

# Yüksek Performanslı Polietilen (HPPE) Lifleri

Ece KALAYCI, O. Ozan AVINÇ\*, Arzu YAVAŞ

*Pamukkale Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Denizli, 20070*

## ÖZ

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri yüksek mukavemet ve elastisite modülünün yanında düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik özellikleri ile üstün performans sergilemektedirler. Genellikle jelden lif çekim yöntemi kullanılarak üretilen HPPE lifleri yoğunluklarının düşük, sürtünme ve yorulma dayanımlarının yüksek olmalarının yanı sıra kimyasal maddelerin çoğuna da dayanıklıdır.  $1 \text{ g/cm}^3$ 'ün altındaki yoğunluğu ile su üzerinde yüzebilen bu lifler, yüksek mekanik özellikleriyle suya ve neme dayanıklılığı bir arada bulundurması sayesinde denizciliğin birçok alanında tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Ayrıca, bu liflerin enerji absorpsiyonunun yüksek olması balistik ürünlerde kullanımını da sağlamaktadır. Erime sıcaklıklarının düşük olması kullanım alanlarını sınırlasa da, günümüzde medikal, koruyucu, taşıma ya da spor teknik tekstilleri başta olmak üzere neredeyse teknik tekstillerin tüm alanlarında kullanımlarına rastlamak mümkündür.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek performanslı lif, yüksek mukavemetli lif, yüksek performanslı polietilen lifi, yüksek mukavemetli polietilen lifi, yüksek modüllü polietilen lifi, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifi

## High Performance Polyethylene (HPPE) Fibers

### ABSTRACT

High performance polyethylene (HPPE) fibers exhibit high strength, high elasticity modulus as well as superior performance with their low density and high mechanical properties. HPPE fibers are generally produced by gel-spinning process. They display not only high abrasion and fatigue resistance, but also exhibit resistance to most chemicals. These fibers can float on the water with their low density, less than  $1 \text{ g/cm}^3$ , and they are preferred in various marine applications due to their water and moisture resistant features as well as high mechanical properties. Furthermore, high energy absorption of these fibers allows for their use in ballistic products. Although their low melting temperature limits the application areas of HPPE fibers, today, it is possible to come across their end-use applications in many areas of technical textiles such as medical, protective and sport textiles.

**Keywords:** High performance fiber, high strength fiber, high performance polyethylene fiber, high strength polyethylene fiber, high modulus polyethylene fiber, ultra high molecular weight polyethylene fiber

## I. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi içerisinde teknik tekstilin önemi her geçen gün daha da artmaktadır. İleri teknoloji ile üretilen, üstün performans özelliklerine sahip lifler de bu nedenle büyük önem taşımaktadır. Yüksek performans lifleri olarak da bilinen bu lifler, sahip oldukları yüksek mukavemet, yüksek kimyasal dayanım, alev dayanıklılık gibi birçok özellikleri ile konvansiyonel liflerden ayrılarak öne çıkmaktadır. Kopma mukavemetleri genellikle  $20 \text{ g/denye}$  ( $2,2 \text{ GPa}$ )'den,

elastisite modülleri de genellikle  $500 \text{ g/denye}$  ( $50 \text{ GPa}$ )'den yüksek olan [1] yüksek performans lifleri genellikle fark yaratan özelliklerine ve nihai kullanım alanlarına göre ısıya dayanıklı lifler, yüksek mukavemetli lifler ve kimyasallara dayanıklı lifler olarak üç kategoride incelenmektedir. Bu sınıflandırma her ne kadar kesin olmasa da liflerin incelenmesinde yardımcı olmaktadır [2-4].

Yüksek mukavemetli yüksek performans lifleri sınıfında incelenen yüksek mukavemetli, yüksek elastisite modüllü

polietilen liflerinin temeli basit ve esnek polietilen moleküllerine dayanmaktadır [5]. Yüksek performanslı polietilen (HPPE), yüksek modüllü polietilen (HMPE) ya da uzun zincirli polietilen (ECPE) lifleri olarak isimlendirilebilen bu lifler düşük yoğunlukları sayesinde çok yüksek mekanik özelliklere sahiptir [5-8].

Normal polietilen molekülleri oryante değildir ve kolayca birbirinden ayrılır. Bu lifleri daha mukavemetli hale getirme fikri 1930'lara dayansa da gerçeğe dönüştürülmesi neredeyse yarım asır almıştır [4,5]. Liflerin mukavemetinde sağlanan iyileştirme, lif eksenine yönündeki oryantasyonun artırılması ve kristalin bölge oranının artırılması esasına dayanmaktadır [5]. Fakat bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için molekül zincirlerinin uzun olması gerektiğinden, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), yüksek performanslı polietilen liflerinin hammaddesi olarak kabul edilmiştir [5].

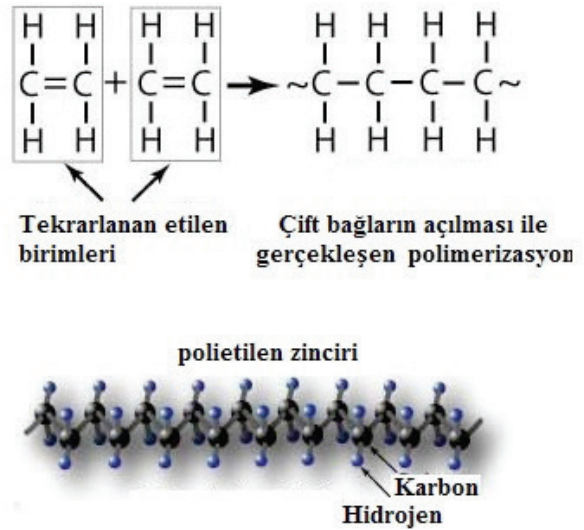
Yüksek performanslı polietilenler ilk olarak 1970'li yıllarda Leeds Üniversitesinde Cappacio ve Ward tarafından eriyikten lif çekim yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Fakat bu polimerden eriyikten lif çekimi, aşırı yüksek eriyik yoğunluğundan dolayı oldukça zordur [6]. Buna ilaveten eriyikten çekilen yüksek performanslı polietilen liflerinin, makromolekül zincirlerinin yüksek derecede birbirine karışık/dolaşık yapıda olmasından dolayı germe-çekme işlemleri sırasında çok az oranda bir uzama gerçekleştirilebilmektedir.

Son olarak 1979 yılında Alman DSM firmasının ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) polimerinin seyreltik çözeltisinden hareket ederek jelden lif çekim yöntemi olarak bilinen lif çekim yöntemini geliştirmesi ile iyi oryante olmuş lif yapısı sağlanarak hedeflenen yüksek mukavemet ve elastisite modülü değerlerine ulaşılabilmiştir [3-5].

1990'lardan bu yana yüksek performanslı polietilen lifleri ticari olarak üretilmektedir. Bugün farklı şirketlere ait farklı isimlerde rastladığımız yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri bilinen en yüksek mukavemetli liflerdir [3]. Balistik koruyucularda, spor malzemelerinde, denizcilikte, havacılıkta ya da medikal malzemeler gibi daha birçok alanda geniş bir kullanıma sahip olan HPPE liflerinin gelecekte de kullanımının artarak devam edeceği düşünülmektedir. Bu derlemenin ilerleyen kısımlarında yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin yapısı, özellikleri ve kullanım alanları gibi konulara yer verilecektir.

## II. POLİETİLEN LİFLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

Polietilen polimerinden lif üretiminin ilk olarak ICI tarafından 1933'lü yılların başında gerçekleştirildiği rapor edilse de patent işlemleri 1936 yılında tamamlanmıştır [9-12]. Eriyikten lif çekim yöntemi kullanılarak elde edilen liflerin en yüksek 25 kg/mm<sup>2</sup> kopma mukavemetine sahip olduğu kaydedilmiştir [9]. Polimerizasyonu, düşük basınç yöntemi ve yüksek basınç yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilen polietilenden lif üretebilmek için düşük basınç yönteminin kullanılması gerekmektedir [10,11,13,14]. Bu yöntem ile elde edilen polietilen polimeri lineer yapıda olduğundan lif çekimine daha uygun özellikte olmakta ve 300°C'de eriyikten lif çekme yöntemi ile filament haline getirilebilmektedir [13]. Molekülleri arasında sadece Van der Waals kuvvetleri bulunan polietilen molekülleri, zayıf etkileşimli esnek bir polimerdir (Şekil 1).



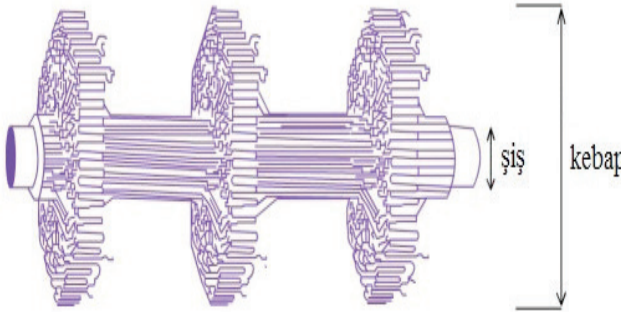
Şekil 1. Polietilen molekül zincirleri [15]

Nem çekme özelliği neredeyse sıfır olan polietilen liflerinin geleneksel tekstil boyama işlemleri ile renklendirilmesi oldukça güçtür bu sebeple genelde lif çekiminden önce suda çözünmeyen küp, azoik, pigment, kükürt ve dispers boyarmaddeleri polimer çözeltisine karıştırılarak kütle boyama yöntemiyle lif çekimi sırasında renkli lifler elde edilebilmektedir [10,12,13,16]. Liflerin nem çekme özelliğinden yoksun olmalarının avantajı da; lif yüzeyinde kir tutunma zorluğu sebebiyle liflerin kirlenmemesidir [13]. Geniş bir pH aralığında kimyasalların çoğuna karşı dayanıklı olan polietilen lifleri, yüksek sıcaklıklarda organik çözeltiler içerisinde şişmektedir [10,12,17,18]. Ancak hava koşullarına karşı dayanımı oldukça iyidir [13,18,19].

### III. YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETİLEN LİFLERİ

#### 3.1. Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lif çekimi

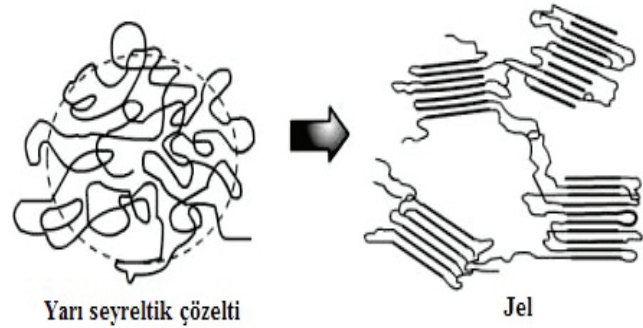
Yüksek performanslı polietilen lifleri oldukça uzun zincirlere [genellikle 2 ile 6 milyon (atomik kütle birimi) arasında değişen molekül kütlelerine] sahip ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) polimerinden üretilmektedirler [3,5,7,20-24]. 1966'da Pennings tarafından apolar bir çözücü içerisinde karıştırılan yüksek molekül ağırlıklı polietilenin seyreltik çözeltisinde şiş-kebab şekilli kristal bir yapı gözlemlenmiştir (Şekil 2) [2,14,20,25]. Bu yapı üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda şiş-kebab şekilli kristal yapısının devam arz ettiği ve ayrıştırılabildiği keşfedilmiştir [2,20]. Süreklilik gösteren şiş kısmını ayırarak çözeltiden lif çekim yöntemi ile HPPE liflerini üretmiştir [2]. Lif eldesi için ilk olarak çözeltiden lif çekimi kullanılarak yüksek performanslı polietilen lifleri elde edilmeye çalışılsa da 1979 yılında DSM şirketi tarafından seyreltik bir polimer çözeltisinden jel formu elde edilerek, bu jeli life dönüştürmeyi içeren jelden lif çekim yöntemi geliştirilmiştir [5,6,26].



Şekil 2. Şiş-kebab şekilli kristalin yapı [27]

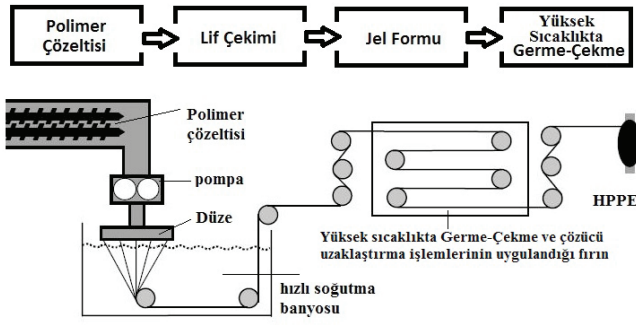
Yüksek performanslı polietilen lifleri eriyikten lif çekimi ve sonrasında uygulanan germe-çekme işlemi ile elde edilebilmektedir. Fakat en yüksek lif mukavemetine yüksek molekül ağırlıklı polietilen çözeltisinden jelden lif çekimi yöntemi ile elde edilen liflerde ulaşıldığından, jelden lif çekim yöntemi en çok tercih edilen yöntem haline gelmiştir [1,6,20,21,25,28-32]. Jelden lif çekim işlemi temel olarak iki basamakta gerçekleştirilmektedir [20]. İlk basamakta, Şekil 3'te gösterilen seyreltik bir ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimer çözeltisi (örneğin, tipik olarak %1-2 ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri içeren seyreltik çözelti) hazırlanır [33]. Jelden lif çekim işleminde çözümler büyük önem taşımaktadır. DSM

firması tarafından yapılan çalışmalarda çözücü olarak ksilen ve dekalın kullanılarak lif üretimi sağlanmıştır [20]. 'Spectra®' liflerinin üretiminde ise çözücü olarak parafin yağı kullanıldığı belirtilmektedir [20]. İkinci basamakta jelden lif çekimi işlemi esnasında, Şekil 3'te gösterilen makromolekül zincirlerinin karışıklığının/dolaşıklığının daha rahat şekilde savuşturulabildiği bir jel formu elde edilmektedir. Jel halindeki lifte bulunan makromolekül zincirlerinin karışıklığı/dolaşıklığı çok daha düşük bir seviyeye geldiğinden, çok yüksek oranlarda germe-çekme işlemleri uygulanabilmekte ve bunun sonucu olarak da oldukça yüksek seviyelerde oryante edilmiş makromolekül zincirleri elde edilmektedir [2-4,6,26].



Şekil 3. Polimerin yarı seyreltik çözeltisinin hazırlanması ve jelden lif çekim yönteminde ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin jel formundaki morfolojisi [27]

Yüksek performanslı polietilen liflerinin üretim basamakları Şekil 4'de gösterilmektedir. Jel lif çekim yöntemi, yaş ve kuru lif çekim yönteminin hibrid bir uygulamasıdır [34]. Sırasıyla; UHMWPE polimerinin yüksek miktarda çözen içeren seyreltik çözeltisinin (sadece %1-2'lik ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimeri içeren seyreltik çözeltisi gibi) [33] hazırlanması, seyreltik çözeltinin düzelerden geçirilip su bulunan soğutma banyosuna ekstürizasyonu, soğutma banyosunda jel formunda lif oluşumu, jel yapısındaki lifin silindirler yardımıyla yüksek sıcaklıkta ultra germe-çekme ve çözücü uzaklaştırma işlemlerinin uygulanacağı fırına transferi, jel formundaki liflere fırında yüksek sıcaklıkta ultra germe-çekme işlemi uygulanması ve bu esnada çözücünün uzaklaştırılması işlemleri ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 4) [2,3,5,6,27,31,33]. Tüm bu işlemlerin sonucunda yüksek oryantasyonlu ve yüksek miktarda kristalin bölge ihtiva eden yüksek performanslı polietilen liflerinin lif çekimi işlemi tamamlanmaktadır.

