleri elde edilebildiği ve elastan çekim oranı ile atkı sıklığının artmasının hava geçirgenliğini azaltabildiği bildirilmiştir (Çelik ve Kaynak, 2017). Söz konusu bulgular denim amaçlı bi-stretch kumaşlardan elde edilmiş olmakla birlikte, elastan içerikli dimi yapıların kompresyon tekstillerindeki geçirgenlik davranışına ilişkin yol gösterici niteliktedir. Bu nedenle dimi örgünün tıbbi tekstillerde sağladığı esneklik ve mekanik performans avantajları; bariyer özelliği, hava geçirgenliği, basınç performansı ve kullanım konforu gibi uygulamaya özgü gereksinimlerle birlikte değerlendirilmelidir.

3.1.3. Saten Örgülü Tıbbi Tekstiller

Saten örgü, bağlantı noktalarının kumaş yüzeyine belirli bir düzen içerisinde dağıtıldığı ve bezayağı ile dimi örgülere kıyasla daha uzun iplik atlamalarının bulunduğu temel dokuma yapılarından biridir. Bağlantı sayısının düşük, iplik atlamalarının ise uzun olması, kumaş yüzeyinin daha düzgün ve pürüzsüz bir karakter kazanmasına ve ipliklerin yapı içerisindeki kıvrım davranışının değişmesine olanak sağlamaktadır. Bu yapısal özellikler saten örgünün yalnızca yüzey karakterini değil, kumaşın esneklik, gözeneklilik ve geçirgenlik gibi kullanım performansını belirleyen özelliklerini de etkileyebilmektedir. Tıbbi tekstillerde saten örgünün kullanımına ilişkin çalışmaların

bezayağı ve dimi yapılara göre daha sınırlı olduğu görülmekle birlikte, özellikle implant edilebilir vasküler protezler ile ileri fonksiyonel tıbbi tekstillerde saten konstrüksiyonlarından yararlanıldığı bildirilmektedir (Rao vd., 1991; Shadanov vd., 2022; Oguz, Cochrane, Mordon vd., 2016).

Saten örgünün implant edilebilir tıbbi tekstillerdeki dikkat çekici uygulamalarından biri vasküler protezlerdir. Rao vd. (1991), saten örgülü polyester filamentlerden oluşturulan hafif ve yüksek gözenekli bir arteriyel protezin yapısal ve biyolojik performansını değerlendirmiştir. Daha güncel bir çalışmada ise Shadanov vd. (2022), sentetik vasküler protezlerde kullanılan dokuma konstrüksiyonlarını incelemiş ve 5/3, 5/4 ve 6/4 saten yapılarının (kaynaktaki gösterimle), bezayağı ve dimi gibi diğer örgülerle birlikte çift katlı ve karmaşık konstrüksiyonların oluşturulmasında kullanılabildiğini ortaya koymuştur (Rao vd., 1991; Shadanov vd., 2022). Çalışmada kullanılan protezlerin 74 dtex S110 PET ipliklerden üretildiği ve dokuma konstrüksiyonundaki farklılıkların gözenek yapısı, su geçirgenliği ve radyal deformasyon davranışı gibi protez performansı açısından önemli özelliklerle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Shadanov vd., 2022). Söz konusu çalışmada saten örgü protezlerde tek başına değil; çift katlı yapıların özellikle dış yüzeyinde bezayağı, rips ve dimi örgülerine eşlik eden tamamlayıcı bir örgü olarak yer almıştır. Tek katlı bezayağı protezlerde en düşük su geçirgenliği 80 mL/dk/cm² olarak ölçülürken, büyük bölümünde tamamlayıcı saten örgü bulunan çift katlı protezlerde bu değer 276,5–538,8 mL/dk/cm² aralığında kalmış ve bu protezler radyal bükülmeye karşı daha düşük direnç göstermiştir (Shadanov vd., 2022).

Saten örgünün bir diğer kullanım alanı, optik liflerin tekstil yapısına entegre edildiği fotodinamik tedavi sistemleridir. Oguz, Cochrane, Mordon vd. (2016) tarafından fotodinamik tedavi amacıyla geliştirilen ışık yayan dokuma yapılarında SW4,

SW6 ve SW8 saten konstrüksiyonları (SW: saten örgü; sırasıyla 4, 6 ve 8 raporlu saten örgüler) kullanılmış; çözgüde 330 dtex polyester, atkıda ise 250 µm çapında PMMA polimer optik lifler (POF) tercih edilmiştir. Farklı saten yapılarının optik liflerin kumaş içerisindeki yerleşimi ve ışığın yüzeye dağılımı üzerindeki etkilerinden yararlanılarak ışık çıkışının daha homojen hale getirilmesine yönelik konstrüksiyonlar geliştirilmiştir (Oguz, Cochrane, Mordon vd., 2016; Oguz, Cochrane, Koncar vd., 2016). Bu çalışmada kumaş eni boyunca beş bölgeye (A–B–C–B–A) ayrılan tekrarlı bir desende her bölgede farklı bir saten örgü kullanılmış; bölgelere ait çözgü gerginlikleri üç ayrı çözgü levendiyle ayarlanarak optik liflerin makro kıvrımları ve buna bağlı ışık çıkışı kontrol edilmiştir (Oguz, Cochrane, Koncar vd., 2016). Bu yaklaşımın aktinik keratozun fotodinamik tedavisine yönelik tekstil tabanlı sistemlerde de değerlendirildiği bildirilmiştir (Oguz vd., 2017). Bu çalışmalar, saten örgünün tıbbi tekstillerdeki kullanımının geleneksel tekstil ürünleriyle sınırlı olmadığını, fonksiyonel liflerin tekstil yüzeyine entegrasyonunu gerektiren ileri tedavi sistemlerinde de konstrüksiyonel bir tasarım aracı olarak değerlendirilebildiğini göstermektedir.

Tablo 3. Tıbbi tekstillerde saten dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

Kullanım alanı	Örgü / konstrüksiyon	Materyal / kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Arteriyel protez	Saten örgülü dokuma yapı	Polyester filament	Hafif ve yüksek gözenekli arteriyel protez yapısının oluşturulması; implantasyon sonrası doku gelişiminin değerlendirilmesi	(Rao vd., 1991)
Sentetik vasküler protezler	5/3, 5/4 ve 6/4 saten içeren çift katlı ve karmaşık dokuma konstrüksiyonları	74 dtex S110 PET	Dokuma yapısının gözenek yapısı, su geçirgenliği ve radyal deformasyon/bükülme davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	(Shadanov vd., 2022)
Fotodinamik tedavi için ışık yayan tekstil	SW4, SW6 ve SW8 saten yapıları; farklı saten bölgelerinin birlikte kullanımı	330 dtex polyester çözgü + 250 µm PMMA polimer optik lif (POF) atkı	Optik liflerin tekstil yapısına entegrasyonu ve ışığın kumaş yüzeyine dağıtılması; ışık dağılımının iyileştirilmesiyle daha homojen ışık çıkışı sağlanması	(Oguz, Cochrane, Mordon vd., 2016; Oguz, Cochrane, Koncar vd., 2016)
Aktinik keratozun fotodinamik tedavisi	Optik liflerin entegre edildiği ışık yayan dokuma yapı; saten temelli konstrüksiyon	Polyester tekstil iplikleri + polimer optik lifler	Tedavi bölgesine ışığın tekstil yüzeyi üzerinden kontrollü uygulanması	(Oguz vd., 2017)

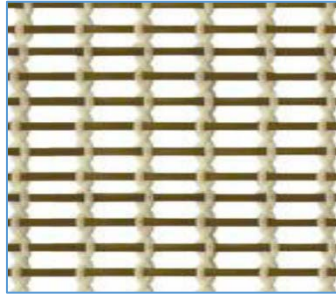
Saten örgünün uzun iplik atlamaları ve düşük bağlantı sayısı, pürüzsüz yüzey ve belirli uygulamalarda istenen esneklik ve geçirgenlik özelliklerinin sağlanması açısından avantaj oluşturabilmekle birlikte, aynı yapısal özellikler kullanım alanına bağlı olarak bazı sınırlılıklar da ortaya çıkarabilmektedir. Özellikle vasküler protezlerde örgü yapısının tek başına değerlendirilmesi yeterli olmayıp, saten raporu, iplik özellikleri, kumaş katmanları ve diğer örgülerle oluşturulan kombinasyonlar protezin gözeneklilik, su geçirgenliği ve mekanik davranışını birlikte belirlemektedir (Shadanov vd., 2022). Nitekim gözenekliliği ve geçirgenliği artırmak amacıyla kullanılan saten örgülerin protez duvarının tam vaskülarizasyonunu sağlamadığı ve tek katlı bezayağı protezlerin su geçirgenliği ile bükülme direnci açısından daha uygun sonuç verdiği bildirilmektedir (Shadanov vd., 2022). Benzer şekilde polimer optik lif içeren fotodinamik tedavi tekstillerinde saten raporunun değişmesi, optik liflerin kumaş içerisindeki kıvrım ve yerleşim biçimini ve buna bağlı olarak ışığın yüzeye dağılımını etkileyebilmektedir (Oguz, Cochrane, Mordon vd., 2016; Oguz, Cochrane, Koncar vd., 2016). Ayrıca uzun iplik atlamaları yüzeydeki ipliklerin mekanik etkilere daha açık hale gelmesine ve yapısal kararlılığın bezayağı gibi yüksek bağlantılı örgülere göre azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle saten örgünün tıbbi tekstillerde kullanımı, yalnızca örgünün yüzey ve esneklik avantajları açısından değil; mekanik kararlılık, gözeneklilik, geçirgenlik ve uygulamaya özgü fonksiyonel gereksinimler birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

3.2. Tıbbi Tekstillerde Kullanılan Özel Dokuma Yapıları

3.2.1. Leno Dokuma Yapılı Tıbbi Tekstiller

Leno dokuma, komşu çözümlü ipliklerinden birinin diğerinin etrafından çapraz hareket ederek atkı ipliğini yapı

içerisinde sabitlediği, bu nedenle düşük iplik sıklıklarında dahi açık ve gözenekli bir yüzey oluşturulmasına olanak sağlayan özel bir dokuma yapısıdır (Şekil 3). Çözümlü ipliklerinin çapraz hareketiyle oluşan bağlantı mekanizması, atkı ipliklerinin yer değiştirmesini sınırlandırarak açık yapı ile yapısal kararlılığın birlikte sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Leno yapılar; çözgü ipliklerinin bağlantı biçimine göre farklı konstrüksiyonlarda oluşturulabilmekte, ayrıca leno ve standart çözgü ipliklerinin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle kumaşın tamamında veya yalnızca belirli bölgelerinde açık yapılar meydana getirilebilmektedir. Bu konstrüksiyonel farklılıkların kumaşın gözeneklilik, iplik kıvrımı, boyutsal özellikleri ve mekanik davranışı üzerinde belirleyici olduğu bildirilmektedir (Kastacı, 2016; Kastacı ve Özek, 2026).



Şekil 3. Dokuma kumaş üretiminde basit leno örgü yapısı

Leno yapının açık yüzey karakterine rağmen iplik hareketliliğini sınırlandırabilmesi, bu örgüyü özellikle geçirgenlik ile yapısal kararlılığın birlikte gerekli olduğu tıbbi tekstil uygulamaları açısından önemli hale getirmektedir. Dört çözgümlü pamuklu leno yapıları inceleyen Tian vd. (2025), leno konstrüksiyonunun aynı sıklıktaki bezayağı yapıya kıyasla çözgü yönünde daha yüksek kopma kuvveti ve uzama gösterebildiğini; aynı zamanda yüksek gözeneklilik nedeniyle düşük hava direnci ve yüksek su buharı geçirgenliği sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Doğrudan tıbbi bir ürüne yönelik olmamakla birlikte

bu özellikler, özellikle hava ve nem transferinin yanı sıra mekanik bütünlüğün de önem taşıdığı tıbbi tekstil yüzeyleri açısından leno konstrüksiyonlarının işlevsel potansiyelini göstermektedir (Tian vd., 2025).

Tıbbi tekstillerde leno yapının kullanımı yalnızca yapısal bir potansiyel olarak kalmamış, farklı ürün ve uygulamalarda doğrudan değerlendirilmiştir. Leno dokuma yapıların yara bakım ve pansuman materyallerinde, parafinli pansumanlarda, gazlı bez ve elastik bandajlarda, ortopedik uygulamalarda, alçılı tekstil yapılarında, kendinden yapışkanlı tıbbi bantlarda ve dental amaçlı tekstil ürünlerinde kullanıldığı bildirilmektedir (Wilk, 2001; Kastacı, 2016). Wilk (2001), özellikle düşük sıklıklı geleneksel bezayağı gazlı bezlerde görülebilen iplik yer değiştirmesi ve kenar saçaklanması gibi yapısal sorunlara karşı leno konstrüksiyonunun avantaj sağlayabildiğini; çapraz çözümlü bağlantılarının iplikleri daha kararlı biçimde tutması sayesinde düşük gramajlı ve açık yapılı pansuman materyallerinin üretilbildiğini belirtmiştir (Wilk, 2001). Leno yapının tıbbi kullanımı implant uygulamalarına da uzanmakta; Aka ve Basal (2016) polyester ve Vectran ipliklerden oluşturulan leno dokuma yapılarını yapay ön çapraz bağ (ACL) geliştirilmesi amacıyla deneysel olarak değerlendirmiştir (Aka ve Basal, 2016).

Tablo 4. Tıbbi tekstillerde leno dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

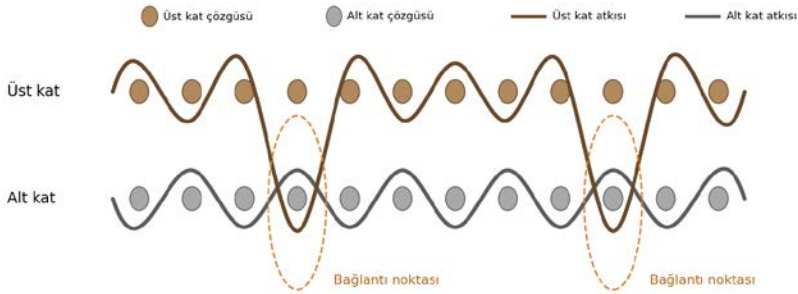
Kullanım alanı	Örgü/konstrüksiyon	Materyal/kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Parafinli pansuman materyali	Leno dokuma; 40–90 g/m ²	Pamuk; çözgü ve atkı 20–40 tex	Açık ve kararlı yapı; yara bakımında pansuman materyali olarak kullanım	(Wilk, 2001)
Elastik bandaj	Leno dokuma; yaklaşık 175 g/m ²	Pamuk ve elastik/Lycra içeren iplik sistemi	Açık yapının korunmasıyla elastikiyet ve bandajlama işlevinin sağlanması	(Wilk, 2001)
Ortopedik/açıklı tıbbi tekstiller	Leno dokuma	Ürüne göre değişken	Açık fakat iplikleri yapısal olarak sabitlenmiş taşıyıcı yüzey oluşturulması	(Kastacı, 2016)
Kendinden yapışkanlı tıbbi bant	Leno dokuma	Ürüne göre değişken	Açık ve kararlı taşıyıcı tekstil yüzeyi	(Kastacı, 2016)
Dental tekstil uygulamaları	Leno dokuma/leno şerit yapı	Ürüne göre değişken	Dental amaçlı tekstil şeridi/yüzeyi olarak kullanım	(Kastacı, 2016)
Fonksiyonel açık dokuma yüzey (tıbbi kullanım potansiyeli)	Dört çözgü bağlantılı leno	Pamuk	Yüksek gözeneklilik, düşük hava direnci, yüksek su buharı geçirgenliği ve yüksek mekanik performans	(Tian vd., 2025)
Yapay ön çapraz bağ (ACL)	Tübüler leno dokuma yapı	Polyester ve Vectran	Doğal ACL'ye benzer mekanik davranışın sağlanmasına yönelik yapay ligament geliştirilmesi; yorulma davranışının değerlendirilmesi	(Aka ve Basal, 2016)

Leno dokuma yapıların tıbbi tekstillerdeki kullanımında temel sınırlılık, performansın örgü türünden çok konstrüksiyonun bütününe bağlı olmasıdır. Leno ve standart çözgü ipliklerinin oranı ve yerleşimi ile atkı sıklığı ve bağlantı düzenindeki değişimler kumaşın mekanik ve boyutsal özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Kastacı, 2016; Kastacı ve Özek, 2026). Ayrıca çözgü ipliklerinin çapraz hareketine dayanan leno geometrisi, klasik dokuma örgülerine kıyasla daha karmaşık bir konstrüksiyon ve üretim düzeni gerektirmektedir. Bu nedenle yara bakım ürünlerinden ligament implantlarına kadar farklı tıbbi

uygulamalarda tek bir leno konstrüksiyonunun uygunluğundan söz etmek mümkün olmayıp, yapı tasarımının ürünün mekanik, geçirgenlik ve kullanım gereksinimlerine göre belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle implant uygulamalarında kullanılan iplik hammaddesi ve tekstil konstrüksiyonunun mekanik ve yorulma davranışı üzerindeki etkisi, leno yapının uygulamaya özgü olarak tasarlanmasının önemini ortaya koymaktadır (Aka ve Basal, 2016).

3.2.2. Çift Katlı ve Çok Katlı Dokuma Yapılar

Çift katlı ve çok katlı dokuma yapılar, iki veya daha fazla kumaş tabakasının dokuma işlemi sırasında belirli bağlantı düzenleriyle bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Tek katlı dokumalardan farklı olarak bu konstrüksiyonlarda her bir katmanın yapısal özellikleri ve katmanlar arasındaki bağlantı biçimi düzenlenebilmekte, böylece kumaş kalınlığı, gözeneklilik ve mekanik özellikler kullanım amacına göre kontrol edilebilmektedir. Bu yapısal esneklik, farklı mekanik ve fiziksel özelliklerin aynı tekstil yapısı içerisinde sağlanmasının gerekli olduğu tıbbi uygulamalar açısından çift ve çok katlı dokumaları önemli hale getirmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Çift katlı dokuma kumaşın kesit şeması (üst kat atkısının alt kat çözgüsü altından geçtiği bağlantı noktaları ile)

Özellikle doku mühendisliği uygulamalarında tekstil esaslı yapıların lif, iplik ve kumaş ölçeğinde tasarlanabilmesi;

gözeneklilik, topografya ve mekanik özelliklerin hedef dokunun gereksinimlerine göre düzenlenmesine olanak sağlamaktadır. Tek ve çok katlı tübüler tekstil yapılarının vasküler ve solunum dokularının ikamesine yönelik doku iskelelerinin geliştirilmesinde kullanılabildiği ve dokumanın bu yapıların üretiminde başvurulan tekstil tekniklerinden biri olduğu bildirilmektedir (Doersam vd., 2022). Benzer şekilde, çok katlı dokuma iskelelerin farklı yoğunluk ve malzeme özelliklerine sahip katmanların bir araya getirilmesine olanak sağladığı ve özellikle kırık ve osteokondral doku onarımına yönelik yapıların geliştirilmesinde değerlendirildiği belirtilmektedir (Moutos vd., 2007; Abrahamsson vd., 2010).

Çok katlı yapıların tıbbi uygulamalardaki bir diğer avantajı, farklı işlevlerin ayrı katmanlara kazandırılabilmesidir. Bu yaklaşım, bir katmanın mekanik dayanım veya yapısal destek sağlarken diğer katmanların sıvı transferi, biyolojik etkileşim veya yüzey fonksiyonelliği gibi farklı görevleri üstlenmesine olanak vermektedir. Nitekim yanık yaralarının tedavisine yönelik geliştirilen üç katmanlı tekstil kompozitlerinde dokuma yapıların kullanıldığı ve bu yapıların elastik ve antibakteriyel özelliklerinin değerlendirildiği bildirilmiştir (Visileanu vd., 2023). Benzer bir yaklaşımla Bush vd. (2024), dokuma polyester katmanı gentamisin sülfat yüklü PLLA cilt temas katmanı ile birleştirdikleri çok katmanlı yara örtüsünde antibakteriyel etki ile dikey nem transferinin birlikte sağlanmasını amaçlamıştır.

