

# ELEKTROSTATİK BOŞALIM İÇİN ETKİN BİR YAKLAŞIM; ESD KORUYUCU GİYSİ VE ÖNERİLEN GİYSİ TOPOLOJİSİNİN PERFORMANS ANALİZİ

**Sultan CAN, Asım Egemen YILMAZ**

Ankara Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50. Yıl Yerleşkesi Gölbaşı, Ankara, Türkiye  
[sultancan@ankara.edu.tr](mailto:sultancan@ankara.edu.tr), [aevimaz@eng.ankara.edu.tr](mailto:aevimaz@eng.ankara.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.11.2013; Kabul/Accepted: 18.03.2015)

## ÖZET

Bu çalışmada, elektrostatik boşalım sonucu doğabilecek zararları önlemek amacı ile tasarlanabilecek Elektrostatik Yük Boşalım veya Elektrostatik Deşarj (*Electrostatic Discharge* – ESD) koruyucu giysilerin tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik incelemeler yapılmıştır. ESD koruyucu giysilerin tarihçesi gözden geçirilmiş ve standardizasyon hakkında literatür çalışmaları sunulmuştur. Olası ESD koruyucu giysilerin örgü topolojileri belirlenmiş, bu topolojilerin gereksinimleri tartışılmıştır. Önerilen örgü topolojisine ait parametrik analiz sonuçları da sunulmuştur. Yapılan statik analiz sonucunda elde edilen sonuçlar, önerilen giysi topolojisinin yeterli koruma sağladığını; en düşük maliyet ve ağırlıkla en yüksek koruma performansının, iletken malzeme olarak alüminyum, yalıtkan olarak da yüksek yalıtkanlık özelliğine sahip pamuk ile elde edilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrostatik boşalım, ESD koruyucu giysi, ESD koruyucu giysi örgü topolojileri

## AN EFFECTIVE APPROACH FOR ELECTROSTATIC DISCHARGE; ESD PROTECTIVE GARMENTS AND PERFORMANCE ANALYSIS OF THE PROPOSED GARMENT TOPOLOGY

### ABSTRACT

In this study, garments, which are designed to prevent damages originated from electrostatic discharge (ESD), are considered; and analyses are performed in order to determine the parameters for those garments. The history of the ESD protective garments is overviewed, and information about the standardization is presented. Possible knit topologies for ESD protective garments are determined, and their requirements are discussed. The parametric analysis results of the proposed topology are also demonstrated in this study. Results of the static analysis show that the proposed garment topology achieves sufficient ESD protection; and the most cost and weight-effective protection performance is achieved via aluminum as the conducting material and high permittivity cotton as insulator.

**Keywords:** Electrostatic discharge, ESD protective garments, ESD protective garment knit topologies

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir alışveriş arabasına dokunduğumuzda, otomobilden inip kapı kilitleyeceğimizde, bir arkadaşımızla tokalaşırken bir çıtırtı eşliğinde başımıza sıklıkla gelen çarpılma durumu aslında Elektrostatik Boşalım veya Elektrostatik Deşarj (*Electrostatic Discharge* - ESD) olup, farklı elektrik potansiyeli olan iki cisim arasında istenmeden oluşan anlık ve düzensiz akımlardan kaynaklanmaktadır [1,2] Cisimlerin elektrostatik olarak yüklenmesi,

triboyükleme, endüksiyon ya da korona etkisi gibi bir takım fenomenler sonucu oluşmaktadır. Bu yükün boşalması, en kötü durumda oluşan arkten ötürü ortam kimyasalların patlamasına sebep verebileceği gibi, daha yaygın olarak ortamdaki hassas elektronik aygıtlara zarar verebilmektedir. Bu nedenle ESD temelli kazalar ve bunların önlenmesine ilişkin çalışmalar, 1950’li yıllardan bu yana, özellikle de Alaska /A.B.D. Alberta/Kanada gibi oldukça soğuk ve rutubetin de buna bağlı olarak çok düşük olduğu bölgelerdeki sanayi kuruluşlarında meydana gelen

olaylardan sonra, önemli bir araştırma konusu olmuştur. 1950–2000 yılları 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 [3-4]. Farklı davranış tiplerinin veya cisimlerin neden olduğu ESD etkileri literatürde ilgi görmüş olup; genelde ölçüm sonuçlarından elde edilen bulgulara göre nem miktarı, Tablo 1'de de görüldüğü üzere oluşan gerilimi etkilemektedir [5]. Örneğin polietilen döşeme üzerinde yürüme, yüksek nemde 250V gerilime sebep olurken bu değer düşük nemde 12000V'a kadar çıkmaktadır.

**Tablo 1.** Farklı davranış/hareket tiplerinin veya cisimlerin neden olduğu ESD etkileri [5]. (ESD effects resulting from different actions and motion types [5])

Koşul	Gerilim (Volt)	
	Düşük Nem	Yüksek Nem
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

Alınan tedbirlerin performansı hakkında öngörü oluşturmak amacıyla yapılacak simülasyonlarda göz önünde bulundurulması gerekmektedir; özellikle insan elinin pozitif yönde yüklenme eğiliminde olduğu göz ardı edilmemelidir [6].

