

## Örümcek ipeği lifleri

### *Spider silk fibers*

İrem PALABIYIK\*<sup>1</sup>, Esen ÖZDOĞAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FG Tekstil Konfeksiyon San. Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, 35410, İzmir

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir

• Geliş tarihi / Received: 24.05.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 16.09.2024

### Öz

Örümcek ipeği, örümceklerin ipek bezleri aracılığıyla salgıladıkları doğal bir protein esaslı biyomalzeme ve bir tür biyoelastik lif olup, doğada üretilen en iyi malzemelerden biridir. Biyolojik olarak uyumlu ve biyolojik olarak bozunabilir özellikte olan örümcek lifleri çok hafif ve çok incedir. Bu lifler yüksek elastikiyetin yanı sıra, yüksek mekanik ve özgül mukavemete de sahiptir. Örümcek ipeği lifinin bu özellikleri, yüksek performans gerektiren birçok ürün için ideal bir alternatif sunar. Örümcek ipeği lifini doğal yollarla örümceklerden elde etmenin yanı sıra, kimyasal olarak örümcek ipeğinin üretiminde rekombinant DNA teknolojisi de kullanılır. Örümcek ipeğini oluşturan ana proteini üretmek için gerekli DNA alınıp, bakteri-maya, bitki, böcek veya memelilere yerleştirildikten sonra lif oluşumu gözlenir. Endüstriyel olarak örümcek ipeğinin özelliklerine sahip bir lifin geliştirilmesi yüksek performanslı lifler alanında umut verici bir potansiyel sunar. Günümüze kadar gelen çalışmalar neticesinde biyomimetik bilimi dahilinde birçok çalışma tekstil sektöründe uygulama alanı bulmuştur. Bu çalışma kapsamında incelenen ve özel lifler içerisinde yer alan örümcek lifleri, tekstil sektörünün birçok alanında potansiyel oluşturur. Bu çalışmada, örümcekler, örümceklerden lif eldesi, örümcek ipeği liflerinin özellikleri ve bu liflerin kullanım alanlarına yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Biyomimetik, İpek protein, Örümcek ağı, Örümcek ipeği

### Abstract

*Spider silk is a natural protein-based biomaterial, which is secreted through spiders' silk glands, and a type of bioelastic fiber, and is one of the best materials produced in nature. Spider silk fibers, which are biologically compatible and biodegradable, are very light and very thin. Besides having high elasticity, these fibers have high mechanical and specific strength, as well. Such properties of spider silk offer an ideal alternative for many products that require high performance. In addition to obtaining spider silk fiber from spiders by natural means, recombinant DNA technology is also used for the same purpose in a chemical manner. Fiber formation is observed after the DNA required to produce the main protein that forms the spider silk is taken, and then placed in bacteria-yeast, plants, insects or mammals. Industrially, the development of fibers with spider silk's characteristics offers a promising potential in the field of high-performance fibers. As a result of the studies to date, many studies within the scope of biomimetics science have found applications in textile sector. Spider fibers, which are one of the special fibers that present potential in many areas of the textile industry, are investigated in this study, as well. Here, spiders, obtaining fiber from spiders, properties of spider silk fibers, and the spider silk fibers' areas of use are included.*

**Keywords:** Biomimetic, Silk protein, Spider webs, Spider silk

\*İrem PALABIYIK; irempalabyk@gmail.com

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Tekstil, insanoğlunun zamana bağlı olarak değişen ihtiyaç ve istekleri ile şekillenen en büyük endüstrilerden biridir. Teknolojinin gelişimi, kaçınılmaz olarak tekstil ürünlerini de etkilemiştir. Tekstil sektöründe teknolojinin olanakları kullanılırken, aynı zamanda doğaya zarar vermeyen yenilikçi yaklaşımlar keşfetmek ve bunları daha sürdürülebilir tasarımlar ile bir araya getirmek büyük önem taşır (Mi vd., 2023).

Doğayı koruma, doğal olma isteği ve sürdürülebilirlik günümüzde ön plana çıkan değerlerdir. İnsanlara her kültürde ve çağda tekstil ürünlerini tasarlamada ilham kaynağı olmaya devam eden doğa, daha fazla gözlemlenerek yenilikçi yaklaşımlara ulaşmayı mümkün kılar (Sevencan & Üreyen, 2020).

Biyomimikri veya Biyomimetik kavramları, yaşam ve taklit etme kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve doğadan ilham alarak yeni ürünler geliştirme veya tasarımlar yapma olarak tanımlanır. Doğadaki canlılardan mühendislik yöntemlerini kullanarak çözüm üreten, canlıların biyolojik yapılarını, hareketlerini ve diğer konuları mühendislik bilgisiyile açıklayan biyomimetik ile bilim insanları doğadaki canlıların özelliklerini saptayarak ve bu özelliklerden ilham alarak bazı ürünlere fonksiyonel özellikler kazandırıp, performanslarını arttırmışlardır (Mi vd., 2023).

Sürdürülebilir kalkınma bugünün dünyasında ortak bir tema haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınmayı karşılayan biyomalzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi de giderek daha önemli hale gelmektedir.

Doğal biyolojik malzemeler arasında örümcek ipeği, mükemmel kapsamlı özellikleri ile giderek daha fazla bilim insanının ilgisini çekmektedir. Örümcek ipeği, örümceklerin vücutlarındaki ipek bezleri aracılığıyla salgıladıkları protein esaslı bir biyomateryal ve bir tür biyoelastik lif olup, doğada üretilen en iyi malzemelerden biridir. Binlerce yıl önce bile insanlar örümcek ipeğinin uygulama değeri hakkında önemli bir bilgiye sahipti. Eski Yunanlılar kanamayı durdurmak ve yaraları iyileştirmek için, yerliler de olta malzemesi olarak örümcek ipeğini kullanmışlardır. Örümcek ipeği son yıllarda en çok araştırılan bilimsel konulardan biri olmuş ve çeşitli alanlarda büyük uygulama potansiyeli ile ticari değere ulaşmıştır (Gu vd., 2020).

Örümcek ipeği, olağanüstü mekanik mukavemete, bileşime, diğer doğal lifler ve sentetik liflerle kıyaslanamayacak yükseklikte bir özgül mukavemete, mükemmel elastikiyete ve süper dayanıklılığa sahiptir. Örümcek ipeği ağırlığı itibarıyla, aramid lifinden üç kat ve çelikten de beş kat daha sağlamdır. Şiddetli bir rüzgarın kuvvetini orijinal uzunluğundan %40 daha fazla uzatarak karşılayabilmektedir. Sabahları ipek liflerinin büzüşmesi, sabah çiğine maruz kalan örümcek ağının yüzey alanının azalmasını ve böylece çiğ bir çöküntüye sebep olmadan örümcek ipeği tarafından emilmesini sağlar. Ağın esnekliği sayesinde absorbe edilen yüksek miktarda enerji, onu parçalanmaktan korurken, aynı zamanda örümceğin kurbanlarının ölüm tuzağından kurtulmalarını da engeller (Heim vd., 2009).

Örümcek ipeğinin bu mükemmel özellikleri, yüksek performans gerektiren birçok ürün için ideal bir malzeme olarak kabul edilmesini sağlar. Ayrıca, örümcek ipeğinin biyo-bozunurluğu ve biyo-uyumluluğu; yapay tendonlar, bağlar, doku onarım malzemeleri, cerrahi dikişler vb. gibi tıbbi uygulamalar için de uygun bir malzeme olmasını sağlar (Gu vd., 2020).

Örümcekler, 400 milyon yıldır ipek üretmektedir, ancak plastikten iki kat esnek, çelikten beş kat sağlam ve aynı zamanda su geçirmez özellikte olan bu mucize lifin sırrı hala tam anlamıyla çözülememiştir (Öcal vd., 2021; Gu vd., 2020). Örümcek ağının bu özelliklerini günümüzde üretilen hiçbir malzemede bir arada bulmak mümkün değildir (Ersanlı, 2016). Örümcek ipeğinin bu eşsiz özelliklerine sahip liflerin endüstriyel olarak üretilmesi yüksek performanslı lifler alanında umut verici bir potansiyel sunar.

Bu çalışmada, örümceklerden lif eldesi ve özellikleri ile örümcek ipeği liflerinin yüksek dayanım ve performans özelliklerine sahip yapay lif geliştirme çalışmaları ve bunların uygulama olanaklarına değinilmiştir.

## 2. Örümcekler

### 2. Spiders

Ağ örme doğada örümceklere has bir özellik olduğundan “örümcek” kelimesi örme ve böcek kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur (Gürarslan, 2012). Örümcekler, sistematik sınıflandırmaya göre *Arthropoda* (eklem bacaklılar) şubesinin *Arachnida* (örümceğimsiler) sınıfı içindeki *Araneae* (örümcek) takımına dahildir. Dünyada 117 familya, 4.118 cins ve yaklaşık 48.000 tür ile çok farklı habitatlarda yaşayabilen örümceklerin ortam nem ve sıcaklığına bağlı olarak metabolizmaları ve davranışları etkilenmektedir. Bu nedenlerle örümceğin ipek çekim hızı, enzim aktivitesi ve ipek üretim süreci koşulları değişiklik gösterdiğinden örümceklerin ürettiği ipek lifi de etkilenmektedir (Öcal vd., 2021; Saravanan, 2006; Çavuşoğlu vd., 2006; Çavuşoğlu & Yalçın, 2007; Vollrath, 1999).

Örümcekler ağlarını avlanmak veya yumurtalarını korumak gibi çeşitli yaşamsal faaliyetler için üretir. Şekil 1’de örümcek ve ağı verilmiştir.



Şekil 1. Örümcek ve ağı (Wagh, 2021).  
Figure 1. The spider and its web (Wagh, 2021).

