

Elektrostatik Yük Boşalımı: Elektronik Üretim Sektöründeki Etkileri ve Alınan Koruyucu Önlemler Üzerine bir İnceleme

Sultan CAN^{1,*}, Asım Egemen YILMAZ¹

¹Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50. Yıl Yerleşkesi L Blok, Gölbaşı, Ankara

Başvuru: 29/04/2014 Düzeltme: 25/11/2014 Kabul:27/11/2014

ÖZET

Elektrostatik Yük Boşalımı, can ve mal kayıplarına yol açabilen, dolayısıyla önlemler alınması gereken önemli bir husustur. Bu makalede Elektrostatik Yük Boşalımı'na sebep olan faktörler özetlenmiş, bu tarz olayların özellikle elektronik üretim sektöründeki etkileri irdelenmiş, buna karşı alınması gerekli önlemler arasında özellikle son zamanlarda yaygınlaşan koruyucu giysiler hakkında temel bilgiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrostatik Yük Boşalımı, Elektrostatik Deşarj, ESD, ESD Koruyucu Önlem

ABSTRACT

Electrostatic Discharge is an issue to be alerted, which might cause fatal or economical impacts. In this article, the factors yielding Electrostatic Discharge are briefly summarized, the impacts of such phenomena on the electronics manufacturing sector is investigated, and basic information regarding the precautions against this issue (particularly the protective garments, which have recently found wider usage) are presented.

Keywords: Electrostatic Discharge, ESD, ESD Protective Precaution

1. GİRİŞ – ELEKTROSTATİK YÜK BOŞALIMI VE SEBEP OLDUĞU KAZALAR

Elektrostatik Yük Boşalımı veya Elektrostatik Deşarj (*Electrostatic Discharge* - ESD), farklı elektrik potansiyeli olan iki cisim arasında istenmeden oluşan anlık ve düzensiz akımlardan kaynaklanmaktadır. Triboyükleme, endüksiyon ya da korona etkisi gibi farklı bir takım olaylar, cisimlerin elektrostatik olarak yüklenmesine yol açmaktadır. Bu yükün boşalması esnasında oluşan en yaygın durum, ortamdaki hassas elektronik aygıtlar üzerinde oluşan kalıcı hasarlardır. Daha nadir olsa da, bu esnada ortaya çıkan arkta otürü ortam kimyasallarının patlaması gibi çok daha

büyük mal ve hatta can kayıplarına sebep olabilecek kazalar da olabilmektedir.

ESD temelli kazalar, oldukça soğuk ve rutubetin de buna bağlı olarak çok düşük olduğu ortamlarda çok daha yaygın olarak görülmektedir. Özellikle Alaska (A.B.D.) ve Alberta (Kanada) gibi soğuk ve rutubetsiz bölgelerdeki büyük sanayi kuruluşlarında meydana gelen olaylar, 1950'li yıllardan bu yana bilim camiasının dikkatini bu gibi kazalara ve bunlara dair önlemler oluşturulmasına yönlendirmiştir.

Rutubetin düşük olduğu ortamlarda çok daha kolay gerçekleşebilen elektrostatik yüklenme etkisi, bu

*Yazışma yazarı: sultan.can@ankara.edu.tr

ortamlarda çalışmakta olan personelin soğuktan korunma amacıyla giydiği termo-koruyucu giysilerin de yüksek yüklenme kapasitesi ile birleşince; petrol platformu, askeri cephanelik, anestezi tüpleri içeren hastane ameliyathanesi gibi mekânlarda ölümcül kazalara yol açmıştır [1].

Bu nedenle, literatürde ESD ve koruyucu önlemler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, 2000’li yıllara kadar yapılmış olan çalışmaların genelinde:

- Çeşitli malzeme tiplerinin elektrostatik yüklenme eğilimlerinin belirlenmesi; bu amaçla ölçüm ve test standardı oluşturulması,
 - Termo-koruyucu giysilerin elektrostatik yüklenme eğilimlerinin düşürülmesi,
 - ESD koruyucu önlemlerin, ölümcül kaza oluşturmayacak şekilde standartlaştırılması
- gibi amaçlarla gerçekleştirildiği görülmektedir.

1950-2000 arasında yapılmış olan çalışmalar, ESD’nin gerçekten de soğuk ve düşük rutubetli ortamlarda bir ceketin veya süveterin hızlı bir şekilde giyilmesi/çıkarılması, bir laboratuvar önlüğünün hızlı bir şekilde bir iskemlenin üzerine bırakılması gibi olağan hareketler sonucunda bile oluşabildiğini göstermiştir [2]. Tablo 1’de, bir takım olayların ve cisimlerin ne kadar yüksek ESD gerilimlerine sebep olabildiği görülmektedir [3].

Elektrostatik yük oluşumu için çok atipik bir hareketin gerekli olmadığı, sadece yürümenin bile kazalara yol açabilecek bir hareket olabildiği, Tablo 1’de görülmektedir. Yürüme esnasında oluşan gerilim değerleri, zeminin kaplı olduğu malzeme ve ortamdaki bağıl neme bağımlı olup, %20 ve %50 nem oranlarında farklı malzemeler için oluşan voltaj değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir [4]-[5]. Oluşan voltaj değerleri ne kadar büyükse, ilgili elektrostatik yük boşalımı o derece hissedilebilir / gözlemlenebilir olmaktadır; örneğin:

- 3,500 Volt’tan büyük voltajların sebep olduğu yük boşalmaları, acı yoluyla hissedilebilir.
- 5,000 Volt’tan büyük voltajların sebep olduğu yük boşalmalarının çıkardığı ses duyulabilir.
- 8,000 Volt’tan büyük voltajların sebep olduğu yük boşalmalarının çıkardığı arklar görülebilir [6].

Tablo 3’te ise, farklı cisimlerin pozitif veya negatif olarak yüklenme eğilimleri sıralanmıştır [7]. Buradan da görüleceği üzere, “insan eli”nin yüksek miktarda pozitif yüklenme eğilimi; bunun yanı sıra birçok ortamda bulunan metallerin veya yarı iletkenlerin yüksek miktarda negatif yüklenme eğilimi, olası kazalara davetiye çıkarmaktadır.

Tablo 1. Farklı davranış/hareket tiplerinin veya cisimlerin neden olduğu ESD etkileri [3].

Koşul	Gerilim (Volt)	
	Düşük nem (%10-20)	Yüksek Nem (%65-90)
Polietilen döşeme üzerinde yürüme	12000	250
El yapımı halı/kilim üzerinde yürüme	35000	1800
Suni çalışma ortamı döşemesi üzerinde yürüme	6000	100
Melamin yüzey	8000	150
Poliüretan iskemle/koltuk	18000	1500
Polietilen ambalaj çantası (dolu/boş)	20000	1200

Tablo 2. Bağıl nem oranlarına göre farklı malzemelerin üzerinde yürümenin oluşturduğu gerilim [4]-[5].