ESD kazaları elektronik sektörde de özellikle mali açıdan önemli kayıplara yol açmaktadır. Yapılan çalışmalara göre, elektronik sektördeki arızalı mal iadelerinin yaklaşık %30-%50 kadarı, üretim hollerindeki ESD kazalarından kaynaklanmaktadır [7]. Bu arızaları minimize etmek adına göz önünde

bulundurulması gereken bir diğer parametre de farklı cisimlerin yüklenme eğilimlerini bilmektir.

Belli başlı cisimlerin yüklenme eğilimleri bu anlamda deneysel olarak incelenmiş ve yüklenme karakteristikleri çıkarılmıştır. Sonuçlar Tablo 2 ile sunulmuştur.

Tablo 2'de de görüldüğü üzere insan elinin yüksek pozitif yüklenme, öte yandan elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan silikonun da hayli yüksek negatif yüklenme eğilimi, elektronik üretim sektöründe ESD kaza riskini artıran önemli bir faktördür. Elektronik dünyasındaki boyutların küçülmesiyle, entegre devrelerin her bir karesine düşen transistor/kapı sayısı her yıl ikiye katlanmış ve bunun sonucu olarak da, her ESD olayıyla birlikte elektronik cihazların zarar görme riski artmıştır. Sivil ve/veya askeri elektronik sektörde kullanılmakta olan birçok tümeleşik devre, kilovolt mertebesindeki ESD voltajlarına karşı dayanıklıdır. Ancak ESD dayanıklılık seviyelerine göre elektronik malzemeler sıralandığında, Tablo 3'te de görüldüğü üzere 2000V mertebesinde altında birçok malzeme bulunmamaktadır. Öte yandan yakın tarihli çalışmalar, bütünlük devre veya yonga (çip) paketlemesi dışında kalan birçok farklı elektronik bileşenin ancak 100-150V mertebesindeki ESD gerilimlerine dayanıklı olduğunu göstermiştir [8]. Hatta manyeto-resistif okuma-yazma kafaları, Schottky diyotları, CCD sensörleri, alan-etki transistörleri (MOSFET, JFET), mikroişlemciler ve LCD ekranlar 10 volt mertebesinde bir voltaj değişikliğine bile duyarlıdır [9]. Günümüzdeki ESD koruyucu tedbirleri tanımlayan standartlar üretim hollerinde maksimum 100V mertebesinde ESD gerilimine izin verecek şekilde tanımlanmıştır; ancak yakın gelecekte bu sınırın 50V mertebesine çekilmesi beklenmektedir [10]. Tüm bu gereksinimler, tek başına yetersiz bir önlem olarak görünen topraklayıcı bileziğe daha iyi bir alternatif olarak ESD koruyucu giysilerin tasarımını önemli kılmıştır. ESD koruyucu giysiler, kullanıcının günlük giysisinin üstüne giyilecek şekilde tasarlanmaktadır [11]. İlk olarak 70'li yıllarda kullanılmaya başlanan bu tip giysilerin ilk örneklerinde, bu giysilerin homojen elektrostatik yüzeyleri (saf pamuk ya da pamuk-higroskopik ajan karışımı) olmaktadır.

**Tablo 2.** Farklı cisimlerin yüklenme eğilimleri [6]. (Charging characteristics of different objects [6])

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

**Tablo 3.** Çeşitli elektronik bileşenlerin ESD' ye karşı dayanıklılık seviyeleri [6]. (Endurance levels of various electronic components to ESD [6])

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

Günümüzde ESD koruyucu giysiler, konvansiyonel tekstil lifleri ve bileşik iletken liflerin karışımı olan iletken bileşik tekstilden üretilmektedir [12] Söz konusu heterojen yapıyı yüzeyler, daha yüksek performans göstermelerinden ötürü tercih edilmektedir. Öte yandan, gerek benzetim/modelleme, gerekse ölçüm/test hususlarında zorluk çıkarmalarından ötürü heterojen yapıyı içeren giysilerin analiz ve tasarımları oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Bu karmaşık yapıyı anlamak amacı ile bir sonraki bölümde söz konusu giysiler için örgü topolojileri ve giysi gereksinimlerinden bahsedilecektir.

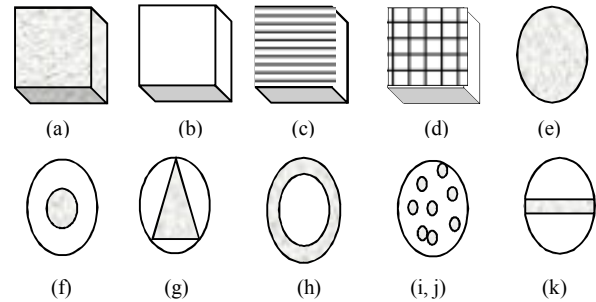
## 2. ÖRGÜ TOPOLOJİLERİ (KNIT TOPOLOGIES)

ESD koruyucu giysi geliştirilmesine yönelik olarak bugüne kadar gerçekleştirilmiş en önemli bilimsel içerikli proje, 2002–2005 yılları arasında Avrupa Komisyonu desteğiyle gerçekleştirilmiş olan “Protective Clothing for Use in the Manufacturing of Electrostatic Sensitive Devices (ESTAT-Garments)” başlıklı projedir. Söz konusu proje sonucu elde edilen bilgi birikimi ve yapılmış olan bilimsel yayınlar[11, 13, ve 14]'de sunulmuştur. İdeal bir ESD koruyucu giysinin, birbirlerine çalışmakta olan:

- ~ Dağıtma (*dissipation*) sürecini desteklemek ve yük birikimini önlemek üzere yüksek iletkenlik ve bunun yanında,
- ~ Hızlı dağıtmayı önlemek ve boşalım sırasındaki enerji transferini sınırlamak üzere yüksek dirence sahip olma, koşullarını aynı anda sağlaması gerekmektedir.