## 3. Örümcek ipeğinin yapısı ve karakteristikleri

### 3. Characteristics and structure of spider silk

Örümceklerin sadece üçte biri ağ örebilir. Örümcek türlerinin ağ yapıları ve ağ örme şekilleri oldukça önemli olup, her türün kendine özgü ağ örme biçimi bulunur. Her bir ağ bezi örümceğin vücudundaki bir memeye bağlanmış olup, bu bezler morfolojik ve histolojik olarak altıya ayrılır. Her bir bez, farklı türde ipek salgılar ve bu ipekler farklı amaçlar için kullanılır. Örümcekler, çevreleri ile arasındaki etkileşimleri, bu ipekli ağla sağladıkları için, ipeğin elde edildiği örü aygıtının morfolojik özellikleri evrimsel süreçte kazanılmıştır. Örümcek ipeğinin üretildiği kısımların fonksiyonel morfolojisi; örü memelerinin modifikasyonlarını, örme tüplerinin sayısını, örme türlerinin morfolojisini ve ipek bezlerinin anatomik özelliklerini içerir. Bu yüzden, ipeğin elde edildiği kısmın tümü, farklı tip ve kalınlıkta ipek liflerinin çıktığı çeşitli örme tüpleri ile donatılmıştır (İkinci, 2010; Öcal vd., 2021).

Ağ yapmak için gelişmiş üç çift örü memesi ve her bir örü memesinde de yaklaşık 2 ile 50.000 arasında ince kanalcık bulunur. Bu kanalcıklardan dışarı çıkan sıvı ve yapışkan madde hava ile temas edince katlaşıp, lif formunu alır. Örümcekler, iki arka bacaklarının üzerinde bulunan özel taraklar ile bu salgıları lif olarak eğirir. Bir örümcek ağ yapmaya başladığında önce tırmanarak ağın ucunu yapıştırır, daha sonra da bu lif yardımıyla aşağıya doğru süzülerek ulaştığı bir başka hedefle bağlantı kurar. Daha sonra lifler üzerinde gidip gelerek ördüğü ağı kalınlaştırır. Vücudundan çıkmaya devam eden lifin bir ucunu ilk life tutturarak kendini boşluğa doğru bırakmakta ve birkaç defa gerçekleşen gidiş gelişle ağın iskeletini oluşturmaktadır. En sonunda ise iskeletin merkez noktasının çevresinde halkalar oluşturularak ağını tamamlamaktadır (İkinci, 2010; Öcal vd., 2021).

*Araneus diadematus* ve *Nephila calavipes* gibi bazı örümcek türlerinden örümcek ipeği elde edilir. Örümcekler, sahip oldukları salgı bezlerinden, özel epitel hücreleri içinde sentezlenen, protein yapıda lif salgırlar (Hinman vd., 2000; Saravanan, 2006; Perera vd., 2023).

Şekil 2’de örümceğin lif üretim organları ve ürettikleri lifler gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Örümceğin lif üretim organları ve lifleri (Biørnstad, 2014).

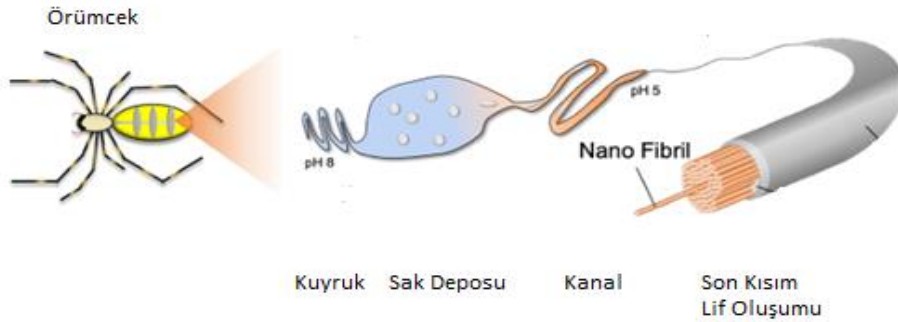
**Figure 2.** Fiber production organs and as-produced fibers of spider (Biørnstad, 2014).

Bütün ipek lifleri protein yapıda ve fibroin şeklindedir. Örümcek ipeği lifi, uzun aminoasit zincirlerinden meydana gelmekte ve genellikle örümcek fibroinleri veya esasen ana proteini olan, spidroin adlı yapısal proteinlerden oluşur. Bu proteindeki amino asitler helezonik yapıda olup, gevşek hidrojen bağlarıyla birbirlerine bağlanmışlardır. Örümcek ipeği proteinlerinin amino asit dizisine çevrilmesi, örümcek ipeği bezinin en üst kısmında bulunan endotel hücrelerinde gerçekleşir. Bu hücreler geniş bir endoplazmik retikulum (ER) ve çok sayıda salgı keseciği barındırır (Heim vd., 2009).

Fibroinler örümceğin ana ampullat bezinde, 8-10 amino asit uzunluğunda bir poli-alanin ve 24-35 amino asit uzunluğunda glisin açısından zengin bir blok içeren çok sayıda tekrarlar şeklinde üretilir. Fibroinler life dönüştüğünde, poli-alanin blokları  $\beta$ -tabaka kristalleri oluşturmakta ve bunun sonucu olarak çapraz bağlanan fibroinler polimerik ağ yapısına büyük bir mukavemet, sertlik ve aynı zamanda tokluk kazandırır. Ağ maddesinin aminoasit dağılımının, ağın değişik kısımlarında farklı olduğu ve kokon veya boru şeklindeki barınak iç döşemelerinde kullanılan ipeğin farklı aminoasitler içerdiği önceki araştırmalarda belirlenmiştir (Öcal vd., 2021; Sponner vd., 2005; Singha vd., 2012; Ersanlı, 2016).

Örümceklerin lif eğirme bölgesi Şekil 3’te görüldüğü gibi dört ana kısımdan oluşur (Rat vd., 2018).

Örümceğin kuyruk kısmında, spidroin adı verilen örümcek ipeği proteinleri sentezlenir. Sak/Ampula kısmında ise spidroinler depolanır ve misel şeklindeki yapılar, diğer bileşenlerin eklenmesiyle oluşturulur. Kanal kısmında, sıvı kristal formdaki yapı sabit bir uzama akışına maruz kalmakta ve bunun yanı sıra iyon değişimi, asidikleşme ve suyun uzaklaştırılması gibi oluşumlarla faz ayrımı gerçekleşir. Son kısım ise ipeğin dışarıya çıktığı kısımdır (Çetin & Denizli, 2016).



**Şekil 3.** Örümcek ipeğinin eğirme işleminin şematik gösterimi (Watanabe & Arakawa, 2023).

**Figure 3.** Schematic representation of the spinning process of spider silk (Watanabe & Arakawa, 2023).

Ağ bezlerinde sıvı durumda bulunan madde dışarı çıkar çıkmaz katılaşmakta ve molekül ağırlığı da 10 kat artmaktadır. Sıvı ipek, katılaşma ile elastik ve yüksek dirençli bir hal almaktadır (Öcal vd., 2021; Sponner vd., 2005; Singha vd., 2012; Ersanlı, 2016).

Her bir örümcek, vücudunda binlerce lif bezi barındırabilir. Her biri farklı olan bu lif bezleri çeşitli amaçlara hizmet etmek için temel olarak yedi sınıfta toplanır. Bu bezlerde oluşan farklı ipek liflerinin mekanik özelliklerini peptit kısımları sağlamakta ve bu yedi farklı örümcek ipeği türünün kopma mukavemeti değerleri 0.02 GPa'dan 1.7 GPa'ya kadar değişiklik gösterirken, uzama değerleri ise %10-500 arasında değişkenlik gösterir (Çetin & Denizli, 2016; İkinci, 2010; Hinman vd., 2000; Hsia vd., 2012).

Büyük ampul ipeği, aynı adlı bezden üretilir. Ağırlığı >300 kDa ve inceliği (çapı) 1-20 µm arasında olup, çekirdek-kabuk yapısında ve orta düzeyde esneklik ile yüksek dayanıma sahiptir. Spidroin 1 ve 2 isimli iki önemli proteinin 3-5 disülfür bağları üzerinden birbirine bağlanması ile yapısı oluşur (Hinman vd., 2000). İçeriğindeki diğer aminoasitler glisin, alanin ve prolin olup, bu ipek; ağ yapılırken, diğer liflerin bağlanması sırasında iskelet görevi görür. Bunun yanı sıra, herhangi bir tehlike durumunda örümceğin diğer bir türden kaçması için de yardımcı olur (Thirugnanasambantham vd., 2020; Çetin & Denizli, 2016; Singha vd., 2012; Rat vd., 2018).

Küçük ampul bezinde üretilen proteinlerden yapılan küçük ampul ipeği de büyük ampul ipeği ile benzer mekanik özelliklere sahiptir. Bu ipeğin ağırlığı >250 kDa olup, kopma mukavemeti değeri büyük ampul ipeğinkine yakın, ancak elastikiyeti daha düşüktür. Bu ipeğin yapısını oluşturan spidroin 1 ve 2 proteinlerinde prolin neredeyse hiç bulunmaz. Ağ yapılırken sarmal olarak üretilir ve ağ iskelesini geçici olarak sabitleyip, dengede kalmasını sağlar. Küçük ampul ipeği, büyük ampul ipeğine kıyasla daha homojen bir yapıda olan, daha ince bir lifdir (Çetin & Denizli, 2016; Hinman vd., 2000; Saravanan, 2006).

Tek tür proteinden oluşan flageliform ipeği, ~500 kDa ağırlığa sahiptir. Kamçılı form olarak bilinen bu ipek türünün, büyük ampul ipeğine kıyasla alanin miktarı daha düşük, prolin ve valin içeriği ise daha yüksektir ve büyük ampul ipeğinden daha fazla elastikiyete sahiptir (Hinman vd., 2000; Heidebrecht vd., 2015). Bu ipek, örümceğin avının kinetik enerjisini dağıtmak için tasarlanmış olan ve tek bir flageliform ipek proteininden oluşan yakalama sarmallarının üretiminde kullanılır (Öcal vd., 2021). Bu ipeğin yapışkan olmaması nedeniyle, Ekribellat örümceklerinin yakalama spirali, yakalanan avı ağa bağlamak için agrega ipek bezi tarafından salgılanan ek bir yapışkan kullanır (Heim vd., 2009).