Çok katlı dokuma konstrüksiyonlarının implant uygulamalarındaki potansiyeli de dikkat çekmektedir. Tendon ve ligament implantlarına yönelik çalışmalarda biyouyumlu liflerden oluşturulan beş ve altı katlı dokuma yapılar geliştirilmiş; katman bağlantı biçiminin ve dokuma konstrüksiyonunun implantın yapısal ve mekanik özelliklerinin düzenlenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir (Lang vd., 2022). Bu çalışmalar, çok katlı dokuma teknolojisinin yalnızca yüzeysel tıbbi ürünlerde

değil, yük taşıması beklenen implant ve doku mühendisliği yapılarında da kullanılabilecek bir konstrüksiyon yaklaşımı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Tıbbi tekstillerde çift ve çok katlı dokuma yapılarının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

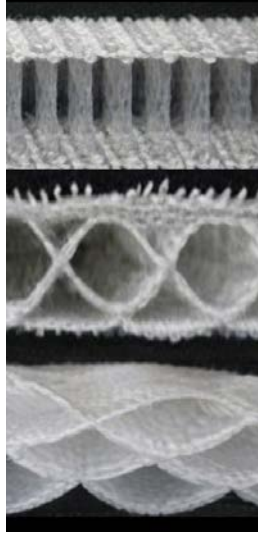
Kullanım alanı	Örgü/konstrüksiyon	Materyal/kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Yumuşak doku mühendisliği – vasküler ve solunum dokuları	Tek ve çok katlı tübüler tekstil yapıları; dokuma dahil farklı tekstil üretim teknikleri	Uygulamaya göre farklı biyomalzemeler	Hedef dokunun kompozisyon, topografya ve mekanik özelliklerini karşılayabilecek biyomimetik ve fonksiyonel iskelelerin geliştirilmesi	(Doersam vd., 2022)
Yanık yaralarının tedavisi	Üç katmanlı tekstil kompoziti; yapının dokuma ile üretilmiş katmanları	Kollajen, kolloidal gümüş, CMC, kil, hyalüronik asit, poliüretan vb. aktif maddelerle fonksiyonelleştirilmiş tekstil yapıları	Yanık tedavisine yönelik yapıda elastik özelliklerin ve antibakteriyel aktivitenin sağlanması/değerlendirilmesi	(Visileanu vd., 2023)
Tendon ve ligament implantları	5 ve 6 katlı dokuma yapılar; layer-to-layer plain, layer-to-layer satin ve angle-through-thickness konstrüksiyonları	İpek fibroin iplikleri	Tendon/ligament implantlarına yönelik çok katlı dokuma yapıların geliştirilmesi; konstrüksiyona bağlı yapısal ve mekanik özelliklerin düzenlenmesi	(Lang vd., 2022)
Kıkırdak/osteokondral doku mühendisliği	Çok katlı dokuma iskele yapıları	Katmanlara göre farklı yoğunluk ve materyal özellikleri	Farklı özelliklere sahip katmanlar aracılığıyla doku oluşumunun desteklenmesi ve osteokondral defektlerin onarımına yönelik yapısal ortam oluşturulması	(Moutos vd., 2007; Abrahamson vd., 2010)
Çok katmanlı antibakteriyel yara örtüsü	Dokuma polyester katman + örgülü (braided) PLLA katman içeren çok katlı yapı	Polyester dokuma yüzey + gentamisin sülfat (GS) yüklü PLLA cilt-temas katmanı + PEG yüzey işlemi	Antibakteriyel etki (bakterisidal/bakteriyostatik) ile dikey nem transferinin (wicking) birlikte sağlanması; enfeksiyon kontrolü ve kişiselleştirilebilir yara iyileşmesi için ayarlanabilir platform	(Bush vd., 2024)

Bununla birlikte, çift katlı ve çok katlı dokuma yapıların tıbbi uygulamalara yönelik tasarımında artan yapısal karmaşıklık bazı sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Katman sayısı, her bir katmanın örgü ve sıklık özellikleri ile katmanlar arasındaki bağlantı düzeninin birlikte kontrol edilmesi gerektiğinden, hedeflenen mekanik davranış ve gözenek yapısının elde edilmesi

tek katlı dokumalara kıyasla daha karmaşık bir tasarım süreci gerektirmektedir. Özellikle doku mühendisliği uygulamalarında iskelenin kompozisyonu, topografyası ve mekanik performansının hedef dokunun gereksinimleriyle uyumlu olması önem taşımaktadır (Doersam vd., 2022). Ayrıca katmanların farklı işlevler üstlendiği yapılarda, bir özelliğin geliştirilmesi diğer performans özelliklerinde değişime neden olabileceğinden, katmanlar arasındaki yapısal ve fonksiyonel uyumun birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çift ve çok katlı dokuma yapıların tıbbi kullanımındaki temel tasarım problemi, yalnızca katman sayısının artırılması değil, katmanların hedeflenen biyolojik ve mekanik gereksinimleri karşılayacak biçimde bütüncül olarak yapılandırılmasıdır.

3.2.3. Üç Boyutlu (3D) Dokuma Yapılar

Üç boyutlu (3D) dokuma yapılar (Şekil 5), geleneksel iki boyutlu dokumalardan farklı olarak ipliklerin yalnızca kumaş düzleminde değil, kalınlık yönünde de yapısal bütünlük oluşturacak biçimde düzenlendiği tekstil yapılarıdır. Bu yapılarda birden fazla çözümlü ve atkı katmanı, kalınlık yönünde uzanan bağlayıcı iplik sistemleriyle bir araya getirilebilmekte; böylece katmanlar arasında mekanik bağlantının dokuma işlemi sırasında oluşturulduğu bütünleşik yapılar elde edilebilmektedir. Kullanılan iplik sistemlerinin yerleşimine ve katmanlar arasındaki bağlantı biçimine bağlı olarak ortogonal, angle-interlock ve layer-to-layer gibi farklı 3D dokuma mimarileri oluşturulabilmektedir (Boussu vd., 2015). Bu yapısal çeşitlilik, kumaşın kalınlık, gözeneklilik, mekanik dayanım ve deformasyon davranışının kullanım amacına göre tasarlanabilmesine olanak sağlamakta ve 3D dokuma yapıların tıbbi tekstiller açısından değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır (Eriksson ve Sandsjö, 2015).



Şekil 5. Üç boyutlu (3D) dokuma kumaş örnekleri

Doku mühendisliği uygulamalarında mekanik performans tek başına yeterli değildir. İskele yapısının hücre tutunması, proliferasyonu ve farklılaşmasını desteklemesi; yeterli gözeneklilik ve gözenekler arası bağlantı sağlaması ve kullanılan malzemenin uygulamaya bağlı olarak biyoyumlu ve/veya biyobozunur olması gerekmektedir. Örneğin Persson vd. (2018), 3D dokumanın gözeneklilik, gözenek boyutu ve bağlantılılık gibi iskele parametrelerinin kontrolüne olanak sağladığını gösterirken, aynı zamanda uygun lif materyalinin geliştirilmesini de çalışmanın önemli bir parçası olarak ele almıştır (Persson vd., 2018).

Tablo 6. Tıbbi tekstillerde üç boyutlu dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

Kullanım alanı	3D dokuma yapı/konstrüksiyon	Materyal/kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Kemik doku mühendisliği	3D dokuma iskele	PLA ve PLA/hidroksipatit (HA) kompozit lifler	Mezenkimal kök hücrelerin osteoblastlara farklılaşmasının ve mineralize matriks oluşumunun desteklenmesi	(Persson vd., 2018)
Kıkırdak doku mühendisliği	Mikro ölçekli anizotropik 3D dokuma iskele	3D dokuma lif iskele + kondrosit içeren hidrojel	Doğal kıkırdığın anizotropik ve viskoelastik mekanik davranışının taklit edilmesi	(Moutos vd., 2007)
Kıkırdak rejenerasyonu	Çok katlı, kalınlık yönünde bağlantılı 3D dokuma iskele	3D dokuma PCL iskele + kıkırdak kaynaklı matriks (CDM) + insan adipoz doku kaynaklı kök hücreler	Kıkırdak doku mühendisliği için mekanik özelliklerin korunması ve hücre dışı matriks oluşumunun desteklenmesi	(Moutos vd., 2010)
Kıkırdak doku mühendisliği	3D dokuma PCL iskele	PCL + insan kemik iliği kaynaklı mezenkimal kök hücreler	Mekanik olarak fonksiyonel kıkırdak greftlerinin geliştirilmesi	(Valonen vd., 2010)
Eklem kıkırdığı onarımı	Gözenekli 3D dokuma lif iskele/hidrojel kompoziti	PCL + alginat/poliakrilamid çift ağırlı hidrojel	Doğal eklem kıkırdığının yük taşıma ve tribolojik özelliklerinin taklit edilmesi	(Liao vd., 2013)
Steril tıbbi cihaz ambalajı	İki katlı 3D dokuma; farklı atkı sıklıkları ve örgü kombinasyonları	Aramid + pamuk/modakrilik	Mikrobiyal bariyer oluşturulması ve yüksek delinme dayanımının sağlanması	(Kovačević vd., 2022)
Potansiyel tıbbi tekstil uygulamaları	Kalınlık yönünde bağlantılı 3D ortogonal oksetik dokuma	Çok katlı 3D dokuma konstrüksiyon	Negatif Poisson oranına sahip oksetik davranışın geliştirilmesi; tıbbi tekstiller potansiyel kullanım alanlarından biri olarak belirtilmiştir	(Zeeshan vd., 2022)

Üç boyutlu dokuma yapılar, kalınlık yönünde bütünleşmiş mimarileri ve yapısal parametrelerinin kontrol edilebilirliği

sayesinde özellikle doku mühendisliği uygulamalarında önemli avantajlar sunmakla birlikte, tıbbi kullanımları açısından bazı sınırlılıklara sahiptir. Karmaşık iplik yerleşimleri ve çok eksenli bağlantı sistemleri, üretim sürecini geleneksel dokuma yapılarına göre daha karmaşık hale getirmekte ve hedef dokunun mekanik özelliklerine uygun bir konstrüksiyonun geliştirilmesini güçleştirebilmektedir (Eriksson ve Sandsjö, 2015). Doku mühendisliği uygulamalarında yalnızca mekanik dayanımın sağlanması yeterli olmayıp; gözenek boyutu ve dağılımı, hücre infiltrasyonu, besin ve metabolit taşınımı, biyouyumluluk ve gerektiğinde biyobozunurluk gibi birbiriyle ilişkili özelliklerin birlikte kontrol edilmesi gerekmektedir (Doersam vd., 2022; Scholpp vd., 2025). Ayrıca tekstil yapısının mekanik performansının hedef dokunun anizotropik ve zamana bağlı davranışıyla uyumlu hale getirilmesi, özellikle yük taşıyan kıkırdak ve kemik dokusu uygulamalarında önemli bir tasarım problemi oluşturmaktadır (Persson vd., 2018; Moutos vd., 2007; Moutos vd., 2010).

Mevcut çalışmalar incelendiğinde, 3D dokuma yapıların tıbbi uygulamalarına ilişkin deneysel araştırmaların özellikle kıkırdak ve kas-iskelet sistemi doku mühendisliği üzerinde yoğunlaştığı (Moutos vd., 2007; Moutos vd., 2010; Valonen vd., 2010; Liao vd., 2013; Persson vd., 2018), steril tıbbi cihaz ambalajı gibi diğer tıbbi uygulama alanlarında ise daha sınırlı kaldığı görülmektedir (Kovačević vd., 2022). Bunun yanında bazı gelişmiş 3D dokuma mimarileri tıbbi tekstiller açısından potansiyel taşımakla birlikte, doğrudan biyomedikal ortamda doğrulanmış uygulamalara henüz dönüşmemiştir; oksetik (auxetic) 3D dokuma yapıların tıbbi tekstiller için önerilmesi buna örnek olarak gösterilebilir (Zeeshan vd., 2022). Bu durum, gelecekteki çalışmalarda 3D dokuma konstrüksiyonların yalnızca yapısal ve mekanik performans açısından değil, biyolojik yanıt, uzun dönem davranış, sterilizasyon koşullarına dayanım ve

uygulamaya özgü fonksiyonellik bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.2.4. Tübüler Dokuma Yapılar

Tübüler dokuma yapılar, kumaşın dokuma işlemi sırasında kapalı veya boru biçimli bir geometri oluşturacak şekilde üretilmesine dayanan özel tekstil konstrüksiyonlarıdır (Şekil 6). Bu yapılarda çözgü iplikleri tüpün uzunlamasına yönünde yer alırken, atkı ipliğinin çevresel yöndeki bağlantıları tübüler formun oluşmasını sağlamaktadır. Dikiş veya sonradan birleştirme işlemine gereksinim duyulmadan kesintisiz yapıların üretilmesi, tübüler dokumaları özellikle damar benzeri geometrilerin gerekli olduğu tıbbi uygulamalar açısından önemli hale getirmektedir. Dokuma teknolojisi ayrıca tüp çapı, iplik yerleşimi, örgü yapısı ve sıklık gibi konstrüksiyon parametrelerinin değiştirilmesine olanak sağlayarak yapının gözeneklilik, mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık özelliklerinin uygulama gereksinimlerine göre düzenlenebilmesini mümkün kılmaktadır (Doersam vd., 2022; Singh vd., 2015).



Şekil 6. Tübüler dokuma yapı örneği

Tübüler dokumanın klinikte en yerleşik kullanımı, büyük çaplı damarların replasmanında kullanılan polyester (Dacron®) vasküler greftlerdir. Dokuma ve örme Dacron greftlerin 15–30 mm çaplı büyük damarların, özellikle aortun replasmanında uzun süredir yaygın biçimde kullanıldığı; dokuma greftlerin düşük

gözenekli yapıları nedeniyle implantasyon öncesinde ön pıhtılaştırma (*preclotting*) gerektirmediği bildirilmektedir. Bununla birlikte ticari dokuma greftlerin temel konstrüksiyonunun, ilk uygulamalarından bu yana homojen tek katlı bir dokuma yapı olarak büyük ölçüde değişmeden kaldığı; küçük çaplı uygulamalarda ise doğal arterle uyumluluk farkına bağlı tromboz ve anastomotik intimal hiperplazi gibi sorunlar nedeniyle başarının sınırlı olduğu vurgulanmaktadır (Singh vd., 2015). Bu durum, güncel tübüler dokuma çalışmalarının ağırlıklı olarak küçük çaplı greftlere ve doku mühendisliği yaklaşımlarına yönelmesinin temel nedenlerinden biridir.

Tıbbi uygulamalarda tübüler dokuma yapılar özellikle küçük çaplı vasküler greftler ve tübüler doku mühendisliği iskelelerinin geliştirilmesinde öne çıkmaktadır. Bu yapılarda mekanik dayanımın sağlanmasının yanı sıra doğal dokuyla uyumlu esneklik, kontrollü gözeneklilik ve uygun yüzey özelliklerinin elde edilmesi önem taşımaktadır. Üretim teknolojilerindeki gelişmeler, küçük çaplı ve dikişsiz tübüler yapıların yanı sıra çapı yapı boyunca değişebilen geometrilerin ve farklı iplik sistemlerinin kullanılabildiği konstrüksiyonların geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Joseph vd., 2018; Meng vd., 2019). Biyobozunur polimerlerin, hücre kaynaklı biyolojik ipliklerin ve çekirdek-kılıf yapıları lif sistemlerinin dokuma konstrüksiyonlarına aktarılması ise tübüler dokumaların yalnızca mekanik destek sağlayan tekstil yapıları olmaktan çıkarak doku rejenerasyonunu desteklemeye yönelik fonksiyonel yapılara dönüştürülmesine yönelik önemli bir gelişim alanı oluşturmaktadır (Yokota vd., 2008; Magnan vd., 2020; Doersam vd., 2025).

Tablo 7. Tıbbi tekstillerde tübüler dokuma yapısının kullanım alanları ve literatürde bildirilen özellikleri

Kullanım alanı	Tübüler dokuma yapı / konstrüksiyon	Materyal / kompozisyon	Bildirilen özellik veya amaç	Kaynak
Büyük çaplı vasküler greft (aort)	Homojen tek katlı tübüler dokuma; ticari ve klinik kullanımda	Polyester (PET, Dacron®)	Düşük gözeneklilik nedeniyle ön pıhtılaşdırma gerektirmemesi; 15–30 mm çaplı damar replasmanı; küçük çaplı damar uyumluluk farkı nedeniyle sınırlı başarı	(Singh vd., 2015)
Vasküler uygulama / tübüler doku iskelesi	Robotik dokuma sistemiyle üretilmiş dikişsiz tübüler dokuma nanotekstil; farklı çaplarda üretim	PCL–kollajen ve PLLA esaslı nanoiplik sistemleri	Porozite ve mekanik özelliklerin konstrüksiyon aracılığıyla ayarlanması; vasküler uygulamalar için küçük çaplı tübüler yapı geliştirilmesi	(Joseph vd., 2018)
Konik vasküler greft	Otomatik olarak üretilen konik dairesel tübüler dokuma (TCT) yapı	Çalışmada kullanılan tekstil iplik sistemi	Değişken çaplı tübüler greftlerin kesintisiz üretimi ve konstrüksiyon/porozite kontrolünün geliştirilmesi	(Meng vd., 2019)
Küçük çaplı vasküler greft	Bezayağı dokuma, biyobozunur tübüler yapı; yaklaşık 4 mm çap	PGA çekirdek / PLLA kılıf lifler + kollajen mikrosünger	Hücre ekimi gerektirmeden in situ doku rejenerasyonunun desteklenmesi; küçük çaplı vasküler greft geliştirilmesi	(Yokota vd., 2008)
Doku mühendisliği vasküler grefti (TEVG)	Özel dairesel dokuma tezgâhında 1/1 bezayağı, yaklaşık 4,2 mm iç çap	İnsan fibroblastlarından oluşturulan hücre-kaynaklı ekstraselüler matriks (CAM) iplikleri	Tamamen biyolojik vasküler greft oluşturulması; yüksek patlama basıncı ve dikiş tutma dayanımı; in vivo implantasyonun gösterilmesi	(Magnan vd., 2020)
Tübüler doku mühendisliği	Ayarlanabilir dokuma mimarisine sahip tübüler dokuma iskele	PLA multifilament çekirdek + elektro-eğrilmiş PCL nanolif kılıftan oluşan core–sheath iplikler	Tübüler dokular için ölçeklenebilir dokuma iskelelerin geliştirilmesi; iplik ve dokuma mimarisinin yapısal özelliklere göre ayarlanabilmesi	(Doersam vd., 2025)

Tübüler dokuma yapılar yüksek mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık sağlayabilmekle birlikte, özellikle vasküler

uygulamalarda doğal dokunun mekanik davranışının taklit edilmesi önemli bir tasarım gücünü oluşturmaktadır. Dokuma konstrüksiyonunun görece sınırlı deformasyon yeteneği, greft ile doğal damar arasında uyumluluk (compliance) farklılığına neden olabilmekte; bu nedenle mekanik dayanım ile esneklik arasında uygun bir dengenin kurulması gerekmektedir. Bunun yanında iplik çapı, örgü yapısı ve dokuma sıklığında yapılan değişiklikler gözeneklilik ve geçirgenliği de etkilediğinden, mekanik performansın iyileştirilmesi diğer fonksiyonel özelliklerden bağımsız olarak ele alınamamaktadır (Doersam vd., 2022; Singh vd., 2015).

Üretim açısından ise küçük çaplı ve geometrisi değişken tübüler yapıların dokunması, iplik gerginliği ve konstrüksiyon parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Ayrıca biyobozunur, biyolojik veya çekirdek-kılıf yapıları yeni iplik sistemlerinin kullanılması, dokuma sırasında işlenebilirlik ile hedeflenen biyolojik ve mekanik özelliklerin birlikte sağlanmasını zorlaştırabilmektedir. Güncel çalışmalar farklı malzeme ve dokuma mimarilerinin tübüler yapılar için önemli bir tasarım potansiyeli taşıdığını göstermekle birlikte, laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların klinik kullanıma aktarılabilmesi için yapıların uzun dönem mekanik davranışı, biyolojik yanıtı ve in vivo performansının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir (Magnan vd., 2020; Doersam vd., 2025).

3.3. Dokuma Yapı-Performans İlişkisinin Genel Değerlendirilmesi

Bu derlemede ele alınan çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, tıbbi tekstillerde dokuma konstrüksiyonlarının kullanım alanlarının yapısal özelliklerine bağlı olarak belirgin biçimde farklılaştığı görülmektedir. Bezayağı gibi temel örgüler yara bakım ürünleri, cerrahi tekstiller

ve hastane tekstilleri gibi geleneksel uygulamalarda geniş kullanım alanı bulurken, dimi ve saten yapıların daha çok belirli mekanik, yüzey veya fonksiyonel özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda değerlendirildiği görülmektedir. Buna karşılık leno, çok katlı, 3D ve tübüler dokuma konstrüksiyonları; açık fakat kararlı yüzeylerin oluşturulması, farklı işlevlerin aynı yapı içerisinde bir araya getirilmesi, kalınlık yönünde kontrollü tekstil mimarilerinin geliştirilmesi veya dikişsiz ve çevresel olarak bütünleşmiş geometrilerin elde edilmesi gibi daha özel tasarım gereksinimlerine cevap vermektedir (Wilk, 2001; Eriksson ve Sandsjö, 2015; Doersam vd., 2022).

Literatürde bildirilen uygulamalar, dokuma konstrüksiyonunun sağladığı bir yapısal avantajın her tıbbi ürün için aynı ölçüde yararlı olmadığını da göstermektedir. Örneğin açık ve kararlı bir tekstil geometrisi yara bakım ve bazı bandaj uygulamalarında avantaj sağlarken, implant ve doku mühendisliği yapılarında gözenek geometrisinin mekanik davranış ve biyolojik gereksinimlerle birlikte kontrol edilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde çok katlı ve 3D yapılarda tasarım serbestliğinin artması, farklı işlevlerin tek bir tekstil yapısında birleştirilmesine olanak sağlamakla birlikte konstrüksiyonun ve üretimin karmaşıklığını da artırmaktadır (Persson vd., 2018; Doersam vd., 2022). Tübüler dokuma yapılarda ise dikişsiz ve kontrollü çapta yapıların oluşturulabilmesi özellikle vasküler uygulamalar açısından önemli bir avantaj sağlamakta; buna karşılık mekanik dayanım, esneklik, gözeneklilik ve doğal damar ile mekanik uyumluluğun birlikte sağlanması önemli bir tasarım gereksinimi oluşturmaktadır (Meng vd., 2019; Doersam vd., 2022). Bu durum, tıbbi tekstillerde dokuma yapısının seçiminde tek bir yapısal özelliğin en üst düzeye çıkarılmasından ziyade, hedef uygulamanın gerektirdiği özellikler arasında uygun dengenin kurulmasının önemli olduğunu göstermektedir.

