

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GİYİLEBİLİR ELEKTRONİK UYGULAMALARINA YÖNELİK YÜKSEK
SICAKLIKLARA DAYANIKLI VERİ İLETİM KALİTESİ YÜKSEK E-
TEKSTİL YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ercan KARABULUT

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

ARALIK 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GİYİLEBİLİR ELEKTRONİK UYGULAMALARINA YÖNELİK YÜKSEK
SICAKLIKLARA DAYANIKLI VERİ İLETİM KALİTESİ YÜKSEK E-
TEKSTİL YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ercan KARABULUT
(503121803)**

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Senem KURŞUN BAHADIR

ARALIK 2018



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121803 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ercan Karabulut, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GİYİLEBİLİR ELEKTRONİK UYGULAMALARA YÖNELİK YÜKSEK SICAKLIKLARA DAYANIKLI VERİ İLETİM KALİTESİ YÜKSEK E-TEKSTİL YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Senem KURŞUN BAHADIR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Umut Kıvanç ŞAHİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Can ÜNAL
Namık Kemal Üniversitesi

Teslim Tarihi : 16 Kasım 2018
Savunma Tarihi : 14 Aralık 2018





Tüm bilim insanlarına,



ÖNSÖZ

Koruyucu tekstiller ve elektronik tekstiller, tekstil sektörüne katma değer yaratan alanların başında gelmektedir. Gerek ülkemizde gerekse dünyada bu alanda faaliyet gösteren şirketlerin sayısı artmaktadır. Akademik olarak yapılan çalışmalar, sanayi ve endüstride karşılık bulmaya artan ivme ile devam etmektedir. Bu tez çalışmasında teknik tekstiller alanındaki çalışmalar incelenmiş, yüksek sıcaklıklara dayanıklı e-tekstil yapıları geliştirebilmek için yüksek sıcaklıklara dayanıklı koruyucu tekstiller ile elektronik tekstil geliştirme teknolojileri biraraya getirilerek e-tekstil yapıları geliştirilmiştir.

Tez çalışmasında bilgi birikimini ve tecrübesini cömertçe ve profesyonelce tarafıma aktarmış olan, tezin oluşmasında büyük desteği olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Senem KURŞUN BAHADIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi tüm desteğini sunan KARABULUT ailesine, motivasyonumu sürekli dinç tutmamı sağlayan Sayın Ahmet ÖBEKCAN'a teşekkür ediyorum.

Bu tez, İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından MYL-2018-41093 kodlu "Giyilebilir elektronik uygulamalarına yönelik yüksek sıcaklıklara dayanıklı veri iletim kalitesi yüksek e-tekstil yapılarının geliştirilmesi" isimli proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Projenin malzemelerinin tedariği ve testleri aşamasında destek sağlayan değerli KIVANÇ GROUP çalışanlarından Sayın Kıvanç KOZA'ya, Sayın Yusuf SAGLAM'a ve Sayın Uğur BAYRAM'a ayrıca teşekkür ederim.

Kasım 2018

Ercan KARABULUT
(Tekstil Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon.....	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Araştırma Metodolojisi	3
1.4 Tez Genel Bakış	4
2. ELEKTRONİK TEKSTİLLER.....	5
2.1 Tekstil Yapılarına Elektriksel İletkenlik Kazandırılması.....	7
2.1.1 İletken Polimerler.....	8
2.1.2 İletken Elyaf.....	12
2.1.3 İletken İplik	13
2.1.4 İletken Polimer Kompozit/Kumaş Yapıları	16
2.1.4.1 Dokuma/Örme teknolojileri	16
2.1.4.2 Nakış teknikleri	18
2.1.4.3 Kaynak teknolojisi	20
2.1.4.4 Kaplama/Baskı teknolojileri.....	20
2.2 Elektronik Tekstillerin Kullanım Alanları	24
2.2.1 Askeri amaçlı kullanılan elektronik tekstiller	24
2.2.2 Uzay çalışmalarında kullanılan elektronik tekstiller.....	25
2.2.3 İş giysilerinde kullanılan elektronik tekstiller.....	26
2.2.4 Sağlık ürünlerinde kullanılan elektronik tekstiller.....	28
2.2.5 Spor ürünlerinde kullanılan elektronik tekstiller.....	30
3. ISI VE ALEV KORUMASI	33
3.1 Yanıcılığa Sebep Olan Faktörler.....	33
3.2 Liflerin Termal Davranışı	34
3.3 Isı ve Alev Koruması İçin Uygun Liflerin Seçilmesi.....	40
3.3.1 Doğal olarak alev geciktirici lifler	40
3.3.1.1 Polibenzimidazol (PBI).....	40
3.3.1.2 Aramid.....	43
3.3.1.3 Cam Elyafı	47
3.3.1.4 Arall (Aramid takviyeli alüminyum laminat)	48
3.3.2 Konvansiyonel tekstil liflerinin alev geciktirilmesi	50
3.3.2.1 Viskoz FR	50
3.3.2.2 Polyester FR.....	51

3.3.2.3 Alev geciktirici naylon	53
4. MATERYAL VE METOD	55
4.1 Malzeme ve Ekipmanlar	55
4.1.1 Kumaşlar	55
4.1.2 İletken iplikler	55
4.1.3 Elektriksel ölçüm cihazları	56
4.1.4 Dikiş Makinaları	57
4.1.5 Test aparatları	57
4.1.5.1 Sınırlandırılmış alev sıçraması testi	58
4.1.5.2 Konvektif ısı testi	58
4.1.5.3 Radyan ısı testi	59
4.2 Metodoloji	59
4.2.1 Sınırlandırılmış alev sıçraması testi EN ISO 15025	60
4.2.2 Konvektif ısı testi EN ISO 9151	61
4.2.3 Radyan ısı testi EN ISO 6942	61
4.3 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı E-tekstil Yapısının Oluşturulması	63
4.4 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı Üretilen E-tekstil Numuneleri	66
4.5 Ölçüm Metotları	67
4.5.1 İletkenlik ve lineer direnç ölçümü	67
4.5.2 Gürültü seviyesi tanımlama	69
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ	73
5.1 Sınırlandırılmış Alev Sıçraması Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi	77
5.2 Konvektif Isı Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi	83
5.3 Radyan Isı Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi	89
5.4 İletkenlik Sonuçlarının Toplu Olarak İstatistiksel Değerlendirilmesi	96
5.5 Veri İletim Kalitesine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi	101
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	109
EKLER	115
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

OI	: Oksijen İndeksi
LOI	: Limit Oksijen İndeksi
FR	: Güç Tutuşurluk
PET	: Polietilen Tereftalat
PTFE	: Politetrafloroetilen
CP	: Kompozisyon Parametresi
PAN	: Poliakrilonitril
DPIP	: Difenil isoftalat
TAB	: Tetra-aminobifenil
PBI	: Polibenzimidazol
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
PTh	: Politiyofen
PAni	: Polianilin
PPy	: Polipirol
PEDOT	: Polietilediyoksitiyofen
PTFE	: Politetrafloroetilen
ICP	: Doğal Olarak İletken Polimerler
HTI	: Konvektif Isı Transfer İndeksi
RHTI	: Radyan Isı Transfer İndeksi
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilâtı
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
ARALL	: Aramid Takviyeli Alüminyum Laminat



SEMBOLLER

T_m	: Erime sıcaklığı (°C)
T_c	: Yanma sıcaklığı (°C)
T_p	: Piroliz sıcaklığı (°C)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
α	: Birinci tip hata olasılığı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Hibrid polimer-metal ipliklere ait bazı çalışma özetleri.....	15
Çizelge 2.2 : Sensörler aracılığıyla ölçülebilen fizyolojik değerler	28
Çizelge 3.1 : Bazı liflerin ısı geçiş sıcaklıkları	38
Çizelge 3.2 : Lifin kimyasal yapısının LOI değeri üzerine etkisi.....	39
Çizelge 3.3 : PBI lifinin yüksek sıcaklıklarda kullanım ömrü.....	43
Çizelge 3.4 : PBI lifinin bazı özellikleri	43
Çizelge 3.5 : Meta-aramid lifinin bazı özellikleri.....	44
Çizelge 3.6 : Meta-aramid lifinin kullanım alanları	45
Çizelge 3.7 : Para-aramid lifinin bazı özellikleri.....	46
Çizelge 3.8 : Para-aramid lifinin kullanım alanları	46
Çizelge 3.9 : Farklı türde cam elyafının özellikleri	48
Çizelge 3.10 : Cam elyafın kullanım alanları	48
Çizelge 4.1 : Kullanılan yüksek sıcaklıklara dayanıklı kumaşlara ait bazı bilgiler...	55
Çizelge 4.2 : Kullanılan iletken ipliklere ait karakteristik bilgiler.	56
Çizelge 4.3 : TS EN ISO 11612:2015 standardına göre sınıflandırma.....	59
Çizelge 4.4 : Ultrasonik kaynak dikiş tekniği ile farklı parametre değerleri altındaki bulgular.....	64
Çizelge 4.5 : İletken ipliğin uzunluğa bağlı olarak lineer direnç değişimi.....	68
Çizelge 5.1 : Numunelerin sınırlandırılmış alev sıçramasına karşı performans değerleri.....	73
Çizelge 5.2 : Numunelerin konvektif ısıya karşı performans değerleri.....	75
Çizelge 5.3 : Numunelerin radyan ısıya karşı performans değerleri.	76
Çizelge 5.4 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%)	81
Çizelge 5.5 : Konvektif ısı testinde kumaş türlerine göre varyans analizi.	86
Çizelge 5.6 : Konvektif ısı testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%)	88
Çizelge 5.7 : Radyan ısı testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%)	91
Çizelge 5.8 : Konvektif ısı testinde kumaş türlerine göre varyans analizi.	93
Çizelge 5.9 : Tüm ısı testleri için kayıp veri oranları.	97
Çizelge 5.10 : Farklı ısı testleri sonrası iletken ipliklerin SNR değerleri.....	104



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Çalışmanın araştırma metodolojisi	3
Şekil 2.1 : Elektronik tekstillerin farklı disiplinlerle olan konumu	6
Şekil 2.2 : Elektronik tekstillerin vizyonu	7
Şekil 2.3 : Sıcaklığın iletkenlik üzerine etkisi	9
Şekil 2.4 : Polianilin polimerinin kimyasal yapısı	10
Şekil 2.5 : Polipirol polimerinin kimyasal yapısı	11
Şekil 2.6 : Hibrid polimer-metal ipliklerin tipik yapısı	14
Şekil 2.7 : Dokuma kumaş bazlı elektrik devresi	17
Şekil 2.8 : “Özelleştirilmiş Elyaf Yerleştirme (TFP)” prensibine göre nakış işlemi.	19
Şekil 2.9 : Nakış yoluyla iletken iplikle bağlanan esnek elektronik modül	19
Şekil 2.10 : “Future Force Warrior” isimli askeri üniforma	25
Şekil 2.11 : E-SEWT projesinde sesli, görsel ve dokunsal uyarı sistemlerinin tekstil yapısına yerleşimi	26
Şekil 2.12 : VIKING firması tarafından üretilmiş termal sensör entegre edilmiş itfaiyeci ceketi	27
Şekil 2.13 : Sivil koruma için kıyafet	28
Şekil 2.14 : Tekstil elektrot detaylarıyla MagIC sistemi	29
Şekil 2.15 : Spor ürünlerinde kullanılan bazı elektronik kıyafetler	30
Şekil 2.16 : Performans ölçümü yapabilen “adiStar Fusion Sistemi”	31
Şekil 3.1 : Liflerin yanma şematigi	34
Şekil 3.2 : Alev stabilite diyagramı	35
Şekil 3.3 : Liflerin geri besleme sistemi ile yanma mekanizması	36
Şekil 3.4 : Oksijen indeksi ile elementel kompozisyon arasındaki korelasyon	38
Şekil 3.5 : Polibenzimidazol (PBI)’ün kimyasal formülü	41
Şekil 3.6 : Sülfürik asit ile işlem görmüş PBI’nın kimyasal formülü	41
Şekil 3.7 : PBI polimerinin sentezlenmesi	42
Şekil 3.8 : Meta-aramid lifinin kimyasal yapısı	44
Şekil 3.9 : Para-aramid lifinin kimyasal formülü	45
Şekil 3.10: Farklı yanma sıcaklıklarında kumaşların toksisitesi	52
Şekil 4.1 : Kullanılan farklı malzemelerden yapılmış iletken iplikler	56
Şekil 4.2 : Multimetre	56
Şekil 4.3 : (a) Osiloskop. (b) Fonksiyon jeneratörü	57
Şekil 4.4 : (a) Ultrasonik kaynak dikiş makinası. (b) Zigzag dikiş makinası. (c) Sıcak hava kaynak dikiş makinası	57
Şekil 4.5 : Konvektif ısı test cihazı	58
Şekil 4.6 : Radyan ısı transferi test cihazı	59
Şekil 4.7: Sınırlandırılmış alev sıçraması testi Prosedür A’ya göre numunenin test edilmesi	61
Şekil 4.8 : Radyan ısı testine göre numunenin test edilmesi	62
Şekil 4.9 : Ultrasonik kaynak dikiş makinesi ile hazırlanan numune	63

Şekil 4.10 : Aramid/viskoz bazlı kumaşın ultrasonik kaynak dikiş işlemi sonrasında zedelenmesi	64
Şekil 4.11 : Sıcak hava kaynak dikiş yöntemiyle hazırlanan yapılarda iletken ipliklerin oryante olamaması sorunu	65
Şekil 4.12 : Zigzag dikiş makinesi kullanılarak iletken ipliğin astar kumaşa sabitlenmesi	66
Şekil 4.13 : Konvansiyonel dikiş tekniğiyle e-tekstil yapısı oluşturma aşamaları	66
Şekil 4.14 : Isıl testler için hazırlanan e-tekstil numuneleri	67
Şekil 4.15 : Numunelerin ön ve arka tarafının görüntüsü.....	67
Şekil 4.16 : “İplik 2” için uzunluk-direnç grafiği	69
Şekil 4.17 : 4-prob yöntemi kullanarak multimetre ile iletken ipliğin lineer direnç değerlerinin ölçülmesi	69
Şekil 4.18 : Osiloskop tarafından 50 Hz frekansında kaydedilen sinyal	70
Şekil 4.19 : Isıl test sonrası iletken ipliğin sinyal-gürültü seviyesinin belirlenmesi..	71
Şekil 5.1 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda kumaşa meydana gelen kömürleşme	74
Şekil 5.2 : Konvektif ısı testi sonrası numunelerin görseli	74
Şekil 5.3 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	78
Şekil 5.4 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türüne göre lineer direnç değişimi kutu-bıyık grafiği.....	79
Şekil 5.5 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı	80
Şekil 5.6 : a) Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği. b) Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği	82
Şekil 5.7 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı	83
Şekil 5.8 : Konvektif ısı testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	84
Şekil 5.9 : Konvektif ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	85
Şekil 5.10 : Konvektif ısı testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı	86
Şekil 5.11 : a) Konvektif ısı testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği. b) Konvektif ısı testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği	87
Şekil 5.12 : Konvektif ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı	89
Şekil 5.13 : Radyan ısı testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	90
Şekil 5.14 : Radyan ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği.....	92
Şekil 5.15 : a) Radyan ısı testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği. b) Radyan ısı testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği	94

Şekil 5.16 : Radyan ısı testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.....	95
Şekil 5.17 : Radyan ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.....	95
Şekil 5.18 : Farklı ısı testler için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	96
Şekil 5.19 : Farklı ısı testler için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişimi kutu-bıyık grafiği.....	98
Şekil 5.20 : Farklı ısı testler için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.....	99
Şekil 5.21 : Farklı ısı testleri için ipliklere göre lineer direnç değişim histogramı	100
Şekil 5.22 : Farklı ısı testleri için kumaşlara göre lineer direnç değişim histogramı	101
Şekil 5.23 : Farklı ısı testlere göre iplik türü için SNR değerleri histogramı	102
Şekil 5.24 : Farklı ısı testlere göre kumaş türü için SNR değerleri histogramı.....	103



GIYİLEBİLİR ELEKTRONİK UYGULAMALARINA YÖNELİK YÜKSEK SICAKLIKLARA DAYANIKLI VERİ İLETİM KALİTESİ YÜKSEK E-TEKSTİL YAPILARININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı giyilebilir elektronik uygulamalarına yönelik yüksek sıcaklıklara dayanıklı e-tekstil yapılarının geliştirilmesidir. Bu çalışmada yüksek sıcaklığa dayanıklı olan farklı tipteki kumaşların, e-tekstil yapılarındaki elektronik bileşenler arası veri transfer kalitesine etkisi araştırılmış ve buna bağlı olarak giyilebilir elektroniklere yönelik yüksek sıcaklıklara uygun e-tekstil yapısı belirlenmiştir. Aramid takviyeli alüminyum laminat, paraaramid - metaaramid, viskoz rayon, cam elyaf, PBI içerikli altı farklı kumaş, farklı tipteki iletken iplikler (çelik, bakır, gümüş kaplı) ile sandviç yapı formunda e-tekstil devre hattı oluşturmak üzere birleştirilmiştir. Numuneler, ultrasonik kaynak dikiş, sıcak hava kaynak dikiş ve konvansiyonel dikiş tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Numunelerin yüksek sıcaklık altındaki performans özellikleri TS EN ISO 11612 standardına (Koruyucu giyecekler - Isı ve alevle karşı koruyucu giyecek) göre sınırlandırılmış alev sıçraması (TS EN ISO 15025), alevli ısı transferi (EN ISO 9151), radyan ısı testleri (EN ISO 6942) uygulanarak test edilmiştir. Numunelerin elektriksel özelliklerinden iletkenlik multimetre kullanılarak, sinyal kalitesi ise osiloskop kullanılarak tespit edilmiştir.

Oluşturulan e-tekstil yapılarının ısı testler öncesi ve sonrası lineer direnç değerleri ve sinyal kalitesi karşılaştırılmış, ısı testler sonucunda kumaş türlerinin ve iplik türlerinin ortalama mutlak lineer direnç ve veri iletim kalitesi değişimleri açısından birbirlerinden anlamlı derecede farklı olup olmadıkları varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle araştırılmıştır. Anlamlı farklılık tespit edildiği durumlarda bu farklılığın hangi gruptan veya gruplardan kaynaklandığının tespitinde çoklu karşılaştırma yöntemi olan “Bonferroni”, “Scheffe” veya “Tamhane” test istatistiği uygulanmıştır.

Isı testler sonucunda bazı e-tekstil yapılarında gümüş kaplı iletkenlik ipliklerde kopmalar meydana geldiği, genel olarak gümüş kaplı iletken ipliklerin, bakır ve çelik iletken ipliklerden daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca nonwoven yüzeye lamine edilmiş alüminize kumaş numunesinin, diğer kumaşlardan oluşan numunelerden iletkenlik ve veri iletim kalitesi açısından daha yüksek performans gösterdiği istatistiksel olarak saptanmıştır. Sonuçta, yüzey görünüşü düzgün, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve veri iletim kalitesi yüksek fonksiyonel bir e-tekstil yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen e-tekstil yapısının, giyilebilir teknolojiler, teknik tekstiller, askeri giysiler, koruyucu giysiler ve uzay kıyafetleri uygulamalarında yer alabileceği öngörülmektedir.



DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE RESISTANT E-TEXTILE STRUCTURES WITH HIGH DATA TRANSFER QUALITY FOR WEARABLE ELECTRONIC APPLICATIONS

SUMMARY

In recent years, new and practical products have emerged to meet user demands with rapid development in science and technology. Electronic textiles, which are formed by the combination of electronic industry and textile science, meet the needs of people in different fields such as health, military, space, and medicine.

In order to obtain e-textile structures and to develop new technologies in this field, scientists working in different disciplines ranging from polymer chemists to physicists, from textile engineers to bioengineers are working together.

The e-textile structure is different from traditional electronic systems because it is an electronic system that is woven, knitted or incorporated into the composite fabric. The electrical and physical properties of electronic textiles work symbiotically and affect the functions and properties of each other. Electronic textiles can include a variety of electronic components such as sensors, video cameras, microprocessors, actuators, batteries.

Recently, there has been a growing awareness of emergency situations involving large numbers of civilians in large populated areas. Professional rescue teams should minimize their risks while maximizing their effectiveness in performing their duties in scenarios such as major fires, earthquakes, floods, terror incidents or major industrial accidents. Along with the political supports provided within this scope, further support studies have been initiated to monitor and coordinate the activities of emergency support personnel against catastrophic events continuously. In these scenarios, with the emergence of wearable electronic devices, developments in information and communication technologies play a primary role. With the development of electronic textiles, information infrastructures are fully integrated into clothes that collect, process, store and transfer information about the user and the surrounding environment.

In this study, it is aimed to develop e-textile structures with high data communication quality which are resistant to high temperatures for wearable electronics applications. Heat and flame protection textile theories were examined and the parameters such as melting temperature, pyrolysis temperature, combustion temperature and limit oxygen index (LOI) values were evaluated. Based on these parameters, six different fabrics were determined. These fabrics are made of woven, knitted and nonwoven based aramid reinforced aluminum laminate, aramid, glass fibre, viscous rayon and PBI fibers. The fabrics are prepared in various sizes according to the test methods specified in TS EN ISO 11612 (Protective clothing - clothing to protect against heat and flame). The samples are 200x160 mm according to ISO 15025 (Protective

clothing -- Protection against flame -- Method of test for limited flame spread) standard, 140x140 mm according to EN ISO 9151(Protective clothing against heat and flame -- Determination of heat transmission on exposure to flame) and 230x70 mm according to EN ISO 6942 (Protective clothing -- Protection against heat and fire -- Method of test: Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat) standard.

Six different fabrics, which are resistant to high temperatures, are combined with different types of conductive yarns (steel, copper, silver coated) to form an e-textile circuit line in sandwich form. Three different sewing machines were used to combine conductive yarns with outer fabrics. The first is the ultrasonic welding sewing machine. Three different parameters such as power, pressure and velocity were used for combining the lining fabric with the outer fabric by ultrasonic welding. By changing the parameter values, an electronic textile structure was tried to be formed by ultrasonic welding. In the case of stable bonding between the layers, it was determined that the aramid-viscous blended liner was deformed. For this reason, the ultrasonic welding technique has been eliminated in the study.

The other method is the hot air welding seam technique. Although working with fabrics in different temperatures and different feed speed, short circuit due to the inability to be an orientated structure formed in the structure of the conductive yarn and sudden deviations in the resistance occurred. For this reason, the hot-air welding method has been eliminated.

As an alternative method, the zigzag sewing machine was used to fix the conductive yarn to the lining fabric. For each test sample, conductive yarns prepared at the relevant length are fixed to the area marked on the liner by zigzag sewing method. After the conductive yarn liner is fixed to the fabric, the liner fabric and the outer fabric are sewn together, with the surface of the conductive yarn corresponding to the rear surface of the outer fabric. The sandwich structure is formed by this joining and the conductive yarns are prevented from direct contact with the outer surface.

Operating characteristics of e-textile samples in terms of high-temperature resistance (limited flame spread, convective heat transfer, radiant heat) and electrical properties (conductivity and signal quality) were tested. As a result of the limited flame splash test, all fabrics were at A1 protection level and all fabrics were at B1 protection level as a result of convective heat test. In addition, as a result of radiant heat test, the protection level of aluminized fabrics was higher than PBI and viscous fabrics.

Linear resistance values and signal quality of e-textile structures were compared before and after thermal tests and variance analysis (ANOVA) was used to determine whether the fabric types and yarn types had a significant difference between the average absolute linear resistance and data transmission quality. In cases where significant differences were detected, multiple comparison methods (Bonferroni, Scheffe or Tamhane test statistic) was applied in order to determine which group or groups were caused by this difference.

As a result of thermal tests, it has been determined that in some e-textile structures, silver-plated conductivity yarns have ruptured and generally silver-coated conductive yarns show lower performance than copper and steel conductive yarns. Particularly in limited flame spread and convective heat test, the rate of loss data on silver yarns is over 30%.

There was a reduction in the data transmission quality of conductive yarns after thermal tests for all yarn types and fabric types. When the signal-to-noise ratio (SNR) according to the yarn types is examined, it is understood that the average of SNR values for all yarns is above 40. This is the amount that can be considered successful in terms of data transmission quality. However, after all thermal tests, the data transmission quality decreased by approximately 10% on average. Compared to the SNR value of the fabric types, the aluminized fabric laminated to the knitted aramid fabric showed significant performance loss after the limited flame spread and convective heat tests.

In addition, it was statistically determined in the conductivity and high data transfer quality measurements, the sample of aluminized fabric laminated to nonwoven showed higher performance than the samples manufactured using other fabrics. As a result, a highly functional e-textile structure that is resistant to high temperatures with smooth surface appearance and high data transmission quality has been developed. It is proposed that the developed e-textile structure is promising for the applications of wearable technologies, technical textiles, military clothes, protective clothing and spacesuits.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Son yıllarda geniş nüfuslu bölgelerde çok sayıda sivil ilgilendiren acil durumlarla ilgili olarak artan bir farkındalık mevcuttur. Profesyonel kurtarma ekipleri büyük yangınlar, depremler, sel, terör olayları veya büyük endüstriyel kazalar gibi senaryolarda görevini icra ederken etkinliğini maksimuma çıkarırken, kendi risklerini en aza indirmelidir. Bu kapsamda sağlanan politik destekler ile beraber, acil destek personellerinin katastrofik olaylar karşısında faaliyetlerini sürekli olarak izlemek ve koordine etmek için ileri destek çalışmaları başlamıştır. Bu senaryolarda, giyilebilir elektronik cihazların ortaya çıkmasıyla birlikte bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler birincil rol oynamaktadır. Elektronik tekstillerin gelişmesiyle beraber, kullanıcıya ve etrafındaki çevreye ilişkin bilgileri toplayan, işleyen, depolayan ve aktaran kıyafetlere tamamen entegre edilmiş bilgi altyapıları geliştirilmektedir. Hem Avrupa hem de Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen büyük projeler ve hem akademik araştırmacıların hem de sanayi şirketlerinin çalışmaları ile işçilerin günlük faaliyetlerinin izlenmesinde, özellikle de doğrudan izleyemedikleri geniş operatif alanlarda tehlikeli faaliyetlerde bulunan asker veya acil durum operatörlerine dair bilgi edinmesinde dikkate değer bir çaba sarf edilmektedir. Bu alandaki öncü projelerden biri, 90'ların sonunda ABD Donanması Dairesi tarafından finanse edilen Georgia Tech Giyilebilir Anakart'dır. Bu proje kapsamında, savaş alanında askerler için hayati öneme sahip işaretleri izlemek amacıyla bir gömlek geliştirilmiştir. Benzer çalışmalar sivil acil durum operatörleri için de söz konusudur. Viking Life-Saving Equipment A/S ve Systematic Software Engineering A/S şirketleri, itfaiyecilere yönelik kapüşonlu ceketler geliştirmiştir. Bu ceketlerin iç ve dış tekstil katmanlarına entegre edilmiş sıcaklık sensörleri sayesinde kullanıcı için potansiyel olarak kritik ısı seviyeleri tespit edilebilmektedir. Ayrıca kullanıcının kalp atış hızı, vücut sıcaklığı gibi fizyolojik durumunu izleyebilmek için sensörler de entegre edilmiştir.

Avrupa Komisyonu, Beşinci ve Altıncı Çevre Programları tarafından finanse edilmiş WearIT@work ve ProeTEX gibi projeler ile hem medikal alanda hem de işçilerde giyilebilir elektroniklerin üzerinde çalışılmaktadır. WearIT@work projesi, günlük faaliyetler sırasında çalışanları desteklemek için giyilebilir bilgisayar teknolojilerine dayalı çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir. Özellikle sağlık hizmetleri, uçak bakımı, üretim yönetimi ve acil durum kurtarma olmak üzere dört uygulama senaryosuna odaklanmaktadır. Bu bağlamda, itfaiyecilerin müdahaleleri sırasında yerini saptamak, itfaiyeciler kendi aralarında ve komuta merkezi ile koordinasyonunu sağlamak gibi çözümler geliştirmektedir. ProeTEX projesinde ise doğrudan tekstil ile bütünleştirilmiş ve özellikle acil durum, afet müdahale personeli için tasarlanmış, sensörler, iletişim, işleme ve güç yönetimi cihazlarını içeren bir dizi fonksiyonel akıllı koruyucu giysi tasarımına odaklanılmıştır [1].

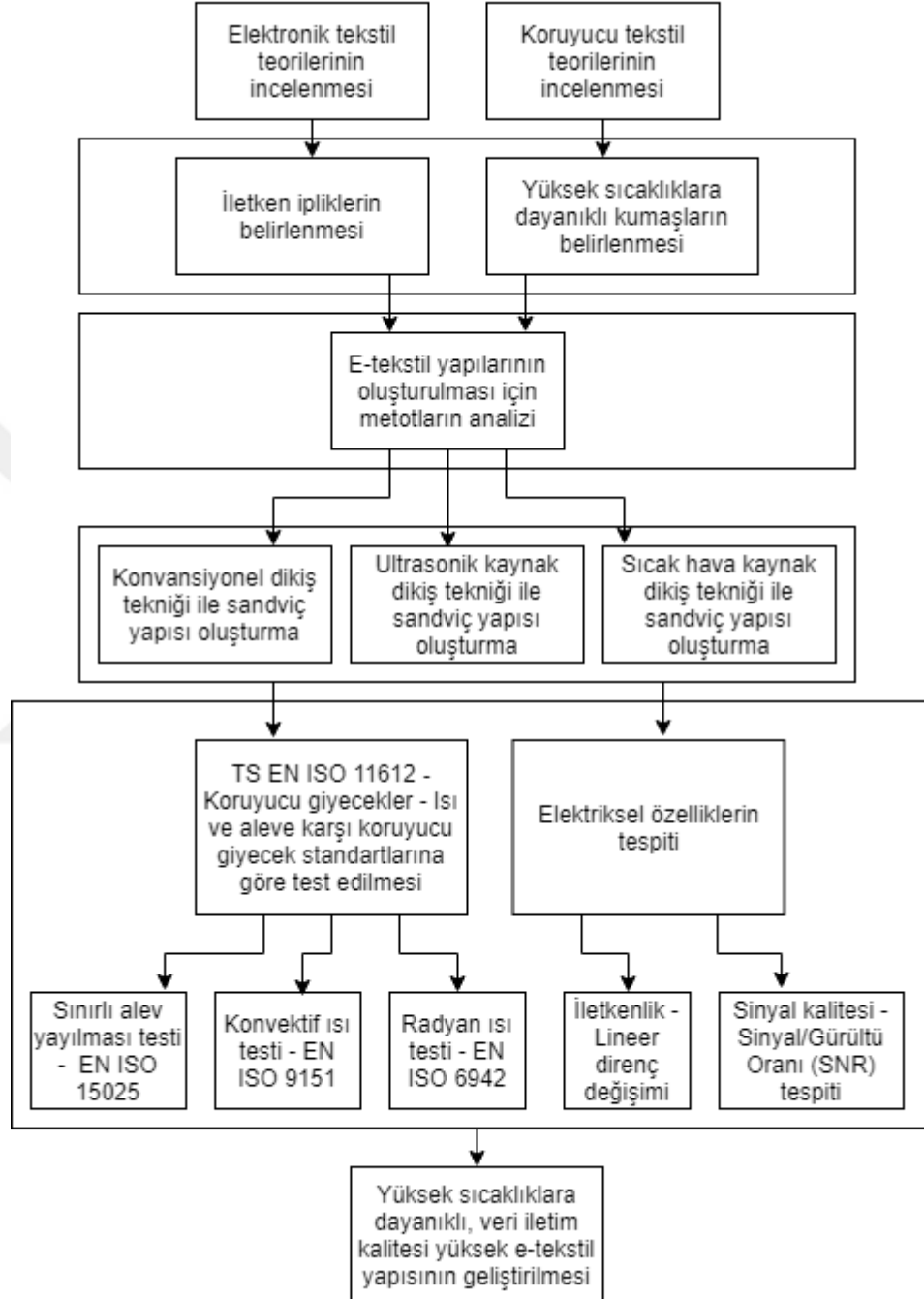
Elektronik tekstiller, kullanıcı için tasarlanmış fonksiyonel amaçları yerine getirirken, bir takım zorluklarla karşılaşmaktadır. Giyside yer alan sensör, güç kaynağı, elektronik devre elemanları gibi tüm bileşenler, son kullanıcının çalışma koşullarında maruz kalacağı koşullara uygun dizayn edilmelidir. Bu projede, ısı ve aleve maruz kalan operatörler için tasarlanan giysilerde kullanılan iletken ipliklerin performansları incelenmiş, yüksek sıcaklıklara tabi olan iletken tellerin iletkenlik özelliğindeki değişimler gözlemlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, veri iletim kalitesi yüksek giyilebilir elektronik tekstil yapılarının geliştirilmesidir. Bu amaca yönelik olarak ısı ve aleve karşı korumaya yönelik üretilmiş olan çeşitli gramajlardaki aramid takviyeli alüminyum laminat (ARALL), aramid, viskoz rayon, cam elyaf ve polibenzimidazol (PBI) liflerinden üretilmiş kumaşlar ile farklı özellikteki iletken ipliklerin entegrasyonu sağlanmıştır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı en uygun malzemenin ve yönteme dair çalışma parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Isı ve aleve karşı koruyucu kıyafetlerin performans değerlendirmelerine ait standartlar kapsamında yapılan testler sonucunda, veri iletim özelliğine sahip e-tekstil yapılarının etkili ve verimli kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

1.3 Araştırma Metodolojisi

Çalışmanın çerçevesi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir ve belirli bir amaç doğrultusunda araştırma metodolojisi Şekil 1.1’de özetlenmiştir:



Şekil 1.1 : Çalışmanın araştırma metodolojisi.

Öncelikle yüksek sıcaklıklara dayanıklı elektronik tekstil yapısını oluşturabilmek için kullanılabilecek nitelikteki iletken iplikler ve kumaşlar belirlenmiştir. Bu malzemelerden sandviç yapı oluşturabilmek için çeşitli dikiş teknikleri kullanılmıştır. Oluşturulan e-tekstil yapıları ısı ve alev karşı koruyucu giyecek standartlarına göre

test edilmiştir. Test sonrasında yapılarda yer alan iletken ipliklerin lineer direnç değişimi ve sinyal-gürültü oranı tespit edilmiştir. Elde edilen veriler istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Kullanılan malzemeler ile yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve veri iletim kalitesi yüksek elektronik tekstil yapılarından en uygun olanı belirlenmiştir.

1.4 Tez Genel Bakış

Tez, aşağıda özetlenen dört bölümden oluşmaktadır:

Elektronik tekstiller (e-tekstiller) bölümünde, elektronik tekstillerin farklı disiplinlerle olan konumu ve e-tekstillerin vizyonu sunulmaktadır. Tekstil malzemesine elektriksel iletkenlik kazandırılması için gereken yöntemler kapsamlı şekilde anlatılmıştır. Elektronik tekstillerin kullanım alanları, güncel örnekler üzerinden kategorik olarak açıklanmıştır.

Isı ve alev koruması bölümünde, yüksek sıcaklıklara dayanıklı e-tekstil yapılarında kullanılabilecek kumaşlara dair incelemeler yapılmıştır. Elyafların yanma davranışı, yanıcılığa sebep olan faktörler sunulmuştur. Alev geciktirici özellikteki kumaşların kimyasal yapısı incelenmiş, geleneksel tekstil liflere nasıl alev geciktirici özellik kazandırıldığı belirtilmiştir.

Malzeme ve metodlar bölümünde, çalışmada kullanılan kumaşların ve iletken ipliklerin teknik özellikleri paylaşılmıştır. Elektronik tekstil yapısı oluşturmak için kullanılan dikiş makineleri ve yapıların ısı ve aleve karşı performans değerlerini tespit etmek için kullanılan test aparatları tanıtılmıştır. E-tekstil yapıların oluşturulması için üç farklı dikiş makinesinin dikiş parametreleri incelenmiş, oluşturulan yapıların test metodu anlatılmıştır. Son olarak, iletken ipliklerin lineer direnç ve veri iletim kalitesinin hesaplanmasında kullanılan denklemler, cihazlar ve metotlar açıklanmıştır.

Sonuçlar bölümünde, elektronik tekstil yapılarının koruma seviyeleri saptanmış, her bir ısı test için iletken ipliklerin lineer direnç değeri ve sinyal-gürültü oranı hesaplanmıştır. Her bir test metodu için lineer direnç değişim oranları istatistiksel olarak analiz edilmiş, kumaş ve iplik türleri için en iyi performanslar belirlenmiştir.

2. ELEKTRONİK TEKSTİLLER

Elektronik tekstiller, elektronik bileşenlerin tekstil yüzeyleri ile entegrasyonu sonucu oluşmuş bir tekstil alanıdır. Teknolojik alandaki güncel eğilimler, kumaşların ve elektroniklerin göze batmayan ve pürüzsüz bir şekilde entegre edilmesini sağlamış, tamamıyla yeni bir uygulama alanı doğurmuştur. Bilimsel araştırmalarda başarılı sonuçlar elde edilmesiyle elektronik malzemelerin tekstil yapılarında kullanımı pratikleşmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen interaktif e-tekstil yapıları, askeri-güvenlik alanı başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Kıyafetlerden otomobil içlerinde kullanılan kumaşlara kadar her kumaş elektronik ile güçlenebilmektedir [2, 3].

Elektronik tekstiller, kumaşlara anti-statik madde emdirilmesi, kumaşların ve dokusuz yüzeylerin iletken malzemelerle kaplanması ve iletken ipliklerin iletken olmayan ipliklerle katlanmalarıyla elde edilebilmektedir. E-tekstil yapıları elde edilmesi ve bu alanda yeni teknolojiler geliştirmek üzere polimer kimyacılarından fizikçilere, tekstil mühendislerinden biyomühendislere kadar farklı disiplinlerde faaliyet gösteren bilim insanları bir arada çalışma yürütmektedir [4]. E-tekstillerin ilk adımı, doktorların tüberküloz hastalarının açık havada uyuması için elektrikli battaniyeleri tavsiye etmesiyle atılmıştır. Günümüzde ise elektronik tekstiller, bir elektrik devresi gibi davranış göstermektedir. Kumaş yapısı içerisinde bir devre ya da devre elemanı olarak rol almaktadır. Son kullanıma uygun şekilde gerekli parça ve düzenek oluşturulabilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda bir anten, sensör veya mekanik düğme ile düzenek oluşturulduğu görülmektedir. İnternet arama motoru Google ile denim markası Levi's şirketlerin ortak projeleri olan "Project Jacquard", giyilebilir elektronik tekstillere örnek olarak gösterilebilir. Bu projede dokuma kumaşlara elektronik devreler ve teller ilave edilerek, günlük giysiler giyilebilir teknolojiye dönüşmüştür. Dokuma giysilerin interaktif olması sağlanarak, kullanıcının kumaş yüzeyine hafif dokunuşları sayesinde akıllı telefonuna kablosuz sinyal göndermesi, telefonunu sessize alabilmesi ve mesaj yazabilmesi gibi fonksiyonları yerine getirmesi sağlanmıştır. Proje kapsamında bir ceket düğmesi kadar küçük konektörleri, minik devreleri, iletken ipliklere bağlamak için yenilikçi

teknikler geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar sayesinde giysi üzerine yapılan dokunmatik etkileşimler anlamlı veri olarak işlenebilmektedir [5]. Bu özelliklerinden ötürü, elektronik tekstiller, “elektronik fonksiyonelliğe ve aynı zamanda da tekstil özelliklerine sahip malzemeler” olarak tanımlanmaktadır [3].

Elektrik mühendisliği, bilişim sistemleri ve tekstil mühendisliğinin ortak çalışma alanında yer alan e-tekstiller, her disiplinin önemli unsurlarını taşımaktadır (bkz. Şekil 2.1). Metal, karbon veya optik liflerin iletkenliği, bu malzemelerin işlenebilirliği ve geleneksel tekstil yapılarında uygulanabilirliği önemli öğelerdir [2]. E-tekstiller için, sistemin sadece hafif ve hareketli olması değil, aynı zamanda yıkanıldığında aşınma ve yıpranmaya da dayanması ve iyi elektrik iletkenliği özelliğini de koruması gerekmektedir [2, 6].

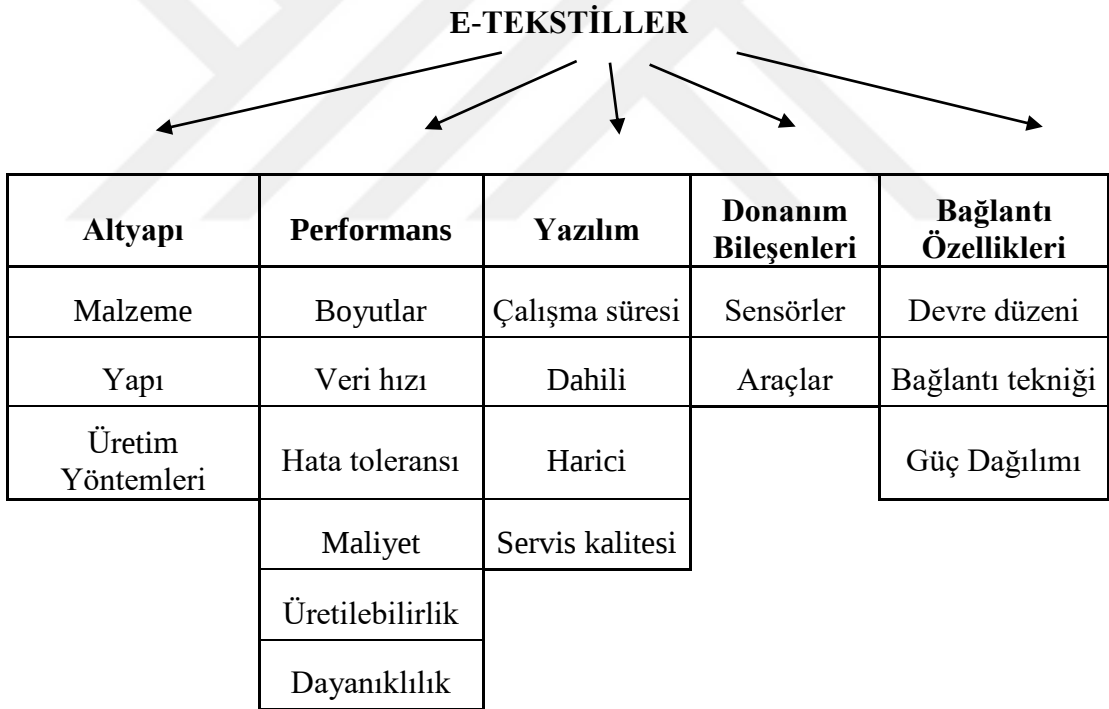


Şekil 2.1 : Elektronik tekstillerin farklı disiplinlerle olan konumu.

E-tekstil yapısı, dokunmuş, örülmüş veya kompozit kumaşa dahil edilen elektronik bir sistem olduğu için geleneksel elektronik sistemlerden farklıdır. Elektronik tekstillerde elektriksel ve fiziksel özellikler, simbiyotik olarak çalışır ve birbirinin işletim işlevlerini ve özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenden dolayı elektronik tekstiller, hem fiziksel kumaş hem de elektronik işlev dikkate alınarak kapsamlı bir strateji ile tasarlanmalıdır. Örneğin elektronik tekstillerde, geleneksel tekstil tasarımında olduğu gibi bir kumaşın gramajının ve uygulama için kumaş konstrüksiyonun belirlenmesi, en uygun sensörün yerleştirilmesi için tellerin en iyi şekilde nasıl yerleştirileceği veya eğer sensör bir lif ise, dokuma yapısının sensörün cevabını etkileyeceği sorusuna cevap veremez. Aksi şekilde, bir e-tekstilin sadece bir elektronik sistem olduğunu varsaymak da yanlış olur. Kumaştaki bir devre,

baskılı devre kartından fiziksel olarak daha büyük olma eğilimindedir. Bu sebeple, e-tekstil yapısında, tipik bir devrede karşılaşılmayan güç ve veri yolu problemi ortaya çıkabilir [7].

E-tekstil vizyonu, altyapı, performans, yazılım, donanım bileşenleri ve bağlantı özelliklerini içeren 5 ana başlıktan oluşmaktadır (bkz. Şekil 2.2). Altyapı kapsamında elektronik tekstilde kullanılan kumaş, yapısı ve üretim yöntemi incelenir. Sensör, mikroçip gibi elektronik aygıtların tekstil yapısına entegrasyonu donanım bileşenlerinin konusuna girmektedir. Performans özellikleri elektronik tekstillerde de en önemli konulardan biridir. Ürünün üretilebilirliği, maliyeti, kendi içerisindeki veya harici cihazlar arasındaki veri iletişim hızı ve üretim problemleriyle ilişkili hata toleransları, performans başlığı altında değerlendirilir. Fiziksel veri yollarının ve ara bağlantı teknolojilerinin tasarımı, e-tekstil uygulamalarını anlayabilmek için bilinmesi gereken faktör olan bağlantı teknolojisi kapsamında yer alır [8].



Şekil 2.2 : Elektronik tekstillerin vizyonu.

2.1 Tekstil Yapılarına Elektriksel İletkenlik Kazandırılması

Elektronik tekstillerin geliştirilmesi için birçok üniversite ve araştırma şirketi projeler üretmektedir. İlk nesil projelerde kullanılan malzemeler esas olarak paslanmaz çelik lifler ve optik elyafa dayanmaktadır. Bu tür malzemeler aşınma gibi işleme özelliği, sertlik ve bükülmezlik gibi ürün özellikleri ve malzemelerin ayrışması gibi normal

kullanım sırasındaki davranışı sebebiyle sıradan tekstil lifleriyle çok uyumlu değildir. Elektro-iletken tekstillerin geliştirilmesi için, iletken malzemelerin birleştirilmesi, polimere nanopartiküllerin eklenmesi, elastik liflerin elastik olmayan iletken liflerle birleştirilmesi, iletken kaplamaların uygulanması veya iletken mürekkeplerin kullanılması gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [9, 10].

