



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.07.2023  
Kabul Tarihi : 17.10.2023

Received Date : 05.07.2023  
Accepted Date : 17.10.2023

### DOKU MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLEN TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME CİHAZLARI

#### PORTABLE ELECTROSPINNING DEVICES DEVELOPED FOR TISSUE ENGINEERING APPLICATIONS

Merve YILMAZ<sup>1,2\*</sup> (ORCID: 0009-0009-7584-1035)  
Nazmi EKREN<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0003-3530-9262)

<sup>1</sup>Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, İstanbul, Türkiye.

<sup>3</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Merve YILMAZ, merveyilmz00@gmail.com

#### ÖZET

Bu makale, doku mühendisliği uygulamalarına odaklanarak taşınabilir elektroegirme teknolojisindeki mevcut gelişmeleri bir araya getirmektedir. Elektroegirme, nanofiber üretimi için kullanılan bir yöntemdir ve son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Ancak, elektroegirme cihazları genellikle büyük ve ağır olduklarından sadece laboratuvar ortamında kullanılmaya elverişlidir. Bu nedenle yara ve yanık tedavisi gibi acil tıbbi müdahale gerektiren laboratuvar dışı uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Cilt yenilenmesi ve doku mühendisliği alanında da umut verici sonuçlar vermektedir. Bu makalede taşınabilir elektroegirme cihazları iki ana kategoriye ayrılacak ve her bir bölüm ait örnekler incelenecektir. İlk kategori, şebekeye bağlı çalışan taşınabilir elektroegirme cihazlarıdır. İkinci kategori, pille çalışan taşınabilir elektroegirme cihazlarıdır. Her iki kategoriye ait elektroegirme cihazlarının kullanımı ve avantajları hakkında detaylı bir inceleme yapılmaktadır. Ayrıca bu makale, taşınabilir elektroegirme cihazlarının doku mühendisliği uygulamalarında kullanımına dair bilgi vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektroegirme, nanofiber, taşınabilir cihaz, doku mühendisliği, yara örtüsü.

#### ABSTRACT

This article brings together current developments in portable electrospinning technology, focusing on tissue engineering applications. Electrospinning is a method used for the production of nanofibers and has gained significant interest in recent years. However, electrospinning devices are generally large and heavy, making them suitable only for use in laboratory settings. Therefore, portable electrospinning devices are of great importance for applications outside the laboratory, particularly in emergency medical situations requiring rapid and effective intervention, such as wound and burn treatment. It also shows promising results in the fields of skin regeneration and tissue engineering. This article will divide portable electrospinning devices into two main categories and examine examples from each category. The first category is portable electrospinning devices that work connected to the grid, and the second category is portable electrospinning devices that work on batteries. A detailed review is conducted on each category's use and advantages of electrospinning devices. This article provides information on the use of portable electrospinning devices in tissue engineering application.

**Keywords:** Electrospinning, nanofiber, portable device, tissue engineering, wound dressings.

## GİRİŞ

Doku mühendisliği, canlı dokuların ve organların yeniden üretilmesi, onarılması ve geliştirilmesi için multidisipliner bir yaklaşımdır. Günümüzde doku mühendisliği, biyoloji, biyomühendislik, kimya, malzeme bilimi, fizik, matematik ve bilgisayar bilimleri gibi birçok farklı disiplinden gelen araştırmacılar tarafından yönlendirilmektedir. Doku mühendisliği, yeniden üretilen dokuların vücuttaki hasarlı veya kayıp dokuların yerini alması amacıyla kullanılmasını hedeflemektedir. Bu amaçla, doku mühendisliği araştırmaları, hücrelerin, materyallerin ve biyolojik sinyallerin kombinasyonuyla yeniden oluşturulan 3 boyutlu yapılar veya biyomalzemeler geliştirmektedir. Doku mühendisliği, tıbbi uygulamalarda yanıklar, yaralanmalar, enfeksiyonlar veya hastalıklar nedeniyle hasar gören deri veya kemiklerin onarımı gibi alanlarda kullanılabilir. Ancak, bu alanda yapılan çalışmaların başarısı, uygun teknolojilerin geliştirilmesine de bağlıdır (Acar, 2007).