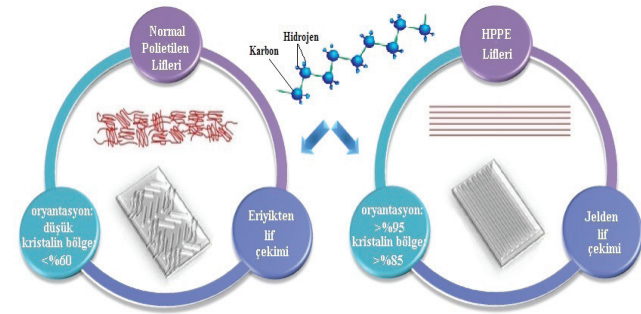


**Şekil 4.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin jelden lif çekim işlemi şematik gösterimi ve işlem basamakları [2,6,27,33,35]

Jel formu; polimerin makromolekül zincirlerini bir arada tutacak yeterli etkileşime sahipken, makromolekül zincirlerine yeterli hareket özgürlüğünü de vermektedir. Jel formundaki polimer, lif çekimi sırasında doğal olarak tam anlamıyla sıvı halde değildir. Jelden lif çekim işlemi sırasında, makromolekül zincirlerinin karışık/dolaşık olduğu bölgeler (Şekil 3) açılarak düz makromolekül zincirlerinin oluşması sağlanır ve yüksek oranda ultra germe-çekme işlemi sonucunda da yüksek oryante olmuş gerilmiş zincir yapısına ve yüksek kristalin bölge oranlarına ulaşılabilir [2,6,33].

Daha önce bahsedildiği gibi, HPPE lifinin üretim basamaklarının ilk adımında UHMWPE polimerinin yüksek miktarda çözgen içeren seyreltik çözeltisi hazırlanır [33]. Soğutma banyosunda jel formunu alan HPPE jelsi filamentleri mekanik olarak yeterli mukavemete sahip olduklarından dolayı sorunsuz şekilde germe-çekme işleminin uygulanacağı fırına silindirler yardımıyla transfer edilmektedirler (Şekil 4) [33]. Lif üretiminin son basamağında ise; çok büyük miktarda çözgen içeren jel formundaki HPPE lifleri, fırında (Şekil 4) yüksek oranda ultra germe-çekme işlemine tabii tutulur [2,4,6,33]. Jelsi filamentlerin yüksek miktardaki çözgen içeriği (daha önce bahsedilen yüksek miktarda çözgen, düşük miktarda polimer içeren seyreltik polimer çözeltisi oluşumundan dolayı) ultra germe-çekme işlemi sırasında plastikleştirici etki gösterebilmekte ve bu etki kolay kontrol edilemeyen ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polimerinin işlenebilirliğini kolaylaştırmakta ve ultra germe-çekme işlemi için elverişli bir lif yapısına/morfolojisine yol açmaktadır [33]. Bu işlemler neticesinde, katlanmış zincir şeklindeki kristalin yapıların yüksek oryante olmuş gerilmiş zincir yapısı ile yer değiştirmesi sonucunda hem kopma mukavemetinin hem de lif elastisite modülünün büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir [2,3,5].

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin elde edilmesinde kullanılan jelden lif çekim yöntemi malzemenin kimyası ile ilgili değil de, daha çok mekanik ve fiziksel parametrelerine bağlı bir yöntemdir. Bu yöntem genel olarak liflerin yüksek derecelerde gerilmiş molekül zincir yapısına, %95'den daha iyi oranlarda lif eksen yönünde paralelleşmeye yani çok yüksek oryantasyona ve %85'e varan bir kristalin bölgeye sahip olmasını sağlamaktadır ki bu da liflerin eşsiz özellikler kazanması demektir [2-4,6,21,36] (Şekil 5). Yani, yüksek moleküler ağırlık, yüksek oryantasyon ve yüksek kristalin bölge içeriği yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifini yüksek mukavemetli kılmaktadır.



**Şekil 5.** Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen polietilen makromolekül zinciri [17], Yüksek performanslı polietilen liflerinin ve normal polietilen liflerinin makro moleküllerinin oryantasyonu [1,17,21,27]

Nisseki kimya şirketi tarafından yüksek performanslı polietilen liflerinin seri üretimi için geliştirilen başka bir yöntemde ise katalist tekniği ve kendilerine ait bir polimerizasyon tekniği kullanılmıştır [20]. Ancak polimer çözeltisinin yüksek viskozitesinden dolayı verim alınmadığından ticari olarak büyük ölçekli üretime tam olarak geçilemedi de tekniğin geliştirilmesi için çalışmalara devam edilmektedir [20].

### 3.2. Yüksek Performanslı Ticari Polietilen Lifleri

Jelden lif çekim yönteminin ilk patent sahibi DSM şirketi patent başvurusunda bulunduğu sırada kendi jelden lif çekimi projeleri üzerinde çalışıyor olan Toyobo Inc. (Japonya) ve Allied Chemical Corp. (ABD) (Bugün Honeywell firması) şirketleri bu patent başvurusunun ardından DSM'in önerdiği patentin önüne geçmenin imkânsız olduğunu kabul ederek DSM ile teknik bir ortaklık yollarını aramaya mecbur kalmışlardır [20]. 1984 yılında DSM ve Toyobo Inc. teknik bir ortaklık antlaşması

imzalamış ve 1986 yılında Hollanda'da Dyneema® şirketini kurmuşlardır. Aynı yıl Toyobo Japonya'daki araştırmalarını tamamlayarak, Japonya'da da Dyneema® liflerinin üretimine başlamıştır [20]. Üretimi esnasında agresif kimyasalların kullanılmadığı ve çok az enerji ihtiyacının duyulduğu Dyneema® lifleri, kolayca geri dönüştürülebilir özelliği

ile birlikte hem üretim basamakları hem de ürün halde kullanımı sırasında çevreye zararı minimum düzeyde olan liflerdir [6]. Bu liflerin kullanım alanlarına birkaç örnek verilecek olursa; Dyneema SK 60 lif halatlar ve kordlarda, koruyucu giysilerde ve çarpmaya dayanıklı kompozitlerin takviyesinde kullanılmaktadır [3,21].

**Tablo 1.** Ticari yüksek performanslı polietilen filament iplikleri [3-6,19,21,37-39]

Ticari Lif Adı	Üretici Firma	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Mukavemet (N/tex)	Elastisite Modülü (N/tex)	Kopma anındaki Uzama (%)
Dyneema SK60	DSM HPF	970	2,7-2,8	89-91	3,0-5,0
Dyneema SK65	DSM HPF	970	3,0-3,1	95-97	3,0-5,0
Dyneema SK75	DSM HPF	970	3,5	110	3,7-3,8
Dyneema SK76	DSM HPF	970	3,7	120	3,8
Dyneema SK60	Toyobo	970	2,8	91	3,5
Dyneema SK71	Toyobo	970	3,5	122	3,7-4
Spectra 900	Honeywell	970	2,6	75	3,5-3,6
Spectra 1000	Honeywell	970	3,2	110	3,3
Spectra 2000	Honeywell	970	3,4	120	2,7-2,9
Tekmilon	Mitsui Petro Chemical	-	-	-	-

Dyneema SK 65, Dyneema SK 60'tan daha yüksek mukavemete ve elastisite modülüne sahiptir ve bu sebeple daha yüksek performansa ve hafifliğe ihtiyaç duyulduğu durumlarda bu lifin kullanımı tercih edilmektedir [3,4,21].

Allied Inc. (USA) şirketi (Bugün Honeywell), DSM şirketi tarafından kullanılan çözücüler yerine parafin yağı kullanarak yüksek mukavemetli Spectra® liflerini geliştirilmiştir [20].

**İlk olarak** Spectra 900 lifi, ardından daha yüksek performans özelliklerine sahip Spectra 1000 lifi üretilmiştir. Spectra 1000 lifleri; kasklar, valizlerde ve halatlarda kullanılabilir [20]. Üretilmeye başladıkları günden bugüne hem Spectra® hem de Dyneema® liflerinin performans özelliklerinde ciddi gelişmeler gözlemlenmiştir. Tablo 1'de çeşitli ticari yüksek performanslı polietilen liflerinin bazı özellikleri verilmektedir.

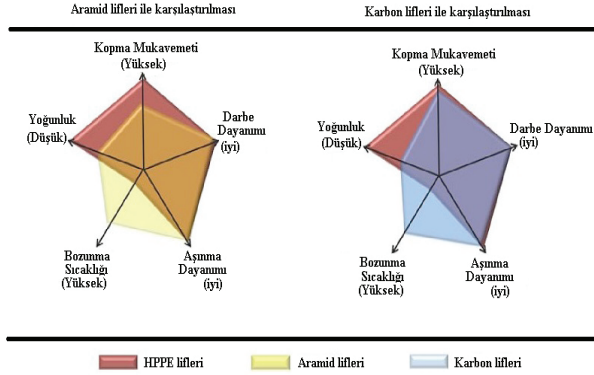
Spectra® ve Dyneema® lifleri ile birlikte Tekmilon® lifleri de ticari bir yüksek performanslı polietilen lif markasıdır [3,4,8,17,19,21,26,32,33,35,38,40-44]. Mitsui Petro Chemical şirketi ve Japon araştırma enstitüsü geliştirilen Tekmilon lifleri tenis raketlerinde, yaylarda, kayaklarda ve kayaklarda güçlendirici olarak kullanılabilir [20,45]. Son yıllarda üretilen polietilen esaslı yüksek performansa sahip bir başka lif ise Kaypla® lifleridir [46]. Hoechst

/ Teijin şirketlerinin bir alt kuruluşu olan Nextrusion GmbH şirketi tarafından 2009 yılında Almanya'nın güneyinde üretilmeye başlanan bu lifler şimdiden 26 ülkede patent almış durumdadır [46]. Ancak lif formundan çok genellikle yüksek performanslı şeritler olarak kullanımına rastlanmaktadır [47,48].

#### IV. YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETİLEN LİFLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri çok yüksek mukavemete ve elastisite modülüne sahiptir [8,19,29,30,49-54]. Polietilenin esnek yapısından dolayı yüksek performanslı polietilen liflerinin darbe dayanımı, mukavemeti ve yorulma dayanımı oldukça yüksektir [1,8,12,17,39,49,50,55]. Bu lifler ayrıca kolaylıkla geri dönüştürülebilir olduğundan çevre kirliliğine neden olmazlar [6]. HPPE liflerinin özellikleri yaygın olarak kullanılan aramid ve karbon lifleri ile karşılaştırıldığında üç lifin de darbe dayanımı ve aşınma dayanımının birbirlerine yakın, karbon ve HPPE liflerinin kopma mukavemetleri arasında çok az fark olduğu ve aramid liflerinin kopma mukavemetinin bu liflere göre daha düşük olduğu belirtilmektedir (**Şekil 6**). HPPE liflerinin yoğunluğunun hem karbon hem de aramid liflerinden çok

daha az olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı aramid ve karbon lifleri ile kıyaslandığında oldukça düşüktür [1].



**Şekil 6.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin bazı özelliklerinin aramid ve karbon lifleri ile karşılaştırılması [1].

#### 4.1. Yüksek Performanslı Polietilen Liflerinin (HPPE) Mekanik Özellikleri

Lif içerisindeki zincirlerin hepsinin lif yönünde sıralanmasından dolayı, yüksek performanslı polietilen liflerinin mekanik özellikleri büyük ölçüde anizotropiktir [21,56]. Lifin eni yönünde ölçülen mukavemet ve elastisite modülü değerleri, boyuna yönde ölçülen değerlerden çok daha azdır [6,21] (Tablo 2).

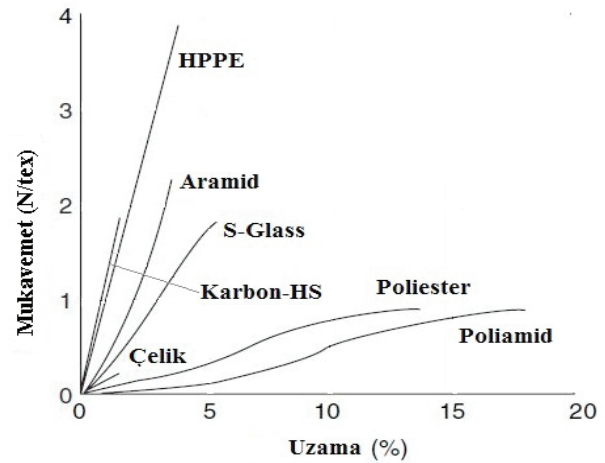
**Tablo 2.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin mekanik özellikleri [6,21,56]

Eksenel kopma mukavemeti	3 GPa
Eksenel kopma modülü	100 GPa
Sünme	$1.10^{-2}$ (Günlük %)
Eksenel basma dayanımı	0,05-0,1 GPa
Eksenel basma modülü	100 GPa
Enine kopma mukavemeti	0,03 GPa
Enine elastisite modülü	3 GPa

#### 4.2. Mukavemet Özellikleri

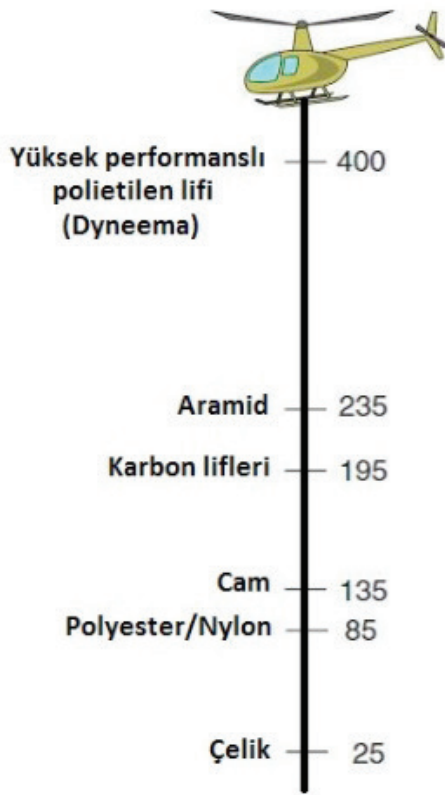
Yüksek performanslı polietilen liflerinin yoğunluğu  $0,97-0,98 \text{ g/cm}^3$  civarındadır ve bu sayede su üzerinde yüzebilmektedir [1,5,6,8,19,21,31-33,38,57]. Yüksek performanslı polietilen liflerinin yüksek mukavemet ve yüksek elastisite modülü gibi üstün özellikleri ile düşük yoğunluğu bu lifi öne çıkarmaktadır [5,19,21,53,57]. Mukavemet ve elastisite

modül değerleri çok yüksek olan bu liflerin yoğunluğunun  $1 \text{ g/cm}^3$ 'den düşük olması özgül mukavemetini ve özgül modülünü aşırı derecede yüksek olmasını sağlamaktadır [6,19,49,52]. Mukavemeti çelikten 10-15 kez daha fazla olan bu liflerin kopma mukavemet değeri literatürde 2.7-4 GPa [1,4,5,7,21,33,38,39] olarak karşımıza çıkmaktadır. Elastisite modülü ise bazı özel karbon lifi türlerinin ve yüksek modüllü (HM) PBO liflerinden sonra gelmektedir [5,38] (Tablo 3). Kopma anındaki uzaması diğer yüksek performanslı lifler ile karşılaştırıldığında biraz düşük olsa da kopma anında uygulanması gereken enerji ve mukavemet oldukça yüksektir [6,21,38]. Düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet kombinasyonu yüksek performanslı polietilen liflerinin üstün özelliklere sahip olmasını sağlamıştır [5,38]. Şekil 7' de çeşitli liflerin mukavemet-uzama değerleri gösterilmiştir [6,21].