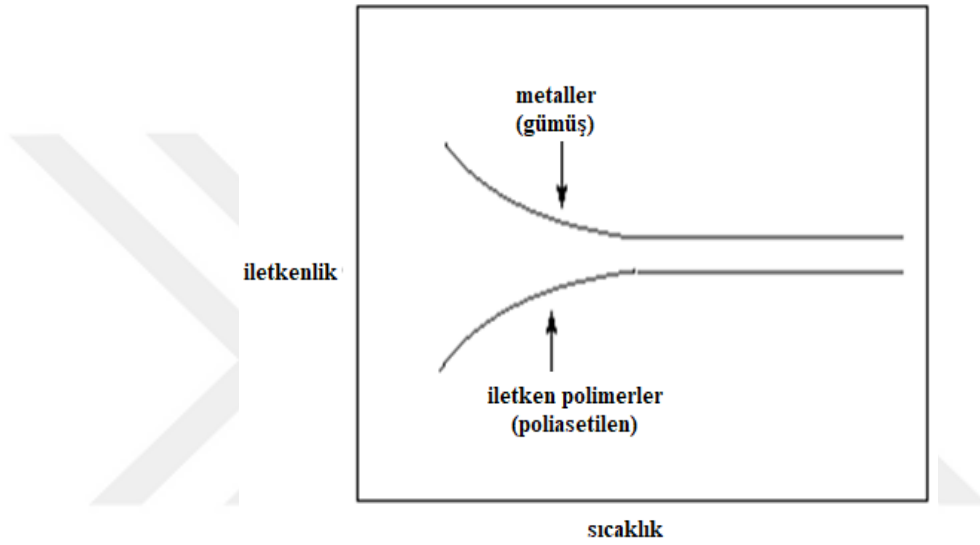
2.1.1 İletken Polimerler

Doğal olarak iletken polimerler (ICP), uygun çevresel uyaranları tanımak, uyaranlardan kaynaklanan bilgileri işlemek ve buna uygun bir şekilde cevap verebilme olanağı sağladığı için birçok araştırmacının akıllı polimer sistemleri tasarlamasına yardımcı olmuştur [11].

İletkenlik, elektronların serbestçe hareket etmesinden kaynaklanmaktadır. Elektronlar, elektron alabilme yeteneği belirli olan enerji bandlarında hareket ederler ve elektronların bir enerji bandında bulunabilmeleri için belli bir enerjiye sahip olmaları gerekmektedir. Bu enerji bandları tam dolu veya boş olduğunda, malzeme yalıtkan özellik gösterir; bandlar tam boş veya tam dolu olmadığı zaman iletkenlik gözlenir [12]. Çoğu organik polimer elektriksel olarak yalıtandır fakat doğal olarak iletken polimerler metallerinkine yaklaşan elektriksel iletkenlik sergileyen malzemelerdir [11]. “İletken polimer” terimi, 1977 yılında Shirakawa, MacDiarmid ve Heeger tarafından poliasetilenin iyot ile yükseltgenip iletkenliğinin metallerinkine yakın özellik göstermesi ile literatüre kazandırılmıştır. Aynı bilim insanları iletken polimerler üzerinde çalışmaya devam etmiş ve 2000 yılında kimya alanında Nobel Ödülü kazanmıştır. Poliasetilen filmlerin halojen buharlara maruz kaldığında elektriksel iletkenliğinin 10^9 kat arttığını ve 10^5 S cm^{-1} değerinden yüksek olduğunu keşfetmişlerdir. Bu iletkenlik değeri, cıvanın iletkenlik değerinden ($\sim 1.04 \text{ S cm}^{-1}$) yüksektir ve bakırın iletkenlik değeri ($5.65 \times 10^5 \text{ S cm}^{-1}$) ile kıyaslanabilmektedir. Poliasetilenin yükseltgenmesinden elde edilen başarıyla poliasetilenin şarj edilebilir pil özelliği üzerine çalışılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalar sonucunda, polipirol (PPy), polianilin (PAni), politiyofen (PTh) dahil bir çok kendinden iletken polimer (ortak bir p-konjuge yapıya sahip) keşfedilmiştir [11, 12]. Bu materyaller, oksijene karşı daha iyi direnç göstermesi ve daha iyi işlenebilirliği nedeniyle endüstride pratik hale gelmiştir. Kendinden iletken polimerler gerek rijitliği gerekse sıkıca paketlenmiş zincir yapısı sebebiyle zayıf işlenebilir özellik göstermektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için kendinden iletken polimerlerin kimyasal yapısında

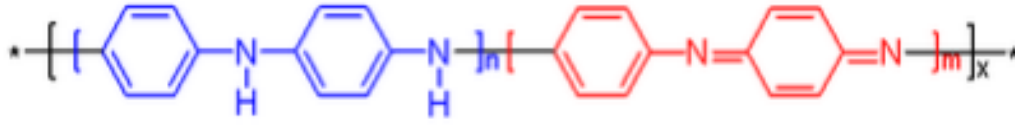
poliizopren, polistiren veya polibütadien gibi ikameli türevler ile veya kompozitler, kolloidal dispersiyonlar ve kaplanmış lateksler gibi kopolimerler ile modifikasyon yapılmıştır [13].

Sıcaklık, iletkenlik değerini etkileyen bir faktördür. Sıcaklığın yükseltilmesi metallerin iletkenliği üzerine olumsuz etki yaparken, iletken polimerlerin ise iletkenliğini artırmaktadır. Bazı metaller yeterince düşük sıcaklıklarda süper iletken davranış göstermektedir. Şekil 2.3’de sıcaklığın iletken polimerler ve metaller üzerine etkisi gösterilmektedir [14].



Şekil 2.3 : Sıcaklığın iletkenlik üzerine etkisi [14].

İletken polimerler ailesi üyelerinden olan polianilin, geri dönüşümlü redoks ve pH değiştirme özellikleri, sentez kolaylığı ve çok çeşitli potansiyel uygulamalarından dolayı üzerinde en çok çalışan kendiliğinden iletken polimerlerden biridir. Anilinin kimyasal ve elektrokimyasal yükseltgenme ürünleri birçok çalışmada incelenmiştir. Polimerik yapısı, polipirol ve politiyofen gibi diğer iletken polimerlerden farklıdır. Her biri kendine özgü rengi olan temelde üç farklı oksidasyon basamağı bulunmaktadır. Tam olarak indirgenmiş lökomeraldin formu çok soluk sarıdır, protonlanmış emeraldin tuzu formu parlak yeşildir ve tamamen oksitlenmiş pernigranilin baz formu koyu mavidir. Bu oksidasyon basamaklarında polianilin yalıtkan özellik göstermektedir. Bunların dışında protoemeraldin ve nigranilin olarak tanımlanan ara basamakları da vardır. Şekil 2.4’de polianilinin yapısı gösterilmektedir [11, 14].

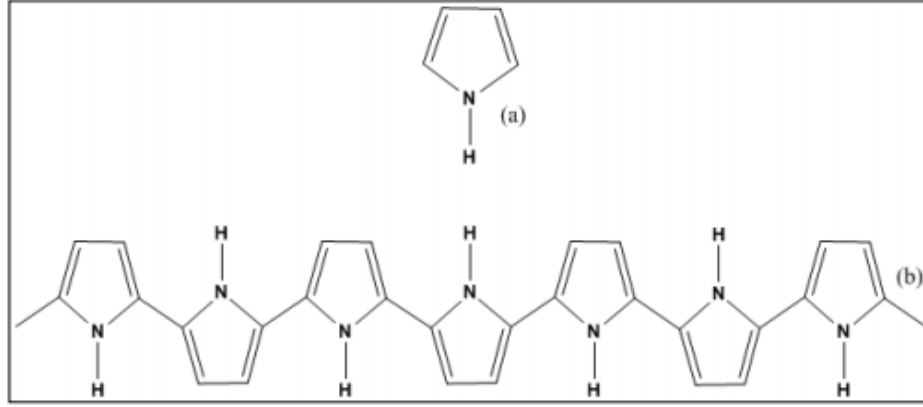


Şekil 2.4 : Polianilin polimerinin kimyasal yapısı [14].

Polianilin genel yapısında n indirgenmiş, m ise yükseltgenmiş tekrar eden birimleri göstermektedir. Genel formülde $n = 1$ ise, PAni tamamen indirgenmiş olan lökomeraldin durumundadır, $n = 0.5$ ise emeraldin durumunda ve $n=0$ ise tamamen yükseltgenmiş pernigranilin durumundadır. PAni, kimyasal veya elektrokimyasal oksidasyon yoluyla sentezlenebilir [11, 14].

Bir diğer kendiliğinden iletken polimer olan polipirol ise, iyi çevre stabilitesine sahip olması, kolay sentezlenmesi ve diğer iletken polimerlerden daha yüksek iletkenliği (10^{-6} Scm^{-1}) nedeniyle ticari uygulamalar için önemli bir polimerdir. Genellikle biyosensörler, gaz sensörleri, teller, mikro-aktivatörler, antielektrostatik kaplamalar, katı elektrolitik kapasitörler, elektrotomik pencereler ve ekranlar, polimerik piller, elektronik cihazlar ve fonksiyonel membranlar olarak kullanılır. Polipirol, hava ortamında stabil, organik ve sulu elektrolit solüsyonlarda elektroaktiftir. Elektriksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin dinamik kontrolüne izin veren oksitlenmiş veya indirgenmiş halleri arasında değiştirilebilir. Çok çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle farklı özelliklere sahip polimerler ortaya çıkabilir. Özellikle PPy, enzimler, antikolar, reseptörler ve hatta tüm canlı hücreler gibi biyolojik olarak aktif moleküllerin immobilizasyonu için toksik olmayan, biyo-uyumlu bir materyaldir. Ayrıca PPy bazlı polimer karışımları, metallerin korozyonunu engelleyebilir. Polipirolun nitrik asitle işlenmiş demir veya çeliğe kuvvetli yapışması nedeniyle, polipirol polimerler iyi bir yapıştırıcı olarak kullanılabilir. Polipirolün kimyasal yapısı Şekil 2.5'te gösterilmiştir [11, 15].

PPy, çözültide pirol monomerlerin kimyasal veya elektrokimyasal oksidatif polimerizasyonu ile sentezlenebilir. Her iki süreç de anyonik katkı maddelerinin oksitlenmiş polimer içerisine dahil edilmesini içerir. Kimyasal polimerizasyon genellikle pirol monomerin uygun bir çözücü içinde kimyasal oksidan ile karıştırılmasını içerir. Diğer taraftan, elektrokimyasal polimerizasyon, uygun bir anotta destekleyici bir elektrolit içinde pirol monomeri oksitleyerek gerçekleştirilir [15].



Şekil 2.5 : Polipirrol polimerinin kimyasal yapısı [14].

Politiyofen, çok geniş olan iletken polimer ailesinin bir diğer üyesidir. Bu konjuge polimer ve türevleri, optik ve elektriksel iletkenlik özellikleri, yüksek kontrast oranı, yüksek geçiş hızı ve işlenebilirliği gibi özelliklerinin iyi olması sebebiyle çok farklı uygulama alanlarında kullanılabilmektedir. Politiyofenin başlıca uygulama alanları elektroluminesans, elektrokimyasal kapasitörler, güneş enerjisi hücreleri, batarya için karşıt elektrot, sensörler ve korozyon engelleyicilerdir. Politiyofen ve türevleri, kapasitans değeri 250 F/g olması sebebiyle süperkapasitörlerde p- ve n-doplanabilen malzeme olarak kullanılmasına rağmen elektrokimyasal kararsızlığından dolayı enerji depolamada pek tercih edilmemektedir. Polietilendiyoksitiyofen (PEDOT), politiyofoenin elektronca zenginleştirilmiş bir türevidir ve mükemmel elektrokimyasal kararlılığı, hızlı anahtarlanabilme hızları ve yüksek spesifik kapasiteleri gibi özellikleri sayesinde süperkapasitör olarak çalıştırılan bir elektrot malzemedir [16].

Politiyofenin elektriksel iletkenliği üzerine yapılan bir çalışmada, çekirdek-kabuk yapısına sahip bir politiyofoen ve nano-titanyum dioksit (TiO_2) bileşimi, anyonik, katyonik ve noniyonik olmak üzere üç farklı yüzey aktif madde varlığında tiyofen oksidatif polimerizasyonu yoluyla sentezlenmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Politiyofenin TiO_2 nanopartikülleri üzerinde çekirdek-kabuk yapısı oluşturduğu Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile ve termal stabilitesi Termogravimetrik analiz cihazı (TGA) analizleriyle doğrulanmıştır. Ayrıca nanokompozitlerin en iyi yarı-iletken özelliği anyonik yüzey aktif madde varlığında gösterdiği tespit edilmiştir. İletkenlik değerindeki farklılığın sebebinin, kompozitlerin stabilitesindeki farklılıklara dayandığı belirtilmiştir [17].

2.1.2 İletken Elyaf

Doğal iletken lifler veya metalik lifler, demir alaşımları, nikel, paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, bakır gibi elektriksel olarak iletken metallerden geliştirilmiştir. Metalik lifler, genellikle bir demet çekme işlemi ile üretilir. Bunları bir araya getirilmesi işlemi, birkaç ince metal telin demetlenmesi ve daha sonra bunları sürekli olarak ve aynı anda çekme işleminden oluşur. Metalik lifler, 1-80 mikron (μm) arasında değişen çaplarda metal filamentler veya şapel halinde üretilebilmektedir. Metalik lifler genellikle liflerin demet halinde çekim işlemi uygulanmasıyla elde edilmektedir. Metal lifleri, konvansiyonel tekstil liflerine göre daha ağır ve kırılgandır. Bu sebeple başka liflerle homojen karışım yapılmaktadır. Ayrıca iplik üretim işlemleri sırasında makinaya zarar verebilmeleri sebebiyle bilinen iplik eğirme makinalarında üretimi zordur ve maliyetlidir. Maliyeti düşürmek için iletken olmayan lif bantları ile metal bantları harmanlanarak yüksek iletkenlikte ($10^5 \times \text{cm}^{-1}$) karışımlar elde edilmektedir. Fakat metal lifleri ile diğer liflerin arasındaki mukavemet farkının tekstil ürününü olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir [18].

Yapılan bir patent çalışmasında en az üç eşmerkezli metal katman içeren radyal kesit alana sahip, demet halinde çekilmiş metal lifi üretilmiştir. Katman yapısı bir öz tabaka, bir yüzey tabaka ve en az bir ara tabakadan oluşmaktadır. Yüzey tabakası demetten çekilen metal lifinin dış yüzeyidir ve metal lifinin eşdeğer çapının %30'undan daha az bir ortalama kalınlıktadır. En az üç katmandan oluşan metal liflerinin etrafı kimyasal maddeyle kaplanır ve istenilen çap değeri elde edilinceye kadar demet halinde çekim işlemi uygulanır. Çekim işleminin bitmesinden sonra, kompozit telin etrafında oluşan tabaka ve matris genellikle kimyasal yolla temizlenir. Bu işlemden sonra demet halinde çekilmiş liflerin ince ve eşit çaplarda olabilmesi için liflere istenilen miktarda büküm verilir. Bu yöntem ile kompozisyonda başlıca demir olmak üzere karbon, manganez, silisyum, nikel, krom, molibden, bakır, azot, kükürt, fosfor gibi bileşenler içeren paslanmaz çelik lifler üretilebilmektedir. Genelde demir veya bakır gibi bir metalin kaplama malzemesi olarak kullanılması, bu metallerin çekime uğrayan çelik tellere benzer mekanik özellik göstermesi sebebiyle dezavantaj yaratmaktadır [18].

İletken lifler, tekstil malzemesinin metal, metal oksitleri ve metal tuzları ile kaplanmasıyla elde edilebilmektedir. İletken kaplama yöntemiyle kimyasal ve yüksek konsantrasyonlu reçine içerisine metalik parçalarla muamele ederek tekstil

malzemesinin özelliklerini değiştirmeden elektrik iletkenliği özelliği sağlamaktadır. Akımsız kaplama (Electroless plating), fiziksel buharlaştırma (PVD), kimyasal buharlaştırma (CVD), sol-jel yöntemi, püskürtme, iletken polimer ile kaplama, lifleri doldurma ve karbonlaştırma gibi çeşitli kaplama yöntemleri kullanarak life iletkenlik özelliği kazandırılabilir.

Metalik tuzlarla kaplayarak iletkenlik sağlamak, özellikle antistatik performans gerektiren halı endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu kaplama yöntemi çeşitli doğal ve sentetik liflere uygulanabilmektedir. Benzer şekilde galvanik kaplamalar tekstil liflerine oldukça yüksek iletkenlik ($>10^4 \text{ cm}^{-1}$) kazandırmaktadır fakat her life uygulanamamaktadır. Bu yöntem sadece grafit ve karbon lifleri gibi elektriği ileten taşıyıcı tabakalara uygulanabilmektedir. Üretim maliyetinin yüksek olması sebebiyle tekstil endüstrisinde tercih edilmemektedir. Diğer kaplama yöntemi olan akımsız kaplama yönteminde ise tekstil malzemesi, kaplama çözelti içerisinde daldırılmaktadır. Çözelti içerisinde kimyasal reaksiyonlar oluşarak, tekstil malzemesi nikel veya bakır ile kaplanmaktadır. Bu yöntemin sonucunda düzgün ve elektriksel olarak iletken kaplama gerçekleşmiş olsa da üretim maliyeti yüksektir [18].

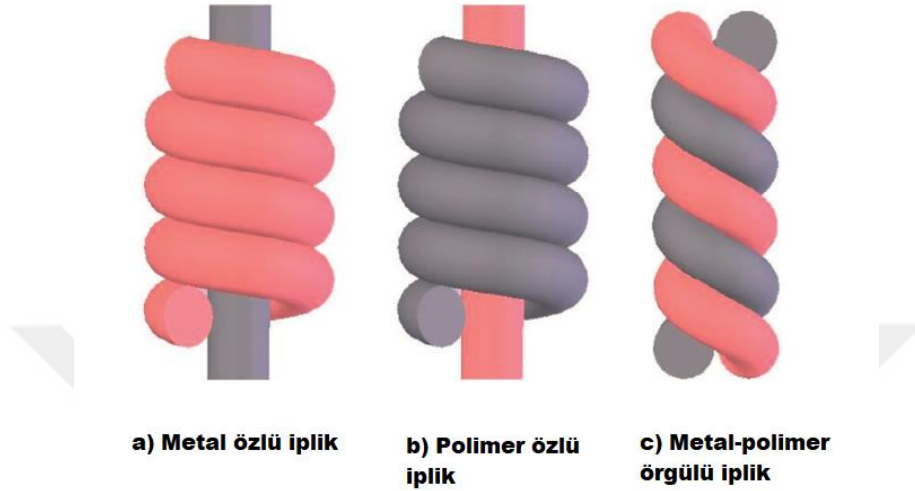
2.1.3 İletken İplik

Elektriksel iletken iplikler, statik ve elektromanyetik korumayı kontrol etmek amacıyla çeşitli endüstriyel uygulamalarda yıllarca kullanılmaktadır. Bu iplikler, giyilebilir sistemler geliştirmek için elektronik ve akıllı tekstil ürünlerinin geliştirilmesinde etkin olarak kullanılmaktadır [19]. İletken iplikler karbon lifi gibi metal olmayan malzemelerden veya metal lifleri gibi metalik malzemelerden oluşmaktadır. Bu tür iplikler, birbiri etrafında bükülebilen paslanmaz çelik filamanlar gibi bir dizi metal filaman içerebilmektedir. Çok filamentli bir lif etrafındaki ince bir metal telin bükülmesiyle, ipliğin elektriksel iletkenliği, mekanik stabilitenin iyileştirilmesiyle elde edilmektedir. Metal telin spiral şekli ipliğin esnekliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu ipliklerin iletkenliği $10 - 500 \Omega / \text{m}$ aralığındadır [20].

İletkenlik kazandırmak için özel olarak işlenen iplikler imal etmenin en basit yöntemlerinden biri, metal filamanları veya telleri doğrudan konvansiyonel tekstil polimer iplikleri ring eğirme yöntemi veya açık-uç eğirme yöntemi ile eğirmektedir. Genellikle, metal tel ile karışmış polimer ipliklerin direnci, ipliklerdeki metal liflerin

yüksek iletkenliğinden ötürü kısmen düşüktür. Genel olarak 0.2 ile 200 Ω/m direnç aralığına sahiptir.

Şekil 2.6’da gösterildiği gibi, bu tip iletken iplikler metal özlü iplikler, polimer özlü iplikler ve metal-polimer iplikler olmak üzere üç alt sınıfa ayrılmaktadır [21].



Şekil 2.6 : Hibrid polimer-metal ipliklerin tipik yapısı [21].

Polimer lifler, bir veya daha fazla metal lifinin etrafına sarılarak, metal özlü iletken iplikler oluşturulmaktadır. Bu tip ipliklerde, metal üzerine sarılan polimer kılıf, metali mekanik aşınmaya karşı koruyabilmektedir. Bu sayede mekanik etkilerden dolayı ipliğin iletkenliğinin kaybı önlenmiş olmaktadır. Metal özlü ipliklerin dezavantajı ise metal çekirdeğin mevcudiyetine bağlı olarak neredeyse hiç esnekliğe sahip olmamasıdır. Polimer özlü iplikler, polimer çekirdeğin üzerine kılıf olarak metalik liflerin sarılmasıyla elde edilmektedir. Metal özlü ipliklerin tersine, daha yüksek uzama özelliğine sahiptir. Yapılan bir çalışmada polimer özlü ipliklerin %320 kopma uzaması gösterdiği ve iletkenlik değerini kaybetmeden %2’lik kalıcı uzama gerçekleştiği bulgusuna varılmıştır. Metalik iplikler kılıfı oluşturduğu için doğrudan çalışma ortamına maruz kalmakta ve paslanma veya mekanik aşınma gibi istenmeyen durumlarla karşılaşmaktadır. Bunu gibi sorunları önleyebilmek için metalik ipliklerin etrafı ince bir plastik tabaka ile kaplanabilmektedir. Polimer-metal örgülü iplikler, bir polimer lifi ve bir metal lifinin bir arada eğilmesi sonucunda elde edilmektedir. Bu iplikler, zayıf mekanik uzamasından ötürü sınırlı sayıda uygulamaya sahiptir. Genellikle diğer iki yapıya bükülemeyen 1-10 cm uzunluğundaki bazı kesikli metal lifler için tercih edilmektedir.

Çizelge 2.1 : Hibrid polimer-metal ipliklere ait bazı çalışma özetleri [21].

Metal özlü iplikler						
Öz	Çap	Kabuk	İncelik	Büküm	Direnç	Referans
Paslanmaz çelik	0.08 mm	Pamuk	44 tex	661 tpm	60 Ω /m	Patel ve arkadaşları (2012)
Paslanmaz çelik	0.05–0.1 mm	Kevlar + Paslanmaz çelik	50–100 tex	–	–	Cheng ve arkadaşları (2003)
Bakır	0.05 mm	Kevlar + Paslanmaz çelik	50 tex	–	–	Cheng ve arkadaşları (2003)
Bakır + Cam	0.12 mm	Polipropilen	930 denye	150 tpm	–	Cheng ve arkadaşları (2000)
Paslanmaz çelik	0.1 mm	Polipropilen	863.5 denye	140 tpm	–	Cheng ve arkadaşları (2002)
Paslanmaz çelik + Poliamid	0.1 mm	Polipropilen	983.4 denye	140 tpm	–	Cheng ve arkadaşları (2002)
Bakır + Poliamid	0.08 mm	Paslanmaz çelik	–	120-200 tpm	–	Chen ve arkadaşları (2004, 2007)
Bakır	0.09-0.1 mm	Pamuk	–	–	4 Ω /m	Perumalraj ve arkadaşları (2009)
Bakır + Polyester	0.024 mm	Polyester	75 denye	400 tpm	–	Inoue ve arkadaşları (1988)
Polimer özlü iplikler						
Öz	Çap	Kabuk	İncelik	Büküm	Direnç	Referans
Polipropilen kumaş kenarı	0.08 mm	Bakır	5651.1 denye	280 tpm	–	Chen ve arkadaşları (2004)
Polipropilen kumaş kenarı	0.08 mm	Paslanmaz çelik	5651.1 denye	280 tpm	–	Chen ve arkadaşları (2004)
Polyester ve diğerleri	0.002 inç	Nikel ve diğerleri	100-1500 denye	1-20 tpi	–	Rees (1988)
Polyester	35 mm	Paslanmaz çelik	600 denye	350 tpm	180 Ω /m	Watson (1999)
Spandex	20 mm	Bakır ve diğerleri	44 dtex	1700 tpm	–	Consoli ve arkadaşları (2004)
Spandex	50 mm	Bakır + Poliamid	1880 dtex	3600 tpm	–	Maier ve arkadaşları (2005)
Polimer-metal örgülü iplikler						
Öz	Çap	Kabuk	İncelik	Büküm	Direnç	Referans
Paslanmaz çelik	8 mm	Polipropilen	2.2 dtex	–	6 x10 ⁵ Ω /m	Safarova and Militky (2012)
Paslanmaz çelik	–	Naylon	1200 denye	–	–	Gerald (1975)

Bu tür ipliklerin elektriksel iletkenliği, ipliğin bileşiminde yer alan metal liflerinin ağırlık içeriğine bağlıdır. Çizelge 2.1’de hibrid polimer-metal ipliklere ait literatürde yer alan bazı çalışmalara ait bilgiler yer almaktadır [21].

2.1.4 İletken Polimer Kompozit/Kumaş Yapıları

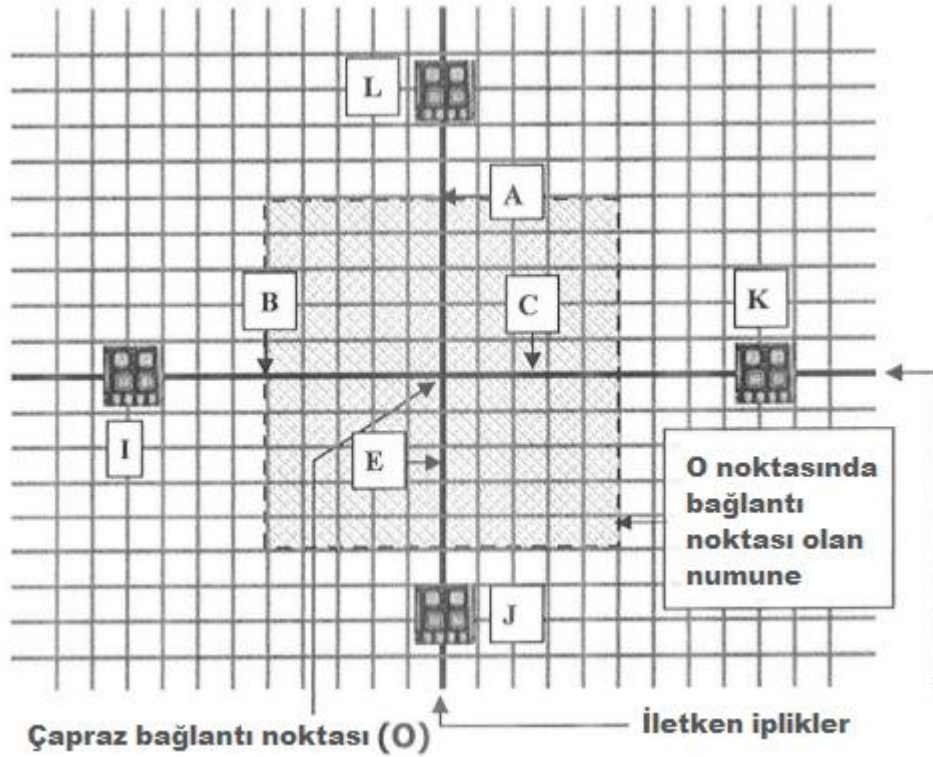
Sentetik kumaşlara iletkenlik kazandırmak için iletken tabakaların kumaş yüzeyine lamine edilmesi, iletken kaplama, iletken püskürtme gibi kaplama yöntemleri, iletken karbon siyahı, karbon nanotüp, metal elyaf, metal tozu gibi iletken dolgu maddelerinin eklenmesi veya iletken liflerin veya ipliklerin kumaşa dikiş, nakış, örme ve dokuma gibi yöntemler ile doğrudan yerleştirilmesi gibi teknikler kullanılmaktadır [22, 23]. İletken kumaşlar, elektromanyetik koruyucu ve antielektrostatik özelliklerinden dolayı savunma, elektrik ve elektronik endüstrilerindeki çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır [24].

2.1.4.1 Dokuma/Örme teknolojileri

Elektronik yetenekleri olan yeni nesil esnek/uyumlu küçük veya büyük, çok fonksiyonlu tekstil yapıları oluşturabilmek için malzeme, elektronik ve tekstil teknolojilerinin entegrasyonu gerekmektedir. Bu elektronik tekstil yapıları çevresel uyaranlara, “gömülü” elektronik cihazlara, kablolu veya kablosuz iletişime karşı duyu ve yanıt vermeyi içerebilmektedir. Kumaş bazlı elektrik devreleri, elektronik tekstillerin temelini oluşturmaktadır. Dokuma kumaşlar, yapısal düzenleri ve en çok istenen şekillerde bükülme ve uyum sağlama yeteneklerinden dolayı, esnek elektrik devreleri geliştirmek için önemli bir fırsat sunmaktadır. Dokuma kumaş tabanlı devreler, sivil ve askeri uygulamalar için çok işlevli ve interaktif tekstil ürünlerinde kullanılmaktadır [25].

Dokuma kumaş bazlı bir elektrik devresi, belirli bir kumaş tasarımına göre düzenlenmiş ve birbirine geçmiş olan ortogonal ipliklerin iletken ve iletken olmayan bir şebekesi olarak tanımlanabilir. Bu ağıdaki elektriksel sinyalleri taşımak, ağıdaki belirli bir noktadan diğerine sinyalleri iletmek için iletken iplikler kullanılır. Bu iletken iplikler dokuma kumaş içerisinde belirli bir elektrik devresini takip edecek şekilde tasarlanmaktadır. Kumaş içerisindeki iletken olmayan iplikler ise, iletken iplikler arasındaki uygun ayrımı sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde, elektriksel kumaş ağı, kumaş üzerinde farklı yerlere yerleştirilmiş cihazlar arasında kablolu bağlantıyı sağlamış olmaktadır. Dokuma kumaşların elektrik özellikleri ile imal edilmesi için,

geleneksel dokuma tipleri, farklı tipte iletken iplikler ve geleneksel polimerik iplikler kombinasyonu ile kullanılmaktadır. İletken iplikler, elektrik devreleri oluşturmak için dokuma yapılarında atkı veya çözgü şeklinde konumlandırılabilir [26]. Şekil 2.7’de elektronik cihazların I, J, K ve L noktalarında iletken ipliklere bağlandığı, O noktası çapraz bağlantısı olan bir dokuma kumaş bazlı elektrik devresi gösterilmektedir [25].



Şekil 2.7 : Dokuma kumaş bazlı elektrik devresi [25].

İletken iplikler ve kumaşlar, esneklik ve uyumun olduğu uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Elektromanyetik koruyucu ve elektrostatik yük dağılımı için kumaş üretmek amacıyla, iletken iplikler kullanılmaktadır. Ayrıca dokuma kumaşlar, elektrotlar ve batarya ayırıcılar olarak da geliştirilmektedir [25].

Teknolojideki sürekli ilerlemeler ve çok sayıda araştırmacının çabaları sayesinde, giyilebilir elektronik tekstiller konusunda iletken örme kumaşlar üzerinde araştırmalar son zamanlarda yoğunlaşmıştır. Çok sayıda araştırmacı, iletken örme kumaşlarda elektriksel direnç değişimini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda örme yapısının elektriksel özellikleri etkilediği ispatlanmıştır. Örgü dikiş kullanılarak yapılan düz örgü kumaşların direncini öngörmek için bir eşdeğer dirençli ağ geliştirilmiştir. Bu ağ sayesinde, elektrik doğrusal direnç (RL) ve elektriksel temas

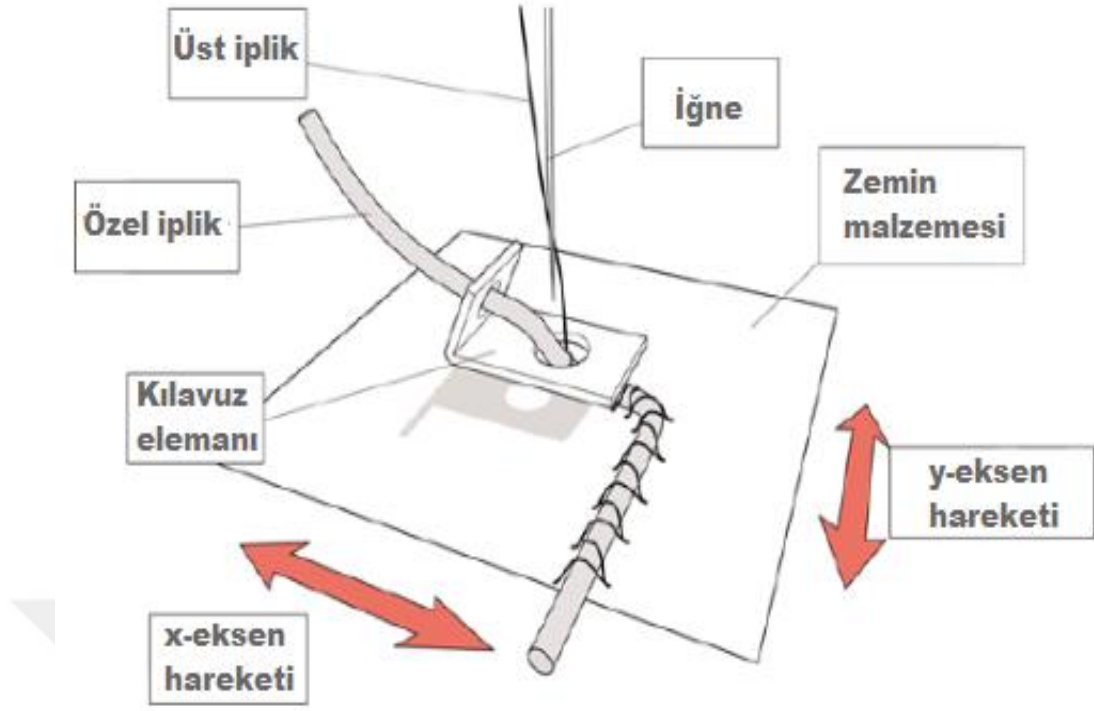
dirençlerin (RC) örme kumaşların toplam direncine katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Örme kumaş bazlı giyilebilir elektronik teknolojilerin tasarımı yapılırken direnç özellikleri ve farklı örme konfigürasyonları arasındaki ilişkinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Örülmüş yapılar, iletken örme kumaşların elektriksel direnç özelliklerini etkilemede çok önemli bir role sahiptir [27].

Örme kumaşın tabiatı sayesinde, tek bir kesiksiz iletken iplik kumaşın tamamı boyunca yer alabilir ve gerilim algılama uygulamaları için kullanılabilir. Örgü kumaşların elastik yapısı sayesinde, iletken ipliklerin ilmekleri birbiri ile temas edebilmektedir ve dirençte değişiklik olmasına neden olmaktadır [28].

2.1.4.2 Nakış teknikleri

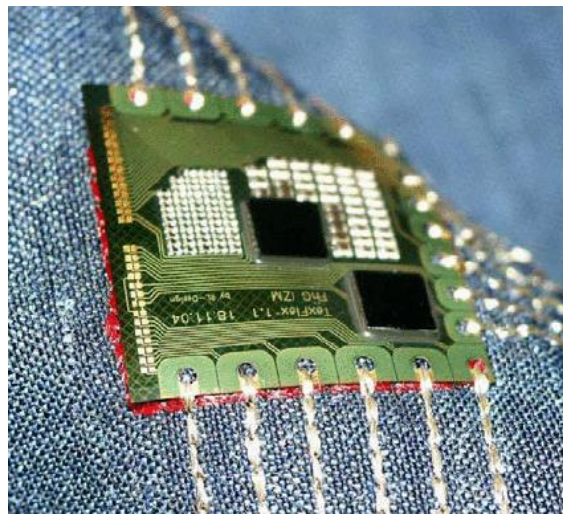
Nakış, geleneksel bir tekstil dekorasyon tekniğidir. Tekstil ve hazır giyim endüstrisindeki yenilik ve araştırmanın temel alanı olması nedeniyle, üç boyutlu hafif yapıların oluşturulması ve işlenmesi sayesinde benzersiz yeni fonksiyonel uygulamalarda nakış bulunmaktadır. Giyilebilir teknolojilerin gelişmesiyle beraber, teknik uygulamalarda da nakış kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin tıbbi tekstiller alanında, ince polimer malzemelerden üç boyutlu yapılar oluşturma fırsatından ötürü doku mühendisliği için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Nakış ile geliştirilen ürünlerin boyutsal kararlılığı da yüksektir. Bu özellikleri nedeniyle ekranlama, iletken ara bağlantılar, akıllı tekstil sensörleri ve arayüzleri gibi teknik uygulamalar için tercih edilmektedir. Teknik tekstiller alanında nakış teknolojisine dayanan en çok talep edilen işleme tekniği “özelleştirilmiş elyaf yerleştirme (TFP)” tekniğidir. Bu yöntem iplik veya kordonun, zemin üzerine tüm yönlerde yönlendirilebilmesini ve üç boyutlu yapılar oluşturulmasını sağlar. Şekil 2.8’de, bir ipliğin veya kordonun zemin kumaşına işlenmesi gösterilmektedir. Nakış makinesinin geliştirilmesi sayesinde ve teknik özelliklerinin spesifik teknik gerekliliklerine göre, iletken teller, metal teller, lamine polimer ve karbon elyaf gibi çok çeşitli malzeme kordon ve zemin kumaşı olarak kullanılabilir [29].

Nakış, akıllı tekstiller alanında en çok kullanılan işleme yöntemlerinden biridir ve giyilebilir ve esnek elektronik geliştirmeye olanak sağlamaktadır. Çoğunlukla iletken malzemelerin uygulanmasında yer aldığı için elektronik nakış veya e-büküm olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.8 : “Özelleştirilmiş Elyaf Yerleştirme (TFP)” prensibine göre nakış işlemi [29].

Nakış tekniğinde iletken iplikler, tekstil entegre elektronik cihazların birbirine bağlanması, işlemeli devreler ve ısıtma ızgaralarının geliştirilmesi için kullanılmaktadır. İletken iplik, esnek bir alt tabaka üzerinde metalize bir temas alanı ile işlenir ve bu şekilde elektriksel ve mekanik bir bağlantı oluşturulmaktadır (bkz. Şekil 2.9). Ayrıca bazı araştırma projelerinde nakış teknolojisi, manyetik rezonans sensörleri için tekstil anteni uygulamaları için de kullanılmaktadır [29, 30].



Şekil 2.9 : Nakış yoluyla iletken iplikle bağlanan esnek elektronik modül [30].

2.1.4.3 Kaynak teknolojisi

Kaynak yöntemi, temel olarak metalleri ve/veya termoplastik malzemeleri dikiş ipliği uygulamadan birleştirme tekniği olarak tanımlanabilmektedir. Dikiş makinelerinin farklı tipte tabakaları birleştirme konusunda kendi sınırları olduğu gibi, yapıştırma ve kaynaklama gibi dikişsiz teknikler de çok çeşitli malzemenin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Kaynak teknolojilerini konfeksiyon endüstrisinde kullanmak için dört farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunların ilki ısı ve basınç altında termoplastik yapıştırıcılar kullanarak kaynak yapmaktır. Diğer yöntemler ise ultrasonik ses dalgaları kullanarak ısı ve basınç kaynağı ile kaynak yapmak, yüksek frekanslı radyasyon kullanarak basınç ilavesiyle kaynak yapmak ve kızıl ötesi ışık radyasyonu kullanarak basınç ilavesiyle kaynak yapmaktır. Isı ve basınç altında yapılan kaynak yöntemi ve ultrasonik kaynak yöntemi, en yaygın olan yöntemlerdir [31].

Yapılan bir çalışmada, iletken ipliğin sıcak hava kaynak yöntemi ile kumaşlara katılmasıyla tekstil iletim hatlarının elde edilmesine yönelik potansiyel olasılıklar araştırılmıştır. %100 polyester kumaş, GoreTex® su geçirmez kaynak bandı ile yedi farklı iletken iplik kullanılarak tekstil iletim hatları oluşturulmuştur. Sıcak hava kaynak makinesinin kaynak sıcaklığı, basınç ve hız gibi farklı parametreleri incelenerek, bu parametrelerinin tekstil iletim hattının iletkenlik ve sinyal aktarma kabiliyeti üzerine etkileri gözlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda iletkenlik ve sinyal aktarma kabiliyetlerine dayanan sonuçlar, elektronik tekstil iletim hatlarının sıcak hava kaynağı teknolojisiyle üretilebileceğini göstermiştir. Ayrıca eğilme özelliklerine dayanan sonuçlar, kullanılan yedi iletken iplik için de kaynak parametreleri ne kadar düşük olursa, sıcak hava kaynaklı tekstil iletim hatlarının o kadar az sertleştiğini ortaya koymuştur [32].

2.1.4.4 Kaplama/Baskı teknolojileri

İletken kaplamalar, elektriksel olarak iletken tekstiller üretmek için liflerin, ipliklerin veya kumaşların yüzeyine uygulanabilir. Bu yöntem birçok elyaf türünde kullanım için uygundur ve yoğunluk, esneklik ve tutum gibi mevcut özellikleri önemli ölçüde değiştirmeden iyi iletkenlik sağlar. Yaygın tekstil kaplama işlemleri arasında, elektroliz kaplama, buharlaştırılmış biriktirme, püskürtme, tekstilin iletken bir polimer ile kaplanması ve iletken mürekkepler ile baskı bulunmaktadır [13].

Elektroliz kaplama, substratı bir elektroliz kaplama solüsyonuna batırarak, tekstil yüzeyinin tek tip bir metalle kaplanmasıdır. Metal iyonları ile çözelti içindeki indirgeyici ajan kimyasal reaksiyona girerek yüzey kaplama gerçekleşir. Kaplama için çeşitli metaller kullanılabilmesine karşın, en popüler tipler nikel ve bakırdır. Bu yöntemin dezavantajı ise, kaplama çözeltisinde kullanılan indirgeyici maddenin maliyetinin yüksek olmasıdır [13]. 2014 yılında Thilagavathi ve Natarajan tarafından yapılan bir çalışmada polyester kumaşlar, elektroliz bakır kaplama metoduyla elektriksel olarak iletken hale getirilmiştir. Bu kumaşlar, elektroensefalogram (EEG) ölçümü için tekstil elektrotlarını geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. SEM ve X-ışınları difraktometresi (XRD) aracılığıyla gerçekleşen yapısal çalışmalar, kumaş yapısının kristalin bölgesinin kaplamadan etkilenmediğini ve kumaşlar üzerinde çok düzgün bir bakır birikmesinin gözlemlenebildiğini ortaya koymuştur. Elde edilen sinyaller piyasada satılan elektrotlarla karşılaştırılmış ve sinyallerin benzer olduğu bulunmuştur [33].

Buhar biriktirme, vakum odasında iç basınç ile substratın kumaşa uygulanması esasına dayanır. Kaplama metali buharlaştırılır ve kumaş yüzeyinde yoğunlaştırılarak katı formda kaplama gerçekleşmiş olur. Bu yöntem başta alüminyum olmak üzere çeşitli metal türleri için uygulanabilir. Bu işlem, düşük iletkenlik değerleri için çok ince bir tabaka halinde veya yüksek iletkenlik değerleri için nispeten ince bir tabaka halinde uygulanabilir [13].

Püskürtme yönteminde ise vakum odasında kaplama malzemesi atomizer ile, püskürtülür ve kumaş yüzeyinde toplanır. Bu yöntem sayesinde düzenli, ince bir kaplama oluşturulur. Püskürtme yönteminin hızı, buhar biriktirme yönteminin hızının yaklaşık onda biri kadardır. Bu dezavantajına rağmen, bu yöntem halen askeri ve havacılık uygulamaları için kullanılmaktadır.

Baskı yöntemi, diğer kaplama yöntemlerine kıyasla uygun fiyatlı bir yöntemdir. İletken baskı yöntemi, mürekkebin kumaşa nüfuz etmesine bağlıdır. Çoğunlukla kumaşın iç yapısına dağılmaz ve yüzeyde kalır. Bu yöntemin başarısı, kumaş yüzeyindeki mikro gözenek oranı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, naylon tafta gibi ince sentetik filament ipliklerle dokunan yüksek yoğunluklu kumaşlarda düz ve pürüzsüz yüzeyler için bu teknik tercih edilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı, mürekkep tabakasında meydana gelen çatlama veya soyulmaya bağlı olarak baskının dayanma süresidir. İletken baskıların uzun ve verimli bir çalışma ömrünü garanti

etmek, elektriksel kısa devre ve mekanik hasarlara karşı korumak için koruyucu iletken olmayan dielektrik tabaka uygulanmalıdır. Bu tabaka genellikle silikon, poliüretan, epoksi veya akrilik reçineden yapılır.

Baskı yöntemi ile iletken mürekkebin kumaş yüzeyine basılması için gravür baskı, fleksografik baskı, silindir baskı ve serigrafi baskı gibi farklı yöntemler mevcuttur.

Gravür baskı teknolojisi, her mürekkep rengi için oyulmuş metal silindirlerin kullanılmasına dayanır. Fazla mürekkep, silindir yüzeyinden rakle yardımıyla uzaklaştırılır. Oyulmuş metal silindir tekstil yüzeyine temas ettiğinde, mürekkep tekstil yüzeyine aktarılır ve baskıyı oluşturur. Baskı rulolarının satın alınması ve muhafaza edilmesi sebebiyle bu baskı yöntemi maliyetlidir [13].

Fleksografik baskı yöntemi, silindirlerin bir kauçuk tabaka veya kompozit ile kaplandığı, deseni rölyefte taşıyan bir silindir baskı yöntemidir. Bu yöntem, hem makine hem de silindir maliyeti açısından gravür baskıdan ucuzdur. Bununla birlikte, tekstil malzemelerinde uygun renk derinliğini elde etmek için daha fazla mürekkep yüklemesi nedeniyle mürekkep maliyetleri önemli ölçüde daha yüksektir. Bu yöntem, genelde daha yavaştır ve karmaşık olmayan tasarımlar için tercih edilmektedir.