Dolayısıyla ESD koruyucu giysi tasarımı, gerek teknik, gerekse ekonomik manada zorlayıcı bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. ESD koruyucu giysi üretiminde sıkça kullanılan panel tipleri; İyi iletken özellikleri bulunan higroskopik ajanlarla işlenmiş homojen paneller (Şekil 1a), iletken tabakayla kaplı paneller (Şekil 1b), tek yönlü iletken yapıya sahip paneller (Şekil 1c) ve ızgara şeklinde iletken yapıya sahip paneller (Şekil 1d) olmak üzere dört adettir. Üretim teknolojisine bağlı olarak

paneller, örgü ve dokuma olarak sınıflandırılmıştır. 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 gerçekleştirilmektedir. 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 [8, 10]. Piyasada yaygın olarak bulunan bileşik iletken lifler; tam iletken lif (Şekil 1e), iletken çekirdek lif (Şekil 1f), trilobal iletken çekirdek lif (Şekil 1g), kaplı iletken lif (Şekil 1h), iletken lifçik ve tekstil lifinden bükme ip, iletken lif ve tekstil lifinden bükme ip, (Şekil 1 i,j) ve sandviç iletken lif (Şekil 1k) olmak üzere altı tiptir.



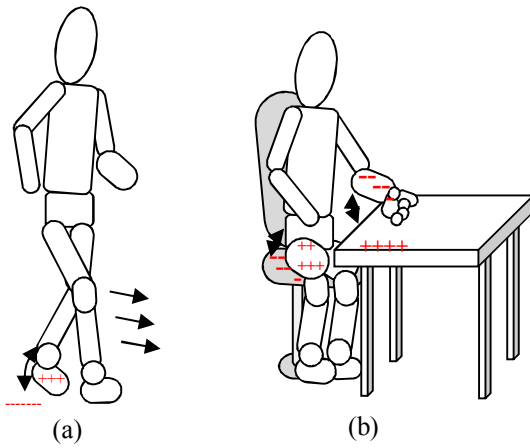
**Şekil 1.** ESD koruyucu giysi üretiminde kullanılan panel ve lifler. (Panels used in manufacturing of ESD protective garments)

Zaman içinde, yalnızca bazı konfigürasyonlar ESD koruyucu giysi üreticilerinin ilgisini çekmiştir. Bunlardan en popülerleri karbon bazlı kompozit lif düğümlü örgü kumaşlar ya da kompozit iletken lif katkılı dokuma kumaşlardır. İletken ve iletken olmayan malzemelerin karışımından oluşan topoloji, ESD koruyucu giysilerde tipik olarak 105–109  $\Omega/m^2$ lik bir yüzey rezistansı sağlamaktadır. Bu da, yükü en iyi şekilde dağıtabilme (*dissipation*) için en hızlı güzergâhın belirlenmesi (yüksek iletkenlik) ile elektrostatik yük riskinin azalması (yüksek direnç) arasında iyi bir denge kurulmasıyla sonuçlanmaktadır.

### 3. GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR (COMPLETED STUDIES)

#### 3.1. Problem Tanımı (Problem Definition)

Önceki bölümlerde elektrostatik yüklerin oluşma ortamları ve kaza/zarara sebep olan ortamlara ilişkin literatür taraması sunulmuştur. Bu bölümde ise çözüm yöntemlerine değinilecektir. Bilindiği gibi elektrostatik yükler bir insanın yürümesi esnasında yürütülen platform ile model arası sürtünmeden kaynaklı olabilir. Masa başında çalışmakta olan bir birey düşünüldüğünde ise çalışma esnasında kalça ve dirsek hareketlerinden dolayı elektrostatik yük oluşması muhtemeldir. Söz konusu örnek hareketlere ait görsel tasvir Şekil 2’de verilmiştir.

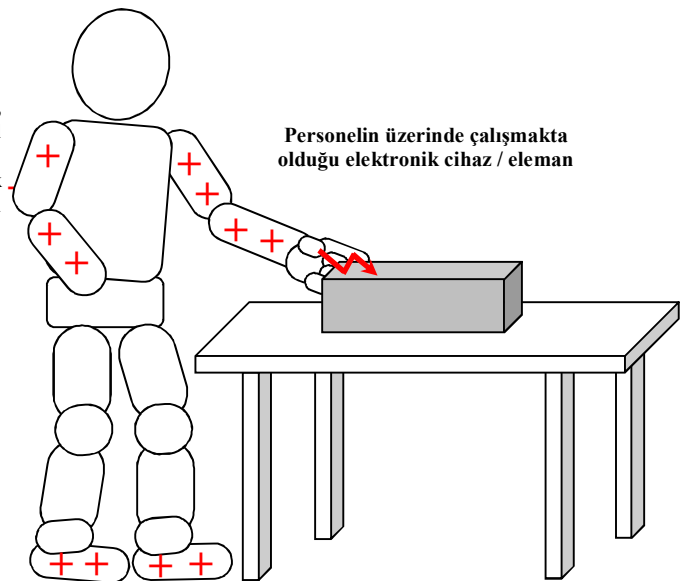


**Şekil 2.** Günlük hayatta insan vücudunun elektrostatik yüklenmesine tipik örnekler: (a) Yürürken, ayak hareketlerinden ötürü; (b) masa başındayken kalça ve dirsek hareketlerinden ötürü. (Typical examples of a human body charging electrostatically a) Resulting from walking and motions of foot b) Movement of hips and elbows while sitting at the desk)