Elektroegirme yöntemi, son yıllarda doku mühendisliği alanında kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntem, elektrostatik kuvvetlerin kullanımı ile polimerik çözümden nanofiberlerin üretilmesini sağlar. Bu nanofiberler, hasarlı dokuların onarımı için kullanılabilir (Şimşek, 2018). Elektroegirme yöntemi, ince ve homojen fiberlerin üretilmesi, yüksek yüzey alanı, yüksek gözeneklilik ve biyoyumluluk gibi avantajları nedeniyle doku mühendisliği uygulamalarında tercih edilmektedir. Yaralı dokunun bakımında, fiberlerin nano ölçekteki boyutları, enfeksiyon kaynaklarına karşı fiziksel koruma sağlamaktadır. Hava değişimini düzenleyerek hemostazi indüklemekte ve yara bölgesinde yumuşak doku rejenerasyonuna katkıda bulunmaktadır (Suepueren vd., 2007). Bununla birlikte, elektroegirme yöntemi bazı sınırlamalara da sahiptir. Özellikle elektroegirme cihazları büyük boyutlu ve sabit cihazlar olmaları nedeniyle bu yöntemi çoğunlukla laboratuvar ortamlarında uygulanmaktadır (Durmuş vd., 2017). Bu durum, mobilite ve hızlı müdahale gerektiren acil durumlarda elektroegirme yönteminin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, taşınabilir elektroegirme cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar, elektroegirme yöntemini her yerde kullanılabilir hale getirmektedir. Özellikle yara ve yanık gibi acil müdahale gerektiren durumlarda, taşınabilir elektroegirme cihazları hızlı ve etkili bir tedavi sağlayabilmektedir (Yan vd., 2016). Bu makalede, taşınabilir elektroegirme cihazları konusunda detaylı bir inceleme yapılacaktır. Şebekeye bağlı çalışan ve pille çalışan cihazlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılacaktır.

## ELEKTROEGİRME YÖNTEMİ

Elektroegirme, mikron ile nanometre arasında değişen boyutlarda çok ince fiberler üretmek için elektrostatik kuvvetleri kullanan basit ve çok yönlü bir yöntemdir (Huang vd., 2006; Long vd., 2022). Bu yöntem, doğal (Chen vd., 2008), sentetik (Ma vd., 2005), biyolojik olarak parçalanabilen, parçalanamayan (Kim vd., 2007; Maretschek vd., 2008) veya bunların karışımları dâhil olmak üzere birçok farklı polimer türünden fiberler üretmek için kullanılmaktadır (Deng vd., 2007).

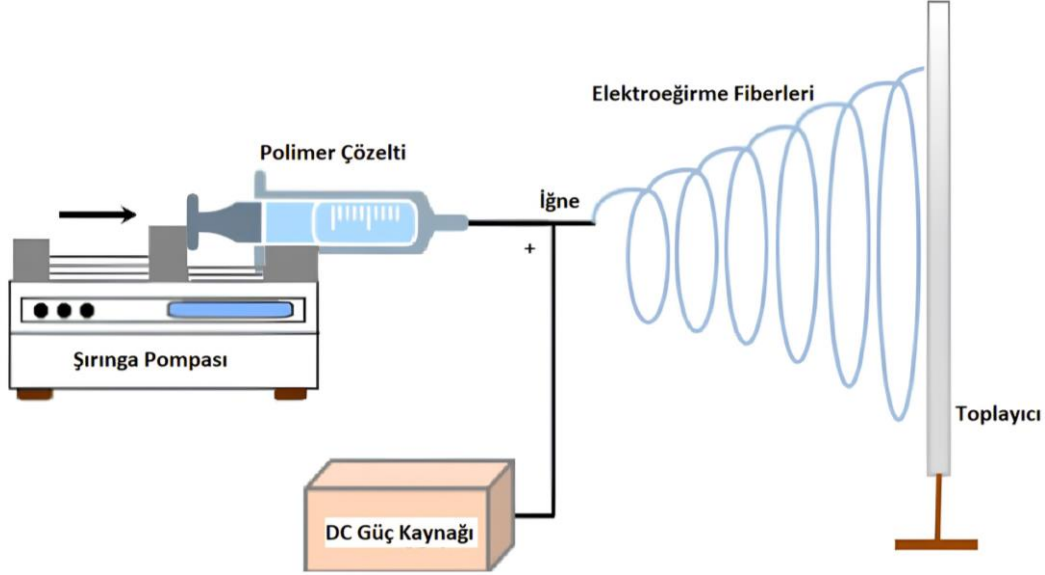
Elektroegirme yöntemi, geleneksel fiber üretme yöntemleriyle üretilen fiberlere göre daha geniş bir yüzey alanı ve daha küçük gözenek çaplarına sahip fiberler üretmektedir. Çok yönlü bir yöntem olan elektroegirme doku mühendisliği, ilaç taşıma, filtreleme ve algılama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Esentürk vd., 2016). Bu nedenle birçok araştırma uygulaması için en başarılı ve popüler seçenektir. Diğer tekniklerle kıyaslandığında basit, çok yönlü ve uygun maliyetli olması başlıca avantajlarıdır (Reneker & Yarin, 2008). Nano ve mikro partiküller üreten elektropüskürtmeye benzer şekilde, elektroegirme, bir polimer çözeltisinden nano ölçekli ve mikro ölçekli fiberler üretmek için yüksek voltajlı elektrik yükleri kullanılmaktadır (Bhushani & Anandharamkrishnan, 2014).