Serigrafi baskı yöntemi, macun benzeri malzemelerden desenli, kalın tabakalar üretme yeteneği nedeniyle elektrik ve elektronik üretimi için uygundur. Serigrafi baskıda, bir şablon işlemi, desenli bir kumaştan geçirilir ve genellikle sonrasında bir kurutma işlemi uygulanır. Bu yöntem, düz veya silindirik tekstil yüzeylerine uygulanmaktadır. Kumaşa elektriksel iletkenlik kazandırmak için pek çok araştırmacı bu yöntemi kullanmıştır ve mürekkep viskozitesi, gözenek sayısı ve rakle sertliğinin basılabilirliği etkileyen bazı faktörler olduğunu tespit etmişlerdir. Daha yüksek viskozite, mürekkebin tekstil yüzeyine yayılmasını önlemektedir ve kalın mürekkep tabakası oluşmasına neden olmaktadır. Serigrafik baskı yöntemi, inorganik malzemelerden (örneğin devre kartları ve antenler için) iletken tabakalar üretebilmeyi sağlamaktadır. Genel olarak 100 mikrondan daha düşük çözünürlüğe ve yaklaşık 50 m² / saat üretim hızına sahiptir. İşlem koşulları ve malzemenin optimize edilmesiyle, baskının çözünürlüğü 30 mikronlara kadar düşebilmektedir [34].

Elektronik tekstiller, iletken mürekkepler kullanılarak da üretilebilmektedir. İletken mürekkeplerin çoğu su bazlıdır. Su, mürekkebin ana bileşimini oluşturmaktadır ve

kirletici maddeleri sınırlamak için mümkün olduğu kadar saf olmalıdır. İletken mürekkepler, elektriksel olarak aktif desenler oluşturmak için çeşitli teknolojilerle tekstil ürünlerine basılabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kullanılacak mürekkep ile kullanılacak olan teknoloji için viskozite ve yüzey geriliminin birbirlerine uygun olmasıdır. Tabaka bazlı mürekkep püskürtmeli ve serigrafi baskı, düşük hacimli ve yüksek hassasiyetli çalışmalar için en uygun yöntemdir [13, 34].

Mürekkep püskürtmeli sistem esnek ve çok yönlüdür. Üretim hızı yaklaşık 100 m²/saattir ve yaklaşık 50 mikron çözünürlük sunmaktadır. Organik yarı iletkenler gibi düşük viskoziteli, çözünebilen materyaller için uygundur. Organik dielektrikler gibi yüksek viskoziteli malzemeler ve inorganik metal mürekkepler gibi dağılmış parçacıklar için kullanıldığında, püskürtme memelerinde tıkanmaya bağlı zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Çünkü mürekkep damlacık yoluyla biriktiğinden, kalınlık ve dağılım homojenliğinde azalma söz konusudur. Aynı zamanda çok sayıda nozulun kullanılması ve substratın önceden hazırlanması, çözünürlüğün ve verimliliği iyileşmesine olanak sağlamaktadır.

İletken mürekkep, mürekkep püskürtmeli baskı için kullanılabilmesi için, yüksek elektrik iletkenliğine ve oksidasyona karşı dirence sahip olmalıdır. Tekstil yüzeyine iyi yapışma özelliğine sahip olmalıdır. Baskı kafası ile mürekkep arasında uygun viskozite ve yüzey gerilimi olması istenmektedir [34].

Gümüşün mükemmel elektriksel iletkenliği ve antimikrobiyal etkileri dolayısıyla iletken mürekkepler gümüş tozlarından yapılmaktadır. Son zamanlarda, iletken mürekkeplerin hazırlanmasında gümüş nanopartiküllerin kullanılması, elementlerin boyutlarını azaltarak elektronik elemanların minyatürleşmesi olasılığını arttırmak için talep edilmektedir. Metal nanopartikül bazlı mürekkebin, baskı sonrasında parçacıklar arasında sürekli bağlantı oluşturabilmesi ve elektriksel perkolasyon elde etmek için sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Sinterleme işlemi, partiküllerin katı ve sıvı arasındaki faz değişiminden ziyade, yüzey difüzyon fenomenlerini içeren, dökme metal erime noktasının altındaki sıcaklıklarda bir araya getirme işlemidir. Örneğin altın nanopartikül (1.5 nm çapında) bazlı mürekkepler, erime sıcaklığının deneysel olarak 380 °C kadar düşük olduğu, gümüş nanopartikül (15 ile 20 nm çapında) bazlı mürekkepler, 180 °C sıcaklığa kadar bir sinterleme teknesinde elde edilebilmektedir [13, 34].

2.2 Elektronik Tekstillerin Kullanım Alanları

Günlük uğraşlarımızı ve etkileşimlerimizi kolaylaştıran elektronikler, her geçen gün etrafımızdaki tekstil ürünlerine entegre edilebilir olmaktadır. Moda ve endüstriyel giyim, konut ve iç yerleşim alanları, askeri, medikal ve endüstriyel tekstil pazarlarında elektronik tekstillerin payı artmaktadır. Günümüzde etkileşimli elektronik tekstiler, iletişim, eğlence, sağlık ve güvenlik amacıyla geliştirilmekte ve birçok geleneksel tekstil uygulamalarında yer bulmaktadır [35].

2.2.1 Askeri amaçlı kullanılan elektronik tekstiller

Elektronik tekstillerin işlevselliği bakımından askeri amaçlı olarak kullanımı mevcuttur. Performans, hafiflik, koruma gibi özellikleri yanı sıra, iletişim, uydu üzerinden takip edilebilme gibi birçok teknolojik özellik elektronik tekstillerin askeri alanda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kamuflaj giysileri ve görünmezlik kalkanı uygulamaları bunlara örnek olarak gösterilebilir.

2004 yılında Amerikan ordusu için U.S. Army Natick Soldier Center tarafından geliştirilen “Future Force Warrior” isimli askeri üniforma, yıllar süren çalışmalar sonucunda askeri kıyafetlerin hangi özellikleri içereceğini, bu alandaki çalışmaların hangi konulara odaklandığını gösteren bir prototiptir (bkz. Şekil 2.10). Proje kapsamında tekstil tabanlı çözümlere başvurularak, askerin taşıdığı ağırlığın yaklaşık 54 kilogramdan 18 kilografa indirilerek hareket kabiliyeti, etkinlik ve hayatta kalabilme becerilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Balistik, kesikler ve aşınma, biyokimyasal tehditler ve aşırı hava koşulları gibi sorunlara tekstil tabanlı çözümler sunarken, yakın haberleşme ağı sistemlerinde iyileştirmeler, durumsal farkındalık arttırma ve görsel ya da elektromanyetik imza gizleme gibi elektronik işlevler ekleyerek giysinin etkinliği arttırılmaktadır. Bu askeri üniformada, askerin fizyolojik durumunu izleyebilmek ve acil durum için entegre sensör sistemleri bulunmaktadır. Elektronik tekstil uygulamaları sayesinde üniforma hafiflik, daha az hacim kaplama, çok işlevsellik gibi özellikler kazanmıştır [36].

Elektronik tekstiller sayesinde renk değiştirebilen kumaşlar üretmek mümkün kılınmıştır. Kumaş içine tutturulmuş iletken elyaf vasıtasıyla sıcaklık değiştiğinde termokromatik mürekkeplerin rengi değişebilmektedir. Bu özellik sayesinde, dış ortamdaki baskın renklere devamlı adaptasyon sağlanıp, kullanıcının görülmemesi

sağlanmaktadır. Renk değıştiren kamuflej giysisi sayesinde asker kıyafet değıştirmeden bulunduğu ortama uyum sağlayabilmektedir [36].



Şekil 2.10 : “Future Force Warrior” isimli askeri üniforma [36].

2.2.2 Uzay çalışmalarında kullanılan elektronik tekstiller

Elektronik tekstiller, uzay aracında kullanılan elektronik algılama, etkileşim, insan kaynaklarını hesaplama gibi birçok giyilebilir teknolojiye ait uygulamaya sahiptir. Bu alanda başta Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) olmak üzere birçok teknoloji merkezi, uzay kıyafetleri geliştirmek için projeler yürütmektedir.

E-SEWT (Electronictextile System for the Evaluation of Wearable Technology) projesi, Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) için yeniden yapılandırılabilir akıllı bir giysinin biçimi ve işleviyle ilgili tasarım odaklı bir çalışmadır. Uzay çalışmaları için geliştirilen özel giysi, bir ana ünite ve çıkarılabilir sensör bileşenlerinden oluşmaktadır (bkz. Şekil 2.11). Bu bileşenler, kullanıcı tarafından belirli bir görevi tamamlanmasını veya kişisel tercihlere göre ihtiyaçlarını karşılamak üzere uyarlanmasını sağlamaktadır. Yeniden yapılandırılabilir çeşitli modüler üniteler kullanıcı ve görevler arasında kişiselleştirme, parçaların değıştirilmesinde kolaylık ve üretimde esneklik sağlar. Bu projedeki tasarımın odak noktası, en uygun veri akışını korurken, hareketlilik, ergonomi ve kullanım kolaylığı sağlamaktır.



Şekil 2.11 : E-SEWT projesinde sesli, görsel ve dokunsal uyarı sistemlerinin tekstil yapısına yerleşimi [37].

Geliştirilen elektronik tekstil yapısı sayesinde, ses aktif hale getirilebilerek hareket esnasında ellerin serbest kalmasına olanak sunulmaktadır. Biyo-medikal sensörler sayesinde hem araştırma için veri toplamak hem de astronotların sağlığını uzaktan izlemek mümkün olmaktadır. CO₂ sensörleri çevreyi izleyebilmekte ve güvensiz koşullar olduğunda alarm sistemi devreye girmektedir. E-SEWT projesi, astronotların Uluslararası Uzay İstasyonu içinde günlük yaşamını daha fazla araştırmak ve mikrogravite ortamının yaşam üzerine etkilerini anlamak için önemlidir [37].

2.2.3 İş giysilerinde kullanılan elektronik tekstiller

Özellikle güvenlik, konfor gibi özelliklerin ön planda olduğu iş giysileri, elektronik aksamaların entegrasyonu ile işlevsel hale getirilebilmektedir. Elektronik tekstiller, iş giysileri ürünleri için büyük bir potansiyel teşkil etmektedir.

Danimarka menşeli VIKING firması, kumaşa termal sensör entegre ederek, akıllı itfaiyeci ceketleri üretmektedir. National Fire Protection Association (NFPA) tarafından yangın söndürme ekipmanları standartları göz önüne alınarak tasarlanan bu ceketler, termal sensör teknolojisi ile eylem halindeki itfaiyecilerin kritik seviyedeki sıcaklık değerlerini göstererek itfaiye personeline müdahale edebilme olanağı sağlamaktır. Termal sensörler, ortam sıcaklığını ve kullanıcının iç sıcaklığını izleyebilmek için kumaş katmanlarının iç ve dış katmanlarına entegre edilmiştir. Elde

edilen verileri diğer personellere aktarabilmek için kolda ve sırtta su geçirmez plastik ile kaplanmış iki LED yüzey bulunmaktadır. Şekil 2.12’de VIKING tarafından geliştirilmiş akıllı itfaiyeci ceketi gösterilmektedir.



Şekil 2.12 : VIKING firması tarafından üretilmiş termal sensör entegre edilmiş itfaiyeci ceketi [36].

Yangın söndürme ekipmanlarının kullanımı göz önüne alınarak tasarlanan itfaiyeci ceketinde üst sol omuzdaki LED yüzey, ekip çalışanlarına itfaiye personelinin potansiyel kritik durumunu göstermektedir. Sol kolun alt kısmında yer alan LED yüzeyi ise iç ve dış ortamın ısı seviyelerini göstermektedir. Giysinin iç katmanında pil ve sensörleri ve LED yüzeyleri aktif duruma getirmeyi sağlayan küçük bir kutu bulunmaktadır. Dış ortam sıcaklığı 250 °C’ye ulaştığında LED yüzeydeki dış çember yavaş yavaş yanıp sönerken, ortam sıcaklığı 350 °C ve üzerine ulaştığında hızla yanıp sönmektedir. Benzer şekilde giysinin iç sıcaklığı 50 °C’ye ulaştığında LED yüzeyinde uzun hat yanıp sönmeye başlarken, 79 °C sıcaklığa ulaşıldığında hızla yanıp sönerik kritik durum olduğunu belirtmektedir [36].

ProeTEX projesi kapsamında geliştirilen dış kıyafet ile acil durum çalışanlarının izlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca acil durum çalışanlarının fizyolojik koşullarını, hareketlerini ve faaliyetlerini, konumlarını ve ortam koşullarını izlemek için giyilebilir algılama ve iletişim sistemleri barındırmaktadır (bkz. Şekil 2.13).

Elektronik tekstiller sayesinde acil durum çalışanlarının güvenliği ve verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır [38].



Şekil 2.13 : Sivil koruma için kıyafet [38].

2.2.4 Sağlık ürünlerinde kullanılan elektronik tekstiller

Elektronik tekstiller, entegre edilebilen sensörler sayesinde medikal uygulamalarda geniş yer tutmaktadır. Nefes ölçümü, kalp aktivitesi, kas aktivitesi, kandaki oksijen doygunluğu, kan basıncı, elektrodermal aktivite gibi birçok fizyolojik ölçüm, sensörler sayesinde tespit edilebilmektedir. Çizelge 2.2’de medikal alanda kullanılan elektronik tekstiller ile ölçülebilen fizyolojik değerler belirtilmiştir.

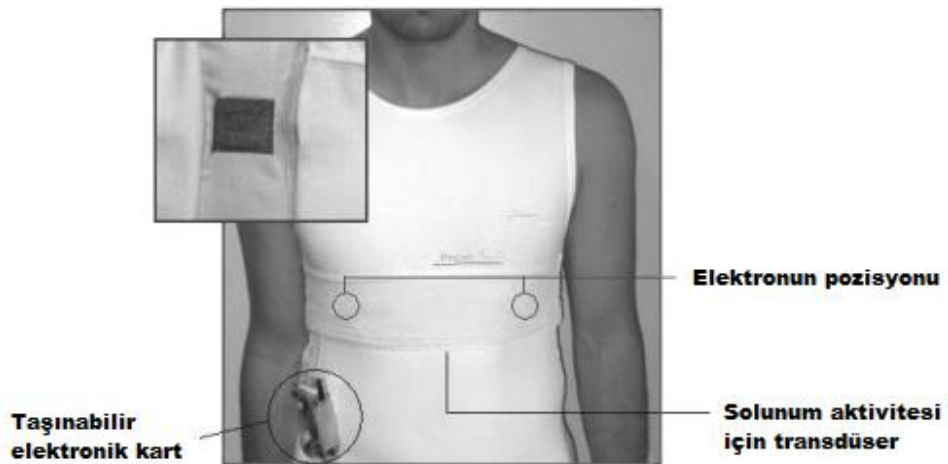
Çizelge 2.2 : Sensörler aracılığıyla ölçülebilen fizyolojik değerler [36].

Fizyolojik Ölçümler	Tekstile Entegre Sensör Çeşitleri	Sinyal Kaynakları	Tipik Sensör Yerleşimleri
Nefes Ölçümü	Piezo dirençli esneme sensörleri, endükleyici pletismografi, empedans pletismografi, fiber lifler	Nefes alışverişi esnasında göğüs kafesindeki genleşme ve büzülme	Göğüs-abdominal gölgesi
Kalp Aktivitesi	Dokuma/örme elektrotlar	Kalpdeki elektriksel aktiviteler	Göğüs bölgesi
Kas Aktivitesi	Dokuma/örme elektrotlar	Kaslardaki elektriksel aktiviteler	İlgili kas üzerindeki deri yüzeyi

Çizelge 2.2 (devam) : Sensörler aracılığıyla ölçülebilen fizyolojik değerler [36].

Fizyolojik Ölçümler	Tekstile Entegre Sensör Çeşitleri	Sinyal Kaynakları	Tipik Sensör Yerleşimleri
Kandaki Oksijen Doygunluğu	Optik algı bileşenleri, plastik, optik lifler	Kandaki hemoglobinlerde ışık Emilimi	Parmak ucu, kulak memesi gibi kan perfüzyonuna uygun bölgeler
Kan Basıncı	Fotopletismografik (PPG) sinyal özellikleri	Arteriyel basınç, nabız atışları	Parmak, bilek ve kulak memesi
Vücut Hareket Pozisyonu	Piezo dirençli gerilme/basınç sensörleri, ivmeölçerler, caryoskoplar, optik lif sensörler	Vücut hareketleri	Analiz edilebilen harekete tabi bölgeler
Elektrodermal Aktivite	Dokuma elektrotlar	Derideki elektriksel iletkenlik	Parmak uçları
Vücut Sıvıları Kompozisyonu	Elektrokimyasal sensörler, pH, renkölçer kumaşlar		Sıvı örnekleme sistemi gerekleri

MagIC sistemi, Şekil 2.14’te gösterildiği gibi sensörlü yelek ve taşınabilir elektronik karttan oluşmaktadır. Ağırlıklı olarak pamuk ve elastandan oluşan bu yelek, iletken liflerle yapılan iki dokuma elektrot içermektedir ve bu elektrotlardan elektrokardiyografi yapılabilmektedir. Tekstil elektrotları ve göğüs kafesi arasındaki temas, giysinin elastik özellikleri ile sağlanmaktadır. Yelek ayrıca göğüs kafesi hacmindeki değişikliklerin değerlendirilmesi yoluyla solunum frekansın ölçülmesini sağlayan tekstil bazlı bir transdüser içermektedir. Sistem ayrıca egzersiz sırasında veya sonrasında, kardiyovasküler durumu değerlendirme imkanı da sunmaktadır [39].



Şekil 2.14 : Tekstil elektrot detaylarıyla MagIC sistemi [39].

2.2.5 Spor ürünlerinde kullanılan elektronik tekstiller

İç ve dış mekan spor aktivitelerindeki gelişmeler ve çeşitliliğin artması, bu alanda geliştirilen ürünlerin de çeşitliliğinde artışa sebep olmaktadır. Yeni teknolojiler, kullanıcıların talepleri ve ihtiyaçları serbest zaman aktivitelerinde akıllı tekstil ürünlerinin gelişmesine olanak sağlamıştır.

Global Konumlandırma Sistemi (GPS) tarafından yönlendirilen duyuşal cihazlarla entegre edilen tekstil ürünleri, kullanıcıların istedikleri zaman ve her türlü atmosferik koşulda tam konumunu tespit etmektedir. Özellikle kayak kıyafetleri gibi GPS entegrasyonu sağlanmış elektronik tekstiller, kullanıcının yerini hızla tespit etmeyi sağlamaktadır. Ayrıca kayak kıyafetlerinde kullanılan elektronik üniteler, giysinin ısınmasını sağlayarak güvenliğini arttırabilmektedir. (bkz. Şekil 2.15a) Bu kıyafetler, GPS sayesinde, hayatı unsurların tesis dışı izlenmesini kolaylaştırarak, acil durum personeli için ek güvenlik sağlayabilmektedir.



Şekil 2.15 : Spor ürünlerinde kullanılan bazı elektronik kıyafetler.

Yüksek performanslı elektronik spor giysileri, spor aktiviteleri veya egzersiz sırasında kullanıcının performansını izlemeyi sağlamaktadır. Şekil 2.15b'deki giysi, kullanıcının nabız, tansiyon, zaman, mesafe, hız ve kalori değerlerini izlemek ve görüntülemek için kumaşa entegre edilmiş sensörlere sahiptir. Ayrıca bu tür sensörler, tenis veya golf gibi sporlarla ilgilenen sporcuların kol hareketleri kayıtlamak ve egzersiz rejimlerini geliştirmek için kullanılabilir [35].

Adidas firması tarafından sensörler aracılığıyla kalp ritmi ölçümü, hız, mesafe gibi performans ölçümlerinin kaydeden ve analiz eden “adiStar Fusion” ürünü tasarlanmıştır [36]. Bu ürün Şekil 2.16’de gösterilmektedir.



Şekil 2.16 : Performans ölçümü yapabilen “adiStar Fusion Sistemi [36]”.



3. ISI VE ALEV KORUMASI

İnsan güvenliği, sanayileşme ile birlikte önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bunun beraberinde endüstriyel tekstil, liflerdeki, kumaşlardaki ve koruyucu giysilerdeki bir dizi yeni gelişme ile endüstrinin büyüyen bir bölümü olarak yer almıştır. Özellikle kaplama ve imalat teknolojisine yönelik zorlukların giderilmesiyle, toksik olmayan, çevre dostu ürünlerin üretimi sağlanmıştır. 1990’larda ısı dayanıklılığı konusundaki gelişimler ile bazı önemli yenilikler sonucunda itfaiyeciler, askeri personeller, hava ve uzay personeli ve tehlikeli koşullara maruz kalan sanayi işçileri için yüksek ısıya dayanıklı ve alev geciktirici özellikte kıyafetler geliştirilebilmiştir.

Isı ve alev koruma seviyesi, son kullanıcının maruz kalacağı koşulların gereksinimine göre değişiklik göstermektedir. Bu koşullar, günlük kullanım esnasında kullanıcının orta seviyede zaman zaman radyan ısıya maruz kalacağı koşullardan, itfaiye personellerinde olduğu gibi doğrudan aleve ve aşırı derecede radyan ve konvektif ısıya maruz kalacağı koşullara kadar farklılık göstermektedir [40].

Koruyucu kıyafetler, vücut ve çevre arasındaki ısı ve nem aktarımı için bariyer görevi görür. Bu nedenle, koruyucu giysilerin tasarımında termal koruma ile termal transfer ve su-buharı geçirgenliğini içeren termal konfor arasında denge gerekmektedir. Koruma ile konfor dengesini optimize edebilmek amacıyla devam eden çalışmalar mevcuttur [40].

3.1 Yanıcılığa Sebep Olan Faktörler

Tutuşma kolaylığı, yanma oranı ve ısı yayılım oranı, yanıcılığa sebep olan en önemli özelliklerdir. Bunun yanı sıra sentetik kumaşların erime ve büzülme karakteristiği, yanma sırasında duman ve zehirli gazların yayılması termal koruma seviyesini etkileyen diğer faktörlerdir [40].

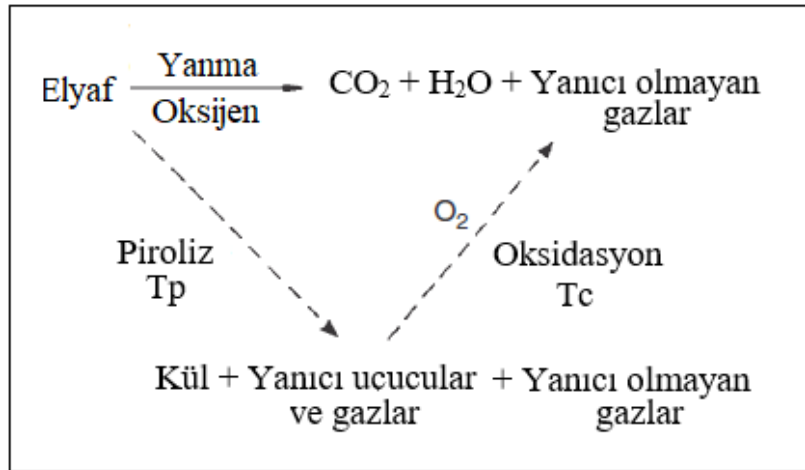
Alev koruyucu giysi seçerken ve tasarlarken, aşağıdaki noktalar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Tekstil liflerinin termal veya yanma davranışı
- Kumaş yapısı ve giysi şeklinin yanma davranışına etkisi
- Toksik olmayan, dumansız alev geciktirici katkı maddelerinin veya yüzeylerin seçimi
- Ateşleme kaynağının yoğunluğu
- Oksijen kaynağı.

3.2 Liflerin Termal Davranışı

Tekstil malzemesi ısıya maruz kaldığında fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelebilir. Termoplastik liflerde, fiziksel değişimler camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) civarında meydana gelirken, kimyasal değişiklikler termal bozunmanın meydana geldiği piroliz sıcaklıklarında (T_p) gerçekleşir. Piroliz sıcaklığına ulaşıldığında makromoleküler parçalanma başlamaktadır ve yanma sıcaklığına ulaşılmasıyla beraber pirolizi takip eden oksitlenme ile yanma işlemi başlamaktadır. Termoset malzemelerde ise makromoleküler zincirlerin arasında kovalent bağlar bulunduğu için erime sıcaklıkları termoplastik malzemelere göre daha yüksektir [40, 41].

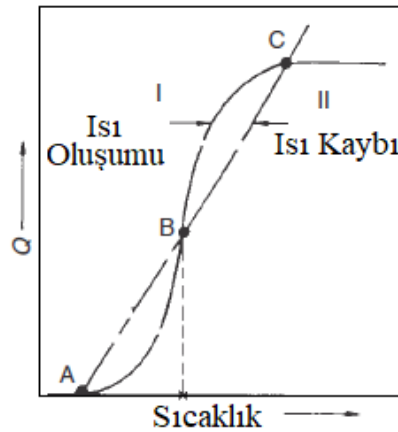
Yanma işlemi, gazlaştırma, ateşleme ve alev yayılmasına yol açan ısınmayı ve ayrışmayı içeren bir süreçtir. Alevin kendiliğinden devam edebilmesi için bir yakıt kaynağı ve yakıtı gazlaştırmak için oksijen ve ısı gerekmektedir. Bir lif, T_p sıcaklığına kadar ısıtıldığında pirolize olur (bkz. Şekil 3.1). Üretilen yanıcı katı ve yanıcı olan uçucu sıvı ve gazlar, yanma işleminin başlaması için gerekli olan yakıt görevini görmektedir [40, 41].



Şekil 3.1 : Liflerin yanma şematığı [40].

Piroliz sonrası sıcaklık, yanma sıcaklığına (T_c) veya daha yüksek sıcaklıklara ulaşırsa, yanıcı piroliz ürünleri karbon dioksit, su ve yanıcı olmayan gazlara dönüşüncüye kadar oksijen eşliğinde yanar. Bir tekstil malzemesi tutuşturulduğunda ise harici kaynaktan gelen ısı malzemenin sıcaklığını degradasyona uğrayıncaya kadar yükseltir. Sıcaklıktaki bu ilk yükselme hızı, lifin özgül ısısına, termal iletkenliğine ve aynı zamanda füzyonun gizli erime sıcaklığına (eriyebilen lifler için) ve piroliz ısısına bağlıdır [40].

Yangın kazası olabilmesi için malzeme tutuşma sıcaklığına ulaşacak kadar ısıtılmalıdır. Şekil 3.2’de ısı oluşumu ve ısı kaybı, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Isı kaybının yakma bölgesi ile çevre arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olduğu belirtilmiş ve yaklaşık olarak bir düz çizgi ile gösterilmiştir. Isı oluşumu ile ısı kaybı arasındaki denge I ve II’nin kesişme noktalarında gerçekleşir. A noktası ortam sıcaklığını, C noktası ise sabit sıcaklığı temsil etmektedir. A ve C noktası kararlı iken B noktası sabit değildir. B noktasının solunda, ısı kaybı ısı oluşumunu aşar; sağında ise tersi durum söz konusudur. Bu nedenle, B noktasına karşılık gelen sıcaklık tutuşma sıcaklığıdır. Aynı zamanda B noktasındaki sıcaklık, malzemenin kendi kendini söndürme sıcaklığı olarak da kabul edilir. Çünkü B noktasının altındaki sıcaklıklarda ısı kaybı ısı oluşumunu aşar ve tutuşma gerçekleşmez [42].

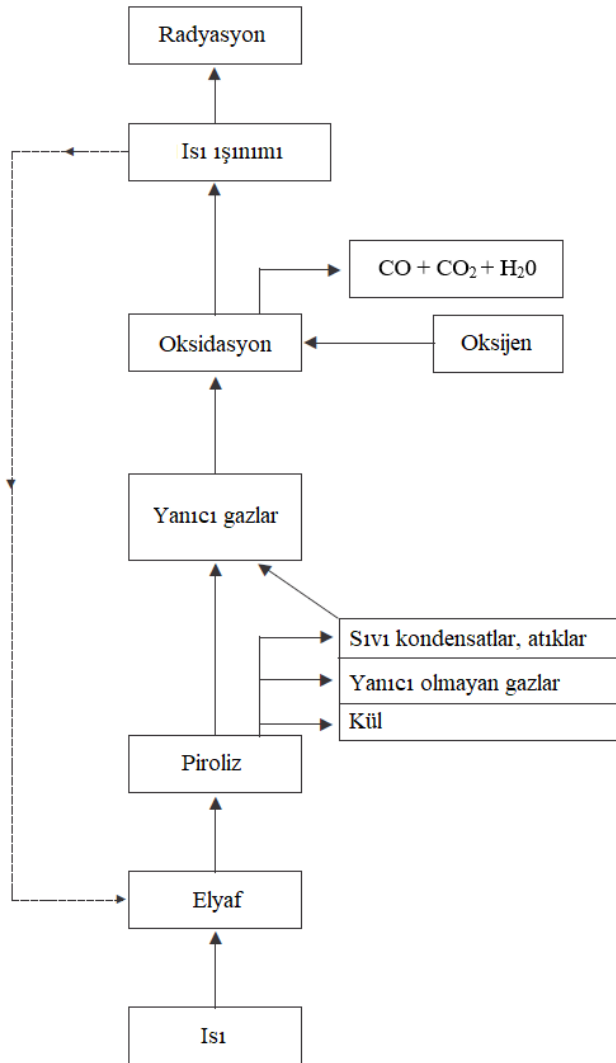


Şekil 3.2 : Alev stabilite diyagramı [42].

Bir malzemenin ısı ve aleve karşı koruyucu giyside kullanabilmesi için alevli bir kaynak altında tutuşma için düşük bir eğilime sahip olması istenir. Tutuşma gerçekleştiği durumda ise düşük ısı çıkışı ile yavaş ateş yayılması gerekmektedir. Poliamid 6, polyester ve polipropilen gibi termoplastik lifler bu gereksinimi

karşılarlar çünkü alevden kaçarlar ve eğer yanarlarsa yavaşça yayılan bir alev oluştururlar. Ayrıca ısıya karşı koruma sağlayan kumaşlarda yüksek boyutsal stabilite şartı gerekmektedir. Kumaş ısıya maruz kaldığında ne küçülmelidir ne de erimelidir. Termoplastik liflerde ısıya maruz kaldığında boyutsal stabilitenin korunamaması sorunundan ötürü aramid elyaf (örneğin Nomex, DuPont), alev geciktirici pamuk veya yün, kısmen oksitlenmiş akrilik elyaflar gibi yüksek performanslı lifler geliştirilmiştir [40, 41].

Dekompozisyonun durumu ve dekompozisyon ürünlerinin (katı, sıvı ve gaz halindeki ürünlerin) doğası elyafın kimyasına, ürüne uygulanan kaplama ve bitim işlemlerine bağlıdır. Bu tür parçalanma ürünleri yanıcı nitelikteyse, atmosferik oksijenin varlığı, alevler olsun veya olmasın, ateşlemeye ve malzemenin tamamen tahrip olmasına neden olabilir (bkz. Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Liflerin geri besleme sistemi ile yanma mekanizması [40].

Elyaf özelliklerine ek olarak, çeşitli giysi karakteristikleri de termal korumayı etkilemektedir. Belli bir kumaş kalınlığı için, yoğunluk ne kadar düşükse, termal direnç de o kadar fazladır. Bu durum pamuk, yün ve benzeri gibi ısıtma üzerinde bir yalıtıcı kömür oluşturan lifler için de geçerlidir. Bundan dolayı, pamuk, yün gibi erimeyen liflerden üretilen kalın kumaşlar, aynı kalınlıkta üretilen termoplastik elyafli kumaşlardan daha iyi termal koruma sağlar. Öte yandan, termoplastik elyafli kumaşlar ciddi yanıklar üretebilir.

Bir malzemenin güç tutuşurluğu, formül 3.1’de belirtildiği gibi o maddenin oksijen indeksi ile açıklanır:

$$(OI) = (OI)_m + f(FR) \quad (3.1)$$

Burada $(OI)_m$, saf malzemenin oksijen indeksinin $f(FR)$ ise güç tutuşurluğun fonksiyonu olarak yer almaktadır. Malzemenin yanmaya devam edebilmesi için ortamdaki oksijen konsantrasyonu önemlidir. LOI değeri, oksijen-azot atmosferinde değişen oksijen konsantrasyonu ile malzemenin yanmaya devam edebilmesi için gerekli minimum oksijen konsantrasyonun bulunduğu bir test metodudur ve EN ISO 4589-2’de standartlaştırılmıştır. Eğer ortamdaki oksijen konsantrasyonu malzemenin LOI değerinden büyükse, yanma devam etmektedir; ortamdaki oksijen konsantrasyonu LOI değerinden küçükse, yanma sona erecektir. LOI değerinin bulunması için formül 3.2’de belirtilen formül kullanılmaktadır:

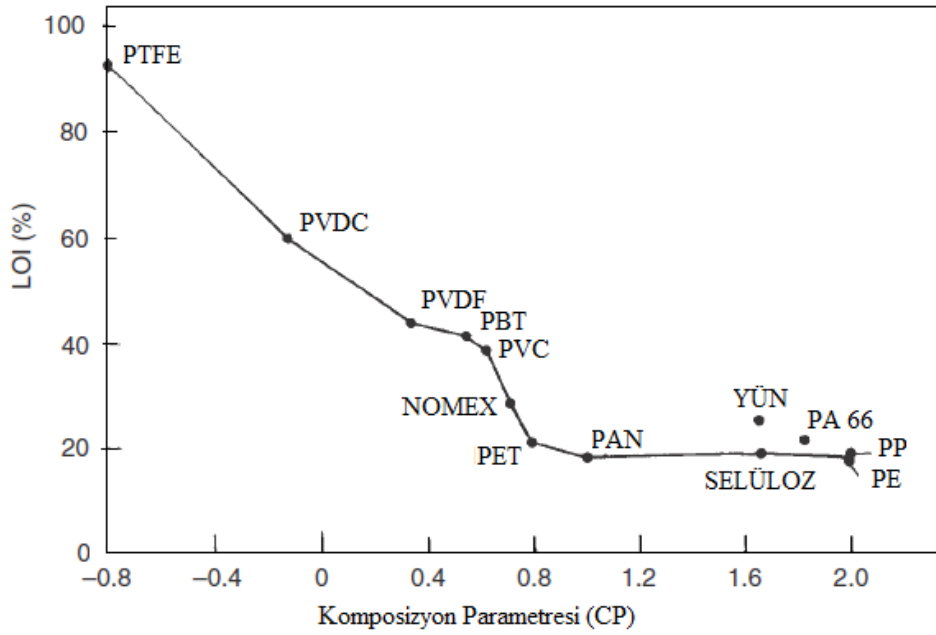
$$LOI = (Q(O_2) / [Q(O_2) + Q(N_2)]) \quad (3.2)$$

Burada $Q(O_2)$ ifadesi, malzeme tutuştuktan sonra yanmaya devam eden oksijen-azot atmosferindeki minimum oksijenin hacimsel konsantrasyonu belirtmektedir [40, 41].

Polimerin LOI değeri ile kimyasal bileşimi arasında iyi bir ilişki mevcuttur. Van Krevelen’in çalışmasına göre, hidrojen ve halojen içeriğinin birleşik etkisini tanımlayan kompozisyon parametresi (CP), alev geciktirici materyaller için 1’den daha az olmalıdır. Kompozisyon parametresinin değeri formül 3.3 kullanılarak bulunmaktadır:

$$CP = (H/C) - 0.65 (F/C)^{1/3} - 1.1 (Cl /C) - x(Br/C)^{1/3} \quad (3.3)$$

Burada (H / C), (F / C) ve (Cl / C), malzemenin bileşimindeki atomik oranları belirtmektedir ve x katsayı değerinin 1.6 civarında olduğu öngörülmektedir. Şekil 3.4, bazı tekstil materyalleri için CP ve LOI arasındaki korelasyonu göstermektedir. Grafiğe göre CP değeri 1'den büyük olduğu durumda, LOI değeri yaklaşık %17.5 civarındadır. Pamuk, yün ve naylon bu bölgede yer almaktadır. CP değerinin 1'den küçük olduğu durumda ise LOI değerinin %42.5 ile %60 arasında yer aldığı gözükmemektedir [40, 43].



Şekil 3.4 : Oksijen indeksi ile elementel kompozisyon arasındaki korelasyon [43].

Çizelge 3.1’de bazı liflerin termal özellikleri ve LOI değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 : Bazı liflerin ısı geçiş sıcaklıkları [40].

Lif	T _g (°C) Camsı Geçiş Sıcaklığı	T _m (°C) Erime Sıcaklığı	T _p (°C) Piroliz Sıcaklığı	T _c (°C) Yanma Sıcaklığı	LOI (%)
Yün	-	-	245	600	25
Pamuk	-	-	350	350	18.Nis
Viskon	-	-	350	420	18,9
Poliamid 6	50	215	431	450	20-21,5
Poliamid 6.6	50	265	403	530	20-21
Polyester	80-90	255	420-477	480	20-21,5
Akrilik	100	>320	290	>250	18,2
Polipropilen	-20	165	469	550	18,6
Modakril	<80	>240	273	690	29-30

Çizelge 3.1 (devam) : Bazı liflerin ısı geçiş sıcaklıkları [40].

Lif	T _g (°C) Camsı Geçiş Sıcaklığı	T _m (°C) Erime Sıcaklığı	T _p (°C) Piroliz Sıcaklığı	T _c (°C) Yanma Sıcaklığı	LOI (%)
PVC	<80	>180	>180	450	37-39
PTFE	126	>327	400	560	95
Nomex	275	375	310	500	28,5-30
Kevlar	340	560	590	>550	29
PBI	>400	-	>500	>500	40-42

Lifin kimyasal yapısında farklılık, piroliz sıcaklığını ve piroliz sonrası oluşan ürünleri etkilemektedir. Kimyasal yapısında aromatik moleküller barındıran lifler, daha yüksek oksijen konsantrasyonlarında yanmaya devam etmektedir. Kimyasal yapının LOI değeri üzerine etkisi Çizelge 3.2’de gösterilmiştir [41].

Çizelge 3.2 : Lifin kimyasal yapısının LOI değeri üzerine etkisi [41].

Lif Yapısı	Elyaf	LOI
C,H ve O içeren tüm lifler	Pamuk, Viskoz, Selülozasetat ve Triasetat, Polipropilen	0.17-0.20
C,H,N (ve O,S) içeren tüm lifler	Yün, Poliamid, İpek, Akrilik	0.18-0.25
Aromatik yapının etkisi		
1- C,H,O + aromatik	Polyester	0.21-0.22
2- C,H,O,N + aromatik	Nomex, Kevlar, Kermel	0.27-0.30
3- C,H,N + aromatik	PBI	0.41
F ve Cl'un etkisi	Modakrilik	0.29
	PVC	0.37
	PVDC	0.60
	PTFE	0.95
Karbonize Lifler	Oksitlenmiş poliakrikik	0.50
(aromatize edilmiş C)	Karbonize viskoz	0.55

Çizelge 3.2’de görülmektedir ki azot ve kükürt elementi içeren liflerin LOI değeri diğerlerinininkine göre daha yüksektir. Fakat bu liflerin yanma sırasında ortama yaydıkları gazlar toksik içeriklidir.

Yanma davranışı, lifin kimyasal yapısının yanı sıra, alev kaynağının yapısı ve malzemeye nüfuz etme süresi, kumaş oryantasyonu, alev kaynağının kumaşa temas etme noktası (kumaşın kenarı, yüzü, altı veya üstü), ortam sıcaklığı ve kondisyonu, havanın akış hızı ve kumaş konstrüksiyonu gibi faktörlere de bağlıdır [44].

3.3 Isı ve Alev Koruması İçin Uygun Liflerin Seçilmesi

Alev geciktirici tekstil malzemeleri yangınların başlamasını ve sınırlandırılmasının önlenmesine yardımcı olarak yaşamları kurtarmaya, yaralanma ve maddi kayıpları önlemeye ve çevreyi korumaya yardımcı olur. Bu tekstil malzemeleri yapısı itibarıyla iki kategoride incelenebilir. İlki, doğal olarak alev geciktirici liflerden üretilen Nomex, Kevlar, modakrilikler, melamin ve polivinil klorür gibi alev geciktirici kumaşlardır. İkinci ve alternatif olarak, ya çeşitli kimyasal maddeler kullanılarak yüzey işlemleri ile alev geciktirici bileşik elde edilmesiyle ya da elyaf eğirmeden önce polimer kütlesine ateşe dayanıklı katkı maddelerinin katılmasıyla alev geciktirici özellik sağlamaktadır. Alev geciktirici pamuk, viskoz ve sentetik lifler ikinci kategoriye örnek olarak verilebilir [45].

3.3.1 Doğal olarak alev geciktirici lifler

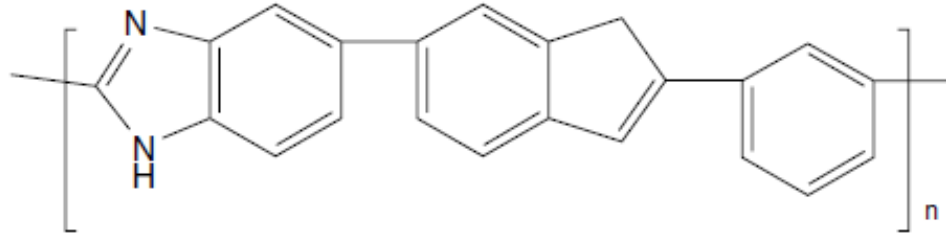
Kimyasal yapısı kendiliğinden alev geciktirici özellikte olan veya alev geciktirici komonomer içererek alev geciktirici özellik kazanan liflerden önce, asbest doğal olarak alev geciktirici özellikteki tek elyaftı. Asbest, istenilen termal özelliklere sahip ve ucuz bir elyaftır fakat lifler o kadar incedir ki akciğerlere solunabilir. Bunun beraberinde bu elyafın kullanımı, 1960’larda işçilerde mezotelyoma ve akciğer kanseri gibi rahatsızlıkların saptanmasıyla kısıtlanmaya ve yasaklanmaya başlamıştır. Günümüzde 50’den fazla ülke asbestin tüm formlarının kullanımını yasaklamıştır. Aramid, Poly(amide-imide), PBI, melamin, cam elyaf gibi lifler ısı ve aleve karşı koruyucu kıyafetlerde sıklıkla tercih edilmektedir [40, 46].

3.3.1.1 Polibenzimidazol (PBI)

Polibenzimidazol lifini, 1959 yılında Brinler ve Robinson keşfetmiştir. 1961 yılına kadar mekanik ve termal dayanımı yüksek lif elde etmek için çok sayıda araştırma yapılmış ve Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri adına H. Vogel ve C. S. Marvel tarafından polibenzimidazol lifleri elde edilmiştir. 1983 yılında Amerikan ‘Celanese Americas’ firması tarafından ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Bugün sadece ‘PBI Performance Products Inc.’ tarafından lif, kompozit, kalıplanmış reçine veya kullanıma hazır tekstil ürünleri olarak üretilmektedir [47].

PBI’nın kimyasal ismi ‘‘Poli-[2,2’-(m-fenilen)-5,5’-dibenzimidazol]’’dır. Yüksek kimyasal ve termal dayanım sağlayan uzun zincirli aromatik bir polimerdir. PBI’nin

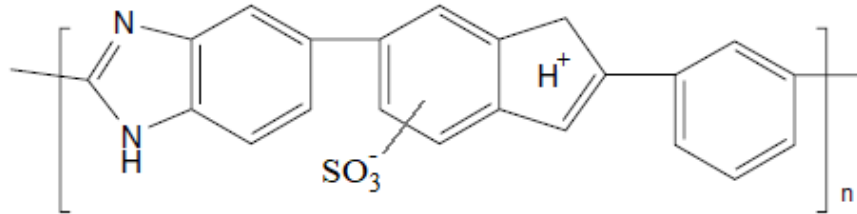
kimyasal yapısı Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Polibenzimidazol (PBI)’ün kimyasal formülü [47].

PBI liflerin alev dayanımını arttırmak için sülfürik asit ile işlem görmektedir. Bu işlem sonucunda lif aleve direkt maruz kaldığında %10 daha az büzülme gerçekleşmektedir. Şekil 3.6’da, PBI lifinin sülfürik asit ile işlem gördükten sonraki kimyasal formülü gösterilmektedir. Sülfürik asit ile işlem görmüş PBI lifinin kullanım alanı daha geniştir. Fosforik asit ile işlem görmüş PBI lifleri de mükemmel alev dayanımı sağlamaktadır.

PBI lifi sentezlenme koşullarından ötürü oldukça pahalı bir liftir. PBI, tetra-aminobifenil (TAB) ve difenil isoftalat (DPIP)’ in kondenzasyon reaksiyonları ile iki aşamada gerçekleşen sentezlenme sonucu elde edilir.



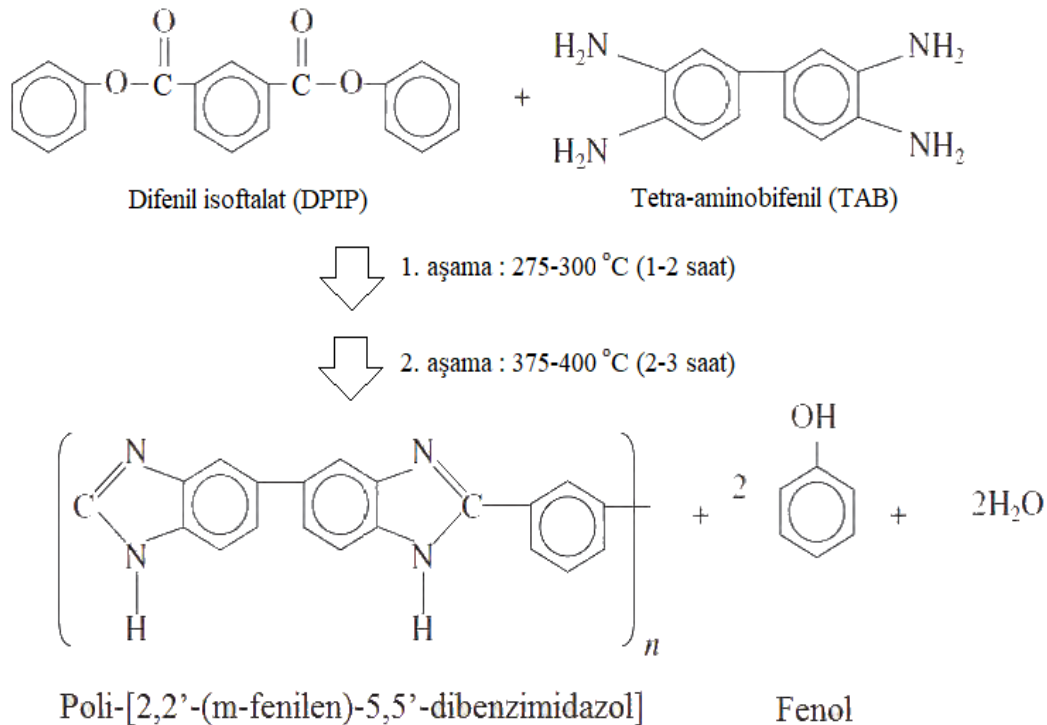
Şekil 3.6 : Sülfürik asit ile işlem görmüş PBI’nın kimyasal formülü [47].