Dokuma yapının seçimi, nihai ürünün karşılaması gereken performans gereksinimlerinden bağımsız değildir. Tıbbi dokuma ürünlerin başlıca uygulama grupları için temel performans gereksinimleri ve bu gereksinimlerin değerlendirilmesinde başvurulacak başlıca standartlar Tablo 8'de özetlenmiştir. Bu çerçevede, önceki bölümlerde ele alınan sıklık, gözenek geometrisi, katman düzeni ve tübüler form gibi yapısal parametrelerin hangi ölçülebilir performans ölçütleriyle ilişkilendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 8. Tıbbi dokuma ürünlerde uygulamaya göre temel performans gereksinimleri ve ilgili standartlar

Uygulama	Temel performans gereksinimleri	İlgili standart(lar)
Yara bakım gazlı bezi ve pansuman materyalleri	Emicilik; lif ve partikül bırakmama; yara yüzeyine yapışmama; boyutsal kararlılık	EN 14079 (pamuk ve pamuk/viskon gazlı bez); EN 13726-1 (birincil yara örtülerinde emicilik)
Yeniden kullanılabilir cerrahi önlük ve örtüler	Islak ve kuru mikrobiyal penetrasyon direnci; sıvı geçirmezlik; düşük partikül bırakma; kopma ve patlama dayanımı	EN 13795-1; ISO 22610 (ıslak bakteri penetrasyonu); ISO 22612 (kuru mikrobiyal penetrasyonu); ISO 811 (hidrostatik basınç)
Hastane yatak tekstilleri, hasta ve personel giysileri	Antibakteriyel etkinlik; endüstriyel yıkamaya dayanıklılık; boyutsal kararlılık; kullanım konforu	ISO 20743 (antibakteriyel aktivite); EN 14065 (çamaşırhanelerde biyokontaminasyon kontrolü)
Kompresyon ve elastik bandajlar	Basınç oluşturma ve tekrarlı kullanımda basıncın korunması; uzama ve geri dönüş; hava geçirgenliği	EN 14704-1 (kumaş elastikiyeti); BS 7505 (elastik bandajların elastik özellikleri); ISO 9237 (hava geçirgenliği)
Vasküler protez ve greftler	Su geçirgenliği; patlama ve dikiş tutma dayanımı; uyumluluk (compliance); bükülme direnci; biyouyumluluk	ISO 7198 (tübüler vasküler greftler ve yamalar); ISO 10993-1 (biyolojik değerlendirme)
Tendon/ligament implantları ve doku iskeleleri	Mekanik dayanım ve yorulma direnci; kontrollü gözeneklilik ve gözenek bağlantılılığı; biyouyumluluk; gerektiğinde biyobozunurluk	ISO 10993-1; ASTM F2150 (rejeneratif tıpta biyomalzeme iskelelerinin karakterizasyonu)
Steril tıbbi cihaz ambalajı	Mikrobiyal bariyer; delinme dayanımı; sterilizasyon yöntemiyle uyumluluk	ISO 11607-1

Not: Standartlar numaralarıyla verilmiştir. Ürünün tabi olduğu mevzuat (ör. AB Tıbbi Cihaz Tüzüğü 2017/745) kapsamında ilgili standartların yürürlükteki sürümleri esas alınmalıdır.

İncelenen literatürün dağılımı açısından ise geleneksel dokuma yapıların yara bakımı, cerrahi ürünler ve hastane

tekstilleri gibi alanlarda daha geniş biçimde ele alındığı, ileri dokuma konstrüksiyonlarına ilişkin çalışmaların ise belirli uygulamalarda yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle 3D dokuma yapıların deneysel tıbbi çalışmalarının önemli bir bölümünün kıkırdak ve kas-iskelet sistemi doku mühendisliğine yöneldiği; tübüler dokuma yapılarına ilişkin çalışmaların ise ağırlıklı olarak vasküler greftler ve tübüler doku mühendisliği üzerinde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir (Doersam vd., 2022; Moutos vd., 2007; Valonen vd., 2010; Liao vd., 2013). Buna karşılık oksetik dokumalar gibi bazı gelişmiş yapılar için tıbbi kullanım potansiyeli bildirilmesine rağmen doğrudan uygulamaya yönelik kanıtlar henüz sınırlıdır (Zeeshan vd., 2022). Bu nedenle farklı dokuma konstrüksiyonlarının uzun dönem kullanım, sterilizasyon sonrası performans ve biyolojik ortamla etkileşim açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, mevcut literatürde geliştirilmesi gereken başlıca alanlardan biri olarak görülmektedir.

Bu derlemede ele alınan dokuma yapılarının temel yapısal avantajları, tipik tıbbi uygulamaları, başlıca sınırlılıkları ve incelenen literatürdeki kanıt düzeyi Tablo 9'da karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Tablo 9. Tıbbi tekstillerde kullanılan dokuma yapılarının karşılaştırmalı değerlendirmesi

Dokuma yapı	Temel yapısal avantaj	Tipik tıbbi uygulamalar	Başlıca sınırlılık	Kanıt düzeyi
Bezayağı	En yüksek bağlantı sayısı; boyutsal kararlılık; sıklığa bağlı olarak geniş gözeneklilik aralığı	Gazlı bez ve pansumanlar; cerrahi önlük; hastane yatak tekstilleri; hasta ve personel giysileri; antimikrobiyal yüzeyler	Açık yapılarda iplik kayması, kenar saçaklanması ve serbest lif oluşumu	Ticari/klinik kullanım
Dimi	Bezayağına göre düşük rijitlik ve daha yüksek esneklik; rapora bağlı ayarlanabilir geçirgenlik	Cerrahi önlük; kurumsal yatak tekstilleri; elastan içerikli kompresyon yapıları	Geçirgenlik ve basınç performansının rapor, sıklık ve elastan parametrelerine duyarlı olması	Ticari (önlük, yatak tekstili); deneysel (kompresyon)
Saten	Pürüzsüz yüzey; uzun iplik atlamaları sayesinde lif yerleşiminin kontrolü	Vasküler protezler; polimer optik lifli fotodinamik tedavi tekstilleri	Uzun atlamalar nedeniyle mekanik etkilere açık yüzey ve düşük yapısal kararlılık	In vivo (protez); prototip (fotodinamik tedavi)
Leno	Düşük sıklıkta dahi açık fakat kararlı yapı; iplik kaymasına direnç	Parafinli pansuman; elastik bandaj; alçılı/ortopedik ürünler; tıbbi bant; yapay ACL	Karmaşık üretim düzeni; performansın leno/standart çözgü oranı ve yerleşimine bağlı olması	Ticari (yara bakımı); deneysel (ACL)
Çift ve çok katlı	Farklı işlevlerin ayrı katmanlara kazandırılması; kalınlık ve gözeneklilik kontrolü	Çok katmanlı yara örtüleri; tendon/ligament implantları; kırık/osteokondral iskeleler	Tasarım karmaşıklığı; katmanlar arası özellik dönüşümü	Ağırlıklı in vitro/deneyse l
Üç boyutlu (3D)	Kalınlık yönünde bütünleşik mimari; anizotropik mekanik davranışın tasarlanabilmesi	Kırık ve kemik doku iskeleleri; steril tıbbi cihaz ambalajı	Üretim karmaşıklığı; uygulamaların kırıkta yoğunlaşması; biyolojik ve uzun dönem doğrulama eksikliği	Ağırlıklı in vitro; oksetik yapılarda öneri düzeyi
Tübüler	Dikişsiz, çapı kontrol edilebilen ve çevresel olarak bütünleşik geometri	Büyük çaplı Dacron greftler; küçük çaplı vasküler greftler; tübüler doku mühendisliği iskeleleri	Doğal damarla uyumluluk farkı; küçük çapta sınırlı başarı; yeni iplik sistemlerinin işlenebilirliği	Klinik (büyük çap); in vivo/deneyse l (küçük çap)

Not: Kanıt düzeyi, bu derlemede incelenen çalışmalar esas alınarak belirtilmiştir.

4. SONUÇ

Dokuma teknolojisi, yapısal parametrelerinin geniş sınırlar içerisinde değiştirilebilmesi sayesinde farklı tıbbi uygulamaların gerektirdiği özelliklerin tekstil yapılarına kazandırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu derlemede incelenen literatür, tıbbi dokuma yüzeylerde performansın yalnızca örgü türüyle açıklanamayacağını; iplik özellikleri, sıklık, katman düzeni, gözenek geometrisi, yapının makroskopik formu ve kullanılan materyalin birlikte belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla dokuma konstrüksiyonunun tıbbi ürün tasarımıdaki önemi, belirli bir örgünün üstünlüğünden çok, yapısal parametrelerin hedeflenen fonksiyona göre düzenlenebilmesinden kaynaklanmaktadır.

Çalışmaların genel eğilimi, dokuma teknolojisinin geleneksel tıbbi tekstillerdeki kullanımının ötesine geçerek daha karmaşık ve uygulamaya özgü yapılara doğru geliştiğini göstermektedir. Özellikle kontrollü gözenek yapısına sahip leno konstrüksiyonları, çok katlı ve 3D mimariler ile dikişsiz ve geometrisi kontrol edilebilen tübüler dokuma yapılar, dokumanın yalnızca iki boyutlu bir yüzey oluşturma yöntemi değil, farklı biyomedikal gereksinimlere göre yapılandırılabilen fonksiyonel bir tasarım aracı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Tübüler yapıların özellikle vasküler greftler ve doku mühendisliği uygulamalarındaki gelişimi, tekstil geometrisi ile mekanik ve biyolojik performansın birlikte tasarlanmasının önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu ileri yapıların klinik veya biyomedikal uygulamalara aktarılabilmesi için laboratuvar ölçeğinde elde edilen yapısal ve mekanik performansın gerçek kullanım koşullarındaki davranışla ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, tıbbi dokuma yüzeylerin gelecekteki gelişiminin yeni örgü yapılarının oluşturulmasından çok, mevcut

ve gelişmiş konstrüksiyonların uygulamaya özgü gereksinimlere göre optimize edilmesi ve doğrulanması yönünde ilerlemesi beklenmektedir. Malzeme seçimi ile tekstil geometrisinin birlikte tasarlanması; mekanik dayanım, gözeneklilik, geçirgenlik, esneklik ve boyutsal kararlılık gibi yapısal performans özelliklerinin biyolojik ve klinik gereksinimlerle birlikte değerlendirilmesi, dokuma yapıların ileri tıbbi tekstillerdeki kullanım alanlarının genişletilmesi açısından temel yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Çalışmanın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atıf gösterme ilkelerine uyduğumu beyan ederim.

YAZAR KATKISI

Bu çalışma tek yazar tarafından hazırlanmıştır. [BBM]: Fikir/Kavram, Tasarım ve Dizayn, Kaynaklar/Malzemeler, Literatür Taraması, Veri Toplama, Veri İşleme, Analiz/Yorum, Taslak Hazırlama, Mizanpaj, Ana Metni Yazma.

KAYNAKÇA

- Abrahamsson, C. K., Yang, F., Park, H., Brunger, J. M., Valonen, P. K., Langer, R., . . . Freed, L. E. (2010). Chondrogenesis and mineralization during in vitro culture of human mesenchymal stem cells on three-dimensional woven scaffolds. *Tissue Engineering Part A*, 16(12), 3709–3718. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2010.0190>
- Aibibu, D., Lehmann, B., & Offermann, P. (2003). Barrier effect of woven fabrics used for surgical gowns. *AUTEX Research Journal*, 3(4), 186–193. <https://doi.org/10.1515/aut-2003-030405>
- Aka, C., & Basal, G. (2016). Production of novel textile-based artificial anterior cruciate ligament. *Tekstilec*, 59(2), 121–125. <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2016.59.121-125>
- Anand, S. C., Kennedy, J. F., Miraftab, M., & Rajendran, S. (Eds.). (2010). *Medical and healthcare textiles*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Bartels, V. T. (Ed.). (2011). *Handbook of medical textiles*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Boussu, F., Cristian, I., & Nauman, S. (2015). General definition of 3D warp interlock fabric architecture. *Composites Part B: Engineering*, 81, 171–188. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.013>
- Bush, E. G., Mwangomo, R., Kidd, J., & Gilmore, J. (2024). Multi-layer antibacterial polyester fabrics for infection management and moisture wicking in a textile-based biomaterial wound dressing. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19. <https://doi.org/10.1177/15589250241241675>
- Büyükgöze, S. (2019). Sağlık 4.0’da giyilebilir teknolojilerden sensör yamalar üzerine bir inceleme. *Avrupa Bilim ve*

Teknoloji Dergisi, (17), 1239–1247.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.658020>

Çelik, H. İ., & Kaynak, H. K. (2017). An investigation on the effect of elastane draw ratio on air permeability of denim bi-stretch denim fabrics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(8), 082007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/8/082007>

Doersam, A., Larrea Murillo, L., Jones, C., & Tsigkou, O. (2025). Developing scalable woven textile-based scaffolds for tubular tissues with core–sheath nanofibre yarns and tuneable weave architectures. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1655852. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1655852>

Doersam, A., Tsigkou, O., & Jones, C. (2022). A review: Textile technologies for single and multi-layer tubular soft tissue engineering. *Advanced Materials Technologies*, 7(11), 2101720. <https://doi.org/10.1002/admt.202101720>

Eriksson, S., & Sandsjö, L. (2015). Three-dimensional fabrics as medical textiles. In X. Chen (Ed.), *Advances in 3D textiles* (pp. 305–340). Cambridge, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-214-3.00012-7>

Joseph, J., Krishnan, A. G., Cherian, A. M., Rajagopalan, B., Jose, R., Varma, P., . . . Menon, D. (2018). Transforming nanofibers into woven nanotextiles for vascular application. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(23), 19449–19458. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b05096>

Kastacı, B. B. (2016). *Leno dokuma kumaşların yapısal değişkenleri ile fiziksel özellikleri arasındaki ilişkinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

- Kastacı, B. B., & Özek, H. Z. (2026). Effect of structural elements on the mechanical properties of hybrid leno woven fabric. *Annals of the University of Oradea, Fascicle of Textiles, Leatherwork*, 27(1), 73–86.
- Kovačević, S., Rogina-Car, B., & Kiš, A. (2022). Application of 3D-woven fabrics for packaging materials for terminally sterilized medical devices. *Polymers*, 14(22), 4952. <https://doi.org/10.3390/polym14224952>
- Lang, T. G., Nuß, D., Gereke, T., Hoffmann, G., Wöltje, M., Aibibu, D., & Cherif, C. (2022). Simulation-based development of gradient woven fabrics for biomimetic implants to restore tendons and ligaments. *Textiles*, 2(2), 336–348. <https://doi.org/10.3390/textiles2020019>
- Liao, I. C., Moutos, F. T., Estes, B. T., Zhao, X., & Guilak, F. (2013). Composite three-dimensional woven scaffolds with interpenetrating network hydrogels to create functional synthetic articular cartilage. *Advanced Functional Materials*, 23(47), 5833–5839. <https://doi.org/10.1002/adfm.201300483>
- Magnan, L., Labrunie, G., Fénelon, M., Dusserre, N., Foulc, M. P., Lafourcade, M., . . . L'Heureux, N. (2020). Human textiles: A cell-synthesized yarn as a truly “bio” material for tissue engineering applications. *Acta Biomaterialia*, 105, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.01.037>
- Maqsood, M., Nawab, Y., Umar, J., Umair, M., & Shaker, K. (2017). Comparison of compression properties of stretchable knitted fabrics and bi-stretch woven fabrics for compression garments. *The Journal of the Textile Institute*, 108(4), 522–527. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1172432>

- Meng, F., Li, Y., Ma, Y., & Chen, X. (2019). Development of automatic weaving technique of tapered circular tubular woven graft: A preliminary validation. *The Journal of the Textile Institute*, 110(8), 1126–1131. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1541438>
- Morris, H., & Murray, R. (2021). *Medical textiles*. Boca Raton, FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003170570>
- Moutos, F. T., Estes, B. T., & Guilak, F. (2010). Multifunctional hybrid three-dimensionally woven scaffolds for cartilage tissue engineering. *Macromolecular Bioscience*, 10(11), 1355–1364. <https://doi.org/10.1002/mabi.201000124>
- Moutos, F. T., Freed, L. E., & Guilak, F. (2007). A biomimetic three-dimensional woven composite scaffold for functional tissue engineering of cartilage. *Nature Materials*, 6(2), 162–167. <https://doi.org/10.1038/nmat1822>
- Oguz, Y., Cochrane, C., Koncar, V., & Mordon, S. (2016). Light properties improvement of light emitting woven textiles with optical fibres for photodynamic therapy. In *Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS 2016)* (pp. 148–153). Setúbal, Portugal: SCITEPRESS. <https://doi.org/10.5220/0005743701460151>
- Oguz, Y., Cochrane, C., Mordon, S. R., Lesage, J. C., & Koncar, V. (2016). Light-emitting fabrics for photodynamic therapy. In L. Van Langenhove (Ed.), *Advances in smart medical textiles: Treatments and health monitoring* (pp. 177–194). Duxford, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-379-9.00008-6>
- Oguz, Y., Koncar, V., Cochrane, C., & Mordon, S. (2017). Light-emitting woven fabric for treatment with photodynamic

- therapy and monitoring of actinic keratosis. In Y. Tanaka (Ed.), *Photomedicine: Advances in clinical practice* (pp. 95–112). Rijeka, Croatia: InTech. <https://doi.org/10.5772/64997>
- Persson, M., Lehenkari, P. P., Berglin, L., Turunen, S., Finnilä, M. A. J., Risteli, J., . . . Tuukkanen, J. (2018). Osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells in a 3D woven scaffold. *Scientific Reports*, 8, 10457. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28699-x>
- Rajendran, S. (Ed.). (2009). *Advanced textiles for wound care*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Rajendran, S., & Anand, S. C. (2001). Development of a versatile antimicrobial finish for textile materials for healthcare and hygiene applications. In S. C. Anand (Ed.), *Medical textiles: Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition* (pp. 107–116). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Rao, T.-J., Pan, C., Guidoin, R., Marceau, D., Roy, P.-E., King, M., . . . Lin, C. (1991). Soft filamentous woven polyester arterial prosthesis from China. *Biomaterials*, 12(3), 335–344. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(91\)90043-A](https://doi.org/10.1016/0142-9612(91)90043-A)
- Scholpp, S., Hoffmann, L. A., Schätzlein, E., Gries, T., Emonts, C., & Blaeser, A. (2025). Interlacing biology and engineering: An introduction to textiles and their application in tissue engineering. *Materials Today Bio*, 31, 101617. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101617>
- Shadanov, A. A., Timchenko, T. P., Vladimirov, S. V., Lushchyk, P. E., Zablotsky, A. V., Kiselyov, S. O., . . . Chernyavskiy, A. M. (2022). The influence of weaving technologies on the integral characteristics of synthetic vascular

- prostheses. *Sovremennye Tekhnologii v Meditsine*, 14(6), 5–13. <https://doi.org/10.17691/stm2022.14.6.01>
- Singh, C., Wong, C. S., & Wang, X. (2015). Medical textiles as vascular implants and their success to mimic natural arteries. *Journal of Functional Biomaterials*, 6(3), 500–525. <https://doi.org/10.3390/jfb6030500>
- Subramanian, S., & Muthumanickam, A. (2024). Textile materials and structures for health and well-being: An overview. In S. Sundaramoorthy, S. Kubera Sampath Kumar, & M. V. Chavhan (Eds.), *Textile materials for good health and wellbeing: Design and applications* (pp. 1–14). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6496-9_1
- Sun, G., Xu, X., Bickett, J. R., & Williams, J. F. (2001). Durable and regenerable antibacterial finishing of fabrics with a new hydantoin derivative. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(4), 1016–1021. <https://doi.org/10.1021/ie000657t>
- Tian, X., Yao, M., Li, Y., & Li, L. (2025). Design and fabrication of mesh-like four-warp leno cotton fabric based on self-locking effect: Outstanding mechanical performance and breathability. *Cellulose*, 32(3), 1979–1991. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06365-y>
- Valonen, P. K., Moutos, F. T., Kusanagi, A., Moretti, M. G., Diekman, B. O., Welter, J. F., . . . Freed, L. E. (2010). In vitro generation of mechanically functional cartilage grafts based on adult human stem cells and 3D-woven poly(ϵ -caprolactone) scaffolds. *Biomaterials*, 31(8), 2193–2200. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.092>

- Visileanu, E., Ene, A., Mihai, C., & Vladu, A. (2023). Textile structures for the treatment of burn wounds – characterization of elastic and antibacterial properties. *Industria Textila*, 74(2), 246–255. <https://doi.org/10.35530/IT.074.02.2022108>
- Wilk, E. (2001). Some aspects of cotton leno fabric usage in the new generation of dressing materials. In S. C. Anand (Ed.), *Medical textiles: Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition* (pp. 149–155). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Yokota, T., Ichikawa, H., Matsumiya, G., Kuratani, T., Sakaguchi, T., Iwai, S., . . . Sawa, Y. (2008). In situ tissue regeneration using a novel tissue-engineered, small-caliber vascular graft without cell seeding. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 136(4), 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2008.02.058>
- Zeeshan, M., Hu, H., & Zulifqar, A. (2022). Three-dimensional narrow woven fabric with in-plane auxetic behavior. *Textile Research Journal*, 92(23–24), 4695–4708. <https://doi.org/10.1177/00405175221109639>

YARA BAKIMINDA TEKSTİL ESASLI YARA ÖRTÜLERİ: TEMEL İLKELER, MALZEMELER VE GÜNCEL GELİŞMELER

Şennur ASMA DELEN¹

1. GİRİŞ

Yara örtüsü, çoğu zaman yaranın üzerini kapatan basit bir malzeme olarak düşünülür. Oysa örtü yara yüzeyine yerleştirildiği andan itibaren sıvıyla, çevre deriyle ve iyileşen dokuyla etkileşime girer. Kimi malzemeler eksüdayı hızla emerken kimileri temas yüzeyinde jel oluşturur; bazıları ise etkin maddeleri kontrollü biçimde serbest bırakır. Üstelik bu özellikler kullanım boyunca aynı kalmayabilir. Sıvıyla temas eden bir örtü şişebilir, esnekliğini kaybedebilir veya emdiği sıvıyı basınç altında yeniden yara yüzeyine bırakabilir. Bu nedenle bir yara örtüsünün başarısı yalnızca başlangıçtaki malzeme özelliklerine bakılarak değerlendirilemez (Kurtoğlu ve Karataş, 2009; Uzun, 2018).

