ISSN / ANATABDER NO: 2026-B04

BİYOMALZEME VE İLERİ TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ

Kenevir (*Cannabis sativa* L.) Liflerinin Yapısal ve Fonksiyonel Nitelikleri: Kapsamlı Bir İnceleme

Berk Sohtorik[1,2] | **Dr. Dilek Himam**[3]

[1] KenevirMED, Biyoteknoloji ve Malzeme Araştırmaları • [2] ANATABDER (Anadolu Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Derneği) • [3] İzmir Ekonomi Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi

ÖZET

Petrokimya ürünü sentetik liflerin mikroplastik kirliliği karşısında endüstriyel kenevir (*Cannabis sativa* L.) lifleri; karbon-negatif tarımsal yapısı ve üstün fizikomekanik nitelikleriyle öne çıkmaktadır. S2 sekonder çeper tabakasındaki düşük mikrofibril açısı (MFA: 2° ila 10°) yüksek çekme mukavemeti sağlarken; lignin ve fenolik asit ağı doğal antimikrobiyal ve UV fotokoruma (UPF > 50) kalkanı oluşturur. Hücre merkezindeki lümen yapısı ise mikroklima nem tamponlamasını mümkün kılar. Bu çalışma, kenevir liflerinin hücresel mimarisi ile makroskobik performans dinamiklerini analiz etmektedir.

01 Giriş ve Biyoekonomik Çerçeve

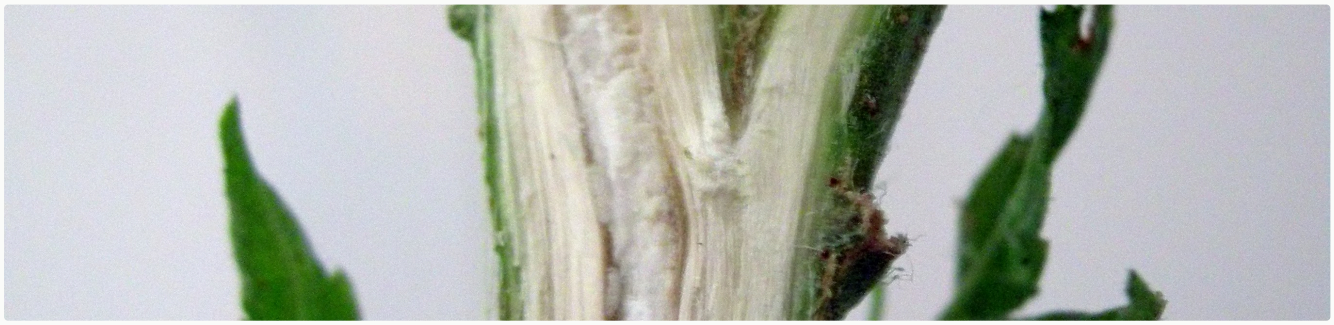
Fosil yakıt türevi sentetik liflerin (polyester, naylon) yol açtığı ekolojik yıkım, biyolojik kökenli döngüsel malzemeleri stratejik bir konuma taşımıştır. Tarihsel süreçte kaba halat ve yelken bezi üretimiyle sınırlanan endüstriyel kenevir soymuk lifleri; günümüzde ileri teknik tekstiller, biyomedikal yüzeyler ve yapısal biyo-kompozitler için yüksek katma değerli bir hammadde olarak yeniden değerlendirilmektedir.[1]

Bitki sapının dış kabuk bölgesinde konumlanan soymuk lifleri (bast fibers), karbon tutma kabiliyetini benzersiz hücresel dayanıklılıkla birleştirir. Bu çalışma; kenevir lifinin nano ölçekli çeper yapısından yaşam döngüsü sonundaki toprak etkileşimine dek uzanan çok boyutlu fonksiyonel niteliklerini incelemektedir.

02 Hücresel Morfoloji ve Çeper Mimarisi

Kenevir soymuk lifleri; hemiselüloz, pektin ve ligninden oluşan amorf bir matriks içine gömülü yarı kristal selüloz mikrofibrillerinden meydana gelen doğal bir kompozittir.[2] Lif hücre çeperi ince bir primer tabaka ile lif kesit alanının büyük bölümünü oluşturan kalın bir sekonder tabakadan (S1, S2, S3) teşekkül eder.[3]

S2 tabakası eksenel yük taşımada birincil yapıdır. Bu tabakada selüloz zincirleri lif boyuna eksenine neredeyse paralel bir açıyla yerleşmiştir. Mikrofibril Açısı (MFA) olarak tanımlanan bu yönelim açısı nitelikli kenevir liflerinde yalnızca 2° ila 10° aralığındadır.[4]



Şekil 1: Kenevir (*Cannabis sativa* L.) sapının mikroskop altındaki anatomik enine kesiti; dış halkada yer alan yüksek mukavemetli soymuk (floem) lif demetleri ve merkezdeki odunsu kıtık dokusu.