Tubuliform ipeği, aynı adlı bezlerde üretilmekte ve örümcek yumurtalarını korumak için gerekli olan sert dış yapıyı oluşturmada kullanılır.

Asiniform ipeği, yakalanan avı sarmak ve yumurta kılıflarının iç kısmını oluşturmak için kullanılır (Öcal vd., 2021; Çetin & Denizli, 2016).

Agrega ipeği, yapışkan glikoproteinler ve nem tutma yeteneği yüksek peptitlerden oluşur (Çetin & Denizli, 2016). Yakalama spirali üzerindeki damlacıkları oluşturan ve agrega bezlerinden kaynaklanan yapışkan bir saldırı ipeğidir (Vollrath, 1999).

Piriform ipeği de aynı adlı bezden üretilen ve bağlantı yerleri ile eklerin bağlanmasında kullanılan yapıştırıcı işlevli ve protein esaslı bir yapıştırıcı olup, büyük ampul iskelesinin farklı yerlere yapışmasını sağlar (Öcal vd., 2021).

Aminoasit dağılımı, ağın farklı kısımlarında değişiklik gösterir. İpekler, farklı türde aminoasitler içerir ve farklı türdeki örümcekler de farklı tiplerde ipekler üretir. Aynı tip örümceklerin farklı çevresel koşullar altında ürettikleri ipeklerin mekanik özellikleri değişkenlik gösterebilir. *Nephila clavipes* ve *Araneus diadematus* örümcek türleri, en güçlü ipekleri üretir. *Nephila clavipes*'in %65 bağıl nem altında fibroin içeriğinin %90 olduğu bilinmektedir. *Araneus diadematus* ipek fibroinin moleküler yapısı 100°C sıcaklığa 50 saat maruz kaldığında bile olumsuz etkilenmemekte ve 180°C sıcaklığa kadar fonksiyonel özelliklerini korumakta olup, 230°C sıcaklığa kadar ısı kararlılığına sahiptir ve bozunması >250°C'de gerçekleşir (İkinci, 2010; Vollrath, 1999; Singha vd., 2012; Saravanan, 2006).

Fibroinler örümceğin ana ampullat bezinde üretilir. Bu lifler, 5-10 aminoasit uzunluğundaki polialanin dizisindeki alanin aminoasitleri ile glisin açısından zengin 24-35 aminoasit dizisi boyunca çok iyi bir şekilde düzenlenmiş yarı kristal polimerlerden oluşur. Fibroinler liflere dönüştüğünde, poli-alanin blokları proteine direnç kazandıran  $\beta$  yaprak konformasyonunu oluşturur ki bu yapıda, çapraz bağlanan fibroinler polimer ağ yapısına yüksek mukavemet, sertlik ve tokluk kazandırır (Öcal vd., 2021).

*Nephila clavipes*'in dragline ve ampullat ipeğinin, spidroin 1 ve spidroin 2 olarak adlandırılan iki proteinin bileşimi olduğu düşünülmektedir. Bu yapıların büyük bir kısmı %42 glisin ve %25 alaninden oluşurken, tirozin, glutamin, arjinin, serin ve lisin gibi aminoasitler geri kalan kısmını oluşturur. Örümcek ipeği altın sarısı renkte olup, ortalama çapı 7  $\mu$ m'dir ve enine kesiti de daireseldir. Örümcek ipeği de protein yapısında olmasına rağmen, diğer proteinlerden farklı olarak, yapısında bulunan pirolidin, potasyum hidrojen fosfat ve potasyum nitrat nedeniyle küf ve bakteriler tarafından parçalanmamaktadır. Burada, pirolidin suyu bağlayarak ipek liflerinin kurummasını önlerken, potasyum hidrojen fosfat ve potasyum nitrat ise liflerin asidik ve tuzlu bir yapıda olmasını sağlayarak küf ve bakteri çoğalmasında engel olur (Sponner vd., 2005; Saravanan, 2006; Thirugnanasambantham vd., 2020; Lewis, 199; İkinci, 2010).

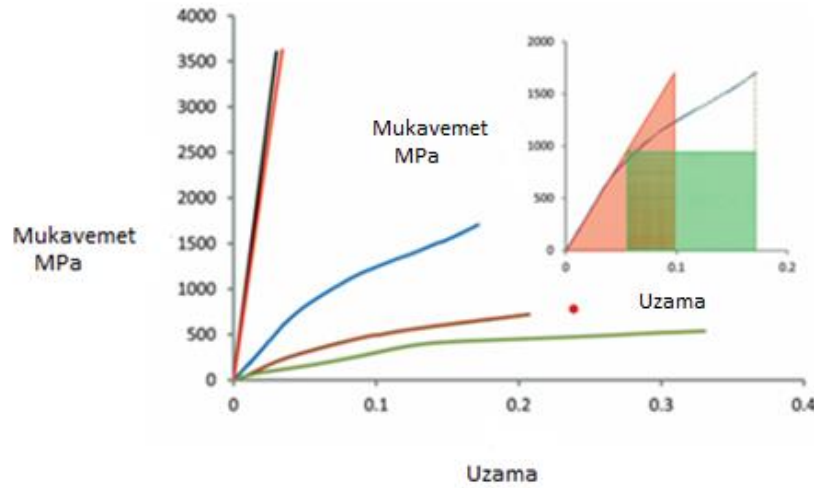
Bahçe örümceği olan *Araneus diadematus*'un ağında glisin oranı %20 iken, ağın çerçeve kısmında %24, kokonlarında %12 ve liflerin üzerinde bulunan yapışkan disklerde ise %25 olarak belirlenmiştir. Darwin'in ağaç kabuğu örümceği (*Caerostris darwini*) ise, son derece uzun eğirme kanallarına sahip olan ipek bezlerini kullanarak küre şeklindeki en büyük ağları örebilmektedir. Diğer ipeklerden iki kat daha sert olan bu dev küre ağlar, bilinen en sert biyolojik materyallerden birisidir (Garb vd., 2019; Öcal vd., 2021; Saravanan, 2006).

Örümcek ipeği doğal bir polipeptid olup, etrafı kolajen ve keratinle sarılmış bir polimerik sklero proteindir. Yapıyı oluşturan spidroin 1 ve spidroin 2'nin bir kombinasyonu olan bu protein, tutunma ağındaki ipekte lifimsi bir biçimde yer alır. Bu proteinlerin esas kompozisyonu, örümceğin cinsi ve beslenme şartlarına bağlıdır ki bu nedenle, örümcek liflerinin özellikleri, örümceğin türüne bağlı olarak farklı kimyasal ve fiziksel özellikler gösterir (İkinci, 2010).

Ana ampulla içinde depolanan sıvı proteinler katlanmamış ve düzensiz bir ikincil yapıya sahipken, örümceğin ipek üreten organlarından geçerken konformasyonlarını ve yönelimlerini değiştiren değişikliklere uğrarlar. Doğal sıvı ipeğin, çözünmeyen liflere dönüştürülmesini içeren bu süreç, kimyasal ve mekanik bir dizi olayla meydana gelir ki bu olaylar arasında pH, tuz konsantrasyonu ve uzama akışındaki değişimler yer alır. Protein molekülleri örümceğin lif üreten organına dar tüplerden geçerek ilerlerken sıralanır ve lif eksenine paralel bir şekilde kısmen kristal bir görüntü oluşturur. Bu tip bir hareket tarzı, hiyerarşik olarak organize edilmiş yarı kristal bir malzemenin ortaya çıkmasına neden olur. Kristalin bölge, polialanin bölgelerinin katlanmış  $\beta$  tabakaları oluşturmak için hidrojen bağları aracılığı ile birbirlerine bağlandığı moleküllerin kendi kendine toplanması şeklinde oluşur. Söz konusu  $\beta$  tabakaları, protein molekülleri arasında çapraz bağ görevi görür ve ipeğe yüksek dayanım kazandırır. Amorf faz ise glisin açısından zengin bölümlerden oluşur ve örümcek ipeğinin yüksek elastik özellik kazanmasını sağlar. Örümcek ipeğinin ana kimyasal bileşenleri glisin, alanin ve az miktarda serindir. Örümcek ipeğindeki büyük çapta amino asitlerin alanin ve glisin olması yalnızca bir rastlantı değildir. Bunlar en küçük amino asitlerdir ve kristalin bölgelerin en kolay şekilde oluşması için birbirlerine sıkıca sarılabilecekleri şekilde büyük yan gruplar içermezler. Kristalin bölgeler örümcek ipeğinin katılması sırasında su kaybetmesine yardım edecek şekilde hidrofob yapıdadır ve bu durum, ipeğin neden çözünmediğini de açıklar. Su molekülleri güçlü hidrojen bağları ile bağlanmış  $\beta$  tabakalarının içine nüfuz edemezler. Örümcek ipeğinin tahmin edilen morfolojik yapısının, amorf bir matriks içinde kristal bölgeler şeklinde olduğu düşünülmektedir (Beşoğlu, 2019; Hsia vd., 2011).

İpek lifleri genel olarak ipek böceğinden elde edilirken, daha dayanıklı ve daha ince olan bu ipek, örümcekler tarafından üretilir (Gu vd., 2020). Örümceklerden elde edilen bu lifler, yumuşak ve parlak olup, tüm doğal lifler içinde en ince ve en uzun olmasının yanı sıra, kimyasal liflerle karşılaştırılabilir seviyede dayanıma sahip, olan en sağlam doğal liftir. Doğal örümcek ipeğinin kopma gerilimi 800-1400 MPa ve kopma uzaması 0,2-0,3 mm/mm iken, rekombinant örümcek proteini ipeğinin kopma gerilimi 508 MPa ve kopma uzaması da 0,2 mm/mm'dir. Örümcek ipekleri -60°C ila 0°C arasındaki düşük sıcaklıklarda mükemmel özellikler sergiler. Yüksek mukavemete sahip olan bu lifler, esnekliği de beraberinde bulundurması nedeniyle olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir (Atav & Karaboğa, 2017; Thirugnanasambantham vd., 2020; Singha vd., 2012; Öcal vd., 2021; Gu vd., 2020).