Tekstil malzemelerinin yapısal ve işlevsel çeşitliliği, yara örtülerinin değişen gereksinimlere uygun biçimde geliştirilmesine olanak tanır. Lifin kimyasal yapısı, sıvıyı tutma ve dokuya temas etme biçimini etkiler; liflerin yüzey içinde nasıl düzenlendiği ise gözenekliliği, esnekliği ve dayanımı belirler. Aynı polimerden üretilmiş bir dokuma, örme, dokusuz yüzey veya nanolifli tabaka farklı performans gösterebilir. Bu nedenle

¹ Öğr. Gör. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0001-8706-1188.

yara örtülerinin geliştirilmesinde malzeme seçimi ve tekstil yüzeyinin yapısal tasarımı bir bütün olarak değerlendirilmelidir.

2. YARA İYİLEŞMESİ VE YARA BAKIMININ TEMEL İLKELERİ

2.1. Deri Yapısı, Yara Türleri ve İyileşme Süreci

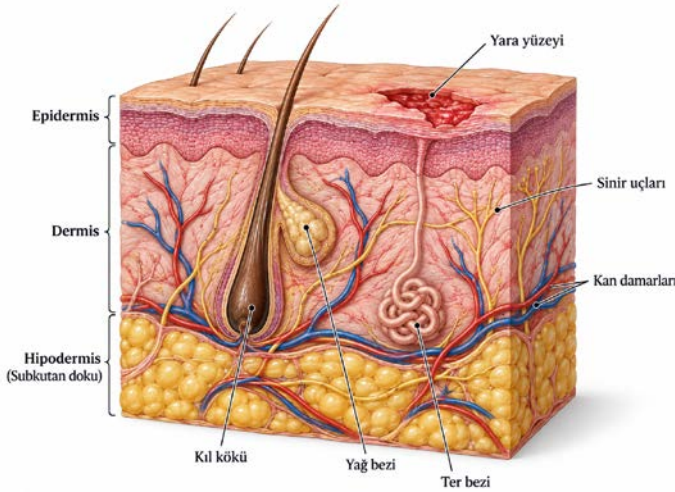
Yara, derinin veya altta bulunan dokuların anatomik ve işlevsel bütünlüğünün çeşitli etkenlerle bozulması sonucu ortaya çıkan doku hasarıdır. Mekanik travmalar, cerrahi girişimler, termal ve kimyasal etkenler ile dolaşım ve metabolizma bozuklukları yara oluşumuna neden olabilir. Deri bütünlüğünün bozulması, koruyucu bariyer işlevinin zayıflamasının yanı sıra inflamatuvar yanıtın başlamasına ve doku onarım süreçlerinin etkinleşmesine yol açar. Yaranın oluşum nedeni, derinliği, bulunduğu anatomik bölge ve bireyin genel sağlık durumu, iyileşme sürecinin seyrini belirleyen temel etkenler arasındadır.

İyileşme seyri bakımından yaralar akut ve kronik olarak değerlendirilebilir. Akut yaralarda iyileşme çoğunlukla öngörülebilir bir biyolojik ilerleyiş izlerken; uzun süre kapanmayan kronik yaralarda inflamasyonun sürmesi, yetersiz perfüzyon, biyoyük ve eşlik eden hastalıklar süreci değiştirebilir. Buna bağlı olarak örtüden beklenen işlev de sabit değildir: iyileşmenin erken evrelerinde kanama ve sıvı yönetimi öne çıkarken sonraki evrelerde yeni oluşan dokunun korunması önem kazanabilir (Larouche vd., 2018).

Yaralar farklı ölçütlerle sınıflandırılır. Açık yaralarda yüzey bütünlüğü bozulmuştur; kapalı yaralarda dış yüzey korunurken alttaki dokularda hasar bulunabilir. Derinlik bakımından yüzeysel ve tam kat yaralar ayrılabilir. Neden açısından travmatik, cerrahi, basınçla ilişkili, venöz, arteriyel veya diyabetle ilişkili yaralar ele alınabilir. Bu sınıflar birbirini

dışlamaz; aynı yara hem derin hem kronik hem de belirli bir dolaşım problemiyle ilişkili olabilir (Dabiri vd., 2016).

Yaranın kendisi kadar önemli bir diğer kavram yara yatağıdır. Yara yatağı; canlı granülasyon dokusu, fibrinli alanlar, nekrotik dokular ve farklı miktarlarda eksüda içerebilir. Aynı yaranın görünümü iyileşmenin farklı dönemlerinde değiştiğinden tek bir örtünün bütün süreç boyunca en uygun seçenek olacağı varsayılmaz. Yara örtüsü seçiminde doku durumu, eksüda düzeyi, çevre derinin korunması, enfeksiyon bulguları ve hastanın eşlik eden klinik sorunları bir arada değerlendirilmelidir (Dabiri vd., 2016; Diegelmann ve Evans, 2004). Derinin temel katmanları, deri ekleri ve yara yüzeyinin bu yapılarla ilişkisi Şekil 1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Derinin temel katmanları, deri ekleri ve yüzeysel yara bölgesinin şematik gösterimi.

Deri, dış çevreyle vücut arasında seçici bir sınır oluşturur. Epidermis yüzeydeki bariyeri sürdürürken, dermis bağ dokusu, damarlar ve hücresel bileşenleriyle yapısal ve biyolojik destek sağlar. Deri altı dokusu ise bu sistemin mekanik ve metabolik çevresine katkıda bulunur. Bu katmanların hasar görmesi,

yalnızca yüzeyde bir açıklık oluşması anlamına gelmez; sıvı kaybı, mikrobiyal giriş, inflamatuvar yanıt ve doku onarımı aynı anda gündeme gelir. Derinin histolojik yapısı ve katmanlar arasındaki biyolojik etkileşim, yara örtüsü tasarımıyla temel referans noktalarıdır (Diegelmann ve Evans, 2004).

Hemostaz evresinde kan kaybının sınırlandırılması ve pıhtı oluşumunun desteklenmesi ön plandadır. Bu evrede yara yüzeyine uyum sağlayabilen ve gerekli durumlarda sıvıyı hızla alan lifli yapılar değerlendirilebilir. Aljinat ve kitosan gibi biyopolimerler hemostatik yara bakım malzemelerinin geliştirilmesinde araştırılmaktadır; ancak bir malzemenin laboratuvar ortamındaki emiciliği, tek başına klinik kanama kontrolü sağladığını kanıtlamaz. Islak dayanım, yara yatağına yapışma ve örtünün çıkarılırken dokuya zarar verme olasılığı da tasarımın parçasıdır.

İnflamasyon evresinde organizma hasarlı alanı temizlemeye ve mikroorganizmaları kontrol altına almaya çalışır. İnflamasyonun tamamen baskılanması değil, uzamış ve dokuya zarar veren yanıtın sınırlandırılması önem taşır. Bu amaçla geliştirilen etkin madde taşıyıcılarında salım hızı ile biyolojik etki birlikte değerlendirilmelidir. M. R. Hossain ve arkadaşlarının (2026) polikaprolakton/jelatin nanoliflere deksametazon yüklediği çalışmada, daha yüksek ilaç yükleme oranı daha güçlü ilk salıma yol açarken hücre canlılığı ve mekanik bütünlük yönünden dezavantajlar ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, işlevsel malzeme tasarımında en yüksek dozun değil, uygun salım profilinin hedeflenmesi gerektiğini göstermektedir.

Proliferasyon evresinde granülasyon dokusu oluşumu, yeni damar gelişimi ve epitel hücrelerinin ilerlemesi belirginleşir. Örtü bu dönemde hassas yeni dokuyu korumalı, yeterli nemi sağlamalı ve gerektiğinde fazla eksüdayı uzaklaştırmalıdır. Lif ve gözenek düzeni sıvının yara yüzeyinden uzaklaşmasını

etkilerken, temas katmanının yapışma davranışı pansuman değişimi sırasında oluşabilecek travmayı belirler. Azam ve arkadaşlarının (2026) iplik aşamasında aljinat hidrojel kaplaması uygulayarak ürettiği dokuma örtü, kaplamanın hangi üretim aşamasında yapıldığının hava geçirgenliği, esneklik ve nem yönetimi üzerinde etkili olabileceğine deneysel bir örnek sunmaktadır. Bununla birlikte bu tür fiziksel performans sonuçları klinik iyileşme üstünlüğü olarak yorumlanmamalıdır.

Yeniden yapılanma evresinde kollajen matriksinin düzenlenmesi ve oluşan dokunun mekanik özelliklerinin olgunlaşması uzun bir süre boyunca devam eder. Yara kapanmış görünse bile yeni dokunun eski derinin bütün özelliklerini kazandığı varsayılmaz. Bu aşamada örtü tasarımında sürtünmeyi azaltma, uygun temas özellikleri ve gerektiğinde çevre derinin korunması önemlidir. Dolayısıyla iyi bir yara örtüsü, dört evren için ayrı ayrı belirlenmiş tek bir ürün değil; yaranın değişen gereksinimlerine göre seçilebilen, özellikleri ölçülmüş ve güvenliği değerlendirilmiş bir malzeme sistemidir.

2.2. Yara Mikroçevresi, Eksüda Yönetimi ve Örtü Seçimi

Yara bakımı, yarayı temizlemek ve üzerini kapatmakla sınırlı değildir. İlk adım, hasarın nedenini ve iyileşmeyi engelleyen etkenleri anlamaktır. Basınç nedeniyle oluşan hasarda basıncın sürmesi, dolaşım bozukluğunda dokunun yeterince beslenememesi veya diyabetle ilişkili yarada metabolik ve nörovasküler sorunlar, örtünün sağlayabileceği yararı sınırlar. Bu nedenle etkili bakım, hastaya ait koşullarla yara yatağını birlikte ele alan bir değerlendirmeye dayanır (National Institute for Health and Care Excellence, 2020).

Yara temizliğinin amacı, iyileşmeyi destekleyen dokuyu gereksiz yere zedelemekten, kir, yabancı bileşenler ve uygun biçimde uzaklaştırılabilecek artıkların yönetilmesidir. Temizleme

ile antiseptik uygulama aynı işlem değildir. Yara tipine uygun yöntem ve sıvının seçilmesi, dokuya zarar verebilecek uygulamalardan kaçınılması ve bakım sırasında kontaminasyonun sınırlandırılması önemlidir. Klinik bakımda yöntem, yaranın durumuna ve yetkin sağlık profesyonelinin değerlendirmesine göre belirlenir (Dabiri vd., 2016).

Nemli yara ortamı, yaranın ıslak bırakılması anlamına gelmez. Az eksüdalı yarada yüzeyin kurumasını sınırlamak gerekirken yoğun eksüdalı yarada fazla sıvının tutulması ve çevre deride maserasyonun önlenmesi önemlidir. Bu yüzden yara yatağında uygun nem dengesini sağlamak, tek bir emicilik değerinden çok örtünün kullanım sırasındaki davranışına bağlıdır (Azam vd., 2026).

Eksüda, yara bölgesinden çıkan ve bileşimi yaraya göre değişen sıvıdır. Bu sıvının yönetimi, yalnızca hacim üzerinden ele alınmamalıdır. Sıvının örtüye giriş hızı, yapı içinde dağılma biçimi, basınç altında tutulması ve buharlaşarak uzaklaşan bölümü bir arada önem taşır. Aynı toplam emme kapasitesine sahip iki örtüden biri sıvıyı daha hızlı alabilir, diğeri ise emdiği sıvıyı daha iyi tutabilir. Yara çevresinin korunması açısından bu iki özelliğin klinik anlamı farklıdır (Dabiri vd., 2016; Uzun, 2018).

Su buharı aktarımı, sıvı yönetiminin başka bir bileşenidir. Bir dış film sıvı geçişini sınırlarken belirli ölçüde buhar geçişine izin verebilir. Bununla birlikte bütün yaralar için geçerli tek bir ideal buhar aktarım değeri yoktur. Uygun denge, eksüda miktarı, örtünün emici kapasitesi, kalınlığı, dış ortam koşulları ve ölçüm yöntemine bağlıdır. Farklı çalışmalardaki değerler, deney sıcaklığı ve bağlı nem gibi koşullar açıklanmadan doğrudan karşılaştırılmamalıdır (Kurtoğlu ve Karataş, 2009).

3. YARA ÖRTÜLERİNİN GELİŞİMİ VE SINIFLANDIRILMASI

3.1. Gelenekselden Modern Yara Örtülerine

Yara örtülerinin tarihi, insanların yarayı dış çevreden koruma ve iyileşmesini destekleme çabalarının tarihidir. Eski uygarlıklarda dokuma parçaları, yağlar, reçineler, bal ve bitkisel karışımlar kullanılmıştır. Bu uygulamalar gözleme ve deneyime dayanıyor, malzemenin neden işe yaradığı her zaman biyolojik olarak açıklanamıyordu. Tarihsel kaynaklar ve paylaşılan eğitim metinleri, temizleme, yüzeye bir madde uygulama ve örtme işlemlerinin erken dönemlerden beri birlikte düşünüldüğünü göstermektedir (Uzun, 2018).

On dokuzuncu yüzyılda mikroorganizmaların hastalık ve enfeksiyonlarla ilişkisinin anlaşılması, yara bakımında antisepsi ve hijyen düşüncesini güçlendirdi. Örtünün görevi bu bağlamda dış kontaminasyonu sınırlama ve bakım sırasında güvenli bir koruma sağlama yönünde gelişti. Tekstil malzemeleri; biçimlendirilebilirlikleri, erişilebilirlikleri ve sıvıyla etkileşimleri sayesinde bu uygulamalarda önemli bir yere sahip oldu. Ancak bu tarihsel gelişim, bütün eski uygulamaların günümüzde geçerli olduğu anlamına gelmez (Dabiri vd., 2016).

Yirminci yüzyılın ikinci yarısındaki önemli değişimlerden biri, yara yüzeyini kuru tutma yaklaşımının yerine uygun nem dengesini destekleyen anlayışın güçlenmesidir. Winter'ın 1962 yılında genç evcil domuzların yüzeyel yaralarını değerlendirdiği çalışması, bu alandaki temel deneysel dönüm noktalarından biridir (Winter, 1962). Sonraki araştırmalar ve geliştirilen polimerik sistemler, örtünün yarayı kapatmanın yanında mikroçevreyi düzenleyebilmesini daha görünür hale getirdi (Winter, 1962; Dabiri vd., 2016).

Tablo 1. Yara örtülerinin gelişiminde başlıca yaklaşım değişiklikleri

Dönem	Öne çıkan yaklaşım	Tasarım açısından anlamı
Erken uygarlıklar	Dokuma parçaları ve doğal karışımlarla örtme	Dış çevreden korunma ve yüzey uygulaması
19. yüzyıl	Mikroorganizma bilgisi ve antisepsi	Kontaminasyonun sınırlandırılması
1962 ve sonrası	Nemli iyileşmeye ilişkin deneysel kanıt	Kuruma ve aşırı nem arasında denge
20. yüzyılın sonu	Film köpük hidrojel ve jelleşen lifler	Farklı yaralara farklı sıvı yönetimi
Yeni nesil araştırmalar	Nanolif kompozit ve etkin madde taşıma	Yapı ile biyolojik işlevin birlikte tasarımı

3.2. Başlıca Yara Örtüsü Türleri ve İşlevsel Özellikleri

Günümüzde yara bakımında kullanılan başlıca yara örtüsü türleri Şekil 2’de genel hatlarıyla gösterilmiştir.



Şekil 2. Yaygın olarak kullanılan başlıca yara örtüsü türleri.

Şekil 2’de görüldüğü gibi bu ürünler görünüş bakımından birbirinden ayrılabilse de asıl belirleyici olan özellik, kullanıldıklarında sıvıyla ve yara yatağıyla nasıl etkileştikleridir. Örneğin film örtüler ince ve şeffaf bir bariyer sağlarken, köpük ve hidrofiber yapılar emicilik açısından öne çıkar. Silikon temas tabakaları ise özellikle hassas granülasyon dokusunu koruma ve daha ağrısız pansuman değişimi sağlama amacıyla tercih edilmektedir.

Tablo 2. Başlıca yara örtüsü türleri, temel özellikleri ve uygun kullanım durumları

Örtü türü	Temel özellik	Başlıca avantaj	Sınırlılık / dikkat noktası	Uygun kullanım durumu
Gazlı bez	Lifli geleneksel örtü	Erişilebilir; taşıyıcı	Yapışma; nem sınırı	Geçici/ikincil
Film örtü	Yarı geçirgen film	Şeffaf bariyer	Az emici	Az eksüdalı
Hidrokolloid	Jelleşen örtü	Nemli ortam	Yoğun eksüda dikkat	Seçilmiş yüzeyel
Hidrojel	Su içeren jel	Kuru yatağı nemlendirir	Düşük emicilik	Kuru/fibrinli
Köpük örtü	Gözenekli emici	Eksüda ve yastıklama	Doygunluk izlenmeli	Orta-çok eksüdalı
Aljinat	Jelleşen lif	Emicilik; hemostaza katkı	Kuru yaraya uygun değil	Çok eksüdalı
Hidrofiber	Yüksek emici lif	Sıvıyı yapı içinde tutar	İkincil örtü gerekebilir	Orta-çok eksüdalı
Silikon temas örtüsü	Düşük yapışmalı tabaka	Dokuya nazık temas	Tek başına az emici	Hassas doku
Antimikrobiyal örtü	Etkin bileşenli örtü	Biyoyük yönetimi	Rutin/süresiz değil	Seçilmiş enfeksiyon
Kollajen örtü	Protein esaslı yapı	Matriks desteği	Maliyet/kanıt değişken	Seçilmiş kronik

4. TEKSTİL ESASLI YARA ÖRTÜLERİNDE MALZEME VE YÜZEY TASARIMI

Tekstil esaslı yara örtüleri yalnızca lifli yapılardan oluşmak zorunda değildir; farklı işlevler üstlenen tekstil ve

polimerik bileşenlerin bir araya getirildiği çok katmanlı sistemler olarak da tasarlanabilir. Örneğin yara ile temas eden katman ağ yapılı bir tekstil yüzeyinden, orta katman emici bir dokusuz yüzeyden, dış katman ise polimerik bir film den oluşabilir. Bu tür bir düzenlemede tekstil bileşenleri sıvı iletimi ve mekanik destek sağlarken, dış film sıvı ve su buharı geçişinin düzenlenmesine katkıda bulunur. Dolayısıyla film ve hidrojel gibi yapıların tekstil esaslı yara örtüleriyle birlikte değerlendirilmesi, bu ürünlerin katmanlar arasındaki işlevsel ilişkilerinin anlaşılmasını sağlar (Kurtoglu ve Karataş, 2009).

4.1. Lif ve Polimer Seçimi

Tekstil esaslı yara örtülerinde lif ve polimer seçimi, malzemenin biyolojik kökeni veya kimyasal bileşimi kadar yara ortamındaki davranışıyla da ilişkilidir. Kullanılan malzemenin sıvıyla etkileşimi, mekanik bütünlüğünü koruyabilmesi, işlenebilirliği ve gerektiğinde işlevsel bileşenleri taşıyabilmesi, son ürünün kullanım özelliklerini belirler. Bu açıdan doğal ve biyolojik kökenli polimerler önemli olanaklar sunmakla birlikte, her malzemenin kendine özgü üstünlükleri ve sınırlılıkları bulunmaktadır.

Selüloz esaslı malzemeler, yara bakımında uzun süredir kullanılan lifli yapıların temel bileşenleri arasındadır. Pamuk, hidrofilik karakteri ve sıvıyla etkileşimi sayesinde geleneksel pansuman malzemelerinde yaygın biçimde değerlendirilirken, selüloz türevleri daha farklı işlevlerin kazandırılmasına olanak tanır. Örneğin karboksimetilselüloz, sıvıyla temas ettiğinde jel oluşturabilen yapısıyla eksüda yönetiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte pamuklu veya selüloz esaslı bir yüzeyin davranışı yalnızca hammaddenin özelliklerine bağlı değildir; liflerin işlenme biçimi, iplik yapısı, yüzey konstrüksiyonu ve uygulanan bitim işlemleri de ürünün kullanım performansını etkiler (Uzun, 2018).

Selülozik malzemelerde öne çıkan sıvı yönetimi işlevi, aljinat gibi jel oluşturabilen diğer polisakkaritlerde farklı mekanizmalarla sağlanmaktadır. Kahverengi alglerden elde edilen aljinatın kalsiyum tuzları, yara eksüdasıyla temas ettiğinde iyon değişimi ve hidrasyon sonucunda jel oluşturabilir. Bu özellik, sıvının yapı içine alınmasına ve yara ile temas eden yüzeyin yumuşamasına katkıda bulunur. Ancak polimer bileşimi ve iyonik yapıdaki farklılıklar nedeniyle aljinat esaslı ürünlerin şişme kapasitesi, jel bütünlüğü ve kullanım sırasındaki dayanımı aynı değildir (Dabiri vd., 2016).

Polisakkarit temelli yara örtülerinde değerlendirilen bir diğer malzeme olan kitosan ise kitinin deasetilasyonu yoluyla elde edilmektedir. Amino grupları içeren kimyasal yapısı sayesinde film, hidrojel ve nanolif sistemlerinde kullanılabilen kitosanın özellikleri; molekül ağırlığı, deasetilasyon derecesi ve ortam pH'sına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle kitosan esaslı sistemlerde yalnızca biyolojik özelliklere değil, malzemenin işlenebilirliğine ve yara ortamındaki kararlılığına da dikkat edilmelidir. Aljinat ve kitosanın birlikte kullanıldığı hidrojel kompozitleri, farklı polimerlerin özelliklerinden yararlanılarak çok işlevli yapıların geliştirilebileceğini göstermektedir. Nitekim Salman ve arkadaşlarının (2025) çalışmasında, aljinat–kitosan hidrojel bileşimi ile taşıyıcı dokusuz yüzey özelliklerinin sıvı yönetimi ve mekanik davranış üzerinde birlikte etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Polisakkaritlerin yanı sıra protein esaslı malzemeler de yara örtüsü tasarımında farklı işlevler üstlenebilmektedir. Kolajen, keratin ve ipek fibroini gibi proteinler, yapısal ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak lif, film veya kompozit sistemlerin geliştirilmesinde değerlendirilmektedir. Bu malzemelerin önemi yalnızca biyolojik kökenlerinden değil, farklı üretim yöntemleriyle işlevsel yapılara dönüştürülebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin kolajenin

yaş çekim yöntemiyle lif formuna getirilmesi, protein esaslı malzemelerin dokuma yüzeylerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Gorman ve arkadaşlarının (2025) kolajen liflerine bromotimol mavisi ekleyerek geliştirdiği pH duyarlı yapı, bu yaklaşımın yara ortamındaki değişimlerin görsel olarak izlenmesine yönelik potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte böyle bir malzemenin renk değişimine yanıt vermesi, enfeksiyonu klinik koşullarda güvenilir biçimde tanılayabildiği anlamına gelmemektedir.