03 Biyomekanik Direnç ve Lif Parametreleri

Ağırlığının %64 ila %78'i kristal selülozdan oluşan kenevir soymuk liflerinde düşük mikrofibril açısı (MFA), çekme gerilimi altında makaslama deformasyonunu sınırlandırır. Bu mimari liflere 550 ila 1110 MPa çekme mukavemeti ve 30 ila 92 GPa Young modülü kazandırır.[5] Bu değerler keneviri ticari cam lifleriyle doğrudan rekabet edebilir seviyeye ulaştırır.[6]

LİF TÜRÜ	SELÜLOZ (%)	HEMİSELÜLOZ (%)	LİGNİN (%)	KÜTLE YOĞUNLUĞU (G/CM³)	ÇEKME DAYANIMI (MPA)	YOUNG MODÜLÜ (GPA)
Kenevir (Soymuk)	**64 – 78**	**10 – 23**	**3 – 13**	**1,40 – 1,64**	**550 – 1110**	**30 – 92**
Keten (Soymuk)	64 – 71	10 – 12	3 – 5	1,50 – 1,54	502 – 1000	52 – 80
Pamuk (Tohum)	83 – 90	3 – 7	< 1	1,50 – 1,54	287 – 597	5 – 12
Polyester (PET)	-	-	-	1,38 – 1,40	400 – 600	2 – 4

Lif hücresinin ortasında uzanan sürekli "lümen" kanalı; yoğunluğu düşürürken (1,40 - 1,64 g/cm³) ses sönümleme ve kapiler iletimi artırır.[7] Çevresel nem ise hemiselüloz matriksinde plastikleştirici gibi davranır. Dinamik devirli yük altında mikrofibriller lif eksenine doğru yönelerek yorulma testlerinin ilk evrelerinde lif rijitliğini %250'ye kadar yükseltebilir.[8]

04 Lignin ve Fenoliklerin Biyosit Etkisi

Kenevir tekstillerinin doğal antimikrobiyal ve antifungal gücü, selüloz dışı bileşenlerden kaynaklanır. Lignin makromolekülü; p-kumaril, koniferil ve sinapil alkol monolignollerinin kenetlenmesiyle oluşur.[9] Lignine bağlı p-kumarik asit ve ferulik asit gibi düşük molekül ağırlıklı fenolikler birincil biyosit unsurlardır.[10]



Şekil 2: Masere edilmiş kenevir soymuk lif demetlerinin fibril düzeni.

Amfipatik fenolik halkalar *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* bakterilerinin fosfolipid çift katmanına tutunarak zarın elektrokimyasal potansiyelini çökertir ve hücre lizisine yol açar.[11] Trikomlardan lif yüzeyine sızan kalıntı kannabidiol (CBD) fraksiyonları da bakteriyel bölünmeyi önler. ISO 20743 uyarınca enzimatik işlenmiş kumaşlar, 50 yıkama sonrasında dahi %95 ila %99 bakteri inhibisyonunu korur.[12]

05 Doğal Fotokoruma ve UV Direnci

Kimyasal koruyucu içermeyen geleneksel pamuk ve keten dokumalar yetersiz UV koruması sunarken; ham kenevir kumaşları uluslararası standartlarda (AS/NZS 4399, ASTM D6603) en yüksek kademe olan UPF > 50 derecesini kendiliğinden sağlar.[13]

Bu üstünlük ligninin kromoforik yapısından kaynaklanır. Aromatik halkalar ve konjuge çift bağlar, 280-400 nm dalga boyundaki (UVA ve UVB) yüksek enerjili fotonları doğrudan soğurur.[14] Delokalize pi-elektronları uyarıldıktan sonra bu enerjiyi dokuya ve cilde zarar vermeden, ışımasız iç dönüşümle düşük düzeyli ısıya çevirerek dağıtır.[15]