Zemin kaplama malzemesi	%20 bağıl nem altında yürüme esnasında oluşan gerilim	%50 bağıl nem altında yürüme esnasında oluşan gerilim
Naylon	> 10 kV	< 4 kV
Akrilik ve polyester	> 7 kV	< 2 kV
Vinil asbest kiremit	> 4 kV	< 3 kV
Anti-statik naylon	< 4 kV	< 1.5 kV
Yüksek basınç Laminat	> 2kV	< 2.5 kV
Piyasada “Compu-Carpet” olarak bilinen ticari ürün	< 2 kV	< 1.5 kV

Tablo 3. Farklı cisimlerin yüklenme eğilimleri [7].

Hava	
İnsan Eli	
Asbest	
Tavşan Kürkü	
Cam	
Mika	
İnsan Saçı	
Naylon	
Yün	
Kürk	
Motor Yağı	
İpek	
Alüminyum	↑
Kağıt	Pozitif Yönde Artış
Pamuk	
Çelik	Negatif Yönde Artış
Tahta	↓
Amber	
Lehim	
Sert Kauçuk	
Nikel, Bakır	
Pirinç (Metal), Gümüş	
Altın, Platin	
Sülfür	
Asetat	
Polyester	
Selüloz	
Orlon	
Poliüretan	
Poliyeten	
Polipropilen	
PVC (Vinil)	
Klorotrifloroetilen polimer	
Silikon	
Teflon	

2. ESD KAZALARININ ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜNDEKİ YERİ VE ÖNEMİ

ESD kazaları, sadece ekstrem durumlarda oluşan ölümcül patlamalar ile sınırlı olmayıp; elektronik sektöründe de özellikle mali açıdan önemli kayıplara yol açmaktadır. Yapılan çalışmalara göre, elektronik sektöründeki arızalı mal iadelerinin yaklaşık %30-%50 kadarı, üretim hollerinde çalışmalar sırasında istenmeyen ve beklenmeyen elektrostatik boşalmalar nedeniyle oluşan arızalardan kaynaklanmaktadır [8]. Bu arızaların ekonomik maliyeti yıllık 45 milyar

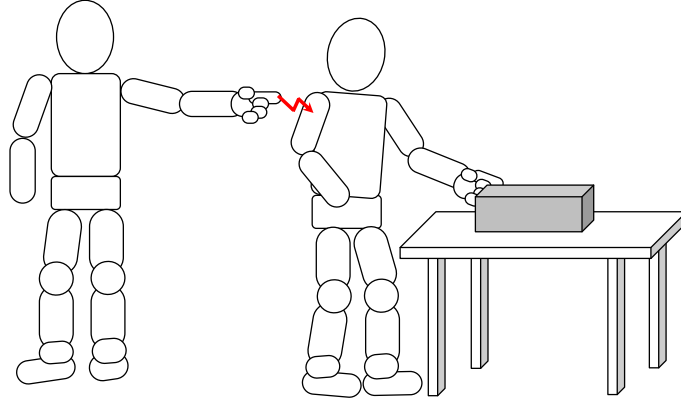
A.B.D. doları mertebesinde olup; bu meblağ tüm elektronik sektörünün yıllık gelirinin yaklaşık %6'sına karşılık gelmektedir [9].

ESD temelli kazalar, gerekli önlemler alınmadığı takdirde üretim sürecinin her adımında meydana gelebilmektedir. Bu kazalar yonga (*chip*), entegre devre gibi temel bileşenlerin üretimi esnasında olabildiği gibi, alt sistem ve sistem üretimi/montajı aşamasında, hatta son kullanıcıların ev/ofislerinde bile gerçekleşmektedir. Bu kazaların oluştukları yere göre rastlanma sıklıkları Tablo 4'te verilmiştir [9].

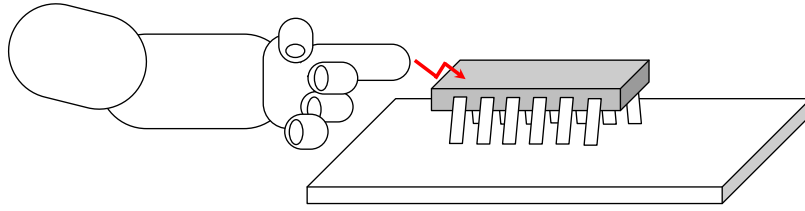
Tablo 4. ESD temelli kazaların ve mali kayıpların olduğu yerlere dair istatistikler [9].

Raporlanan Statik Kayıplar			
Tanımları	Tahmini en küçük kayıp	Tahmini en büyük kayıp	Tahmini ortalama kayıp
Bileşen Üreticileri	%4	%97	%16-22
Alt Sistem Üreticisi Firmalar (Alt Yükleniciler)	%3	%70	%9-15
Sistem Entegratörü Büyük Firmalar	%2	%35	%8-14
Kullanıcılar	%5	%70	%27-33

Şekil 1’de, bir üretim holünde olması en muhtemel personelden personele yük boşalımı vakası resmedilmektedir. Söz konusu üretim holünde elektronik cihazların bulunması, özellikle de narin elektronik ürünlerin koruyucu kılıfları henüz monte edilmemiş şekilde tezgâhlarda yer alması durumunda,



Şekil 1. Üretim holünde tipik bir elektrostatik yük boşalımı kazası: Yaklaşma veya temas nedeniyle personelden personele yük boşalımı.



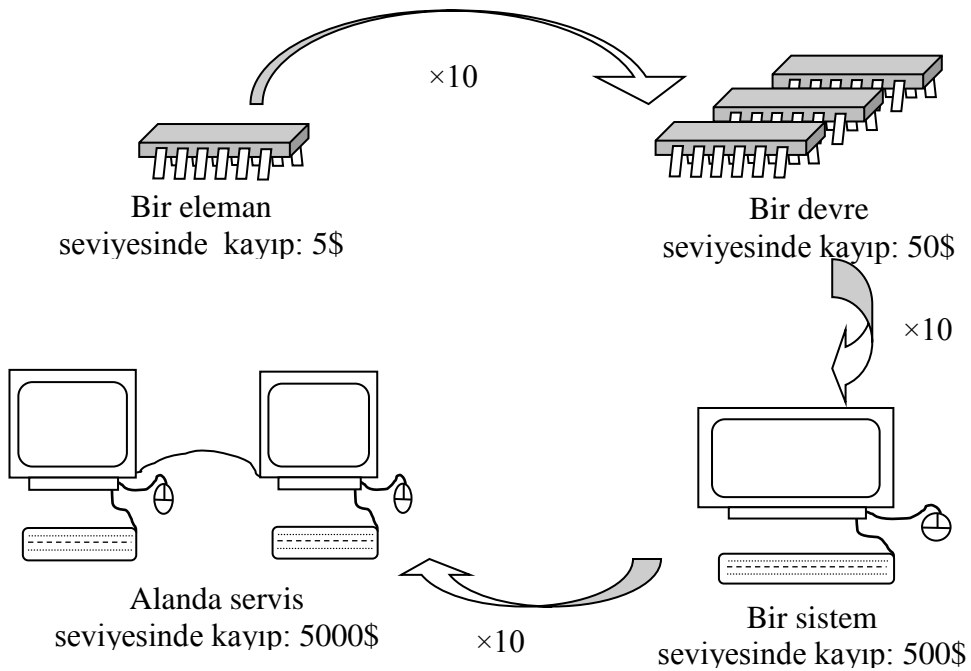
Şekil 2. Elektronik sektörü üretim holünde cihaz/ürün arızalarına sebep olan tipik bir elektrostatik yük boşalımı vakası: Personelden, iletken tezgâh üzerinde bulunan yongaya doğru yük boşalımı.