Protein esaslı malzemelerin kullanımında dikkat çeken bir diğer yaklaşım, tekstil atıklarının yeniden değerlendirilmesidir. Yün keratini ve ipek fibroininin geri kazanılarak film esaslı yara örtülerinde kullanılması, işlevsel malzeme geliştirme ile kaynakların daha verimli kullanımını bir araya getiren bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Ottaviano ve arkadaşlarının (2025) derlemesinde bu malzemeler; biyoyumluluk, işlenebilirlik, hücresel etkileşim ve fonksiyonelleştirme olanakları bakımından ele alınmaktadır. Ancak geri kazanılmış hammaddelerin kullanılması, nihai ürünün kendiliğinden güvenli veya çevresel açıdan üstün olduğu anlamına gelmez. Kimyasal işlem kalıntıları, hammaddeler arasındaki değişkenlik, sterilizasyon sonrası kararlılık ve biyolojik güvenlik gibi özelliklerin ayrıca değerlendirilmesi gerekir.

Selüloz, aljinat, kitosan ve protein esaslı polimerlerin farklı özellikleri, yara örtüsü tasarımında tek bir malzemenin bütün gereksinimleri karşılamasının her zaman mümkün olmadığını göstermektedir. Hidrofilik bir bileşen sıvı alımını desteklerken ıslak mekanik dayanım açısından ek desteğe ihtiyaç duyabilir; biyolojik işlevi öne çıkan bir polimer ise uygun bir taşıyıcı yapı olmadan istenen kullanım özelliklerini sağlayamayabilir. Bu nedenle malzeme seçimi, polimerlerin tekil özelliklerinden çok, birbirleriyle ve tekstil yüzeyiyle oluşturdukları işlevsel bütünlük üzerinden değerlendirilmelidir.

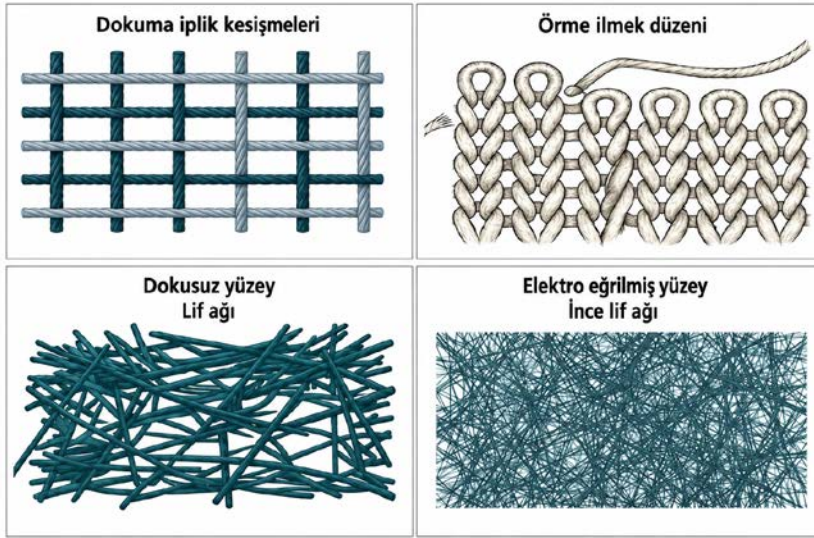
4.2. Tekstil Yüzeylerinin Oluşturulması

4.2.1. Dokuma ve Örmeye Yapılar

Dokuma yapılarında çözgü ve atkı ipliklerinin sıklığı, numarası ve örgü düzeni gözenek açıklığını, kalınlığı, esnekliği ve sıvı geçiş yollarını etkiler. Sıklığın artırılması yüzey bütünlüğünü destekleyebilirken geçirgenliği sınırlandırabilir; daha hacimli iplikler emici lif miktarını artırsa da yüzey pürüzlülüğünü değiştirebilir.

Kaplamanın uygulandığı üretim aşaması da yüzey performansını etkileyebilir. Azam ve arkadaşları (2026), pamuklu kumaşı doğrudan hidrojel ile kaplamak yerine pamuk ipliğini aljinat hidrojel ile kapladıktan sonra dokuma yüzeyi oluşturmuş; iplikten kaplama yaklaşımının doğrudan kumaş kaplamasına göre hava geçirgenliği, nem tutma ve esneklik bakımından avantaj sağladığını bildirmiştir. Bu sonuç, tekstil mimarisinin fonksiyonel bir bileşeni taşımaktan öte onun kullanılabilir performansını belirlediğini göstermektedir. Çalışmada bildirilen 407,4 N çekme kuvveti, 696 mm/s hava geçirgenliği ve %420 eksüda emme değeri, söz konusu örnek ve deney koşullarına özgüdür; farklı ürünler için genel bir klinik eşik olarak yorumlanmamalıdır.

Örmeye yapılarında ilmek uzunluğu, ilmek sıklığı ve örgü düzeni esneme, dökümlülük, gözenek açıklığı ve boyutsal kararlılık arasında bir denge oluşturur. Daha açık bir yapı sıvının emici üst katmana aktarımını kolaylaştırabilir; ancak temas yüzeyinin bütünlüğü ve mekanik koruma ayrıca değerlendirilmelidir. Sık bir ilmek düzeni ise temas alanını ve birim alan kütlelerini değiştirebilir. Dolayısıyla dokuma ve örmeye yüzeylerin performansı yalnızca konstrüksiyon farklılıklarıyla açıklanamaz; iplik özellikleri, yüzey gramajı, uygulanan işlemler ve kullanım amacı birlikte değerlendirilmelidir. Yapıların kavramsal farkları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dokuma, örme, dokusuz yüzey ve elektro-eğrilmiş nanolif ağının kavramsal gösterimi.

Örme yapılar için 2026 yılında yayımlanan bir araştırma, bambu esaslı tekstil yüzeyinin balık pulu kaynaklı kolajen, nanoselüloz ve bitkisel ekstraktlarla işlevselleştirilmesini incelemiştir. Hossain ve arkadaşları (2026), bitim işlemi sonrasında su buharı geçişinde, başlangıç ıslanma davranışında ve mekanik özelliklerde değişim rapor etmiş; *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* üzerinde antibakteriyel aktivite gözlemlemiştir. Bu bulgular sürdürülebilir hammaddelerin çok işlevli tasarımlara dâhil edilebileceğini göstermektedir; bununla birlikte laboratuvar temelli antimikrobiyal performans, tek başına insanlarda daha hızlı yara iyileşmesi kanıtı değildir.

4.2.2. Dokusuz Yüzeyler ve Elektro-Eğrilmiş Nanolifler

Dokusuz yüzeyler, liflerin iplik hâline getirilmesine gerek duyulmadan oluşturulan lif tülentlerinin mekanik, kimyasal veya termal yöntemlerle bağlanması sonucunda elde edilen tekstil yüzeyleridir. Bu yapılarda lif inceliği, liflerin yönlenmesi ve

yerleşimi, birim alan kütlesi, kalınlık ve bağlama yöntemi; gözeneklilik, sıvı emme ve iletim özellikleri ile mekanik dayanımı doğrudan etkiler. Bu nedenle dokusuz yüzeylerin yara örtülerindeki performansı, kullanılan lif hammaddesinin yanı sıra yüzeyin yapısal özellikleri ve uygulanan fonksiyonel işlemlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Dokusuz yüzeylerin işlevsel özellikleri, hidrojel gibi polimerik bileşenlerle birleştirilmeleri yoluyla geliştirilebilir. Bu yaklaşımda lifli yapı mekanik destek ve sıvı taşınımı sağlarken hidrojel bileşeni, yüzeyin sıvıyla etkileşimini değiştirebilir. Atık pamuk esaslı dokusuz yüzeylerin aljinat/kitosan hidrojel ile birleştirildiği bir çalışmada, yüzey gramajı ve işlevsel bileşimin emicilik, hava geçirgenliği ve mekanik davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Neem (*Azadirachta indica*) özütü içeren deney grubunda %420 eksüda emiciliği, zerdeçal içeren farklı bir bileşimde ise 0,45 genel nem yönetim kapasitesi rapor edilmiştir (Salman vd., 2025). Bununla birlikte bu sonuçlar, farklı bileşim ve deney koşullarına ait olduğundan tek başına ürün üstünlüğünün veya klinik etkinliğin göstergesi olarak değerlendirilmemelidir.

Dokusuz yüzeylerde geri kazanılmış liflerin kullanımı, işlevsel tasarımın yanı sıra hammaddelerin daha verimli değerlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır. Ancak atık pamuk gibi geri kazanılmış malzemelerin çevresel yararı yalnızca yeniden kullanılmalarına bağlı değildir. Islak kullanım dayanımı, sterilizasyon kararlılığı, olası işlem kalıntıları ve üretimin ölçeklenebilirliği de dikkate alınmalıdır. Benzer şekilde laboratuvar düzeyinde biyobozunurluk gösterilmesi, nihai ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu kanıtlamaz (Ottaviano vd., 2025).

Lifli yüzeylerin yara örtülerinde kullanımına yönelik bir diğer önemli yaklaşım, elektro-eğirme yöntemiyle çok ince

liflerden oluşan ağ yapıların üretilmesidir. Elektro-eğirme, elektrik alan etkisi altında bir polimer çözeltisinden veya uygun bir polimer sisteminden ince liflerin oluşturulmasına dayanır. Çözelti derişimi, viskozite, iletkenlik, uygulanan gerilim, besleme hızı ve toplayıcıya olan uzaklık lif oluşumunu etkileyen başlıca değişkenlerdir. Bu parametrelerin uygun biçimde düzenlenmesi, boncuk oluşumunun sınırlandırılması ve lif çapı dağılımının kontrol edilmesi açısından önemlidir. Yöntemin yara örtüsü üretimindeki kullanım olanakları, özellikle polimer seçimi ve ilaç taşıma sistemleriyle ilişkili olarak literatürde ele alınmaktadır (Tort ve Acartürk, 2015).

Elektro-eğrilmiş nanolifli yüzeylerin geniş özgül yüzey alanı ve gözenekli yapısı, etkin maddelerin taşınması ve salım davranışının düzenlenmesi bakımından çeşitli olanaklar sunar. Bununla birlikte etkin maddenin liflerin içinde veya yüzeyinde bulunması, salımın başlangıç hızını ve zaman içindeki dağılımını değiştirebilir. Polikaprolakton/jelatin nanoliflerine farklı oranlarda deksametazon yüklenen bir araştırmada, yüksek ilaç yükleme oranının yüzey kristalleşmesini ve hızlı başlangıç salımını artırabildiği; daha düşük yükleme düzeyinin ise hücre canlılığı ve mekanik özellikler bakımından daha dengeli sonuçlar verdiği bildirilmiştir (M. R. Hossain vd., 2026). Bu bulgular, etkin madde miktarının artırılmasının her zaman daha başarılı bir yara örtüsü elde edilmesini sağlamadığını göstermektedir.

Etkin madde taşıyan nanolifli sistemlerin değerlendirilmesinde yalnızca toplam yükleme miktarı değil, başlangıç salımı, devam eden difüzyon davranışı, etkin maddenin lif içindeki dağılımı ve biyolojik etkileri birlikte incelenmelidir. Ayrıca yüksek özgül yüzey alanı, sulu ortamda yeterli mekanik bütünlüğün kendiliğinden sağlanacağı anlamına gelmez. Özellikle suya duyarlı polimerlerde çapraz bağlama, polimer karışımı oluşturma veya lifler arasındaki bağların güçlendirilmesi gerekebilir. Ancak bu işlemler de gözenek yapısını, şişme

davranışını ve etkin madde salımını değiştirebilir. Bu nedenle nanolifli yara örtülerinde kuru durumdaki lif morfolojisinin yanı sıra sıvıyla temas sonrasındaki yapısal kararlılık, mekanik dayanım ve hücresel yanıtın değerlendirilmesi önemlidir. Deksametazon yüklü nanoliflerde bildirilen hücre kültürü sonuçları ve makrofaj belirteçleri bu açıdan değerli olmakla birlikte, insanlarda daha hızlı yara kapanmasının doğrudan kanıtı olarak yorumlanmamalıdır (M. R. Hossain vd., 2026).

Etkin madde salımının daha kontrollü biçimde düzenlenmesi amacıyla nanoliflerin iç yapısı da değiştirilebilmektedir. Bu kapsamda koaksiyel elektro-eğirme, iki farklı çözeltinin eş eksenli bir düzenek üzerinden beslenmesiyle çekirdek ve kabuk bölgelerinden oluşan liflerin üretilmesine olanak tanır. Çekirdek-kabuk yapısı, etkin maddenin dış ortamla temasını ve difüzyon yolunu değiştirmek için kullanılabilir. Bununla birlikte kabuk kalınlığı, polimerlerin çözünürlüğü ve lif yapısındaki kusurlar salım davranışını etkilediğinden bu mimari tek başına kontrollü salımı garanti etmez. Dolayısıyla koaksiyel liflerin tasarımında da sulu ortamda yapısal bütünlük, etkin madde salımı ve hücre uyumluluğu birlikte değerlendirilmelidir.

4.3. Hidrojeller, Filmler ve Çok Katmanlı Sistemler

Hidrojeller su tutan polimer ağları, filmler ise yara yüzeyi ile dış ortam arasındaki madde geçişini düzenleyen tabakalar olarak farklı işlevler üstlenebilir. Hidrojinin şişme ve bütünlük davranışı polimer bileşimine ve çapraz bağlanmaya; filmin su buharı aktarımı ise malzeme kimyasına, kalınlığa ve üretim koşullarına bağlıdır. Köpüklerde hücre boyutu ve bağlantılılık eksüda alımı ile sıvı tutma davranışını etkiler. Bu sistemlerin lifli taşıyıcılarla birleştirilmesi, mekanik destek ve sıvı yönetiminin farklı katmanlar arasında paylaşılmasına olanak verir (Kurtoglu ve Karataş, 2009; Dabiri vd., 2016).

Çok katmanlı örtülerde temel tasarım sorunu, farklı katmanların görevlerini birbiriyle uyumlu biçimde yerine getirmesidir. Temas tabakasından emici gövdeye sıvı geçişi ve dış filmin buhar aktarımı birlikte düzenlenmediğinde katmanların tek tek iyi performans göstermesi yeterli olmayabilir (Dabiri vd., 2016; Uzun, 2018).

5. FONKSİYONEL VE YENİ NESİL YARA ÖRTÜLERİ

5.1. Antimikrobiyal Özellikler ve Biyolojik Güvenlik

Antimikrobiyal örtü kullanımı her kolonize yara için otomatik bir gereklilik değildir. Birleşik Krallık Ulusal Sağlık ve Bakım Mükemmelliği Enstitüsünün (NICE, 2020) rehberi, bacak ülserlerinde antibiyotik kullanımını klinik enfeksiyon bulgularıyla ilişkilendirir. Örtülerin de hastanın genel durumu ve yara yatağındaki bulgular değerlendirilerek seçilmesi gerekir.

Yarayı dış mikroorganizmalardan koruyan fiziksel bariyer ile mikroorganizmaların canlılığını veya çoğalmasını azaltan antimikrobiyal etki farklı işlevlerdir. Bir yüzey, yeterli bütünlük sağladığında dış girişin sınırlandırılmasına katkıda bulunabilir; ancak antimikrobiyal bir bileşen içermeyebilir. Etkin madde içeren bir yüzey ise belirli test koşullarında bakterilere karşı etki gösterebilir, fakat bütünlüğü bozulduğunda yeterli fiziksel koruma sağlayamayabilir. İki işlevin ayrı doğrulanması gerekir (Dabiri vd., 2016; Uzun, 2018).

5.2. Kontrollü Salım ve Biyoaktif Bileşenler

Elrys ve arkadaşları (2026), polyester/pamuk karışımı kumaşlarda tarımsal atık kökenli karboksimetilselüloz ve yün atığından elde edilen keratin matriksleri kullanarak amoksisilin ve zencefil ekstraktının kontrollü salımını incelemiştir. Çalışmada başlangıçtaki hızlı salımı izleyen ve 12 saate kadar

devam eden salım davranışı rapor edilmiştir. Bu sonuç, kumaş bileşimi ile polimer konsantrasyonunun yalnızca tutulan ilaç miktarını değil, salımın zaman içindeki dağılımını da etkileyebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte laboratuvar düzeyindeki antimikrobiyal aktivite, antibiyotik içeren bir örtünün rutin klinik kullanımı için tek başına yeterli gerekçe değildir. Doz güvenliği, direnç seçilimi, uzun dönem kararlılık, sterilizasyon ve düzenleyici gereklilikler ayrıca ele alınmalıdır. Bitkisel ekstraktlarda da bileşim farklılığı ve parti tekrarlanabilirliği önem taşır (Elrys vd., 2026; Salman vd., 2025).

Bal, propolis, bitki ekstreleri ve kurkumin gibi bileşenler, antimikrobiyal veya biyolojik yanıtı düzenleyici özellikleri nedeniyle yara örtüsü araştırmalarında değerlendirilmektedir. Bu maddelerin doğal kökenli olması, bileşimlerinin sabit ya da biyolojik etkilerinin koşulsuz güvenli olduğu anlamına gelmez. Kaynak türü, toplama koşulları, ekstraksiyon yöntemi ve depolama bileşimi değiştirebilir. Bu nedenle doğal etkin maddeli bir ürünün tekrar üretilebilirliği, yalnızca örtünün üretim aşamasına değil, ekstraktın standardizasyonuna da bağlıdır (Mirzaei vd., 2016).

Sarhan ve arkadaşları (2016), bal, kitosan ve polivinil alkol içeren nanolifleri *Allium sativum* ve *Cleome droserifolia* ekstreleriyle birleştirmiştir. Antimikrobiyal etkinlik, hücre kültürü yanıtı ve ön hayvan deneyleri birlikte değerlendirilmiştir. Araştırmada farklı bakterilerde aynı düzeyde etki görülmemesi, “doğal antibakteriyel örtü” ifadesinin hangi mikroorganizma ve test koşulu için kullanıldığının açıklanması gerektiğini gösterir. Bir bileşenin tek bir bakteriye karşı güçlü etkisi, geniş bir klinik enfeksiyon yelpazesindeki başarısını kanıtlamaz.

Etkin bir bileşenin yara örtüsünde bulunması, o bileşenin yara yatağına istenen miktarda ve sürede ulaşacağını göstermez.

Salımın değerlendirilmesinde toplam yükleme miktarının yanı sıra ilk hızlı salım, daha sonraki difüzyon davranışı ve malzemenin ıslak ortamda kararlılığı izlenmelidir. M. R. Hossain ve arkadaşları (2026), deksametazon içeren polikaprolakton/jelatin nanoliflerde yüksek yükleme düzeyinde yüzey kristalleşmesi ve belirgin başlangıç salımı gözlemiş; orta düzeyde yüklemenin hücre uyumluluğu ile salım arasında daha elverişli bir denge sağlayabildiğini bildirmiştir. Bu sonuçlar, salım tasarımının yalnızca daha fazla etkin madde eklemekten ibaret olmadığını gösterir.

5.3. Akıllı Yara Örtüleri ve Güncel Teknolojik Yaklaşımlar

Akıllı yara örtüleri, yara bölgesindeki bir fiziksel veya kimyasal değişimi algılayıp bunu ölçülebilir bir yanıtla dönüştürmeyi hedefler. Wang ve arkadaşları (2025), tekstil benzeri geometrisi olan bir jel örtüde basınç izleme özelliğini antimikrobiyal ve biyolojik işlevlerle birleştirmiştir. Gorman ve arkadaşları (2025) ise renk değiştiren kolajen lifleriyle pH temelli görsel izlemeyi araştırmıştır. İki yaklaşımın klinik soruları aynı değildir: biri mekanik baskıyı izlemeyi, diğeri yara ortamındaki pH değişimini görünür kılmayı amaçlar.

Alves ve arkadaşları (2025), prodigiosin biyopigmentinin tekstil boyama ve baskı süreçlerindeki antimikrobiyal ve halokromik özelliklerini göstermiştir. Ancak bir yüzeyin pH'a yanıt vermesi, belirli bir yarada enfeksiyonu tek başına tanımlayabildiğini kanıtlamaz. Terleme, dış sıvılar, pansuman bileşimi ve ölçüm koşulları da sinyali etkileyebilir. Akıllı örtülerde analitik duyarlılık kadar yanlış yorumlama riski, hasta güvenliği ve klinik doğrulama önemlidir.

6. TEKSTİL ESASLI YARA ÖRTÜLERİNİN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

6.1. Fiziksel, Mekanik ve Fonksiyonel Performans

Yara örtüsünün performansı, kullanım amacı ve yaranın özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Emicilikte alınan sıvı miktarı, emme hızı ve basınç altında geri salım birbirinden farklı ölçütlerdir. Hava geçirgenliği ile su buharı aktarımı da aynı özelliği ifade etmez; numune kalınlığı, gramaj, nem ve deney yöntemi sonuçları değiştirebilir. Çekme ve uzama ölçümlerinin kuru durum yanında ıslak kullanım koşullarında da değerlendirilmesi önemlidir. Bu nedenle farklı araştırmalarda bildirilen sayısal sonuçlar, birimleri ve deney koşulları eşdeğer olmadıkça doğrudan üstünlük sıralamasına dönüştürülmemelidir (Azam vd., 2026; Salman vd., 2025).