**Şekil 7.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE), Aramid, S-Glass, Karbon-HS (Yüksek mukavemet), Poliester, Poliamid liflerinin ve çeliğin Mukavemet-Uzama eğrileri [4,6]

Serbest kopma uzunluğu liflerin mukavemetini ifade etmek için kullanılan bir başka yöntemdir. Lifin kendi ağırlığı ile koptuğu uzunluk olarak özetlemek mümkündür [43]. Bu yöntem de Şekil 8'de de görüldüğü gibi helikopterin belirli bir irtifaya çıkartılarak aşağı salınan lifin kendi ağırlığı ile kopması ile lifin mukavemet değeri belirlenir [6]. Serbest kopma uzunluğu lifin ya da halatın kalınlığından bağımsızdır [6]. Spectra® ve Dyneema® gibi yüksek performanslı polietilen liflerinin serbest kopma uzunluğunun uydunun yörüngesine ulaşabileceği düşünülmektedir [6]. Çelik için bu uzunluk 25 km, karbon lifleri için 195 km, yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin 400 km'e ulaştığı kaydedilmiştir [6,43].



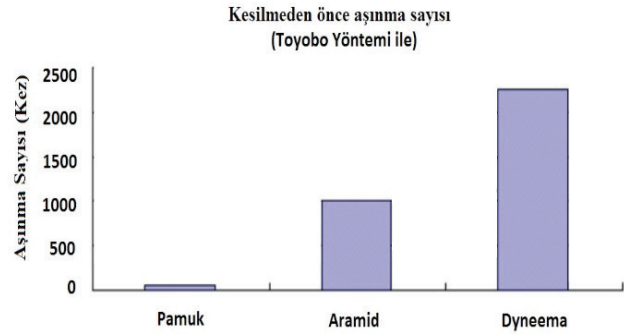
Şekil 8. Çeşitli liflerin kendi ağırlığında kopma uzunluğu (km) [6,43]

#### 4.3. Enerji absorpsiyonu

Yüksek performanslı polietilen liflerinin enerji absorpsiyonu oldukça yüksektir ( $50-70.10^6 \text{ J/m}^3$ ) [21,33,55]. Bu özelliği ile balistik koruma sağlayan ürünlerde ve kesilmeye karşı direnç göstermesi gereken eldivenlerde ya da motorcu kasklarında kullanım alanı bulan bu lifler, karbon veya cam lifi esaslı kompozitlerin darbe dayanımını güçlendirmek için kullanılabilir [6,21,58,59]. HPPE liflerinin balistik darbe aldığı anda ortaya çıkan ısının liflerin sıcaklığının artmasına neden olduğu ve liflerin sıcaklığın arttığı bölgelerinde kalıcı deformasyonların yaşandığı gözlemlenmiştir. Ancak ortaya çıkan bu ısının liflerin balistik direncini arttırabileceğine yönelik ifadelerle rastlanmaktadır [60].

#### 4.4. Aşınma Dayanımı

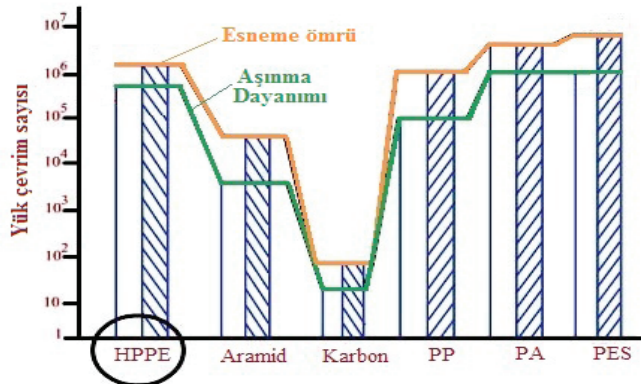
Yüksek performanslı polietilen liflerinin aşınma ve sürtünme dayanımı oldukça yüksektir [1,8,21,32,38,54,55] bu sayede halatlarda ve yüksek performans özelliklerine ihtiyaç duyulan eldivenlerde sık kullanılmaktadır (Şekil 9). Aşınma direncinin yüksek olması ürünün kullanım ömrünü de yakından ilgilendiren bir parametredir [6].



Şekil 9. Aşınma dayanımı [27]

#### 4.5. Yorulma Dayanımı

Yüksek performanslı lifler için yorulma dayanımı oldukça önem taşıyan bir özelliktir. Sadece yüksek statik mukavemete değil ayrıca yüksek çekme ve eğilme yorulmalarına da sahip olan yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri yüksek elastisite modülüne sahip olmalarına rağmen aynı zamanda esneklerdir [6,8]. Ayrıca uzun bir esneme ömrüne (esneme ömrü) sahiptir (Şekil 10) [6,8].



Şekil 10. Çeşitli liflerin aşınma dayanımları ve esneme ömürleri [27]

#### 4.6. Sünme Özellikleri

Yük altında kalma süresi arttıkça deformasyon arttığından yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri sünmeye meyilli olarak kabul edilmektedir [6,8,33,37,52,61]. Kopma sırasında hem daha yüksek bir gerilme hem de daha düşük bir elastisite modülü gibi sonuçlar ortaya çıkmaktadır [8]. Bu özellik, HPPE liflerinden yapılan halatların uzun süreli yüksek ağırlık altındaki uygulamaları için büyük önem taşımaktadır.

Ticari HPPE liflerinin hepsinin sünme değerleri aynı değildir. Üretim sırasında uygulanan işlemlere göre farklılık göstermektedir. Ayrıca, sünme özelliği bütün HPPE lifleri

için çok önemli ve kontrol altında tutulması gereken bir özellik olarak da görülmektedir [6,8]. Örneğin HPPE liflerinin balistik uygulamalarında kullanılacak liflerin sünme değerlerinin sabitlenmesine gerek yoktur ancak halatlarda ya da benzeri uygulamalarda sünme özellikleri önem taşıdığından liflerin sünme değerleri alınarak uygulamalar sırasında yaşanacak sünme miktarları üzerine bazı bilgisayar programları ile tahminler yapılabilmektedir [6].

#### 4.7. Kimyasal Dayanım

Yüksek performanslı polietilen liflerinin bünyesinde, agresif maddeler tarafından hasara duyarlı aromatik halka, amid grubu, hidroksilik ya da diğer kimyasal gruplar bulunmaktadır bu sebeple yüksek kristalin yapı ve yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri bazı organik maddeler hariç genel olarak kimyasalların çoğuna karşı oldukça dayanıklıdır [8,21,32,33,36-39,43,49,53-55,62]. Tablo 4'de yüksek performanslı polietilen liflerinin çeşitli kimyasallara olan dayanımı gösterilmiştir. Ticari yüksek performanslı polietilen liflerinden olan Dyneema® ve Spectra® lifleri, oksitleyici ortamlara karşı duyarlıdır. Kuvvetli yükseltgen ortamlarda lifler hızla mukavemet kaybedebilir fakat normal ortam şartlarında lifler yıllarca mukavemetlerini koruyabilirler [6].

**Tablo 3.** Yüksek performanslı polietilen liflerinin çeşitli kimyasallara dayanımı [6,36]

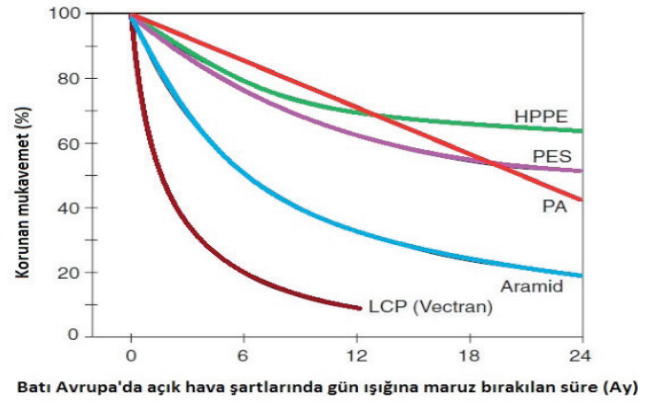
	Yüksek Performanslı Polietilen Lifleri
Distile su	+++
Deniz suyu	+++
%10 Deterjan	+++
Hidroklorik asit (pH=0)	+++
Nitrik asit (pH=1)	+++
Saf asetik asit	+++
Amonyum hidroksit	+++
Sodyum Hidroksit (pH>14)	++
Petrol	+++
Kerosen	+++
Toluen	+++
Triklormetan	+++
Oda sıcaklığında 6 ay boyunca kimyasalın içerisinde bekletilmiştir.	
+++ : etkilenmemiş, ++ : çok az etkilenmiş, + : büyük ölçüde zarar görmüş	

#### 4.8. Nem Çekme Özelliği

Yüksek performanslı polietilen liflerinin amorf bölgeleri çok az olduğu için nem almaları sıfırdır yani higroskopik olmayan bu lifler suyu absorbe etmez [2,12,17,37,52]. Lif su almamasına rağmen, kumaş ya da halat içerisinde multifilament iplikler kullanıldığında kumaş ya da halat yapısına bağlı olarak yapıda %40'a varan oranlarda boşluklar oluşabilir ve lifler arasındaki bu boşluklara da doğal olarak su girebilmektedir [6]. Eğer bu tekstil malzemesinin uygulama yeri için kabul edilemez ise, su itici maddeler eklenerek kullanılabilir [6]. HPPE lifleri suda şişmez, hidrolize olmaz. Nemli ortamda, suda veya deniz suyunda bozunmaz [6,32,38,39].

#### 4.9. Işık Dayanımı

Yüksek performanslı polietilen lifleri, UV ışığına devamlı ya da çok uzun sürelerde maruz bırakıldığında mukavemetinin bir kısmını kaybetse de UV ışınlarına karşı dayanıklı olarak kabul edilmektedirler (Şekil 11) [32,36,38,39,43]. Liflerin depolanması ya da işlemi sırasında UV ışınlarından koruma sağlamak için özel önlemler alınmasına ihtiyaç duyulmamaktadır [36]. Ancak yüksek enerjili radyasyona karşı, gama ışınları ile muamelelerinde zincir parçalanmalarının olduğu ve mukavemet kaybının gözlemlendiği kaydedilmiştir [63].



**Şekil 11.** Yüksek performanslı polietilen liflerinin (HPPE) ışığa karşı dayanımı [6]

#### 4.10. Termal Dayanım ve Alev Direnci

Yüksek performanslı polietilen lifleri özünde bir polietilen lifidir ve polietilen lifleri gibi termoplastiktir [7]. Yaklaşık 150°C'de erimeye başlayan [3,4,8,31,62,64] ve 300-350°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bozulan bu lifler düşük sıcaklıklarda büzüşmektedir [4,37]. Bu sebeple doğrusal ısıl genleşme katsayısı (-12.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) negatiftir



[33,37] (Tablo 5). Erime sıcaklığının göreceli olarak düşük olması yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin de olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [21,55]. HPPE lifleri, kriyojenik (**çok düşük sıcaklıklarda şartlardan 80-100°C'lere** kadar geniş bir sıcaklık yelpazesinde kullanılabilir).  
kullanılabilir.

**Tablo 5.** Yüksek performanslı polietilen liflerinin (HPPE) termal özellikleri [21,31-33,64]

Erime noktası	130-155 °C
Kaynayan suda büzülme	<%1
Isıl iletkenlik	20-40 W/mK
Isıl genleşme katsayısı	-12.10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Termal iletkenlik katsayısı normal liflerden 4 kat iyi olan HPPE (Dyneema®) liflerinin dokunulduğunda verdiği soğukluk hissi konvansiyonel liflerden daha fazladır [65]. HPPE (Dyneema®) liflerinin özel lifler ile birleşimi ile oluşturulan ve dokunulduğunda konvansiyonel ürünlerin iki katına varan serinlik hissi veren Icemax® gibi ticari ürünlere rastlamak da mümkündür. Icemax® adı verilen bu ürünün ısıyı hızla dağıtma özelliği ve soğukluk hissi ile güneş altında ve sıcakta çalışan kişilerin konforunu sağlamak hedeflenmiştir [65].

Yüksek performanslı polietilen liflerinin ısı ve aleve karşı gösterdiği dayanımın ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilen testler sonucunda, bu liflerin birçok şart altında kabul edilebilir değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Yanmaya maruz bırakılan yüksek performanslı polietilen liflerinin tıpkı normal polietilen liflerinde olduğu gibi sadece karbon ve hidrojen gazları ürettiği, nitrojen ve diğer zararlı kimyasal elementlerin üretilmediği bu sayede de yanma sırasında ortaya çıkan gazların zehirlilik oranının çok düşük oranlarda olduğu belirtilmiştir [6].

LOI (Limit oksijen indeksi) değerleri incelendiğinde ise, yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerinin ticari markası olan Dyneema® ve Spectra® liflerinin LOI değerinin 20'den az olduğu gözlemlenmiştir [64]. LOI değerinin 20'den az olması bu liflerin atmosfer şartlarında yanabildiğini göstermektedir [64].

#### 4.11. Kesilme ve Delinme Direnci

Avrupa Standartları'na göre EN 388 (1994) kesilme dayanımı 1 ile 5 arasında sınıflara ayrılmıştır. Kesilme dayanımının en yüksek olduğu sınıf yüksek performanslı polietilen liflerinin ait olduğu sınıf 5'tir [6]. Yüksek performanslı polietilen liflerinden elde edilen dokuma ya

da örme yüzeyler, kesilmeye karşı mükemmel dirençleri sayesinde çok iyi bir koruma sağlayabilmektedir [62].

Tekstil ürünün uygulanan darbe ile delinmeye karşı gösterdiği direnç; hem lifin özelliklerine hem de kumaş konstrüksiyonuna bağlıdır [6]. HPPE lifli ipliklerden örülmüş kumaşlar, eskrim kıyafetleri için kullanılan ucu çok keskin olmayan silahlar ile uygulanan bir teste tabii tutulduğunda bunu başarıyla geçebilmektedir fakat dağcı kazması gibi sivri uçlu bir metal kolaylıkla lifler arasına girebilmekte yani kumaş delinmektedir [6].

Aynı zamanda yüksek performanslı polietilen liflerinin neme karşı hassasiyetinin düşük ve kimyasal maddelere karşı dayanıklı olması, bu liflerden yıkamaya ve giymeye dayanıklı koruyucu giysilerin üretilebilmesine imkân sağlamaktadır [6,27].

#### 4.12. Elektriksel ve Akustik Özellikleri

Yüksek performanslı polietilen lifleri yalıtıcıdır. Polietilen lifleri genel olarak yüksek öz dirençleri ( $>10^{14} \Omega m$ ) [21], düşük dielektrik sabiti (2,2-2,4) [21,33,62] ve çok düşük bir dielektrik kayıp faktörü ( $2 \cdot 10^{-4}$ ) [21,33] ile bilinmektedir [6,55]. Fakat liflerin elektriksel özellikleri üzerinde lif çekimi sırasında uygulanan işlemlerin büyük etkisi vardır. Yüksek performanslı polietilen liflerinin kumaşın boyuna yöndeki ses hızı ( $10-12 \cdot 10^3 m/s$ ) enine yöndeki ses hızından ( $2 \cdot 10^3 m/s$ ) daha yüksektir [6,33].