Elektronik dünyasındaki boyutların küçülmesiyle, entegre devrelerin her bir karesine düşen transistör/kapı sayısı her yıl ikiye katlanmış ve bunun sonucu olarak da, her ESD olayıyla birlikte elektronik cihazların zarar görme riski artmıştır.

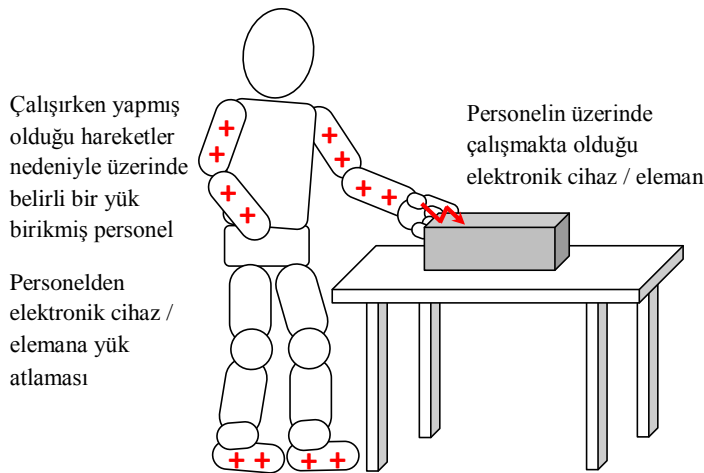
Bu zarar tek bir bileşenden sistem seviyesine kadar çıktıkça Şekil 3’de gösterildiği gibi hemen her basamakta 10 kat artmaktadır. Şekil 4’de resmedildiği gibi kendi yaptığı hareketler dolayısıyla üzerinde yük birikmiş personelden, iletken tezgâh üzerinde bulunan cihaz/ürüne doğru elektrostatik yük boşalımı vakasında olduğu gibi benzer vakalarda, bir elemandaki kayıp 5 A.B.D. Doları iken, elemanlardan oluşan bir devrede kayıp 50 A.B.D. Doları ve devrelerden oluşan sistemde de 500 A.B.D. Doları mertebesine çıkmaktadır. Söz konusu ürünler sahaya yayıldıktan sonra bunların tamiri veya yedek parça ile

değiştirilmesinin maliyeti ise 5000 A.B.D. Doları mertebesine ulaşabilmektedir [6].

Gerek tüketici elektroniği, gerekse askeri elektronik sektöründe kullanılmakta olan birçok entegre devre, kendi üreticilerinin de kataloglarında belirttiği üzere kiloVolt mertebesindeki ESD voltajlarına karşı dayanıklıdır. Ancak geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar, entegre devre veya yonga paketlemesi dışında kalan birçok farklı elektronik bileşenin ancak 100-150V mertebesindeki ESD gerilimlerine dayanıklı olduğunu göstermiştir [10]. Hatta, manyeto-resistif okuma-yazma kafaları, Schottky diyodları, CCD sensörleri, alan-etki transistörleri (MOSFET, JFET), mikroişlemciler ve LCD ekranlar 10 volt mertebesinde bir voltaj değişikliğine bile duyarlıdır. Farklı elektronik bileşenlerin duyarlılık seviyeleri, Tablo 5 ve Tablo 6’da verilmektedir.



Şekil 3: Eleman, devre, sistem ve servis seviyelerinde ESD temelli mali kayıplar [6].



Şekil 4. Kendi yaptığı hareketler dolayısıyla üzerinde yük birikmiş personelden, iletken tezgâh üzerinde bulunan cihaz/ürüne doğru elektrostatik yük boşalımı vakası.

Tablo 5. ESD dayanıklılık seviyeleri 2000 Volt'un altında olan elektronik malzemeler [11].

Teçhizat / Malzeme tipi
Mikrodalga elemanlar (Schottky bariyer diyodları, nokta-temas diyodları ve 1GHz üzeri çalışan diğer diyodlar)
MOSFET'ler
Yüzey akustik dalga (<i>Surface Acoustic Wave - SAW</i>) cihazları
JFET'ler
CCD'ler
Voltaj regülatör diyodları
OpAmp'lar
İnce film dirençleri
AMR ve GMR tipi hard-disk okuma/kayıt kafaları
Lazer diyodlar
Hibrid kuplörler
VHSIC'ler
0.175A'dan düşük çalışma özellikli silikon kontrollü düzelticiler

Tablo 6. Çeşitli elektronik bileşenlerin ESD'ye karşı dayanıklılık seviyeleri [3].

Bileşen Tipi	Maksimum dayanıklılık seviyesi (Volt)	Bileşen Tipi	Maksimum dayanıklılık seviyesi (Volt)
VMOS	30-180	SCR	680-1000
MOSFET	100-200	Schottky TTL	1000-2500
GaAsFET	100-300	Bipolar transistör	380-7000
EPROM	100	ECL (Baskı Devre seviyesi)	500-1500
JFET	140-7000	Schottky diyod	300-2500
SAW	150-500	Film tipi direnç	300-3000
OpAmp	190-2500	CMOS	250-3000

3. ESD KORUYUCU ÖNLEMLER

ESD kazalarının ve ölümcül etkilerinin görülmesinin ardından yapılan çalışmalar, çalışma ortamlarında ESD karşı önlemlerinin tanımlanmasına yönelik standartların oluşmasına da yol açmıştır. 2000 yılı itibarı ile bu konuda, A.B.D.'de MIL-I-23659, İsveç'te Försvarsstandard FSD 0112 standartları yürürlüğe girmiştir. Söz konusu ESD kazalarının elektronik cihazlar üzerinde olumsuz etkilerinin ölçülmesi ve engellenmesine yönelik olarak ise A.B.D.'de sivil ANSI C63 ile askeri U.S. MIL-STD-883D standartları; Avrupa Birliği'nde ise sivil IEC 801-2 ve askeri ECMA TR-40 standartları halen yürürlüktedir [7]. Oluşabilecek olası tüm ESD olaylarını (ve kazaları), analiz ve simülasyonlarda kapsamak amacıyla, literatürde 3 farklı model ortaya konulmuştur. Bu modeller sırası ile insan vücudu modeli, makine modeli ve yüklü cihaz modelidir. Her bir model için de elektrostatik boşalım standardı oluşturulmuş ve söz konusu modeller için sırası ile ESD STM5.1-1998, ESD STM5.2-1999 ve ESD STM5.3-1999 standartları kabul görmüştür.

1. İnsan Vücudu Modeli (*Human Body Model - HBM*): Bu model, yüklü insan vücudundan cihaza doğru olan yük boşalımı durumunu incelemektedir. ESD STM5.1-1998 standardına göre sınıflandırılması ve bu sınıflara ait voltaj kısıtları Tablo 7 ile sunulmuştur.

Tablo 7. İnsan Vücudu Modeli uyarınca cihazların duyarlılık sınıflandırması (ESD STM5.1-1998) [11].