6.2. Biyolojik Değerlendirme ve Klinik Uygulamaya Geçiş

Malzeme performansının doğrulanmasında her test farklı bir soruya yanıt verir: mikroskopi ve kimyasal analiz yapı ile bileşimi, fiziksel ve mekanik deneyler kullanım koşullarındaki davranışı, salım deneyleri etkin maddenin zamana bağlı aktarımını ortaya koyar. Antimikrobiyal testler belirli mikroorganizmalar ve deney koşullarındaki etkiyi gösterirken hücre deneyleri biyolojik uyuma ilişkin ayrı bilgi sağlar. Hayvan deneyleri ve klinik çalışmalar da birbirinin yerine geçmez. Sterilizasyon sonrasında yapının, emiciliğin ve etkin maddenin değişip değişmediği ayrıca incelenmelidir. Böylece ‘yüksek emici’ veya ‘biyouyumlu’ gibi nitelermeler, belirtilmiş koşullarda elde edilen karşılaştırılabilir sonuçlara dayanabilir (Dabiri vd., 2016; M. R. Hossain vd., 2026).

7. GÜNCEL SINIRLILIKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Yeni nesil yara örtülerinde akıllı izleme, işlevsel malzemelerin üretilebilirliğiyle birlikte değerlendirilmelidir. Wang ve arkadaşları (2025) basınç algılayan tekstil benzeri hidrojel yapısını araştırmış; ancak sensörlerin klinik uygulamaya geçişinde kalibrasyon, hareket ve sıvı kaynaklı girişimler ile hasta güvenliği önemini korumaktadır. Tekstil mühendisliği açısından diğer temel sorunlar; lif ve kaplama bileşiminde parti tekrarlanabilirliği, prosesin ölçeklenebilirliği, ıslak dayanım, sterilizasyon sonrası kararlılık ve katmanların birlikte çalışmasıdır. Atık kökenli veya biyobozunur bileşenlerin kullanımı da tek başına düşük çevresel etki anlamına gelmez; işlem girdileri ve kullanım sonrası koşullar birlikte değerlendirilmelidir. Gelecek araştırmaların karşılaştırılabilir deney koşullarına, üretim ölçeğindeki kararlılığa ve klinik gereksinimlerle uyuma odaklanması bu nedenle önem taşımaktadır.

8. SONUÇ

Paylaşılan çalışmaların birlikte değerlendirilmesi, güçlü bir örtü tasarımının tek bir performans ölçütüne dayanamayacağını göstermektedir. Sıvının alınması kadar tutulması, etkin maddenin bulunması kadar uygun biçimde erişilebilir olması, antibakteriyel etkinlik kadar hücre güvenliği ve kuru dayanım kadar ıslak bütünlük önemlidir. Benzer biçimde iyi bir mikroskop görüntüsü, olumlu bir hücre testi veya hayvanlarda hızlanan yara kapanması, insanlardaki klinik başarıyla aynı kanıt düzeyini oluşturmaz.

Bu nedenle yeni yara örtülerinin geliştirilmesinde başlangıç sorusu, hangi malzemenin daha yenilikçi olduğu yerine hangi yara gereksiniminin karşılanacağı olmalıdır. Gereksinim

açıkça tanımlandığında malzeme seçimi, yüzey yapısı, katman düzeni ve doğrulama yöntemleri birbiriyle tutarlı hale gelir. Tekstil mühendisliğinin bu alandaki katkısı, biyolojik açıdan yararlı bir bileşeni uygun bir taşıyıcıya yerleştirmekle birlikte, o bileşenin yara ortamında güvenilir biçimde çalışmasını sağlayan yapıyı tasarlamaktır.

KAYNAKÇA

- Alves, C., Soares-Castro, P., Fernandes, R. D. V., Pereira, A., Rodrigues, R., Fonseca, A. R.,... Zille, A. (2025). Application of prodigiosin extracts in textile dyeing and novel printing processes for halochromic and antimicrobial wound dressings. *Biomolecules*, 15(8), 1113. <https://doi.org/10.3390/biom15081113>
- Azam, F., Ahmad, F., Ahmad, S., Rasheed, A., Nawab, Y., Zafar, M. S., & Khaliq, J. (2026). Alginate hydrogel yarn-based wound dressing: A high-performance alternative to fabric-coated dressings. *Cellulose*, 33, 3699–3715. <https://doi.org/10.1007/s10570-026-07033-z>
- Dabiri, G., Damstetter, E., & Phillips, T. (2016). Choosing a wound dressing based on common wound characteristics. *Advances in Wound Care*, 5(1), 32–41. <https://doi.org/10.1089/wound.2014.0586>
- Diegelmann, R. F., & Evans, M. C. (2004). Wound healing: An overview of acute, fibrotic and delayed healing. *Frontiers in Bioscience*, 9, 283–289. <https://doi.org/10.2741/1184>
- Disa, J. J., Alizadeh, K., Smith, J. W., Hu, Q., & Cordeiro, P. G. (2001). Evaluation of a combined calcium sodium alginate and bio-occlusive membrane dressing in the management of split-thickness skin graft donor sites. *Annals of Plastic Surgery*, 46(4), 405–408. <https://doi.org/10.1097/00000637-200104000-00009>
- Elrys, S. M. M. E., Elaraby, S., Mahmoud, K., Abdalmagid, R., Abdalatif, M., Magdy, M.,... Hassabo, A. G. (2026). Impact of polyester/cotton fabric composition on the controlled release of amoxicillin and ginger extract for sustainable wound dressing applications. *Egyptian*

- Journal of Chemistry, 69(SI), 379–400.
<https://doi.org/10.21608/ejchem.2026.444331.12660>
- Gorman, J., Brooker, C., Li, X., & Tronci, G. (2025). An infection-responsive collagen-based wet-spun textile fibre for wound monitoring. *Polymer*, 339, 129113.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.129113>
- Hossain, M. R., Alam, M. M., Corcione, C. E., Striani, R., & Alam, M. S. (2026). Electrospun polycaprolactone/gelatin blended nanofibre textiles with controlled dexamethasone release for anti-inflammatory wound dressings. *Polymers*, 18(12), 1495. <https://doi.org/10.3390/polym18121495>
- Hossain, A. K. M. N. U., Sazal, M. I. H., Siddique, M. N. A., Sabbir Hossain, M., Sela, S. K., Alam, M. M., Mahmud, E., & Fatema, U. K. (2026). Development of an eco-friendly bamboo-based textile wound dressing utilizing fish scales and herbal extracts. *Vacuum*, 254, 115750.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2026.115750>
- Kurtoğlu, A. H., & Karataş, A. (2009). Yara tedavisinde güncel yaklaşımlar: Modern yara örtüleri. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 211–232.
https://doi.org/10.1501/Eczfak_00000000562
- Larouche, J., Sheoran, S., Maruyama, K., & Martino, M. M. (2018). Immune regulation of skin wound healing: Mechanisms and novel therapeutic targets. *Advances in Wound Care*, 7(7), 209–231.
<https://doi.org/10.1089/wound.2017.0761>
- Mirzaei, E., Sarkar, S., Rezayat, S. M., & Faridi-Majidi, R. (2016). Herbal extract loaded chitosan-based nanofibers as a potential wound-dressing. *Journal of Advanced Medical Sciences and Applied Technologies*, 2(1), 141–150. <https://doi.org/10.18869/nrip.jamsat.2.1.141>

- National Institute for Health and Care Excellence. (2020). Leg ulcer infection: Antimicrobial prescribing (NG152). <https://www.nice.org.uk/guidance/ng152>
- Ottaviano, L., Buoso, S., Zamboni, R., Sotgiu, G., & Posati, T. (2025). Natural protein films from textile waste for wound healing and wound dressing applications. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(1), 20. <https://doi.org/10.3390/jfb16010020>
- Poornima, B., & Korrapati, P. S. (2017). Fabrication of chitosan-polycaprolactone composite nanofibrous scaffold for simultaneous delivery of ferulic acid and resveratrol. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1741–1749. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.056>
- Salman, S. M., Azam, F., Ahmad, S., Ahmad, F., Mushtaq, B., Habib, S. R.,... Rasul, S. (2025). Development of environment friendly biodegradable biopolymer-based hydrogel composites incorporated with waste cotton for wound dressings. *Journal of Industrial Textiles*. <https://doi.org/10.1177/15280837251324895>
- Sarhan, W. A., Azzazy, H. M. E., & El-Sherbiny, I. M. (2016). Honey/chitosan nanofiber wound dressing enriched with *Allium sativum* and *Cleome droserifolia*: Enhanced antimicrobial and wound healing activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(10), 6379–6390. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00739>
- Tort, S., & Acartürk, F. (2015). Yara tedavisi ve nanolif yapısındaki yara örtüleri. *Türkiye Klinikleri Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(2), 68–78. <https://doi.org/10.5336/pharmsci.2015-45768>

- Uzun, M. (2018). A review of wound management materials. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 4(1), 53–59. <https://doi.org/10.15406/jteft.2018.04.00121>
- Wang, J., Zhao, C., Yang, P., He, H., Yang, Y., Lan, Z., Guo, W., Qin, Y., Zhang, Q., & Li, S. (2025). A multifunctional electronic dressing with textile-like structure for wound pressure monitoring and treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, 679, 737–747. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.10.116>
- Winter, G. D. (1962). Formation of the scab and the rate of epithelization of superficial wounds in the skin of the young domestic pig. *Nature*, 193, 293–294. <https://doi.org/10.1038/193293a0>

KOMPOZİT MALZEMELERDE İLERİ TEKSTİL TAKVİYELERİ: 2B KUMAŞLARDAN 3B TEKSTİL PREFORMLARINA

Gül SEVENCAN TOPAL¹

1. GİRİŞ

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, yüksek özgül dayanım ve özgül rijitlikleri sayesinde havacılıktan enerjiye, ulaşımdan inşaata kadar geniş bir alanda geleneksel metal ve alaşımların yerini almaktadır. Bir kompozitin mekanik, termal ve hasar davranışını belirleyen en önemli bileşenlerden biri, yükün büyük bölümünü taşıyan takviye fazının geometrik düzenidir. Filament elyafların dokuma, örme ve dikiş gibi tekstil teknolojileriyle iki ya da üç boyutlu yapılara dönüştürülmesi, hem yük taşıma yeteneğini yönlendirmeyi hem de karmaşık geometrili parçaların kolaylıkla üretilmesini mümkün kılmaktadır (Chou ve Ko, 1989; Tong, Mouritz ve Bannister, 2002).

Geleneksel yöntemde tek yönlü (UD) prepreg ya da 2B kumaş katmanları üst üste istiflenerek laminat oluşturulmaktadır. Bu yaklaşım düzlem içi yönde iyi özellikler göstermesine rağmen kalınlık (z) yönünde elyaf bulunmadığından, katmanlar arasındaki bağlanma yalnızca matrise bağlı olarak gerçekleşmektedir. Sonuç olarak darbe, yorulma ve kenar etkileri altında delaminasyon, laminat kompozitlerin en kritik hasar mekanizması hâline gelmektedir (Mouritz, Bannister, Falzon ve Leong, 1999; Tong vd., 2002).

¹ Öğr. Gör., Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı, ORCID: 0000-0003-3957-0820.

Kalınlık yönünde elyaf içeren 3B tekstil preformları bu eksik yönü gidermek üzere geliştirilmiş, son yıllarda ise özellikle havacılık, savunma ve enerji uygulamalarında endüstriyel ölçekte kullanılmaya başlanmıştır (Bogdanovich ve Mohamed, 2009; Mouritz vd., 1999; Perera vd., 2021).

Bu bölümün amacı, tekstil takviyelerinin kompozitlerdeki rolünü sistematik biçimde ele almak; 2B kumaşlardan 3B preformlara uzanan yapı ailelerini sınıflandırmak; yapısal parametrelerin kompozit performansı üzerindeki etkilerini tartışmak; üretim tekniklerini ve güncel uygulamaları özetlemek ve gelecekteki araştırma eğilimlerini ortaya koymaktır.

1.1. Materyal ve Metod

Bu çalışma, sistematik deneysel bir araştırma olmayıp anlatsal bir literatür derlemesi niteliğindedir. Çalışmanın materyalini hakemli bilimsel yayınlar, akademik kitaplar ve ilgili sektör kaynakları; metodunu ise kaynakların seçilmesi, sınıflandırılması ve karşılaştırmalı olarak sentezlenmesi oluşturmuştur.

Literatür taramasında “3D woven composites”, “textile preforms”, “non-crimp fabric”, “braided composites”, “warp interlock”, “binder yarn architecture”, “liquid composite molding” ve “3D textile modelling” anahtar sözcükleri kullanılmış; başta Composites Part A/B, Composite Structures, Composites Science and Technology, Textile Research Journal ve Journal of Industrial Textiles olmak üzere ilgili bilimsel yayınlar incelenmiştir. Alanın temel çalışmalarına ek olarak, özellikle son 15 yılda yayımlanan derleme ve karşılaştırmalı araştırmalar ile 2023–2025 dönemindeki güncel çalışmalar değerlendirilerek konuya ilişkin güncel eğilimler ve gelişmeler ortaya konulmuştur..

2. KOMPOZİTLERDE TEKSTİL TAKVİYELERİNİN ROLÜ

Bir kompozitte matris, elyafları bir arada tutmakta, yükü elyaflar arasında dağıtmakta ve elyafların çevresel etkilerden korunmasını sağlamaktadır. Yükün asıl taşıyıcı elemanları sürekli elyaflardır. Elyafın yönü, hacim oranı ve süreklilik derecesi, kompozitin hangi yönde ne kadar rijit ve dayanımlı olacağını belirlemektedir. Tekstil teknolojileri bu noktada üç temel işlev görür. Bunlar elyafları kontrollü yönlerde yerleştirmek, elyaf demetlerini sarılabilir, kesilebilir kalıba yerleştirilebilir özellikleriyle işlenebilir bir forma getirmek ve bu formu otomasyona uygun biçimde yeniden üretilebilir hâle getirmektir (Chou ve Ko, 1989; Tong vd., 2002).

Tekstil takviyeli kompozitlerde yapı, birbirini izleyen ölçeklerde ele alınmaktadır. Mikro ölçek, tek tek filamentleri ve filament–matris arayüzünü; mezo ölçek, iplik (tow/yarn) geometrisini ve ipliklerin birbiriyle kesişme düzenini; makro ölçek ise parçanın tamamını kapsamaktadır. Tekstil mühendisliğinin başlıca etki alanı, iplik kesiti, sıklığı, dalgalanması (crimp) ve bağlantı düzeninin tasarlandığı ve kompozit davranışının büyük ölçüde belirlendiği mezo ölçektir (Lomov, Gusakov, Huysmans, Prodromou ve Verpoest, 2000; Lomov vd., 2007).

Tekstil takviyelerinin kompozit teknolojisindeki öne çıkan avantajları şu şekilde özetlenebilir: (a) kumaşın elle ya da robotla kolay kalıba yerleştirilebilmesi ve kıvrımlı yüzeylere uyum sağlaması (drapability), (b) sıvı kompozit kalıplama (LCM) süreçleriyle uyumlu, yüksek hacimli üretime elverişli olması, (c) iplik düzenlerinin tasarlanabilmesi sayesinde anizotropinin kontrol edilmesi, (d) 3B yapılarda kalınlık yönünde elyaf bulunmasıyla hasar toleransının artması ve (e) tek parçada, bütünselik (near-net-shape) yapıların üretilebilmesiyle

birleştirme ve bağlantı elemanı ihtiyacının azalması (Huang, Wang ve Wang, 2018; Mouritz vd., 1999).

Bu avantajların yanında tekstil takviyeler, iplik dalgalanması nedeniyle UD laminata kıyasla daha düşük düzlem içi rijitlik/dayanım, karmaşık hasar mekanizmaları ve daha zor modelleme gibi sınırlamalar ve zorluklar da gösterebilmektedir (Ishikawa ve Chou, 1982; Verma ve Majumdar, 2025).

2.1. Tekstil Takviyelerinin Boyutsal Sınıflandırması

Tekstil takviyeleri, elyafların uzaysal yerleşimi ve tekstil yapısının boyutsal mimarisi esas alınarak genel olarak 1B, 2B ve 3B yapılar şeklinde sınıflandırılabilir (Chou & Ko, 1989; Ishikawa & Chou, 1998; Lomov et al., 2000; Mouritz et al., 1999; Tong et al., 2019).

1B yapılar, elyaf veya ipliklerin ağırlıklı olarak tek bir doğrultuda yer aldığı yapılardır. 2B tekstil takviyeleri ise elyaf veya ipliklerin esas olarak düzlem içerisinde iki doğrultuda düzenlendiği dokuma, NCF, örme ve bazı 2B braiding yapıları kapsamaktadır. Bu yapılar farklı elyaf yönelimlerinin bir arada kullanılmasına olanak sağlarken, özellikle çok katmanlı laminatlarda kalınlık doğrultusundaki elyaf bağlantısının sınırlı olması delaminasyon açısından dikkate alınması gereken bir faktördür (Mouritz, 2007; Mouritz & Cox, 2000).

3B tekstil preformlarında ise elyaf veya iplikler düzlemsel yönlerin yanı sıra kalınlık doğrultusunda da yapısal bağlantılar oluşturacak şekilde düzenlenebilmektedir. 3B dokuma ve 3B braiding gibi yapılar bu grupta değerlendirilebilir. Kalınlık doğrultusundaki bağlantılar, uygun tasarım ve üretim koşullarında tabakalar arası yük aktarımının ve delaminasyon direncinin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Mouritz et al., 1999; Tong et al., 2019).

Bu nedenle 2B ve 3B tekstil takviyeleri arasında doğrudan bir üstünlük ilişkisi kurmak yerine, tekstil mimarisi, üretim yöntemi ve kullanım koşullarına bağlı olarak farklı avantaj ve sınırlılıklara sahip yapılar olarak değerlendirilmelidir.

3. 2B TEKSTİL TAKVİYELERİ

2B tekstil takviyeler, kompozit endüstrisinin en yaygın kullanılan ara ürünleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlar dokuma, çok eksenli dikişli (NCF), örme ve 2B braid yapıları olarak ele alınmaktadır.

3.1. Dokuma Kumaşlar

Dokuma kumaşlar, çözgü ve atkı adı verilen birbirine dik iki iplik sisteminin belirli bir desen düzeniyle bağlantı oluşturması sonucunda elde edilen tekstil yüzeyleridir. Kompozit uygulamalarında en temel karşılaşılan dokuma desenleri düz, dimi ve saten dokumalardır. Dimi ve özellikle saten gibi daha düşük bağlantı noktası içeren dokuma yapılarında, uygun konstrüksiyon parametreleri altında ipliklerin daha düşük kıvrım oranıyla yerleştirilmesi mümkün olabilmekte; bu durum elyaf doğrultusunda yük taşımaya katkı sağlayabilmektedir. Bunun yanında şekillendirilebilirlik kabiliyetini artırmakta ve düzlem içi özellikleri iyileştirme eğilimi oluşmaktadır. Fakat buna karşılık olarak kumaş stabilitesi azalmaktadır (Chou ve Ko, 1989; Ishikawa ve Chou, 1982).

İplik kıvrılması (crimp), dokuma kompozitlerin düzlem içi özelliklerini belirleyen temel parametredir. Kıvrımlı iplikler yük altında düzleşme eğilimi gösterir; bu da başlangıç rijitliğinin düşmesine ve iplik kesişim bölgelerinde gerilme yoğunluklarına yol açmaktadır. Ishikawa ve Chou'nun (1982) klasik çalışmalarından bu yana dokuma kompozitlerin rijitlik ve

dayanımı, iplik dalgalanmasını içeren birim hücre modelleriyle tahmin edilmektedir. Dokuma sırasında ipliklerin deforme olması ve kırılması da özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir; bu etkinin 3B dokuma için nicelleştirilmiş bir örneği Bölüm 5'te ele alınmaktadır (Lee vd., 2002).

3.2. Çok Eksenli Dikişli (NCF) Kumaşlar

Çok eksenli dikişli kumaşlarda (non-crimp fabric, NCF) birbirine paralel, kıvrımsız UD iplik katmanları farklı açılarda (ör. 0° , $\pm 45^\circ$, 90°) üst üste serilir ve ince bir dikiş ipliğiyle (genellikle çözgü örgüsü/warp-knit tarzında) birleştirilmektedir. Böylece dokuma kumaşların işlenebilirlik avantajı, UD laminatın düz elyaf avantajıyla birleştirilmekte ve katman sayısına bağlı olarak tek bir kumaşla kalın ve kuasi-izotropik laminatlar elde edilebilmektedir. NCF kumaşlar çok çeşitli yapısal uygulamalarda LCM süreçlerinde yaygın olarak kullanılır (Saeedifar vd., 2020). Dikiş iplikleri düzlem içinde küçük bölgesel elyaf sapmalarına ve reçine bakımından zengin bölgelere yol açabilir; dikişin kalınlık yönünde yük taşıyacak şekilde tasarlandığı “yapısal dikiş” uygulamaları ise 2,5B yaklaşımlara geçişi temsil etmektedir (Mouritz ve Cox, 2010).