### V. YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETİLEN LİFLERİNDEN ELDE EDİLEN TEKSTİL YAPILARI

Yüksek performanslı polietilen lifleri farklı tekstil formlarında karşımıza çıkabilmektedir. İplik, dokuma, örme, dokusuz **yüzey**, kompozit, lamine yüzey, ağ ya da halat formunda rastladığımız bu HPPE lifli yüzeyler sadece HPPE lifleri kullanılarak elde edilebileceği gibi çeşitli liflerle karışım halinde de kullanılabilir [6,38]. Yüksek performanslı polietilen liflerinden iplik üretim işlemi çok zorlu değildir fakat sahip olduğu mukavemet ve elastisite modülü değerlerinin işlemler sırasında korunabilmesini sağlamak amacıyla bazı önlemlerin alınması gerekmektedir. Örneğin dönen seramik kılavuzlar kullanılabilir. Temas noktalarındaki yüzeylerden herhangi bir çapaklanmanın ya da yivlenmenin olması; iplik özelliklerine ciddi ölçüde zarar verebilmektedir [6]. Ayrıca iplik üretimi sırasında yüksek gerilimlerden ve keskin kenarlardan uzak durulmalıdır.

Dokuma işlemleri sırasında da dikkat edilmesi gereken en önemli husus, liflerin mukavemet ve elastisite modülü

değerlerinde herhangi bir kaybın yaşanmasını engellemek ya da bu kayıpları minimuma indirmektir. Yüksek performanslı polietilen liflerin örme işleminde ise lifler için özel bir ekipman kullanılmasına gerek yoktur. Örgü yapısında %100 HPPE filament lifleri kullanılabilmesi gibi giysi konforunu iyileştirmek için ya da daha az performans ihtiyacı duyulan durumlarda kumaşın performans özelliklerini azaltmak için pamuk ile karıştırılabilir [6].

HPPE liflerinin yaygın bir kullanımı olan halat konstrüksiyonu elde edilirken halat yapısının performansının etkilenmemesi için üretim sırasında gerilimin sabit tutulması büyük önem taşımaktadır. HPPE lifli halatlara, halat üretimi sırasında oluşabilen ekstra uzamayı gidermek ve mukavemeti arttırmak için gerilim altında bir ısıl fiksaj işlemi uygulanabilmektedir. Bu işlem aynı zamanda halat içindeki HPPE liflerinin oryantasyonunun da gelişmesini sağlamaktadır [6].

Yüksek performanslı polietilen liflerinin dokusuz yüzeyler olarak kullanımı da mevcuttur. Hatta dokusuz yüzey kullanımı için konvansiyonel yöntemden farklı yöntemler geliştirilerek üretilmiş Dyneema UD® ve Spectra Shield® gibi bazı HPPE dokusuz yüzey yapıları bulunmaktadır [4,6,7,38,39].

Spectra Shield® dokusuz yüzeyler, yaygın olarak kullanılan dokusuz kumaş yüzeyi oluşturma tekniklerinden biri kullanılmadan, yan yana paralel sıralanan ipliklerin farklı yönlerde iki tabaka halinde üst üste konulması ve bu iki tabakanın çeşitli termoplastik matrisler ile kaynaştırılması sonucu elde edilmektedir [39]. Genellikle balistik koruma amaçlı ürünlerde kullanılan bu yapıların, aynı ağırlıktaki bir kumaş yüzeyinden çok daha etkin balistik koruma sağladığı gözlemlenmektedir [39]. Fakat HPPE lifli bu kompozitlerin yanma sıcaklığı düşük olduğundan güç tutuşur bir kılıf ile kaplanması gerekmektedir [39].

Patentli üretim olan bu sistemler sadece lisansına sahip şirketler tarafından üretilmektedir. Dynema Fraglight® kesikli kısa liflerden üretilen iğneleme yöntemi ile elde edilen dokusuz yüzey türüdür. Genellikle bomba ve şarapnel parçalarından korunmak için askeri zırhlarda kullanılır [6]. Yüksek performanslı polietilen liflerinin çarpma dayanımını ve enerji absorpsiyonunu iyileştirmek için cam ya da karbon lifli kompozit yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilmektedir [6,21,58].

Kompozit malzemeler, yüksek performanslı polietilen liflerinin kullanıldığı farklı bir yapı formudur. Kompozit malzemelerde genellikle güçlendirici olarak kullanılan HPPE lifleri, kompozit malzemelerde tek başına kullanılabildiği gibi hem konvansiyonel [66] hem de diğer yüksek performanslı malzemeler (bazalt lifleri [67], karbon nano tüpler [68-

71]) ile birlikte de kullanılabiliyorlar. Karbon nanotüpler ile birlikte kullanılan HPPE lifli kompozit yapıların hem mukavemetinde hem de termal özelliklerinde sadece HPPE lifleri kullanılan kompozit yapılara göre iyileşme gözlemlenmektedir [68]. Ayrıca elektrik iletkenliğinde ve çarpma dayanımında artış sağlamaktadır [69]. Karbon nanotüp ve HPPE lifleri içeren kompozit yapılar bu sayede, sürtünmeye dayanıklı, darbe dayanımı yüksek ve iyi bir korozyon dayanımına sahip malzemelerin kullanılması gereken elektromanyetik kalkanlarda ya da elektrik alanında kullanılan malzemelerde kullanılabilmektedir [69-72]. Karbon nanotüp ilavesi ile HPPE liflerinin UV ışınlarına karşı dayanımının da artırıldığı kaydedilmiştir [32].

### Cuben Fiber (CTF3)

Cuben Fiber (CTF3), yüksek performanslı polietilen lifi monofilamentleri ve polyester, PVF (polivinil florür film) gibi filmler kullanılarak üretilen ticari bir laminasyonlu kumaş türüdür [73]. Cuben Fiber ve Cuben Tech Şirketleri tarafından geliştirilen CTF3 (Cuben fiber) yüksek performanslı dokusuz yüzey kumaşının ilk kullanımı 1992 Amerika's Cup yat yarışlarına dayanmaktadır. Bugün kullanılmakta olan ticari ürünün ilk versiyonlarının bu yarış sırasında kullanıldığı öne sürülmüştür [73]. Cuben Fiber olarak bilinen kumaş 2009 yılında tekrar markalandırılarak CTF3 adını almıştır. Sadece HPPE lifleri ile değil diğer yüksek performanslı lifler ile birlikte de kullanılmaya başlanan CTF3; yatlarda, yelkenlilerde, rüzgâr sörflerinde, zeplin gibi hava gemilerinin (air-ship) gövdelerinde, medikal uygulamalarda, çadırlarda, sırt çantalarında, uyku tulumlarında, yağmurluklarda, cüzdan çanta gibi aksesuarlarda kullanılabilmektedir [73] (Şekil 12).



Şekil 12. Yüksek performanslı polietilen lifleri ile üretilen Cuben Fiber ticari dokusuz yüzey kumaşlı ürünler; cüzdan[74], su geçirmez çadır [74-76], yelken [77], kamp koltuğu ve kamp yatağı [78], yağmur pantolonu [79], kar ayakkabıları [80], yağmurluk [81], su geçirmez eldiven [76], sırt çantası [82], hava gemileri [83]

## VI. YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETİLEN LİFLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Yüksek performanslı polietilen lifleri çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Liflerin sahip olduğu üstün özellikler liflerin kullanımının her geçen gün daha yaygınlaşmasına neden olurken, bu liflerden üretilen ürünler gün geçtikçe daha çok günlük hayatımızın içerisine girmektedir. Günümüzde hemen hemen teknik tekstillerin tüm alt başlıklarında kullanım örneğine rastladığımız bu liflerin halen geliştirilmeye açık bazı özellikleri sayesinde gelecekte çok daha yakından tanıdığımız bir lif haline dönüşeceği düşünülmektedir.

### 6.1. Medikal Teknik Tekstiller

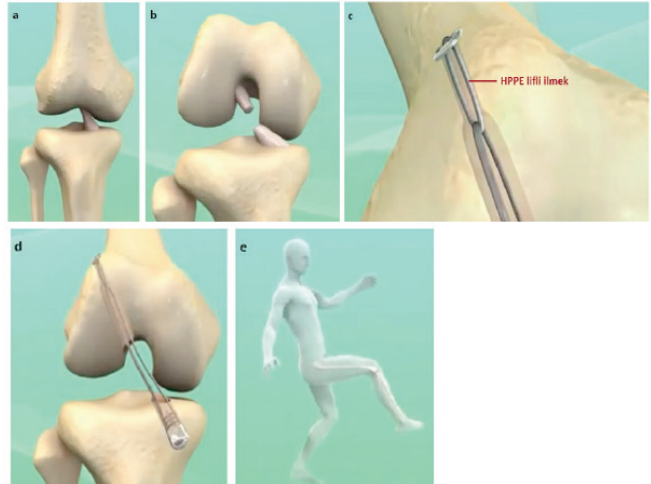
Yüksek performanslı polietilen lifleri bioetkisiz olarak kabul edildiklerinden yani vücut sıvısı içerisinde korozyona dayanıklı olduklarından dolayı medikal teknik tekstillerde kullanımı oldukça yaygındır [5,6,36,84]. Literatürde; kan damarları içerisinde pıhtı yakalama sistemleri [45], kan filtreleri [55], diş iplikleri [33,85], vücut içerisine yerleştirilen implantlar [84], protezler [55], kardiyovasküler cihazlar (damar açma işlemlerinde kullanılan cihazlar, vb.) [86], cerrahi dikiş iplikleri gibi genel ameliyat malzemeleri [85] gibi birçok alanda HPPE liflerinin kullanıldığı kaydedilmiştir (Şekil 13). İncelikleri 0,3 dpf (0,44 dtex) ile 10dpf (11 dtex) arasında değişen HPPE liflerinin [2,6,38] küçük medikal aletlerin üretiminde ve dolaylı olarak hastaların daha hızlı sürede iyileşmesinde büyük önem taşımaktadır [87].

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin örme yapısındaki formlarının ortopedik aletlerde kullanımı için iyi bir potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir [36]. Farklı liflerle birlikte kullanılarak HPPE liflerinin pürüzsüz yüzeyi ile iyi bir giyim rahatlığı sağlanırken, buna ek olarak doğal liflerle birlikte kullanıldığında teri emme kapasitesine de sahip ürünler elde edilebilmektedir [36]. Genellikle örme tekstil formu kullanılsa da dokuma formu oluşturularak da bu tarz ortopedik ürünler elde edilebilmektedir [36]. Örme formunda kullanılan HPPE lifli medikal ürünlerin başında bandajlar gelmektedir. Özellikle kesilen uzuvların vücutta kalan kısımlarının sarılmasını sağlayan çorap şeklindeki ürünlerde HPPE lifli örme yapılar tercih edilmektedir (Şekil 13) [36].



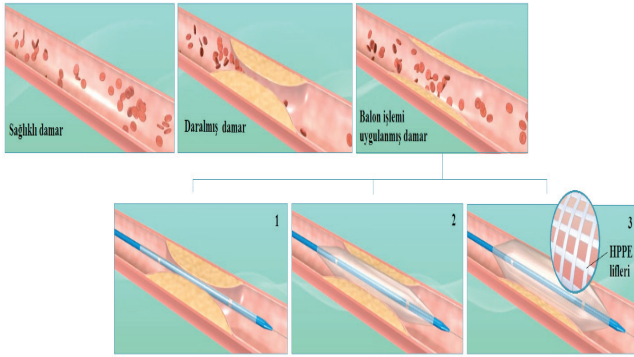
Şekil 13. HPPE lifli medikal tekstil ürünlerine örnekler; a) cerrahi iplikler [88-91], b) kesilen uzuvların vücutta kalan kısımlarına geçirilen çorap şeklinde bandajlar [92,93]

Şekil 14’ de yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin ön çapraz bağ yaralanmalarının tedavisinde kullanımı gösterilmektedir [94,95]. Ön çapraz bağ yaralanmaları genellikle ayak yere sabit basarken, dizin vücutla beraber bir yöne dönmesi sonucunda oluşmaktadır [96]. Yüksek performanslı polietilen lifi, devamlı bir döngü halindeki yapı içerisinden kopan tendon geçirilerek kemiğe sabitlenmesi şeklinde gerçekleştirilen operasyon ile hastaların tedavisinin başarılı ile tamamlandığı gözlemlenmiştir [94,95].



Şekil 14. Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin ön çapraz bağ yaralanmalarının tedavisinde kullanımı; a) eklem yapısının sağlıklı hali, b) kopmuş ön çapraz bağının görüntüsü, c-d) kopan ön çapraz bağı yerine HPPE liflerinin kullanımı, e) HPPE lifleri ile tedavi edilen eklem eski sağlığına kavuşmasının temsili [94]

Şekil 15’de yağlanma sonucu iç çeperinde daralma yaşanan bir damarın yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri kullanılarak yapılan balon anjiyoplastisi işlemini göstermektedir. Balon adı verilen bir yapının damar içerisine salınarak damarda daralmanın yaşandığı bölgede kontrollü olarak şişirilmesi ile damar içerisindeki daralmanın azaltılması şeklinde özetlenebilen bu işlemde balon yapısı için yüksek performanslı polietilen liflerinin çok az esneme ve üstün mukavemet özelliklerinden faydalanılabilmektedir [97].

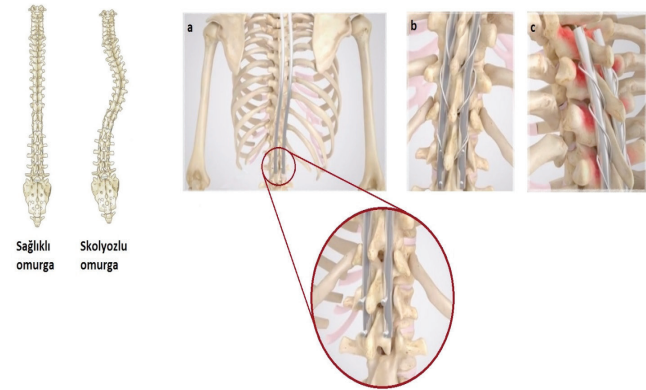


**Şekil 15.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinden üretilmiş balon sistemi ile gerçekleştirilmiş balon anjiyoplastisi; 1) balonun damar içerisinde ilerletilmesi, 2-3) balonun kontrollü olarak şişirilmesi [97]

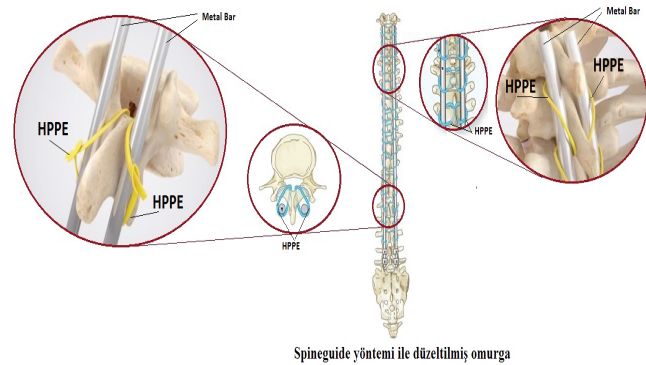
Günümüzde birçok medikal tekstil uygulamasında kullanılan yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin yakın gelecekte uygulama alanlarının daha da çeşitleneceği düşünülmektedir [95]. Liflerin yüksek basınçlara dayanıklılığı, uzamasının düşük olması ve doku iyileşmesi için uyum göstermesinden dolayı cerrahi uygulamalarda kullanılabilmektedir. Ayrıca kemik çimentosunun uygun yerleşimine de olanak sağlamaktadır [95].