Şekil 3.7’de PBI lifinin sentezlenmesi gösterilmektedir. İlk aşamada tetra-aminobifenil yükseltgenmemesi için vakum sistemi ile oksijen ortamdan uzaklaştırılmaktadır; sistem azot ile arındırılmaktadır. Eşit miktarlarda monomerden oluşan karışım, 150 °C sıcaklıkta reaktif olmayan bir gaz atmosferinde eritilir ve monomerlerin tepkimeye girmesi sağlanır. PBI ön polimerinin oluşmaya başlaması ile birlikte, yan ürün olan su ve fenol ortaya çıkmaktadır. Yan ürün olarak oluşan fenol ve su, PBI ön polimerinin köpürmesine neden olmaktadır. Bu nedenle sıcaklık 1-2 saat sürecinde 275-300 °C’e ve basınç 2,1- 4,2 MPa’a çıkartılmaktadır ve köpüğün soğutulup yatırılmasının ardından ön polimer ince toz haline

getirilmektedir. İkinci aşamada PBI ön polimeri, arzu edilen molekül ağırlığını sağlaması için 2-3 saat sürecince 375-400 °C sıcaklıkta ısıtılmaktadır ve bunun sonucunda polimerizasyon işlemi sağlanmaktadır. İşlem sonunda altın ve kahve arası bir renkte PBI polimer tozu elde edilmektedir [47].

PBI lifi yüksek nem geri kazanımı, iyi bir tutum ve dökümü ile oldukça iyi tekstil özelliklerine sahiptir. Bunun beraberinde düşük elektrik iletkenliği, genelde güçlü asitler ile işleme sokularak arttırılabilmektedir.

Termal dayanımı oldukça iyi olan PBI lifi, 300 °C sıcaklıkta yapısını koruyabilmektedir. 560 °C sıcaklıklarda zehirli gaz üretmeye başlamaktadır ve 600 °C'de sadece %10 büzülme göstermektedir. PBI lifi, asbest lifi ile aynı koruma seviyesini sağlarken, asbest lifinin sadece yarısı ağırlığındadır. Bu özelliği sayesinde, roket motorlarında tutuşmayı önlemek amacıyla kullanılan asbest takviyeli kauçukların yerine geçmiştir. Ayrıca PBI lifleri kullanılarak üretilen eldivenlerin, asbest kullanılarak üretilen eldivenlerden dokuz kata kadar daha uzun ömürlü olduğu, daha yumuşak ve daha esnek olduğu bilgisi raporlanmıştır. PBI'nın yüksek sıcaklıklarda kullanım ömrü Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : PBI polimerinin sentezlenmesi.

Çizelge 3.3 : PBI lifinin yüksek sıcaklıklarda kullanım ömrü [47].

Sıcaklık (°C)	Kullanım Ömrü
600	3-5 saniye
450	5 dakika
400	1 saat
330	24 saat

Normal şartlar altında hava ile yanmaması ile bilinen PBI lifleri, aleve direkt maruz kaldığında alev almamakta, erimemekte ya da gevrekleşmemektedir. Lifin LOI değeri % 41’dir ve aleve maruz kaldığında az miktarda duman yaymaktadır. Çizelge 3.4’te PBI lifinin özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 3.4 : PBI lifinin bazı özellikleri [48].

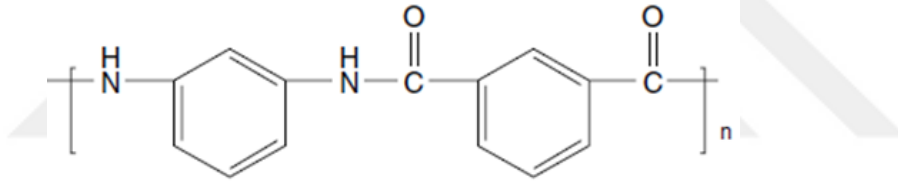
PBI Özellikleri	Değer
Çekme Mukavemeti (g/denye)	2,7
Modül	32
Uzama (%)	29
LOI	41
Kimyasal Direnç	Mükemmel
Sürekli operasyon sıcaklığı (°F)	482

Yapılan bir çalışmada itfaiyeci ceket ve pantolonlarında kullanılan poliamid ve poliamid/polibenzimidazol bazlı dış kumaşlar, 50 °C ve %50 bağıl nemde simüle edilmiş morötesi güneş ışığına maruz kaldığında, kumaşların mekanik performansının önemli ölçüde bozulmaya uğradığı tespit edilmiştir. Bu koşullara 13 gün boyunca maruz bırakıldıklarında farklı bileşendeki her iki kumaşın da yırtılma mukavemeti ve gerilme mukavemetinin %40’tan fazla azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, polibenzimidazol içeren kumaşın mekanik özelliklerinin yaklaşık %20’sini muhafaza ettiği bulgusuna ulaşılmıştır. Kızılötesi spektroskop ve konfokal mikroskop ile yapılan gözlemler sonucunda yüzey ayrışması ve süneklikten dolayı poliamid liflerin kırılabilirlik artışına neden olduğu, amid bağlarının bölündüğü ve oksidasyon türlerinin olduğu ve bunun da poliaramid liflerini foto-oksidasyona uğrattığı sonucuna varılmıştır [49].

3.3.1.2 Aramid

Aromatik poliamidler sınıfına, alifatik poliamid sınıfından farklı özellik gösterdiği için 1974 yılında Amerika Federal Ticaret Komisyonu tarafından “aramid” ismi

verilmiştir. Aramid lifleri aslında, bozunma sıcaklığından daha yüksek bir cam geçiş sıcaklığına (T_g) sahip olan termoplastiklerdir. Kuvvetli kovalent bağlarla bir arada tutulan lif doğrultusunda oldukça yönlendirilmiş molekül zincirine sahiptir. Radyal doğrultudaki zincirler ise daha zayıf olan hidrojen bağları ile bir arada tutulmaktadır ve bu sebeple aramid liflerinin enine mukavemeti daha düşüktür. Aramid lifler için bugüne kadar kabul edilebilir bir yüzey terbiye işlemi geliştirilemediği için cam ve karbon veya grafit lifler gibi yüzey terbiye işlemine tabi tutulmamaktadır [50]. Yüksek performanslı lif olan aramid iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, ticari olarak üretilen ilk aramid olan Nomex'in yer aldığı meta-aramid grubudur. Meta-aramidler orta bir modül ve mukavemete sahiptir fakat mükemmel bir ısı dayanımına sahiptir. 400 °C'nin üzerinde ve 700 °C'ye kadar olan sıcaklıklara kısa süreli dayanabilirler. Nomex (DuPont), Conex (Teijin) ve Fenilon (Rus) meta-aramid lifleri, savaş pilotları, tank ekipleri, astronotlar ve belirli endüstrilerde çalışanlar için koruyucu giysiler olarak geliştirilmiştir. Şekil 3.8'de meta-aramid lifinin kimyasal yapısı gösterilmektedir [40].



Şekil 3.8 : Meta-aramid lifinin kimyasal yapısı [40].

Meta-aramid lifler en iyi ısı direnci ve mukavemet kombinasyonu ile bilinmektedirler (bkz. Çizelge 3.5). Bu lifler erimemekte ve damlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini uzun süreli koruyabilmektedir. Meta-aramidler nispeten yumuşak bir tuşeye sahiptir ve konvansiyonel liflere çok benzer bir şekilde işlemeye eğilimlidirler. Bu lifler, antistatik, iletken ve yüksek performanslı diğer liflerle karışım halinde yaygın kullanımı vardır. Meta-aramid lifinin kullanım alanları Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

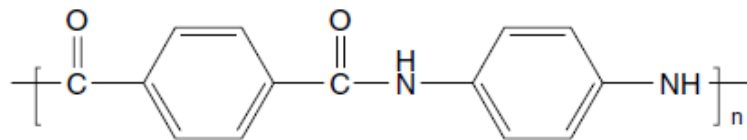
Çizelge 3.5 : Meta-aramid lifinin bazı özellikleri [48].

Meta-aramid Özellikleri	Değer
Çekme Mukavemeti (g/denye)	3.8 - 7.2
Uzama (%)	25-40
LOI	30
Kimyasal Direnç	Hafif-iyi
Operasyon sıcaklığı (°F)	400

Çizelge 3.6 : Meta-aramid lifinin kullanım alanları [48].

M-Aramid Kumaş Formu	Kullanım Alanı
Keçe	Otomotiv
	İş makineleri parçaları
	Hava yastığı malzemesi
	Sıcak gaz filtrasyonu
	Koruyucu kıyafet
Dokuma Kumaş	Termal izolasyon
	Sıcak gaz filtrasyonu
	Hoparlör bileşeni
	Takviye (kompozit ve kauçuk)
	Koruyucu kıyafet
Sulu serme nonwoven	Termal izolasyon
	İş makineleri parçaları
	Akü ayırıcı
	Isı kalkanı
	İş makineleri parçaları
Kuru serme nonwoven	Elektriksel yalıtım
	Isı kalkanı
	Sıcak gaz filtrasyonu
	Laminat destek tabanı
	Termal ayırıcı
Dokusuz örgüsüz nonwoven	Yüksek sıcaklık filtrasyonu
	Koruyucu kıyafet
	Laminat destek tabanı

Bir diğer aramid türü ise para-aramid lifidir. 1970'lerin başında Dupont tarafından tanıtılan Kevlar, para-aramid sınıfına girmektedir. Kevlar, polifarafenilen tereftalamid (aramid) oluşturmak üzere bir organik çözücü içinde parafenilendiamin ile tereftaloil klorürün reaksiyona sokulması sonucu elde edilmektedir [50]. Para-aramid lifleri son derece yönlendirilmiş rijit moleküler yapısı nedeniyle yüksek mukavemet, yüksek çekme modülü ve yüksek ısı direncine sahiptir (bkz. Şekil 3.9). Para-aramid lifleri meta-aramid liflerine benzer çalışma sıcaklıklarına sahiptir fakat 3 ile 7 kat daha yüksek mukavemete ve modüle sahiptir. Bu özelliği sayesinde takviye ve koruyucu tip uygulamalar için ideal bir liftir.



Şekil 3.9 : Para-aramid lifinin kimyasal formülü [40].

Kevlar ve Twaron gibi homopolimer içeren ve Technora gibi kopolimer içeren iki tip para-yönelimli aramid elyafı mevcuttur.

Para-aramidler kuvvetli olmasına rağmen, kimyasal dirençle ilgili bir problem vardır. Güçlü asitler ve bazlar homopolimer para-aramidlere zarar verebilmektedir. Örneğin Kevlar ve Twaron, klor ile ağartılamamaktadır ve bu liflerden üretilmiş koruyucu eldivenler gıda işleme için onaylanmamaktadır. Technora, kopolimerin ince yüzey yapısı sayesinde daha yüksek kimyasal dirence sahiptir (bkz. Çizelge 3.7). Ayrıca kopolimer para-aramidler, yüksek aşınma ve buhar direncine de sahiptir. Bu özellikleri sayesinde birçok koruyucu uygulamada yer alabilmektedir [48].

Çizelge 3.7 : Para-aramid lifinin bazı özellikleri [48].

Para-aramid Özellikleri	Değer
Çekme Mukavemeti (g/denye)	22 - 26
Modül	460 - 1100
Uzama (%)	2.4 - 4.4
LOI	25-28
Kimyasal Direnç	Hafif-iyi
Sürekli operasyon sıcaklığı (°F)	375

Para-aramid lifleri, yüksek mukavemet özelliklerinden ötürü diğer liflerle karışım halinde kullanılır. Örneğin 60/40 oranında para-aramid ve PBI harmanı, itfaiyeci kıyafetleri için en çok kullanılan malzemedir. Para-aramid lif, PBI lifinin işleme ve mukavemet gibi bazı eksikliklerini giderirken, PBI lifi ise yumuşaklığı, nem geri kazanımı ve yüksek sıcaklıklara dayanımı gibi özellikleriyle para-aramid lifinin özelliklerini iyileştirir. PBI lifi ile para-aramid lifini harmanlamak, maliyetin azaltılmasını da sağlamaktadır [48]. Para-aramid lifinin kullanım alanları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.8 : Para-aramid lifinin kullanım alanları [48].

P-Aramid Formu	Kullanım Alanı
Keçe	Hava yastığı malzemesi
	Koruyucu kıyafet
	Termal izolasyon
	Termal bariyer
Dokuma Kumaş	Takviye (kompozit ve kauçuk)
	Spor malzemeleri
	Termal izolasyon

Çizelge 3.8 (devam) : Para-aramid lifinin kullanım alanları [48].

P-Aramid Formu	Kullanım Alanı
Dokuma Kumaş	Mekanik kauçuk ürünleri
	Koruyucu kıyafet
	Balistik uygulamalar
Sulu serme nonwoven	Sürtünme malzemesi
	Isı kalkanı
İplik	Takviye (kompozit ve kauçuk)
	Dikiş ipliği
	Halatlar ve kablolar

3.3.1.3 Cam Elyafı

Cam elyafı, 1930'ların sonlarında ticarileştirilen ilk “insan yapımı” liflerden biridir. Oryantasyon veya kristalizasyona sahip olmayan inorganik bir lifdir. İlk insan yapımı liflerden biri olarak kabul edilir. Yapı olarak izotropik üç boyutlu ağ yapısına sahip olan lif, genellikle silikondioksit, kalsiyumoksit, alüminyumoksit, boronoksit ile bazı metaloksitlerden oluşmaktadır. Yaygın olarak yalıtım ve takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Doğal olarak yanıcı değildir ve ısıya maruz kaldıklarında herhangi bir buhar veya zehirli madde bırakmamaktadır. Yağlara ve çözeltilere karşı dayanıklı olmakla beraber, asitlere ve alkalilere karşı da iyi bir direnç göstermektedir. Yüksek performanslı cam liflerinin en önemli üreticileri Owens Corning, Wentrotex, Ashltrom ve Pilkinton'dur [48, 51].

Silika, bütün ticari cam tiplerinin temel yapı taşıdır. Silika, çeşitli oksitlerin 1300-1600 °C arasında eritilmesiyle elde edilir. Çeşitli cam elyaf tipleri mevcuttur:

- 1- A – Cam : Alkali içeren cam kompozisyonudur.
- 2- AR – Cam : Alkaliye dayanıklı cam kompozisyonudur. Genellikle çimento destekleyici malzeme olarak kullanılmaktadır.
- 3- C – Cam: Kimyasallara dayanıklı cam kompozisyonudur.
- 4- E – Cam: Yüksek elektriksel dayanımı olan cam kompozisyonudur.
- 5- HS – Cam:Yüksek mukavemetli cam lifidir. Alumina, silika, magnezyum ve küçük ölçeklerde diğer metaloksitleri içerir.
- 6- S – Cam: Yüksek mukavemetli cam lifine oldukça benzemektedir.

Cam liflerin toplam üretiminin yaklaşık %90'ı E – Cam'dır. Cam destekli plastik endüstrisinde genellikle E - Cam elyafı kullanılmaktadır. Cam elyafı tipleri farklı

özellikler barındırmaktadır. Çizelge 3.9’da çeşitli cam elyafı liflerinin özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 3.9 : Farklı türde cam elyafının özellikleri [48].

Özellikler	E - Cam	AR - Cam	S - Cam
Kopma Mukavemeti (g/denye)	35	46	35
Modül (g/denye)	524	1250	620
Uzama (%)	4.8	2	5.4
Kırılma İndisi	1547	1561	-
Yoğunluk (g/cm ³)	2.57	2.68	2.46
Termal Genişleme Katsayısı (10 ⁷ °C)	50-52	75	23-27
Dielektrik sabiti (10 ¹⁰ Hz)	6.1 - 6.3	-	-

Cam lifleri kullanım biçimi olarak elyaftan kumaşa kadar çok çeşitliliğe sahiptir. Kullanım alanı olarak başta otomotiv ve spor ekipmanları olmak üzere cam destekli plastiklerde yer alır. Ayrıca alev almaz özellikleri, kolay bozulmamaları ve sağlık tehlikesi oluşturmamalarından ötürü asbest yerine kullanılmaktadır.

S – Cam, E – Cam’dan daha yüksek mukavemete ve yorulma dayanımına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı helikopter ve uçaklarda uçuş kabini zırhı, helikopter zırhı olarak kullanılır. Diğer kullanım alanları Çizelge 3.10’da belirtilmektedir [48].

Çizelge 3.10 : Cam elyafın kullanım alanları [48].

Cam Elyaf Formu	Kullanım Alanı
Keçe	Otomotiv
	Filtrasyon
	Takviye (kompozit, kauçuk ve çimento)
	Termal yalıtım
	Baskılı devre kartı
Dokuma Kumaş	Uçak ve uzay sanayi
	Minder materyali
	Filtrasyon
	Termal yalıtım ve ayırıcı
	Akustik izolasyon

3.3.1.4 Arall (Aramid takviyeli alüminyum laminat)

Alüminyum alaşımı-aramid laminat, alüminyum alaşımlı levhaların tek yönlü aramid elyaf-epoksi kompozit ile yapışkan bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen bir hibrit kompozittir. Yaygın olarak Arall (Aramid elyaf takviyeli alüminyum laminat) olarak bilinen bu malzeme, laminatta kullanılan monolitik alüminyum alaşımları ile

karşılaştırıldığında esas olarak daha düşük bir yoğunluğa ve daha yüksek bir çekme mukavemetine sahiptir. Arall'ın en önemli özelliği, yorgunluk çatlak yayılma oranlarını azaltma kabiliyetidir. Ayrıca, Arall laminatları geleneksel sac şekillendirme teknikleri ile farklı konturlara şekillendirilebilmektedir. Bu cazip özelliğinden ötürü, gelecek nesil uçakların tercih edilen malzemesi olması öngörülmektedir [52].

Metal/elyaf hibrid laminatlar, kırılma mukavemeti ve nispeten düşük çatlak yayılma oranı gibi olağanüstü mekanik ve yorulma özellikleri sunar. Farklı kullanım alanları için çeşitli yapılar söz konusudur. Örneğin; soğuk havacılık yapıları için 1200 °C şekillendirme sıcaklığına sahip laminatlar kullanılabilirken, 1800 °C şekillendirme sıcaklığına sahip epoksi sistem tipi laminantlar yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılır. 2500 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere ise lamine edilmiş termoplastik yapıştırıcılı laminantlar tercih edilmektedir. Arall ve Glare en çok tercih edilen alüminyum-aramid laminatlar olarak örnek gösterilebilir. Arall, Fokker 27 uçağının alt kanat cilt panelleri ve Boeing C17 Kargo kapıları için geliştirilmiştir. Glare ise Airbus A380 gövde için kanat ön kenarına kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Uluslararası ve uzun mesafe taşımacılık taleplerindeki sürekli artıştan ötürü nispeten pahalı olan süpersonik uçakların gerekliliği oluşmuştur. Bunun beraberinde, yatırımı geri kazanmak için uçak ömrü arttırılırken, uçağın kütlesini en az indirgenmesi gerekmektedir. Örneğin; uçak gövdesi, kanatlar ve uçağın diğer parçaları hafif olmalıdır, ancak bu parçalar aynı zamanda yüksek güç/ağırlık oranına, mukavemete ve yüksek termo-mekanik dayanıklılık gibi birçok özelliğe sahip olmalıdır. Titanyum alaşımları gibi metalden yapılmış uçak gövdesi, dış paneller, kanatlar ve kontrol yüzeyleri, gelişmiş bir süpersonik sivil hava aracı için tüm performans kriterlerini karşılamamaktadır. Bunun yanı sıra, titanyum panellerin boyutları büyük ebattaki uçaklarda daha fazla panel eklemine gerektirdiğinden dolayı sınırlıdır. Titanyum alaşımları nispeten yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve nispeten pahalıdır. Titanyum alaşımları ayrıca düşük yorulma direncine ve yüksek oranda çatlak ilerlemesine sahiptir. Arall laminatları, yorgunluk çatlak yayılma oranlarını azaltma kabiliyetinden, nispeten daha düşük yoğunluğundan ve yüksek çekme mukavemetinden dolayı, havacılık sektöründe önemli bir yere sahiptir [52, 53].

3.3.2 Konvansiyonel tekstil liflerinin alev geciktirilmesi

Geleneksel tekstil liflerine alev geciktirici özellik polimerizasyon, eğirme ve bitim işlemleri aşamasında ilave edilen çeşitli kimyasallar aracılığıyla kazandırılmaktadır. Fosfor, antimon, kurşun metilfosfonat ve bir alkil-fosfonik asit gibi kimyasallar viskoz, polyester ve naylon 6 gibi liflerin LOI değerinin arttırılması için kullanılan başlıca ürünlerdir.

3.3.2.1 Viskoz FR

Viskoz rayonu, çok küçük düzelerden bir selüloz türevi çözeltisinin ekstrüde edilmesi ve daha sonra pH değerinin değiştirilmesi ve türevinin tekrar selüloza dönüştürülüp çökeltilmesiyle elde edilir. Genellikle odun hamuru formunda selülozdan üretilmesiyle beraber, bambu ve pamuk linterleri gibi diğer selüloz kaynaklarından da üretilebilir. Odun hamuru sodyum hidroksit içine batırılır ve daha sonra selülozu ksantata dönüştürmek için karbondisülfür ile reaksiyona sokulur. Viskoz elde etmek için yaygın olarak viskoz adı verilen altın renkli bir sıvı, ksantat bir sodyum hidroksit çözeltisi içinde çözülür. Çözeltinin havası tahliye edilir ve filtrelendir. Daha sonra, metal düzelerden geçerek, sülfirik asit, sodyum sülfat ve çinko sülfattan oluşan bir eğirme banyosuna ekstrüde edilir. Asit, selüloz ksantatın çökmesine neden olması için viskoz içindeki sodyum hidroksit ile reaksiyona girer. Ayrıca asit, selüloza geri dönüştüren selüloz ksantat ile reaksiyona girer. Oluşan lif plastik bir haldedir. Selüloz moleküllerinin lifin ekseninde oryantasyonu arttırmak ve kristalleşmeyi teşvik etmek için germe işlemi uygulanır. Eğirme makinesinin tasarımına ve ürünün gerektirdiklerine bağlı olarak elyaf daha sonra kesikli elyaf oluşturmak için gerekli uzunluklarda kesilebilir veya sürekli filament veya yumak olarak tutulabilir. Sürecin geri kalan kısmında viskoz lifi, sodyum sülfat ve hidrojen sülfür gibi reaksiyonun selüloz olmayan ürünlerini uzaklaştırmak için yıkanır. Sonraki işlemlere yardımcı olmak için yağlayıcılar ve antistatik ile bitim işlemi uygulanır ve kurutulur [54].

Çevre kirliliğinden kaçınmak ve toplumun güvenliği için, viskoz üretim sürecinin yan ürünlerinin mümkün olan en yüksek miktarda geri kazanılması gereklidir. Yan ürünlerinin daha iyi geri kazanımı ve geri dönüşümü ekonomik fayda sağlayabilir. Lenzing firması, kağıt kamuru fabrikası ve viskoz üretimini bir arada yürütmektedir, böylece kurutulmamış odun hamuru doğrudan viskoz üretim aşamasına beslenir.

Kağıt hamuru fabrikasında kullanılan odunun selülozik olmayan kısmı yakılır ve kağıt hamuru fabrikası tarafından kullanılan enerjiyi ve viskoz prosesi için kullanılan enerjinin çoğunu üretmek için kullanılır. Asetik asit, ksilitol veya odun şekeri ve furfural gibi diğer kimyasallar yakma işleminden önce geri kazanılır.

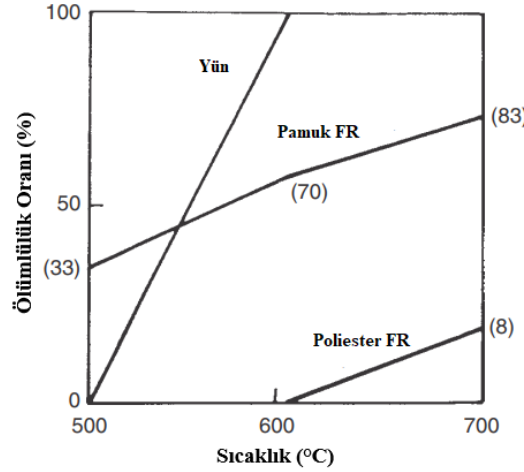
1976 yılında Lenzing firması “Lenzing FR” üretimine başlamıştır. Lenzing FR, en yaygın kullanılan alev dayanıklı insan yapımı selülozik elyafıdır. Özellikle askeriye, kolluk kuvveti ve yangınla mücadele için koruyucu giysilerde ve endüstriyel iş giysilerinde kullanılır. Aynı zamanda mobilya ve ulaşım endüstrisi için döşemelik kumaşlarda da kullanılmaktadır. Alev geciktirici özellik, fosfor içerikli bileşiklerin selüloz yapısına karıştırılması ile sağlanmaktadır. Bu bileşikler, kömür oluşumuna neden olan selülozun dehidrasyonuna neden olur. Artan kömür oluşumu, uçucu ve parlayıcı ayrışım ürünlerinin daha az üretilmesini sağlar ve dolayısıyla yanma sürecini durdurur. Alev geciktiriciler ayrıca selülozun gaz fazında yanma reaksiyonunu da kesintiye uğratmada etkili olabilir. Selülozun ayrışma sıcaklığına yakın sıcaklıkta, selülozdan ayrılan ürünler ile tercihen tepkimeye girecek uçucu bileşikleri üreten bir katkı maddesi kullanılırsa oksijenle yanma reaksiyonu meydana gelmez. Tris 2,3 dibromopropil fosfat, ısıtma sırasında serbest radikal toplayıcı olarak hareket eder ve selüloz dekompozisyonundan gelen parlayıcı uçucu ürünlerin oksijenle reaksiyonlarını önleyen hidrojen bromür üretmek üzere ayrışır [54].

Alev geçirmez kumaş üretirken viskoz FR lifleri, aramid liflerle harmanlanarak maliyetler azaltılabilir. Huang Gu tarafından 2009 yılında yapılan bir çalışmada Nomex 462 ve Lenzing Viskoz FR liflerinden üretilen kumaşların termal özellikleri analiz edilmiştir. Dikey yanma sonrası, limit oksijen indeksi ve termal gravite testlerinden sonra, harmanlanmış malzemelerin termal davranışları %100 Nomex elyafından üretilmiş malzemenin özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli aramid/viskoz FR karışımları arasından, 80/20 Nomex/Lenzing FR karışımının en yüksek LOI değerini verdiği ve dikey yakma testinde en kısa hasarlanmış alan oluşturduğu tespit edilmiştir [55].

3.3.2.2 Polyester FR

Sentetik liflerin alev geciktirici olarak işlenmesi için kopolimerizasyon sırasında FR komonomerlerinin kullanılması, ekstrüzyon sırasında bir FR katkı maddesinin tanıtılması ve alev geciktirici bitim işlemi veya kaplama uygulaması olmak üzere üç

yöntem bulunmaktadır. İlk iki yöntem ile kendiliğinden alev geciktirici özellikte polyester lifi üretilebilir. Hoechst firması tarafından üretilen Trevira CS ve Trevira FR, alev geciktirici karakterde polyesterdir. Her ikisi de fosfinik asit türevine dayalı bifonksiyonel bir organofosfor bileşiğinin kopolimerizasyonu ile üretilmektedir. %0.6 fosfor içeren Trevira CS kumaşının LOI değeri %28'dir. Artan sıcaklıklarda yanan kumaşların zehirliliği ile ilgili testler, Trevira CS polyester kumaşın işlenmiş FR pamuğa kıyasla daha az toksik olduğunu gösterir (bkz. Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : Farklı yanma sıcaklıklarında kumaşların toksisitesi [40].

Trevira CS ve FR, modakriliklerin (%50'ye kadar PVC içerir) ve PVC kloroliflerin aksine klorür içermemektedir. Ayrıca alev kaynağına maruz kaldıklarında aşırı düşük seviyelerde zehirli gaz ve duman çıkarmaktadır. Örneğin; hem için için yanan hem de alevli yanan alev geciktirici özellikteki yün ve modakriliklere kıyasla sıfır hidrojen siyanür açığa çıkartmaktadır. Bu nedenle 700 °C sıcaklığa maruz kalan kumaşlarda, hayvanlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda FR pamuk kumaşın %83 ölümlülük oranına sahip olduğu görülürken, Trevira CS ve Trevira FR kumaşın sadece %8'lik ölümlülük oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda Trevira CS ve Trevira FR kumaşı için zararlı madde içermediğini gösteren Oeko-Tex standart 100 sertifikası için onaylanmıştır.

Unitika, [2,5-bis (2-hidroksietoksi)fenil]difenil fosfin oksit ve bis(β- hidroksietil) tereftalat kopolimer kullanılarak, eriyikten çekim metoduyla üretilmiş alev geciktirici özellikte polyesterdir. Filament, kabuk-öz tipi yapıya sahiptir. Kabuk olarak normal polyester kullanılırken, öz olarak kopolimer polyester kullanılmıştır. Bu kabuk-öz yapısı, tekstüre sürecinde ısıya karşı stabilite sağlamaktadır ve tekstüre işlemini

kolaylaştırmaktadır. Unitika lifinin LOI değeri yaklaşık %30'dur. Kendi kendini söndürme özelliğine sahiptir ve yanarken zararlı gazlar üretmemektedir [40].

3.3.2.3 Alev geciktirici naylon

Naylonlar, yanma sırasında büyük ölçekte büzülme ve eriyerek damla oluşturmaları nedeniyle kendiliğinden söndürme özelliğine sahiptir. Fakat selüloz gibi doğal liflerle karışım halinde iken, selülozun yanmasından ötürü sorunlar oluşabilmektedir.

Alev veya yanma geciktiricilerin eğermeden önce poliamid eriyiğinin içine katılması, ekonomik ve kararlı yapı sağlanabildiği durumlarda uygulanabilir bir yöntemdir. Butylkina ve arkadaşları, kurşun metilfosfonat ve bir alkil-fosfonik asit ve antimon kompleksi gibi erimeyen tipteki bileşiklerin performansını, naylon 6'nin eriyikten çekimi sırasında katkı maddesi olarak kullanılan fosforlu pentaeritritol ve fosfor bazlı Borofos gibi yüksek viskoziteli alev geciktirici özellikteki bileşikleriyle karşılaştırmıştır. Bulgular sonucunda Borofos katkı maddesi kullanıldığında en fazla karbonik tortu/kül oluştuğu görülmüştür fakat kütlece %2 antimon bileşiği kullanılan naylon 6'nın LOI değerinin yaklaşık %50 olduğu tespit edilmiştir [56].

Naylon elyafı ve plastiklerde alev geciktirme üzerine yapılan başka bir çalışmada, naylon 6 ve naylon 6.6 liflerine alev geciktirici özellik kazandırmak için uygun proses ve kimyasallar seçilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda polimerizasyon, eğerme ve bitim aşamalarında çeşitli alev geciktirici kimyasalların etkisi incelenmiştir. Alev geciktirici naylon lifleri elde edebilmek için polimerizasyon aşamasında fosfor bazlı bileşiklerin eklenmesinin LOI değerini yükselttiği saptanmıştır. Naylon 6 için kırmızı fosfor ve magnezyum oksit ilavesi sonucunda LOI değerinin %28,5 olduğu gözlenmiştir. Eğerme işlemi sırasında alkil fosfonik asit ve antimon kompleksinin bir bileşiğinin kullanılması ise LOI değerini yaklaşık %30'a yükseltmektedir [57].



4. MATERYAL VE METOD

4.1 Malzeme ve Ekipmanlar

4.1.1 Kumaşlar

Deney kapsamında yüksek sıcaklıklara dayanıklı aramid materyalden yapılmış dokuma, örme ve nonwoven yüzeylere lamine edilmiş 3 farklı aluminize kumaş (ARALL), cam elyaf üzerine lamine edilmiş aluminize kumaş, viskoz rayon ve PBI kumaş olmak üzere 6 farklı kumaş tedarik edilmiştir. Kumaşlar ISO 139:2005 standardına göre (20 ± 2) °C sıcaklıkta ve % (65 ± 2) 'lik bağıl nemde 24 saat süreyle kondisyonlanmıştır. Kullanılan kumaşlara dair bilgiler Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Kullanılan yüksek sıcaklıklara dayanıklı kumaşlara ait bazı bilgiler.

Kumaşlar	Bileşenler	Gramaj (g/m ²)	Yırtılma Dayanımı (N)		Kopma Mukavemeti (N/m ²)	
			Çözücü	Atkı	Çözücü	Atkı
Kumaş 1	%55 Viskoz FR - %44 Aramid - %1 Antistatik	250	25	24	1550	842
Kumaş 2	%58 Paraaramid - %40 PBI - %2 Antistatik	200	102,9	92,4	1689	1492
Kumaş 3	Alüminyum - %100 Cam elyaf - Epoksi	500	125	105	2042	954
Kumaş 4	Alüminyum - %100 Aramid (dokuma) - Epoksi	290	270	210	2150	1020
Kumaş 5	Alüminyum - %100 Aramid (dokusuz yüzey) - Epoksi	460	264,5	287,7	3672	1045
Kumaş 6	Alüminyum - %100 Aramid (örme) - Epoksi	460	83	73	1680	870

4.1.2 İletken iplikler

Deneyde, gümüş kaplı poliamid (PA), paslanmaz çelik ve bakırdan yapılmış 5 farklı iletken iplik kullanılmıştır. Bu ipliklerden ikisi paslanmaz çelik, ikisi gümüş kaplı PA ve biri bakır iletken teldir. Şekil 4.1'de deneyde kullanılan iletken iplikler gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Kullanılan farklı malzemelerden yapılmış iletken iplikler.

İletken ipliklere dair karakteristik bilgiler Çizelge 4.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kullanılan iletken ipliklere ait karakteristik bilgiler.

İletken İplik No	Malzeme Tipi	İplik No	Kopma Mukavemeti (cN)	Kopma Uzaması (%)	Lineer Direnç (ohm/m)
1	Bakır		440	23,55	1,5
2	100% Paslanmaz çelik	100Fx1	2287	0,92	65
3	100% Paslanmaz çelik	1000Fx1	2556	1,34	19
4	Gümüş kaplı PA	235Fx34x2	2565	33,85	85
5	Gümüş kaplı PA	70Fx34	319	28,61	300

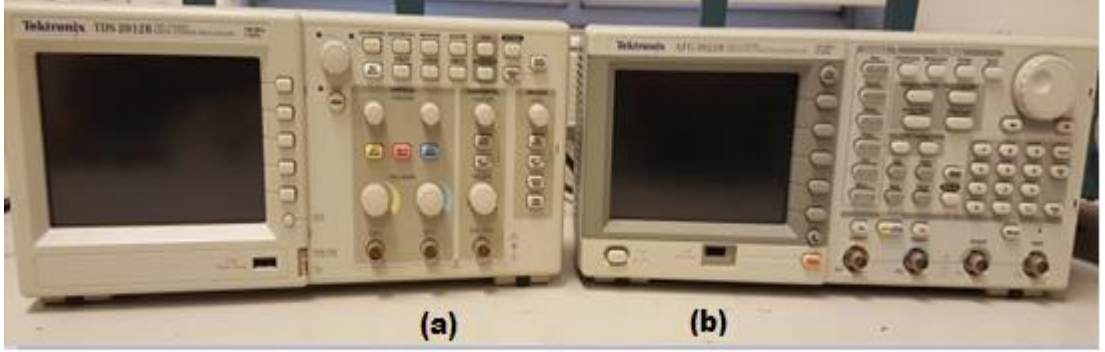
4.1.3 Elektriksel ölçüm cihazları

Elektriksel ölçümlerde Keithley Multimetre (bkz. Şekil 4.2), Tektronix TDS 2012B osiloskop (bkz. Şekil 4.3a), Tektronix AFG 3022B Fonksiyon jeneratörü (bkz. Şekil 4.3b) kullanılmıştır.



Şekil 4.2 : Multimetre.

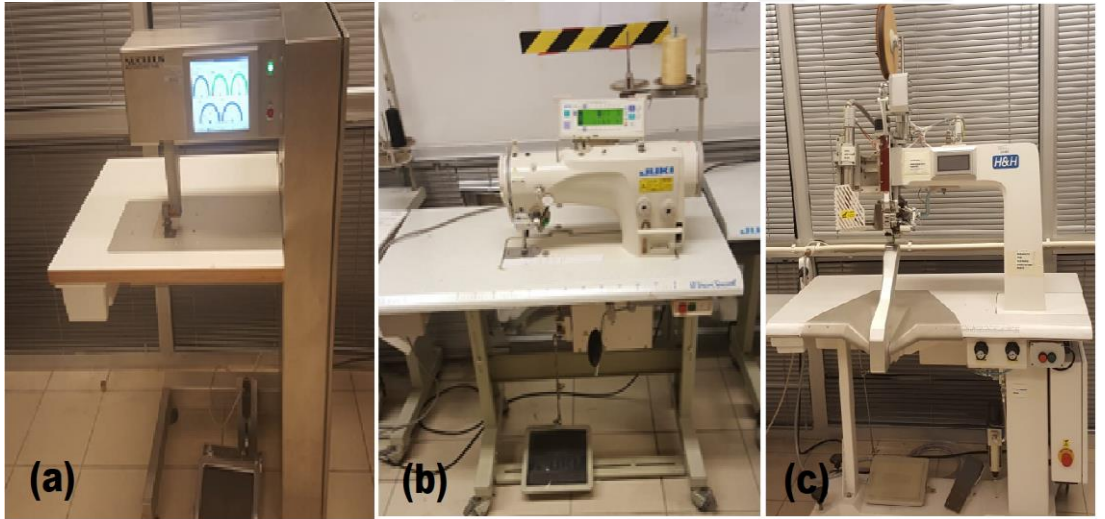
Elektriksel sinyali gözlemlemek için osiloskop kullanılmıştır. Ölçümler öncesinde osiloskop kalibre edilmiştir. Fonksiyon jeneratörü, çeşitli frekanslarda farklı tipte elektrik dalga formları üretmek için kullanılmıştır. Deneyde kare dalga formu ile ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.3 : (a) Osiloskop. (b) Fonksiyon jeneratörü.

4.1.4 Dikiş Makinaları

Çalışmada elektronik tekstil yapısı oluşturabilmek için NUCLEUS ROTOSONIC V4E modeli ultrasonik kaynak dikiş makinesi (bkz. Şekil 4.4a), JUKI LZ-2290A elektronik programlı zigzag dikiş makinesi (Şekil 4.4b) ve H&H marka sıcak hava kaynak dikiş makinası (bkz. Şekil 4.4c) kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : (a) Ultrasonik kaynak dikiş makinası. (b) Zigzag dikiş makinası. (c) Sıcak hava kaynak dikiş makinası.

4.1.5 Test aparatları

Isı ve aleve karşı koruyucu kıyafetler için TS EN ISO 11612:2015 standardına göre uygulanması gereken test metotlarına ait kullanılan test aparatları bu bölümde açıklanmaktadır.

4.1.5.1 Sınırlandırılmış alev sıçraması testi

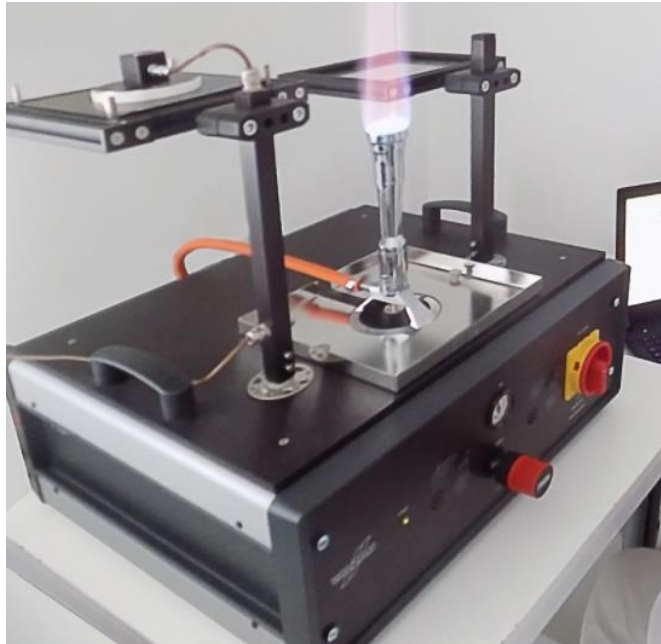
EN ISO 15025:2016 standardı, tek veya çok bileşenli kumaşlar (kaplanmış, kapitone, çok katmanlı, sandviç konstrüksiyonlar ve benzer kombinasyonlar) tarif edilmiş küçük bir aleve maruz kaldığında, dikey yönelimli esnek malzemelerin alev yayılma özelliklerini belirlemek üzere gerekli prosedürü belirtmektedir. İlgili standarda göre aşağıdaki aparatlar testi gerçekleştirirken kullanılmıştır [58].

- Dikdörtgen metal çerçeve,
 - Prosedür A için 190 mm × 150 mm numune tutucu.
- Gaz brülörü,
- Kronometre,
- Şablon,
 - Prosedür A için 200 mm × 160 mm şablon.

4.1.5.2 Konvektif ısı testi

Aleve maruz kalmada ısı geçişini tayin edebilmek için EN ISO 9151:2016 standardına göre Şekil 4.5'te gösterilen aparatlar testi gerçekleştirirken kullanılmıştır [59].

- Gaz yakıcı (meker beki),
- Bakır diskli kalorimetre,
- Numune destek çerçevesi,
- Kalorimetre plakası,
- Ayaklı destek,
- Ölçme cihazı,
- Kalıp (model).

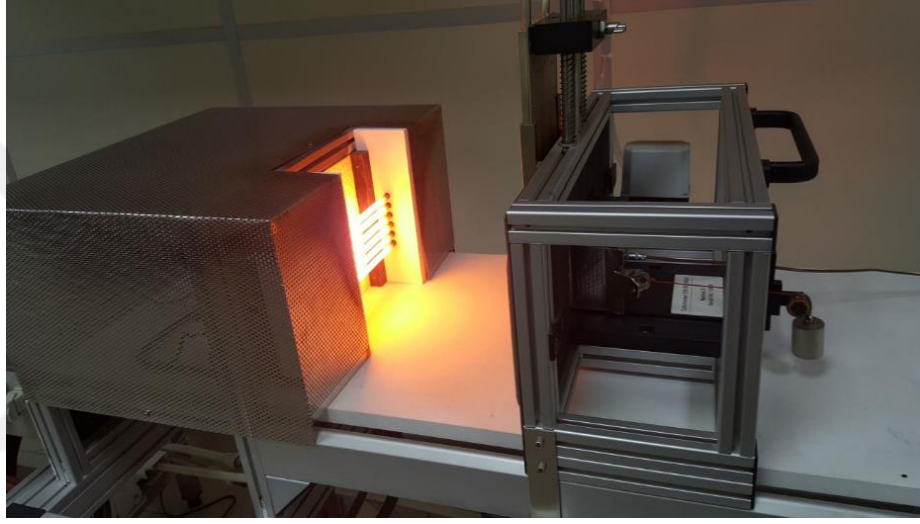


Şekil 4.5 : Konvektif ısı test cihazı.

4.1.5.3 Radyan ısı testi

Işıma yoluyla yayılan ısı kaynaklarına maruz kalındığında malzeme ve malzeme birleşimlerinin değerlendirilmesi için EN ISO 6942:2002 standardına göre testi gerçekleştirirken Şekil 4.6’da gösterilen deney düzeneğinde ilgili aparatlar kullanılmıştır [60].

- Işıma kaynağı,
- Deney çerçevesi,
- Numune taşıyıcı,
- Kalorimetre,
- Sıcaklık ölçme ve kaydetme cihazı



Şekil 4.6 : Radyan ısı transferi test cihazı.

4.2 Metodoloji

Bu kısımda, TS EN ISO 11612:2015 (Koruyucu giyecekler - Isı ve aleve karşı koruyucu giyecek - Asgari performans gereklilikleri) standardı gereği, bir koruyucu kıyafete aşağıdaki testler uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Test standartlarına göre ürünün koruma seviyesi ve sınıflandırılması Çizelge 4.3’de belirtilmektedir [61].

Çizelge 4.3 : TS EN ISO 11612:2015 standardına göre sınıflandırma.

Test Standardı	İşaret	Sınıflandırma
EN ISO 15025 / Sınırlandırılmış Alev Sıçraması	A1	Prosedür A'ya göre işlem uygulanır.
	A2	Prosedür B'ya göre işlem uygulanır.
ISO 9151 / Konvektif Isı	B1	$4.0 \text{ sn} < \text{HTI}_{24} < 10.0 \text{ s}$
	B2	$10.0 \text{ sn} < \text{HTI}_{24} < 20.0 \text{ s}$
	B3	$20.0 \text{ sn} < \text{HTI}_{24}$

Çizelge 4.3 (devam) : TS EN ISO 11612:2015 standardına göre sınıflandırma.

Test Standardı	İşaret	Sınıflandırma
EN ISO 6942 / Radyan Isı	C1	$7.0 \text{ s} < \text{RHTI}_{24} < 20.0 \text{ s}$
	C2	$20.0 \text{ s} < \text{RHTI}_{24} < 50.0 \text{ s}$
	C3	$50.0 \text{ s} < \text{RHTI}_{24} < 95.0 \text{ s}$
	C4	$95.0 \text{ s} < \text{RHTI}_{24}$

4.2.1 Sınırlandırılmış alev sıçraması testi EN ISO 15025

Sınırlandırılmış alev sıçraması test metodu koruyucu elbise – ısı ve aleve karşı koruma - sınırlandırılmış alev sıçraması için deney metodudur. Numunenin tanımlanmış küçük aleve maruz kaldığındaki alev yayılımı, EN ISO 15025:2016 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Prosedür A için 200 mm x 160 mm boyutlarında 90 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklığa ve $(\% 65 \pm 5)$ izafi neme sahip bir atmosferde 24 saat kondisyonlandırılmıştır ve testler numunelerin kondisyonlanmış odadan çıkartılmasından sonra 2 dakika içerisinde başlamıştır. Testler $24 ^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $\% 65$ bağıl nem olan ortamda, hava hareketinin $0,2 \text{ m/s}$ 'den düşük olduğu atmosfer koşullarında gerçekleşmiştir.