Şekil 4'te örümcek ipeği liflerinin ve diğer liflerin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir.



**Şekil 4.** Örümcek ipeği liflerinin ve diğer liflerin kuvvet-uzama eğrileri (siyah: kevlar, kırmızı: ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, mavi: örümcek ipeği, kahverengi: serisini giderilmiş ipekböceği ipeği, yeşil: orta mukavemetli Naylon 6.6.) Dragline ipeğinin tokluğu kırmızı alanda enerji kazanımı gösterirken yeşil alan enerjinin kazanımının olmadığını gösterir (Porter, 2013).

**Figure 4.** The stress-strain curves of spider silk fibers and other fibers: black: Kevlar, red: UHMWPE, blue: dragline silk, brown: degummed silkworm silk, green: medium tenacity Nylon 6.6. Inset shows recoverable (red) and non-recoverable (green) energy contributions to toughness for dragline (Porter, 2013).

Kevlar lifinden üç kat daha sert ve çelikten beş kat daha güçlü olabilen örümcek ipeği lifleri, pamuktan hafif, saç telinden daha ince, suda çözünür, biyolojik olarak uyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilir özelliindedir (İkinci, 2010; Thirugnanasambantham vd., 2020; Şevkay & Bayburtlu, 2020). Örümcek liflerinin bu etkileyici özelliklerinin kaynağını benzersiz moleküler yapılar oluşturmaktadır.

#### 4. Örümcek ipeğinin farklı yöntemlerle eldesi

##### 4. Obtaining spider silk with different methods

Örümcek ipeği proteinlerinin yeterli miktarda ve uygun maliyetli bir şekilde üretilebilmesi, örümcek ipeğinin yüksek performanslı malzeme olarak uygulanması için esastır (Connor vd., 2024).

Örümceklerden lif elde etmenin birinci yolu, ipek lifini doğal yollarla örümceklerden elde etmektir. Bu yolla lif elde etmek için Oxford Üniversitesi'nde Vollrath ve ark. Nephila clavipes isimli örümceğin ipeğini küçük bir elektromotor yardımıyla doğrudan makaraya sarmayı başarmışlardır. Bu çalışmada toplanan örümcek ipeği genel olarak örümcek ağının ana yapısını oluşturan büyük ampulat ipeği ve ağ yapının ana iskelesinin oluşmasına yardım eden küçük ampulat ipeğinden oluşmuştur. Her bir etapta 20 ila 80 m civarında ipek elde edilebilmiştir (Çetin & Denizli, 2016).

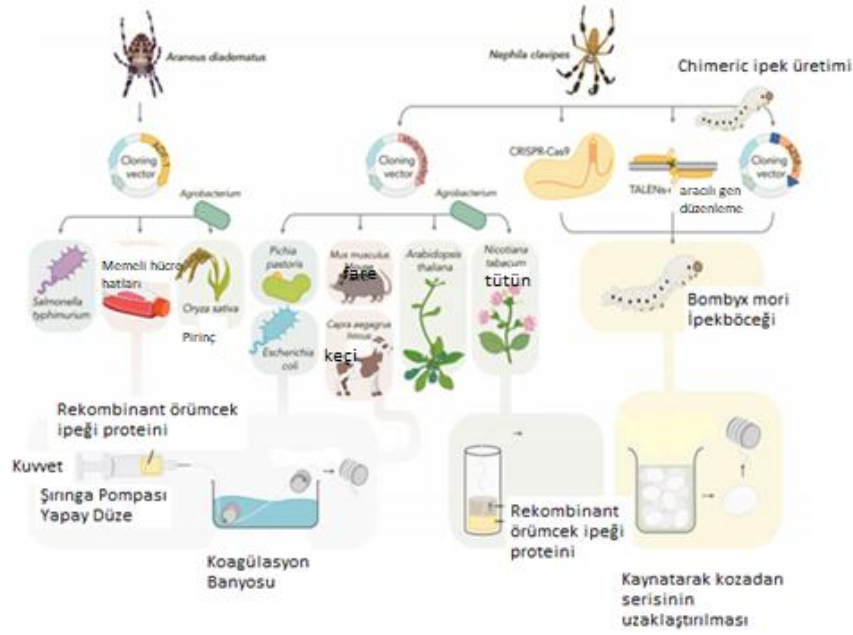
Bombyx mori ipekböceği tarafından üretilen ipek proteinlerinin aksine, ipek lifinin doğal yollardan büyük miktarlarda üretilmesi, örümceklerin bölgesel ve yamyamlık davranışları nedeniyle zordur. Ayrıca, her bir türün farklı ipek üretmesi ve sentezlenen miktarların sınırlı olması gibi sebeplerden dolayı bu lifin doğal yöntemlerle ticarileşmesi zor olmaktadır (Gu vd., 2020; Mi vd., 2023; Connor vd., 2024; Su vd., 2024).

Kimyasal olarak örümcek ipeği sentezlemenin zorluğu, örümceğin ipeği ürettiği anda sıvı olması ve havayla temas eder etmez katılaşmasıdır. Bu sorunu çözmek ve laboratuvarında gerçekleştirmek henüz tam olarak başarılammıştır. Örümcek ipeğinin yapısında bulunan spidroin 1 ve 2 tipindeki iki proteinin ayrı ayrı çalışılmasının gerekmesi, karşılaşılan yaygın zorluklardan bir diğeridir (İkinci, 2010).

Bilim ve teknolojinin gelişmesi, aynı zamanda insanların yeni malzemelere olan taleplerinin artması gibi nedenlerle, örümcek ipeği liflerinin araştırılması ve geliştirilmesi giderek daha fazla ilgi görmektedir (Iqbal, 2023; Connor vd., 2024; Su vd., 2024). Bilim insanları, kimyasal olarak da örümcek ipeği liflerini üretmeye

çalışmaktadır. Bu amaçla, etkili bir yöntem, örümcek ipeği yapısını ve oluşum ilkesini diğer insan yapımı malzemelere uygulamak için biyo-teknolojiyi kullanmaktadır. Son yıllarda, genetik modifikasyon, fonksiyonel polimerler ve nanoteknoloji gibi ileri teknolojilerin gelişmesiyle birlikte, araştırmacılar örümcek ipeğinin bileşimini, yapısını ve özelliklerini derinlemesine araştırmaya başlamışlardır. Bugüne kadar, örümcek ipeği proteinlerinin rekombinant üretimi, endüstriyel ölçekte üretim kurmanın en umut verici yolu olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle bilim insanları çeşitli klonlama ve üretim stratejileri geliştirmek için büyük çaba harcamışlardır. Biyo-teknoloji alanında meydana gelen gelişmeler kapsamında, rekombinant DNA teknolojisi ile spidroin üretmek için gerekli olan DNA alınarak, ilgili farklı bir organizmaya yerleştirildikten sonra, ipek lifi oluşumu gözlenebilmektedir (Singha vd., 2012; Zhanga vd., 2019; Kluge vd., 2008; Çerkez, 2007). Rekombinant protein üretiminin gerçekleştirilebilmesi için, örümceğin DNA dizilimi ile ev sahibi (konak) canlının DNA dizilimi birleştirilebilecek şekilde uyumlu olmalıdır. Örümcek ipeği proteinlerinin DNA dizilimi uzun zaman önce belirlenmiş olup, örümcek genleri de, transgenik teknoloji ile yüksek miktarda örümcek ipeği proteinini üretmek için bakteri, maya, memeli hücreleri, böcek hücreleri, transgenik bitkiler ve transgenik hayvanları içeren çeşitli konakçı organizmalara aktarılabilir (Connor vd., 2024; Su vd., 2024).

Örümcek ipeği uygulamalarını geliştirebilmek adına bu yöntem gelecek vadetmekle birlikte, bazı kısıtlamaları da söz konusudur. Rekombinant bakteri ve maya kullanılarak az miktarda ipek üretilebilmesine rağmen, ipeğin sürekli ve kararlı olması sağlanamamaktadır. Büyük ölçekli üretimin gerçekleştirilebilmesi için hem yüksek verimli hem de uygun maliyetli heterolog bir ipek üretim sistemi gereklidir. Rekombinant spidroini kodlayan genler, bitki, bakteri, maya, böcek ve memeli hücrelerine transfer edilebilmekle beraber, rekombinant spidroinlerin heterolog üretiminde giderek daha çeşitli konak platformlarından yararlanılması konusundaki araştırmalar da devam etmektedir (Beğiç, 2020; Kiseleva vd., 2020; Lewis, 1996; Li vd., 2020; Hinman vd., 2000) Şekil 5'te rekombinant örümcek lifi üretiminde kullanılan ana konak sistemler verilmiştir (Whittall vd., 2020).



**Şekil 5.** Rekombinant örümcek lifi üretiminde kullanılan ana konak sistemler (Whittall vd., 2020).

**Figure 5.** The main host systems used in the production of recombinant spider fiber (Whittall vd., 2020).

Örümcek ipeği endüstrisini geliştirebilmek için rekombinant DNA teknolojisi alanındaki uygulamalar aşağıda verilmiştir.