Hollanda’da henüz çalışma aşamasında olan Spineguide isimli bir proje kapsamında, yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri kullanılarak özellikle 8-16 yaş aralığındaki gençlerde yaygın olarak görülen Skolyoz (omurga eğriliği) hastalığının tedavisi için yeni bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir [95,98]. Nefes alma problemlerine, ağrılara neden olan bu hastalık hareket fonksiyonlarını kısıtlayarak hayat kalitesini ciddi şekilde etkilemektedir. Bu hastalığın geleneksel yöntemler ile yapılan tedavisi omurga üzerine vidalanan 2 metal çubuğun omurlara metal kablolarla bağlanması şeklinde gerçekleştirilmektedir [98] (Şekil 16). Ancak bu yöntemde metal kabloların kemik dokusunu kesmesi ve dokuyu çevreleyen kaslara zarar vermesi söz konusudur.

Metal kablolar yerine yüksek performanslı polietilen lifleri kullanılarak bu yöntemi revize etmeyi ve olası riskleri ortadan kaldırmayı hedefleyen projenin ayrıntıları Şekil 16 ve Şekil 17’de gösterilmektedir [98]. HPPE lifli kabloların kullanılmasının planlandığı yeni yöntemde, konvansiyonel yöntemde kullanılan metal kabloların neden olduğu zararın ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Bu yöntem ile ayrıca hastalar daha geniş bir hareket özgürlüğüne sahip olabilmekte, ağrılardan kurtulmakta ve hastanın fiziksel gelişimini engelleyecek her hangi bir durum oluşturmamaktadır [98].



**Şekil 16.** İki metal çubuğun omurga üzerine vidalanması (a) ve omurgaya vidalanan metal çubuğun metal kablolar ile sabitlenmesi (b) işlemleri ile gerçekleştirilen konvansiyonel Skolyoz rahatsızlığı (omurga eğriliği) tedavisi [98].

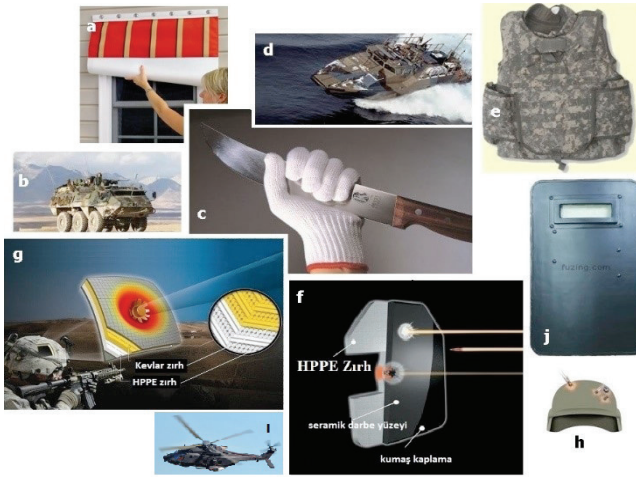


**Şekil 17.** Metal kablolar yerine HPPE lifli kabloların kullanıldığı uygulama [98]

## 6.2. Koruyucu Teknik Tekstiller

Yüksek performanslı polietilen liflerinin koruyucu teknik tekstillerde yaygın şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Darbe dayanımı ve enerji absorpsiyonu yüksek olduğundan özellikle balistik koruma sağlayan giysiler

için kullanılan lifler arasında önemli bir role sahiptir [4,7,21,31,32,38,39,60,62,99-103]. Sadece kurşun geçirmez yelekler değil [4,7,21,33,36,38,55,103,104], genellikle askeri amaçlı kullanılan çeşitli hava, kara ve deniz taşıtlarının zırhları [62,97], kişisel koruma sağlayan kask ve kalkanlar [4,8,38,55,62,85,105], kesilmeye dayanıklı malzemeler (eldivenler ve giysiler) [4,21,33,38,62,106], evlerde fırtına önleyici paneller [85] gibi alanlar bu liflerin kullanım alanlarındandır (Şekil 18).



**Şekil 18.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri kullanılarak üretilen koruyucu teknik tekstiller: a) fırtına önleyici panel [85], b) balistik koruma için HPPE lifleri ile güçlendirilmiş tank [107], c) HPPE lifli kesilmeye dayanıklı eldiven [108], d) balistik koruma için HPPE lifleri ile güçlendirilmiş askeri bot [97], e) kurşungeçirmez yelek [109], f-j) HPPE lifli kalkan [85,105], g) Kevlar ve HPPE lifleri içeren kask [110], h) HPPE lifli askeri kask [111], i) balistik koruma için HPPE lifleri ile güçlendirilmiş helikopter [97].

### 6.3. Spor ve Serbest Zaman Teknik Tekstilleri

Yüksek performanslı polietilen lifleri sahip oldukları üstün özellikleri sayesinde sürtünme dayanımı ya da mukavemetin önem taşıdığı spor ürünlerinde tercih edilen bir hammadde haline gelmiştir [5,55,62]. Özellikle düşme ve kazaların sık yaşandığı motor ve bisiklet sporlarında yüksek performanslı polietilen lifleri ile güçlendirilmiş ürünlere rastlamak mümkündür [97]. Şekil 19' da profesyonel bir erkek bisiklet sporcunun yaralanmasına ve bisiklet sporcularının kıyafetlerinin yaralanmalarının sıkça yaşandığı bu bölgelerde HPPE lifleri ile güçlendirilmesine örnekler verilmiştir [97]. Motor ve Formula araç sürücülerinin kasklarında yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin üstün mukavemet özelliklerinden faydalanılarak darbeye dayanıklı kasklar geliştirilmektedir

[8,21,33]. Aynı şekilde buz sporcuları için de benzer HPPE lifleri ile güçlendirilmiş giysilere rastlamak mümkündür [97].

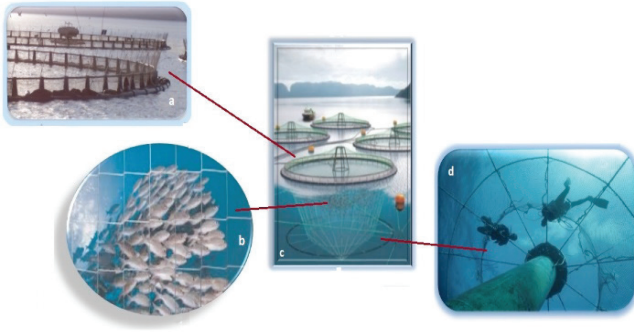
Spor çantalarında [112], spor ayakkabılarında, raketlerde, ve yaylarda kullanılan iplerde [85], uçurtma iplerinde [85], golf toplarında [55], bowling pistlerinde [55], buz sporlarında kullanılan malzemelerde ve giysilerde kullanılabilen yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin diğer bir kullanım alanı da olta balıkçılığıdır [100]. Oltalarda, ağlarda da kullanımı mevcuttur [5,17,21,33,36,37,50,55,85]. Ses modülü yüksek olduğundan balık oltaya takıldığı an çok hızlı şekilde hissedilebilmektedir bu da balıkçılık için büyük bir avantaj sağlamaktadır [37].



**Şekil 19.** Yüksek performanslı polietilen lifleri ile üretilmiş spor ve serbest zaman teknik tekstilleri; a) yarış aracı ve motor sürücülerinin kasklarında [113], b) HPPE lifleri ile güçlendirilmiş karbon lifli kask [114], c) Profesyonel bir erkek bisiklet sporcusunun yaralanma örneği [115], d) HPPE lifli spor çantası [85], e) buz sporlarında kullanılan giysiler [97], f-g) HPPE lifleri ile güçlendirilmiş bisiklet sürücüsü kıyafeti [97,116], h) HPPE lifli spor ayakkabılar [117], i) olta [97], j-k) bisiklet sürücüsü kıyafetinin HPPE lifleri ile güçlendirilmiş kısımları [116].

### 6.4. Tarım Teknik Tekstilleri

HPPE liflerinden üretilen ağlar hem profesyonel hem de amatör balıkçılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır [33,85,95]. Oltalarda, ağlarda, balıkçılar tarafından kullanılan trollerde ve balık çiftliklerinde kullanılan ağlarda kullanıldığı görülmektedir [33,85,97] (Şekil 20). Balık çiftlikleri için büyük tehlike arz eden köpek balığı saldırılarının bu liflerden üretilen ağlar sayesinde önlediği kaydedilmiştir. Köpek balığı ısırıklarından zarar görmeyen HPPE lifli ağlar balıkların korunmasını sağlamaktadır. İstenilen uzunlukta, genişlikte ve derinlikte kullanılabilen bu ağlar balık üreticileri için avantaj sağlamaktadır [97,118].



**Şekil 20.** Tarım teknik tekstillerinde Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinden üretilen ağlar ile kurulmuş bir balık çiftliği; a) balık çiftliklerinin su üzerinden görünümü [119], b) ağ içerisinde beslenen balıklar [97], c) balık çiftliklerinin su üzerinden ve su altından görünümü [119], d) balık çiftliği kurulumunun su altı görüntüsü [118]

### 6.5. Taşımacılık Teknik Tekstilleri

Taşımacılık teknik tekstilleri otomobiller, ağır yük araçları, otobüsler, uçaklar, trenler ve deniz taşıtlarında kullanılan tekstil materyallerinin tümünü kapsamaktadır. Yüksek performanslı polietilen lifleri de taşımacılık tekstillerinde özellikle de deniz taşıtlarında geniş bir kullanıma sahiptir [5,12,33,43,62]. Aşırı sağlamlığı, hidrofob yapısı ve hafifliği sayesinde ip, halat ya da urgan [12,21,36,43,120] olarak hem kara hem de deniz taşıtlarında tercih edilen bir hammadde haline gelen HPPE lifleri aynı zamanda derin sulardaki çalışmalarda da başarıyla kullanılmaktadır [5,12,17,44]. Bunun en yakın örneği geçtiğimiz yıllarda İtalya kıyılarında batan seyahat gemisinin deniz altından çıkartılması işlemidir. Bu işlem 3 km'i aşan bir derinlikte gerçekleştirilmiş ve işlem sırasında HPPE lifleri kullanılmıştır [97]. Ayrıca yelkenliler için ileri teknoloji ile üretilmiş HPPE lifli kompozit yapılardan elde edilmiş yelken bezleri [85], deniz taşıtların gövdelerinde güçlendirici olarak [62], çekme halatları [33], demirleme halatları [33], yatlarda kullanılan halatlar [17,33], uzun halatlar [33], araba panelleri [33] gibi çeşitli alanlarda kullanım örneklerine rastlamak mümkündür (Şekil 21).

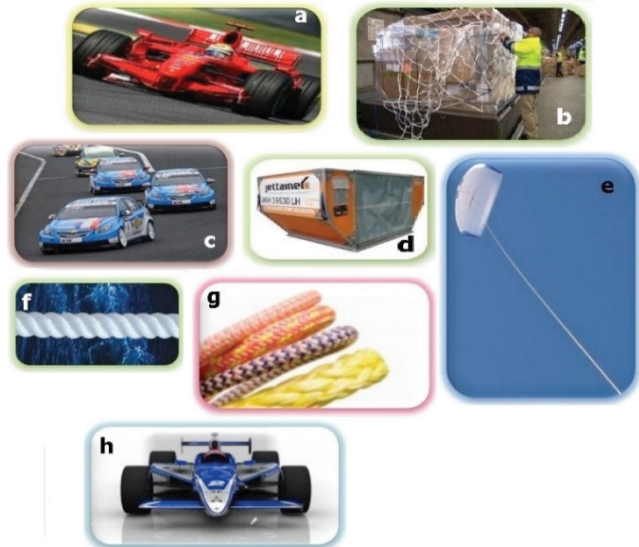
Hava taşımacılığında ağırlık büyük önem taşıdığından yüksek performanslı polietilen lifleri büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir [62]. HPPE lifleri bu alanda genellikle ip ya da halat formunda kullanılsa da kumaş ve kompozit yapı uygulamaları da bulunmaktadır. Paraşütlerde, balonlarda [85] ve Nasa tarafından uzayda kullanılan uzay balonlarında da kullanılabilmektedir [85,121].

Hafif olmalarının yanında çok iyi bir mukavemete ve darbe dayanımına sahip olan aynı zamanda enerji absorpsiyonu da yüksek olan HPPE lifleri Boeing 737, Boeing 757 gibi

uçakların kokpit kapılarında balistik koruma sağlayan kompozit yapılar olarak kullanılmaktadır [122].

Uçak ile taşınacak kargo konteynırlarında ya da kargoların sabitlenmesinde kullanılan yardımcı elemanlarında mümkün olduğunca hafif olması gerekmektedir. Günümüzde KLM ve Lufthansa gibi havayolları tarafından kullanılan, yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin hafif ve üstün mukavemet özelliklerinde faydalanılarak geliştirilen kargo ağları ve HPPE lifli kumaş ya da kompozit yapılar ile üretilen kargo konteynırları hem yakıt hem karbon emiliminin hem de maliyetlerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır [97].

Yüksek performanslı polietilen liflerinin motor sporlarındaki kullanımı sadece sürücüler için tasarlanan giysi ve aksesuarlarda değil aynı zamanda araçlar içi malzemelerde de bulunmaktadır. Örneğin, motor sporları için aksesuar üreten bir şirket olan OMP Racing şirketi 2013 yılında DSM şirketi ile ortak bir çalışma sonucunda yüksek performanslı polietilen lifleri ile emniyet kemeri üreterek, hem çok hafif hem de oldukça mukavemetli bir ürün elde etmişlerdir. İlk olarak hızın, hafifliğin ve dolayısıyla mukavemetin büyük önem taşıdığı Formula 1 araçlarında kullanılmaya başlanan bu emniyet kemerleri, aynı yıl IndyCar araba yarışlarında, Uluslararası Otomobil Federasyonu (FIA) tarafından düzenlenen Turing Otomobil Şampiyonası (WTCC) ve Dünya Rally Şampiyonası (WRC) gibi birçok yarış organizasyonunda kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 21) [97].



**Şekil 21.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin kullanıldığı taşımacılık teknik tekstillerine örnekler: Formula 1 (a)[123], Turing (c)[124] ve IndyCar (h) [125] yarışlarında emniyet kemerleri, paraşüt halatları (e) [85], denizcilikte kullanılan çeşitli halat ve sicimler (f,g) [126], uçaklarda kullanılan kargo ağları (b) [97] ve kargo konteynırları (d) [97]

### 6.6. Giyim Teknik Tekstilleri

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri son yıllarda günlük yaşamda kullanılan tekstil ürünleri içerisinde de farklı liflerle karışım halinde kullanılarak karşımıza çıkmaktadır [127]. İyi bilinen denim markalarından biri olan Levi's ve DSM şirketi tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada %96 pamuk ve %4 oranında Dyneema® lifleri kullanılarak özel bir ürün geliştirilmiştir [97]. Dyneema® liflerinin oranın %4 gibi az bir oranda olmasına karşın geleneksel tamamı pamuklu denim kumaşla karşılaştırıldığında ürün mukavemetinde %25 oranında, ürünün sürtünme dayanımında ise 2,5 kata varan bir artış sağlandığı kaydedilmiştir [97]. Elde edilen yüksek mukavemet ve sürtünme dayanımı sayesinde sürtünme ve delinmeye dayanıklı giysilere ihtiyaç duyulan motor sporları gibi bazı tehlikeli sporlarda ya da metal, otomobil endüstrisi gibi riskli alanlarında kullanılmak için ideal bir ürün olarak kabul edilebilmektedir (Şekil 22) [127].