Sınıflar	Voltaj aralıkları
Sınıf 0	<250 volt
Sınıf 1A	250 - 500 volt
Sınıf 1B	500 - 1,000 volt
Sınıf 1C	1,000 - 2,000 volt
Sınıf 2	2000 - 4,000 volt
Sınıf 3A	4000 - 8000 volt
Sınıf 3B	> 8000 volt

2. Makine Modeli (*Machine Model - MM*): Bu model, hareketli ve yüklü metal bir cisimden cihaza doğru olan yük boşalımı durumunu incelemektedir. Modele ait ESD-S5.2-1999 kodlu standart kapsamında 4 sınıfta belirlenen bu standart ve bu standartlara ait voltaj kısıtları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Makine Modeli uyarınca cihazların duyarlılık sınıflandırması (ESD-S5.2-1999 [11])

Sınıf	Voltaj aralıkları
Sınıf M1	<100 volt
Sınıf M2	100 - 200 volt
Sınıf M3	200 - 400 volt
Sınıf M4	> 400 volt

3. Yüklü Cihaz Modeli (*Charged Device Model - CDM*): Bu model ise, cihaz üzerinde biriken yükün topraklanmış iletken bir cisim üzerine boşalımı durumunu incelemektedir. Yüklü cihaz modeline ait C1-C7 aralığında olmak üzere toplam 7 sınıftan oluşan standardın voltaj kısıtları ise Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Yüklü Cihaz Modeli uyarınca cihazların duyarlılık sınıflandırması (ESD-DS5.3-1999 [11])

Sınıflar	Voltaj aralıkları
Sınıf C1	<125 volt
Sınıf C2	125 - 250 volt
Sınıf C3	250 - 500 volt
Sınıf C4	500 - 1,000 volt
Sınıf C5	1000 - 1500 volt
Sınıf C6	1500 - 2000 volt
Sınıf C7	> 2000 volt

Bu modellerin, alınan önlemlerin performansı hakkında öngörü oluşturmak amacıyla yapılacak

simülasyonlarda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Elektronik bileşenlerdeki (Tablo 5 ve 6'da da görülen) hassasiyet sebebiyle, elektronik cihazların statik elektriğe ve yüksek frekanslardaki elektromanyetik girişime karşı dayanıklılığının artırılabilmesi için, önümüzdeki yıllarda elektrostatik boşalma (ESD) ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) için kullanılan koruyucu ürünlerde bir artış öngörülmektedir. Günümüzdeki ESD koruyucu önlemleri tanımlayan standartlar üretim hollerinde maksimum 100V mertebesinde ESD gerilimine izin verecek şekilde tanımlanmıştır; ancak yakın gelecekte bu sınırın 50V mertebesine çekilmesi beklenmektedir [12].

Elektromanyetik uyumluluk ve koruma ile ilgili ürünlere ilişkin pazar, yılda %7'den daha hızlı bir büyüme göstermektedir. Halkın elektromanyetik alanlara maruziyetinin kısıtlanmasını öngören 1999/519/EC sayılı Avrupa Konseyi Tavsiye Kararı ve işçi sağlığı ve iş güvenliği ile ilgili 2004/40/EC sayılı yönerge ile, koruma sağlayan yeni özgün materyal ve teknolojilerin üretilmesi ve geniş çaplı kullanımı acil bir gereklilik haline gelmiştir.

Pazar, koruyucu yapıların hem yaşam, hem de iş alanlarında örneğin tıbbi cihazların yüksek güçte elektromanyetik yayıcılardan (radyo, TV, radar, GSM telefonlar, v.b.) korunması, ya da DECT/WLAN sistemlerin bulunduğu yerlerde telsiz uygulamalarda seçici veri transferi ve/veya veri koruması gibi amaçlarla kullanılması nedeniyle giderek büyümektedir.

ESD kazalarını önlemeye yönelik en yaygın önlem, "topraklayıcı bilezik veya bileklik" kullanımudur. Söz konusu bilekliklerin kullanımındaki temel fikir, personel vücudundan toprağa iletken bir güzergâh oluşturularak personel üzerinde yük birikmesini engellemektir. Ancak yukarıda anılan sebeplerden ötürü, üretim hollerinde personelin "topraklayıcı bilezik veya bileklik" takması artık tek başına yetersiz bir önlem haline gelmiştir. Ayrıca üretim holünde, çoğunlukla da narin bileşenler üzerinde hassas lehimleme işlemleri yapan personel, el hareketlerini kısıtlayan bu bileklikleri tüm mesai

boyunca takmayı istememektedir. ESD bilekliklerin yanı sıra ESD-güvenli paketeleme malzemesi, ayak bileklikleri veya topukluklar, anti-statik masa altlıkları, yer döşemeleri ve paspaslar, elektrostatik boşalmı önlemek için kullanılan başlıca diğer araçlardır.

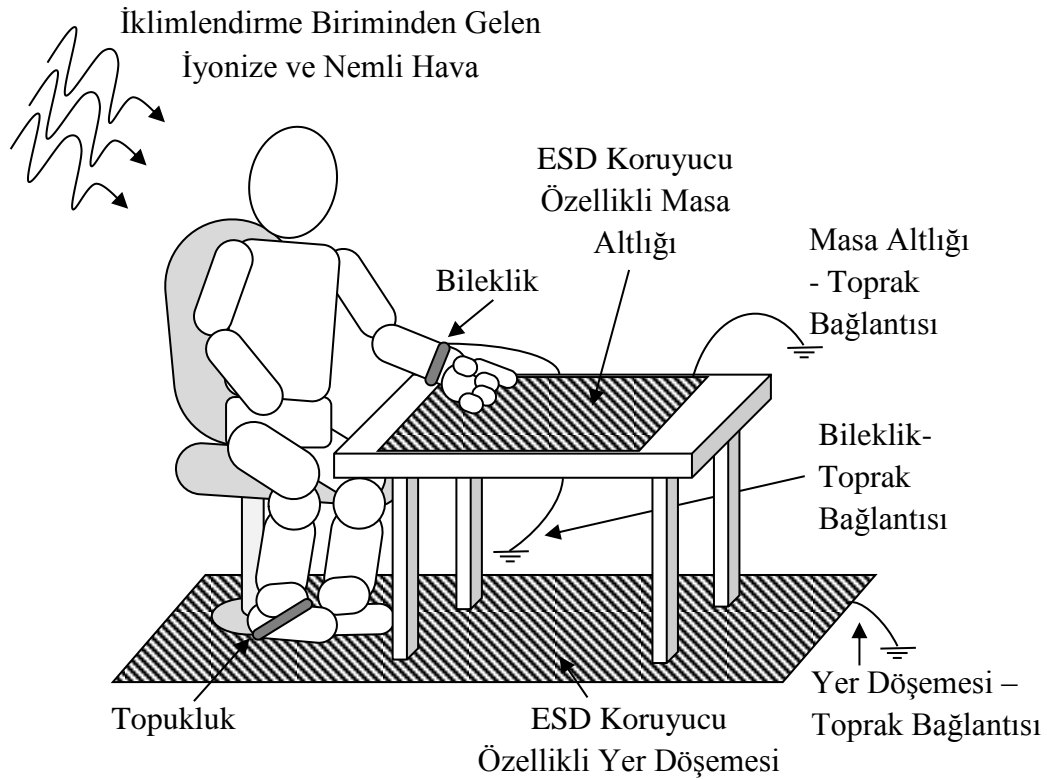
Statik problemlere önerilebilecek çözümler literatürde 4 ana başlık altında toplanmaktadır.