#### 4.1. Bakteri ve mayalardan hareketle örümcek ipeği eldesi

##### 4.1. Obtaining spider silk through bacteria and yeast

Örümcek ipeği üretiminden sorumlu genleri bakteriye transfer ederek örümcek ipeği proteinlerini üretme ve proteinlerin ipek liflerine dönüşümünü sağlama çalışmaları devam etmektedir. *E. coli* bakterisi; üretim süresinin kısa olması, az bakım gerektirmesi, genetik olarak kolay değişebilmesi ve biyo-reaktörlerde üretim



kapasitesini hızla arttırabildiği için araştırmalarda tercih sebebi olmuştur. Araştırmacılar, üretime başladıktan 3-4 gün sonra örümcek ipeğini elde etmişlerdir. Ancak elde edilen bu ipeğin hem veriminin düşük, hem de rekombinant DNA teknolojisiyle üretilen spidroinlerin (30-110 kDa) doğal olanlardan (300-350 kDa) daha küçük olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, spidroin proteinlerinin karmaşık olması ve boyutunun büyük olması nedeniyle, *E. coli* bazlı sistemlerin spidroinleri liflere bağlamakta zorluk yaşadığı ve ayrıca, pahalı saflaştırma adımları gerektirdiği de ifade edilmektedir. Bu yolla ipek liflerine dönüşüm sağlanabildikten sonra, mekanik özelliklerin test edilmesi hedeflenmektedir. Proteinlerin dayanımını arttırmak, doğal ipek proteini ile yapay ipek proteini arasındaki farklılıkları ortadan kaldırmak ve bakteri üretim hızlarını arttırabilmek bu hususta önem arz etmektedir (Blamires vd., 2020; Hinman vd., 2000; İkinci, 2010; Whittall vd., 2020; Heim vd., 2009).

Örümcek ipeğini taklit eden biyo-mühendisler, bakterilerden ürettikleri malzeme ile kutup koşullarında kullanıma yönelik bir ceket geliştirmişlerdir. Hafif, çevre dostu, çelikten dört kat sağlam ve naylondan daha esnek olan bu sentetik örümcek ipeğini Japon şirketi Spiber seri olarak üretmiş ve kumaş haline getirmiştir. Kopmadan önce çok yüksek miktarda enerji emebilen bu sağlam malzemeden hareketle, 2015 yılında dış mekan kıyafetleri üreticisi The North Face markası ile ortak bir çalışma yürütmüşler ve dışı sentetik örümcek ağından liflerle dokunmuş olan "Moon Parka" isimli paltoyu üretmişlerdir (Şekil 6) (Değerli, 2019; Begiç, 2020).



**Şekil 6.** Örümcek ağından elde edilen liflerle dokunmuş palto (Popular Science Türkiye, 2015).  
**Figure 6.** Coat woven with fibers obtained from a spider web (Popular Science Turkey, 2015).

Örümcek ipeğinin üretiminde başarılı sonuçlar sağlayan, genetik olarak işlenmiş bakterilerin kullanımı, balık asalağı salgısı liflerinin üretiminde de denenmekte ve burada, balık asalağı, ara filament proteinlerini üreten DNA bakterilerine aktarılarak, bu proteinin bakteriler tarafından üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple, örümcek ipeğinin üretiminde kullanıldığı gibi, balık asalağı liflerini oluşturan protein geninin bakterilere aktarılarak bu liflerin üretiminin de bakterilerin yardımı ile gerçeleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu konuda henüz net bir sonuç elde edilememiş olsa da Kanada'daki Guelph Üniversitesi'nde araştırmalar halen devam etmektedir (Kalaycı vd., 2016).

Bakteriye alternatif bir diğer mikrobiyal üretim sistemi de mayadır. İpek lifi yapımında *Pichia pastoris* ve *Saccharomyces cerevisiae* mayalarının kullanımları incelenmiştir. Bu teknik ile yetiştirme ortamına ipeği direkt salgılama avantajı bulunduğundan, daha az saflaştırma adımına ihtiyaç duyulmakta ve daha yüksek protein veriminin yanı sıra, düşük maliyetli fermantasyon da sağlanmaktadır. Ökaryotlarda daha büyük ipek proteinlerinin üretimi mümkündür. Ancak burada da, spidroinlerin boyutu sorun oluşturmaya devam etmektedir. Bu kapsamda, rekombinant maya ve bakteri kullanılarak çok az miktarlarda üretilebilen ipek proteininin kararlı ve sürekli olması sağlanamamaktadır. Bakteri ve mayalardan elde edilen proteini uygun bir çözücüde çözdükten sonra lif çekiminin gerçeleştirilebileceği ifade edilmektedir (Heim vd., 2009; Çerkez, 2007; Li vd., 2020; Hinman vd., 2000).

## 4.2. Bitkilerden hareketle örümcek ipeği eldesi

### 4.2. Obtaining spider silk through plants

Bu kapsamda tütün, patates, yonca, farekulağı teresi, pirinç ve alfalfa bitkileri ile örümcek ipeği proteininin eldesi araştırılmıştır. Bu bitkilerin daha büyük proteinler üretme eğilimleri ve bitkinin kök, yaprak gibi kısımlarında belirli genlerin transfer edilmesi, çalışmada yer alan avantajlardan bazılarını oluşturur. Bitki hücreleri hem rekombinant proteinlerin kararlılığına hem de buna yardımcı olan spesifik organeller için rekombinant proteinleri biriktirme kapasitesine sahiptir. Bu avantajların yanı sıra, yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bitkilerin genetik manipülasyonu bakterilerden daha karmaşıktır ki bu nedenle, ipek proteinlerinin üretiminden sorumlu örümcek genlerinin bitkilere transfer edilmesi ve bitkilerin örümcek ipeği proteinini üretmesi ile ilgili çalışmalara hala devam edilmektedir (Zhang vd., 2019; İkinci, 2010; Whittall vd., 2020). Şekil 7’de genetiği değiştirilmiş bitkilerden proteininin üretilmesi ve bundan elde edilen örümcek ipeği ile ondan dokunan kemer gösterilmiştir.



**Şekil 7.** Genetiği değiştirilmiş bitkilerden örümcek ipeği proteininin üretilmesi ve bundan elde edilen örümcek ipeği ile ondan dokunan kemer (İkinci, 2010).

**Figure 7.** Production of spider silk protein from genetically modified plants, and the spider silk obtained from this with the belt woven from it (İkinci, 2010).

Kanada, Montreal'deki Wyoming Üniversitesi Laramie Nexia Biyoteknolojileri Enstitüsü'nde moleküler biyoloji profesörü Randolph V. Lewis, mantarlara ve soya bitkilerine gen ilavesiyle normal ipek üzerinde daha yüksek parlaklık ve mekanik strese sahip yeni bir örümcek türü geliştirmiştir (Singha vd., 2012).

## 4.3. Böceklerden hareketle örümcek ipeği eldesi

### 4.3. Obtaining spider silk through insects

İpek lifleri protein yapıda olup, ipek böcekleri (*Bombyx mori*) ve örümcekler tarafından kesiksiz lif formunda üretilebilmektedir. Bu nedenle, örümcek ipeği elde etmek için ipek böceklerinin kullanılması oldukça uygundur. Geleneksel olarak ipekböceğinden elde edilen ipek lifleri, örümceklerden elde edilen ipek liflerini üretmek için araştırma kaynağı olmuştur. Çünkü ipek böcekleri, örümcek ipeği üretimindeki temel sorunlardan biri olan lifin filamentlere çevrilmesi konusunda oldukça iyilerdir. Bunun için solvent ekstrüzyonu, elektroğirme ve mikro-akışkan yöntemleri gibi ipekböceği proteinlerinden lif elde etme tekniklerinin, örümcek ipeği proteinleri için de uygun olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, her bir yöntemin avantajları ve sınırlamaları, örümcek liflerinin belli uygulamalarda kullanımını veya ticari kullanımını belirler (Kluge vd., 2008; Whittall vd., 2020). İlk üretim denemelerinde düşük kaliteli ipek üretilmiş olsa da, gen düzenleme teknolojilerindeki gelişmeler büyük bir ilerlemeyi teşvik etmiştir. Elde edilen lifler, 1,2 GPa gerilme mukavemeti ile doğal örümcek ipekleri kadar güçlüdür (Özdoğan vd., 2021; Gök vd., 2019; Şevkay & Bayburtlu, 2020; Kluge vd., 2008).

## 4.4. Memelilerden hareketle örümcek ipeği eldesi

### 4.4. Obtaining spider silk through mammals

Genleri ifade etmede oldukça iyi olan memelilerin hücre dizilimleri de örümcek liflerinin eldesinde kullanılabilir. Bu hücreler, protein salgılayabilmekte ve bu da saflaştırmayı kolaylaştırırken, daha fazla verim de sağlamaktadır. İpek üretimi için birkaç memeli hücre dizilimi geliştirilmiş olsa da spidroin proteini için gerekli gen diziliminin tekrarlayan doğası, bazı sorunlara ve üretim verimliliğinin azalmasına yol açmıştır (Hinman vd., 2000; Whittall vd., 2020).

Bu kapsamda yapılan bir çalışmada transgenik koyunlara ait yünlerin bir bileşeni olarak örümcek ipeği üretme potansiyeli araştırılmıştır. Kültürleşmiş hücrelerden oluşan koyun derisi fibroblastları in vitro olarak kolayca gerçekleştirilmiş ve bu çalışma ile yapay spidroin geni taşıyan transgenik koyun embriyoları başarıyla elde edilmiştir. Bununla birlikte, embriyo nakli gerçekleştirilebilmesine ve hamilelik gözlemlenmesine rağmen, yavrular elde edilemediğinden, henüz gerçek bir ipeksi koyun doğmamıştır (Li vd., 2020).

Kanada'daki bir biyo-teknoloji firması, örümcek ipeği genini keçilere aktararak ipek liflerini bu yolla üretmeye çalışmıştır. Keçiden elde edilen sütteki ipek proteini izole edilerek gerçek örümcek ipeğine benzer bir lif haline getirilmiştir. Ancak, 1 L süttten 2-15 g ipek elde edilmesi bu hususta henüz istenilen aşamaya gelinemediğini göstermiştir (İkinci, 2010; Çerkez, 2007).