Numuneler pimlerin şablonun işaretli noktalarından gergin veya sarkık olmayacak şekilde geçirilmiştir. Prosedür A için gaz brülörü dikey konuma getirilip yakılmıştır. Alevin sarı kısmının yüksekliği yaklaşık 40 mm'ye ulaşınca kadar ısınması beklenmiştir. Daha sonrasında gaz brülör yatay konuma getirilmiş ve brülör sabitleyicisinin ucundan alevin sarı kısmının ucuna kadar olan mesafe 25 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelere alev 10 saniye boyunca uygulanmıştır ve aşağıda belirtilen durumlar gözlenerek kaydedilmiştir (bkz. Şekil 4.7).

- Herhangi bir alevlenmenin üst kenara mı yoksa test numunesinin dikey kenarına mı ulaştığı,
- En yakın saniyeye kadar geçen alev sönme süresi,
- En yakın saniyeye kadar geçen kor sönme süresi,
- Kor alev yayılımının, alev yayılmış alanın ötesine (genellikle karbonize alan) yayılıp yayılmadığı,
- Erime oluşumu,
- Damla oluşumu,
- Prosedür A için delik sayısı, en büyük deliğin boyutu ve deliğin hangi katmanlar içinde olduğu.



Şekil 4.7 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi Prosedür A'ya göre numunenin test edilmesi.

4.2.2 Konvektif ısı testi EN ISO 9151

Konvektif ısı testi de koruyucu elbise – ısı ve aleve karşı koruma testidir. Aleve maruz kalmada ısı geçişinin tayini, EN ISO 9151:2016 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

140 mm x 140 mm boyutlarında hazırlanan 90 adet numune, $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve % (65 ± 2) 'lik bağıl nemde 24 saat kondisyonlanmıştır. Numuneler kondisyonlama odasından çıkartıldıktan sonra 3 dakika içerisinde teste tabi tutulmuştur. Test $24 ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve % 65 nispi neme sahip olan ve hava akışı olmayan bir ortamda gerçekleştirilmiştir.

Yatay konumda yerleştirilmiş numune, altına yerleştirilen bir bek aleviyle 80 kW/mm ani ısı akış yoğunluğuna maruz bırakılmıştır. Numune katmanından geçen ısı, astar kumaşın arka yüzeyine temas eden küçük bir bakır kalorimetre vasıtasıyla ölçülmüştür. Kalorimetrede $24 ^\circ\text{C}$ 'lık bir sıcaklık artışı meydana getirmek için gerekli zaman saniye cinsinden bilgisayar vasıtasıyla otomatik olarak kaydedilmiştir. Her üçlü numune seti için ısı transfer indeksi hesaplanmıştır.

4.2.3 Radyan ısı testi EN ISO 6942

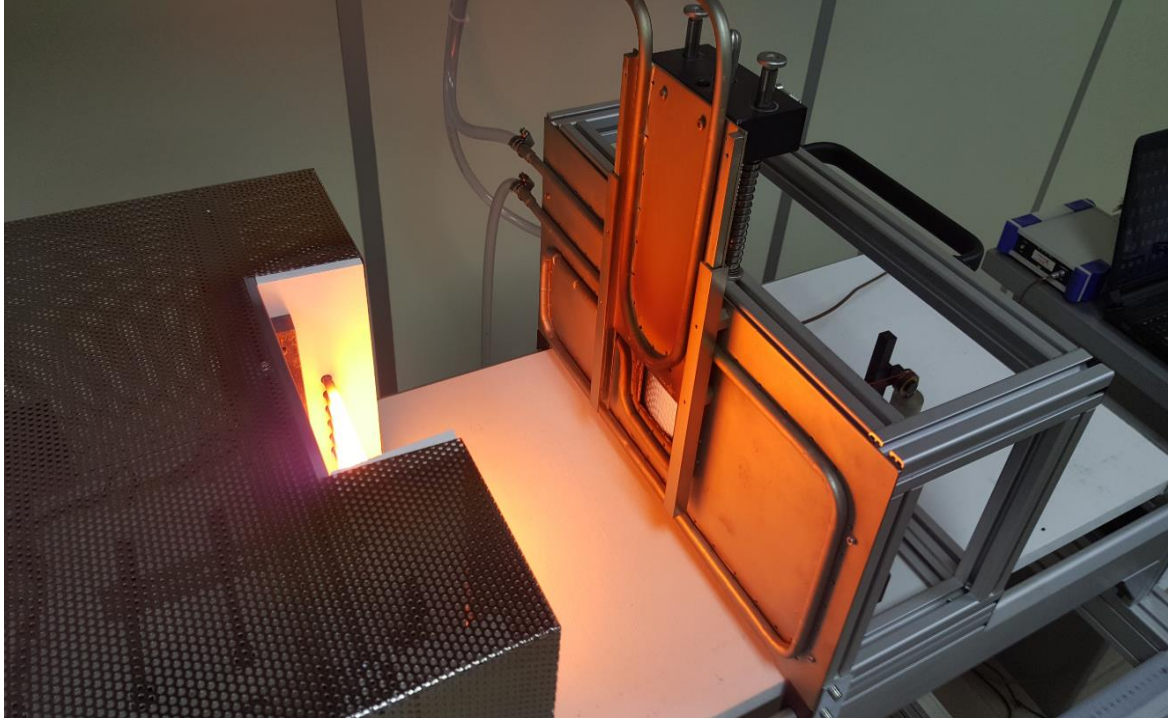
Radyan ısı testi koruyucu giyecekler - ısı ve yangına karşı koruma testidir. Işıma yoluyla yayılan ısı kaynaklarına maruz kalındığında malzeme ve malzeme

birleşimlerinin değerlendirilmesi EN ISO 6942:2002 standardına göre aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Deney öncesinde 230x70 mm boyutlarında 90 adet numune $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve $\% (65 \pm 2)$ 'lik bağıl nemde 24 saat süreyle kondisyonlanmıştır. Radyan ısı testi, standartta belirtildiği gibi numuneler kondisyonlanmış ortamdan alındıktan sonra 3 dakika içerisinde başlamıştır. Deney, hava akımı olmayan bir ortamda, kalorimetre ile kaydedilen ısıma yoluyla ısı ışıınımı üretebilen başka herhangi bir sistem olmayan ortamda, $24 ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Yatay yönlendirilmiş test numunesi, dar kenarların birisinden kelepçe vasıtasıyla numune taşıyıcının bir kenarındaki levhaya tutturulmuştur. Numunenin diğer dar kenarı diğer kenar levhası üzerine çekilmiş ve 2 N'lık kuvvetle gergin olacak şekilde tutturulmuştur.

Hareketli perdenin açılmasıyla ısıma yoluyla ısı yayılımının başlangıcı bilgisayar tarafından otomatik olarak kaydedilmektedir (bkz. Şekil 4.8). Deneyde ısı akışı 20 kW/m^2 'dir. Hareketli perde $30 ^\circ\text{C}$ sıcaklık artışı elde edildikten sonra kapalı duruma getirilmiştir. Deney sonucunda bilgisayar üzerinden t_{12} süresi ($12 ^\circ\text{C}$ sıcaklık artışı için geçen süre) ve t_{24} süresi ($24 ^\circ\text{C}$ sıcaklık artışı için gereken süre) belirlenmiştir ve t_{24} ile t_{12} arasındaki fark hesaplanıp kaydedilmiştir.



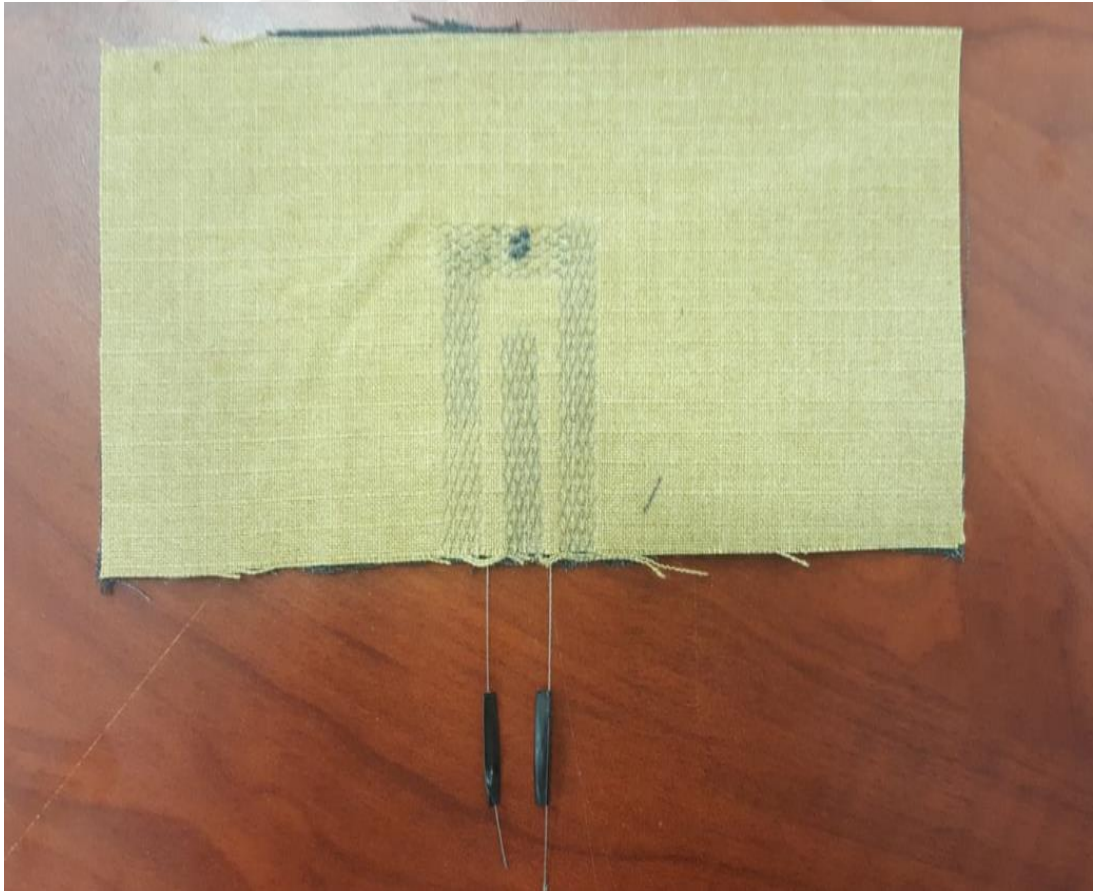
Şekil 4.8: Radyan ısı testine göre numunenin test edilmesi.

4.3 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı E-tekstil Yapısının Oluşturulması

Sandviç tipi elektronik tekstil yapısı oluşturmak için NUCLEUS ROTOSONIC V4E modeli ultrasonik kaynak dikiş makinesi ve konvansiyonel dikiş makinesi olarak JUKI LZ-2290A elektronik programlı zigzag dikiş makinesi ve H&H marka sıcak hava kaynak dikiş makinesi kullanılmıştır.

İletken iplikler radyan ısı testi için 20 cm boyunda, konvektif ısı testi için 30 cm boyunda ve sınırlandırılmış alev sıçraması testi için 40 cm boyunda olacak şekilde hazırlanmıştır. İletken iplikler, astar kumaşıyla dış kumaş arasında olacak şekilde sandviç yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır.

Ultrasonik kaynak dikiş tekniğiyle hazırlanan numunelere ait görsel Şekil 4.9’de gösterilmektedir. Ultrasonik kaynak dikiş tekniğiyle astar kumaşı, dış kumaş ile birleştirmek için güç, basınç ve hız olmak üzere üç farklı parametre incelenmiştir. Parametre değerleri değiştirilerek, ultrasonik kaynak dikiş tekniğiyle elektronik tekstil yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Değiştirilen parametre değerlerine göre bulgular Çizelge 4.4’te gösterilmektedir.



Şekil 4.9 : Ultrasonik kaynak dikiş makinesi ile hazırlanan numune.

Çizelge 4.4 : Ultrasonik kaynak dikiş tekniği ile farklı parametre değerleri altındaki bulgular.

Güç	Basınç	Hız	Bulgular
350	1	2	Katmanlar arası birleşme gerçekleşmedi.
350	2	2	Katmanlar arası birleşme gerçekleşmedi.
350	20	2	Katmanlar arası birleşme gerçekleşmedi.
400	2	2	Katmanlar arası birleşme gerçekleşmedi.
400	5	2	Katmanlar arası birleşme gerçekleşmedi.
400	7	2	Katmanlar arasında zayıf bir birleşme gerçekleşti.
400	9	2	Katmanlar arasında zayıf bir birleşme gerçekleşti.
400	20	2	Dış kumaş zedelendi, katmanlar arasında zayıf bir birleşme gerçekleşti.
400	25	2	Dış kumaş zedelendi, katmanlar arasında zayıf bir birleşme gerçekleşti.
400	25	1	Dış kumaş ve astar kumaşı zedelendi.
400	30	2	Dış kumaş ve astar kumaşı zedelendi.

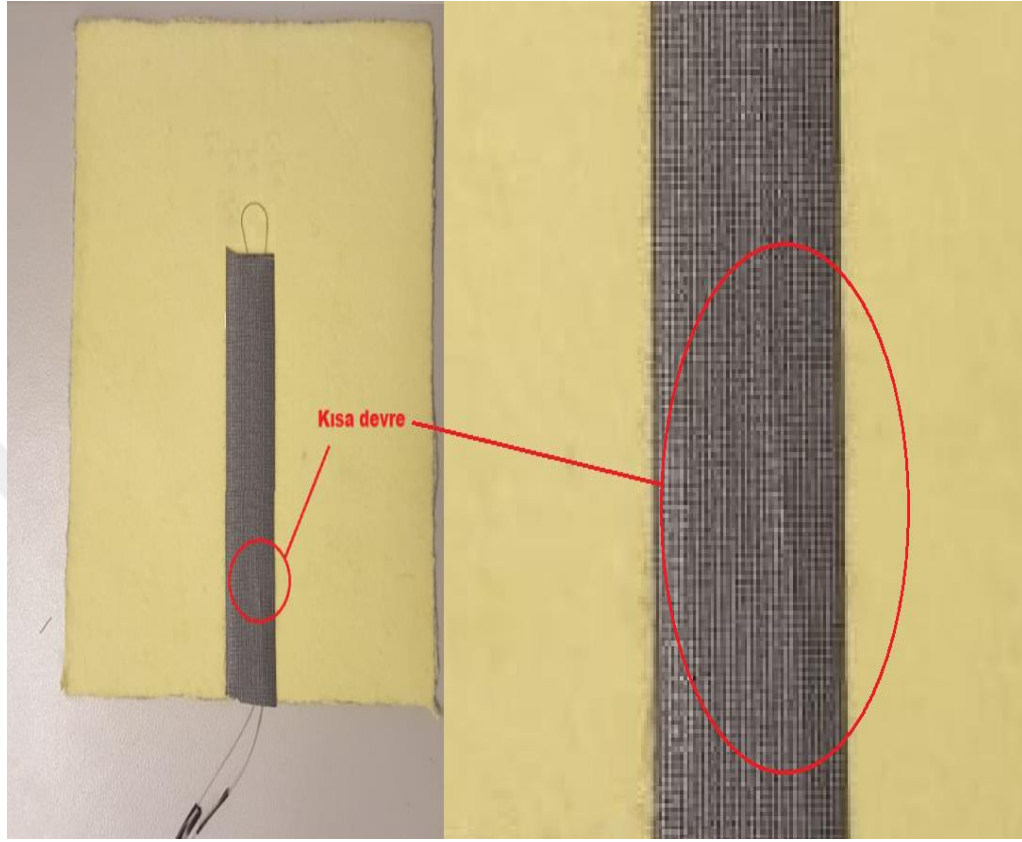
Yapılan çalışma sonucunda, stabil şekilde birleşme gerçekleştiği durumda, viskoz/aramid bazlı astar kumaşının deforme olduğu tespit edilmiştir. Ultrasonik kaynak dikiş tekniğiyle termoplastik özellikteki katmanlar birbirlerine rijit ve stabil şekilde bağ yapabilmektedir. Deneyde kullanılan PBI, aramid, alüminize kumaşların termoset özellikte olması sebebiyle ultrasonik kaynak dikiş tekniği kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Şekil 4.10’da aramid/viskoz karışımli astar kumaşın işlem sonrasında zedelendiği gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : Aramid/viskoz bazlı kumaşın ultrasonik kaynak dikiş işlemi sonrasında zedelenmesi.

Diğer yöntem olarak sıcak hava kaynak dikiş tekniği kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda (200-400 °C) ve farklı besleme hızlarında (2.5 – 9 ft/dk) numune kumaşlar ile çalışılmış olmasına rağmen, iletken ipliklerin yapı içerisinde oryante olamamasından ötürü oluşturulan yapıda kısa devreler ve dirençte ani sapmalar

meydana gelmiştir. Şekil 4.11’de yapı içerisinde iletken ipliğin birbirine temas ederek kısa devre yaptığı gösterilmektedir. Bu sebepten ötürü sıcak hava kaynak dikiş yöntemi çalışmadan elimine edilmiştir.



Şekil 4.11 : Sıcak hava kaynak dikiş yöntemiyle hazırlanan yapılarda iletken ipliklerin oryante olamaması sorunu.

Alternatif yöntem olarak iletken ipliği astar kumaşına sabitleyebilmek için zigzag dikiş makinası kullanılmıştır. Her test numunesi için ilgili uzunlukta hazırlanmış olan iletken iplikler, astar kumaş üzerine işaretlenmiş bölgeye zigzag dikiş yöntemiyle sabitlenmiştir. İletken iplik, iğnenin kumaş yüzeyine yatay eksendeki sağ ve sol batış noktalarının arasında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 4.12’de iletken ipliğin zigzag dikiş makinasıyla astar kumaşına dikilmesi gösterilmektedir. Zigzag dikişi sayesinde iletken iplik, meta-aramid malzemeden yapılmış dikiş ipliği ile astar kumaşı arasında kalmaktadır.

İletken iplik astar kumaşa sabitlendikten sonra, iletken ipliğin olduğu yüzey dış kumaşın arka yüzeyine denk gelecek şekilde, astar kumaşı ve dış kumaş birbirlerine dikilmiştir. Bu birleştirme şekliyle sandviç yapısı oluşturulmuştur ve iletken ipliklerin dış yüzeye doğrudan temas etmesi engellenmiştir.



Şekil 4.12 : Zigzag dikiş makinesi kullanılarak iletken ipliğin astar kumaşa sabitlenmesi.

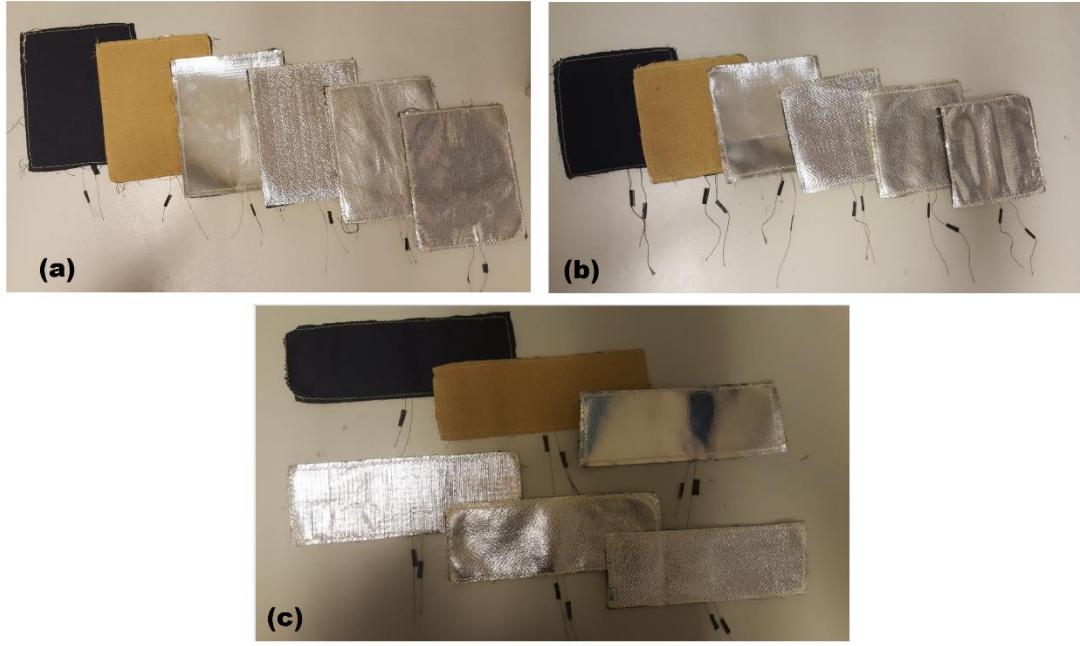
Şekil 4.13’de astar kumaşa iletken ipliğin dikileceği hattın işaretlenmesinden başlayarak, iletken ipliğin astar kumaşa sabitlenmesi ve sonrasında astar kumaş ile dış kumaşın katman oluşturacak şekilde birbirlerine dikilmesi aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 4.13 : Konvansiyonel dikiş tekniğiyle e-tekstil yapısı oluşturma aşamaları.

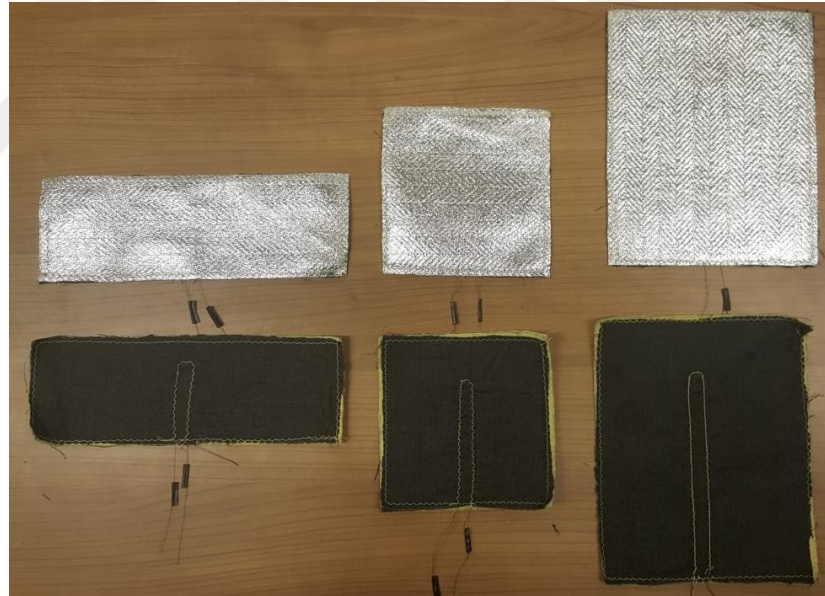
4.4 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklı Üretilen E-tekstil Numuneleri

Konvansiyonel dikiş yöntemiyle 90 adet sınırlandırılmış alev sıçraması testi, 90 adet konvektif ısı testi ve 90 adet radyan ısı testi için toplamda 270 adet numune hazırlanmıştır. Şekil 4.14a’da sınırlandırılmış alev sıçraması, Şekil 4.14b’de konvektif ısı ve Şekil 4.14c’de radyan ısı testi için hazırlanan farklı kumaşlar içeren örnek yapılar gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Isıl testler için hazırlanan e-tekstil numuneleri.

Hazırlanan numunelere ait önden ve arkadan görüntü Şekil 4.15’te gösterilmektedir.



Şekil 4.15 : Numunelerin ön ve arka tarafının görüntüsü.

4.5 Ölçüm Metotları

4.5.1 İletkenlik ve lineer direnç ölçümü

Çalışmada, ipliklerin iletkenliğini ölçmek için Keithley dijital multimetre kullanılmıştır. İplik örnek uzunluğu boyunca ölçüm yapılarak ipliklerin lineer direnci metre başına ohm (Ω / m) olarak hesaplanmıştır. İpliklerin direnç değeri 4-prob

teknikğine göre ölçülmüştür (bkz. Şekil 4.17). Örneğin; Çizelge 4.5, iplik numunesi 2 (paslanmaz çelik) için öz direnç hesaplarını göstermektedir.

Uzunluk ve ölçülen direnç değerleri kullanılarak Şekil 4.16 elde edilmiştir. İncelenen numunede, direnç değişkenini uzunluk değişkeniyle açıklayan doğrusal regresyon denklemi formül 4.1’de gösterilmektedir.

$$\text{Direnç (ohm)} = 0,6487 \times \text{uzunluk(cm)} + 0,045 \quad (4.2)$$

Özdirenç değerlerini hesaplamak için formül 4.2 kullanılmıştır.

$$\rho = \frac{R - Rc}{l} A \quad (4.2)$$

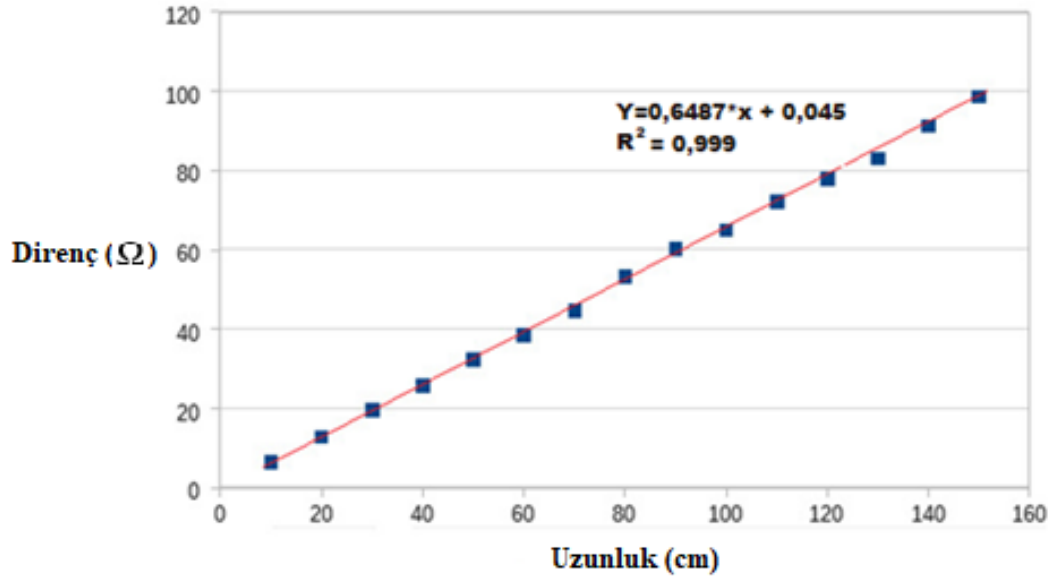
Bu formülde,

l değeri iletken ipliğin metre cinsinden uzunluğudur.

A değeri iletken ipliğin kesit alanının metrekare cinsinden değeridir.

Çizelge 4.5 : İletken ipliğin uzunluğa bağlı olarak lineer direnç değişimi.

Ölçüm	l (cm)	R(ohm)	RC	R-Rc	Özdirenç	Özdirenç
1	10	6,4508	0,045	6,4058	0,00081	0,08046
2	20	12,8157	0,045	12,7707	0,0008	0,0802
3	30	19,475	0,045	19,43	0,00081	0,08135
4	40	25,8158	0,045	25,7708	0,00081	0,08092
5	50	32,3345	0,045	32,2895	0,00081	0,08111
6	60	38,3971	0,045	38,3521	0,0008	0,08028
7	70	44,714	0,045	44,669	0,0008	0,08015
8	80	53,262	0,045	53,217	0,00084	0,08355
9	90	60,1778	0,045	60,1328	0,00084	0,08392
10	100	65,0423	0,045	64,9973	0,00082	0,08164
11	110	72,2354	0,045	72,1904	0,00082	0,08243
12	120	77,8694	0,045	77,8244	0,00082	0,08146
13	130	83,058	0,045	83,013	0,0008	0,0802
14	140	91,3157	0,045	91,2707	0,00082	0,08188
15	150	98,5492	0,045	98,5042	0,00083	0,08248
					0,00082	0,08147 Ortalama
					1,20E-05	0,0012 Standart Sapma



Şekil 4.16 : “İplik 2” için uzunluk-direnç grafiği.



Şekil 4.17 : 4-prob yöntemi kullanarak multimetre ile iletken ipliğin lineer direnç değerlerinin ölçülmesi.

4.5.2 Gürültü seviyesi tanımlama

Gürültü seviyesi (istenmeyen sinyal) ve gürültü genliği MATLAB'de sinyal işleme yöntemi ile belirlenmiştir. Sinyal-gürültü oranı (SNR), istenen sinyalin seviyesini arka plan gürültüsü seviyesine göre karşılaştıran bir ölçüdür. SNR, sinyal gücünün genellikle desibel cinsinden ifade edilen gürültü gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Sinyal gürültü oranı aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmiştir:

$$SNR = \frac{P_{sinyal}}{P_{gürültü}} \quad (4.3)$$

Sinyal ve gürültü aynı empedans boyunca ölçülürse, SNR, genlik oranının karesi hesaplanarak elde edilebilmektedir. Burada A, kök ortalama karesi genliğidir.

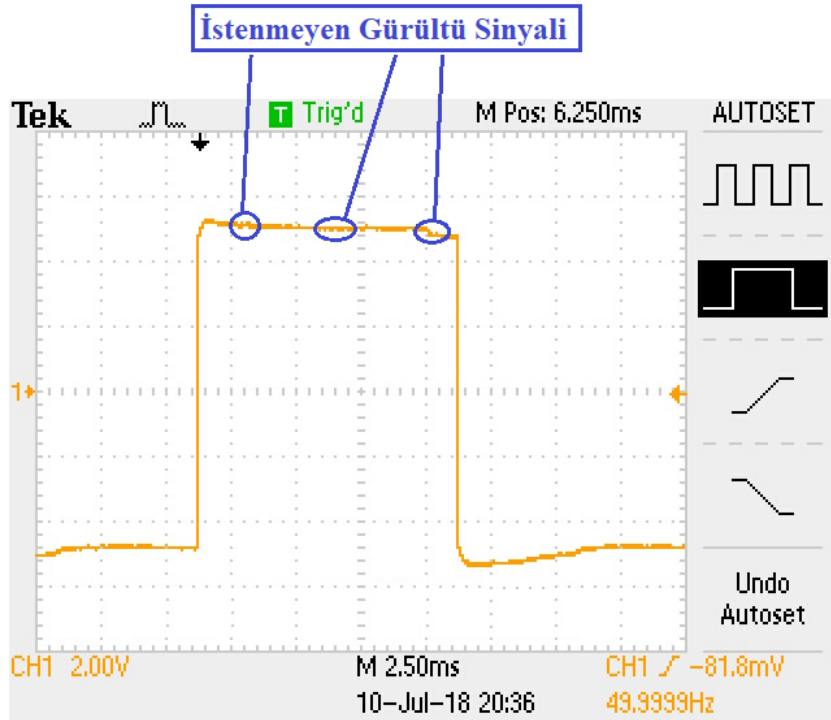
$$SNR = \left(\frac{A_{sinyal}}{A_{gürültü}} \right)^2 \quad (4.4)$$

Genel olarak, sinyal gürültü oranı logaritmik desibel ölçeğinde ifade edilir. Bu nedenle, her bir numunenin sinyal kalitesini ölçmek için, her bir numunenin değeri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [62].

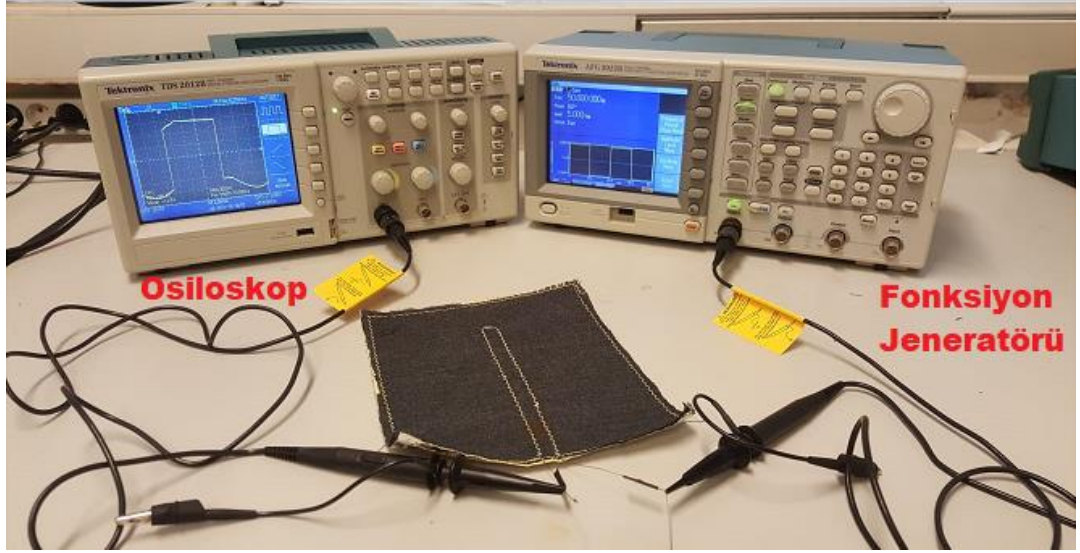
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinyal}}{P_{gürültü}} \right) = P_{sinyal_{dB}} - P_{gürültü_{dB}} \quad (4.5)$$

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{A_{sinyal}}{A_{gürültü}} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{sinyal}}{A_{gürültü}} \right) \quad (4.6)$$

Şekil 4.18, osiloskop tarafından kaydedilen sinyalin 50 Hz frekansında olduğunu göstermektedir. Fonksiyon Jeneratörü e-tekstil devresi için sinyaller oluştururken, sinyal kalitesini bulmak için sinyal görüntülerini kaydetmek amacıyla osiloskop kullanılmıştır. İletken iplikler ısı ve aleve maruz kaldıktan sonra ipliklerin üzerinden geçen sinyalin gürültü seviyesini belirlemek için, Textronix Function Generator AFG 3022B ve TDS 2012 B Şekil 4.19'da gösterildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.18 : Osiloskop tarafından 50 Hz frekansında kaydedilen sinyal.



Şekil 4.19 : Isıl test sonrası iletken ipliğin sinyal-gürültü seviyesinin belirlenmesi.



5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

Sandviç yapıda oluşturulmuş olan 6 farklı dış kumaş, 5 farklı iletken iplikten oluşan e-tekstil numuneleri Sınırlandırılmış alev sıçraması için EN ISO 15025:2016 standardında, konvektif ısı testi için EN ISO 9151:2016 standardında ve radyan ısı testi için EN ISO 6942:2002 standardında belirtilen test metotlarına göre işlem görmüştür. Test işlemleri KIVANÇ GROUP firması bünyesinde bulunan akredite laboratuvar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Sınırlandırılmış alev sıçraması testinde her bir kumaş-iletken iplik numunesi, dikey yanma testine tabi tutulmuş ve toplamda 90 adet numune incelenmiştir. Test sonucunda hiçbir numunede damlama ve delik oluşumu gözlemlenmemiş, hiçbir numune alevli veya kor yanmaya devam etmemiştir. EN ISO 15025:2016 standardına göre tüm numuneler “A1” koruma seviyesine sahiptir. Sınırlandırılmış alev sıçraması için test sonuçları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Numunelerin sınırlandırılmış alev sıçramasına karşı performans değerleri.

Kumaşlar	Kor Sönme Süresi (s)	Alev Sönme Süresi (s)	Damlama	Delik	Koruma Seviyesi
Numune 1	0	0	Yok	Yok	A1
Numune 2	0	0	Yok	Yok	A1
Numune 3	0	0	Yok	Yok	A1
Numune 4	0	0	Yok	Yok	A1
Numune 5	0	0	Yok	Yok	A1
Numune 6	0	0	Yok	Yok	A1

Numuneler EN ISO 15025:2016 standardı Prosedür A metoduna göre dikey yanma testine maruz kaldıktan sonra, yüzeyinde oluşan kömürleşmiş alanlara dair görsel Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

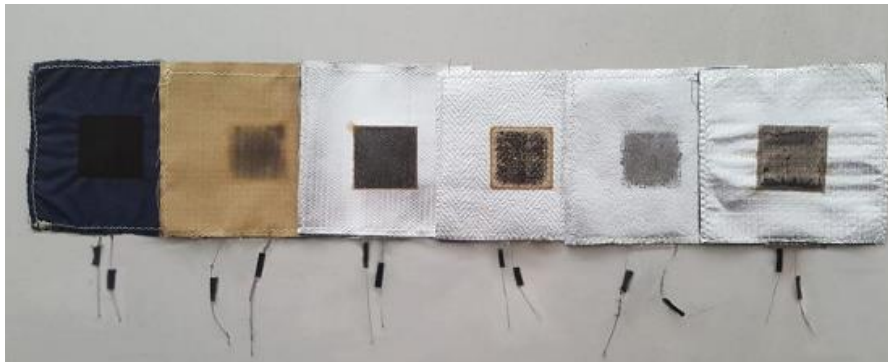
Numunelerin konvektif ısıya karşı koruma seviyesini değerlendirebilmek için EN ISO 9151:2016 standardında belirtilen test metoduna göre, her bir kumaş her bir iletken iplik için üç defa test edilmek üzere toplamda 90 numune test edilmiştir. Test sonucunda konvektif ısıya en dayanıklı kumaşın 7,9 saniyelik HTI₂₄ değeri ile 4 numaralı kumaş olduğu, 6 numaralı kumaşın ise HTI₂₄ değeri 4,9 saniye olduğu için

deney kapsamında seçilmiş yüksek sıcaklığa dayanıklı kumaşlar arasında konvektif ısıya karşı en düşük değere sahip kumaş olduğu gözükmemektedir. Deneyde kullanılan tüm katmanlar, ölçülen HTI_{24} sürelerine göre “B1” koruma seviyesine sahiptir. “B1” koruma seviyesi EN ISO 11612 – Isı ve alev karşı koruyucu giyecekler standardının asgari performans gerekliliklerini karşılamaktadır. Oluşturulan e-tektil yapısının konvektif ısıya karşı performans değerleri Çizelge 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda kumaşta meydana gelen kömürleşme.

Numunelerin radyan ısıya karşı koruma performansını tespit etmek için EN ISO 6942:2002 standardına göre test yapılmıştır. 6 farklı dış kumaştan oluşan elektronik tekstil yapısının, 3 farklı koruma seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Kumaş 1 ve Kumaş 2 içeren katmanların $RHTI_{24}$ değerinin 7 saniye ile 20 saniye arasında olduğu “C1” koruma seviyesine sahip olduğu, Kumaş 4 ve Kumaş 5 içeren katmanların $RHTI_{24}$ değerinin 50 saniye ile 95 saniye arasında olduğu için “C3” seviyesinde, Kumaş 3 ve Kumaş 6 içeren katmanlar ise test sonucunda ikinci seviye yanık oluşturmak için gereken sürenin 95 saniyeden fazlası olması dolayısıyla “C4” koruma seviyesine sahip olduğu bilgisi elde edilmiştir. Çizelge 5.3’de numunelerin radyan ısıya karşı performans değerleri yer almaktadır.



Şekil 5.2 : Konvektif ısı testi sonrası numunelerin görseli.

Çizelge 5.2 : Numunelerin konvektif ısıya karşı performans değerleri.

HTI ₂₄ (s)																		
Kumaşlar	İplik 1			İplik 2			İplik 3			İplik 4			İplik 5			Sonuç (s)	Koruma Seviyesi	
	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test			
Kumaş 1	6,4	6,5	6,5	6,4	6,6	6,5	6,5	6,7	6,5	6,7	6,5	6,6	6,5	6,4	6,5	6,4	B1	
Kumaş 2	6,1	6,2	6,2	6,2	6,1	6,3	6,2	6,3	6,3	6,3	6,1	6,2	6,2	6,3	6,2	6,1	B1	
Kumaş 3	6,5	6,5	6,3	6,6	6,7	6,3	6,5	6,6	6,7	6,4	6,5	6,6	6,5	6,7	6,4	6,3	B1	
Kumaş 4	7,9	8,2	8,1	8	8,2	8	8,2	8,3	8,1	7,9	8,1	8,2	8,2	8,1	8,2	7,9	B1	
Kumaş 5	7,6	7,8	7,9	7,6	7,8	7,7	7,7	7,9	8	7,8	7,7	7,9	7,8	7,6	7,7	7,6	B1	
Kumaş 6	5,2	5,3	4,9	5,4	5,4	5,3	5,2	5,3	4,9	5,2	5,2	5,3	5,1	5,3	5	4,9	B1	

Çizelge 5.3 : Numunelerin radyan ısıya karşı performans değerleri.

RHTI ₂₄ (s)																	
Kumaşlar	İplik 1			İplik 2			İplik 3			İplik 4			İplik 5			Sonuç (sn)	Koruma Seviyesi
	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test	1. test	2.test	3.test		
Kumaş 1	12,2	11,7	12,3	12,5	11,9	12,1	12,4	11,8	12,2	12	12,5	12,3	12,1	12,2	12,4	11,7	C1
Kumaş 2	15,5	16,4	15,8	16,5	16,3	15,7	16,1	15,5	15,9	16,4	16,2	16,1	15,9	15,7	15,6	15,5	C1
Kumaş 3	175,7	139,3	138,9	157,6	160,9	164,5	145,1	153,8	148,5	174,6	146,2	156,3	149,9	170,3	163,8	138,9	C4
Kumaş 4	92,5	87,6	88,4	88,4	89,1	87,7	87,9	91,4	90,7	91,6	92,4	88,6	87,6	88,5	87,9	87,6	C3
Kumaş 5	85,6	79,5	82,4	85,4	81	82,4	82,9	83,2	84,1	79,8	83,6	82,1	82,7	83,3	80,6	79,5	C3
Kumaş 6	166,6	203,7	199	176,6	178,1	195,4	188,6	183,4	181,2	168,4	177,8	169,1	172,9	174,3	181,5	166,6	C4

Çalışmada istatistiksel analiz IBM SPSS 21 istatistik programı kullanarak yapılmıştır. Kumaş türlerinin (6) ve iplik türlerinin (5) ortalama lineer direnç değişimleri açısından birbirlerinden anlamlı derecede farklı olup olmadıkları “varyans analizi (ANOVA)” yöntemiyle araştırılmıştır. ANOVA test istatistiğinin uygulanabilirliği 3 temel varsayımı içermektedir. Bunlar ana kütle dağılımının normal dağılım oluşu, ana kütle varyanslarının homojenliği ve değişkenlerin birbirlerinden bağımsız olması gerekliliğidir [63]. Normallik varsayımının sağlanmadığı koşullarda bu varsayımı içermeyen bir test istatistiği olan “Kruskal-Wallis H Test” istatistiğine başvurulmuştur. Anlamlı farklılık tespit edildiği durumlarda bu farklılığın hangi gruptan veya gruplardan kaynaklandığının tespitinde çoklu karşılaştırma yöntemi olan “Bonferroni”, “Scheffe” veya “Tamhane” test istatistiği uygulanmıştır.

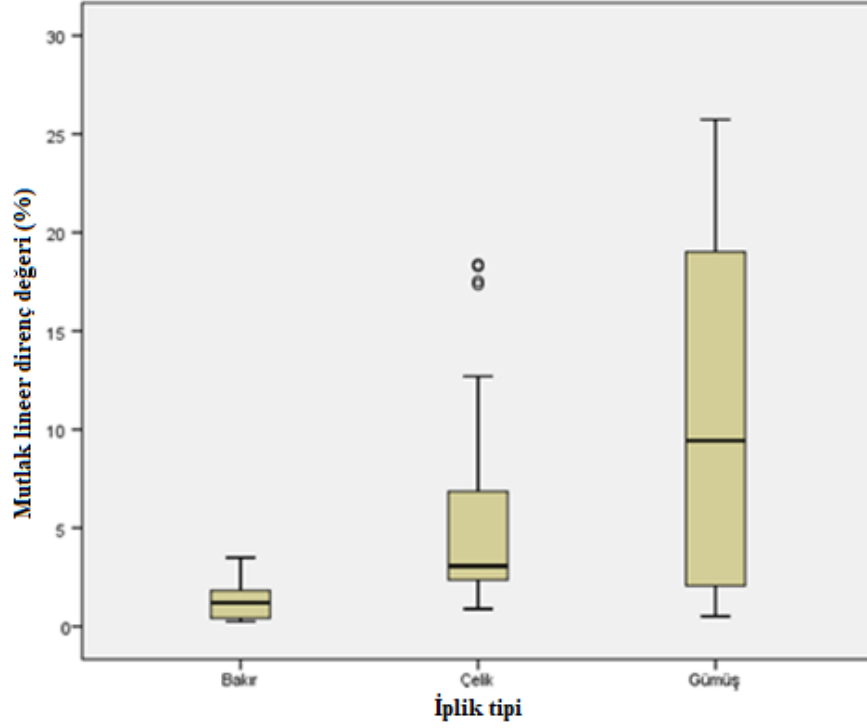
5.1 Sınırlandırılmış Alev Sıçraması Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

EN ISO 15025:2016 standardına göre deneyde 6 farklı kumaş ve 5 farklı iletken iplikten oluşan toplamda 90 adet numune hazırlanmıştır. Multimetre kullanılarak deney öncesinde tüm numunelerin lineer direnç değerleri kayıt edilmiştir. Numuneler sınırlandırılmış alev sıçraması testi kapsamında aleve maruz kaldıktan sonra, iletken ipliklerin direnç değerlerinde farklılık olup olmadığını gözlemlemek için tekrardan multimetre ile ölçüm yapılmıştır. Multimetre ile yapılan test öncesi ve test sonrası ölçüm değerleri, iletken ipliğin önceden belirlenmiş noktasından elde edilmiştir. Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için ölçüm yapılan iletken iplik uzunluğu 40 cm’dir. Sonuçlar, 1 metre uzunluğa normalize edilmiştir. Test sonrasındaki lineer direnç değişimi oranları Çizelge 5.4’te detaylıca belirtilmiştir.

Test sonrasında yapılan ölçümlerde bazı iletken ipliklerde kopma meydana geldiği gözlemlenmiştir. 4 numaralı ipliğin sadece 3 numaralı kumaştan oluşan katmanda koptuğu tespit edilirken, 5 numaralı ipliğin Kumaş 2, Kumaş 3, Kumaş 4 ve Kumaş 6’da deforme olarak probler arasında elektriği iletmediği bulgusuna varılmıştır.