- **Yük Oluşumunun Önlenmesi:** Personel tarafından üretilen yükler, bileğe bağlanan bileklik veya bilezik ile uzaklaştırılır. Söz konusu bileklikler:
 - temas eden malzemelerin ayrılmasından dolayı meydana gelen triboelektrik yükler, ile
 - vücut kapasitansında meydana gelen değişiklikler nedeni ile ortaya çıkan yükler

olmak üzere 2 çeşit yükü uzaklaştırır.

- **Yükün dağıtılması:** Yük dağıtımı yükü uzaklaştırmanın yavaş ama etkin bir yöntemidir.
- **Yükün nötrlenmesi:** Bu terminoloji, iletken olmayan malzemelerde iyonizasyon etkisini tanımlamak için kullanılır. Strafor köpükten bir kahve bardağı buna örnek olarak verilebilir. Bu malzeme eğer topraklanmaz ise birkaç bin voltaj birikimine neden olabilir.
- **Elektrostatik Alanlar için kalkanlama:** Statik olarak hassas cihazların taşıma ve depolanmasında kullanılan ambalajlar statik yükten koruma amaçlı tasarlanmalı ve en az bir metalik katmandan oluşmalıdır [6].

Bunların yanı sıra ESD kazalarına davetiye çıkaran düşük nemli ortamı engellemek amacıyla nem artırıcı iklimlendirme birimlerinin kullanımı da, uygulamada hayli yaygın bir yaklaşımdır. Şekil 5'te, klasik anlamda tüm ESD önlemlerinin bir arada kullanıldığı bir üretim tezgâhı görülmektedir [13]-[14]. Daha önce de belirtildiği üzere, personelin el hareketlerini kısıtlayan bileklik kullanımı, klasik önlemlerin başında gelmektedir.



Şekil 5. Klasik anlamda tüm ESD koruyucu önlemlerin alındığı bir çalışma tezgâhı.

ESD önlem almanın kritik olduğu tipik olarak Tablo 10'da özetlenen yerler, kalite artırma ve söz konusu zararların minimize edilmesinde önem teşkil etmektedir.

Tablo 10. ESD önlem alınması gereken tipik yerler ve aşamalar [6].

Mağazalar ve depolar
Montaj hattı
Test ve muayene
Araştırma ve geliştirme
Paketleme
Saha servis onarım
Ofisler ve laboratuvarlar
Temiz odalar

4. ESD KAZALARINI ÖNLEMEDE YENİ BİR YAKLAŞIM: ESD KORUYUCU GİYSİLER

Personelin ayrıca ESD koruyucu giysi giymesi, olası HBM (İnsan Vücudu Modeli - *Human Body Model*) temelli ESD kazalarını önleyici önemli bir faktör olarak görülmektedir. Bunun sonucu olarak, ESD giysilerine gereksinim duyulmakta ve bunlar giderek daha da geliştirilmektedir.

Yarı iletken endüstrisinin mikro-elektronik ürünlerde yonga (*chip*) ve tekstil içi uygulamalara yönelik

koruma önlemlerini artırması; dolayısıyla ESD/EMC giysilere ilişkin toplam işlem hacminin 2015 yılında 480 milyon A.B.D. Doları'na ulaşması beklenmektedir. Günümüzde, ESD giysiler bileşik iletken elyaf liflerinden, iletken lif ve/veya iletkenliği artırmak üzere yüzeylerin higroskopik (yani nem tutan) maddelerle işlemden geçirilmesiyle yapılmaktadır. Son yıllarda EMC kavramı, özellikle yüksek hızlı özgün iletim ağlarının tasarımı ve güvenli donanım üretiminde giderek daha büyük bir önem kazanmaktadır.

ESD koruyucu giysiler, kullanıcının günlük giysisinin üstüne giyilecek şekilde tasarlanmaktadır. İlk olarak 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanan bu tip giysilerin ilk örneklerinde, bu giysilerin homojen elektrostatik yüzeyleri (saf pamuk ya da pamuk-higroskopik ajan karışımı) olmaktadır. Günümüzde, ESD giysiler konvansiyonel tekstil lifleri ve bileşik iletken liflerin karışımı olan iletken bileşik tekstilden üretilmektedir. Söz konusu heterojen yapıları yüzeyler, daha yüksek performans göstermelerinden ötürü tercih edilmektedir. Öte yandan, gerek simülasyon/modelleme, gerekse ölçüm/test hususlarında zorluk çıkarmalarından heterojen yapıları yüzeyler içeren giysilerin analiz ve tasarımları oldukça karmaşık bir hal almaktadır.

İdeal bir ESD giysisinin, şu özellikleri aynı anda sağlaması gerekmektedir:

1. Yük dağıtma sürecini desteklemek ve yük birikimini önlemek üzere yüksek iletkenlik,
2. Öte yandan hızlı yük dağıtımını önlemek ve boşalım sırasındaki enerji transferini sınırlamak üzere yüksek direnç.

Anlaşılabacağı üzere yukarıda anılan iki özellik, birbirleriyle çelişmekte olan iki husustur. İletken ve yalıtkan yapılardan oluşan heterojen yüzeyler, ESD giysilerde işte bu nedenle tercih edilmektedir. Giysi içerisindeki iletken malzeme, düzenli ve sürekli yük akışını sağlayacak iletken güzergâhları oluşturmakta iken; yalıtkan malzeme yüksek yüzey direnci oluşturarak boşalım esnasındaki enerji transferini kontrol altına almaktadır. Dolayısıyla ESD koruyucu giysi tasarımı, gerek teknik, gerekse ekonomik manada zorlayıcı bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

ESD giysi üretiminde sıkça kullanılan panel tipleri şunlardır [15]-[16]:

1. İyi iletken özellikleri bulunan higroskopik ajanlarla işlenmiş homojen paneller (Şekil 6a)
2. İletken tabakayla kaplı paneller (Şekil 6b)
3. Tek yönlü iletken yapıya sahip paneller (Şekil 6c)
4. Izgara şeklinde iletken yapıya sahip paneller (Şekil 6d)

Üretim teknolojisine bağlı olarak ise paneller şöyle sıralanabilir:

1. Dokunmamış paneller (farklı organik ve sentetik liflerle iletken lifçikler bir bağlayıcı üzerine sarılmıştır)
2. Dokuma (*woven*) paneller (tekstil lifleri ve iletken lifler dik açıyla iç içe geçerek bir konfigürasyon oluştururlar)
3. Örgü (*knitted*) paneller (iletken liflerin birbirine düğümlenmesiyle bir konfigürasyon oluşturulur)

Panellerin iletken yapısı bileşik liflerden kaynaklanmaktadır. Bu da organik (pamuk, keten ya da kenevir) ya da inorganik (viskon, relon ya da tergal) liflerin iletken materyallerin (gümüş, bakır, altın ya da paslanmaz çelik kaplamalar) kullanımıyla gerçekleşmektedir. Kumaş içerisinde kullanılan