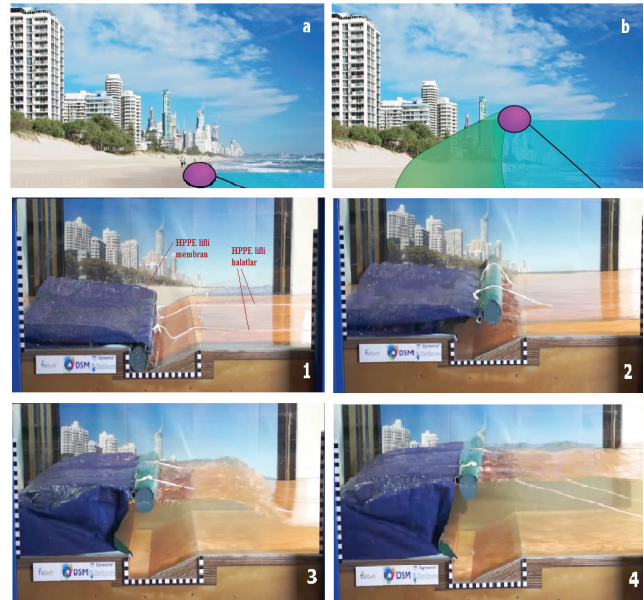
Şekil 22. motor sürücüler için HPPE lifleri ile güçlendirilmiş deri ceketler, kasklar (a) [97] ve kotlar (c) [97,128], kesilmeye dayanıklı tişörtler (b) [129]

### 6.7. Jeotekstiller

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin kullanılması planlandığı bir diğer uygulama ise tsunami önleyici membranlardır. Dünyada denize kıyısı olan birçok şehir büyük depremler sonrası denizlerde ya da okyanuslarda oluşan bu dev dalgaların tehdidi altındadır. Tsunami felaketinin şiddetini azaltmak ve zaman kazandırmak için düşünülen bu proje sahilde yüzen bariyer konsepti olarak isimlendirilmektedir [130]. Normal zamanda neredeyse görünmez olarak bulunan yüzen bariyerin felaket anında suyun yükselmesi ile birlikte su üzerine çıkması ve su geçirmeyen çok güçlü bir membran yardımıyla dev dalgaların sahile vurmasını engellemesi planlanmaktadır. Delf Teknoloji Üniversitesi, Deltares şirketi ve Dyneema® liflerinin üreticisi DSM şirketinin ortak çalışması olan bu projede; membran yapı üzerinde suyun oluşturacağı

kuvvetlerin hesaplanabilmesi için mekanik bir model oluşturulmuştur (Şekil 23)[130]. Bu mekanik model Şekil 23'de gösterilmektedir. Şekil 23-a ve Şekil 23-1 tsunami engelleyici yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifli membran yapının afet öncesi günlük konumunu temsil etmektedir. Tsunami felaketinin başlaması suyun yükselmesi ile birlikte Şekil 23-b ve Şekil 23-2' de gösterildiği gibi yüzen bariyer su yüzeyine çıkmaktadır. Şekil 23-3 ve Şekil 23-4'de su yüksekliği artsa dahi yüzen bariyerin su üzerinde kalarak dalgaların sahile vereceği zararın engellemesi modellenmiştir [130].

1 cm kalınlığında Dyneema® lifleri içeren membran yapının 20 m yüksekliğindeki tsunami dalgalarını durdurma potansiyeline sahip olduğu, tasarlanandan daha yüksek dalgaların oluşması halinde bile Dyneema® halatlar sayesinde tsunami dalgalarından korunmanın sağlanabileceği düşünülmektedir [130].

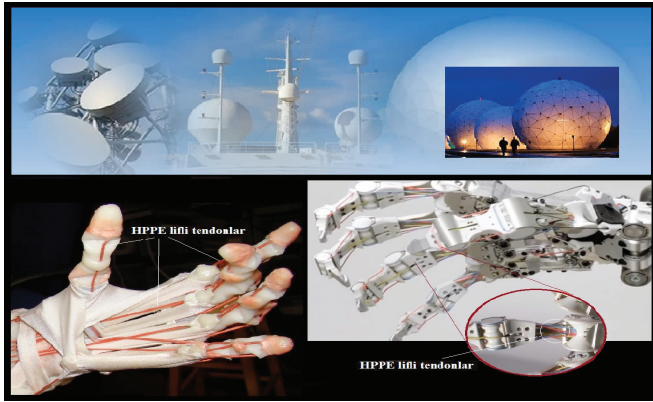


Şekil 23. Tsunami engelleyici yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifli membran yapının çalışma mekanizmasının modellenmesi [130]

### 6.8. Endüstriyel Teknik Tekstiller

Radar tertibatlarında [33,62,120,131,132], pompa dişlilerinde [55], valf contalarında [55], kömür, çimento, buğday, kum, çakıl gibi hacimli malzemelerin ambalaj ve/veya nakliye uygulamalarında [55], hoparlörlerde [33,57], çok düşük sıcaklıklarda yapılan üretim ve işlemler için kullanılan (kriyojenik) kompozitlerde [33,133,134] ve robot çalışmalarında [135] yüksek performanslı polietilen liflerinden

faýdalanılmaktadır. İnsansı robotik organ çalışmalarında kullanımına rastlanan HPPE liflerinin yapay el uygulamasında hareketi sağlayan tendonları oluşturmak maksadıyla kullanımı Şekil 24'de görülmektedir [135]. Yüksek performanslı polietilen lifleri cam lifi gibi radarlarda sık kullanılan malzemelerle kıyaslandığında daha az sinyali absorbe ettiğinden ve yansıttığından dolayı radar sistemlerinin giydirmelerinde yaygın kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Bal peteği şekilli sandviç kompozitler olarak ya da farklı şekillerde elde edilen kompozit yapılarda radar cihazların kaplaması olarak kullanılmaktadır (Şekil 24)[132].

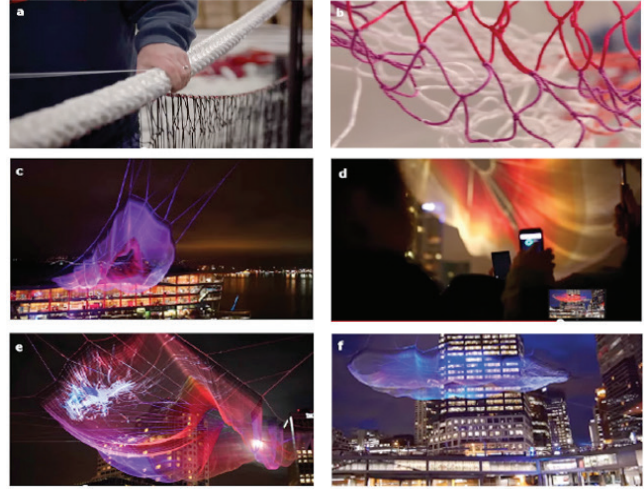


**Şekil 24.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifli yapıların kullanıldığı radarlar (kompozit yapılar) [136,137], insansı robotlar (kablolar) [135] ve mekanik robotlar (kablolar) [138]

### 6.9. Özel Uygulamalar

Yüksek performanslı polietilen liflerinin teknik tekstillerde kullanılmalarının yanı sıra sanatsal uygulamalarına da rastlamak mümkündür. Örneğin, Vancouver'da yüksek binalar arasında kalan bir alanda havada asılı olarak sergilenen en büyük heykellerden biri olarak kabul edilen yapı Spectra® liflerinden elde edilmiş organlarla hazırlanmıştır [139,140]. Spectra® liflerinin düşük ağırlığı sayesinde rüzgâr ile dalgalanabilen yapının aynı zamanda yüksek performanslı polietilen liflerinin verdiği üstün mukavemet özelliği sayesinde oldukça dayanıklı olduğu belirtilmektedir. [140]. Google'ın da içerisinde bulunduğu bir ekip tarafından hazırlanan bu çalışmada, etraftan geçen kişilerin cep telefonlarına yükledikleri bir uygulama ile heykel üzerine yansıtılan ışıkları kontrol edebilmesi sağlanmıştır [140]. Bunun sonucunda gökyüzünde oldukça geniş bir yer kaplayan fakat rüzgâr ile yaptığı dalgalanmalar sayesinde çok narin görünen, etraftaki yüzlerce insanın heykel üzerinde oluşturduğu renk ve şekil cümbüşü

ile oldukça farklı bir görüntü elde edilmiştir (Şekil 25) [139,140].



**Şekil 25.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifli halat ve ipler (a, b) kullanılarak yapılan binalar arasında havada asılı vaziyette sabitlenen heykelin (c, f) üzerine yansıtılacak ışıkların çevredeki kalabalık tarafından kontrol edilebilmesi sonucu ortaya çıkan görüntü (d, e)[139,140]

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerine sanatsal bir diğer yaklaşım da 'Hafif oda' isimli çalışmada gerçekleştirilmiştir. (Şekil 26). Sürdürülebilir üretime hafif malzemelerden üretilen ürünler ile katkı sağlanabileceğini savunan bir tasarımcı tarafından hazırlanan bu çalışmada Kevlar®, alüminyum, ipek ve Dyneema® liflerini kullanarak üretim ve taşıma sırasında enerji tüketiminin minimizasyonu hedeflenmektedir. Modern tasarımlara imza atan tasarımcının yüksek performanslı polietilen liflerini kullanarak ortaya koyduğu ürünler şekilde gösterilmektedir [141].



**Şekil 26.** Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifli kompozit yapı ve örme kumaşlar ile üretilmiş koltuk, HPPE lifli kompozit yapı içeren tabure ve HPPE lifli kablo, alüminyum ve cam lifleri ile üretilen kafes raf [141]



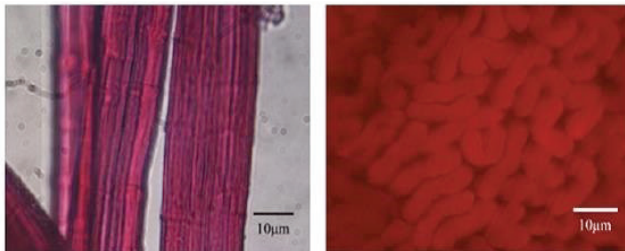
## VII. YÜKSEK PERFORMANSLI POLİETİLEN LİFLERİNE UYGULANAN TERBİYE İŞLEMLERİ

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin kimyasal yapısı neredeyse hiçbir kimyasal bağ oluşumuna izin vermemektedir. Bu sebeple bu liflerin boyanabilmesi oldukça güçtür. Renklendirme işlemi genellikle polimer çözeltisi içerisinde boyarmaddelerin/pigmentlerin eklenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin suyu sevmeyen yapısından dolayı literatürde kimyasal modifikasyon [51,142-146], UV radyasyonu [147,148], elektron (demet) bombardımanı [14,149,150], sol-gel kaplama [151], aşılama [148,152,153], korona boşalması [147,150,152,154] [155], ozon [147], plazma [49,120,142,147,150,152,155-168], süper kritik karbondioksit ( $scCO_2$ ) [33], ışınlama ( $x-\gamma$ ) [84,150,169,170] gibi yöntemlerle lif yüzeyinin modifiye edilerek yeni kimyasal grupların oluşumu sağlanmakta ve bunun sonucunda HPPE liflerinin özelliklerini (ıslanabilirlik, boyanabilirlik, vb.) iyileştirmeyi hedefleyen çalışmalara rastlanmaktadır [49,120,142,143,147-149,151,152,156-164,169,171].

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin en önemli kullanım formlarından biri kompozit malzemelerdir ve bu liflerin adezyon özelliklerinin zayıf olması kompozit malzemelerin oluşumunu da olumsuz etkilemektedir [52]. Bu sebeple liflerin adezyonunu iyileştirmeyi ve kompozit yapılar için önemli bir parametre olan yüzeyler arası kayma dayanımını arttırmayı hedefleyen modifikasyon çalışmalarına da literatürde sıklıkla rastlanmaktadır [51,52,143].

HPPE lifli yüzeylere uygulanan yüzey modifikasyonları sayesinde ıslanabilirlik artarken boyanabilirlik de geliştirebilmektedir. Ön işlem uygulanmış HPPE lifli yüzeylerin katyonik ve asit boyarmaddeler ile boyanabildiği rapor edilmiştir (**Şekil 27**) [153]. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin ön işlem uygulanmasına gerek olmadan dispers boyarmaddeler ile boyanabildiği de kaydedilmektedir [172-175].



**Boylamsal Görünüş**

**Enine Kesit Görünüşü**

**Şekil 27.** Akrilik asit (AA) monomeri ile aşı polimerizasyonu uygulanmış HPPE liflerinin asit boyarmaddeler ile boyanmasından sonra lifin boylamsal ve enine kesit görüntüleri [153]

## VIII. SONUÇ

Yüksek performanslı polietilen (HPPE) lifleri, düşük yoğunluğu, üstün mukavemet ve elastisite modül değerleri sayesinde günümüz teknik tekstillerinde sıkça karşımıza çıkan bir hammadde haline gelmiştir. Her ne kadar düşük termal dayanımı kullanım alanlarını az da olsa sınırlasa da balistik koruma sağlayan giysilerden, spor kıyafetlerine, halatlardan balık ağlarına, medikal tekstillere hatta sıra dışı heykellere, robotlara kadar daha birçok alanda kullanımı bulunmaktadır. Lif özelliklerini daha da iyileştirmek ve hassasiyetlerini minimuma indirmek amacıyla yapılan çalışmalar halen devam etmektedir. Aynı zamanda lif yüzeylerinin modifikasyonu ile çeşitli kompozit yapılarda kullanılabilmekte ve son yapılan çalışmalara göre alkil sübstitüent eklentili dispers boyarmaddeler ile iyi haslık değerleri elde edilerek boyanabilmektedir.

Yüksek performanslı lifler arasında dünyada en bilinen ve yaygın kullanılan liflerden biri olan yüksek performanslı polietilen (HPPE) liflerinin gelecekte çok daha çeşitli alanlarda karşımıza çıkacağı düşünülmektedir. Bu sebeple konvansiyonel tekstil ürünlerinin üretimin yanı sıra teknik tekstiller alanında da ilerlemeyi hedefleyen ülkemiz tekstil sektörü için yüksek performanslı liflerinin varlığının, çeşitliliğinin, kullanım alanlarının ve özelliklerinin bilinirliği büyük önem taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] UHMWPE Fiber, <http://www.ropes.co.kr/miracle/e-pro-1.asp>, (Şubat 2015)
- [2] Erdoğan Ü.H. (2012). Yüksek Mukavemetli Lifler Ve İplikler, TSE Standard Ekonomik ve Teknik Dergi, 51, (602), 57-65.
- [3] Horrocks A., Anands C. (2003). Teknik Tekstiller El Kitabı (Technical Textiles Handbook), The Textile Institute, Türk Tekstil Vakfı, İstanbul.
- [4] Horrocks A.R., Anand S.C. (2000). Handbook of Technical Textiles, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [5] Bunsell A.R. (2009). Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [6] Hearle J.W. (2001). High-Performance Fibres, CRC Press, Cambridge.
- [7] Wilusz E. (2008). Military Textiles, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [8] Scott R.A. (2005). Textiles for Protection, CRC Press, Cambridge.
- [9] McIntyre J.E. (2004). Synthetic Fibres: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, Elsevier.
- [10] Cook J.G. (1984). Handbook of Textile Fibres: Man-Made Fibres, Elsevier.