#### Problemin Tanımı:

- Personelin üzerinde oluşan yüzey yük yoğunluğunun, personelin vücudunda oluşturduğu elektrik potansiyel fonksiyonunun hesaplanması;
- Elektronik cihazın / elemanın, söz konusu elektrik potansiyelden olumsuz etkilenip etkilenmediğinin belirlenmesi.

Çalışırken yapmış olduğu hareketler nedeniyle üzerinde belirli bir yük birikmiş personel Personelden elektronik cihaz / elemana yük atlaması



**Şekil 3.** Bu çalışma kapsamında çözülmeye çalışılan problemin tanımı. (The scenario that is considered to be solved in this study)

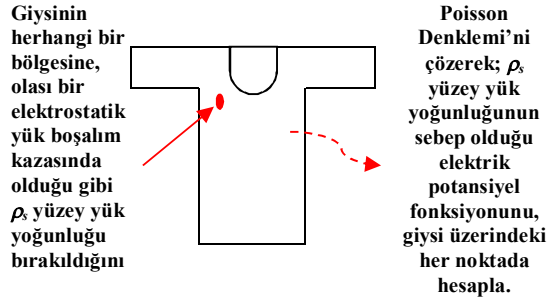
Bu gibi günlük hareketlerin neden olduğu yüklenme, bir iş ortamı düşünüldüğünde iki kişinin birbirine temas etmesi ile daha yüksek mertebelere ulaşabilmekte ve giriş kısmında bahsedildiği gibi ciddi zararlara neden olabilmektedir. Söz konusu çalışma ortamları ve elektrostatik yüklenme durumları düşünüldüğünde oluşması muhtemel 2 ana senaryo akla gelmektedir. Bunlardan birisi çalışırken yapmış olduğu hareketler nedeniyle üzerinde belirli bir yük birikmiş personelden elektronik cihaz / elemana yük atlaması iken (Şekil 3); diğeri yürüme nedeni ile yüklenmiş bir personelden çalışmakta olan bir diğer personele yük akışı nedeniyle meydana gelen senaryodur.

Bu çalışma kapsamında incelenen problem, personelin üzerinde oluşan yüzey yük yoğunluğunun, personelin vücudunda oluşturduğu elektrik potansiyel fonksiyonunun hesaplanması ve elektronik cihazın/elemanın, söz konusu elektrik potansiyelden olumsuz etkilenip etkilenmediğinin belirlenmesidir.

Sözü geçen problemler ile başa çıkma yöntemlerinden biri olarak kullanılan ESD koruyucu giysilerde temel amaç, söz konusu senaryolardan herhangi biri nedeniyle yüklenmiş personel üzerinden mevcut elektrostatik yükü kontrollü ve hızlı bir biçimde boşaltmaktır. Bu işlemi gerçekleştirmek esnasında giysi örgü yapısı üzerinde herhangi bir yere hacimsel veya yüzeysel yük dağılımı bırakılması durumunda bu yük dağılımının giysi örgü topolojisi üzerinde sebep

olacağı elektrostatik potansiyeli,  $\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$  formülü

ile verilen Poisson Denklemi’ni ayrıklaştırarak hesaplayan Sonlu Elemanlar Yöntemi’ne dayalı nümerik çözümün formüle edilmesine dayanır.



**Şekil 4.** Eldeki problemlere (Senaryo 1 ve 2) yönelik çözüm yaklaşımı. (Solution approach for the problems described via Scenarios 1 and 2)

Sözü geçen çözüm için öncelikle insan vücudunun modellenmesi, modele ait kapasitans ve yük yoğunluğu gibi parametrelerin bulunması gerekmektedir. Sonrasında ise sonlu elemanlar yöntemine dayalı CST Microwave Studio benzetim programı ile çözüm gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla bir sonraki bölümde literatürde sunulan insan vücudu modeli ve ilgili yaklaşımlardan bahsedilecek ve modellere ait kapasitans ve yük yoğunluğu gibi veriler paylaşılacaktır. Takip eden bölümlerde ise önerilen topoloji ve ilgili topolojinin parametrik performans analizi sunulacaktır. Bahsedilen performans kavramı tanımlanacak olursa; tasarlanan ESD koruyucu giysinin, maruz kalınan yükü en kısa sürede kontrollü bir biçimde giysi üzerinde uzak noktalara dağıtarak bir noktada birikmesini engelleme amacı güttüğünden, giysi üzerinde gözlenen maksimum voltaj değerinin minimum olması, ESD koruyucu giysi performansının görece daha iyi olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