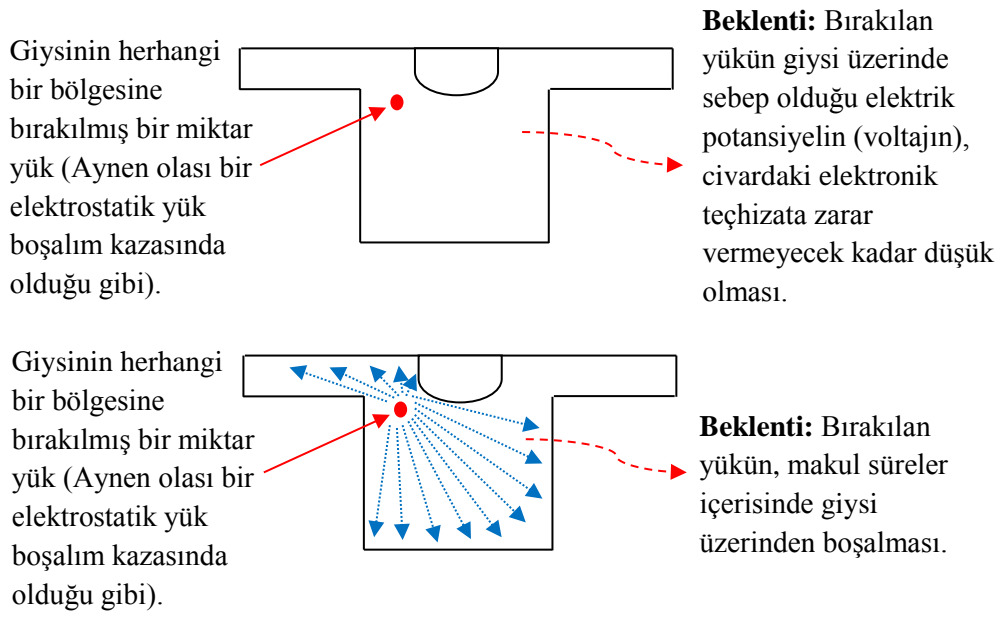
iletken malzemenin türü, yük boşaltım performansı açısından büyük önem arz etmektedir. Örneğin, 2kV'luk ESD gerilimi için paslanmaz çelik fiberler üzerinde oluşan akımların (yaklaşık 13A), iletken karbon fiberler üzerinde oluşan akımların (0.12A) yaklaşık olarak 100 katı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [10].

Piyasada yaygın olarak bulunan bileşik iletken lifler; tam iletken lif, iletken çekirdek lif, trilobal iletken çekirdek lif, kaplı iletken lif, iletken lifçik ve tekstil lifinden bükme ip, iletken lif ve tekstil lifinden bükme ip ve sandviç iletken lif olarak sıralanabilir.

Zaman içinde, yalnızca belirli konfigürasyonlar ESD giysi üreticilerinin ilgisini çekmiştir. Bunlardan en popüler olanları karbon bazlı kompozit lif düğümlü örgü kumaşlar, ya da kompozit iletken lif katkı dokuma kumaşlardır.

İletken ve iletken olmayan malzemelerin karışımından oluşan topoloji, ESD giysilerde tipik olarak 105-109 Ω/m^2 lik bir yüzey rezistansı sağlamaktadır. Bu da, dağıtkanlık (*dissipation*) için en hızlı güzergâhın belirlenmesi (yüksek iletkenlik) ile elektrostatik yük riskinin azalması (yüksek direnç) arasında iyi bir denge kurulmasını sağlamaktadır.

ESD koruyucu giysi geliştirilmesine yönelik olarak bugüne değin gerçekleştirilmiş en önemli bilimsel içerikli proje, 2002-2005 yılları arasında Avrupa Komisyonu desteğiyle VTT (Finlandiya), Genova Üniversitesi (İtalya), Centexbel (Belçika), SP (İspanya), STFI (Almanya), Nokia (Finlandiya) ve Celestica (İtalya) konsorsiyumu tarafından gerçekleştirilmiş olan "Protective Clothing for Use in the Manufacturing of Electrostatic Sensitive Devices (ESTAT-Garments)" başlıklı projedir. 3 yıllık bu projenin temel amacı sadece ESD koruyucu giysi geliştirmekle sınırlı kalmayıp; aynı zamanda International Electrotechnical Commission Technical Committee'ye elektrostatik boşalım standartları ve koruyucu özellikli kumaşların test prosedürlerine yönelik TC101 Standardı'nın oluşturulması konusunda veri sağlamak da olmuştur. Söz konusu proje sonucu elde edilen bilgi birikimi ve yapılmış olan bilimsel yayınlara, [16]'dan ulaşılabilir.



Şekil 6. İyi bir ESD koruyucu giysinin sağlaması gereken özellikler.

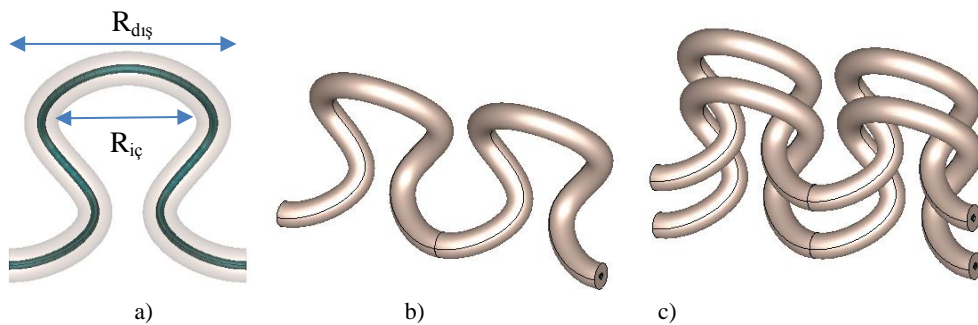
ESD koruyucu giysi geliştirme projelerinde, önceki paragraflarda sözü edilen 3 model arasından İnsan Vücudu Modeli (HBM)'nin baz alınması gerekmektedir. Analiz ve benzetimlerdeki genel yaklaşım, eşlenik ESD voltajı uyarınca yüklenmiş olan bir kapasitansın giysi yüzeyi üzerinde boşalmasının hesaplanması/incelenmesi olarak özetlenebilir. Bu gibi bir giysiden beklenen, Şekil 7'de görüldüğü gibi üzerindeki herhangi bir noktada oluşan yük dağılımının:

- a) Etraftaki herhangi bir elektronik cihaza zarar verecek derece yüksek voltaj değerlerine sebep olmaması,

- b) Makul ve mantıklı sürelerde boşaltılması olarak özetlenebilir.

5. BENZETİM SONUÇLARI

ESD giysi tasarımına yönelik çalışmalarda CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak bir ilmek yapısı tasarlanmıştır. Tek ilmeğe ait görüntü Şekil 7a'da sunulmuştur. Önerilen ilmeğin Şekil 7b'de görüldüğü gibi yan yana, Şekil 7c'de görüldüğü gibi alt alta örgü yapısını oluşturacak şekilde çoklanması ile söz konusu giysi modellenmiştir.