- [11] Bower D.I. (2002). An Introduction to Polymer Physics, Cambridge University Press.
- [12] Tayyar A.E., Alan G. (2007). Sentetik Liflerden Üretilen Halat Yapıları Ve Kullanım Performansları Tekstil ve Mühendis, 14, (68).
- [13] Başer İ. (2002). Elyaf Bilgisi, Marmara Üniveristesi Döner Sermaye İşletmesi Teknik Eğitim Fakültesi Matbaa Birimi, İstanbul.
- [14] Ugbolue S. (1990). Structure/Property Relationships in Textile Fibres, Textile Progress, 20, (4), 1-43.
- [15] Polymer Structure, <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/polymer.htm>, (Ocak 2015)
- [16] Glossary C.T. (2001). Celanese Acetate, New York, 10016, 63.
- [17] UHMWPE: Gel Spinning, <http://archimorph.com/2010/05/26/uhmwpe-gel-spinning/>, (Şubat 2015)
- [18] Carr C. (1995). Chemistry of the Textiles Industry, The University Press, Cambridge.
- [19] Houcks M.M. (2009). Identification of Textile Fibers, Woodhead Publishing Limited, Oxford.
- [20] Hongu T., Phillips G.O. (1997). New Fibers, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [21] Alagirusamy R., Das A. (2010). Technical Textile Yarns, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [22] Fred W., Billmeyer J. (1984). Textbook of Polymer Science, Wiley, New York.
- [23] Hall C. (1989). Polymer Materials, Macmillan Education Ltd, London.
- [24] Hearle J.W., Morton W.E. (2008). Physical Properties of Textile Fibres, CRC Press, Cambridge.
- [25] Eichhorn S.J., Hearle, J.W.S., Jaffe, M., Kikutani, T. (2009). Handbook of Textile Fibre Structure, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [26] Çelikkanat A.B. (2002). Teknik Tekstiller, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [27] Module 2. High Strength High Modulus Fibres, <http://nptel.ac.in/courses/116102006/6>, (Aralık 2014)
- [28] Peacock A. (2000). Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications, CRC Press, New York.
- [29] Jones C.E. (2011). Encyclopedia of Polymer Research, Nova Science Publishers, New York.
- [30] Blackburn R.S. (2009). Sustainable Textiles: Life Cycle and Environmental Impact, Elsevier, Cambridge.
- [31] Joseph M.L., Hudson P.B., Clapp A.C., Kness D. (1993). Joseph's Introductory Textile Science, Harcourt Brace Javanovich College Publishers.
- [32] Yumak N., Pekbey Y., Aslantaş K. (2013). Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10, (4), 1-21.
- [33] Jacobs M. (1999). Creep of Gel-Spun Polyethylene Fibres, Ph. D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven,
- [34] Elsasser V.H. (2005). Textiles: Concepts and Principles, Fairchild Publications, Inc., New York.
- [35] Gupta V., Kothari V. (1997). Manufactured Fibre Technology, Chapman and Hall, London.
- [36] Schlomski J., Garus B., Sprunk J. (2003). Textile Product for Use in Orthopedic Technology, US 20030194935 A1.
- [37] Hongu T., Takigami M., Phillips G. (2005). New Millennium Fibers, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [38] El Mogahzy Y. (2008). Engineering Textiles: Integrating the Design and Manufacture of Textile Products, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [39] Karakan G. (2008). Yüksek Performanslı Liflerin Balistik Amaçlı Kullanımı, Tekstil Teknolojileri E-Dergi, (2), 67-73.
- [40] Shahkarami S., Macneil J., Krummel J., Rayner K., Pritchard L. (2009). Coated Multi-Threat Materials and Methods for Fabricating the Same, EP 2129826 A1.
- [41] Technical Yarns: Characteristics of Technical Filament Yarns, <http://textilefashionstudy.com/technical-yarns-characteristics-of-technical-filament-yarns/>, (ocak 2015)
- [42] Holland J.E., Holland C.W. (2010). Thermoplastic Ethylene-Vinyl Acetate Film Bonded to a High Molecular Weight Polyethylene Fabric; and a Polyethylene Outer Film Surface Will Not Degrade, Become Tack or Soft; High Performance Cable and Rope Covers, Hovercraft Curtains, Gun and Boat Covers, Gloves, and Aprons, US 20100068963 A1.
- [43] Fung W., Hardcastle M. (2001). Textiles in Automotive Engineering, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [44] Jackson D., Shephard B., Kebabze E., Teles R., Rossi R., Gonçalves R. (2005). Cfip Mooring Lines for Modu Applications, *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston,
- [45] Brady E., Razavi M., Vale D., O'shaughnessy J. (2010). Clot Capture Systems and Associated Methods, US 8777976 B2.
- [46] Fakirov S. (2013). Nano-and Microfibrillar Single-Polymer Composites: A Review, *Macromolecular Materials and Engineering*, 298, (1), 9-32.
- [47] Doğan M., Şeyhoğlu H. (2013). Film İstifleme Yöntemiyle Tek Bileşenli Polimer Kompozit Malzeme Üretimi, *Tekstil ve Mühendis*, 20, (90), 53-62.
- [48] Kaypla, <http://www.nextrusion.de/en/search/kaypla/news/summary.html>, (Şubat 2015)
- [49] Bartusch M., Hund R.D., Hund H., Cherif C. (2014). Surface Functionalisation of Uhmw Polyethylene Textile with Atmospheric Pressure Plasma, *Fibers and Polymers*, 15, (4), 736-743.
- [50] Yi R. (2010). The Properties and Applications of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fibre, *Guangzhou Chemical Industry*, 8, 031.
- [51] Silverstein M.S., Breuer O., Dodiuk H. (1994). Surface Modification of UHMWPE Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 52, (12), 1785-1795.
- [52] Chiu H.-T., Wang J.-H. (1998). The Relationship between Zeta-Potential and Pull-out Shear Strength on Modified

- UHMWPE Fiber Reinforced Epoxy Composites, Polymer composites, 19, (4), 347-351.
- [53] Yifeng L. (1999). General Situation of World's Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber and Some Suggestions, Hi-Tech Fiber & Application, 5, 001.
- [54] Shishoo R. (2005). Textiles in Sport, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [55] Callister W.D., Rethwisch D.G. (2013). Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons.
- [56] Elices M., Llorca J. (2002). Fiber Fracture, Elsevier Science Ltd., Oxford.
- [57] Ohta S., Sakamoto M., Iwakura S., Shirasaki Y., Yoshida I. (1991). Speaker Diaphragm, US 5,031,720.
- [58] Balcı H. (2006). Akıllı (Fonksiyonel) Tekstiller, Seçilmiş Kumaşlarda Antibakteriyel Apre Ve Performans Özellikleri, Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [59] Kelly A., Zweben C.H. (2000). Comprehensive Composite Materials, Elsevier.
- [60] Çay A., Süpüren G., Kanat Z.E., Gülümser T., Tarakçıoğlu I. (2007). Balistik Lifler (Bölüm 1), Tekstil ve Konfeksiyon, 4, 232-236.
- [61] Sengonul A., Wilding M.A. (1995). Modelling of Time Dependence in Ultra-High-Modulus Polyethylene Based on Raman Microscopy, Polymer, 36, (23), 4379-4384.
- [62] Goswami B.C., Anandjiwala R.D., Hall D. (2004). Textile Sizing, CRC Press, New York.
- [63] Ulcay Y., Altun Ş., Baycan İ. (2010). Radiation Effects on the Tenacity of Novoloid, Aramid and Polyethylene Fibers, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 15, (1).
- [64] Long A.C. (2005). Design and Manufacture of Textile Composites, Elsevier, Cambridge.
- [65] İcemax, <http://www.toyobo-global.com/seihin/dn/dyneema/youto/textile.htm>, (Şubat 2015)
- [66] Hashmi S., Dwivedi U., Chand N. (2006). Friction and Sliding Wear of UHMWPE Modified Cotton Fibre Reinforced Polyester Composites, tribology letters, 21, (2), 79-87.
- [67] Cao S., Liu H., Ge S., Wu G. (2011). Mechanical and Tribological Behaviors of UHMWPE Composites Filled with Basalt Fibers, Journal of reinforced plastics and composites, 30, (4), 347-355.
- [68] Wang Y., Cheng R., Liang L., Wang Y. (2005). Study on the Preparation and Characterization of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene-Carbon Nanotubes Composite Fiber, Composites Science and Technology, 65, (5), 793-797.
- [69] Ping H., Shoushan F., Jianwei W. (1998). Study on Carbon Nanotube/UHMWPE Composite, Engineering Plastics Application, 1.
- [70] Nwabunma D., Kyu T. (2008). Polyolefin Composites, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [71] Ruan S., Gao P., Yu T.X. (2006). Ultra-Strong Gel-Spun UHMWPE Fibers Reinforced Using Multiwalled Carbon Nanotubes, Polymer, 47, (5), 1604-1611.
- [72] Aydın Ö., Günaydın G.K. (2014). Elektromanyetik Kalkanlama Amaçlı Koruyucu Tekstiller, AKDENİZ SANAT DERGİSİ, 4, (7).
- [73] Cuben Fiber, [http://en.wikipedia.org/wiki/Cuben\\_Fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Cuben_Fiber), (Şubat 2015)
- [74] Wa-Ben Cuben Fiber Wallet, <http://sticksblog.com/2011/08/20/wa-ben-cuben-fiber-wallet/>, (Şubat 2015)
- [75] Mojo Ufo Cuben Fiber Tent, <http://www.dudeiwantthat.com/outdoors/camping/mojo-ufo-cuben-fiber-tent.asp>, (Şubat 2015)
- [76] Zpacks Waterproof/Breathable Cuben Fiber Rain Mitts, <http://sticksblog.com/2012/12/09/zpacks-waterproofbreathable-cuben-fiber-rain-mitts/>, (Şubat 2015)
- [77] Race Series 780 Cuben Fiber, <http://no.northsails.com/tabid/26335/Default.aspx>, (Şubat 2015)
- [78] Cuben Fiber Keeps the Weight Down, <http://www.gizmag.com/terra-strenua-nyx-ultralight-collapsible-cot-chair/21446/pictures#1>, (Şubat 2015)
- [79] Zpacks Waterproof Breathable Cuben Fiber Rain Pants, <http://www.trailspace.com/gear/zpacks/waterproof-breathable-cuben-fiber-rain-pants/>, (Şubat 2015)
- [80] Cc Snowshoes (Carbon Fiber/Cuben Fiber), <http://www.suluk46.com/RandD%20-%20RD13%20CC%20Snowshoes.html>, (Şubat 2015)
- [81] Cuben Fiber Poncho, [http://www.mountainlaureldesigns.com/shop/product\\_info.php?cPath=37&products\\_id=56](http://www.mountainlaureldesigns.com/shop/product_info.php?cPath=37&products_id=56), (Şubat 2015)
- [82] Cuben Fiber Backpack, <http://geared.jp/editors/2013/04/cuben-fiber-backpac.html>, (Şubat 2015)
- [83] Airship, <http://en.wikipedia.org/wiki/Airship>, (Mart 2015)
- [84] Doğan O.M., Karacaer Ö., Tinçer T. (2005). Silanla Kaplanan Ve Gamma ışını Uygulanan Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Örgü Fiberle Güçlendirilen Akrilik Rezinlerin Bükülme Dayanıklılığı, Gazi Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Dergisi, 22, (3), 147.
- [85] Advanced Fibers and Composites, <http://www.honeywell-advancedfibersandcomposites.com/>, (Şubat 2015)
- [86] Dyneema Purity® Membrane, [http://www.dsm.com/markets/medical/en\\_US/products-page/products-uhmwpe-fibers/dyneema-purity-membrane.html](http://www.dsm.com/markets/medical/en_US/products-page/products-uhmwpe-fibers/dyneema-purity-membrane.html), (Şubat 2015)
- [87] Laird J. Materials and Coatings That Go One Step Beyond, <http://medicaldesign.com/materials/materials-and-coatings-go-one-step-beyond>, (Şubat 2015)
- [88] Specialty Suture, <https://www.arthrex.com/shoulder/specialty-suture>, (Mart 2015)
- [89] Implantable-Grade Fiber Comes in Colors Everywhere, <http://www.qmed.com/mpmn/article/implantable-grade-fiber-comes-colors-everywhere>, (Mart 2015)
- [90] Polymers in Sutures Heal Wounds Faster, <https://www.polymersolutions.com/blog/polymers-in-sutures-heal-wounds-faster/>, (Mart 2015)
- [91] Wound Closed with Surgical Sutures, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wound\\_closed\\_with\\_surgical\\_sutures.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wound_closed_with_surgical_sutures.jpg), (Mart 2015)