06 Termodinamik Denge ve Nem Kinetiği

Kenevir liflerinin ısıl iletkenlik katsayısı 0,022 ila 0,083 W/m·K aralığındadır.[16] Bu yalıtım yeteneği doğrudan hücre morfolojisinin sonucudur: Hücre merkezindeki lümen kanalı durgun hava cepleri barındırır. Havanın 0,026 W/m·K düzeyindeki ısıl iletkenliği sayesinde lif doğal bir termal direnç gibi çalışır; kışın vücut ısısını korur, yazın dış ortamdan gelen radyant ısıyı öteler.[17]

Kenevir, standart koşullarda %12 ila %13 nem geri kazanımına (regain) sahiptir (pamukta %8,5; polyesterde <%1).[18] Sekonder çeperdeki serbest hidroksil (-OH) grupları su buharıyla hidrojen bağları kurar.

KORUMA SINIFI	UPF DEĞER ARALIĞI	UV GEÇİRGENLİĞİ (%)	PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ
İyi Koruma	15 – 24	6,7 – 4,2	Temel seviye koruma
Çok İyi Koruma	25 – 39	4,1 – 2,6	Güçlendirilmiş açık alan koruması
Mükemmel Koruma	**40 – 50+**	**< 2,5**	**Tam fotokoruma (Ham kenevir kumaşı: UPF 50+)**



Şekil 3: Kenevir saplarının lif ayrıştırma (maserasyon/havuzlama) süreci, 1950 tarihsel belgesel arşiv kaydı.

Sorpsiyon Histerezisi ve Mikroklima Tamponlama

Sabit bağıl nemde, kuruma (desorpsiyon) sırasındaki denge nem oranı ıslanma (adsorpsiyon) evresinden daima daha yüksektir.[19] Bu histerezis olgusu kenevire yüksek Nem Tamponlama Değeri (MBV) kazandırır. Kenevir kumaşlar ciltteki buhar halindeki teri sıvılaşmadan önce bünyesine çeker; kılcal çekimle dış ortama ileterek yapışkanlık hissini bütünüyle engeller.[20]

07 Zamk Giderme ve Mühendislik Dengesi

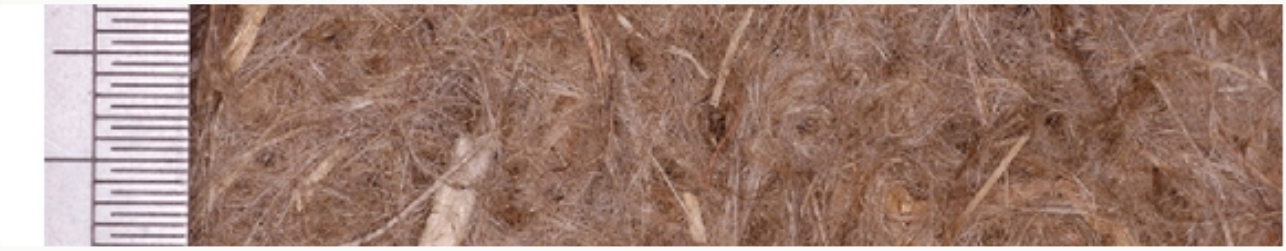
Kenevir lif demetlerini ayrıştırmada uygulanan yöntem lif inceliği ile doğal fonksiyonlar arasında bir takas yaratır. Çiğde havuzlama (dew retting) düşük enerjiyle çalışır; fakat iklim koşullarına bağımlıdır.[21] Suda havuzlama ise yüksek atıksu kirliliği nedeniyle terk edilmektedir.[22]

Modern lif mühendisliğinde pektinaz ve ksilanaz enzim sistemleri, selüloz omurgaya zarar vermeksizin pektini ve ksilan zincirlerini 5,5 saatte hidrolize eder (%75 pektin, %40 hemiselüloz giderimi).[23] Bu biyolojik süreç lif mukavemetini (>5,6 cN/dtex) korurken, biyoaktif lignini bünyede tutarak antimikrobiyal ve UV koruma kapasitesini muhafaza eder.[24]

08 Biyobozunurluk ve Fitoremediasyon

Sentetik liflerin aksine kenevir tekstilleri biyolojik karbon döngüsüne eksiksiz katılır. Toprak gömme testlerinde (ISO 11721), mikrobiyal selülaz, ksilanaz ve lakkaz enzimleri lifleri hızla parçalar.[25] Kompost ortamında kenevir 2 ila 4 ay içinde %100 kütle kaybıyla kalıntısız ayrışır; Karbon/Azot (C/N) oranını 11 seviyesinde dengeleyerek toprağın humifikasyonunu destekler.[26]