Şekil 7. Örgü-ESD giysisi için ilmek tasarımı

Şekil 7'de görüldüğü gibi ilmek 2 ana katmandan oluşmaktadır. Dış yapı akımı sınırlandırmaya yönelik dielektrik katman iken, iç kısım boşalımı sağlaması için iletken yapıdadır. Modellemede $R_{dış}$ dış yarıçapı, $R_{iç}$ ise iç yarıçapı göstermekte, p ise bu iki çap arasındaki oranı sembolize etmektedir.

Yapılan çalışmalarda ilk aşamada belirli bir yük yoğunluğunda söz konusu geometrinin tepkisi incelenmiş ve bu bağlamda statik yükün ilk ilmeğe boşalmaya başladığı, yük değerinin $2,1 \times 10^{-6}$ C olduğu ve ilmek sayısının 5 olduğu varsayılmıştır. Önerilen yapıda iç malzemeler değiştirilmiş ve iç malzemenin alüminyum, nikel ve çelik olacak şekilde

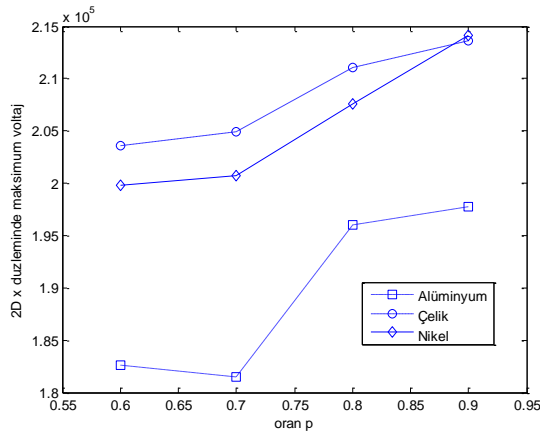
elektrostatik boşalmaya etkisi gözlenmiştir. 2 boyutta gözlenen maksimum voltaj değerleri ile malzeme kıyası yapılmış, daha az voltaj değerine sahip olan malzemede daha hızlı bir yük boşalımı olduğu

öngörülmüştür. Dış malzemenin etkisi ise dielektrik katsayısı 3,5, 3,7 ve 7,9 olacak şekilde değiştirilerek gözlemlenmiştir ve sonuçlar Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. İletken malzemeler alüminyum, çelik ve nikel seçildiğinde farklı dış malzemeler için maksimum voltaj miktarları ($R_{dış}=0,7mm$, $p=0,7$, ilmek sıra sayısı=5)

R _{dış} =0,7mm, p=0,7 için 2 boyutlu analiz sonucu elde edilen maksimum voltaj değerleri (V)			
	Dielektrik malzeme poliimid ($\epsilon_r=3,5$)	Dielektrik malzeme Pamuk ($\epsilon_r=7,9$)	Dielektrik malzeme Pamuk ($\epsilon_r=3,7$)
Alüminyum	181488	148064	180134
Çelik	204962	172989	202711
Nikel	20709	168670	198494

Bu sonuçlara göre dielektrik malzemenin dielektrik katsayı değeri arttıkça maksimum voltaj değerinde azalma meydana gelmiş, bu davranış her üç iletken iç malzeme için de geçerli olmuştur. Yine bu bağlamda, düşük dielektrik katsayılı bir dış malzeme yüksek voltaj değerine sebep olmuştur.



Şekil 8. Farklı iç dış yarıçap oranları için voltaj değişimi ($R_{dış}=0,7mm$, Dış malzeme poliimid ($\epsilon_r=3,5$), ilmek sıra sayısı= 5)

İç dış yarıçap oranı etkisi Şekil 9'da sunulmuştur. Oran, 0,6'dan 0,9'a kadar 0,1'er aralıklarla artırılmış; artan oranla maksimum yükün de arttığı gözlenmiştir. Alüminyum, çelik ve nikel için analizi yapılan benzetim sonuçlarında artan oranla çelik ve nikel iletkenleri ile sürekli artış gösteren maksimum voltaj değerinde alüminyum için 0,7 oranında bir istisna olmuş; fakat diğer oranlarda bu artış devam etmiştir.

6. ESD KORUYUCU GİYSİLERDE TASARIM ÖLÇÜTLERİ – SONUÇ

Daha önce de belirtildiği üzere birbirleriyle çelişen yüksek iletkenlik ve yüksek direnç özelliklerinin aynı anda sağlanması zorunluluğu, ESD giysilerin tasarımını bilimsel açıdan zor ancak çekici kılmaktadır. Mühendislik açısından ilginç diğer hususlar da bilhassa ekonomik parametrelerin göz

önünde bulundurulmasıyla ortaya konulabilir. Bunlar, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. **Ağırlık:** Giysi içerisinde kullanılan iletken yapıların çoğunlukla metal olması ve özgül ağırlıklarının yüksek olması, söz konusu giysilerin ağırlığında önem arz eden bir husustur. Öte yandan personelin tüm mesai boyunca üzerinde bulunacak böyle bir giysinin rahatsızlık vermeyecek kadar hafif olması beklenmektedir. Örneğin özgül ağırlığı düşük, ancak iletkenliği yüksek bir madde olan berilyum, toksik etkisi olması nedeniyle tekstil ürünlerinde kullanılamamaktadır.
2. **Esneklik:** Benzer şekilde, metal yapıların tekstil ürünlerinde kullanılan diğer malzemeler kadar esnek olmaması, giysiyi üzerinde bulduran kişi için oldukça rahatsızlık verici olabilmektedir.
3. **Maliyet:** İletken yapıların, özellikle de yüksek iletkenliğe sahip metallerin genelde soy metaller olması, bu tür ürünlerin maliyetinde belirleyici bir faktördür. Dolayısıyla bu tür giysilerin fiyatı, normal tekstil ürünlerinde göre onlarca kat fazla olmaktadır. Öte yandan büyük bir işletmede bu tür giysileri aynı anda giyecek personelin sayısı 100'ler ile ifade edilmektedir. Bu da, işletmelere büyük mali yük getirmektedir.
4. **Süreklilik:** Daha önce de belirtildiği üzere ESD koruyucu giysiler üzerindeki iletkenler, yük boşalımı için uygun ve sürekli güzergâhlar oluşturmalıdır. Ancak tekstil ürünlerinde genelde rastlanan dikişler, söz konusu iletken güzergâhlarda süreksizliklere yol açmakta, bu da yük boşaltım performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle dokuma (*woven*) tekstil ürünlerinin yerine, örgü (*knitted*) tekstil ürünlerinin, hiç dikiş içermeyen tekniklerle giysi haline getirilmesi gerekmektedir.
5. **Paslanmazlık:** İletken madde olarak kullanılan metallerin günlük kullanımda hava, yıkama esnasında da suya maruz kalması, bu tarz malzemenin gerek oksidasyon, gerekse korozyon etkileriyle paslanarak iletkenlik özelliğini kaybetmesine yol açmaktadır. Örneğin paslanmazlık özelliği bulunan altın, yüksek maliyeti yüzünden; paslanmaz çelik gibi

metaller de yeteri kadar yüksek iletkenlik özelliği göstermemeleri yüzünden bu tarz ürünlerde kullanılamamaktadır. Bakır ve alüminyum gibi düşük maliyetli iyi iletkenler ise, paslanmaya karşı dayanıklı değildir.