İplik tiplerine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Grafiğe göre bakır ve gümüş iplerin birbirlerine benzer biçimli dağılımlardan geldikleri görülse de gerek medyan gerekse kartil aralığı parametreleri açısından gümüş ipliklerin çok daha düşük performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Çelik ipliklere ilişkin verilerin dağılımı ise bunlardan ayrık bir biçime sahiptir. Çelik iplikler her ne kadar gümüş ipliklere oranla yüksek performans göstermiş olsalar da, bakır ipliklerden daha yüksek medyan ve kartil aralığı parametrelerine sahip oldukları görülmektedir.



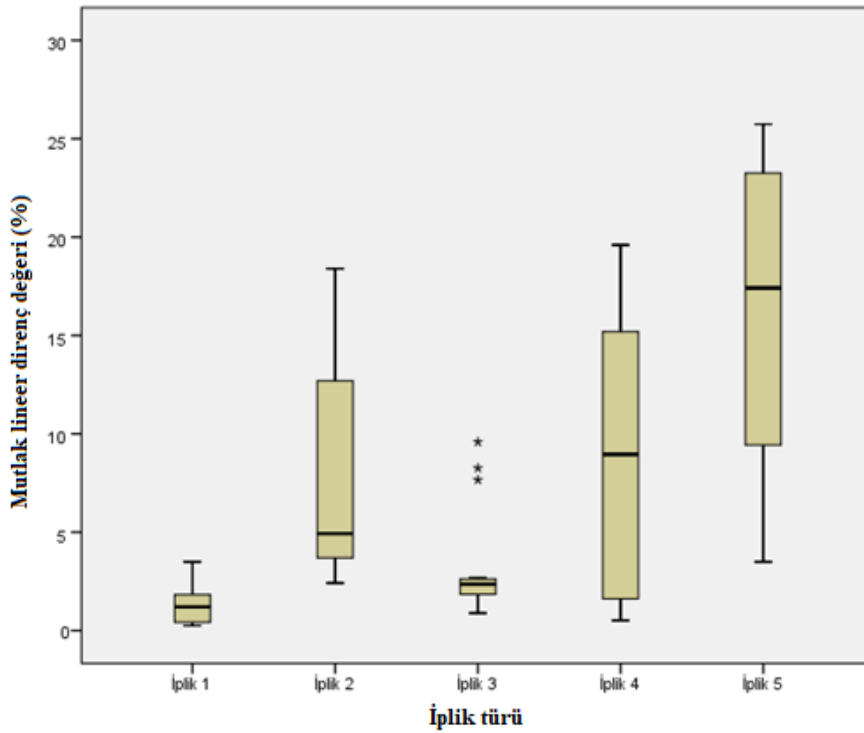
Şekil 5.3 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.

ANOVA varsayımlarının sağlanıp sağlanmadığını belirlemek için veriye normallik testi uygulanmıştır. Test sonuçları (bkz. EK 1 ve EK 2) neticesinde verinin normallik varsayımını sağlamadığı görülmüş olup, araştırma için kullanılacak test istatistiğinin Kruskal-Wallis H Testi olmasına karar verilmiştir. Yapılan araştırma sonucu (bkz. EK 3) en az bir iplik türünün ortalama mutlak lineer direnç değişimi açısından bir diğerinden anlamlı derecede farklılık gösterdiği saptanmıştır.

Çoklu karşılaştırma testleri neticesinde (bkz. EK 4) İplik 5'in İplik 4 hariç diğer tüm ipliklerden anlamlı derecede farklılıklar gösterdiği saptanmaktadır. Buna karşın İplik 3'ün İplik 5 hariç hiçbir iplikten ortalama mutlak lineer direnç değişimi açısından anlamlı derecede farklı olduğuna dair bir bulguya rastlanmamıştır. İplik 1, İplik 3 hariç tüm ipliklerden anlamlı derecede farklılık gösterirken, aynı zamanda en düşük ortalama ve varyans değerlerine sahip bu ipliğin performans açısından İplik 3 ile birlikte en iyi performansa sahip iplik olduğu görülmektedir. İplik 4 haricinde tüm

iplerden anlamlı derecede farklılık gösteren İplik 5'in ise İplik 4 ile birlikte anlamlı derecede düşük performans göstermiş olduğu tespit edilmiştir.

Kullanılan iletken iplikler için mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği (Şekil 5.4) incelendiğinde, İplik 1 ve İplik 4'ün medyan etrafında benzer dağılım gösterdiği gözükmemektedir. Şekil 5.3'de de belirtildiği gibi gümüş iplikler (İplik 4 ve İplik 5), bakır ve çelik ipliklere göre daha yüksek medyan değerine ve kartil aralığına sahiptir. İplik 1 ve İplik 3 dağılımları çarpıklıklar bakımında birbirine aksi yönde bir eğilim göstermiştir. Çelik iplikler arasında İplik 3, İplik 2'ye göre daha stabil sonuçlar sunmaktadır.

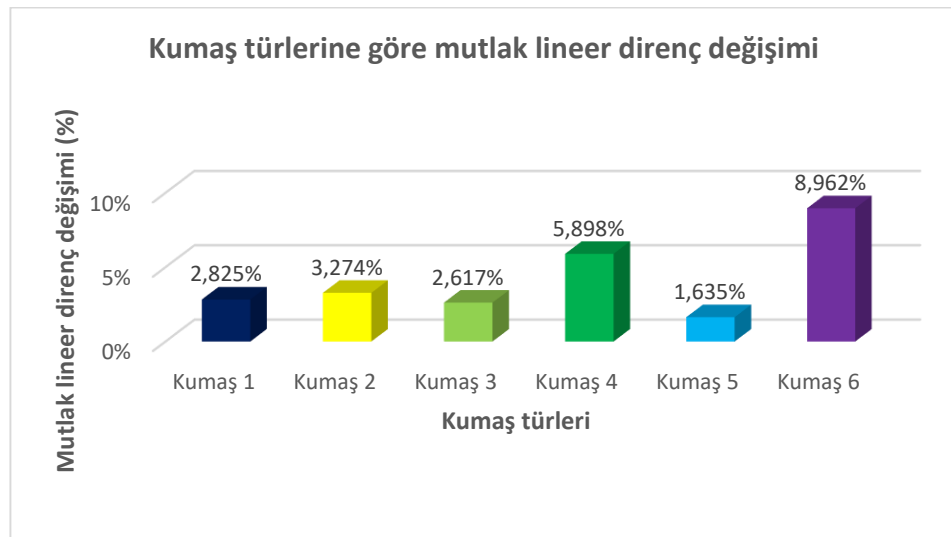


Şekil 5.4 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türüne göre lineer direnç değişimi kutu-bıyık grafiği.

Isıl testler sonrası gümüş ipliklerde bazı kumaş türleri için kopma meydana geldiğinden, yapılan istatistik analizlerinde veri kaybına sebebiyet vermiştir. İplik 4 için kayıp veri oranının %16.6, İplik 5 için ise %66.7 gibi çok yüksek bir oran olduğu görülmektedir. Sınırlandırılmış alev sıçraması testinin analizinde kayıp olan veriler Çizelge 5.4'te yer almaktadır. Kumaş türlerine dair analiz yaparken, lineer direnç değeri yüksek olan İplik 4 ve İplik 5 bazı kumaş türleri için kayıp gözleme sahip olmasından ötürü lineer direnç değişim oranını kayıp verilerin olduğu kumaş türleri lehine taraflı hale getirmektedir. Şekil 5.6a 'da gümüş ipliklerden (İplik 4 ve

İplik 5) gelen verilerin yer almış olduğu kumaş türüne göre lineer direnç değişimi gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere Kumaş 1 medyanı çok düşük olmasına rağmen çok yüksek kartil aralığına sahiptir. Bunun sebebi verilerin geneline uymayan çok yüksek gözlem değerlerine de sahip olmasıdır. İplik 4 ve İplik 5 değeri çıkartıldığında (bkz. Şekil 5.6b), Kumaş 1'in medyan değeri değişmemişken, kartil aralığı kayda değer küçülmüştür. Medyan değerinin değişmemesi, medyanın robust bir ortalama ölçütü olmasıdır. Benzer bir durumun kayıp gözlem içermeyen Kumaş 5 için de olması beklenirken, böyle bir durum görülmemiştir. Sebebi ise Kumaş 5'in gümüş iplikler içeren kutu-bıyık grafiğinde, İplik 4 ve İplik 5'ten gelen yüksek ortalama değerine sahip verilerin aykırı gözlem olarak tespit edilmiş olmasıdır. Kumaş 4 ve Kumaş 6'ya dair kutu-bıyık grafiklerine bakıldığında, çok ciddi bir performans kaybı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, kayıp olan gözlemlerin bu iki değişkenin lehine yarattığı taraflılıktan kaynaklanmaktadır. Bu iki ipliğe dair veriler araştırmadan çıkartıldığında, Kumaş 4 ve Kumaş 6 için olan bahsi geçen taraflılık ortadan kalkmaktadır.

Kumaş türleri arasında lineer direnç değişimi değerleri açısından anlamlı bir farklılık olduğu savı $\alpha = 0,05$ önem düzeyinde istatistiksel olarak desteklenememiştir (bkz. EK 6). Gümüş iplikler analizden çıkartıldıktan sonra kumaş türlerine göre mutlak lineer direnç değişim oranları incelendiğinde (bkz. Şekil 5.5) Kumaş 5'te en az oransal değişimin (%1.635) gerçekleştiği görülmektedir. Kumaş 6 ise %8,962'lik değişim ile en fazla değişimin gerçekleştiği kumaştır.

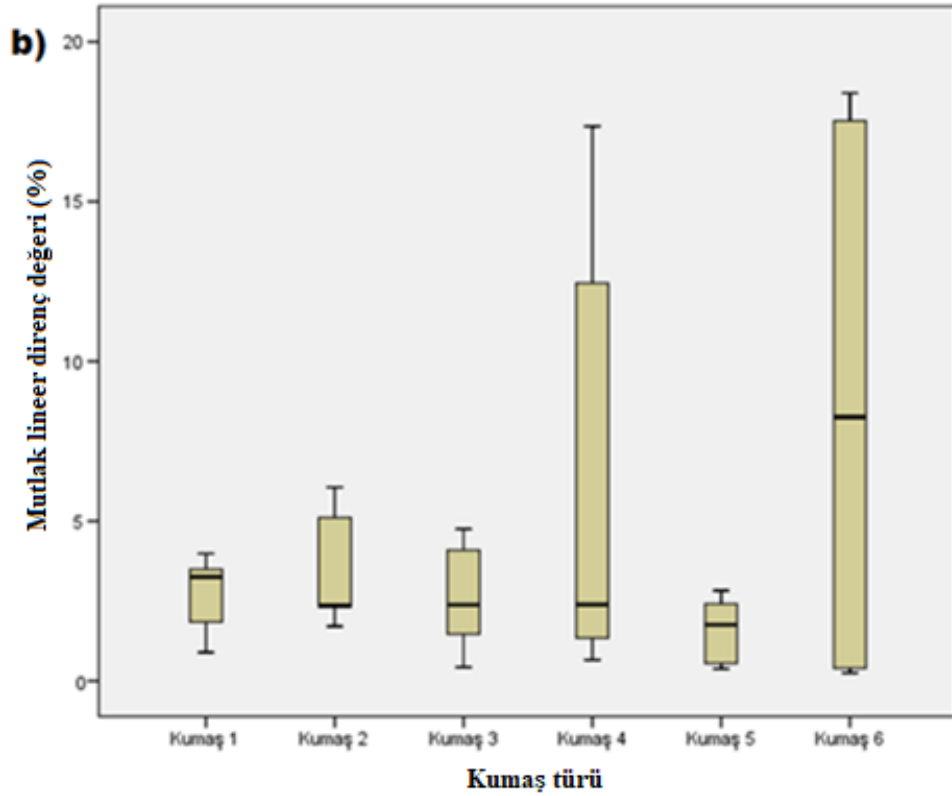
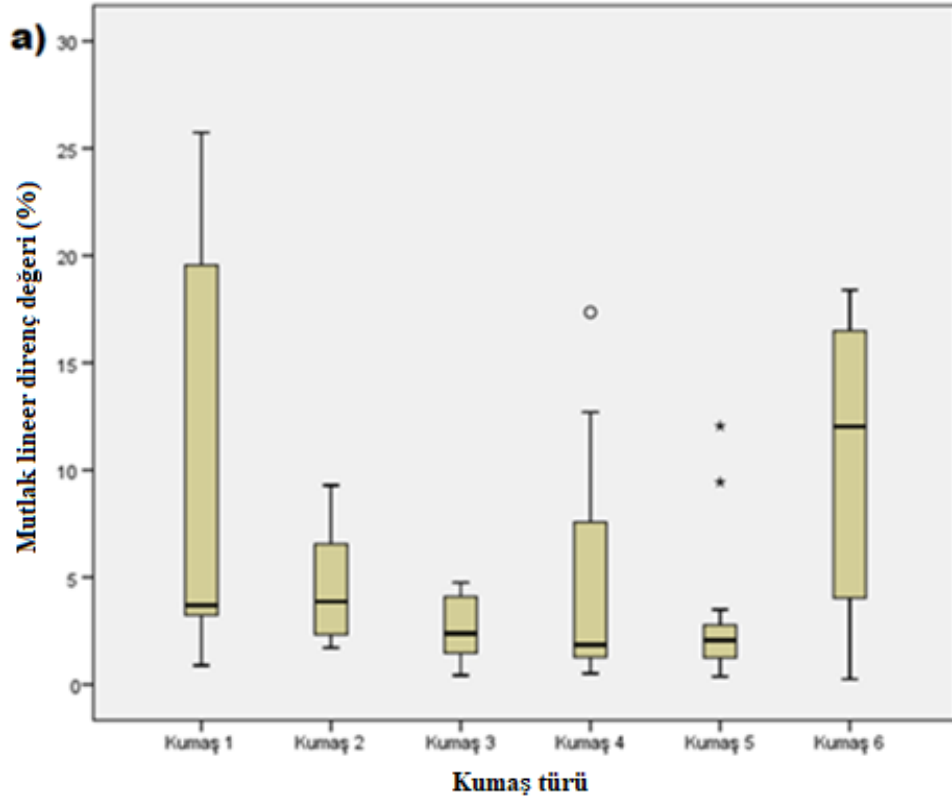


Şekil 5.5 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

Çizelge 5.4 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%).

	Kumaş 1				Kumaş 2				Kumaş 3			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	3,221	3,496	3,252	3,323	2,342	1,704	1,826	1,957	0,428	1,109	1,465	1,001
İplik 2	3,982	3,696	3,297	3,658	5,129	5,108	6,061	5,433	4,376	4,092	4,752	4,407
İplik 3	1,750	1,843	0,889	1,494	2,362	2,621	2,314	2,432	2,357	2,378	2,601	2,445
İplik 4	19,502	19,019	19,596	19,372	9,288	8,952	7,041	8,427	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk
İplik 5	22,780	23,259	25,738	23,926	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk

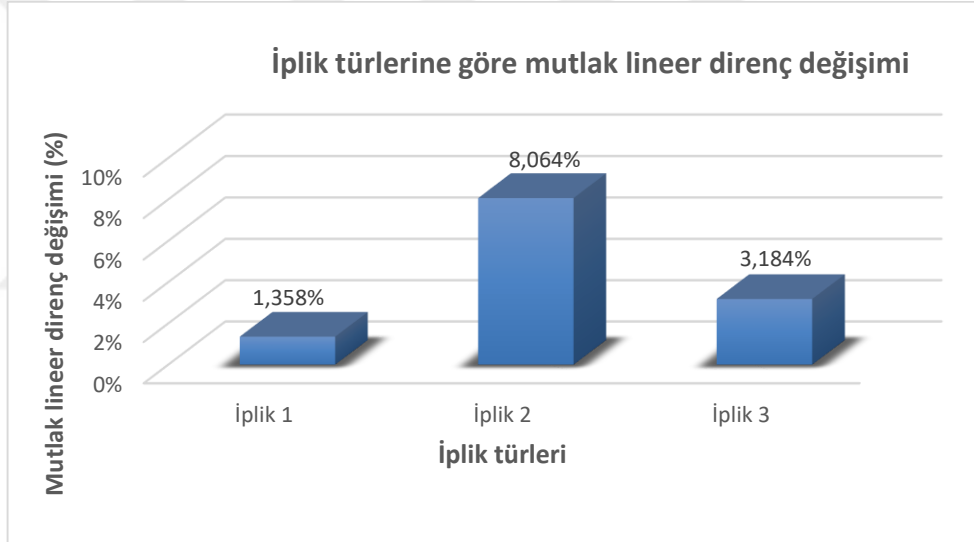
	Kumaş 4				Kumaş 5				Kumaş 6			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	0,657	1,292	1,343	1,097	0,421	0,373	0,547	0,447	0,395	0,247	0,321	0,321
İplik 2	12,449	12,701	17,355	14,168	2,411	2,728	2,825	2,655	18,274	17,529	18,393	18,066
İplik 3	2,696	2,385	2,203	2,428	1,757	2,207	1,444	1,803	9,588	7,655	8,255	8,499
İplik 4	1,505	1,237	0,510	1,084	1,065	1,721	2,060	1,615	14,938	14,472	15,446	14,952
İplik 5	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	3,494	9,432	12,047	8,324	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk



Şekil 5.6 : a) Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği. b) Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği.

Tüm kumaş türleri için direnç değeri ölçülebilen iplikler arasında bakır olan İplik 1, %1,358 oranındaki mutlak lineer direnç değişim ile en yüksek performansı gösterirken, sırasıyla %8,064 ve %3,184 değişim oranları olan İplik 2 ve İplik 3 (çelik iplikler) daha düşük performanslar göstermiştir (bkz. Şekil 5.7). Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türleri arasında en yüksek performansı sergileyen ipliklerin İplik 1 ve İplik 3 olduğu istatistiksel olarak tespit edilmiştir.

Bu test kapsamında, bakır olan İplik 1 için ise en uygun kumaş türlerinin alüminize içerikli Kumaş 5 (%0,447) ve Kumaş 6 (%0,321) olduğu gözlemlenirken, en düşük performans ise vizkoz/aramid karışımı Kumaş 1 (%3,323) ile bulunmuştur (bkz. Çizelge 5.4). Kumaş 1 ise en yüksek performansı İplik 3 (%1,494) ile göstermektedir. Bu aynı zamanda, İplik 3'ün kumaşlar ile eşleşmeleri arasındaki en yüksek performanstır.



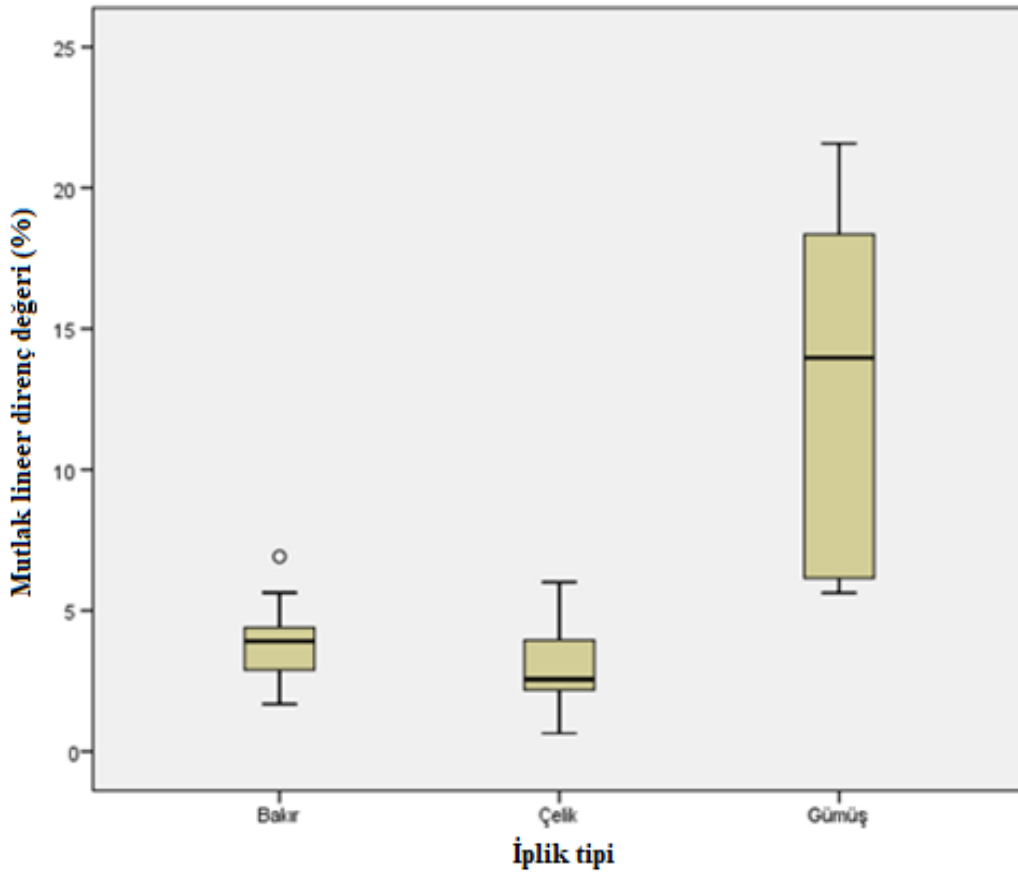
Şekil 5.7 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

5.2 Konvektif Isı Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Konvektif ısı testi, EN ISO 9151:2016 standardında belirtilen test metoduna 6 farklı kumaş ve 5 farklı iletken iplikten oluşan toplam 90 adet numuneye uygulanmıştır. Numunelerin direnç değerleri multimetre ile test öncesinde ve test sonrasında ölçülmüştür. Konvektif ısı testi için ölçüm yapılan iletken iplik uzunluğu 30 cm'dir. Ölçüm sonrasında elde edilen veriler (bkz. Çizelge 5.6), 1 metre uzunluğundaki iletken ipliğe göre normalize edilmiştir.

İletken iplikler konvektif ısıya maruz kaldığında, gümüş kaplamalı poliamid ipliklerde (İplik 4 ve İplik 5) kopmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Multimetre ile 4-prob yöntemiyle yapılan ölçümlerde İplik 4'ün sadece Kumaş 5 için, İplik 5'in ise sadece Kumaş 1 ve Kumaş 5 için problar arasında elektriği ilettiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sadece Kumaş 5, tüm iplik türleri için sonuç vermiştir.

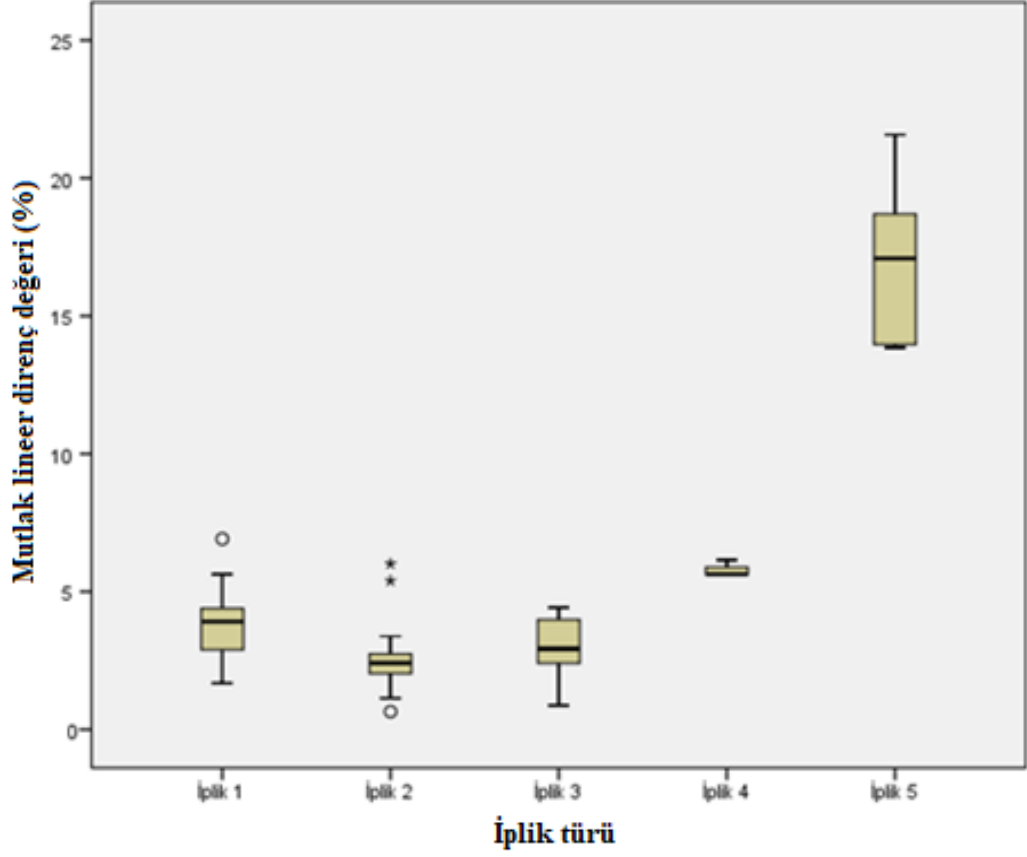
İplik tiplerinin kutu-bıyık grafiklerinden (bkz. Şekil 5.8) 3 farklı iplik türünün de benzer dağılımdan gelmediği gözükmemektedir. Gümüş ipliklerin medyan ve kartil aralıklarının bakır ve çelik ipliklere oranla yüksek olduğu gözükmemektedir. Bakır ve çelik ipliklerin dağılımları farklı yönlerde çarpıklık göstermektedir.



Şekil 5.8 : Konvektif ısı testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.

İplik türlerine ait kutu-bıyık grafikleri (bkz. Şekil 5.9) göstermektedir ki, İplik 5, diğer tüm ipliklere göre yüksek medyan değerine ve kartil aralığına sahiptir. İplik 4 için alt bıyık ve birinci kartilin görülmemesinin sebebi, veri sayısının kartillerin hesaplanması için yeterli sayıda olmamasından kaynaklanmaktadır. İplik 4'ün yer aldığı 6 farklı kumaş bileşeni için toplam 18 numune arasında, sadece 3 numunedan lineer direnç değeri ölçülebilmektedir.

Çoklu karşılaştırma testleri neticesinde (bkz. EK 9) gümüş ipliklerin (İplik 4 ve İplik 5) lineer direnç değişimi açısından $\alpha = 0,05$ önem düzeyinde tüm ipliklerden anlamlı derece farklı olduğu sonucuna varılmıştır. İplik 1, İplik 2 ve İplik 3 için iplikler arasındaki fark istatistiksel olarak desteklenememiştir.



Şekil 5.9 : Konvektif ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.

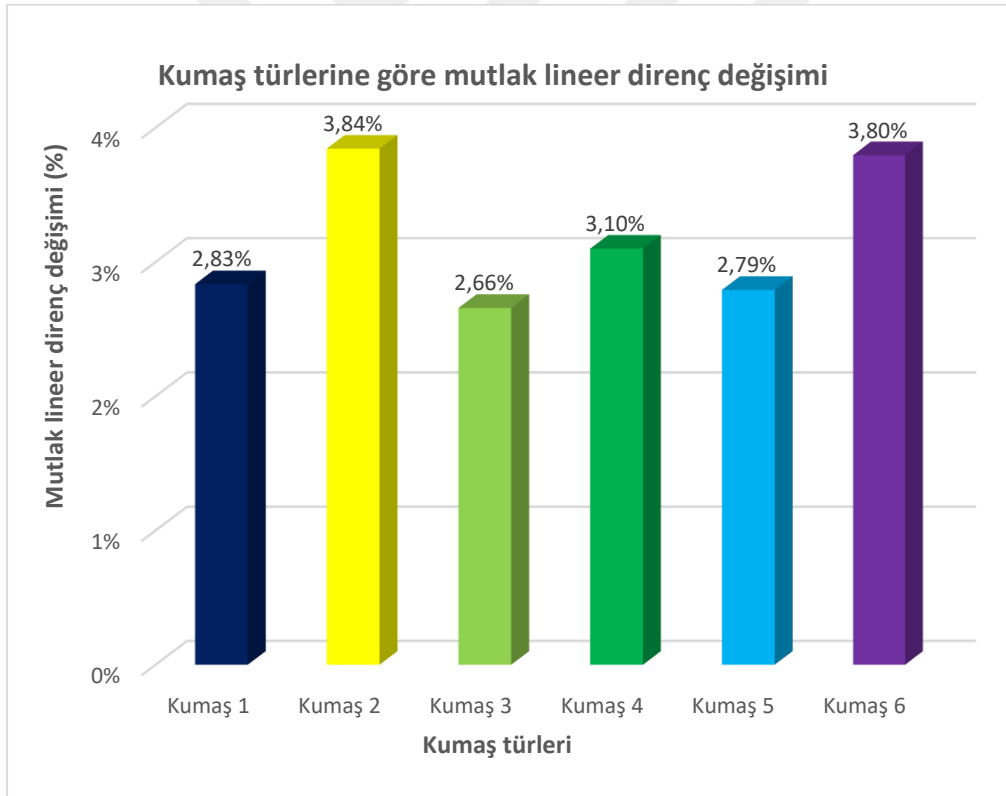
Konvektif ısı testi sonucunda mutlak lineer direnç değişimin kumaş türlerine göre olan kutu-bıyık grafiği Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Grafik sonucunda hiçbir kumaş için dağılımın benzer olmadığı görülmektedir. Şekil 5.11a'da deneyde kullanılan 5 ipliğe dair veri bulunurken, Şekil 5.11b'de gümüş iplikler kullanılmamıştır. Grafikler arasındaki farklılığa bakıldığında, İplik 4 ve İplik 5'in Kumaş 1 ve Kumaş 5'in medyan değerini değiştirmezken kartil aralıklarını arttırdığı gözükmemektedir.

Tabachnick ve Fidell yaklaşımıyla verilerin çarpıklık ve basıklığın değerinin $\pm 1,5$ aralığında olması sebebiyle verilerin normal dağılım gösterdiği varsayılmıştır. Varyans çözümlemesi sonucunda (bkz. Çizelge 5.5) kumaşlar arasında anlamlı bir farklılık savı desteklenememiştir.

Çizelge 5.5 : Konvektif ısı testinde kumaş türlerine göre varyans analizi.

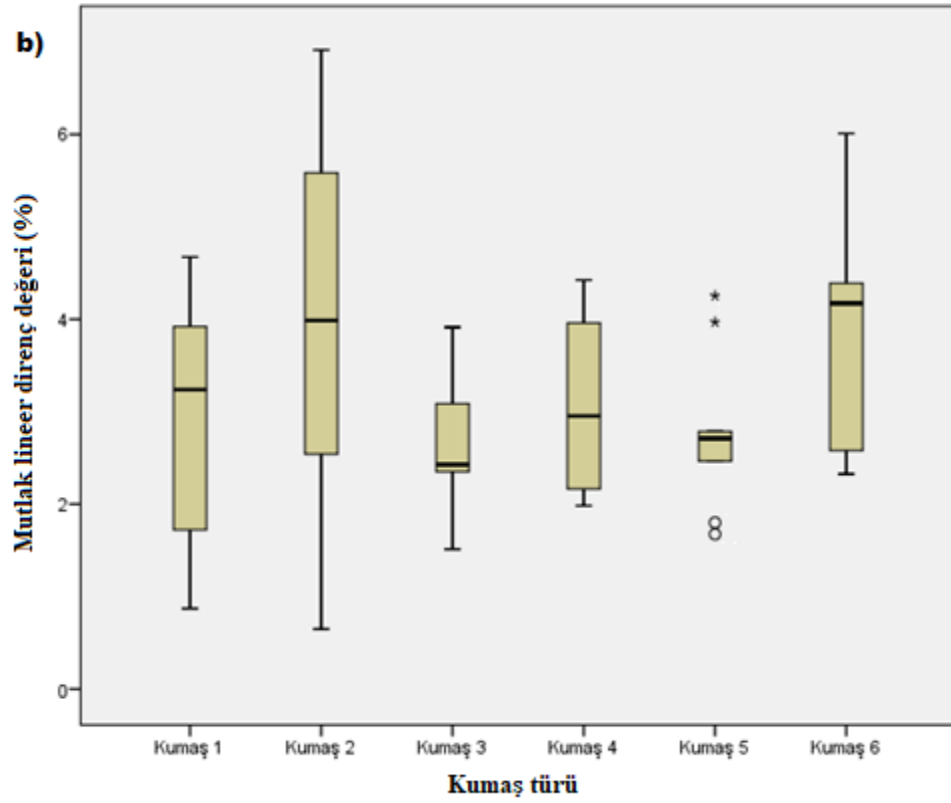
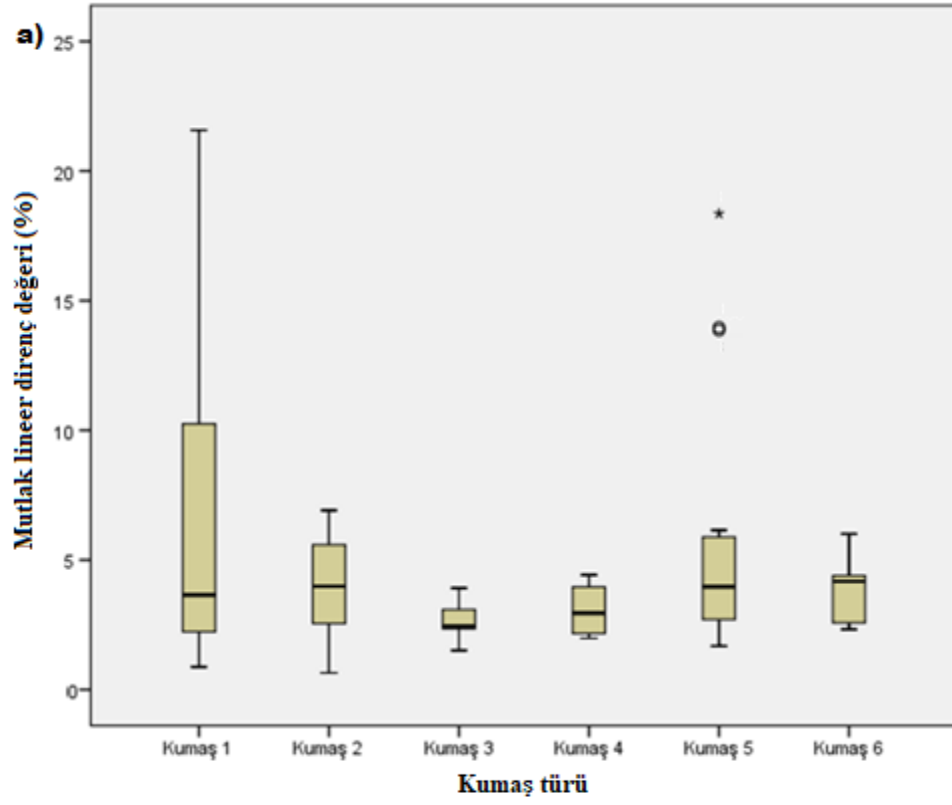
	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar arası	12,319	5	2,464	1,422	0,233
Gruplar içi	83,158	48	1,732		
Toplam	95,476	53			

Lineer direnç değişim değerleri açısından anlamlı bir farkın olup olmadığı Kruskal-Wallis H test istatistiği ile araştırılmıştır. Farklı kumaş türleri arasında direnç değerleri değişimi açısından $\alpha = 0,05$ için anlamlı düzeyde farklılık bulunduğu savı desteklenmemiştir. Araştırmada herhangi bir kumaş türünün, diğerlerine oranla daha iyi performans gösterdiği bulgusuna rastlanmamıştır. Kumaş 3 için direnç değerindeki değişim %2,66 iken, Kumaş 2’de bu oran sadece %3,84’tür (bkz. Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : Konvektif ısı testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

Çelik ve bakır iplikler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olmamakla beraber (bkz. EK 9), ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi % 2,62 ile % 3,84 arasında değişmektedir (bkz. Şekil 5.12).

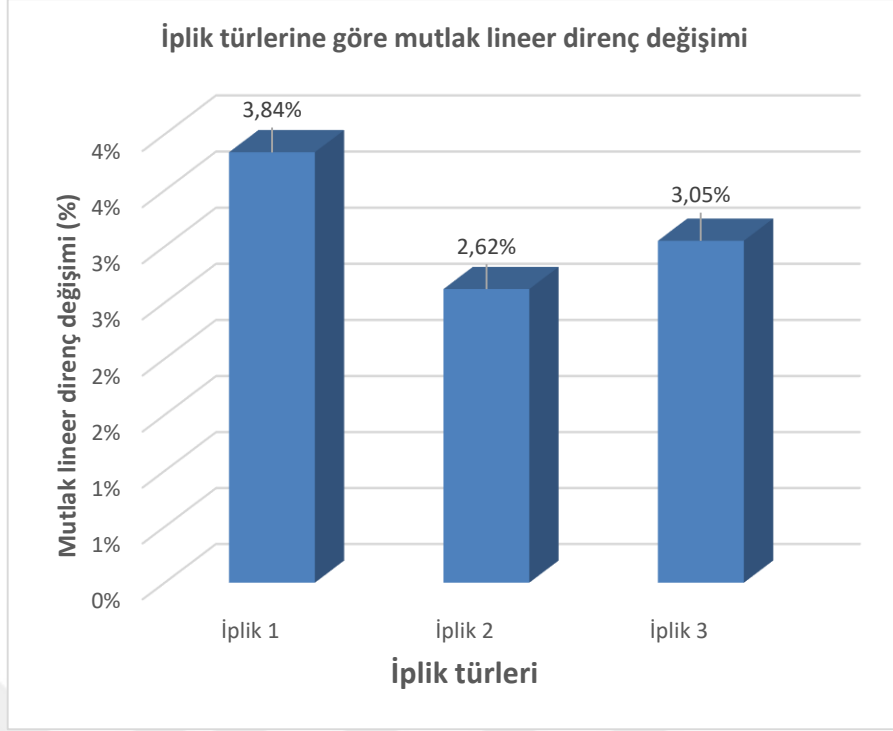


Şekil 5.11 : a) Konvektif ısı testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği. b) Konvektif ısı testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği.

Çizelge 5.6 : Konvektif ısı testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%).

	Kumaş 1				Kumaş 2				Kumaş 3			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	4,673	4,029	3,922	4,208	6,914	5,585	5,632	6,044	3,913	3,116	2,896	3,308
İplik 2	3,383	2,738	3,238	3,120	0,648	2,541	1,136	1,442	2,210	2,350	1,513	2,024
İplik 3	1,723	0,934	0,872	1,176	4,226	3,929	3,987	4,047	2,428	2,404	3,087	2,640
İplik 4	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk
İplik 5	15,819	21,575	18,695	18,696	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk

	Kumaş 4				Kumaş 5				Kumaş 6			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	2,955	3,457	1,983	2,798	2,710	1,675	2,787	2,391	4,305	4,172	4,390	4,289
İplik 2	2,165	2,026	2,515	2,235	1,800	2,465	2,704	2,323	5,396	6,010	2,337	4,581
İplik 3	4,423	4,410	3,961	4,265	2,762	3,970	4,255	3,662	2,579	2,326	2,643	2,516
İplik 4	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	5,630	5,625	6,146	5,801	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk
İplik 5	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk	13,969	18,357	13,854	15,393	kopuk	kopuk	kopuk	kopuk



Şekil 5.12 : Konvektif ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

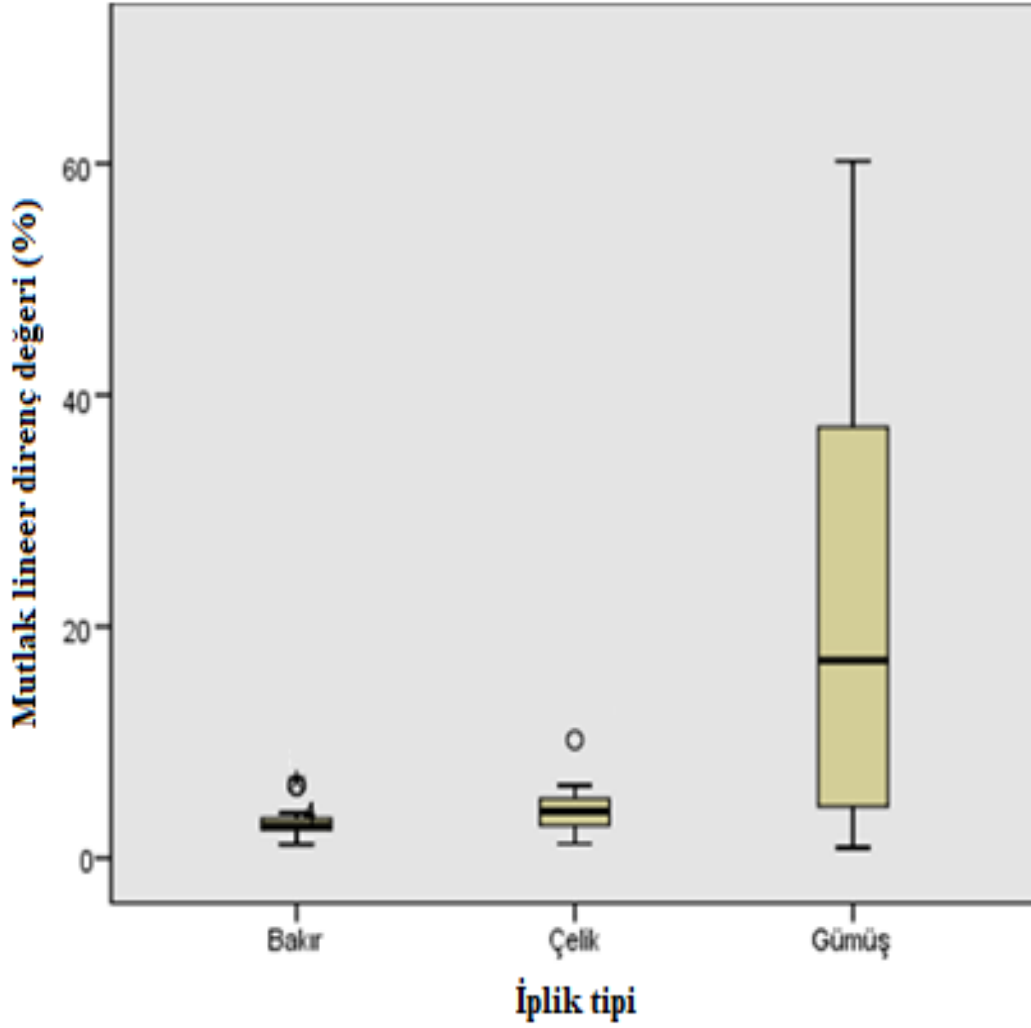
İplik 3, en yüksek performansını Kumaş 1 (%1,18) için gösterirken, bu aynı zamanda Kumaş 1 için tüm iplik türleri arasında en iyi sonuçtur. İplik 2 ise, buna ters olarak en düşük performanslarından birini Kumaş 1 için göstermektedir. İplik 2, en yüksek performansı %1,44'lük bir değişim gösterdiği Kumaş 2 içeren katmanda tespit edilmiştir.

5.3 Radyan Isı Testine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Numunelerin radyan ısıya karşı performans değerlerini tespit edebilmek için EN ISO 6942:2002 standardında belirtilen metoda göre farklı iletken iplik ve farklı kumaş bileşenlerinden oluşan toplam 90 adet numune test edilmiştir. Numunelerin test öncesi ve test sonrası direnç değerleri multimetre kullanarak ölçülmüştür. Radyan ısı testi için 20 cm uzunluğunda iletken iplikler kullanılmıştır.

İletken iplikler radyan ısıya maruz kaldığında, hiçbir numune için kopma meydana gelmemiştir. Multimetreden elde edilen veriler sonucunda iletken ipliklerin lineer direnç değerindeki mutlak değişim, Çizelge 5.7'de gösterilmektedir.

İplik tiplerine ait kutu-bıyık grafikleri Şekil 5.13'te yer almaktadır.



Şekil 5.13 : Radyan ısı testi için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.

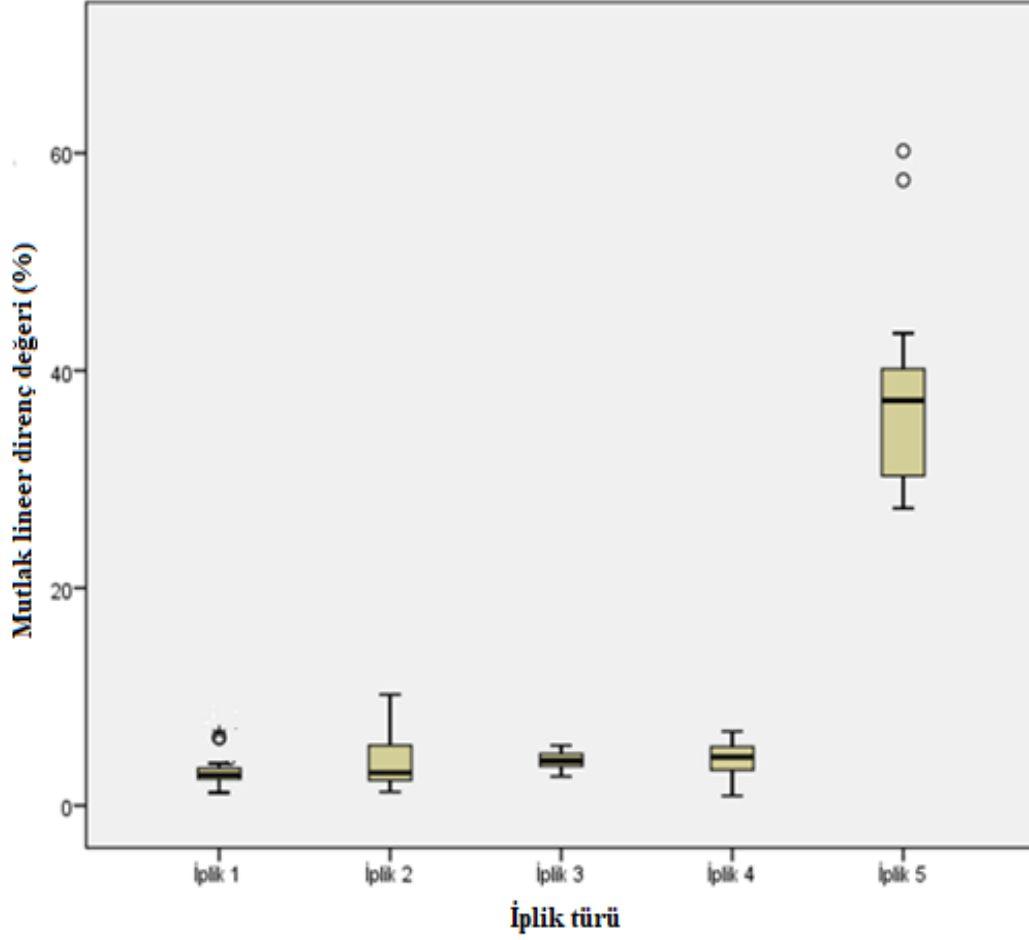
İplik tiplerine ilişkin kutu-bıyık grafikleri incelendiğinde verilerin benzer biçimlerdeki dağılımlardan gelmediği anlaşılmaktadır. Gümüş ipliklere ilişkin veriler ile diğer iplikler arasındaki fark o denli büyüktür ki bu ipliklere ilişkin birinci kartil değerinin bakır ipliklerin sahip olduğu üçüncü kartilden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Radyan ısı testi için yapılan araştırmada iplik türlerinin mutlak lineer direnç değişimlerine ilişkin kutu-bıyık grafiği (bkz. Şekil 5.14) İplik 3 ve İplik 4'ün benzer biçime sahip dağılımlardan geldiğini göstermektedir. Bunun haricinde tüm iplik türleri birbirlerinden farklı çarpıklık eğilimlerine sahip dağılımlar göstermektedirler. İplik 5'in diğer ipliklerden çok daha farklı medyan ve kartil aralığı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.7 : Radyan ısı testi sonrası iletken ipliklerin mutlak lineer direnç değişimi (%).