3.3. Örme Yapılar

Örme yapılarda ipliklerin ilmekler hâlinde birbirine bağlantı oluşturması sayesinde yüksek deformasyon kabiliyeti, mükemmel şekillendirilebilirlik ve karmaşık şekillerin dikişsiz olarak üretilmesi mümkün olmaktadır. Atkılı örme (weft knitting) ve çözgülü örme (warp knitting) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Örme kompozitler, ilmek yapısı nedeniyle düzlem içi rijitlik ve dayanım bakımından dokuma ve NCF kompozitlerden genellikle daha geride kalmaktadır; ancak yüksek enerji yutma kapasitesi, şekillendirilebilirlik ve net şekle yakın üretim avantajı sunmaktadırlar. İlmek içine iplik

yerleştirme (inlay) ile düzlem içi özelliklerin iyileştirilebildiği bildirilmiştir (Leong, Ramakrishna, Huang ve Bibo, 2000).

3.4. 2B Braid (Örgü) Yapılar

Braiding, üç veya daha fazla iplik sisteminin diyagonal olarak birbiri üzerinden geçirilmesiyle, genellikle bir mandrel çevresinde tüp veya profil formunda sürekli yapılar üretilmesini sağlayan bir tekstil yöntemidir. 2B braid yapılar biaksiyal ($\pm\theta$) ya da triaksiyal (eksenel iplik eklenmiş) olabilmektedir. Yüksek burulma ve eğilme rijitliği gerektiren borular, miller, çubuklar ve tıbbi uygulamalar için uygundur (Ayranci ve Carey, 2008). Braid açısının ayarlanabilmesi, yük yönüne göre tasarımı kolaylaştırırken; geometrik karmaşıklık ve mandrel gerekliliği üretimde esnekliği sınırlandırmaktadır.

3.5. 2B Yapıların Sınırlamaları

2B takviyelerin ortak sınırlaması, katmanlar arasında elyaf bağının bulunmamasıdır. Bu durum darbe sonrası delaminasyona, düşük kalınlık yönü dayanımına ve kenar/bağlantı bölgelerinde erken hasara yol açabilmektedir. Dikiş, z-pin ve tufting gibi sonradan uygulanan kalınlık yönü takviyeleri bu açığı kapatsa da, düzlem içi özelliklerde sınırlı da olsa değişikliğe neden olmaktadır. Mouritz ve Cox'un (2010) yayımlanmış verileri karşılaştıran çalışmasına göre dikiş veya 3B dokuma düzlem içi özellikleri genellikle %20'den az değiştirirken, pin takviyesi düzlem içi özellikleri ve yorulma performansını her zaman düşürmektedir (Mouritz, 2007).

4. 3B TEKSTİL PREFORMLARI

3B tekstil preformları, kalınlık yönünde de elyaf içeren ve genellikle tek bir üretim adımında kalın, bütünselik yapılar sağlayan takviyelerdir. Mouritz vd.'nin (1999) uygulamaları ele alan öncü derlemesinden bu yana 3B dokuma, 3B braid, 3B

örme ve dikiş tabanlı yaklaşımlar ayrı yapı aileleri olarak sınıflandırılmaktadır (Bogdanovich ve Mohamed, 2009; Tong vd., 2002).

4.1. 3B Dokuma Yapılar

3B dokuma preformlar, çözgü ve atkı iplik katmanlarının, kalınlık yönünde ilerleyen binder adı verilen bağlayıcı iplikler aracılığıyla birbirine bağlanmasıyla elde edilmektedir. Literatürde yaygın sınıflandırmaya göre başlıca 3B dokuma ailesi şunlardır (Boussu, Cristian ve Nauman, 2015; Chen vd., 2011; Gokarneshan ve Alagirusamy, 2009; Khokar, 2001) (Şekil 1):

- *Ortogonal (dik) dokuma*: Dolgu (stuffer) iplikleri düz ve kıvrımsız şekilde x ve y yönlerinde yerleştirilir; bağlayıcı iplikler z yönünde dik olarak kalınlık boyunca ilerlemektedir. İplik kıvrımının neredeyse sıfır olması, bu yapıyı düzlem içi yönde en verimli 3B dokuma yapılardan biri yapar (Bogdanovich, Karahan, Lomov ve Verpoest, 2013; Lomov vd., 2009).
- *Katmandan katmana açılı kilitli (layer-to-layer angle interlock)*: Bağlayıcı iplikler yalnızca komşu katmanları birbirine bağlar; yapı, kalınlık boyunca bir bağlayıcı sistemin tek bir ardışık geçişiyle tamamlanmamaktadır.
- *Kalınlık boyunca açılı kilitli (through-thickness angle interlock)*: Bağlayıcı iplikler tüm kalınlığı eğimli bir yolla geçer; bu yapı şekillendirme açısından ortogonal yapıya göre avantaj sağlar, fakat bağlayıcı eğiminden dolayı kıvrım daha yüksektir (Boussu vd., 2015; Li vd., 2022).
- *Çok eksenli 3B dokuma*: Ortogonal yapıya ek olarak $\pm$ bias (çapraz) iplik katmanları eklenerek düzlem içi

kayma ve çok yönlü yük taşıma özellikleri iyileştirilmektedir (Bilisik, 2012).



Şekil 1. Başlıca 3B dokuma mimarilerinin çözgü doğrultusundaki kesit şemaları. Yazar tarafından özgün olarak çizilmiştir; ölçekli değildir.

3B dokuma yapıların önemli bir kısmı, kalınlık yönündeki bağlayıcıların tek aşamada eklendiği bir dokuma süreciyle üretilir; bu da ayrı bir dikiş veya pinleme adımı gerektirmez. Bununla birlikte 3B dokuma tezgâhları, geleneksel dokuma tezgâhlarının uyarlanmasıyla ya da özel olarak tasarlanmış makinelerle çalışmaktadır. Çok katmanlı çözgü beslemesi, ipliklerin düşük gerilimle taşınması ve tefe mekanizmasının belirli bir kalınlığa sahip yapıyı sıkıştırması en kritik makine problemleridir (Chen vd., 2011; Gokarneshan ve Alagirusamy, 2009; Perera vd., 2021). Khokar'ın (2001) tanımlamasına göre gerçek 3B dokuma, ipliklerin üç boyutta birbirine kenetlendiği ve kalınlığın çok sayıda iplik katmanıyla oluşturulduğu süreçtir. Bu ayrım, katmanların yalnızca bir arada tutulduğu çoklu katmanlı 2B dokumadan 3B dokumayı ayırt etmek için kullanılmaktadır.

Dokuma tezgâhında doğrudan şekillendirilen preformlar, 3B dokumanın en büyük avantajlarından birini oluşturur. I, T, Pi (π) ve kutu kesitli profiller, kenar bağlantıları ve değişken kalınlıklı bölgeler tek parça hâlinde dokunabilmektedir (Bogdanovich ve Mohamed, 2009; El-Dessouky ve Saleh, 2018; Mohamed vd., 2001). Bu sayede perçin, cıvata, yapıştırıcı gibi ek bağlantı elemanlarına ihtiyaç azalmakta ve yük aktarımı

bağlantı bölgelerinde kesintisiz elyafı sağlanabilmektedir. Yan, Zeng ve Long (2018) 3B dokuma T-bağlantıların mekanik davranışını deneysel olarak incelemiş ve bu tür bütünleşik yapıların bağlantı performansı açısından potansiyelini göstermiştir.

4.2. 3B Braid ve Çok Eksenli Örmeye Yapılar

3B braid yönteminde, iplik demetlerinin üç boyutlu bir yatakta kenetlenmesiyle dikdörtgen, I-kesitli veya karmaşık profil formunda monolitik preformlar üretilmektedir. İplik yönleri braid açısıyla belirlenir ve kalınlık yönünde süreklilik sağlanmaktadır (Kuo ve Fang, 2000). Çok eksenli örme (multiaxial warp knit) preformları ise farklı yönlerde ve/veya kalınlık yönünde takviye iplikleri içeren, makine hızı yüksek ve endüstriyel olarak olgun bir diğer yaklaşımdır. Bilisik'in (2012) çok eksenli 3B dokuma derlemesi, çok eksenli örme preformların elyaf mimarisi ve kalınlık yönü takviyesi bakımından sınırlılıklarına da işaret etmektedir (Leong vd., 2000).

4.3. Dikiş, Tufting ve Z-pin ile Kalınlık Yönü Takviyesi

Dikiş (stitching), tufting ve z-pin yöntemleri, hâlihazırda üretilmiş 2B kuru preforma veya prepreg laminata kalınlık yönünde iplik ya da pin ekleyerek delaminasyon direncini artırır. Bu yaklaşımların avantajı, mevcut 2B tedarik zincirini ve otomasyonu kullanabilmesi; dezavantajı ise iplik/pin deliklerinin düzlem içi elyaf düzeninde yerel sapmalara, reçine bakımından zengin bölgelere ve bazı durumlarda düzlem içi mekanik özelliklerde azalmaya yol açmasıdır (Mouritz, 2007; Mouritz ve Cox, 2010). Mouritz ve Cox'un (2010) karşılaştırması, dikiş ve 3B dokumanın düzlem içi özelliklere etkisinin birbirine yakın büyüklükte olduğunu, pinlemenin ise pin hacim oranı ve çapı

arttıkça düzlem içi özellikleri sistematik olarak düşürdüğünü göstermektedir.

Tablo 1. 3B tekstil preform ailelerinin niteliksel karşılaştırması

Yapı	Düzlem içi özellik	Delaminasy on direnci	Şekil esnekliği	Başlıca sınırlama
3B ortogonal dokuma	Yüksek (dalgalanma sız)	Yüksek	Orta (kalıba drape sınırlı)	Özel tezgâh; yüksek gerilimlerde iplik hasarı
3B açılı kilitli / warp interlock	Orta–yüksek	Yüksek	İyi	Bağlayıcı dalgalanması
Çok eksenli 3B dokuma	Yüksek (bias katmanlı)	Yüksek	Orta	Yeni ve karmaşık tezgâh teknolojisi
3B braid	Yönlendirile bilir	Yüksek	Profil/tüp odaklı	Mandrel ve makine kapasitesi
Dikiş / tufting / z-pin	Korunur–hafif azalır	Orta–yüksek	Mevcut 2B preforma bağlı	Delik/pin hasarı; düzlem içi azalma

3B yapıların tasarımında kalınlık, katman sayısı, bağlayıcı yolu ve dolgu/bağlayıcı oranı gibi parametrelerin bir arada ele alınması gerekmektedir.

5. TEKSTİL YAPISAL PARAMETRELERİNİN KOMPOZİT PERFORMANSINA ETKİSİ

Tekstil takviyeli kompozitlerin performansı, yalnızca elyaf ve matris türüne değil, aynı zamanda tekstil yapısını tanımlayan geometrik parametrelere de bağlıdır.

5.1. İplik Özellikleri ve Yoğunluk

İplik numarası (tex), filament sayısı, burulma durumu ve kesit biçimi; iplik demetinin kumaş içinde nasıl yassılaşacağını, kıvrımını ve reçine ile doyurulabilirliğini belirler. Kalın demetler iplik sayısını azaltarak üretimi hızlandırmaktadır. Bunun yanında bölgesel reçine yığılmalarına ve iplik içi emdirme zorluklarına yol açabilmektedir. Atkı ve çözgü sıklıkları ise elyaf hacim oranını, dolayısıyla sertlik ve dayanımın üst sınırını doğrudan etkilemektedir. Neale vd.

(2020) 3B dokuma kompozitlerde atkı (pick) yoğunluğunun değiştirilmesinin ezilme enerjisi absorpsiyonunu iyileştirebildiğini bildirmiştir. Aynı yapı içinde bile tek bir parametrenin değiştirilmesinin hasar ve enerji yutma davranışını belirgin biçimde etkileyebildiği anlaşılmaktadır.

5.2. İplik Kıvrımı ve Dokuma Kaynaklı Hasar

İplik kıvrımı (crimp), düzlem içi yük taşıma verimini azaltan baskın geometrik etkenlerden biridir. Kıvrımsız (non-crimp) 3B ortogonal dokuma yapılar, bu açıdan 2B düz dokuma laminatlara kıyasla dikkat çekici avantaj sağlar: Lomov vd. (2009) aynı elyaf cinsiyle üretilen kıvrımsız 3B ortogonal dokuma E-cam kompozitlerinin, düz dokuma laminatlara göre önemli ölçüde daha yüksek düzlem içi dayanım, kopma birim şekil değişimi ve hasar başlangıç eşiği gösterdiğini bildirmiştir. Bogdanovich vd. (2013) aynı tipteki karbon/epoksi kompozit için çekme davranışı ve hasar gelişimini ayrıntılı olarak incelemiştir.

Öte yandan dokuma süreci, ipliklere sürtünme, bükülme ve gerilme uygulayarak filamentlerde hasar oluşturabilmektedir. Lee vd. (2002), dokuma kaynaklı hasarın 3B dokuma kompozitlerin çekme özelliklerini etkileyebildiğini deneysel olarak göstermiştir. Bu bulgu, karbon, aramid, yüksek molekül ağırlıklı polietilen (HMWPE) gibi yüksek performanslı iplikler kullanıldığında dokuma parametrelerinin ve iplik yönetiminin ayrı bir optimizasyon problemi olduğuna işaret etmektedir (Li vd., 2022).

5.3. Bağlayıcı İplik Mimarisi

3B yapılarda bağlayıcı iplik, kalınlık yönünde yük taşıyan ve katmanları bir arada tutan elemandır. Bağlayıcı yolunun uzunluğu, eğimi, bağlayıcı sıklığı ve bağlayıcı–dolgu iplik oranı birlikte kompozitin düzlem içi ve düzlem dışı davranışını şekillendirmektedir. Saleh vd. (2016), 3B dokuma

kompozitlerin yükleme yönüne duyarlılığının z-bağlayıcı mimarisine bağlı olduğunu göstermiştir. Ralph vd. (2021) ise bağlayıcı atlama (float) uzunluğunun düzlem dışı ve eksenel darbe performansını etkilediğini bildirmiştir. Dash ve Behera'nın (2019) 3B preformların dokuma tasarımı yönünden mekanik özelliklere etkisini inceleyen çalışması da dokuma deseninin performansın birincil belirleyicilerinden biri olduğunu vurgulamaktadır.

Bağlayıcı sıklığının artırılması, kalınlık yönü dayanımını ve delaminasyon direncini artırırken düzlem içi iplik dalgalanmasını ve reçine bakımından zengin bölgeleri de artırabilmektedir. Bu nedenle bir optimum nokta aranmaktadır.

5.4. Hasar Toleransı ve Delaminasyon Davranışı

3B dokuma kompozitlerin en önemli üstünlüğü hasar toleransıdır. Kalınlık yönünde elyaf bulunması, delaminasyonun ilerlemesini köprüleme yoluyla yavaşlatır; Stegschuster vd. (2016) ince 3B dokuma kompozitlerde Mod I delaminasyon kırılma ve yorulma özelliklerini deneysel olarak belirlemiştir. Darbe altında 2B ve 3B dokuma kompozitlerin hasar mekanizmalarını karşılaştıran çalışmalar, 3B yapılarda hasar türlerinin ve yayılımının 2B laminatlardan farklılaştığını, kalınlık yönündeki elyafın delaminasyon gelişimini sınırlayan bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır (Hart vd., 2017; Saeedifar vd., 2020). Zhou vd. (2020) da yarı-3B dokuma bir kompoziti UD ve 2B dokuma laminatlarla karşılaştırmıştır. Buna karşılık, 3B dokuma kompozitlerde düzlem içi dayanım değerleri her zaman 2B muadilinden yüksek değildir; sonuç, mimari, bağlayıcı yolu ve test yönüne bağlıdır (Dau, Dano, Vérone, Girardot ve Aboura, 2021; Hu vd., 2020; Saleh ve Soutis, 2017).

5.5. Geometri Karakterizasyonu ve Modelleme

Yapısal parametrelerin etkisini öngörmek için tekstil geometrisinin doğru temsil edilmesi gerekmektedir. Mezo ölçekli modellemede iplik yörüngesi, kesit şekli ve sıkıştırma altındaki deformasyon, birim hücre (RVE) modelleri aracılığıyla tanımlanır; ardından sonlu eleman analizi için ağ (mesh) oluşturulur (Lomov vd., 2000, 2007). Lomov vd.'nin (2007) meso-FE çalışması, bu modelleme zincirinin yol haritasını ve veri akışını ortaya koymuş; tam alan birim şekil değişimi ölçümleriyle (DIC) modelin doğrulanması da ayrıca gösterilmiştir (Lomov vd., 2008).

3B yapılarda geometri, iplik kesiti değişimleri ve üretim kaynaklı sapmalar nedeniyle daha karmaşıktır. Mikro-bilgisayarlı tomografi (micro-CT), gerçek 3B tekstil mimarisindeki değişkenliği nicel olarak ortaya koymak için kullanılmaktadır (Desplentere vd., 2005). Pierreux, Van Hemelrijck ve Massart (2019) iplik kesit değişimlerini içeren 3B ortogonal dokuma kompozitler için RVE'lerin otomatik oluşturulmasını önermiş, Isart vd. (2015) ise 3B dokuma kompozitlerin iç geometrik modellemesinde farklı yaklaşımları karşılaştırmıştır. 3B dokuma yapılar için sayısal modelleme çalışmaları Ansar, Xinwei ve Chouwei (2011), Gereke ve Cherif (2019), Gao ve Chen (2021), Korkmaz ve Okur (2022) ile Wielhorski vd. (2022) tarafından derlenmiştir. Bu derlemeler modelleme stratejilerinin, çok ölçekli yaklaşımların ve hâlâ açık olan problemlerin bütünsel bir görünümünü sunmaktadır.

6. ÜRETİM TEKNİKLERİ

Tekstil takviyeli kompozit üretimi üç ana aşamadan oluşmaktadır: (i) kuru preformun üretilmesi, (ii) preformun kalıp geometrisine şekillendirilmesi (draping/forming) ve (iii) matris ile emdirme ve kürleme. Her aşama, nihai kompozitin kalitesini

belirleyen parametrelerin farklı bir bölümünü kontrol etmektedir.

6.1. Preform Üretimi

2B dokuma, NCF ve örme kumaşlar yüksek verimli, olgun endüstriyel proseslerle üretilirken; 3B preformlar için özel ya da modifiye makineler gerekmektedir. 3B dokuma tezgâhları, çok katmanlı çözgü düzeni, kalınlık yönünde bağlayıcı hareketi ve sıkıştırma mekanizmaları içeren yapılardır. Konvansiyonel dokuma tezgâhlarından dönüştürülen sistemlerin yanında 3B yapılar için özel geliştirilmiş tezgâh tasarımları da bulunmaktadır (Chen vd., 2011; Gokarneshan ve Alagirusamy, 2009; Perera vd., 2021). Mohamed vd. (2001), bütünleşik şekilli 3B preformların üretimine olanak tanıyan yeni nesil 3B dokuma preform ve kompozitlerini tanıtmıştır (Bogdanovich ve Mohamed, 2009). Çok eksenli 3B dokuma için ise Bilisik'in (2012) derlemesi, bias ipliklerin yerleştirilmesine yönelik mekanizmaların geliştirilmesini ele almaktadır.

6.2. Preform Şekillendirme

Kuru preformların üç boyutlu kalıplara yerleştirilmesi sırasında kayma, gerilme ve eğilme deformasyonları oluşmaktadır. Bu deformasyonlar elyaf yönlerini, yerel elyaf hacim oranını ve kırışıklık (wrinkling) gibi kusurların oluşumunu etkiler. Gereke, Döbrich, Hübner ve Cherif (2013) tekstil takviye şekillendirmesine ilişkin deneysel ve hesaplamalı çalışmaları derlemiş, Boisse, Colmars, Hamila, Naouar ve Steer (2018) ise eğilme ve kırışıklık davranışının draping simülasyonlarındaki rolünü ayrıntılı olarak ele almıştır. 3B yapılarda kalınlık yönündeki bağlayıcı iplikler, şekillendirme sırasında kayma ve kilitlenme (locking) davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle 3B dokuma preformlar için özel kinematik ve sayısal modeller geliştirilmiştir (El Said,

Green ve Hallett, 2014; Green, Long, El Said ve Hallett, 2014; Korkmaz vd., 2022; Pazmino, Carvelli ve Lomov, 2014).

6.3. Sıvı Kompozit Kalıplama (LCM)

Tekstil preformların matris ile doyurulmasında en yaygın yol, kuru preformun bir kalıba yerleştirilip reçinenin enjeksiyon ya da infüzyonla akıtıldığı sıvı kompozit kalıplama (LCM) yöntemleridir (Şekil 2). Reçine transfer kalıplama (RTM), basınçlı reçine enjeksiyonu yapılan kapalı kalıplarda yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal kararlılık sağlamaktadır. Vakum destekli RTM (VARTM) ve infüzyon yöntemleri ise tek taraflı kalıp ve vakum torbası kullanarak büyük parçalar için daha düşük ekipman maliyeti sunmaktadır. Mishnaevsky vd. (2017) tarafından yapılan değerlendirmeye göre VARTM, rüzgâr türbini kanatlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan sıvı kompozit kalıplama yöntemlerinden biridir..



Şekil 2. RTM ve VARTM/infüzyon süreçlerinin şematik gösterimi. Yazar tarafından özgün olarak çizilmiştir.

LCM proseslerinde preformun geçirgenliği ve sıkıştırılabilirliği, doldurma süresini, boşluk oluşumunu ve elyaf hacim oranını belirleyen kilit özelliklerdir. Endruweit ve Long (2010) seçili 3B dokuma takviyelerin sıkıştırılabilirliğini ve geçirgenliğini analiz etmiş; bu özelliklerin tekstil mimarisine kuvvetle bağlı olduğunu göstermiştir. Potluri ve Sagar (2008) tekstil preformların sıkıştırma (kompaksiyon) davranışını modelleme yaklaşımlarını sunmuştur. 3B yapılarda kalınlık yönündeki bağlayıcılar, reçine akışı için ek kanal oluşturabildiği gibi kalınlığın artması nedeniyle akış mesafesini de

uzatabilmektedir. Bu nedenle enjeksiyon kapıları ve havalandırma noktalarının tasarımı preform mimarisiyle birlikte ele alınmalıdır.