### 3.2. İnsan Vücudu Modeli (Human Body Model)

ESD korucu giysiler temel anlamda bir insan vücudundan bir cihaza doğru kontrolsüz akan elektrostatik akımları önlemeye yönelik geliştirildiklerinden, insan vücudunun modellenmesi önem arz etmektedir. Bu anlamda söz konusu giysilerin etkinliğinin artırılması, insan vücudu modelinin en iyi şekilde ifade edilerek, söz konusu modele ait kapasitans, yük yoğunluğu gibi parametrelerin iyi hesaplanmasına bağlıdır [12]. İlgili modellerin teorik temellerine Fujiwara ve Ikawa'nın 2002 yılında yayınladıkları makale ile ulaşmak mümkündür [12]. Nümerik çözüm yapan bu yöntemler, çeşitli açık-kaynak yazılımlarda uygulanmıştır [16]. Bu uygulamalar sonucunda çeşitli duruş tiplerinde 3 farklı özelliğe sahip insan modeline ait yüzey yük yoğunluğu ve kapasitans değerleri, söz konusu bir voltaj değeri için hesaplanır hale gelmiştir.

İlk aşamada, üzerinde sentetik giysi olduğu varsayılan modeller için benzetimler yapılmıştır; bu duruma karşılık gelen potansiyel değeri 3000V olarak belirlenmiştir. İlgili açık-kaynak kodlu yazılım (16) kullanılarak, söz konusu potansiyel değeri ve ayakta

duran bir model varsayımı ile 30 yaşındaki birey modelinin yüzey yük yoğunluğu yaklaşık olarak  $3,9 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ; 35 yaş için  $4 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ; 60 yaş için ise  $4,3 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$  olarak tarafımızca hesaplanmıştır. Aynı yazılım ile yine ek bir parametre olarak kapasitans değerlerine bakıldığında 30, 35 ve 60 yaş modeller için kapasitans değerleri sırasıyla 47,1723 pF, 50,9582 pF ve 47,8323 pF olarak belirlenmiştir. Farklı beden ve yaş grupları için insan vücudu modellenmesi sonucu hesaplanan kapasitans değerlerinin yaklaşık %20 mertebesinde değişim gözlemlenmiştir. Bu nedenle yapılan benzetimlerde 30 yaşındaki birey, referans insan modeli olarak ele alınmıştır ve sonuçlar bu varsayım ile analiz edilmiştir. Söz konusu modele ait boy 170cm iken, kilosu 63kg ve yüzey alanı  $1,70 \times 10^4 \text{ cm}^2$  olarak varsayılmıştır. Bu nedenle, yüzey yük yoğunluğu  $3,9 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$  olarak kabul edilmiştir. Elde edilen yük yoğunluğuna, temel anlamda kapasitans ve voltaj değeri ilişkisinden yola çıkarak ulaşılabilir. Önceden de belirtildiği gibi üzerinde sentetik giysi olduğu varsayılan modeller için potansiyel değeri 3000V olarak belirlenmişti; ayrıca literatürdeki çalışmalarda da, bahsi geçen 30 yaş-erkek model için kapasitans değerini 47,1723 pF olarak raporlanmıştı 16. Söz konusu potansiyel ve kapasitans değerine ait toplam yükü Denklem (1) ile bulmak mümkündür:

$$Q = C \times V \quad (1)$$

Denklemde  $V$ , Volt cinsinden voltaj değerini ifade ederken;  $C$ , Farad cinsinden kapasitans değerini ifade eder. Elde edilen yükün birimi ise Coulomb'dur. Verilen değerler ile hesaplandığında elde edilen toplam yük  $1,41 \times 10^{-7} \text{ C}$  olmaktadır. İnsan vücudu modeli incelendiğinde yük dağılımının el ve ayaklarda, toplam vücut yüzeyinin yaklaşık %21'i kadar bir alanında (yaklaşık  $0,36 \text{ m}^2$ ) biriktiği gözlenmektedir. Bu yaklaşık değer kabul edildiğinde, yüzey yük yoğunluğu Denklem (2) ile hesaplanabilmektedir:

$$\rho_s = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

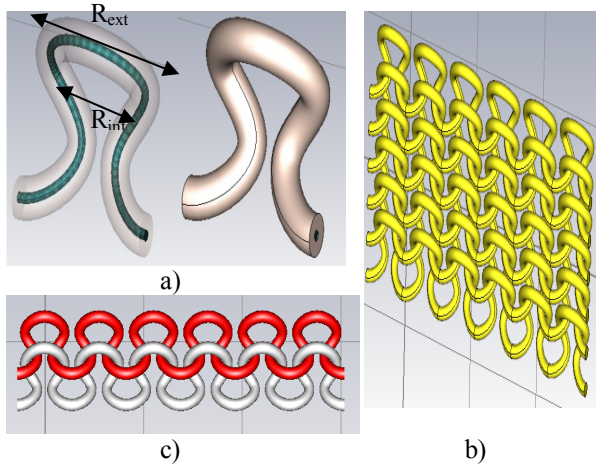
Denklemde  $Q$ , senaryoda  $1,41 \times 10^{-7} \text{ C}$  olarak hesaplanan toplam yükü belirtirken;  $A$  yükün yoğunlaştığı toplam alanı ifade etmektedir ve senaryo gereği bu değer  $0,36 \text{ m}^2$ 'dir.  $\rho_s$  ise bu değerler sonucu  $3,94 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$  olarak hesaplanan yüzey yük yoğunluğudur ve  $3,9 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$  olarak verilen nümerik yöntem sonucuna oldukça yakın bir sonuçtur.