6. Yıkama ve Diğer Etkilere Karşı Dayanıklılık: Daha önce belirtildiği üzere diğer tekstil ürünlerine göre onlarca kat yüksek maliyetli olan ESD koruyucu giysilerin en az 40 yıkama sonrasında bile özelliklerini kaybetmemeleri beklenmektedir. Ancak birçok üründe, 10 yıkama sonrası iletken güzergâhların kopması veya yalıtkan kaplamaların sıyrılarak iletkenlerin açığa çıkması gibi yapısal sorunlar gözlemlenmiştir.

Bütün bu bilgiler ışığında, birçok farklı kriter de göz önünde bulundurulduğunda ESD koruyucu giysilerde kullanım için ideal iletken malzemenin karbon bazlı elyaf, yalıtkan malzemenin de yüksek kaliteli pamuk olduğu söylenebilir. Yüksek kaliteli pamuk, daha iyi yalıtkanlık özelliği göstermesi açısından düşük kaliteli pamuğa göre tercih edilmelidir.

İyi bir ESD giysi, Şekil 5'te görülmekte olan tedbirler arasında personele en çok rahatsızlık veren bileklik kullanımı ihtiyacını ortadan kaldırmakta olup, giysinin paça kısmından sarkıtılacak bir kablo ile topraklama yapılması yeterlidir. Bunun dışındaki diğer önlemlerin (yer döşemesi, masa altlığı, nem artırıcı iklimlendirme birimi, vb.) ayrıca alınması da, büyük ekonomik kayıplara yol açan ESD kazaları riskini minimize etmede önem arz edecektir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AMR	<i>Anisotropic Magneto-Resistive (İng.)</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute (İng.)</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device (İng.)</i>
CDM	<i>Charged Device Model (İng.)</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor (İng.)</i>
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telephone (İng.)</i>
EC	<i>European Commission (İng.)</i>
ECL	<i>Emitter-Coupled Logic (İng.)</i>
ECMA	<i>Electrification and Controls Manufacturers Association (İng.)</i>
EED	<i>Electro-Explosive Device (İng.)</i>
ESD	<i>Electrostatic Discharge (İng.)</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility (İng.)</i>
EPROM	<i>Erasable and Programmable Read Only Memory (İng.)</i>
FET	<i>Field-Effect Transistor (İng.)</i>
GaAsFET	<i>Galium Arsenide Field-Effect Transistor (İng.)</i>
GMR	<i>Giant Magneto-Resistive (İng.)</i>
GSM	<i>Global Standard for Mobile Communications (İng.)</i>
HBM	<i>Human Body Model</i>
IEC	<i>International Engineering Consortium (İng.)</i>
JFET	<i>Junction Field-Effect Transistor (İng.)</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display (İng.)</i>
MM	<i>Machine Model (İng.)</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (İng.)</i>
OpAmp	<i>Operational Amplifier (İng.)</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride (İng.)</i>
SAW	<i>Surface Acoustic Wave (İng.)</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier (İng.)</i>
TEYDEB	Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
TTL	<i>Transistor- Transistor Logic (İng.)</i>
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
TV	Televizyon
VHSIC	<i>Very High Speed Integrated Circuit (İng.)</i>
VMOS	<i>Vertical Metal Oxide Semiconductor (İng.)</i>
WLAN	<i>Wide – Local Area Network (İng.)</i>

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı (TEYDEB) tarafından 9110018 numaralı sözleşme kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, söz konusu destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKÇA

[1] Lüttgens, G. ve Wilson, N., “**Electrostatic Hazards**”, Butterworth-Heinemann: Oxford, 1st Edition, 1997.

[2] Gonzalez, J. A., Rizvi, S. A., Crown, E. M. ve Smy, P. R., “A Laboratory Protocol to Assess the Electrostatic Propensity of Protective-clothing Systems”, **Journal of the Textile Institute**, Cilt 92, No 3, 315-332, 2001.

[3] Cheng, K. B., Ueng, T. H. ve Dixon, G., “Electrostatic Discharge Properties of Stainless Steel/Polyester Woven Fabrics”, **Textile Research Journal**, Cilt 71, 732-739, 2001.

[4] Jonassen, N., “Charging by Walking”, **Compliance Engineering Magazine**, Mr. Static Column, Mart/Nisan 2001.

[5] Khan A., “Electro-static Discharge (ESD) Tutorial”, **Cypress Semiconductors Corp. White Paper**, Mart 2012.

[6] Fisher, R. N., “**Static Control Measures - ESD Control Handbook**”, Çevrimiçi: http://emp.byui.edu/FisherR/ESD/ESD_control_handbook.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.04.2014.

[7] Billon, H., “The Protection of Electro-explosive Devices (EEDs) and Electronics from Electrostatic Discharge (ESD) Hazards”, **Department of Defence Technical Report (DSTO-TR-0100)**, 2000.

[8] Merril, R. ve Issaq, E., “ESD Design Methodology”, **EOS/ESD Symposium (EOS-15)**, Orlando, Florida, ABD, 233-237, 1993.

[9] Allen, K. “Guest Editorial: How ESD damage affects OEMs and what they can do to mitigate the damage”, **PC/104 Embedded Solutions**, Kış 2002.

[10] Paasi, J., Nurmi, S., Kalliohaka, T., Coletti, G., Guastavino, F. ve Fast, L., “Electrostatic testing of ESD-protective clothing for electronics industry”, **Electrostatics 2003 Conference (Inst. Phys. Conf. Ser. No. 178)**, Edinburgh, İskoçya, 239-246, 23-27 Mart 2003.

[11] Debus, W., “Electrostatic Discharge (ESD) Tutorial”, **Technical Memorandum**, August 2006.

[12] Fast, L., Paasi, J., Kalliohaka, T., Börjesson, A. and Smallwood, J., “Direct Discharges from ESD

fabrics”, **1st Nordic ESD Conference**, Karlskoga, İsveç, 14-15 Mayıs 2003.

[13] Mardiguian, M., “**Electrostatic Discharge - Understand, Simulate, and Fix ESD Problems**”, IEEE Press: Piscataway, 3rd Edition, 2009.

[14] Boxleitner, W. “**Electrostatic Discharge and Electronic Equipment – A Practical Guide for Designing to Prevent ESD Problems**”, IEEE Press: New York, 1st Edition, 1998.

[15] Donciu, C., “Core Conductive Yarn Based Integral Knitted ESD Garments Part I - Metallic Core Conductive Yarns Investigation”, **Advanced Materials Research**, Cilt 772, 467-473, 2013.

[16] Donciu, C., “Core Conductive Yarn Based Integral Knitted ESD Garments Part II - Carbon Composite Yarns Investigation”, **Advanced Materials Research**, Cilt 772, 474-479, 2013.

[17] ESTAT-Garments: Publications, Çevrimiçi: <http://estat.vtt.fi/publications.html>, Son Erişim Tarihi: 26.04.2014.