6.4. Termoplastik Matrisli Tekstil Kompozitler

Termoplastik matrisler; geri dönüştürülebilirlik, kısa çevrim süresi ve yüksek tokluk avantajları nedeniyle tekstil takviyeli sistemlerde giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Bununla birlikte erimiş termoplastığın yüksek viskozitesi nedeniyle kuru preformun emdirilmesi zordur. Bu amaçla takviye ve matris liflerinin birlikte bulunduğu hibrit iplikler, film istifleme veya çok aşamalı emdirme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kuo ve Fang (2000) 3B dokuma ve 3B braid termoplastik kompozitlerin işlenmesini ve karakterizasyonunu incelemiş, Hufenbach vd. (2011) otomotiv uygulamaları için polipropilen/cam elyaf 3B tekstil takviyeli kompozitleri geliştirmiştir. Mountasir vd. (2015) çok katmanlı dokuma yapılara dayalı 3B termoplastik kompozit panellerin rekabetçi üretimini ele almış, Goud vd. (2020) ise karbon/polipropilen 2B ve 3B dokuma kompozitlerin çok aşamalı emdirme süreçleriyle üretimini ve mekanik performansını karşılaştırmıştır.

6.5. Kalite Güvencesi ve Kusurlar

Preform üretimi, şekillendirme ve emdirme aşamalarında oluşan kusurlar (iplik kırılması, boşluk, kuru bölge, kırıksıklık, elyaf yönü sapması) kompozitin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Mikro-CT, ultrasonik muayene ve görüntü analizi gibi tahribatsız yöntemler, gerçek tekstil geometrisinin ve kusurların ortaya konmasında kullanılmaktadır (Desplentere vd., 2005; Pierreux vd., 2019). Üretim değişkenliğini sayısal modellere yansıtan yaklaşımlar ise geometrik modelleme ile üretim gerçekliği arasındaki boşluğu kapatmayı hedeflemektedir (Isart vd., 2015; Wielhorski vd., 2022).

7. UYGULAMALAR

Tekstil takviyeli kompozitler; havacılık ve uzaydan rüzgâr enerjisine, balistik korumadan otomotiv ve inşaatla kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle 3B tekstil preformlar, yüksek hasar toleransı, delaminasyon direnci ve yapısal bütünlükleri nedeniyle ileri mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır.

7.1. Havacılık ve Uzay

3B dokuma kompozitlerin en önemli endüstriyel uygulamalarından biri, CFM International LEAP motorlarında kullanılan karbon elyaf kompozit fan kanatları ve fan kasasıdır. Albany Engineered Composites ve Safran tarafından geliştirilen 3B dokuma preform–RTM teknolojisi, düşük ağırlık, yüksek darbe dayanımı ve delaminasyon riskinin azaltılması gibi avantajlar sunmaktadır (AEC, t.y.; CompositesWorld, 2023). 3B dokuma yapıların bağlantı elemanları ve karmaşık geometrili bileşenlerde kullanımı da araştırılmaktadır (Mouritz vd., 1999; Huang vd., 2018; Yan vd., 2018).

7.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr türbini kanatlarında yaygın olarak kullanılan cam/epoksi kompozitlerin üretiminde çok eksenli non-crimp fabric (NCF) yapılar önemli bir yer tutmaktadır. 3B tekstil yapıların ise özellikle kanat kökü ve kiriş–kabuk birleşimleri gibi kritik bölgelerde delaminasyonun azaltılması amacıyla kullanımı araştırılmaktadır (Mishnaevsky vd., 2017).

7.3. Balistik ve Koruma Uygulamaları

Balistik korumada enerji yutma kapasitesi, darbe dayanımı ve katmanlar arası bütünlük büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle özellikle 3B warp interlock yapılar, delaminasyon direnci ve yüksek yapısal bütünlükleri nedeniyle balistik ve

kesici/delici koruma uygulamalarında araştırılmaktadır (Boussu, 2011; Bilisik, 2017; Abtew vd., 2019).

7.4. Otomotiv, İnşaat, Sandviç Yapılar ve Diğer Alanlar

Otomotiv sektöründe hafif ve geri dönüştürülebilir kompozitlere yönelik gereksinimler, 3B tekstil takviyeli termoplastik yapıların gelişimini desteklemektedir (Hufenbach vd., 2011; Mountasir vd., 2015). İnşaat ve sandviç yapılarda 3B dokuma kafes ve bütünlüklü çekirdek yapılar, yüzey-çekirdek arasında elyaf sürekliliği sağlayarak delaminasyon riskini azaltmaktadır (Wang vd., 2016; Jabbar vd., 2019). Ayrıca 3B dokuma seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklık uygulamaları için değerlendirilmektedir (Gao vd., 2015).

7.5. Doğal Elyaf ve Sürdürülebilir 3B Yapılar

Sürdürülebilir kompozitlere yönelik çalışmalar kapsamında keten ve sisal gibi doğal liflerden 3B dokuma ve warp interlock yapılar geliştirilmektedir. Bu çalışmalar, doğal elyafların 3B tekstil mimarileriyle birleştirilerek mekanik performans ve çevresel avantajların birlikte değerlendirilmesine odaklanmaktadır (Lansiaux vd., 2020; Jabbar vd., 2021; Samouh vd., 2022).

8. GELECEK PERSPEKTİFİ

Tekstil takviyeli kompozitlerin geleceği; yapay zekâ ve veri güdümlü tasarım, çok ölçekli modelleme, dijital ikiz, sürdürülebilir malzemeler, otomasyon ve çok işlevlilik ekseninde şekillenmektedir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri, 3B tekstil geometrisinin oluşturulması ve mekanik özelliklerin tahmininde geleneksel modelleme yöntemlerine alternatif oluşturmaktadır (Kibrete vd., 2023; Koptelov vd., 2024).

Bunun yanında üretim değişkenliklerini dikkate alan çok ölçekli modeller, micro-CT doğrulaması ve dijital ikiz yaklaşımları, tasarım–üretim–performans süreçlerinin bütünleştirilmesini desteklemektedir (Desplentere vd., 2005; Gao ve Chen, 2021; Wielhorski vd., 2022). Doğal elyaflar ve geri dönüştürülebilir termoplastik matrisler sürdürülebilirliği güçlendirirken; üretim otomasyonu, proses optimizasyonu ve maliyetlerin azaltılması 3B tekstillerin endüstriyel kullanımını artıracaktır. Gelecekte ayrıca elektriksel iletkenlik, yapısal sağlık izleme ve enerji depolama gibi işlevlerin tekstil mimarilerine entegre edilmesiyle çok işlevli kompozitlerin geliştirilmesi beklenmektedir.

9. SONUÇ

Tekstil takviyeli kompozitlerde 2B kumaşlardan 3B preformlara geçiş, özellikle hasar toleransı, delaminasyon direnci ve yapısal bütünlük açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, tekstil mimarisi; elyaf yönlendirilmesi, kıvrım, bağlayıcı iplik yapısı ve üretim parametreleri üzerinden kompozitin mekanik performansını doğrudan etkilemektedir.

3B dokuma, braid ve warp interlock yapılar; havacılık, balistik, rüzgâr enerjisi ve diğer ileri mühendislik uygulamalarında önemli bir potansiyel sunarken, preform şekillendirme, geçirgenlik, emdirme, maliyet ve standardizasyon gibi konular geliştirilmesi gereken başlıca alanlardır.

Sonuç olarak, ileri tekstil yapıları malzeme, yapı ve üretim süreçlerini bütünleştiren önemli bir kompozit tasarım yaklaşımıdır. Yapay zekâ destekli tasarım, sürdürülebilir malzemeler, çok ölçekli modelleme ve otomasyon alanlarındaki gelişmelerin, 3B tekstil takviyeli kompozitlerin gelecekteki

endüstriyel kullanımını daha da yaygınlaştırması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C. ve Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite Structures*, 223, 110966. doi:10.1016/j.compstruct.2019.110966
- Albany Engineered Composites. (t.y.). *Fan blades (LEAP engine)*. Erişim adresi: <https://www.albint.com/engineered-composites/products/fan-blades/>
- Ansar, M., Xinwei, W. ve Chouwei, Z. (2011). Modeling strategies of 3D woven composites: A review. *Composite Structures*, 93, 1947–1963.
- Ayranci, C. ve Carey, J. (2008). 2D braided composites: A review for stiffness critical applications. *Composite Structures*, 85(1), 43–58.
- Bilisik, K. (2012). Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review. *Textile Research Journal*, 82(7), 725–743.
- Bilisik, K. (2017). Two-dimensional (2D) fabrics and three-dimensional (3D) preforms for ballistic and stabbing protection: A review. *Textile Research Journal*, 87, 2275–2304.
- Bogdanovich, A. E., Karahan, M., Lomov, S. V. ve Verpoest, I. (2013). Quasi-static tensile behavior and damage of carbon/epoxy composite reinforced with 3D non-crimp orthogonal woven fabric. *Mechanics of Materials*, 62, 14–31.
- Bogdanovich, A. E. ve Mohamed, M. H. (2009). Three-dimensional reinforcements for composites. *SAMPE Journal*, 45(6), 8–28.

- Boisse, P., Colmars, J., Hamila, N., Naouar, N. ve Steer, Q. (2018). Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations. *Composites Part B: Engineering*, 141, 234–249.
- Boussu, F. (2011). The use of warp interlock fabric inside textile composite protection against ballistic impact. *Textile Research Journal*, 81(4), 344–354.
- Boussu, F., Cristian, I. ve Nauman, S. (2015). General definition of 3D warp interlock fabric architecture. *Composites Part B: Engineering*, 81, 171–188.
- Chen, X., Taylor, L. W. ve Tsai, L. J. (2011). An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites. *Textile Research Journal*, 81(9), 932–944.
- Chou, T. W. ve Ko, F. K. (Ed.). (1989). *Textile structural composites*. Amsterdam, Hollanda: Elsevier.
- CompositesWorld. (t.y.). *3-D preformed composites: The leap into LEAP*. Erişim adresi: <https://compositesworld.com/articles/3-d-preformed-composites-the-leap-into-leap>
- CompositesWorld. (2023, Şubat). *Plant tour: Albany Engineered Composites, Rochester, N.H., U.S.*. Erişim adresi: <https://compositesworld.com/articles/plant-tour-albany-engineered-composites-rochester-nh-us>
- Dash, A. K. ve Behera, B. K. (2019). Weave design aspects of 3D textile preforms towards mechanical properties of their composites. *Fibers and Polymers*, 20, 2146–2155.
- Dau, F., Dano, M.-L., Vérone, B., Girardot, J. ve Aboura, Z. (2021). In-plane and out-of-plane characterization of a 3D angle interlock textile composite. *Composites Part A:*

Applied Science and Manufacturing, 149, 106581.
doi:10.1016/j.compositesa.2021.106581

Desplentere, F., Lomov, S. V., Woerdeman, D. L., Verpoest, I., Wevers, M., & Bogdanovich, A. (2005). Micro-CT characterization of variability in 3D textile architecture. *Composites Science and Technology*, 65(13), 1920–1930. doi:10.1016/j.compscitech.2005.04.008

El-Dessouky, H. M. ve Saleh, M. N. (2018). 3D woven composites: From weaving to manufacturing. İçinde *Recent developments in the field of carbon fibers*. Londra, İngiltere: IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.74311

El Said, B., Green, S. ve Hallett, S. R. (2014). Kinematic modelling of 3D woven fabric deformation for structural scale features. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 95–107.

Endruweit, A. ve Long, A. C. (2010). Analysis of compressibility and permeability of selected 3D woven reinforcements. *Journal of Composite Materials*, 44, 2833–2862.

Gao, Z. ve Chen, L. (2021). A review of multi-scale numerical modeling of three-dimensional woven fabric. *Composite Structures*, 263, 113685.

Gao, T., Zhao, Y., Zhou, G., Han, Y., Zheng, Y., Shan, Z., Hui, D., Xu, F., & Qiu, Y. (2015). Fabrication and characterization of three dimensional woven carbon fiber/silica ceramic matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 77, 122–128. doi:10.1016/j.compositesb.2015.03.002

- Gereke, T. ve Cherif, C. (2019). A review of numerical models for 3D woven composite reinforcements. *Composite Structures*, 209, 60–66.
- Gereke, T., Döbrich, O., Hübner, M. ve Cherif, C. (2013). Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 46, 1–10.
- Gokarneshan, N. ve Alagirusamy, R. (2009). Weaving of 3D fabrics: A critical appreciation of the developments. *Textile Progress*, 41, 1–58.
- Goud, V., Singh, D., Ramasamy, A., Das, A., Kalyanasundaram, D. (2020). Investigation of the mechanical performance of carbon/polypropylene 2D and 3D woven composites manufactured through multi-step impregnation processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130, 105733.
- Green, S. D., Long, A. C., El Said, B. S. F. ve Hallett, S. R. (2014). Numerical modelling of 3D woven preform deformations. *Composite Structures*, 108, 747–756.
- Hart, K. R., Chia, P. X. L., Sheridan, L. E., Wetzel, E.D., Sottos, N.R., White, S.R. (2017). Mechanisms and characterization of impact damage in 2D and 3D woven fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101, 432–443.
- Hu, Q., Memon, H., Qiu, Y., Liu, W., Wei, Y. (2020). A comprehensive study on the mechanical properties of different 3D woven carbon fiber-epoxy composites. *Materials*, 13, 2765.
- Huang, T., Wang, Y. ve Wang, G. (2018). Review of the mechanical properties of a 3D woven composite and its

- applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57, 740–756.
- Hufenbach, W., Böhm, R., Thieme, M., Winkler, A. (2011). Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications. *Materials & Design*, 32, 1468–1476. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.049
- Isart, N., El Said, B., Ivanov, D. S., Hallet, S. R., Mayugo, J. A., Blanco, N. (2015). Internal geometric modelling of 3D woven composites: A comparison between different approaches. *Composite Structures*, 132, 1219–1230. doi:10.1016/j.compstruct.2015.07.007
- Ishikawa, T. ve Chou, T. W. (1982). Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites. *Journal of Materials Science*, 17, 3211–3220.
- Jabbar, A., Karahan, M., Zubair, M., Karahan, N. (2019). Geometrical analysis of 3D integrated woven fabric reinforced core sandwich composites. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 27, 45–50. doi:10.5604/01.3001.0012.7507
- Jabbar, M., Shaker, K., Nawab, Y., Umair, M. (2021). Effect of the stuffer yarns on the mechanical performance of novel 3D woven green composites. *Composite Structures*, 269, 114023. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114023
- Khokar, N. (2001). 3D-weaving: Theory and practice. *Journal of the Textile Institute*, 92, 193–207.
- Kibrete, F., Trzepieciński, T., Gebremedhen, H. S. ve Woldemichael, D. E. (2023). Artificial intelligence in predicting mechanical properties of composite materials. *Journal of Composites Science*, 7(9), 364.

- Koptelov, A., Thompson, A., Hallett, S. R. ve El Said, B. (2024). A deep learning approach for predicting the architecture of 3D textile fabrics. *Materials & Design*, 239, 112803.
- Korkmaz, M. ve Okur, A. (2022). The review about the numerical modelling and analysis of 3D woven fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 114, 496–522.
- Korkmaz, M., Okur, A., Labanieh, A. R., Boussu, F. (2022). Investigation of the mechanical and forming behaviour of 3D warp interlock carbon woven fabrics for complex shape of composite material. *Journal of Industrial Textiles*, 51, 5427S–5465S.
- Kuo, W. S. ve Fang, J. (2000). Processing and characterization of 3D woven and braided thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 60, 643–656.
- Lansiaux, H., Soulat, D., Boussu, F., Labanieh, A. R. (2020). Development and multiscale characterization of 3D warp interlock flax fabrics with different woven architectures for composite applications. *Fibers*, 8, 15.
- Lee, L., Rudov-Clark, S., Mouritz, A. P., Bannister, M. K., Herszberg, I. (2002). Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites. *Composite Structures*, 57, 405–413.doi: 10.1016/S0263-8223(02)00108-3
- Leong, K. H., Ramakrishna, S., Huang, Z. M. ve Bibo, G. A. (2000). The potential of knitting for engineering composites—A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 197–220.
- Li, M., Wang, P., Boussu, F., Soulat, D. (2022). A review on the mechanical performance of three-dimensional warp

interlock woven fabrics as reinforcement in composites.
Journal of Industrial Textiles, 51, 1009–1058.doi:

- Lomov, S. V., Bogdanovich, A. E., Ivanov, D. S., Mungalov, D., Karahan, M. ve Verpoest, I. (2009). A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 1134–1143.
- Lomov, S. V., Gusakov, A. V., Huysmans, G., Prodromou, A. ve Verpoest, I. (2000). Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. *Composites Science and Technology*, 60, 2083–2095.
- Lomov, S. V., Ivanov, D., Verpoest, I., Zako, M., Kurashiki, H., Molimard, J., Vautrin, A. (2008). Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 1218–1231.doi: 10.1016/j.compositesa.2007.09.011
- Lomov, S. V., Ivanov, D. S., Verpoest, I., Zako, M., Kurashiki, T., Nakai, H., Hirosawa, S.(2007). Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. *Composites Science and Technology*, 67, 1870–1891.doi: 10.1016/j.compscitech.2006.10.017
- Mishnaevsky, L., Jr., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M. ve Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*, 10(11), 1285.
- Mohamed, M. H., Bogdanovich, A. E., Dickinson, L. C. (2001). A new generation of 3D woven fabric preforms and composites. *SAMPE Journal*, 37(3), 8–17.

- Mountasir, A., Hoffmann, G., Cherif, C., Löser, M., Grossman, K. (2015). Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering. *Composite Structures*, 133, 415–424.doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.071
- Mouritz, A. P. (2007). Review of z-pinned composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(12), 2383–2397.
- Mouritz, A. P., Bannister, M. K., Falzon, P. J. ve Leong, K. H. (1999). Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1445–1461.
- Mouritz, A. P. ve Cox, B. N. (2010). A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(6), 709–728.
- Neale, G., Dahale, M., Yoo, S., Toso, N., McGarrigle, C., Quinn, J., Kelly, J., McIlhagger, A., Archer, E., Harkin-Jones, E. (2020). Improved crush energy absorption in 3D woven composites by pick density modification. *Composites Part B: Engineering*, 192, 108007. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108007
- Pazmino, J., Carvelli, V. ve Lomov, S. V. (2014). Formability of a non-crimp 3D orthogonal weave E-glass composite reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 76–83.
- Perera, Y. S., Muwanwella, R. M. H. W., Fernando, P. R., Fernando, S. K., Jayawardana, T.S.S. (2021). Evolution of

3D weaving and 3D woven fabric structures. *Fashion and Textiles*, 8, 11.

Pierreux, G., Van Hemelrijck, D. ve Massart, T. J. (2019). Automated generation of 3D orthogonal woven composites RVEs including yarn cross-section variations. *Composites Science and Technology*, 176, 90–102.

Potluri, P. ve Sagar, T. V. (2008). Compaction modelling of textile preforms for composite structures. *Composite Structures*, 86, 177–185.

Ralph, C., Dahale, M., Neale, G., Ramaswamy, K., McCarthy, M., Yoo, S., Toso, N., Kelly, J., McCarrigle, C., Archer, E., Harkin-Jones, E., McIlhagger, A. (2021). Influence of binder float length on the out-of-plane and axial impact performance of 3D woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 147, 106459. doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106459

Saeedifar, M., Saleh, M. N., El-Dessouky, H. M., Freitas, S.T.D., Zarouchas, D. (2020). Damage assessment of NCF, 2D and 3D woven composites under compression after multiple-impact using acoustic emission. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 132, 105833. doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105833

Saleh, M. N. ve Soutis, C. (2017). Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 3, 12.

Saleh, M. N., Yudhanto, A., Potluri, P., Lubineau, G. (2016). Characterising the loading direction sensitivity of 3D woven composites: Effect of z-binder architecture.

Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 90, 577–588. doi:10.1016/j.compositesa.2016.08.028

Samouh, Z., Abed, A., Cherkaoui, O., Saulat, D., Labanieh, A.R., Boussu, F., Elmoznine, R. (2022). Investigation on the properties of 3D warp interlock fabrics based on Moroccan sisal yarns as reinforcement for composite materials. *Journal of Natural Fibers*, 19, 6822–6840. doi: 10.1080/15440478.2021.1932679

Stegschuster, G., Pingkarawat, K., Wendland, B., Mourtiz, A.P. (2016). Experimental determination of the mode I delamination fracture and fatigue properties of thin 3D woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 308–315. doi:10.1016/j.compositesa.2016.02.008

Tong, L., Mouritz, A. P. ve Bannister, M. K. (2002). *3D fibre reinforced polymer composites*. Londra, İngiltere: Elsevier.

Verma, V. ve Majumdar, A. (2025). Structure-property relationships of 3D woven fabric composites: A critical review through bibliometric and content analyses. *Journal of Composite Materials*, 59(2), 241–263.

Wang, P., Lai, C., Wang, F., Jin, F., Fan, H.(2016). Fabrication and mechanical behaviors of cementitious composites reinforced by 3D woven lattice sandwich fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85, 130–137. doi: 10.1016/j.compositesa.2016.03.017

Wielhorski, Y., Mendoza, A., Rubino, M., Roux, S.(2022). Numerical modeling of 3D woven composite reinforcements: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 154, 106729. doi:10.1016/j.compositesa.2021.106729

- Yan, S., Zeng, X. ve Long, A. (2018). Experimental assessment of the mechanical behaviour of 3D woven composite T-joints. *Composites Part B: Engineering*, 154, 108–113.
- Zhou, W., Wentz, T., Liu, D., Mao, X., Zeng, D., Torab, H., Dahl, J., Xiao, X. (2020). A comparative study of a quasi 3D woven composite with UD and 2D woven laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139, 106139.doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106139

**TEKSTİL BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com