### 3.3. Geliştirilen Topoloji Ve Performans Analizi (Proposed Topology And Performance Analysis)

Sunulan çalışmada ilgili ESD koruyucu giysi için önerilen örgü topolojisine ait geometri Şekil 5'de sunulmuştur. İlgili geometride iç ve dış yarıçaplar  $R_{int}$  ve  $R_{ext}$  olarak adlandırılmıştır. Bu topolojide dış kısım bir dielektrik malzeme iken iç malzeme iletken bir



yapıdadır [17]. Birim örgü hücresi ve giysi örgü yapısı da Şekil 5'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Bu çalışma kapsamında önerilen giysi örgü topolojisi: a) İçinden iletken malzeme geçen yalıtkan kaplamalı birim örgü hücresi, b) Giysinin örgü yapısı (6×6 ilmekli bir parça) c) İlmeklerdeki yük dağılımı (The proposed knit topology in the study a) a knit cell consisting of an internal conductor coated with a dielectric material, b) knit topology with 6×6 loops) c) Charge distribution of the knit topology)

Yükün giysi ile ilk temasının birinci sıradaki ilmekte olduğu varsayılmış ve yükün bulunduğu ilmek Şekil 5c'de gösterilmiştir.

### 3.3.1. Dış Malzeme Ve İlmek Sayısı Etkisi (Outer Material And Knit Number Impact)

Bu çalışmada dış malzemesi ipek ( $\epsilon_r=4,5$ ) olan bir topolojide iç malzeme alüminyum ve çelik olarak değiştirilmiş; CST Microwave Studio benzetim programı aracılığı ile gerçekleştirilmiş, 5 ilmekli ve 10 ilmekli yapılar için sonuçlar sunulmuştur. 5 ve 10 ilmekli yapılar ilmeklerin birbirine temas etmeyecek şekilde çoklanmasıyla oluşturulmuştur. Aynı varsayımlar dış malzeme pamuk ( $\epsilon_r=7,9$ ) olan geometri için de yapılarak elde edilen değerler Tablo 4'de sunulmuştur.

Söz konusu dielektrik katsayıları literatürde sunulan değerlerden elde edilmiştir [18,19]. İç malzemelere göre değişim incelendiği durumda alüminyum için elde edilen voltaj değeri çelik ile kıyaslandığında daha düşük mertebelere düşmektedir. Bu sonuçlara göre, temas eden yükün hızlı bir şekilde diğer ilmeklere dağıldığı varsayıldığından, alüminyumun çeliğe kıyasla daha iyi bir performansa sahip olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 4'de verilen sonuçlara göre, ilmek sayısındaki artışın, 2 boyutlu maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Yine aynı tablo göstermektedir ki dielektrik katsayısı küçük olan dış malzemeler daha büyük voltaj değerlerine (bir başka deyişle daha kötü performansa) neden olmuştur.

### 3.3.2 Farklı İnsan Vücudu Modellerinin Performansa Etkisi (Impact Of Different Human Body Types To The Performance)

Önceki bölümlerde sunulan insan modeli yaklaşımı ile elde edilen veriler, vücut yapısına göre değişiklik göstermektedir. Her 3 model için de kapasitans değerleri göz önünde bulundurulursa artan kapasitans değeri maksimum voltaj değerinde artmaya neden olmuştur. Bu kıstas göz önüne alınarak gerçekleştirilen çalışmada 30, 35 ve 60 yaş için aynı geometriye sahip topoloji göz önünde bulundurularak CST Microwave Studio benzetim programı aracılığı ile gerçekleştirilmiş, dış malzemenin poliimid olduğu durumda elde edilen benzetim sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

İç malzeme nikel seçildiğinde 30 yaşındaki model için 44265,7 V olan maksimum gerilim değeri, 35 yaşındaki model için 45400,7 V'a çıkmış, 60 yaşta ise 48805,8V'a ulaşmıştır. Tablo 4'de gösterildiği gibi, Tablo 5 de dielektrik katsayısı küçük olan dış malzemelerin daha büyük voltaj değerlerine (yani daha düşük performansa) neden olduğunu destekler niteliktedir.

**Tablo 4.** 30 yaşındaki insan modeli için dış malzeme ipek ( $\epsilon_r=4,5$ ) ve pamuk ( $\epsilon_r=7,9$ ) olduğu durumda iç malzeme ve ilmek sayısının potansiyel değişimine etkisi ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ) (Impact of the inner conductor and the number of loops on the electric potential for the 30-year-old human body model in the cases of silk ( $\epsilon_r=4,5$ ) and cotton ( $\epsilon_r=7,9$ ) used as coating material ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ))

İç Malzeme	İlmek Sayısı	2 boyutlu analiz sonucu maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değeri (V), $\epsilon_r=4,5$	2 boyutlu analiz sonucu maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değeri (V), $\epsilon_r=7,9$
Alüminyum	5	42680,8	39599,0
Çelik		42758,5	39652,7
Alüminyum	10	42806,8	39770,1
Çelik		42834,5	39811,7

**Tablo 5.** Farklı insan modelleri için dış malzeme poliimid olduğu durumda iç malzeme değişiminin potansiyele etkisi ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=3,5$ ) (Impact of the inner conductor on the electric potential for various age human body models in case polyimide used as coating material ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=3,5$ ))