	Kumaş 1				Kumaş 2				Kumaş 3			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	2,941	1,881	2,601	2,475	6,238	6,720	6,256	6,405	3,238	3,267	2,472	2,992
İplik 2	4,102	2,376	2,943	3,140	5,570	5,740	6,274	5,861	2,414	2,598	3,090	2,701
İplik 3	5,524	5,298	4,502	5,108	4,136	4,382	3,575	4,031	4,001	4,093	5,139	4,411
İplik 4	5,683	5,381	6,619	5,894	4,193	4,469	4,727	4,463	3,363	4,255	5,064	4,227
İplik 5	36,422	38,054	39,801	38,092	43,428	42,956	38,676	41,687	27,544	27,337	27,724	27,535

	Kumaş 4				Kumaş 5				Kumaş 6			
	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.	1.	2.	3.	Ort.
İplik 1	1,334	1,785	1,182	1,434	2,736	2,906	3,878	3,173	3,419	2,558	2,452	2,810
İplik 2	5,521	5,473	10,208	7,067	1,236	1,574	1,641	1,484	3,421	2,315	1,309	2,348
İplik 3	5,097	4,681	4,733	4,837	3,638	3,829	3,142	3,536	3,506	4,096	2,675	3,426
İplik 4	6,813	5,406	5,933	6,051	0,887	1,119	1,640	1,215	3,275	2,690	4,417	3,461
İplik 5	39,157	35,991	33,011	36,053	34,481	30,308	29,559	31,449	60,193	57,514	40,166	52,624



Şekil 5.14 : Radyan ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği.

İplik türlerine ilişkin mutlak lineer direnç değişimi verilerinin normal dağılan bir ana kütleden gelip gelmediklerine yönelik bir varsayımda bulunabilmek adına veriye Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır (bkz. EK 12). Verilerin normal dağılım göstermediği tespit edilmiştir. Çoklu karşılama testi neticesinde İplik 5'in, diğer tüm iplik türlerine göre istatistiksel olarak anlamlı derece farklı olduğu bulgusuna varılmıştır. Fakat İplik 5 haricindeki diğer ipliklerin birbirleri arasında farkın istatistiksel olarak anlamlı derecede olduğu söylenememektedir. İplik 5'in en düşük performansı gösterdiği tespit edilmiştir.

Farklı kumaş türlerinde ölçümlenen mutlak lineer direnç değişimi değerlerine ilişkin kutu-bıyık grafiği (Şekil 5.15a) veride bol miktarda aykırı değer olduğunu işaret etmektedir. Kullanılan 90 adet verinin 18 tanesinin aykırı değer olduğu saptanmıştır (bkz. EK 14). Bu aykırı değerlerin İplik 4 ve İplik 5'e ilişkin veriler olduğu tespit edilmiştir.

Aykırı değerler barındıran gözlemler araştırmadan çıkartıldıktan sonra ortaya çıkan kutu-bıyık grafiği (Şekil 5.15b) Kumaş 2 ve Kumaş 5'in benzer biçimlere sahip dağılımlardan geldiğini göstermektedir. Buna karşın diğer kumaşlar için buna benzer bir durumdan bahsetmek mümkün değildir. En yüksek medyan değeri Kumaş 2'de, en düşük medyan değeri ise Kumaş 6'da görülmektedir

Kolmogorov-Smirnov testi sonucu verilerin ANOVA varsayımlarını sağladığı (bkz. EK 15) görülmüş olup, kumaşlar arasında ortalama mutlak lineer direnç değişimi açısından anlamlı bir farklılığın mevcudiyeti ANOVA yöntemi ile araştırılmıştır (bkz. Çizelge 5.8).

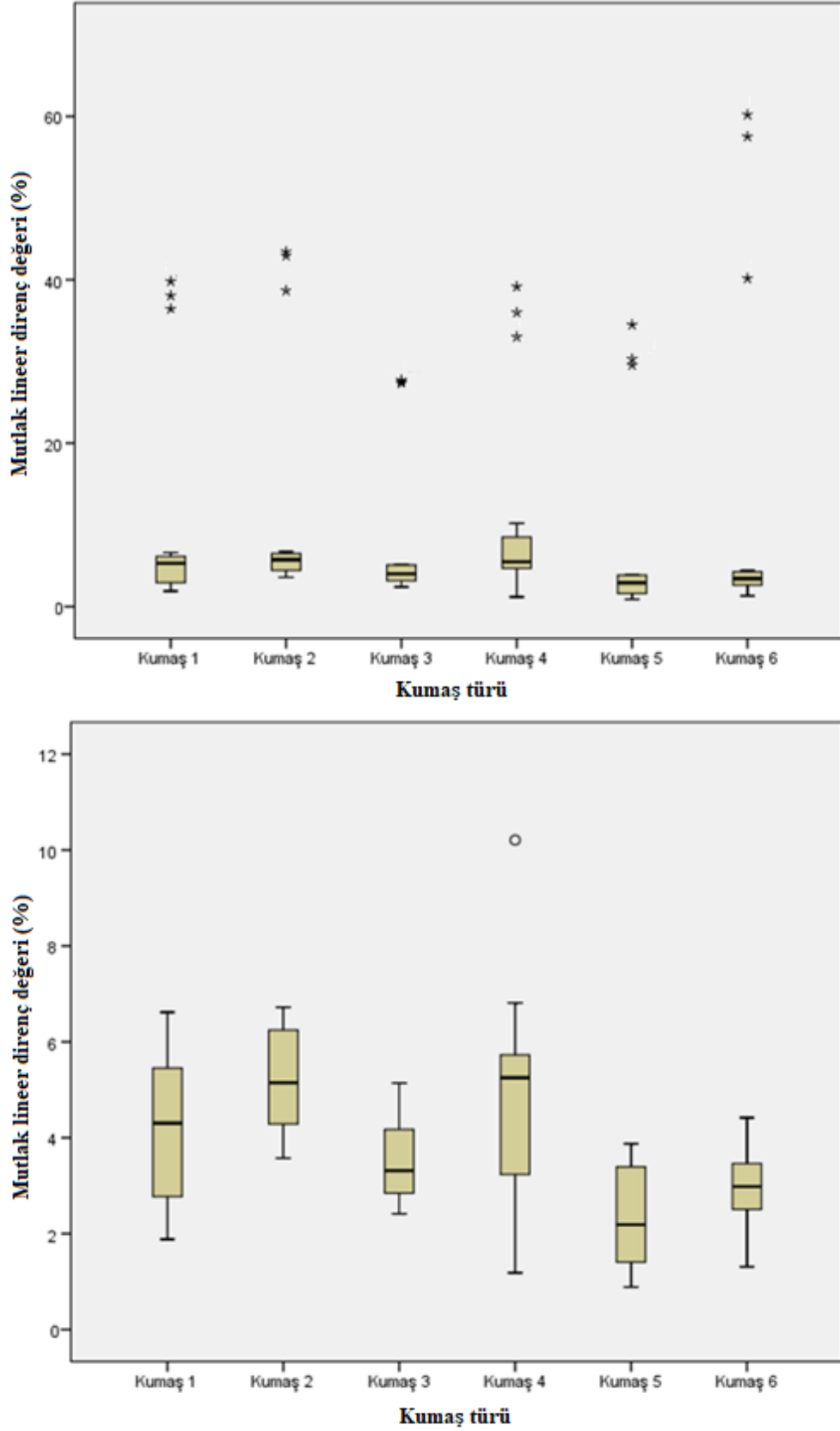
Çizelge 5.8 : Konvektif ısı testinde kumaş türlerine göre varyans analizi.

	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	p
Gruplar arası	70,802	5	14,16	6,644	0
Gruplar içi	140,674	66	2,131		
Toplam	211,476	71			

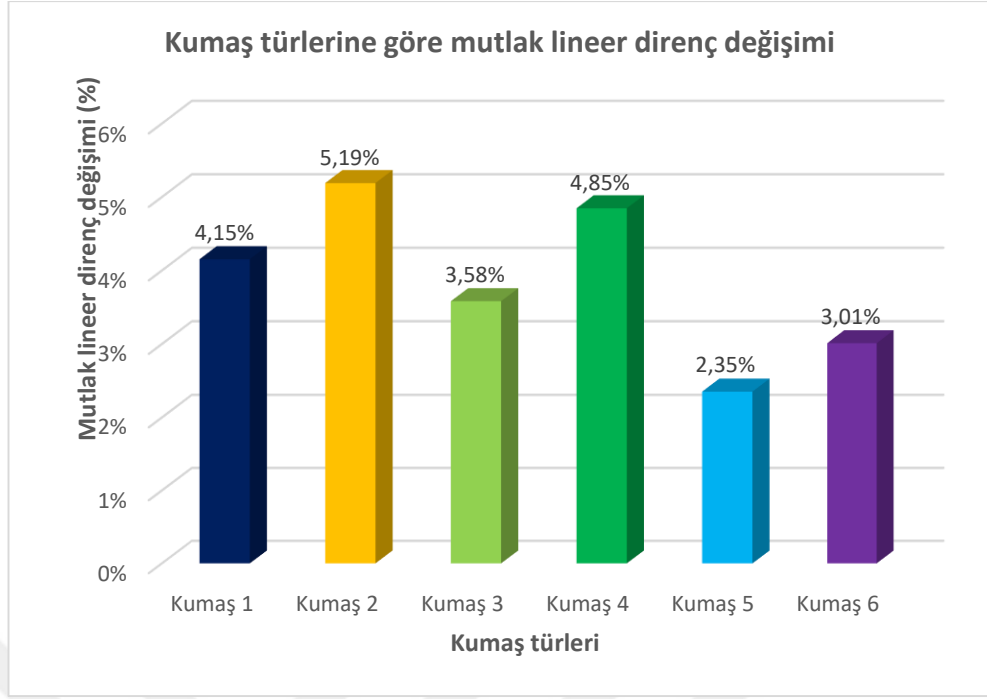
Farklı kumaş türleri arasında ortalama mutlak lineer direnç değişimleri açısından $\alpha=0.05$ önem düzeyinde anlamlı bir farklılık olduğu savı istatistiksel olarak desteklenmiştir.

Çoklu karşılaştırma testi sonucunda (bkz. EK 16) Kumaş 2'nin Kumaş 5 ve Kumaş 6'dan anlamlı derece farklı olduğu bulgusu elde edilmiştir. Kumaş 5 ise Kumaş 4 ve Kumaş 2'den anlamlı derecede farklıdır. Değerlendirme sonucunda Kumaş 2'nin en düşük performansı gösterdiği, Kumaş 5 ve Kumaş 6'nın en yüksek performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Fakat Kumaş 5 ile Kumaş 6 arasında anlamlı fark bulunamamıştır.

Kumaş türleri arasında gümüş iplik içerenlerin veri kaybı oluşturması sebebiyle istatistiksel değerlendirmeden çıkartılmasından sonrasında mutlak lineer direnç değişimi incelendiğinde, %2,35'lik değişimle en yüksek performansı Kumaş 5'in gösterdiği anlaşılmaktadır (bkz. Şekil 5.16). Çoklu karşılaştırma testine göre en düşük performansı gösteren Kumaş 2, %5,19'lük oran ile en büyük değişimi göstermiştir. Radyan testi sonucuna göre Kumaş 5 (%2,35) ve Kumaş 6 (%3,01) diğer kumaşlara göre yüksek performans göstermişlerdir.

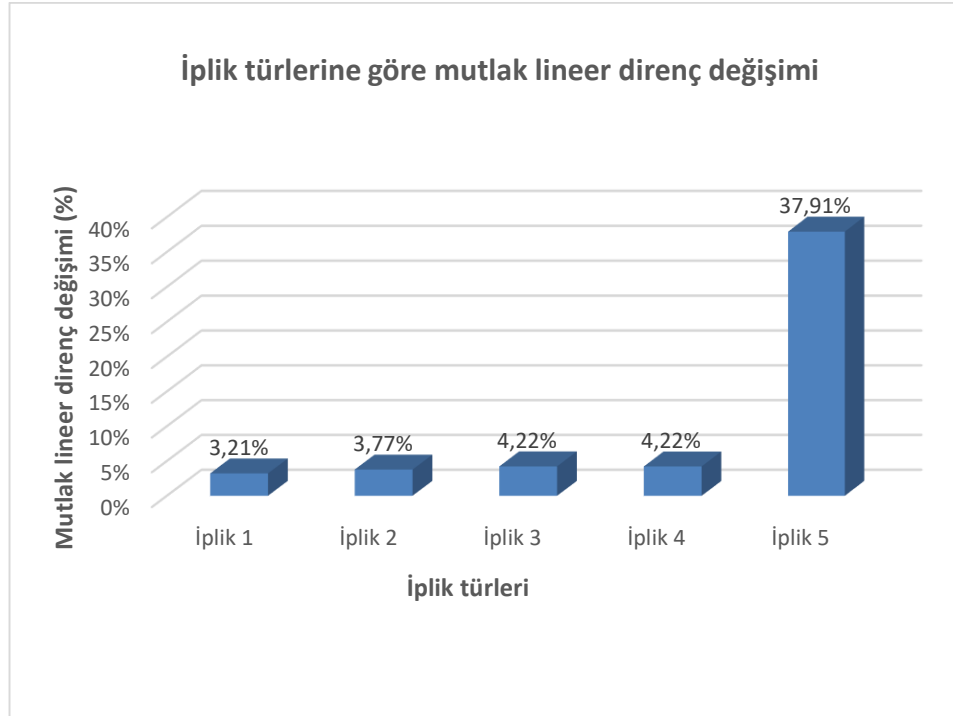


Şekil 5.15 : a) Radyan ısı testi için gümüş iplikler dahil iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği. b) Radyan ısı testi için gümüş iplikler hariç iken kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.



Şekil 5.16 : Radyan ısı testi için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

İplik türleri arasındaki araştırmada, İplik 5'in diğerlerinden anlamlı düzeyde farklılık taşıdığı görülmüştür. Diğer ipliklerin ise kendi aralarında anlamlı bir farklılık gösterdiğine dair bir bulguya varılamamıştır. Tüm iplikler arasında İplik 5'in en düşük performansı gösterdiğini saptanmıştır.

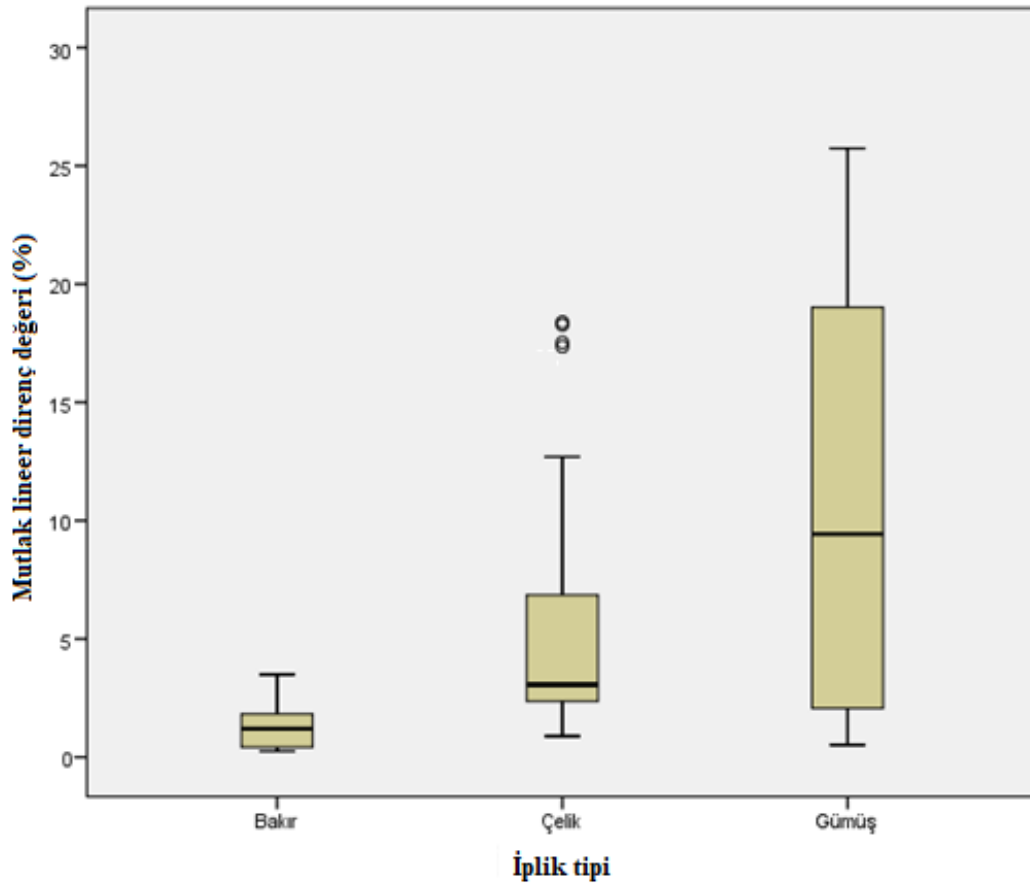


Şekil 5.17 : Radyan ısı testi için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişim histogramı.

5.4 İletkenlik Sonuçlarının Toplu Olarak İstatistiksel Değerlendirilmesi

Deneyde kullanılan 6 farklı kumaş ve 5 farklı iletken iplikten oluşan toplam 270 adet numune, sınırlandırılmış alev sıçraması testi, konvektif ısı testi ve radyan ısı testi metodlarına göre incelenmiştir. Farklı ısı testlere göre kumaşların ve iletken ipliklerin performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

İplik tiplerinin mutlak lineer direnç değişimine dair kutu-bıyık grafikleri (bkz. Şekil 5.18) incelendiğinde dağılımların birbirinden farklı olduğu gözükmemektedir. Grafikte çelik ipliklere ait 4 aykırı değer bulunmaktadır. İplik türleri arasında bakır ipliğin çelik ve gümüş ipliklere daha düşük kartil aralığına sahip olduğu gözükmemektedir. Gümüş iplikler, en yüksek medyan ve kartil aralığı değerine sahiptir.



Şekil 5.18 : Farklı ısı testleri için iplik tipine göre mutlak lineer direnç değişimin kutu-bıyık grafiği.

Radyan ısı testinde tüm kumaş ve iplik türleri için problar arasında iletken ipliklerin elektriği ilettiği gözlenirken, sınırlandırılmış alev sıçraması ve konvektif ısı testinde

gümüş ipliklerin (İplik 4 ve İplik 5) bazı kumaş türleri için koptuğu ve/veya deforme olduğu gözükmemektedir. Farklı ısı test yöntemlerine göre ipliklerin performans karşılaştırılması yapılabilmesi için, kayıp verilerin karşılaştırmaya katılmaması gerekmektedir.

Çalışmaya ait verilerden, gümüş ipliklere ait kayıp veri oranının oldukça yüksek olduğu gözükmemektedir. Kullanılan 270 numune arasında, İplik 4'e ait 36 adet veri bulunurken, 18 adet verinin (%33,3) kayıp veri olduğu, benzer şekilde İplik 5'e ait 30 veri bulunurken, kayıp veri oranının %44,4 olduğu Çizelge 5.9'da gözükmemektedir.

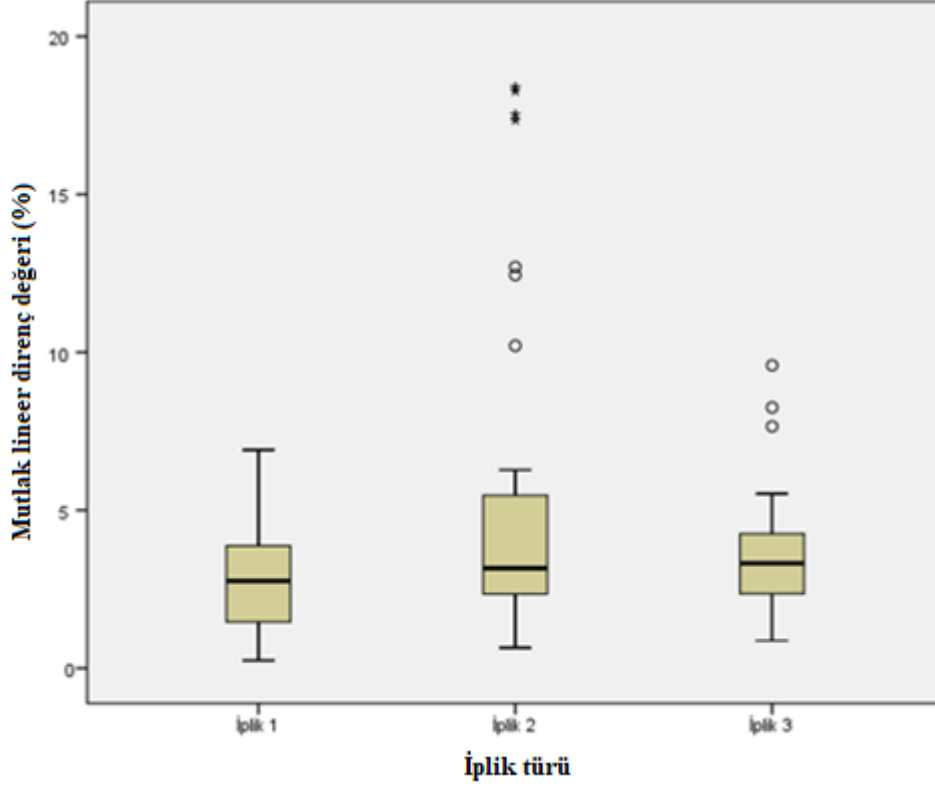
Çizelge 5.9 : Tüm ısı testler için kayıp veri oranları.

	İplik türü	Durum					
		Geçerli		Kayıp		Toplam	
		Miktar	Yüzde	Miktar	Yüzde	Miktar	Yüzde
Lineer direnç değişimi	İplik 1	54	100,00%	0	0,00%	54	100,00%
	İplik 2	54	100,00%	0	0,00%	54	100,00%
	İplik 3	54	100,00%	0	0,00%	54	100,00%
	İplik 4	36	66,70%	18	33,30%	54	100,00%
	İplik 5	30	55,60%	24	44,40%	54	100,00%

Çizelge 5.9'da görüldüğü üzere kayıp değerlerin oranı İplik 4 ve İplik 5 için %30'un üzerindedir. Kayıp veriler “tamamen rastgele kayıp veri (MICR)” özelliği gösterdiğinden ötürü sağlıklı olarak tahmin edilmeleri mümkün görülmemektedir. Kayıp verilerin varlığı araştırmada taraflılık yaratacağından ötürü, İplik 4 ve İplik 5'in araştırmadan çıkartılması uygun görülmüştür.

İplik türlerine ait lineer direnç değişimi analiz edilirken, verilerin varyans çözümlemesi varsayımlarını sağlamadığı (bkz. EK 17) tespit edilmiş ve kullanılacak test istatistiği olarak Kruskal-Wallis H testi uygun görülmüştür. Test istatistiği sonucunda iplik türleri arasında ortalama lineer direnç değişimi açısından $\alpha=0,05$ önem düzeyinde anlamlı bir fark olduğu savı istatistiksel olarak desteklenebilmektedir (bkz. EK 18).

Çelik ipler olan İplik 2 ile İplik 3 arasında anlamlı bir farklılık bulunamazken, İplik 1 ile İplik 2 arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olduğu saptanmıştır (bkz. EK 19).



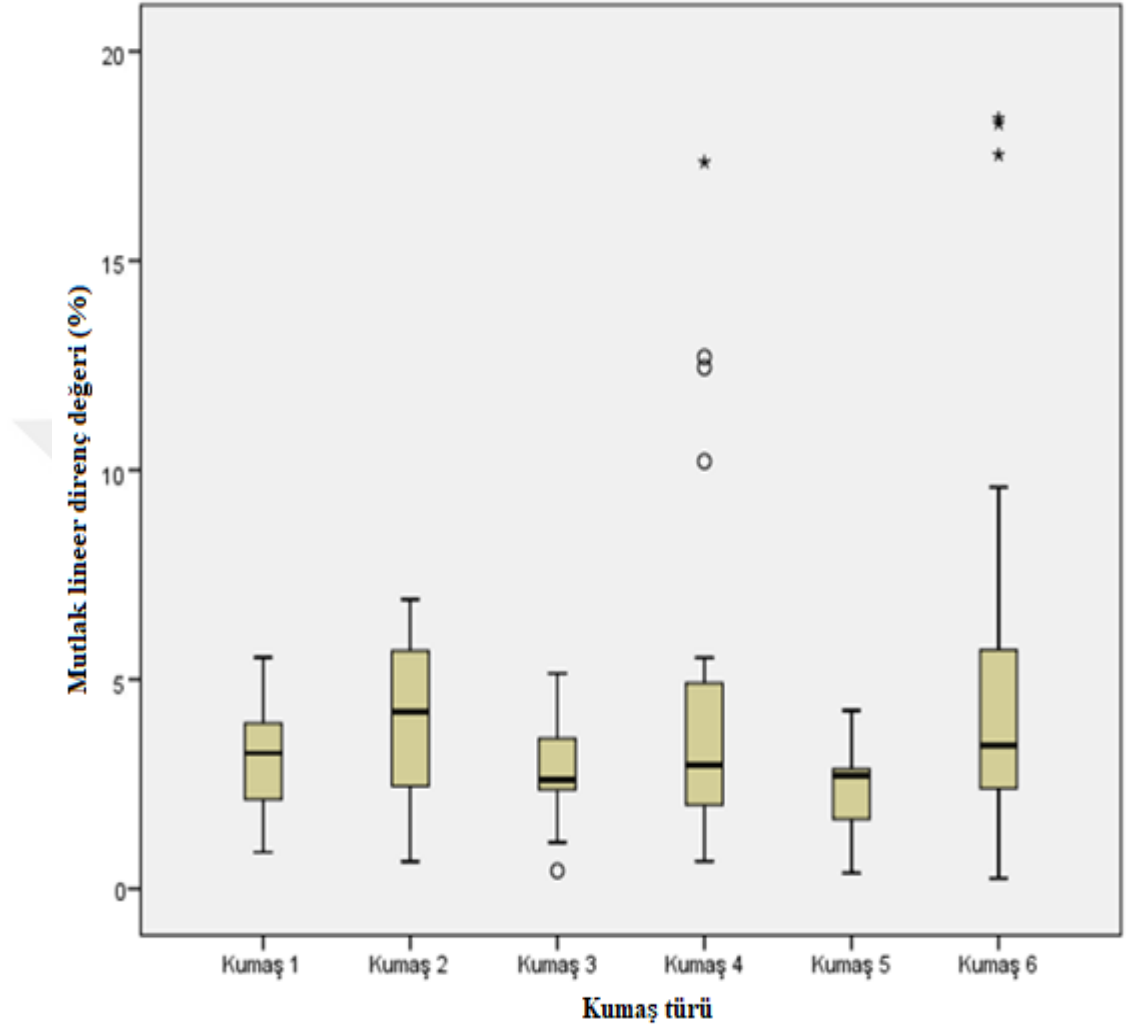
Şekil 5.19 : Farklı ısı testleri için iplik türüne göre mutlak lineer direnç değişimi kutu-bıyık grafiği.

Kumaş türlerine göre ısı testlerinin etkisi analiz edilirken, verilerin varyans çözümlemesi varsayımlarını sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır (bkz. EK 20). Lineer direnç değişimine ilişkin farkın değerlendirilmesinde Kruskal-Wallis H testi istatistiğinin uygun olduğuna karar kılınmıştır. Analiz sonucunda en az bir kumaş türünün diğer kumaş türlerinden lineer direnç değişimi açısından $\alpha = 0.05$ önem düzeyinde anlamlı miktarda farklı olduğu savı istatistiksel olarak desteklenmiştir.

Çoklu karşılaştırma testleri (bkz. EK 22) sonucu kumaşlar arasında görülen anlamlı farklılığın Kumaş 2 ve Kumaş 5 arasındaki anlamlı farklılıktan kaynaklandığı görülmektedir. Kumaş 5, tüm ısı testleri göz önüne alındığında, Kumaş 2'den yüksek performansa sahiptir.

Kumaş 1 ve Kumaş 2'ye ilişkin lineer direnç değişimi değişken dağılımının biçimsel olarak birbirlerine benzedikleri söylenebilir. Diğer kumaş türleri için böyle bir benzerlik görülmemektedir. Kumaş 5'e ait kutu grafiği incelendiğinde değişimin

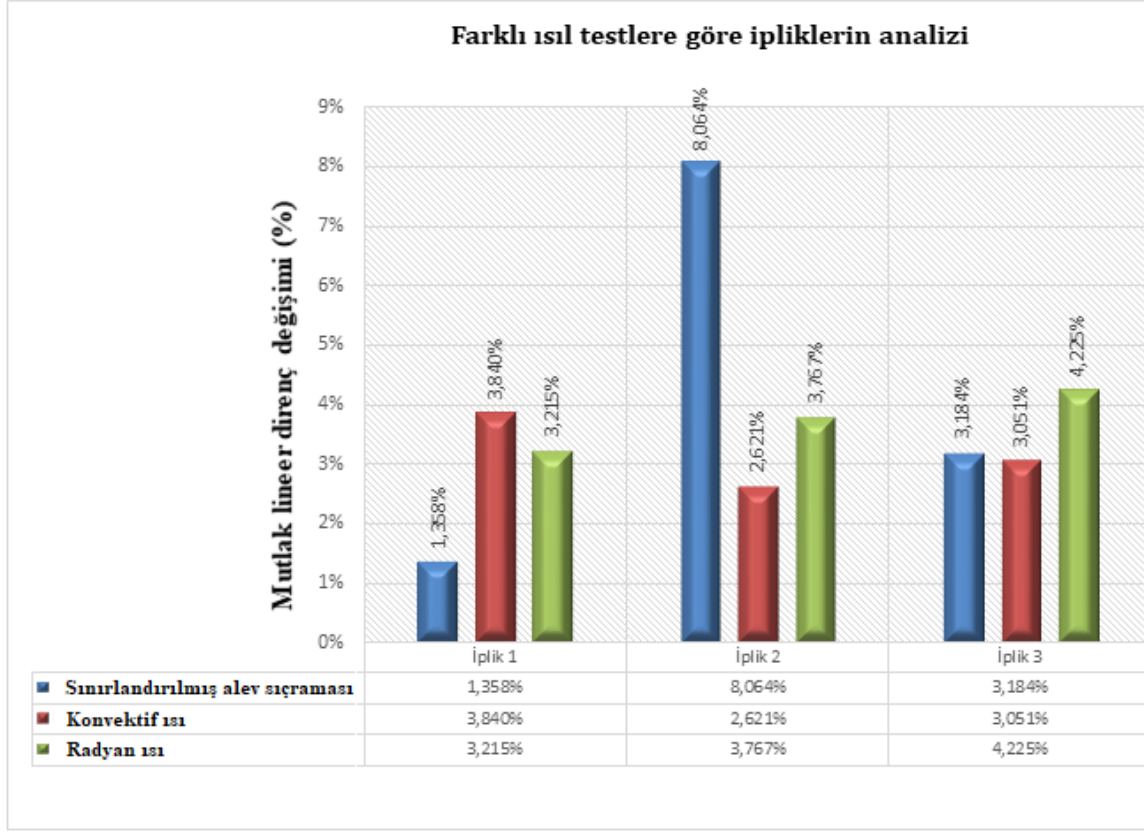
büyük kısmının medyanın altındaki değerlerde olduğu görülmektedir. Ortalamasının ve varyansının en düşük olacağını varsayabileceğimiz Kumaş 5 genel düzeyde tüm kumaş türleri arasında en başarılı performansları sergilemiştir.



Şekil 5.20 : Farklı ısı testleri için kumaş türüne göre mutlak lineer direnç değişiminin kutu-bıyık grafiği.

İplik 1, sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda test sonrası değer, test öncesi değerinden % 1,358 oranında değiştiği gözlemlenirken, konvektif ısı testi sonucunda bu oran %3,840 değerinde ve radyan ısı testi sonucunda %3,215 değerinde olduğu görülmektedir. İplik 1 için konvektif ve radyan ısı testinde dirençteki değişme oranı sınırlandırılmış alev sıçraması testine göre fazla iken, İplik 2 için tam tersi durum söz konusudur. İplik 2 için sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda %8,064'lük bir değişim var iken, konvektif ısı ve radyan ısı testleri sonucundaki değişim sırasıyla %2,621 ve % 3,767'dir. İplik 3 için her test yöntemi için dirençteki değişim oranları birbirine daha yakındır. Testler sonucundaki iletken

İpliğin direnç değişimi %3,184 ile %4,225 arasında değişmektedir. Analiz sonucunda İplik 1 ve İplik 3'ün en iyi performansı gösterdiği söylenebilmektedir. Ayrıca bakır ve çelik iplikler, tüm ısı testlerinde problar arasında elektriği ilettiği gözlenmiştir.

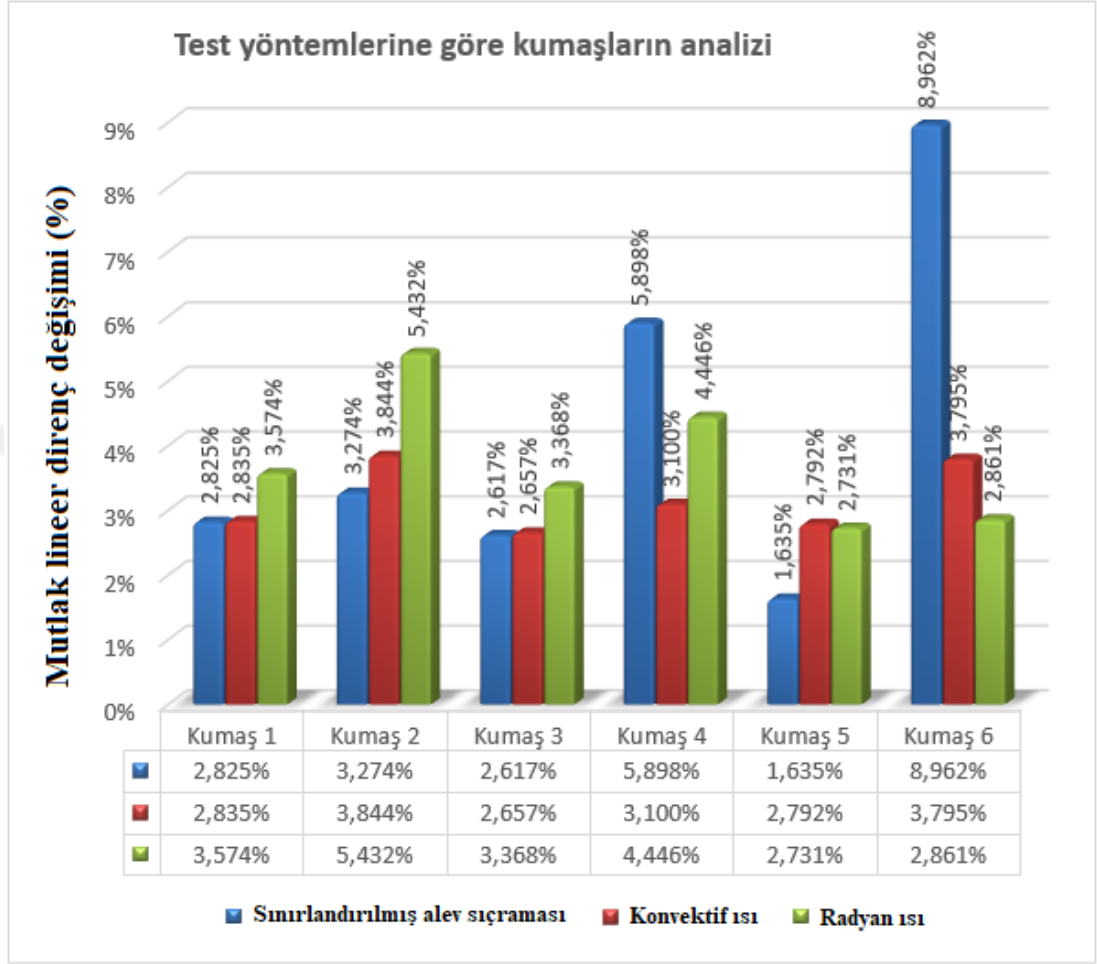


Şekil 5.21 : Farklı ısı testleri için ipliklere göre lineer direnç değişim histogramı.

Şekil 5.22’de iletken ipliklerin lineer direncindeki değişimin kumaşlar bazında uygulanan test yöntemine göre ne şekilde değiştiği gösterilmektedir. Kumaş 1 içeren tekstil yapısındaki ipliklerin direnç değişimi, sınırlandırılmış alev sıçraması testi ve konvektif ısı testi için hemen hemen aynıdır. Radyan ısı testinde ise bu değişim %3,574 kadardır. Benzer şekilde Kumaş 3 için de sınırlandırılmış alev sıçraması ve konvektif ısı testinden sonra ipliklerin direncindeki değişim hemen hemen aynıdır. Radyan ısı testinde %3,368’lik değişim gözlenmiştir. Kumaş 5’te tüm test yöntemleri için genel olarak en az değişim gözlenmiştir. Sınırlandırılmış alev sıçraması ve radyan ısı için en az yüzdesel değişimin Kumaş 5’te olduğu gözükürken, konvektif ısı için de en az değişimlerden biri olan %2,792’lik değişim yine Kumaş 5’te olmuştur.

Sınırlandırılmış alev sıçraması ve konvektif ısı testinden sonra İplik 4 ve İplik 5’te kopmalar meydana geldiği için, test yöntemlerine göre direnç değişimi analizinde bu

iplikler araştırmaya katılmamıştı. Fakat bu ipliklerin her ısıl test yönteminde Kumaş 5 için sonuç verdiği gözükmemektedir. Kumaş 5, diğer kumaşlar arasında en yüksek performansı gösterdiği istatistiksel olarak ispatlanmıştır.



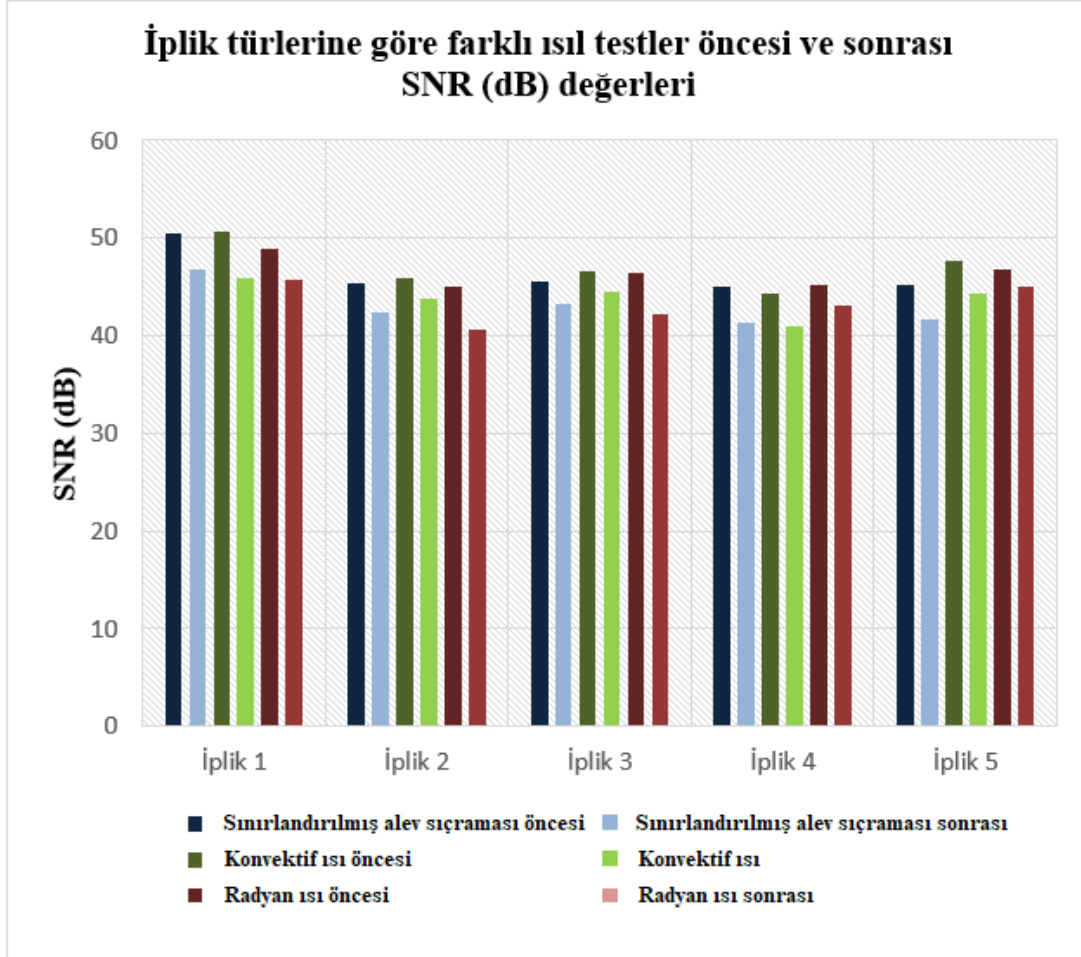
Şekil 5.22 : Farklı ısıl testleri için kumaşlara göre lineer direnç değişim histogramı.

5.5 Veri İletim Kalitesine Göre Sonuçların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

İletken ipliklerin sinyal-gürültü oranını (SNR) hesaplamak için osiloskop ve fonksiyon jeneratörü kullanılmıştır. Farklı ısıl testler altında işleme tabi tutulan toplamda 270 adet numuneden alınan veriler MATLAB programında veri işleme modülü kullanılarak SNR sonuçları elde edilmiştir. SNR sonuçları Çizelge 5.10'da gösterilmektedir.

Bakır ipliğin (İplik 1), test öncesi SNR ortalamasının diğer tüm iletken ipliklerinkilerden yüksek olduğu gözükmemektedir. Test öncesinde ipliklerin sinyal-gürültü oranlarının yaklaşık 44 ile 52 arasında olduğu gözükmemektedir.

Yapılan analiz sonucunda SNR değerlerinin test öncesi ve test sonrası değişim yüzdelерinin iplik türleri arasında $\alpha = 0,05$ anlam düzeyinde farklılık içermediği saptanmıştır (bkz. EK 23). İpliklerin test öncesi ve sonrası değerleri, Şekil 5.23'te gösterilmektedir.

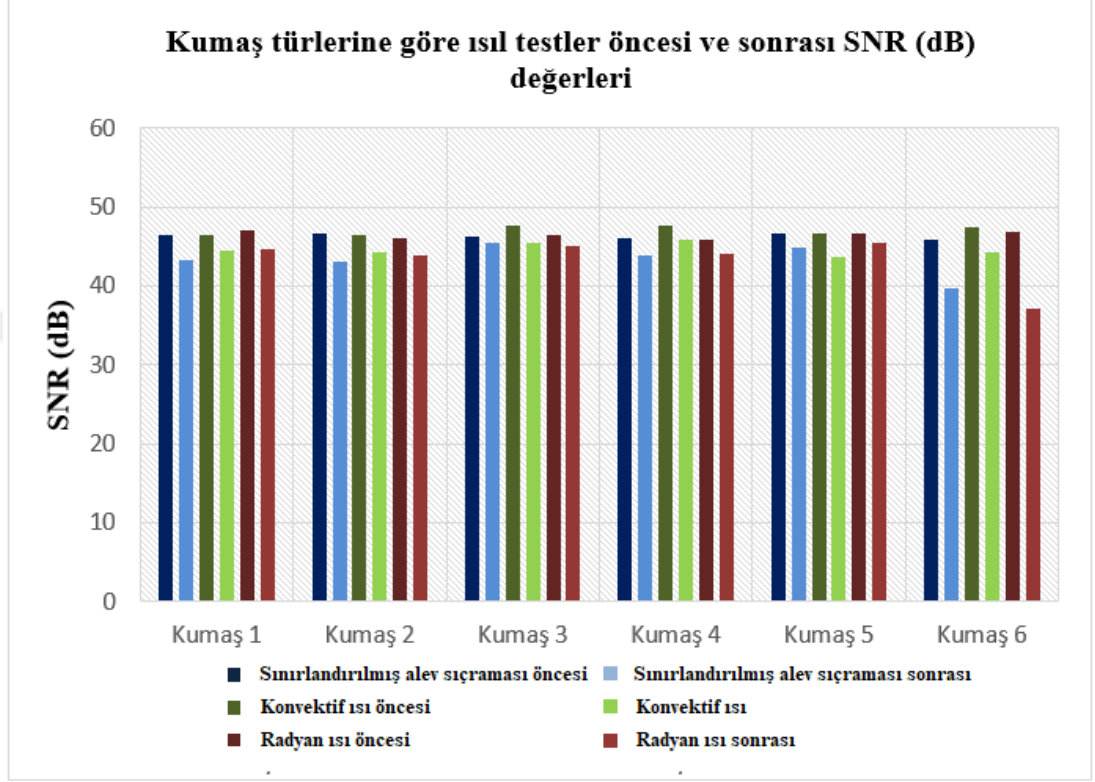


Şekil 5.23 : Farklı ısı testlere göre iplik türü için SNR değerleri histogramı.