- [92] <http://www.tradeindia.com/fp660355/Silver-Stump-Socks.html>, (Mart 2015)
- [93] Knit-Rite, <http://www.knitrite.com/>, (Mart 2015)
- [94] Use of Dyneema Purity® Fiber in Acl Repair, <https://www.youtube.com/watch?v=txcLFTnGMuQ>, (Şubat 2015)
- [95] Gemci R. (2011). Tarım Teknik Tekstilleri (Agrotech), Teknik Tekstil 2011: Frankfurt Fuarı Teknolojik Değerlendirme Raporu, Bursa.
- [96] Ön Çapraz Bağ Yaralanmaları, <http://www.beyzadeoglu.com/tr/guide/on-capraz-bag-yaralanmalari>, (Şubat 2015)
- [97] Applications, [http://www.dsm.com/products/dyneema/en\\_GB/applications.html](http://www.dsm.com/products/dyneema/en_GB/applications.html), (Şubat 2015)
- [98] Arts C. Better Support for the Scoliosis Patient with New Technology and Dyneema Purity®, <http://www.bmm-program.nl/site/public/go/article.aspx?id=85&title=Scoliosis>, (Şubat 2015)
- [99] Karakan G. (2009). Teknik Tekstillerin Koruyucu Yapılarda Kullanımı, Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3, (1), 65-70.
- [100] Mecit D., Ilgaz S., Duran D., Başal D., Gülümser T., Tarakçıoğlu I. (2007). Teknik Tekstiller Ve Kullanım Alanları (Bölüm 2), Tekstil ve Konfeksiyon, 17, (3), 154-161.
- [101] Dimeski D., Bogoeva-Gaceva G., Srebrenkoska V. Ballistic Properties of Polyethylene Composites Based on Bidirectional and Unidirectional Fibers, *Rad saopsten na IX Simpozijumu* 184-191, 21-22 October 2011, Lekovac. Faculty of Technology in Leskovac.
- [102] Hockenberger A.S. (1998). The Effects of Weaving on Fibre Performance in Ballistic Fabrics Made from High-Performance Polyethylene Fibres, *The Journal of The Textile Institute*, 89, (3), 595-604.
- [103] Bozdoğan F., Üngün S., Temel E., Mengüç G.S. (2015). Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri Ve Balistik Performans Testleri, *Tekstil ve Mühendis*, 22, (98).
- [104] Tao L.Z.Z.Q.W., Guanxiong Q. (2002). A Study on Ballistic Performance and Mechanism of UHMWPE Fiber/Ldpe Composites, *Fiber Composites*, 4, 001.
- [105] Portable Dyneema Bulletproof / Ballistic Shield, <http://www.fuzing.com/vli/002391de6279/Portable-Dyneema-bulletproof-%7C-ballistic-shield>, (Şubat 2015)
- [106] Williams J.T. (2009). Textiles for Cold Weather Apparel, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [107] Diverse Protection, <http://www.soldiermod.com/summer-08/industry-dsm.html>, (Şubat 2015)
- [108] Preventing Head Trauma – Designing the Next Generation of Soldier Helmets, <http://www.army-technology.com/features/featurepreventing-head-trauma-soldier-helmets-army/>, (Şubat 2015)
- [109] Body Armor Suites, [http://defense-update.com/features/du-2-07/infantry\\_armor.htm](http://defense-update.com/features/du-2-07/infantry_armor.htm), (Şubat 2015)
- [110] Polar Bear (R) Plus Cut-Resistant Spectra (R) Glove, [http://www.butcher-packer.com/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=906](http://www.butcher-packer.com/index.php?main_page=product_info&products_id=906), (Şubat 2015)
- [111] Brown A. New Options in Personal Ballistic Protection, <http://www.compositesworld.com/articles/new-options-in-personal-ballistic-protection>, (Şubat 2015)
- [112] Reinforcing Material, <https://www.dropbox.com/s/9zac9rusehchylc/09.02.2015-HPPE%20-%20Copy.docx?dl=0>, (Şubat 2015)
- [113] Thomas G.P. Materials Used in Formula One (F1) Cars, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8194>, (Şubat 2015)
- [114] Motorcycle Helmet - Blue, <http://www.bikerperformance.com/icon-airframe-carbon-fiber-rr-full-face-motorcycle-helmet-blue-p12974.html>, (Şubat 2015)
- [115] How Did Surgeons Get Cyclist Awang's Splinter Out?, [http://news.bbc.co.uk/sport2/hi/other\\_sports/cycling/9404458.stm](http://news.bbc.co.uk/sport2/hi/other_sports/cycling/9404458.stm), (Şubat 2015)
- [116] Safer in the Saddle with Dyneema®, [https://www.youtube.com/watch?v=43tK\\_5xuG5I](https://www.youtube.com/watch?v=43tK_5xuG5I), (Şubat 2015)
- [117] Melnykowycz M. Discovering the Pleasure of Running, <http://www.dromeus.com/mammut-2013-trail-running-shoe-preview/>, (Şubat 2015)
- [118] Howard B.C. Can New Shark-Resistant Nets Spur Responsible Aquaculture?, <http://voices.nationalgeographic.com/2013/08/19/can-new-shark-resistant-nets-spur-responsible-aquaculture/>, (Şubat 2015)
- [119] Fish Farm Nets, [http://fis.com/fis/tradingmarket/Read.asp?sector=aquaculture&id=18383&id\\_reply=18383&image=&scrollaction=&monthyear=&day=&l=e](http://fis.com/fis/tradingmarket/Read.asp?sector=aquaculture&id=18383&id_reply=18383&image=&scrollaction=&monthyear=&day=&l=e), (Şubat 2015)
- [120] Xia P., Xinghua Z., Suling D., Liping H. (2004). Research Progress of Ultrahigh Strength High-Modulus Polyethylene Fiber and Its Composites, *China Synthetic Fiber Industry*, 4, 019.
- [121] Said M., Dingwall B., Gupta A., Seyam A., Mock G., Theyson T. (2006). Investigation of Ultra Violet (Uv) Resistance for High Strength Fibers, *Advances in Space Research*, 37, (11), 2052-2058.
- [122] Biron M. (2003). Thermosets and Composites: Technical Information for Plastics Users, Elsevier Advanced Technology, Oxford.
- [123] Formula 1 Takvimi Açıklandı, <http://onedio.com/haber/formula-1-takvimi-aciklandi-214462>, (Şubat 2015)
- [124] 2010 World Touring Car Championship Season, [http://en.wikipedia.org/wiki/2010\\_World\\_Touring\\_Car\\_Championship\\_season](http://en.wikipedia.org/wiki/2010_World_Touring_Car_Championship_season), (Şubat 2015)
- [125] Air Force 'Slows' Speed with No. 2 Indy Car, <http://airforcelive.dodlive.mil/2009/04/air-force-slows-speed-with-indy-car/>, (Şubat 2015)
- [126] New Gleistein Ropes Products with Latest Dyneema Sk90 Fibres, <http://www.gleistein.com/en-new-gleistein-ropes-products-with-latest-dyneema-sk90-fibres-2-press/>, (Şubat 2015)
- [127] Dyneema Fibre to Provide Strength to Levis 501 Jeans, [http://www.fibre2fashion.com/news/garment-company-news/newsdetails.aspx?news\\_id=154276](http://www.fibre2fashion.com/news/garment-company-news/newsdetails.aspx?news_id=154276), (Şubat 2015)

- [128] Sourcing Dyneema's Super Strength: An Interview with Ls&Co. Fabric Innovator Neil Bell, <http://www.levistrauss.com/unzipped-blog/2014/01/sourcing-dyneema-s-super-strength-interview-ls-co-fabric-innovator-neil-bell/>, (Şubat 2015)
- [129] Dyneema Cut Resistant / Knife Proof Cloth T-Shirt, [http://www.alibaba.com/product-detail/Dyneema-Cut-Resistant-Knife-Proof-cloth\\_120105032.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Dyneema-Cut-Resistant-Knife-Proof-cloth_120105032.html), (Şubat 2015)
- [130] Stopping a Tsunami a Membrane Tsunami Float Barrier Concept with Dyneema®, <https://www.youtube.com/watch?v=0eFU4KIezSc>, (Şubat 2015)
- [131] Zhi-jun L. (2000). The High-Powered UHMWPE Fiber and It S Applications Foreground in Ground Radome, Hi-Tech Fiber & Application, 4, 004.
- [132] Lee S.M., Lee S. (1992). Handbook of Composite Reinforcements, Wiley-VCH, California.
- [133] Liu H., Ji H., Wang X. (2013). Tribological Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene at Ultra-Low Temperature, Cryogenics, 58, 1-4.
- [134] Kriyojenik, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kriyojenik>, (Mart 2015)
- [135] Hand Built Humanoid Robots, Part1: Introduction, <http://www.instructables.com/id/Android-Anthropomimetic-Humanoid-Robot/>, (Şubat 2015)
- [136] Radome, <http://en.wikipedia.org/wiki/Radome>, (Mart 2015)
- [137] Radomes, [http://www.rf-mw.org/antennas\\_antenna\\_radomes\\_antenna\\_radomes.html](http://www.rf-mw.org/antennas_antenna_radomes_antenna_radomes.html), (Mart 2015)
- [138] Saenz A. Dlr Robot Hand Is Tough Enough to Withstand a Hammer (Video), <http://singularityhub.com/2011/01/31/dlr-robot-hand-is-tough-enough-to-withstand-a-hammer-video/>, (Şubat 2015)
- [139] The Making of Unnumbered Sparks, <https://www.youtube.com/watch?v=npjTmG-TBHQ&feature=youtu.be>, (Şubat 2015)
- [140] Echelman J. Spectra® Fiber Strengthens 745-Foot Vancouver Sculpture by World-Renowned Artist, <http://www.honeywell-advancedfibersandcomposites.com/strength-of-spectra/>, (Şubat 2015)
- [141] Turner T. Lb Room, <http://www.yankodesign.com/2011/03/18/16-5-lb-room/>, (Şubat 2015)
- [142] Lin S.P., Han J.L., Yeh J.T., Chang F.C., Hsieh K.H. (2007). Surface Modification and Physical Properties of Various UHMWPE-Fiber-Reinforced Modified Epoxy Composites, Journal of Applied Polymer Science, 104, (1), 655-665.
- [143] Chiu H.T., Wang J.H. (1998). Dynamic Mechanical Properties of the Chemical Oxidation on UHMWPE Fibers for Improved Adhesion to Epoxy Resin Matrix, Journal of Applied Polymer Science, 68, (9), 1387-1395.
- [144] Yaman N., Özdoğan E., Seventekin N., Öktem T. (2008). Tekstil Liflerinin Adhezyonunu Geliştirmek İçin Yüzey Modifikasyon Yöntemleri, Tekstil ve Konfeksiyon, 2, 89-93.
- [145] Mattila H.R. (2006). Intelligent Textiles and Clothing, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [146] Çerkez İ., Ulçay Y. Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Dokusuz Yüzeyin Enerji Absorbsiyonuna Olan Etkisi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 12, (2), 71-84.
- [147] Oosterom R., Ahmed T., Poulis J., Bersee H. (2006). Adhesion Performance of UHMWPE after Different Surface Modification Techniques, Medical engineering & physics, 28, (4), 323-330.
- [148] Wang J., Liang G., Zhao W., Lü S., Zhang Z. (2006). Studies on Surface Modification of UHMWPE Fibers Via Uv Initiated Grafting, Applied Surface Science, 253, (2), 668-673.
- [149] Kondo Y., Miyazaki K., Yamaguchi Y., Sasaki T., Irie S., Sakurai K. (2006). Mechanical Properties of Fiber Reinforced Styrene-Butadiene Rubbers Using Surface-Modified UHMWPE Fibers under Eb Irradiation, European Polymer Journal, 42, (5), 1008-1014.
- [150] Muraoka Y., Rich M.J., Drzal L.T. (2002). Sulfonation of Uhmw-Pe Fibers for Adhesion Promotion in Epoxy Polymers, Journal of Adhesion Science and Technology, 16, (12), 1669-1685.
- [151] Zhang Y., Shi F., He J., Wu H., Qiu Y. (2010). Surface Characterization of Oxygen Plasma Treated Nano-Sio2 Sol-Gel Coating UHMWPE Filaments, Materials Science Forum, 658, 117-120.
- [152] Anna L.Y.H.F.Z., Xuqin W. (1998). Surface Modification of Ultra-High Molecular Polyethylene Fibers FIBER REINFORCED PLASTICS/COMPOSITE, 5.
- [153] Enomoto I., Katsumura Y., Kudo H., Soeda S. (2011). Graft Polymerization Using Radiation-Induced Peroxides and Application to Textile Dyeing, Radiation Physics and Chemistry, 80, (2), 169-174.
- [154] Zheng Z., Tang X., Shi M., Zhou G. (2004). Surface Modification of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Fibers, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 42, (3), 463-472.
- [155] Ogawa T., Mukai H., Osawa S. (2001). Improvement of the Mechanical Properties of an Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber/Epoxy Composite by Corona-Discharge Treatment, Journal of Applied Polymer Science, 79, (7), 1162-1168.
- [156] Gao S., Zeng Y. (1993). Surface Modification of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers by Plasma Treatment. I. Improving Surface Adhesion, Journal of Applied Polymer Science, 47, (11), 2065-2071.
- [157] Gao S., Zeng Y. (1993). Surface Modification of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers by Plasma Treatment. Ii. Mechanism of Surface Modification, Journal of Applied Polymer Science, 47, (12), 2093-2101.
- [158] Chaoting Y., Gao S., Mu Q. (1993). Effect of Low-Temperature-Plasma Surface Treatment on the Adhesion of Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene Fibres, Journal of Materials Science, 28, (18), 4883-4891.
- [159] Yim J.H., Palmese G.R., Kissounko D.A., Abu-Obaid

- A., Gillespie Jr J.W., Pappas D.D., Fridman A. Effect of Interfacial Strength and Energy Absorption of Plasma-Modified Uhmw-Pe Fiber/Epoxy Interface, *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*, 2009.
- [160] Wang T., Wang C., Qiu Y. (2008). Surface Modification of Ultra High Modulus Polyethylene Fibers by an Atmospheric Pressure Plasma Jet, *Journal of Applied Polymer Science*, 108, (1), 25-33.
- [161] Moon S.I., Jang J. (1999). The Effect of the Oxygen-Plasma Treatment of UHMWPE Fiber on the Transverse Properties of UHMWPE-Fiber/Vinylester Composites, *Composites Science and Technology*, 59, (4), 487-493.
- [162] Sheng J. (2007). Properties of Plasma Treated UHMWPE/Ldpe Composites, *Journal of Textile Research*, 9, 016.
- [163] Shishoo R. (2007). *Plasma Technologies for Textiles*, Elsevier, Cambridge.
- [164] Rauscher H., Perucca M., Buyle G. (2010). *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical and Textile Applications*, John Wiley & Sons.
- [165] Teodoru S., Kusano Y., Rozlosnik N., Michelsen P.K. (2009). Continuous Plasma Treatment of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE) Fibres for Adhesion Improvement, *Plasma Processes and Polymers*, 6, (SUPPL. 1), S375-S381.
- [166] Yim J.H., Pappas D., Kissounko D., Fridman A., Palmese G.R. Interfacial Shear Strength Studies of Plasma-Treated Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fibers, *AIChE 100 - 2008 AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, 2008.
- [167] Yim J.H., Pappas D., Fridman A., Palmese G.R. (2008). Surface Modification of Uhmw-Pe Fibers Using Atmospheric Plasma, *52nd International SAMPE Symposium - Material and Process Innovations: Changing our World*, California,
- [168] Zhang Y., Yu J., Chen L., Zhu J., Hu Z. (2009). Surface Modification of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Fibers with Coupling Agent During Extraction Process, *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 48, (2), 391-404.
- [169] Yamanaka A., Izumi Y., Kitagawa T., Terada T., Hirahata H., Ema K., Fujishiro H., Nishijima S. (2006). The Effect of  $\Gamma$ -Irradiation on Thermal Strain of High Strength Polyethylene Fiber at Low Temperature, *Journal of Applied Polymer Science*, 102, (1), 204-209.
- [170] Karahan H.A., Demir A., Özdoğan E., Öktem T., Seventekin N. (2007). *Tekstil Malzemelerinin Yüzey Modifikasyonlarında Kullanılan Bazı Yöntemler Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 248-255.
- [171] Bartusch M., Hetti M., Pospiech D., Riedel M., Meyer J., Toher C., Neu V., Gazuz I., Shagolsem L.S., Sommer J.U., Hund R.D., Cherif C., Moresco F., Cuniberti G., Voit B. (2014). Innovative Molecular Design for a Volume Oriented Component Diagnostic: Modified Magnetic Nanoparticles on High Performance Yarns for Smart Textiles, *Advanced Engineering Materials*, 16, (10), 1276-1283.
- [172] Kim T., Jeon S., Kwak D., Chae Y. (2012). Coloration of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fibers Using Alkyl-Substituted Anthraquinoid Blue Dyes, *Fibers and Polymers*, 13, (2), 212-216.
- [173] Kim T., Jeon S. (2013). Coloration of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fibers Using Alkyl-Substituted Monoazo Yellow and Red Dyes, *Fibers and Polymers*, 14, (1), 105-109.
- [174] Henssen G.J.I., Verdaasdonk P. (2015). Process to Enhance Coloration of UHMWPE Article, the Colored Article and Products Containing the Article, US Patent 20,150,018,482.
- [175] Bae J.-s., Kim T., Lee C. (2014). Synthesis of Novel Violet Dyes for Polyolefin Fibers Using N, N-Dihexyl-2-Methoxy-5-Methylaniline and Various Diazo Components, *Fibers and Polymers*, 15, (12), 2466-2471.