İletken malzeme	2 boyutlu analiz sonucu, Poliimid ( $\epsilon_r=3,5$ )		
	Maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değeri (V), 5 ilmek için		
	30 yaş	35 yaş	60 yaş
Alüminyum	44167,6	45300,1	48697,6
Nikel	44265,7	45400,7	48805,8

**Tablo 6.** Farklı insan modelleri için dış malzeme pamuk olduğu durumda iç malzeme değişiminin potansiyele etkisi ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=3,7$ ) (Impact of the inner conductor on the electric potential for various age human body models in case cotton used as coating material ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=3,7$ ))

İletken malzeme	2 boyutlu analiz sonucu Maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değeri (V), ilmek sayısı=5		
	30 yaş	35 yaş	60 yaş
Alüminyum	33453,4	34311,1	36884,5
Nikel	36863,2	37808,4	40644,0
Çelik	37646,4	38611,7	41507,6

### 3.3.3 Farklı İnsan Vücudu Modellerinde İç Malzeme Etkisi (Impact Of Inner Material For Different Human Body Types)

İletken iç malzemenin performansı incelenirken alüminyum, nikel, çelik, gümüş ve bakır olmak üzere 5 iletken malzeme dikkate alınmıştır. Bu malzemelerden alüminyum, gümüş ve bakırın aynı manyetik geçirgenlik değerlerine sahip olduğundan aynı sonucu vermiş; bu nedenle sadece iletkenin alüminyum olduğu duruma ait sonuçlar sunulmuştur. İlgili verilerden dış malzeme 3,7 ve 7,9 dielektrik katsayısına sahip pamuk seçilerek benzetimi yapıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 6 ve 7 ile sunulmaktadır. Tablo 5'de gözlenen benzer şekilde, Tablo 6 ve 7'de sunulan sonuçlar da her bir iletken malzeme kendi içinde değerlendirildiğinde yaş azaldıkça maksimum gerilimin azaldığını desteklemektedir.

Benzetimlerle bu anlamda da birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Yine aynı yaş grubu ele alındığında nikelin çeliğe göre, alüminyumun ise çelik ve nikel göre daha iyi performans sağladığı gözlenmiş ve sonuçlar Tablo 7 ile sunulmuştur.

Benzetim dielektrik katsayısı 7,9 olan pamuk dış malzemesi olacak şekilde iletken malzeme alüminyum, çelik ve nikel için benzetimler yapılmış ve sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Bu model için de gerilim miktarı alüminyumda en az değeri alırken çelikte en yüksek değeri almıştır.

Aynı benzetimler 30, 35 ve 60 yaş modeller için yapıldığında da bununla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Her bir iletken malzeme kendi içinde değerlendirildiğinde yaş azaldıkça maksimum gerilimin azaldığı gözlenmiştir. Benzetimlerle bu anlamda da birbiri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 1.** Farklı insan modelleri için dış malzeme pamuk olduğu durumda iç malzeme değişiminin potansiyele etkisi ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=7,9$ ) (Impact of the inner conductor on the electric potential for various age human body models in case cotton used as coating material ( $R_{ext}=0,7mm$ ,  $p=0,7$ ,  $\epsilon_r=7,9$ ))

İletken malzeme	2 boyutlu analiz sonucu maksimum yük düzleminde elde edilen voltaj değeri (V), 5 ilmek için		
	30 yaş	35 yaş	60 yaş
Alüminyum	27497,7	28202,7	30317,9
Nikel	31324,4	32127,6	34537,5
Çelik	32126,5	32950,3	35421,5

## 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE RESULTS)

Çalışmada elektrostatik boşalmanın neden olduğu zararları minimize etmek için günümüz çözüm yollarından biri olan ESD koruyucu giysilerin gereksinimlerinden bahsedilmiş; bu gereksinimi sağlamanın yöntemlerine değinilmiştir. Giysi üretiminde önem teşkil eden insan vücut modeli ve bu model kapsamında elektrostatik boşalmanın çözümü için gereken literatür taraması yapılmıştır. Söz konusu giysiler için bir topoloji önerisi tanımlanmış; malzeme özellikleri (içteki iletken, dıştaki yalıtkan) değiştirilerek farklı alternatifler sunulmuştur. Poisson Denklemi'nin ayrıştırılması ile giysi üzerindeki herhangi bir bölgede bulunan yük dağılımının giysi üzerinde her noktada sebep olacağı elektrik potansiyel değerleri hesaplanmış; tanımlanmış bir senaryo üzerinden benzetim programları aracılığıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizler sonucu elde edilen bulgular ise kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

— Önerilen örgü topolojisinin, içeride yüksek iletkenliğe sahip metaller içermesi nedeniyle hızlı yük boşalımı sağlamakta olduğu, öte yandan dış kaplamasında iyi yalıtkan özellik gösteren tekstil ürünleri içermesi nedeniyle de yüksek yüzey

rezistansına sahip olduğu görülmektedir. Yapılan analizler, gerçekten de göz önünde bulundurulmuş bütün iç (gümüş, bakır, alüminyum, nikel ve çelik) ve dış (poliimid, ipek, dielektrik sabiti 3,7 olan pamuk ve dielektrik sabiti 7,9 olan pamuk) malzeme alternatifleri için, iç/dış yarıçap oranları her ne olursa olsun, kilovoltlar mertebesindeki bir voltaj değerinin birkaç ilmek ileride 2'de güvenli sınır olan 30V mertebesine düşmekte olduğunu göstermektedir. Bu da, önerilen giysi topolojisinin ESD koruyucu özellik göstermekte olduğunu işaret etmektedir.