Amerika'daki Wyoming Üniversitesi'nde yine aynı konu üzerinde çalışan araştırmacılar, örümcek genini keçilere aktararak, keçi sütünden örümcek ipeğini elde etmeyi başarmışlar ancak, verim istenilen miktardan çok daha düşük olmuştur (Çetin & Denizli, 2016).

Özetlenecek olursa; biyoloji ve mühendislik dallarının iş birliğinde doğal örümcek ipeğinin etkileyici özellikleri ile hem eşleşen hem de daha iyi performans özellikleri gösteren türde rekombinant ipek üretebilen bir dizi sistem geliştirilmiştir. Bu başarıya rağmen, ipeksi bir pürüzsüzlüğün elde edilememesi ve yüksek hacimli üretimin henüz başarılmasından dolayı, bu alanda yapılan çalışmalar ticarileşmemiştir (Heim vd., 2009).

Yapılan bu çalışmalara ek olarak; Delaware Üniversitesi'nde kollajen/örümcek ipeği ve denatüre kollajen gibi doğal polimerlerden üretilen nano-lifler ile biyo-taklit yapıya sahip ağlar üretilmiştir (Arslan, 2007).

Cambridge Üniversitesi'nde Dr. Yuachuo Wu ve ark. da örümcek ipeğinden esinlenerek, hidrojel esaslı polimerik yapılardan çok güçlü ve çok esnek özellikli lifler elde etmişlerdir. Bu lifler, oda sıcaklığında üretilmekte ve yüksek miktarda enerji soğurabilmektedir. Sıvıdan çekilen lifler nano ölçekte, uzun ve ince zincirlerden oluşmaktadır. Bu malzemenin içinde bulunan su ise 30 s içinde buharlaşmakta ve geriye hem güçlü hem de esnek lifler kalmaktadır. Araştırmacıların elde ettiği bu malzemenin bugüne kadar üretilmiş tüm sentetik liflerden daha güçlü olduğu gözlemlenmiş de, örümcek ipekleri kadar güçlü olmadığı belirtilmiştir (Wu vd., 2017).

## 5. Örümcek ipeği liflerinin kullanım alanları

### 5. Usage areas of spider silk fibers

Çok eski çağlardan bu yana örümcek liflerinden birçok alanda yararlanılmıştır. Yunanlılar, antibiyotik ve kanı pıhtılaştırıp, yaraları iyileştirme özelliklerine sahip olduğuna inandıkları örümcek ağını, kan akışını durdurmak amacıyla kompres olarak kullanılmışlardır (Heim vd., 2009).

Yeni Gine'deki bazı kabilelerde, örümcek ipeğinden oluşan ağlar yağmurdan korunmak için şapka olarak kullanılmıştır. Güney Pasifik Adaları'nda yaşayan bazı yerlilerin de balık avlarken örümcek ağlarını kullandığı görülmüştür. Endonezyalıların da örümcek ipeğinden dokunmuş kumaşları bulunmaktadır. Fransa'da 18. yy'da yaşamış olan Bon de Saint-Hilaire, örümcek ipeğinden kumaş, çorap ve eldiven dokunmasının mümkün olduğunu göstermiş, ancak 1 kg örümcek ipeği elde etmek için 1.3 milyon örümceğin gerekli olması nedeniyle bunun çok da pratik bir uygulama olmadığı anlaşılmıştır (İkinci, 2010; Çetin & Denizli, 2016).

Doğal yollardan elde edilen ve örümcek ağından dokunduğu bilinen en büyük kumaş 2009 yılında Madagaskar'da üretilmiştir. Bu kumaş, 82 kişilik bir ekibin dört yıllık gayreti sonucunda 1 milyon örümcekten toplanmış olan ağlar ile yapılmış ve çok pahalıya mal edilmiştir. Bu örnekten yola çıkarak, bilim insanları örümceklerin genetiği ile oynayarak, doğal yollardan yapay lif üretme çalışmalarına başlamışlardır (Arıcı, 2018; Hinman vd., 2000).

Binlerce yıldır, yara pansumanlarından askeri uygulamalara birçok alanda kullanılmış olan bu liflerin, günümüzde, çevre dostu ve doğal ürünlere olan ilginin de artması ile balistik koruma alanında da umut verici bir potansiyel sunacağı düşünülmekte ve kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Balistik amaçlı kullanılan doğal örümcek ipeği lifleri, genellikle Güney Amerika'da bulunan "Kara Dul" örümceğinden elde edilmektedir. Bu lifler, Kevlar lifinden daha mukavemetli olmakla beraber, %270'lik kopma uzaması değeri ile sıra dışı fiziksel

özelliklere sahiptir (Çay vd., 2007; Karakan, 2009; Bozdoğan vd., 2015). Balistik tekstil uygulamalarında, yüksek mukavemetli olmaları önemli bir avantaj olmakla birlikte, bu liflerin yüksek elastikiyetleri, bu alandaki kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Aydın & Günaydın, 2011; Çerkez, 2007; Saravanan, 2006).

Örümcek ipeği, yüksek esneklik ve dayanıklılığa sahip olmasına rağmen, nispeten düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle, hayvansal kökenli lifler arasında, en yüksek ses iletim hızına sahiptir. Bu nedenle *Nephila clavipes* örümceklerinden elde edilen lifler, müzik enstrümanlarının tel yapımında kullanılmışlardır (Thirugnanasambantham vd., 2020).

Bilim insanları, hayvanlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda örümcek ipeğinin, vücut içerisine yerleştirilen implantların normalde sebep olduğu reaksiyonlara sebep olmadığını görmüşlerdir. Buna ek olarak, örümcek ipeği lifleri doku uyumlu yapay tendon ve bağların üretiminde, ilaç salım sistemlerinde, hassas ameliyatlara için biyo-bozunur, alerji yapmayan ve iz bırakmayan ameliyat ipliklerinin üretiminde, son derece sağlam dikişlerin yapımında, özel bandajlarda, yara örtülerinde ve biyo-uyumluluğu nedeniyle protezlerde, damar yaralanmalarının tedavisinde ve birçok ileri teknoloji ürün ve tıbbi malzemenin üretiminde kullanılmıştır (Singha vd., 2012; İkinci, 2010; Çerkez, 2007; Gu vd., 2020; Aras & Kazancı, 2019).

Biyo-uyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilen örümcek ipeği, implant kabiliyetinin yanı sıra, morfolojik olarak yüksek esnekliğe de sahiptir. Bu lifler, son derece ince dikiş ipliği olarak göz veya sinir cerrahisinde kullanılmıştır. Günümüzde örümcek ipeği liflerinin, hidrojel, tüp, sünger, mikro-kapsül, köpük ve film gibi yeni biyo-malzemelerin kaynağını oluşturabilmeleri oldukça dikkat çekicidir. İpek lifinin içerdiği protein kimyasal işlemle modifiye edilebildiğinden, diğer malzemeler ile kombinasyon halinde kullanılabilir (Liu & Zhang, 2014; Xu vd., 2012).

Örümcek ipekleri kolaylıkla elde edilemediği için, ekonomik kullanımları çok yaygın olmasa da tekerlek şeklinde ağ ören örümceklerin (*Araneidae* gibi) ağları seçkin mekanik ve biyo-medikal özellikleri nedeniyle bazı uygulamalar için kullanılmıştır (Öcal vd., 2021; Yang vd., 2020). Alman bilim insanları mikrobiyal büyümeyi engelleyen örümcek liflerinden biyo-malzeme geliştirmiştir. Aynı zamanda, örümcek lifleri biyo-uyumlu olmaları nedeniyle, biyomedikal uygulamalar için ilgi odağı olmuştur (Winkless, 2020; Whittall vd., 2020; Perera vd., 2023).

Düşük sıcaklıklarda esnekliğini koruyabildiği için, farklı sıcaklıklara maruz kalan paraşüt kumaşlarının üretiminde yapay örümcek ipeğinin kullanılmasının ideal olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, çiğne maruz kalan örümcek ağının yüzeyi, yapısındaki liflerin %50 oranında büzülmesi ile küçülmekte ve böylece, ağın hasar görmesini engellemektedir. Bilim insanları, bu mekanizmayı yapay kas oluşturmak için kullanmışlardır. "Süper büzülme" olarak tarif edilen bu özelliği ile örümcek lifleri, tıpkı insan kası gibi, belirli bir oranda şekil değiştirerek hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. Bu çalışmanın sonucunda, örümcek ipeklerinin robot ve mikroçip teknolojilerinde kullanımları da söz konusu olabilecektir (İkinci, 2010; Singha vd., 2012).

Özellikle dragline ipeği, 1950'lerde doğal ve sentetik liflerin çoğundan daha iyi performans gösteren mekanik özellikleri nedeniyle malzeme biliminin odak noktası haline gelmiştir. Dragline ipeği, %35 elastikiyetle Kevlar lifi ile ( $4 \times 10^9 \text{ N m}^{-2}$ ) karşılaştırılabilir bir kopma mukavemetine sahip olup, oldukça güçlü bir lifdir (Hinman vd., 2000). Bazı çalışmalarda, lifleri güçlendirmek için inorganik nano-partiküller ile kompozitleri birleştirmek için doğal örümcek dragline ipekleri kullanılmıştır (Doblhofer vd., 2015; Saravanan, 2006; Heim vd., 2009; Gu vd., 2020).

Askeri alanda, zırh ve paraşütlerde örümcek liflerinin kullanımı, ürünün performans özelliklerini artırmanın yanı sıra, ağırlığı da büyük ölçüde azaltmaktadır. Bazı örümcek ağı yapıları, aynı zamanda, darbe kuvvetlerini etkili bir şekilde sönmüleyerek ürünün mukavemetini arttırmaktadır (Gu vd., 2020).