Tarım aşamasında ise kenevir kökleri kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) gibi ağır metalleri topraktan temizler.[27] Şiddetli kirleticili arazilerde dahi soymuk lifleri ağır metalleri dışlar (Cd < 0,59 mg/kg); böylece kullanıcı sağlığı riske atılmaksızın güvenli lif elde edilir.[28]



Şekil 4: Dokunmamış (non-woven) kenevir lif matı; kompozit takviyesi ve akustik/termal yalıtım paneli yapısı.

09 NOTLAR

1. P. Petit vd., "Physicochemical Properties of Hemp Fibers," *Bioresource Tech.* 340 (2021): 126.
2. J. Mussig, "Biomechanical Properties of Bast Fibers," *BioResources* 11 (2016): 4850.
3. N. Graupner ve J. Mussig, "Technical Aspects of Hemp," *Composites Part A* 118 (2019): 102.
4. K. Charlet vd., "Micro-Fibrillar Angle in Bast Fibers," *J. Mater. Sci.* 42 (2007): 154.
5. H. Lilholt, "Comprehensive Composite Materials: Organic Fibres" (Oxford: Elsevier, 2000), 303.
6. A. Bourmaud vd., "Microstructure of Industrial Hemp," *Ind. Crops Prod.* 112 (2018): 87.
7. C. Baley, "Morphological Porosity Under Heat Transfer," *Mater. Lett.* 56 (2002): 779.
8. M. Hughes, "Humidity on Tensile Behaviour of Hemp," *Composites Part A* 41 (2010): 1205.
9. R. Vanholme vd., "Lignin Biosynthesis and Structure," *Plant Physiol.* 153 (2010): 895.
10. S. Ralph vd., "Lignin Fractions in Industrial Hemp," *Phytochemistry* 68 (2007): 1120.
11. E. Ceballos vd., "Bacteriostatic Action of Phenolic Compounds," *Appl. Microbiol.* 98 (2014): 4511.
12. V. Radivojevic vd., "Bioactive Hemp Clothing with CBD," *Materials* 14 (2021): 6031.
13. AS/NZS 4399:2020, "Sun Protective Clothing Evaluation" (Sidney: Standards Australia, 2020).
14. Y. Lu vd., "Ultraviolet Protection of Hemp Fabrics," *Textile Res. J.* 88 (2018): 1823.
15. H. Liu vd., "Review of UV Radiation and Bast Textiles," *Cellulose* 31 (2024): 211.
16. M. Srebrenkoska vd., "Thermal Comfort Properties of Hemp," *Polymers* 17 (2025): 903.
17. G. Gourlay, "Moisture Buffering of Plant Fibers," *JTATM* 12 (2022): 1.
18. F. Collet vd., "Hygric Behaviour of Hemp-Starch Panels," *BioResources* 9 (2014): 6321.
19. H. Rahim vd., "Hygrothermal Behavior of Hemp: Hysteresis," *Build. Environ.* 165 (2019): 106.
20. D. Akin, "Microbial Communities in Hemp Retting," *Ind. Crops Prod.* 44 (2013): 323.
21. M. Tahir vd., "Traditional vs Bio-Retting Processes," *J. Cleaner Prod.* 211 (2019): 1102.
22. W. Zhou vd., "Alkaline Pectinase-Xylanase Degumming," *Textile Res. J.* 91 (2021): 2341.
23. S. Pang vd., "Ionic Liquids for Hemp Degumming," *ACS Sustainable Chem.* 12 (2024): 1560.
24. ISO 11721-1:2001, "Resistance of Cellulose to Micro-Organisms" (ISO, 2001).
25. A. Kowalska vd., "Biodegradability of Natural Fibers," *Agronomy* 15 (2025): 2700.
26. K. Smith, "Enzymatic Degradation in Soil Ecologies," *Appl. Soil Ecol.* 142 (2021): 88.
27. P. Angelini vd., "Phytoremediation by Industrial Hemp," *Agronomy* 13 (2023): 995.
28. M. Meers vd., "Hemp in a Phytoattenuation Strategy," *Environ. Pollut.* 298 (2022): 118.