— İletken malzeme seçiminde alüminyum, gümüş ve bakır aynı performans özelliklerini göstermiştir. Dolayısıyla bu üç malzeme arasından seçim yapılması gerekirse, maliyet ve ağırlık kısıtları da göz önünde bulundurulursa tercih edilmesi gereken iletken alüminyum olmalıdır.

— Yalıtkan malzeme seçiminde, özellikle çoklu ilmek yapısı için elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, dielektrik katsayısı 7,9 olan pamuğun en yüksek performansı sağladığı gözlemlenmiştir.

— İç/dış yarıçap oranının artması, yük boşaltım performansında azalmaya sebep olmaktadır. Ancak bu oranın düşük tutulması ilmek kalınlığını artıracığından, gerek maliyet gerek ağırlık açısından dezavantajlar içermektedir.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışma kapsamına alınmamış senaryolarda analizlerin gerçekleştirilmesi; giysinin yıkanması ile iletken malzemede oluşacak paslanma, yalıtkan malzemeden oluşacak aşınma vb. etkilerin ESD koruyuculuk özellikleri üzerinde etkilerinin incelenmesi hedeflenmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

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.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mardiguian, M., **Electrostatic Discharge - Understand, Simulate, and Fix ESD Problems**, IEEE Press: Piscataway, 2009.
2. Cheng, K.B., Ueng, T.H. ve Dixon, G., "Electrostatic Discharge Properties of Stainless Steel/Polyester Woven Fabrics", **Textile Research Journal**, Cilt 71, No 8, 732-739, 2001.
3. Boxleitner, W., **Electrostatic Discharge and Electronic Equipment - A Practical Guide for Designing to Prevent ESD Problems**, IEEE Press: New York, 1998.

4. Lüttgens, G. ve Wilson, N., **Electrostatic Hazards**, **Butterworth-Heinemann**, Oxford, 1997.
5. 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.
6. 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.
7. Merrill, R. ve Issaq, E., "ESD Design Methodology", **EOS/ESD Symposium (EOS-15)**, Orlando, Florida, 233-237, Eylül 1993.
8. Paasi, J., Nurmi, S., Kalliohaka, T., Coletti, G., Guastavino, F., ve Fast, L., et al., "Electrostatic testing of ESD-protective clothing for electronics industry", **Electrostatics 2003 Conference (Inst. Phys. Conf. Ser. No. 178)**, Edinburgh, 239-246, 23-27 Mart, 2004.
9. Debus, W., "Electrostatic Discharge (ESD) Tutorial", **Technical Memorandum**, August 2006.
10. Hebeish, A.A., El-Gamal, M.A., Said, T.S. ve Abd El-Hady, R.A.M., "Major Factors Affecting the Performance of ESD-protective Fabrics", **Journal of The Textile Institute**, Cilt 101, No 5, 389-398, 2010.
11. Fast, L., Paasi, J., Kalliohaka, T., Börjesson, A. ve Smallwood, J., "Direct Discharges from ESD fabrics", **1st Nordic ESD Conference**, Karlskoga, Sweden, 14-15 Mayıs, 2003.
12. Brandt, B. ve Cory, E.M., "Garments Worn by Production Workers in Cleanrooms: A Needs Assessment", **Clothing and Textiles Research Journal**, Cilt 7, No 4, 27-34, 1989.
13. Paasi, J., Fast, L., Kalliohaka, T., Smallwood, J., Börjesson, A., Haase, J., Vogel, C., Lemaire, P., Coletti, G., Guastavino, F., Peltoniemi, T., Reina, G., "Risks of Damage to Electronics with Reference to Charged Clothing", **Journal of Electrostatics**, Cilt 63, No 6, 603-608, 2005.
14. **ESTAT-Garments Web Sitesi**, Çevrimiçi: <http://estat.vtt.fi/whatis.html>, Son Erişim Tarihi: 12 Kasım 2013.
15. Fujiwara, O. ve Ikawa, T., "Numerical Calculation of Human-Body Capacitance by Surface Charge Method", **Electronics and Communications in Japan**, Cilt 85, No 12, 38-44, 2002.
16. **NEVA Electromagnetics Web Sitesi**, Çevrimiçi: <http://www.nevaelectromagnetics.com>, Son Erişim Tarihi: 30 Ekim 2013.
17. Donciu, C., "3D Conductive Textile Shields", **Advanced Materials Research**, Cilt 837, 340-345, 2014.
18. Xu, S., Yang, L., Huang, L. ve Chen, H.S., "Experimental Measurement Method to



- Determine The Permittivity of Extra Thin Materials Using Resonant Metamaterials”, **Progress In Electromagnetics Research**, Cilt 120, 327-337, 2011.
19. Harmer, S.W., Rezgui, N., Bowring, N., Luklinska, Z. ve Ren, G., “Determination of the Complex Permittivity of Textiles and Leather in the 14-40 GHz millimetre-wave Band using a Free-wave Transmittance Only Method”, **Microwaves, Antennas & Propagation, IET**, Cilt 2, No 6, 606-614, 2008.