Örümcek liflerinden, süper dayanıklı tekstil ürünleri, aşınmaya dayanıklı hafif tekstil ürünleri, esnek ve kurşun geçirmez zırh, çelik yelek, miğfer, paslanmayan paneller ile paraşüt ipi, ağ, emniyet kemeri, biyo-sensör, gemileri bağlamak için hafif halat, filtre membranı, optik ve elektromekanik kablolar ile uçak ve gemi sanayisinde kullanılacak dış yapı malzemelerinin üretilme çalışmaları halen devam etmektedir (Xu vd., 2012; Perera vd., 2023; Singha vd., 2012).

Örümcek ipeğinin yüksek miktarda üretilmesi başarılabilirse; ilaç taşıma sistemlerinden kozmetiğe, biyo-bozunur şişelerden doku iskelesine, su motorlarından yapay deriye kadar çok geniş bir yelpazede kullanım potansiyeli bulunacaktır. Bu yaklaşım, enerji, sürdürülebilirlik, tıp ve nano-biyomedikal teknolojilerde alanlarında yenilikçi malzeme uygulamaları için birçok fırsat sunacaktır (Kiseleva vd., 2020; Singha vd., 2012; Thirugnanasambantham vd., 2020; Liu & Zhang, 2014).

Örümcek ağları sanayide direkt olarak kullanılmadığından, rekombinant örümcek ipeği üretimi ile elde edilen liflerin doku mühendisliği uygulamaları halen araştırılmaktadır. Bu kapsamda, örümcek liflerinin biyo-uyumluluğu nedeniyle; protez, kemik ve kırık doku rejenerasyonu ile kalp kası yenilenmesinde, yara örtüsü üretiminde ve periferik sinir rejenerasyonunda da kullanımları geliştirilmektedir (Salehi vd., 2020; Gu vd., 2020).

Örümcek ipeği lifinin yüksek mukavemeti ve hafifliği ile neme ve soğuğa dayanıklılığı nedeniyle köprü, asansör halatı ve bina inşasında güçlendirme elemanı olarak kullanılması durumunda paslanma da gözlenmeyecektir. Otomotiv endüstrisinde de hafif ve aşınmaya dayanıklı lastik ve araç gövdesi üretiminin gerçekleştirilmesi ile araç ağırlığında önemli bir azalma görülecektir (Gu vd., 2020; Saravanan, 2006).

Doğal ve rekombinant örümcek ipeği malzemeleri, üstün mekanik ve biyo-uyumlu özelliklerinden dolayı kompozit üretimi için uygun malzemeler olup, genel mekanik mukavemeti artırmanın yanı sıra, uygulama yelpazesinin genişletilmesini de sağlar.

## 6. Sonuçlar

### 6. Conclusions

Son yıllarda, insanların etkisiyle doğal dengesi gittikçe bozulan dünyamızda, sürdürülebilir ve yenilikçi yaklaşımlar kapsamında doğadan esinlenerek uygulamalar geliştirmek daha da önemli olmuştur. Doğada mevcut olan eşsiz özellikler, insanın her zaman ilgisini çekmiş ve taklit edilmeye değer bulunmuştur (Sevencan & Üreyen, 2020).

Günümüze kadar gelen çalışmalar neticesinde biyo-mimetik bilimi dahilinde birçok çalışma tekstil sektöründe uygulama alanı bulmuştur. Bu çalışma kapsamında incelenen ve özel lifler içerisinde yer alan örümcek lifleri, tekstil sektörünün birçok alanında potansiyel oluşturmaktadır.

Örümcek ipeği, olumsuz koşullara dayanıklılığın yanı sıra, mevcut doğal ve sentetik liflerin birçoğundan daha iyi fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Bu nedenle de, örümceklerden ya da örümceklerden esinlenerek gerçekleştirilen biyo-teknolojik yaklaşımlarla örümcek ipeği elde edebilmek için çeşitli yöntemler denenmektedir. Ancak henüz, bu çalışmaların ticari boyuta taşınması için lif elde etme yöntemlerinin önemle araştırılması gereklidir. Bu liflerin, kimyasal olarak sentezlenmesi henüz verimsiz olsa da, biyolojik konakların kullanımı, örümcek ipeğini büyük ölçekte üretmek için daha iyi bir seçenek olarak görülmektedir. Doğal örümcek ipeği lifine yakın özellikler elde edilmesi için üretim aşamasında yapılan kontroller, gelecekteki araştırmalar için hala birçok zorluğun varlığına işaret etmektedir (Saravanan, 2006; Connor vd., 2024).

Örümcek ipeği liflerinin doğada benzerinin bulunmaması ve henüz bilimsel açıdan tam olarak taklit edilememesi ve bir alternatifinin de keşfedilememesi değerini daha da arttırmaktadır. Benzersiz bir mukavemet ve esneklik kombinasyonu, yeni geliştirilecek mühendislik malzemeleri için de bir model oluşturmaktadır. Örümcek lifleri, sentetik liflerden daha üstün mekanik performans ile yüksek mekanik kararlılık, pürüzsüzlük, incelik, biyo-bozunurluk ve biyo-uyumluluk ile yüksek elastikiyet, suda çözünürlük ve süper büzülme gibi özellikleri nedeniyle tekstil sektörünün birçok alanında devrim yaratacağına inanılmakla birlikte, bunlardan da en çok balistik ve medikal tekstillere işlevsellik kazandıracığı düşünülmektedir (Heim vd., 2009; Perera vd., 2023; Gu vd., 2020).

Doğal örümcek ipeğinden üretilen giysiler iyi nefes alabilirliğe ve ter emiciliğe sahip olmanın yanı sıra, aşınma ve yıpranmaya karşı da dayanıklıdır ancak, üretim verimliliğinin düşük olması nedeniyle bu liflerden elde edilen kumaşların giyim tekstili yerine teknik tekstil ürünü olarak kullanılması daha önemli bir hale gelmiştir. Gözenek boyutu ve mikro gözenek sayısı ayarlanabildiği sürece; gelişmiş ısı transfer özelliği, UV direnci, nem geçirgenliği, nefes alabilirlik ve su geçirmezlik gibi özellikler koruyucu giysilerin ihtiyacını karşılayacak şekilde değiştirilebilir (Gu vd., 2020).

Bütün bu muhteşem özellikleri aktif olarak hayata geçirebilmek ve bunlardan faydalanabilmek için örümcek ve örümcekten esinlenerek yapılan yapay lif eldesi çalışmalarına daha da önem verilmeli ve bunların üretimini hızlandırılacak çalışmalar yapılmalıdır. İnsanlığın ileri teknoloji seviyesine ulaştığı günümüzde dahi, üretimi hala tam olarak çözülememiş olan bu özel lifin ticarileştirilmesi, tekstil endüstrisi için umut vadetmekte ve büyük önem taşımaktadır.

### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Bu çalışmada İrem PALABIYIK ve Esen ÖZDOĞAN literatür araştırması, derleme ve yazım aşamalarına eşit derece katkıda bulunmuştur.

### **Etik beyanı**

*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

### **Çıkar çatışması beyanı**

*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

*References*

- Aras, O., & Kazancı, M. (2019). Kullanılan farklı çözücülerin ipek fibroin-PVA kompozit süngerlerin yapısına olan etkisi. *Tekstil ve Mühendis Dergisi*, 26(115), 224-232. <https://doi.org/10.7216/1300759920192611502>
- Arıcı, A. (2018). *Elektrospın metodu ile hazırlanan polimer/MWCNT nanofiberlerin özelliklerine MWCNT çapının ve uzunluğunun etkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Arslan, Y. E. (2007). *Elektrodöndürme tekniğiyle oluşturulan polimer nano-liflerin memeli hücresi etkileşimlerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]
- Atav, R., & Karaboğa Ekinci, S. (2017). Proteazlarla enzimatik modifikasyon yoluyla ipek liflerinin boyanabilirliğinin geliştirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(1), 138-146. <https://doi.org/10.5578/fmbd.54077>
- Aydın, A., & Günaydın Karakan., G. (2012). Elektromanyetik kalkanlama amaçlı koruyucu tekstiller. *Akdeniz Sanat*, 4(7), 85-88.
- Begiç, H. N. (2020). Entomolojiden moda ve tekstile bir değerlendirme. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (39), 131,149.
- Beşoğlu-Sırrı çözülemeyen biyopolimer örümcek ipeği. (2019, 30 Ağustos). <https://www.besoglu.com/sirri-cozulemeyen-biyopolimer-orumcek-ipegi/>.
- Biørnstad, L. (2014, August 13). How spiders make their silk. *ScienceNordic*. <https://sciencenordic.com/forskningno-molecular-biology-spiders/how-spiders-make-their-silk/1405645>.
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., & Süpüren Mengüç, G. (2015). Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, özellikleri ve balistik performans testleri. *Tekstil ve Mühendis Dergisi*, 22(98), 84-103. <https://doi.org/10.7216/130075992015229808>.
- Çavuşoğlu, K., Bayram, A., Maraş, M., & Kırındı, T. (2006). Steatoda paykulliana (Araneae, Theridiidae) (Walckenaer, 1806)'nın zehir aygıtının morfolojisi hakkında. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 25-29.