İplik türlerine göre SNR değerleri incelendiğinde, tüm iplikler için SNR değerleri ortalamasının 40'ın üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu oran, veri iletim kalitesi açısından başarılı sayılabilecek miktardır. Ancak, tüm ısı testler sonrasında veri iletim kalitesinde yaklaşık ortalama %10'luk düşüş gözlenmiştir (Çizelge 5.10).

Kumaş türleri arasında yapılan analiz sonucunda ise kumaşlar arasında anlamlı farklılık olduğu bulgusuna varılmıştır (bkz. EK 24). Yapılan çoklu karşılaştırma testi sonucunda bu farklılığın Kumaş 6'dan kaynaklandığı gözükmemektedir. Kumaş 6 hariç diğer kumaşlar arasında anlamlı bir farklılığın olmadığı görülmüştür. Kumaş 6 için sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda İplik 2 ve İplik 3 için, radyan ısı testi sonucunda ise İplik 2, İplik 3 ve İplik 4 için sinyal-gürültü oranlarının ciddi miktarda

azalmaktadır. Özellikle, sınırlandırılmış alev sıçraması ve radyan ısı testi sonrasında İplik 2'yi içeren Kumaş 6 sandviç yapısında veri iletim kalitesinde, %31 ve % 58'lere varan ciddi düşüşler gözlenmiştir (Çizelge 5.10). Bunun neticesinde Şekil 5.24'de görüldüğü gibi Kumaş 6 için 30'un altında sinyal-gürültü oranları görülmektedir.



Şekil 5.24 : Farklı ısı testlerine göre kumaş türü için SNR değerleri histogramı.

Konvektif ısı testi için tüm kumaşların veri iletim kalitesi yüksektir. Sınırlandırılmış alev sıçraması ve radyan ısı testlerinde gösterdiği performans sebebiyle Kumaş 6, kumaş türleri arasında en başarısız olanıdır. Kumaş 6 haricindeki tüm kumaşların veri iletim kalitesinin kabul edilebilir değerlerde olduğu söylenebilmektedir.

Çizelge 5.10 : Farklı ısı testleri sonrası iletken ipliklerin SNR değerleri.

Sınırlandırılmış Alev Sıçraması Testi

	İplik 1			İplik 2			İplik 3			İplik 4			İplik 5		
	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim
Kumaş 1	51,284	48,645	5,43%	44,489	41,822	6,38%	45,125	42,789	5,46%	44,789	42,578	5,19%	46,978	40,702	15,42%
Kumaş 2	50,645	47,654	6,28%	45,127	42,325	6,62%	45,197	42,644	5,99%	46,785	39,846	17,41%	45,712	kopuk	-
Kumaş 3	48,63	47,215	3,00%	46,286	45,787	1,09%	46,764	43,531	7,43%	45,329	kopuk	-	44,361	kopuk	-
Kumaş 4	51,432	45,621	12,74%	45,763	44,533	2,76%	46,796	45,035	3,91%	42,781	40,305	6,14%	43,781	kopuk	-
Kumaş 5	51,475	49,123	4,79%	46,254	45,683	1,25%	46,485	45,555	2,04%	43,764	40,782	7,31%	44,861	42,829	4,74%
Kumaş 6	49,361	42,631	15,79%	44,365	33,796	31,27%	43,167	39,069	10,49%	46,568	43,108	8,03%	45,961	kopuk	-

Konvektif Isı Testi

	İplik 1			İplik 2			İplik 3			İplik 4			İplik 5		
	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim
Kumaş 1	50,423	46,785	7,78%	45,216	42,358	6,75%	45,783	43,853	4,40%	44,923	kopuk	-	45,863	44,523	3,01%
Kumaş 2	50,423	47,621	5,88%	45,786	40,65	12,63%	46,268	44,606	3,73%	45,236	kopuk	-	44,885	kopuk	-
Kumaş 3	51,471	45,237	13,78%	46,173	45,892	0,61%	46,716	45,209	3,33%	44,752	kopuk	-	49,235	kopuk	-
Kumaş 4	49,678	46,296	7,31%	46,785	45,555	2,70%	47,631	45,461	4,77%	43,086	kopuk	-	50,781	kopuk	-
Kumaş 5	51,123	46,026	11,07%	45,555	43,487	4,75%	46,937	43,48	7,95%	42,785	40,961	4,45%	46,782	44,097	6,09%
Kumaş 6	50,361	43,206	16,56%	46,185	45,174	2,24%	46,745	44,566	4,89%	44,931	kopuk	-	48,554	kopuk	-

Radyan Isı Testi

	İplik 1			İplik 2			İplik 3			İplik 4			İplik 5		
	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim	Önce	Sonra	Değişim
Kumaş 1	50,136	46,074	8,82%	45,693	43,636	4,71%	46,125	43,727	5,48%	47,294	45,434	4,09%	46,321	44,793	3,41%
Kumaş 2	48,631	45,144	7,72%	45,731	42,407	7,84%	46,162	45,029	2,52%	44,237	42,179	4,88%	45,768	44,46	2,94%
Kumaş 3	50,175	46,371	8,20%	44,003	43,77	0,53%	47,031	45,58	3,18%	45,612	44,64	2,18%	45,349	44,984	0,81%
Kumaş 4	47,263	46,231	2,23%	45,713	42,189	8,35%	45,375	41,245	10,01%	42,371	43,86	-3,40%	48,369	46,289	4,49%
Kumaş 5	49,176	47,537	3,45%	44,083	43,711	0,85%	46,71	44,413	5,17%	46,018	45,437	1,28%	47,296	45,652	3,60%
Kumaş 6	48,312	43,431	11,24%	44,821	28,236	58,74%	47,234	33,371	41,54%	45,982	36,759	25,09%	47,761	44,058	8,40%

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, giyilebilir elektronik uygulamalarına yönelik yüksek sıcaklıklara dayanıklı e-tekstil yapısı geliştirebilmek için alüminize, aramid, viskoz rayon, cam elyaf ve PBI içerikli 6 farklı teknik kumaş, meta-aramid/para-aramid/viskoz FR bileşenlerinden oluşan astar kumaş ve paslanmaz çelik, bakır ve gümüş kaplı poliamidden oluşan toplamda 5 farklı iletken iplik, kaynak dikiş ve konvansiyonel dikiş tekniği kullanılarak sandviç yapı formunda e-tekstil devre hattı oluşturmak üzere birleştirilmiştir. Numuneler, öncelikle yüksek sıcaklık altındaki performans özellikleri açısından sınırlandırılmış alev sıçraması, konvektif ısı ve radyan ısı testlerine tabi tutulmuş olup numunelerin iletkenlik ve sinyal gürültü oranı tespit edilerek elektriksel özelliklerindeki değişim test öncesi ve sonrasında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sınırlandırılmış alev sıçraması testi sonucunda, bakır olan İplik 1 (bakır; 1.5 ohm/m; lineer direnç değişimi: %1,358)'in ve çelik ipliklerden İplik 3 (100% Paslanmaz çelik; 19 ohm/m, lineer direnç değişimi: %3,184)'ün diğer iletken ipliklere göre yüksek performans sergilediği gözükürken, kumaşlar arasında herhangi bir kumaş ön plana çıkmamıştır. Bunun sebebi seçilen tüm kumaşların EN ISO 15025:2016 standardında aynı koruma seviyesini sağlamasıdır.

Konvektif ısı testinin analizinde bakır ve çelik ipliklerin gümüş ipliklerden daha yüksek performans gösterdiği, fakat kumaşlar arasında herhangi bir kumaşın istatistiksel olarak anlamlı derecede farklı olmadığı bulgusuna varılmıştır. Çizelge 5.2 'ye bakıldığında EN ISO 9151:2002'ye göre tüm kumaşların koruma seviyesinin B1 olduğu ve HTI_{24} değerinin tüm kumaşlar için 6.1 ile 7.9 saniye aralığında olduğu gözükmemektedir. Bu kapsamda, son kullanıcının çalışma koşulları dikkate alınarak deneyde kullanılan yüksek sıcaklıklara dayanıklı kumaşların her birisi bakır veya çelik iplikler ile beraber kullanılarak yüksek sıcaklıklara dayanıklı e-tekstil yapısı oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.

Radyan ısı testi sonucunda, Kumaş 1 ($RHTI_{24}$: 11,7 sn) ve Kumaş 2 ($RHTI_{24}$: 15,5 sn)'nin "C1" koruma seviyesine, Kumaş 3 ($RHTI_{24}$: 138,9 sn) ve Kumaş 6 ($RHTI_{24}$:

166,6 sn)'nin "C4" koruma seviyesi ve Kumaş 4 ($RHTI_{24}$: 87,6 sn) ve Kumaş 5 ($RHTI_{24}$: 79,5 sn)'in "C3" koruma seviyesine sahip olduğu gözükmemektedir (bkz. Çizelge 5.3). Bu fark, iletken ipliklerin lineer direnç değişimine de yansımıştır. Yapılan istatistiksel analize göre en iyi performansı Kumaş 5 sağlamışken, en düşük performans Kumaş 2'de görülmüştür. Alüminize kumaş olan Kumaş 3, Kumaş 4, Kumaş 5 ve Kumaş 6 "C3" ve "C4" koruma seviyesi göstermesine karşın, kumaşların nefes alabilirliği yok denecek kadar azdır. Son kullanıcının çalışma koşulları göz önüne alınarak seçilecek herhangi kumaş için, bakır ve çelik iplikler ile oluşturulacak e-tekstil yapıları tavsiye edilmektedir.

Tüm ısı testleri göz önüne alındığında Kumaş 5'in (460 g/m^2 gramajlı aramid esaslı nonwoven lamine edilmiş alüminize kumaş), diğer tüm kumaşlardan anlamlı derecede farklı olduğu gözükmemektedir. En yüksek performans Kumaş 5 tarafından gösterilmiştir. İplikler arasında, İplik 1 (Lineer direnç değişimi: %2,804) ve İplik 3 (Lineer direnç değişimi: %3,486) test sonrasında test öncesine göre lineer direnç değerlerinde istatistiksel olarak çok az bir farklılık gösterdiğinden ön plana çıkmaktadır. Gümüş ipliklerde ise özellikle sınırlandırılmış alev sıçraması ve konvektif ısı testlerinde kopma meydana geldiği gözlenmiştir. Genel olarak en yüksek mutlak lineer direnç değişim oranına sahip ipliklerin yine gümüş iplikler olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin poliamid etrafına kaplanmış gümüş nanopartiküllerinin ısı işlem sonucu birbirinden uzaklaşması ve böylece ipliğin iletkenliğinin azalması olduğu düşünülmektedir.

Tüm ısı testler sonrasında üretilen e-tekstil numunelerinin veri iletim kalitesinin genellikle 40-50 SNR(dB) aralığında değiştiği ve bu değerlerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu gözlenmiştir. Ancak Kumaş 6 (290 g/m^2 gramajlı aramid esaslı örme kumaş lamine edilmiş alüminize kumaş) ve İplik 2 ($65 \Omega/\text{m}$ lineer dirence sahip %100 paslanmaz çelik iletken iplik)'yi içeren e-tekstil yapısında ısı testler sonrasında ciddi bir oranda (%58'lere varan düşüş) veri iletim kalitesinin düştüğü gözlenmiştir.

EN ISO 11612 "Koruyucu giyecekler – Isı ve alev karşı koruyucu giyecek" standardında kontak ısı testi de yer almaktadır. Testlerin yapıldığı akredite laboratuvar da ilgili test cihazı bulunmamasından ötürü, iletken ipliklerin lineer direnç değişimi ve veri iletim kalitesi özelliklerinin kontak ısı testi sonrası performansları incelenememiştir. Geliştiren e-tekstil yapısının ısı performansları

değerlendirilirken, kontak ısıya karşı performansının da ileriki çalışmalar için değerlendirilmeye katılması önerilmektedir.

Bu çalışmada toplamda 270 adet e-tekstil yapısının farklı ısı testler sonucunda iletkenlik ve sinyal veri iletim kalitesi değişimi istatistiksel olarak incelenmiştir. Daha güçlü bir çözümleme yapılması için daha fazla veri içeren veri seti kullanılması önerilmektedir. Kullanılan yüksek sıcaklıklara dayanıklı kumaşların maliyetinden ötürü numune sayısı 270 adet ile sınırlı kalmıştır.

Özetle; bu çalışma kapsamında geliştirilen e-tekstil yapıları içerisinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve veri iletim kalitesi yüksek olan en uygun e-tekstil yapısının; Kumaş 5 (460 g/m² gramajlı aramid esaslı nonwoven lamine edilmiş alüminize kumaş) ve astar kumaşın (110 g/m² gramajlı %40 meta-aramid, %10 para-aramid, %50 viskoz FR bileşenli kumaş) konvansiyonel dikiş tekniği ile beraber birleştirilmesi sonucunda ve arasına İplik 1 (bakır; 1.5 ohm/m) veya İplik 3 (100% Paslanmaz çelik; 19 ohm/m)'ün yerleştirilmesi sonucu elde edilen e-tekstil yapısı olduğu bulunmuştur. Sonuçta, bu tez kapsamında yüzey görünüşü düzgün, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve veri iletim kalitesi yüksek fonksiyonel bir e-tekstil yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen e-tekstil yapısının, giyilebilir teknolojiler, teknik tekstiller, askeri giysiler, koruyucu giysiler ve uzay kıyafetleri uygulamalarında yer alabileceği öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Curone, D., Secco, E. L., Tognetti, A., Loriga, G., Dudnik, G., Risatti, M., ... & Magenes, G.** (2010). Smart garments for emergency operators: the ProeTEX project. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(3), 694-701.
- [2] **Locher, I., & Tröster, G.** (2008). Enabling technologies for electrical circuits on a woven monofilament hybrid fabric. *Textile Research Journal*, 78(7), 583-594.
- [3] **Sezgin, H.** (2012). *Farklı İletken İpliklerin Farklı Kumaş Yapıları Altında Sıcaklık Davranışlarının İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Yetmen, G.** (2017). Giyilebilir Teknoloji. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(1), 275-289.
- [5] **Poupyrev, I., Gong, N. W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C., & Robinson, K. E.** (2016). Project Jacquard: interactive digital textiles at scale. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 4216-4227). ACM.
- [6] **Kao, J. C., & Marculescu, R.** (2005). Energy-aware routing for e-textile applications. In *Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe-Volume 1* (pp. 184-189). IEEE Computer Society.
- [7] **Quirk, M. M., Martin, T. L., & Jones, M. T.** (2009). Inclusion of fabric properties in the e-textile design process. In *Wearable Computers, 2009. ISWC'09. International Symposium on* (pp. 37-40). IEEE.
- [8] **Engin, M., Demirel, A., Engin, E. Z., & Fedakar, M.** (2005). Recent developments and trends in biomedical sensors. *Measurement*, 37(2), 173-188.
- [9] **Van Langenhove, L.** (2015). Smart textiles: past, present, and future. *Handbook of Smart Textiles*, 1035-1058.
- [10] **Kazani, I., Hertleer, C., De Mey, G., Schwarz, A., Guxho, G., & Van Langenhove, L.** (2012). Electrical conductive textiles obtained by screen printing. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 20(1), 57-63.
- [11] **Foroughi, J., Spinks, G. M., & Wallace, G. G.** (2015). Conducting polymer fibers. *Handbook of Smart Textiles*, 31-62.
- [12] **Erdemir, N.** (2011). *Politiyofen ve poliindol esaslı kompozit ve kopolimerlerin sentezi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [13] **Ghahremani Honarvar, M., & Latifi, M.** (2017). Overview of wearable electronics and smart textiles. *The Journal of The Textile Institute*, 108(4), 631-652.
- [14] **Eylem, Ç.** (2007). *Anilin ve Poli(etilen teraftalat) Kullanarak Kimyasal Polimerizasyon Yöntemi İle İletken Kompozit Lif Hazırlanması ve Karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] **Balkan, T.** (2010). *İletken Polipirol-poli (akrilonitril-ko-stiren) Esaslı Kompozit Sentezi Ve Karakterizasyonu; Nano Lif Eldesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Çarbaş, B. B.** (2016). İletken Polimerler Ve Enerji Uygulamaları. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3(1), 46-60.
- [17] **Uygun, A., ve diğerleri.,** 2009. The electrical conductivity properties of polythiophene/TiO₂ nanocomposites prepared in the presence of surfactants, *Current Applied Physics*, 9(4): s. 866-871.
- [18] **Bedeloglu, A., Sünter, N., & Bozkurt, Y.** (2010). Elektriksel Olarak İletken Tekstil Yapıları, Üretim Yöntemleri Ve Kullanım Alanları. *Tekstil ve Mühendis*, 17, 7-17.
- [19] **Schwarz, A., Hakuzimana, J., Westbroek, P., Mey, G. D., Priniotakis, G., Nyokong, T., & Langenhove, L. V.** (2012). A study on the morphology of thin copper films on para-aramid yarns and their influence on the yarn's electro-conductive and mechanical properties. *Textile Research Journal*, 82(15), 1587-1596.
- [20] **Stoppa, M., & Chiolerio, A.** (2016). Testing and evaluation of wearable electronic textiles and assessment thereof. In *Performance Testing of Textiles* (pp. 65-101).
- [21] **Qu, H., & Skorobogatiy, M.** (2015). Conductive polymer yarns for electronic textiles. In *Electronic textiles* (pp. 21-53).
- [22] **Chen, H. C., Lee, K. C., Lin, J. H., & Koch, M.** (2007). Fabrication of conductive woven fabric and analysis of electromagnetic shielding via measurement and empirical equation. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), 124-130..
- [23] **Bahadir, S. K., & Jevsni, S.** (2017). Optimization of hot air welding process parameters for manufacturing textile transmission lines for e-textiles applications: Part I: Electro-conductive properties. *Textile Research Journal*, 87(2), 232.
- [24] **Telipan, G., Moasa, B., Helerea, E., Carpus, E., Scarlat, R., & Enache, G.** (2017). ESD Knitted Fabrics from Conductive Yarns Used as Protective Garment for Electronic Industry. In *Textiles for Advanced Applications*. InTech.
- [25] **Dhawan, A., Seyam, A. M., Ghosh, T. K., & Muth, J. F.** (2004). Woven fabric-based electrical circuits: Part i: Evaluating interconnect methods. *Textile Research Journal*, 74(10), 913-919.
- [26] **Mattila, H.** (Ed.). (2006). *Intelligent textiles and clothing*. Woodhead Publishing.

- [27] **Liu, S., Tong, J., Yang, C., & Li, L.** (2017). Smart E-textile: Resistance properties of conductive knitted fabric–Single pique. *Textile Research Journal*, 87(14), 1669-1684.
- [28] **Jost, K., Stenger, D., Perez, C. R., McDonough, J. K., Lian, K., Gogotsi, Y., & Dion, G.** (2013). Knitted and screen printed carbon-fiber supercapacitors for applications in wearable electronics. *Energy & Environmental Science*, 6(9), 2698-2705.
- [29] **Mecnika, V., Hoerr, M., Krievins, I., Jockenhoevel, S., & Gries, T.** (2014). Technical Embroidery for Smart Textiles. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*, 9, 56-63.
- [30] **Linz, T., Kallmayer, C., Aschenbrenner, R., & Reichl, H.** (2005). Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric. In *Wearable Computers, 2005. Proceedings. Ninth IEEE International Symposium on* (pp. 86-89). IEEE.
- [31] **Tyler, D., Mitchell, A., & Gill, S.** (2012). Recent advances in garment manufacturing technology: Joining techniques, 3D body scanning and garment design. In *The global textile and clothing industry* (pp. 131-170).
- [32] **Bahadir, S. K., Kalaoğlu, F., & Jevšnik, S.** (2015). The use of hot air welding technologies for manufacturing e-textile transmission lines. *Fibers and Polymers*, 16(6), 1384-1394.
- [33] **Natarajan, M., & Govindarajan, G. T.** (2014). Design and development of textile electrodes for EEG measurement using copper plated polyester fabrics. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 8(4).
- [34] **Stoppa, M., & Chiolerio, A.** (2014). Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *sensors*, 14(7), 11957-11992.
- [35] **Meoli, D., & May-Plumlee, T.** (2002). Interactive electronic textile development: A review of technologies. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 2(2), 1-12.
- [36] **Meriç, D.** (2016). *Akıllı Tekstillerin Ürün Tasarımında Kullanım Olanakları ve Moda Tasarımın Yönelik Uygulamalar* (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi, Endüstriyel Sanatlar Anabilim Dalı, Eskişehir.
- [37] **Pailes-Friedman, R., Miller, C., Lin, K., Ferlauto, T., Stanch, C., Tamayo, V., & Skourtis-Cabrera, E.** (2014). Electronic-textile system for the evaluation of wearable technology. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program* (pp. 201-207). ACM.
- [38] **Paradiso, R., & Caldani, L.** (2010). Electronic textile platforms for monitoring in a natural environment. *Research Journal of Textile and Apparel*, 14(4), 9-21.
- [39] **Di Rienzo, M., Rizzo, F., Parati, G., Brambilla, G., Ferratini, M., & Castiglioni, P.** (2006). MagIC system: A new textile-based wearable device for biological signal monitoring. Applicability in daily life and clinical setting. In *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*(pp. 7167-7169). IEEE.

- [40] **Bajaj, P.** (2000). Heat and flame protection. *Handbook of technical textiles*, 223-263.
- [41] **Özcan, G.** (2002). *Örme Kumaş Yapısının Güç Tutuşma Özelliklerine Etkisi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Ross, J. H.** (1977). Thermal conductivity of fabrics as related to skin burn damage. In *J of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium* (Vol. 31, pp. 293-312).
- [43] **Van Krevelen, D. W.** (1977). Flame resistance of chemical fibers. In *Appl Polym Symp* (Vol. 31, p. 269).
- [44] **Ömeroğulları, Z., & Kut, D.** (2012). Tekstilde Güç Tutuşurluk. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(1), 27-41..
- [45] **Gaan, S., Salimova, V., Rupper, P., Ritter, A., & Schmid, H.** (2011). Flame retardant functional textiles. In *Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health* (pp. 98-130).
- [46] **Güneş, M., Güneş, A., İlbeyli, N., & Kaya, B.** (2017). Asbest Maruziyeti ve Etkileri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 10(1), 1-5.
- [47] **Kalaycı, E., Avinç, O. ve Yavaş, A.** (2014). Polibenzimidazol (pbi) lifleri. *Tekstil ve Mühendis*, 21(96).
- [48] **Smith, W. C.** (1999). High Performance and High Temperature Resistant Fibers.
- [49] **Davis, R., Chin, J., Lin, C. C., & Petit, S.** (2010). Accelerated weathering of polyaramid and polybenzimidazole firefighter protective clothing fabrics. *Polymer Degradation and Stability*, 95(9), 1642-1654.
- [50] **Campbell Jr, F. C.** (Ed.). (2003). *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier.
- [51] **Sabir, T.** (2018). Fibers used for high-performance apparel. In *High-Performance Apparel* (pp. 7-32). Woodhead Publishing.
- [52] **Kanakalatha, P., Sridhar, M. K., Ajay, C., Balasingh, C., & Singh, A. K.** (1990). Preparation and characterization of aluminium alloy sheet Aramid fibre-laminated composites. *Bulletin of Materials Science*, 13(5), 305-311.
- [53] **Dincă, I., Ştefan, A., & Stan, A.** (2010). Aluminum/glass fibre and aluminum/carbon fibre hybrid laminates. *Incas Bull*, 2, 2066-2081.
- [54] **Burrow, T.** (2013). Flame resistant manmade cellulosic fibres. In *Handbook of Fire Resistant Textiles* (pp. 221-244).
- [55] **Gu, H.** (2009). Research on thermal properties of Nomex/Viscose FR fibre blended fabric. *Materials & Design*, 30(10), 4324-4327.
- [56] **Butylkina, N. G., Ivanova, A. Y., & Tyuganova, M. A.** (1989). Polycapraamide fibres with reduced combustibility. *Fibre Chemistry*, 20(3), 170-172.
- [57] **Subbulakshmi, M. S., Kasturiya, N., Hansraj, Bajaj, P., & Agarwal, A. K.** (2000). Production Of Flame-Retardant Nylon 6 And 6.6. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 40(1), 85-104.

- [58] **ISO** (2016). *Protective clothing - Protection against flame - Method of test for limited flame spread* (BS EN ISO 15025:2016).
- [59] **ISO** (2016). *Protective clothing against heat and flame - Determination of heat transmission on exposure to flame* (ISO 9151:2016).
- [60] **ISO** (2002). *Protective clothing - Protection against heat and fire - Method of test: Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat* (ISO 6942:2002).
- [61] **ISO** (2015). *Protective clothing - Clothing to protect against heat and flame - Minimum performance requirements* (ISO 11612:2015).
- [62] **Knowlton, A. E., & Shoop, R. M.** (1957). Standard handbook for electrical engineers.
- [63] **Jupiter, D. C.** (2017). Assumptions of statistical tests: What lies beneath. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 56(4), 910-913.





EKLER

EK 1 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için kumaş türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	Kumaş türü	İstatistik	Serbestlik derecesi	p
Lineer direnç değişimi	Kumaş 1	0,344	15	0
	Kumaş 2	0,258	12	0,027
	Kumaş 3	0,171	9	0,200
	Kumaş 4	0,383	12	0
	Kumaş 5	0,317	15	0
	Kumaş 6	0,214	12	0,137

EK 2 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	İplik türü	İstatistik	Serbestlik derecesi	p
Lineer direnç değişimi	İplik 1	0,185	18	0,106
	İplik 2	0,296	18	0
	İplik 3	0,41	18	0
	İplik 4	0,226	15	0,038
	İplik 5	0,269	6	0,199

EK 3 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için iplik türlerine ilişkin Kruskal-Wallis H testi.

Lineer Direnç Değişimi	
Ki Kare	36,343
Serbestlik Derecesi	4
p	0

EK 4 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi iplik türlerine ilişkin Scheffe testi.

(I) İplik türü	(J) İplik türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
İplik 1	İplik 2	-6,70662672*	1,762717	0,01	-12,2838	-1,12947
	İplik 3	-1,82587504	1,762717	0,897	-7,40303	3,751285
	İplik 4	-7,73247800*	1,848753	0,003	-13,5819	-1,8831
	İplik 5	-14,76729678*	2,492858	0	-22,6546	-6,88
İplik 2	İplik 1	6,70662672*	1,762717	0,01	1,129467	12,28379
	İplik 3	4,88075168	1,762717	0,117	-0,69641	10,45791
	İplik 4	-1,02585128	1,848753	0,989	-6,87523	4,823523
	İplik 5	-8,06067006*	2,492858	0,042	-15,948	-0,17337
İplik 3	İplik 1	1,82587504	1,762717	0,897	-3,75128	7,403035
	İplik 2	-4,88075168	1,762717	0,117	-10,4579	0,696408
	İplik 4	-5,90660296*	1,848753	0,047	-11,756	-0,05723
	İplik 5	-12,94142174*	2,492858	0	-20,8287	-5,05413
İplik 4	İplik 1	7,73247800*	1,848753	0,003	1,883103	13,58185
	İplik 2	1,02585128	1,848753	0,989	-4,82352	6,875226
	İplik 3	5,90660296*	1,848753	0,047	0,057228	11,75598
	İplik 5	-7,03481878	2,554419	0,121	-15,1169	1,047254
İplik 5	İplik 1	14,76729678*	2,492858	0	6,880002	22,65459
	İplik 2	8,06067006*	2,492858	0,042	0,173375	15,94797
	İplik 3	12,94142174*	2,492858	0	5,054127	20,82872
	İplik 4	7,03481878	2,554419	0,121	-1,04725	15,11689

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

*Bağımsız değişken: Lineer direnç değişimi

EK 5 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için (gümüş iplikler olmaksızın) kumaş türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	Kumaş Türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	Kumaş 1	0,312	9	0,012
	Kumaş 2	0,319	9	0,009
	Kumaş 3	0,171	9	0,2
	Kumaş 4	0,359	9	0,001
	Kumaş 5	0,197	9	0,2
	Kumaş 6	0,2	9	0,2

EK 6 : Sınırlandırılmış alev sıçraması testi için (gümüş iplikler olmaksızın) kumaş türlerine ilişkin Kruskal Wallis H testi.

Lineer Direnç Değişimi	
Ki Kare	5,518
Serb. Derecesi	5
p	0,356

EK 7 : Konvektif ısı testi için (tüm iplik tipleri dahil) iplik türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	İplik türü	İstatistik	Serbestlik derecesi	p
Lineer direnç değişimi	İplik 1	0,117	18	0,2
	İplik 2	0,242	18	0,006
	İplik 3	0,221	18	0,021
	İplik 4	0,382	3	0,038
	İplik 5	0,178	6	0,2

EK 8: Konvektif ısı testi için (tüm iplik tipleri dahil) iplik türlerine ilişkin Kruskal Wallis H testi.

Lineer Direnç Değişimi	
Ki Kare	28,675
Serbestlik Derecesi	4
p	0

EK 9 : Konvektif ısı testi için iplik türlerine ilişkin Tamhane testi.

(I) İplik türü	(J) İplik türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
İplik 1	İplik 2	1,2187582	0,439257	0,086	-0,09599	2,533504
	İplik 3	0,7885149	0,414693	0,494	-0,45432	2,031345
	İplik 4	-1,96097529*	0,357393	0	-3,11755	-0,8044
	İplik 5	-13,20511290*	1,278658	0,001	-18,8679	-7,54237
İplik 2	İplik 1	-1,2187582	0,439257	0,086	-2,5335	0,095987
	İplik 3	-0,4302433	0,411364	0,973	-1,66278	0,802297
	İplik 4	-3,17973349*	0,353524	0	-4,32593	-2,03354
	İplik 5	-14,42387110*	1,277582	0	-20,0917	-8,75603
İplik 3	İplik 1	-0,7885149	0,414693	0,494	-2,03135	0,454316
	İplik 2	0,4302433	0,411364	0,973	-0,8023	1,662784
	İplik 4	-2,74949021*	0,322495	0	-3,81754	-1,68144
	İplik 5	-13,99362782*	1,269346	0,001	-19,7023	-8,28494
İplik 4	İplik 1	1,96097529*	0,357393	0	0,804404	3,117546
	İplik 2	3,17973349*	0,353524	0	2,033541	4,325926
	İplik 3	2,74949021*	0,322495	0	1,68144	3,81754
	İplik 5	-11,24413761*	1,251798	0,002	-17,0547	-5,43358

EK 9 (devam) : Konvektif ısı testi için iplik türlerine ilişkin Tamhane testi.

(I) İplik türü	(J) İplik türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
İplik 5	İplik 1	13,20511290*	1,278658	0,001	7,542368	18,86786
	İplik 2	14,42387110*	1,277582	0	8,756035	20,09171
	İplik 3	13,99362782*	1,269346	0,001	8,284939	19,70232
	İplik 4	11,24413761*	1,251798	0,002	5,433582	17,05469

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Bağımsız değişken: Lineer direnç değişimi

EK 10 : Konvektif ısı testi için kumaş türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	Kumaş Türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	Kumaş 1	0,171	9	0,2
	Kumaş 2	0,183	9	0,2
	Kumaş 3	0,187	9	0,2
	Kumaş 4	0,165	9	0,2
	Kumaş 5	0,28	9	0,04
	Kumaş 6	0,242	9	0,137

EK 11 : Konvektif ısı testi için kumaş türlerine ilişkin betimleyici istatistikler.

	Miktar	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık		Basıklık	
	İstatistik	İstatistik	İstatistik	İstatistik	Hata	İstatistik	Hata
Kumaş 1	9	2,834639	1,376633	-0,392	0,717	-1,261	1,4
Kumaş 2	9	3,844198	2,09392	-0,258	0,717	-0,819	1,4
Kumaş 3	9	2,657434	0,684646	0,261	0,717	0,72	1,4
Kumaş 4	9	3,099559	0,998548	0,26	0,717	-1,282	1,4
Kumaş 5	9	2,791984	0,857406	0,602	0,717	-0,091	1,4
Kumaş 6	9	3,79544	1,383507	0,349	0,717	-1,357	1,4

EK 12 : Radyan ısı testi için iplik türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	İplik türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	İplik 1	0,228	18	0,014
	İplik 2	0,17	18	0,178
	İplik 3	0,101	18	0,2
	İplik 4	0,161	18	0,2
	İplik 5	0,181	18	0,124

EK 13 : Radyan ısı testi için iplik türlerine ilişkin betimleyici istatistikler.

İplik türü	İstatistik	Hata
İplik 1	Ortalama	3,2146559 0,383462
	Standart Sapma	1,6268895
	Çarpıklık	1,187 0,536
	Basıklık	0,674 1,038
İplik 2	Ortalama	3,7669429 0,546171
	Standart Sapma	2,3172078
	Çarpıklık	1,303 0,536
	Basıklık	2,027 1,038
İplik 3	Ortalama	4,2248309 0,18176
	Standart Sapma	0,7711445
	Çarpıklık	-0,117 0,536
	Basıklık	-0,46 1,038
İplik 4	Ortalama	4,2185724 0,415126
	Standart Sapma	1,7612294
	Çarpıklık	-0,551 0,536
	Basıklık	-0,453 1,038
İplik 5	Ortalama	37,906768 2,169149
	Standart Sapma	9,2029185
	Çarpıklık	1,222 0,536
	Basıklık	1,427 1,038

EK 14 : Radyan ısı testi için aykırı değer oluşturan verilerin analizi.

	N	Ortalama	Standart Sapma	Kayıp		Aykırı değer sayısı	
				Miktar	Yüzde	Düşük	Yüksek
Kumaş 1	15	10,94196	14,13439	0	0	0	3
Kumaş 2	15	12,48929	15,17253	0	0	0	3
Kumaş 3	15	8,373312	9,951861	0	0	0	3
Kumaş 4	15	11,08817	13,16432	0	0	0	3
Kumaş 5	15	8,171623	12,12955	0	0	0	3
Kumaş 6	15	12,93376	20,96231	0	0	0	3

* Aralığın dışındaki vaka sayısı ($Q1 - 1.5 \cdot IQR$, $Q3 + 1.5 \cdot IQR$).

EK 15 : Radyan ısı testi için kumaş türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	Kumaş Türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	Kumaş 1	0,239	9	0,146
	Kumaş 2	0,216	9	0,2
	Kumaş 3	0,211	9	0,2
	Kumaş 4	0,24	9	0,143
	Kumaş 5	0,191	9	0,2
	Kumaş 6	0,193	9	0,2

EK 16 : Radyan ısı testi için kumaş türlerine ilişkin Scheffe testi.

(I) Kumaş türü	(J) Kumaş türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
Kumaş 1	Kumaş 2	-1,0355822	0,596019	0,697	-3,08029	1,009123
	Kumaş 3	0,5714184	0,596019	0,968	-1,47329	2,616123
	Kumaş 4	-0,6927663	0,596019	0,928	-2,73747	1,351939
	Kumaş 5	1,8020799	0,596019	0,119	-0,24263	3,846785
	Kumaş 6	1,1431517	0,596019	0,599	-0,90155	3,187857
Kumaş 2	Kumaş 1	1,0355822	0,596019	0,697	-1,00912	3,080287
	Kumaş 3	1,6070006	0,596019	0,217	-0,4377	3,651706
	Kumaş 4	0,3428159	0,596019	0,997	-1,70189	2,387521
	Kumaş 5	2,83766208*	0,596019	0,001	0,792957	4,882367
	Kumaş 6	2,17873394*	0,596019	0,029	0,134029	4,223439
Kumaş 3	Kumaş 1	-0,5714184	0,596019	0,968	-2,61612	1,473287
	Kumaş 2	-1,6070006	0,596019	0,217	-3,65171	0,437704
	Kumaş 4	-1,2641847	0,596019	0,487	-3,30889	0,78052
	Kumaş 5	1,2306615	0,596019	0,518	-0,81404	3,275367
	Kumaş 6	0,5717333	0,596019	0,968	-1,47297	2,616438
Kumaş 4	Kumaş 1	0,6927663	0,596019	0,928	-1,35194	2,737471
	Kumaş 2	-0,3428159	0,596019	0,997	-2,38752	1,701889
	Kumaş 3	1,2641847	0,596019	0,487	-0,78052	3,30889
	Kumaş 5	2,49484619*	0,596019	0,007	0,450141	4,539551
	Kumaş 6	1,835918	0,596019	0,107	-0,20879	3,880623
Kumaş 5	Kumaş 1	-1,8020799	0,596019	0,119	-3,84678	0,242625
	Kumaş 2	-2,83766208*	0,596019	0,001	-4,88237	-0,79296
	Kumaş 3	-1,2306615	0,596019	0,518	-3,27537	0,814044
	Kumaş 4	-2,49484619*	0,596019	0,007	-4,53955	-0,45014
	Kumaş 6	-0,6589281	0,596019	0,941	-2,70363	1,385777
Kumaş 6	Kumaş 1	-1,1431517	0,596019	0,599	-3,18786	0,901553
	Kumaş 2	-2,17873394*	0,596019	0,029	-4,22344	-0,13403
	Kumaş 3	-0,5717333	0,596019	0,968	-2,61644	1,472972
	Kumaş 4	-1,835918	0,596019	0,107	-3,88062	0,208787
	Kumaş 5	0,6589281	0,596019	0,941	-1,38578	2,703633

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Bağımsız değişken: Lineer direnç değişimi

EK 17 : Farklı ısı test yöntemleri için iplik türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	İplik türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	İplik 1	0,228	18	0,014
	İplik 2	0,17	18	0,178
	İplik 3	0,101	18	0,2

EK 18 : Farklı ısı test yöntemleri için iplik türlerine ilişkin Kruskal-Wallis H Testi.

Lineer Direnç Değişimi	
Ki Kare	6,249
Serbestlik Derecesi	2
p	0,044

EK 19 : Farklı ısı test yöntemleri için iplik türlerine ilişkin Scheffe testi.

(I) İplik türü	(J) İplik türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
İplik 1	İplik 2	-2,01338517*	0,563323	0,002	-3,40535	-0,621421
	İplik 3	-0,6825117	0,563323	0,482	-2,074476	0,7094527
İplik 2	İplik 1	2,01338517*	0,563323	0,002	0,6214207	3,4053496
	İplik 3	1,33087346	0,563323	0,064	-0,061091	2,7228379
İplik 3	İplik 1	0,6825117	0,563323	0,482	-0,709453	2,0744762
	İplik 2	-1,33087346	0,563323	0,064	-2,722838	0,061091

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Bağımsız değişken: Lineer direnç değişimi

EK 20 : Farklı ısı test yöntemleri için kumaş türlerine ilişkin Kolmogorov-Smirnov testi.

	Kumaş Türü	İstatistik	Serbestlik Derecesi	p
Lineer direnç değişimi	Kumaş 1	0,101	27	0,2
	Kumaş 2	0,143	27	0,169
	Kumaş 3	0,13	27	0,2
	Kumaş 4	0,251	27	0
	Kumaş 5	0,136	27	0,2
	Kumaş 6	0,267	27	0

EK 21 : Farklı ısı test yöntemleri için kumaş türlerine ilişkin Kruskal-Wallis H testi.

Lineer Direnç Değişimi	
Ki Kare	6,501
Serbestlik Derecesi	4
p	0,165

EK 22 : Farklı ısı test yöntemleri için kumaş türlerine ilişkin Tamhane testi.

(I) Kumaş türü	(J) Kumaş türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
Kumaş 1	Kumaş 2	-1,1054861	0,4323693	0,19	-2,4408656	0,2298933
	Kumaş 3	0,1969959	0,3229284	1	-0,7947155	1,1887072
	Kumaş 4	-1,4030995	0,8218607	0,786	-4,0095433	1,2033444
	Kumaş 5	0,692012	0,3182107	0,408	-0,2856814	1,6697053
	Kumaş 6	-2,1282528	1,0213726	0,507	-5,3842678	1,1277622
Kumaş 2	Kumaş 1	1,1054861	0,4323693	0,19	-0,2298933	2,4408656
	Kumaş 3	1,30248200*	0,4161859	0,046	0,01139	2,593574
	Kumaş 4	-0,2976134	0,8627763	1	-3,0005535	2,4053268
	Kumaş 5	1,79749811*	0,4125361	0,001	0,5161371	3,0788591
	Kumaş 6	-1,0227667	1,0545757	0,998	-4,3528037	2,3072704
Kumaş 3	Kumaş 1	-0,1969959	0,3229284	1	-1,1887072	0,7947155
	Kumaş 2	-1,30248200*	0,4161859	0,046	-2,593574	-0,01139
	Kumaş 4	-1,6000954	0,8134633	0,595	-4,1880276	0,9878368
	Kumaş 5	0,4950161	0,2958472	0,795	-0,4128274	1,4028596
	Kumaş 6	-2,3252487	1,0146277	0,362	-5,5669919	0,9164945
Kumaş 4	Kumaş 1	1,4030995	0,8218607	0,786	-1,2033444	4,0095433
	Kumaş 2	0,2976134	0,8627763	1	-2,4053268	3,0005535
	Kumaş 3	1,6000954	0,8134633	0,595	-0,9878368	4,1880276
	Kumaş 5	2,0951115	0,811602	0,204	-0,4887858	4,6790087
	Kumaş 6	-0,7251533	1,2651647	1	-4,617068	3,1667613
Kumaş 5	Kumaş 1	-0,692012	0,3182107	0,408	-1,6697053	0,2856814
	Kumaş 2	-1,79749811*	0,4125361	0,001	-3,0788591	-0,5161371
	Kumaş 3	-0,4950161	0,2958472	0,795	-1,4028596	0,4128274
	Kumaş 4	-2,0951115	0,811602	0,204	-4,6790087	0,4887858
	Kumaş 6	-2,8202648	1,0131361	0,133	-6,0588899	0,4183603
Kumaş 6	Kumaş 1	2,1282528	1,0213726	0,507	-1,1277622	5,3842678
	Kumaş 2	1,0227667	1,0545757	0,998	-2,3072704	4,3528037
	Kumaş 3	2,3252487	1,0146277	0,362	-0,9164945	5,5669919
	Kumaş 4	0,7251533	1,2651647	1	-3,1667613	4,617068
	Kumaş 5	2,8202648	1,0131361	0,133	-0,4183603	6,0588899

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Bağımsız değişken: Lineer direnç değişimi

EK 23 : Veri iletim kalitesine göre iplik türlerine ilişkin Kruskal Wallis H Testi.

SNR Değişimi	
Ki Kare	6,501
Serbestlik Derecesi	4
p	0,165

EK 24 : Veri iletim kalitesine göre kumaş türlerine ilişkin Kruskal-Wallis H Testi

SNR Değişimi	
Ki Kare	20,213
Serbestlik Derecesi	5
p	0,001

EK 25 : Veri iletim kalitesine göre kumaş türlerine ilişkin Scheffe testi.

(I) Kumaş türü	(J) Kumaş türü	Ortalama Farkı (I-J)	Standart Sapma	p	95% Güven Aralığı	
					Alt Sınır	Üst Sınır
Kumaş 1	Kumaş 2	-0,00861	0,029519	1	-0,1097	0,092485
	Kumaş 3	0,021552	0,030233	0,991	-0,08199	0,125089
	Kumaş 4	0,009976	0,029519	1	-0,09112	0,111069
	Kumaş 5	0,01711	0,027885	0,996	-0,07838	0,112603
	Kumaş 6	-,13352381*	0,029519	0,003	-0,23462	-0,03243
Kumaş 2	Kumaş 1	0,008607	0,029519	1	-0,09249	0,1097
	Kumaş 3	0,030159	0,031322	0,967	-0,07711	0,137425
	Kumaş 4	0,018583	0,030634	0,996	-0,08633	0,123492
	Kumaş 5	0,025717	0,029062	0,977	-0,07381	0,125242
	Kumaş 6	-,12491667*	0,030634	0,009	-0,22983	-0,02001
Kumaş 3	Kumaş 1	-0,02155	0,030233	0,991	-0,12509	0,081985
	Kumaş 2	-0,03016	0,031322	0,967	-0,13743	0,077107
	Kumaş 4	-0,01158	0,031322	1	-0,11884	0,095691
	Kumaş 5	-0,00444	0,029787	1	-0,10645	0,097565
	Kumaş 6	-,15507576*	0,031322	0,001	-0,26234	-0,04781
Kumaş 4	Kumaş 1	-0,00998	0,029519	1	-0,11107	0,091116
	Kumaş 2	-0,01858	0,030634	0,996	-0,12349	0,086325
	Kumaş 3	0,011576	0,031322	1	-0,09569	0,118842
	Kumaş 5	0,007133	0,029062	1	-0,09239	0,106658
	Kumaş 6	-,14350000*	0,030634	0,002	-0,24841	-0,03859
Kumaş 5	Kumaş 1	-0,01711	0,027885	0,996	-0,1126	0,078384
	Kumaş 2	-0,02572	0,029062	0,977	-0,12524	0,073808
	Kumaş 3	0,004442	0,029787	1	-0,09756	0,10645
	Kumaş 4	-0,00713	0,029062	1	-0,10666	0,092392
	Kumaş 6	-,15063333*	0,029062	0	-0,25016	-0,05111
Kumaş 6	Kumaş 1	,13352381*	0,029519	0,003	0,032432	0,234616
	Kumaş 2	,12491667*	0,030634	0,009	0,020008	0,229825
	Kumaş 3	,15507576*	0,031322	0,001	0,04781	0,262342
	Kumaş 4	,14350000*	0,030634	0,002	0,038592	0,248408
	Kumaş 5	,15063333*	0,029062	0	0,051108	0,250158

*Ortalama fark 0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Bağımsız değişken: SNR değişimi



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ercan Karabulut

Doğum Tarihi ve Yeri : 02/10/1988, Samsun

E-posta : ercankarabulut@outlook.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İTÜ, Tekstil Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013 yılında Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından verilen Teknogirişim Sermayesi Desteği Programı kapsamında Karabulut Yazılım Ltd. Şti. firmasını kurdu ve genel müdür olarak çalıştı.
- 2015 yılında Panko Pantolon Konfeksiyon Ltd. Şti. firmasında üretim mühendisi olarak çalıştı.
- 2015-2018 yılları arasında Kıvanç Kimya Ltd. Şti firmasında planlama mühendisi olarak çalıştı.