- Çavuşoğlu, K., & Yalçın, E. (2007). *Eresus Cinnabarinus* (Olivier, 1789) (Araneae, Eresidae) örümceğinin zehir aygıtı üzerine morfolojik bir çalışma. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 2(2), 126-135.
- Çay, A., Süpüren, G., Kanat, Z. E., Gülümser, T., & Tarakçioğlu, I. (2007). Balistik lifler (Bölüm 1). *Tekstil ve Mühendis Dergisi*, 17(4), 232-236.
- Çerkez, İ. (2007). *Kolloidal silika dispersyonunun polietilen kumaşların balistik performansına etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Connor A., Zha R. H., Kofas M., (2024) Production and secretion of recombinant spider silk in *Bacillus megaterium*. *Microbial Cell Factories* 23:35. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02304-5>
- Değerli, N. (2019). Moda endüstrisinin giyilebilir teknoloji tasarımları, *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*. 4(1), 50-65. <https://doi.org/10.21733/ibad.500289>
- Demir, Z. (2017). *Aculepeira Ceropegia* (Walckenaer, 1802) (Araneae: Araneidae) türünde kitin ve kitosan izolasyonu ve fizikokimyasal karakterizasyonu. [Yüksek Lisans Tezi, Niğe Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Ersanlı, C. C. (2016). Fizik eğitiminde biyomimikri verileri kullanımının yeri ve önemi. *5th International Vocational Schools Symposium*, 588, Prizren.
- Garb, J. E., Haney, R. A., Schwager, E. E., Gregorić, M., Kuntner, M., Agnarsson, I., & Blackledge, T. A. (2019). The transcriptome of Darwin's bark spider silk glands predicts proteins contributing to dragline silk toughness. *Communications Biology*, 2(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0496-1>.
- Gök, Z., Yiğitoğlu, M., & Vargel, İ. (2019). İpek serisin ve potansiyel uygulama alanları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 450-459. <https://doi.org/10.31590/ejosat.517226>.
- Gu, Y., Yu, L., Mou, J., Wu, D., Zhou, P., & Xu, M., (2020). Mechanical properties and application analysis of spider silk bionic material, *e-Polymers*, 20(1), 443-457. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0049>.
- Gürarlan, A. (2012). Tekstildilerden Türk Diline Armağanlar, *Türk Dili Dergisi*, 103(728), 81-89.
- Heidebrecht, A., Eisoldt, L., Diehl, J., Schmidt, A., Geffers, M., Lang, G., & Scheibel, T. (2015). Biomimetic fibers made of recombinant spidroins with the same toughness as natural spider silk, *Advanced Materials*, 27(13), 2189-2194. <https://doi.org/10.1002/adma.201404234>.
- Heim, M., Keerl, D., & Scheibel, T. (2009). Spider silk: from soluble protein to extraordinary fiber. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(20), 3584-3596. <https://doi.org/10.1002/anie.200803341>.
- Hinman, M. B., Jones, J. A., & Lewis, R. V. (2000). Synthetic spider silk: a modular fiber. *Trends in Biotechnology*, 18(9), 374-379. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01481-5](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01481-5).
- Hsia, Y., Gnesa, E., Jeffery, F., Tang, S., & Vierra, C. (2011). Spider silk composites and applications. J. Cuppoletti (ed.), *Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses*, 2, 303-324. <https://www.intechopen.com/chapters/16711>
- Hsia, Y., Gnesa, E., Pacheco, R., Kohler, K., Jeffery, F., & Vierra, C. (2012). Synthetic spider silk production on a laboratory scale. *Journal of Visualized Experiments*, (65):4191. <https://doi.org/10.3791/4191>.
- Iqbal, S. (2023, Ekim 25). Genetiği Değiştirilmiş İpekböcekleri Saf Örümcek İpeği Üretebiliyor! *Evrım Ağacı*. <https://evrimagaci.org/genetiği-değistirilmis-ipekbocekleri-saf-orumcek-ipegi-uretebiliyor-15900>.
- İkinci, Ö. (2010). Plastikten esnek, çelikten dayanıklı, sırrı çözülemeyen biyopolimer, örümcek ipeği. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 507, 26-33.
- Kalaycı, E., Avınç, O., & Yavaş, A. (2016). Yarının yüksek performanslı liflerine doğal bir yaklaşım: balık asalağı salgısı lifleri. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 27(4), 135-142. <https://doi.org/10.7240/mufbed.94326>.
- Karakan, G. (2009). Teknik tekstillerin koruyucu yapılar da kullanımı. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1), 65-70.

- Lewis, R. (1996). Unraveling the weave of spider silk. *Bioscience*, 46(9):636-638. <https://doi.org/10.2307/1312891>.
- Li, H., Chen, S., Piao, S., An, T., & Wang, C. (2021). Production of artificial synthetic spider gene 4S-transgenic cloned sheep embryos using somatic cell nuclear transfer. *Animal Biotechnology*, 32(5), 616-626. <https://doi.org/10.1080/10495398.2020.1737098>
- Liu, X., & Zhang, K. Q. (2014). Silk fiber-molecular formation mechanism, structure-property relationship and advanced applications. C. Lesieur (Ed.), *Oligomerization of Chemical and Biological Compounds*, 3, 69-102. IntechOpen. <https://dx.doi.org/10.5772/57611>.
- Mi, J., Zhou, Y., Ma, S., Zhou, X., Xu, S., Yang, Y., Sun, Y., Xia, Q., Zhu, H., Wang, H., Tian, L., & Meng, Q. (2023). High-strength and ultra-tough whole spider silk fibers spun from transgenic silkworms. *Matter*, 6(10), 3661-3683. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.08.013>.
- Öcal, İ. Ç., Kayhan, N. Y., & Aktaş, Ü. H. (2021). Argiope bruennichi (Scopoli, 1772) örümceğinin ağ yapısı ve örü aygıtının morfolojisi. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 9(3), 577-583. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i3.577-583.4073>.
- Özdoğan, A., Çalışkan Koca, U., Durbilmez, G. D., & Küçük, Ş. (2021). İpek proteinin sağlık alanında kullanımı. *Acta Biologica Turcica*, 34(2),105-113.
- Porter, D., Guan, J., & Vollrath, F. (2013). Spider silk: super material or thin fibre? *Advanced Materials*, 9(25), 1275-1279. <https://doi.org/10.1002/adma.201204158>
- Popular Science Türkiye-Ağ Kıyafeti: Biyotek Örümcek Ağından Yapılan Yeni Palto. (2015, 1 Kasım). <https://popsci.com.tr/ag-kiyafeti-biyotek-orumcek-agindan-yapilan-yeni-palto/>.
- Rat, C., Heiby, J. C., Bunz, J. P., & Neuweiler, H. (2018). Two-step self-assembly of a spider silk molecular clamp. *Nature Communications*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07227-5>.
- Salehi, S., Koeck, K., & Scheibel, T. (2020) Spider silk for tissue engineering applications. *Molecules*, 25(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/molecules25030737>.
- Saravanan, D. (2006). Spider silk-structure, properties and spinning. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 5(1), 1-20.
- Sevencan, H., & Üreyen, M.E. (2020). Tekstil ve giysi tasarımında biyomimetik uygulamaları. *Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat*, 5(10), 101-118.
- Singha, K., Maity, S., & Singha, M. (2012). Spinning and applications of spider, *Frontiers in Science*, 2(5): 92-100. <https://doi.org/10.5923/j.fs.20120205.02>
- Sponner, A., Schlott, B., Vollrath, F., Unger, E., Grosse, F., & Weisshart, K. (2005). Characterization of the protein components of Nephila clavipes dragline silk, *Biochemistry*, 44(12),4727-4736. <https://doi.org/10.1021/bi047671k>.
- Su, Y., Shi, S., Wang, C., Wang, Z., Li, P., Zhang, S., Fei B., Yang Z., Hu J., (2024) Spider silk-inspired tough materials: Multi-pathway synthesis, advanced processing, and functional applications. *Nano Today*, V. 55, 102188 <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102188>
- Şevkay, I., & Bayburtlu, İ. (2020). Sürdürülebilirlik bağlamında inovatif yaklaşımlar ve modüler giyim tasarımı, *Yıldız Journal of Art And Design*, 7(2), 150-176. <https://doi.org/10.47481/yjad.772513>.
- Thirugnanasambantham, K. G., Vaasan, R. K., Kishore, S., Anirudh, S., Bala Kumaran, K., & Kumar, P. M. (2020). Spider silk fiber: A brief review on molecular structure, properties and applications of spider silk, *Proceedings of International Conference on Recent Trends in Mechanical and Materials Engineering: Icrmmme 2019*, AIP Publishing LLC: In AIP Conference Proceedings, (V. 2283, 020050), 1-10. India. <https://doi.org/10.1063/5.0024918>.
- Vollrath, F. (1999). Biology of spider silk. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24(2-3), 81-88. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(98\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(98)00076-2).



- Wagh, M. (2021, October 27). Bacteria make ‘spider silk’ that’s stronger than steel. *Science News Explores*. <https://www.snexplores.org/article/innovation-bacteria-spider-silk-stronger-steel-chemistry-engineering>.
- Watanabe, Y., & Arakawa, K. (2023). Molecular mechanisms of the high performance of spider silks revealed through multi-omics analysis. *Biophysics and Physicobiology*, 20(1), e200014. 1-11. <https://doi.org/10.2142/biophysico.bppb-v20.0014>.
- Whittall, D. R., Baker, K. V., Breitling, R., & Takano, E. (2020). Host systems for the production of recombinant spider silk. *Trends in Biotechnology*, 39(6), 560-573. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.09.007>.
- Winkless, L. (2020). Spider silk: The future of antimicrobial materials, *Materials Today*, 41:1. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.026>
- Wu, Y., Shah, D. U., Liu, C., Yu, Z., Liu, J., Ren, X., Rowland, M. J., Abell, C., Ramage, M. H., & Scherman, O. A. (2017). Bioinspired supramolecular fibers drawn from a multiphase self-assembled hydrogel, *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 114(31): 8163-8168. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705380114>.
- Xu, G., Toh, G. W., Du, N., & Liu, X. Y. (2012). Spider silk: the toughest natural polymer, *In Natural Polymers*, 275-304. <https://doi.org/10.1039/BK9781849734028-00275>.
- Yang, Y., Greco, G., Maniglio, D., Mazzolai, B., Migliaresi, C., Pugno, N., & Motta, A. (2020). Spider (*Linothele megatheloides*) and silkworm (*Bombyx mori*) silks: Comparative physical and biological evaluation, *Materials Science and Engineering: C*, 107, 110197. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110197>.
- Zhang, X., Xia, L., Day, B. A., Harris, T. I., Oliveira, P., Knittel, C., Licon, A. L., Gong, C., Dion, G., Lewis, R. V., & Jones, J. A. (2019). CRISPR/Cas9 initiated transgenic silkworms as a natural spinner of spider silk, *Biomacromolecules*, 20(6): 2252-2264. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00193>.