### *Elektroegirme Yönteminin Temelleri ve Çalışma Prensibi*

Polimer çözeltisi sabit bir hızda şırıngadan veya püskürtücüden pompalanır ve iğneye yüksek voltaj uygulanmaktadır. Bu elektrik alan, polimer çözeltisini uzatarak ince bir jet haline getirir, bu da ardından sallanma ve bükülme kararsızlığına uğrayarak sürekli bir fiber oluşturmaktadır. Elektroegirme işlemi temel olarak dört ana bileşenden oluşmaktadır: içine konulan çözeltiyi beslemek için pompa, iğne uçlu şırınga, topraklanmış iletken toplayıcı ve yüksek voltajlı güç kaynağı. Uygulanan yüksek voltajın bir sonucu olarak elektroegirme işlemi sırasında, iğne ucundaki polimer çözelti damlacığı elektrostatik kuvvetler altında "Taylor konisi" adı verilen bir koniye dönüşmektedir (Santangelo, 2019).

Elektroegirme yöntemi, öncelikle polimerin uygun bir çözücüde çözündürülmesi ile başlamaktadır. Daha sonra, Şekil 1' de görüldüğü gibi polimer çözeltisi besleme ünitesine(şırınga) yerleştirilip, besleme ünitesinin iğnesi ile topraklanmış metalik toplayıcı arasına yüksek gerilim güç kaynağı bağlanarak bir elektrik alan oluşturulmaktadır. Bu

sayede, polimer çözeltisi içindeki polimerler elektrik alanının etkisiyle birbirine çekilmekte ve metalik toplayıcıda birikmektedir. Belirli bir voltaj seviyesinin üzerinde, elektrostatik itme kuvveti, çözeltinin yüzey gerilimini yener ve ince bir polimer çözeltisi püskürtülür. Sıvının çoğu, şırınga iğnesinden tanımlanmış bir çalışma mesafesindeki toplayıcıya ulaşmadan önce çözeltiden buharlaşmaktadır. Çözücünün buharlaşmasıyla nanofiber formunda toplayıcı üzerinde katılaşmaktadır. Böylece nanofiber örtü oluşmaktadır (Williams vd., 2018).



Şekil 1: Elektroejirme Yönteminin Şematik Görünümü (Alharbi vd., 2016).

Üretilen fiberlerin morfolojisi, çapı ve gözenekliliği oldukça önemlidir. Elektroejirme fiberlerinin üretimini etkileyen en belirgin parametrelerin bir listesi Tablo 1' de sunulmaktadır. Genel olarak, elektroejirme işlemi sırasında daha ince fiberler üretilebilmek adına toplayıcı ve düzenek arasındaki mesafeyi artırarak atış süresi uzatılmaktadır. Düşük uçuculuğa sahip solventlerin kullanılması ve solventin buharlaşma hızının artırılması için sıcaklığın yükseltilmesi de mümkündür. Bununla birlikte, çalışma mesafesini optimum değerine çıkarmanın, homojen olmayan fiberlere yol açabileceği ve dallanma ile sonuçlanabileceği unutulmamalıdır (Asmatulu & Khan, 2018; Williams vd., 2018).

**Tablo 1:** Elektroğirme Sırasında Elektroğirme Fiberlerinin Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin Listesi (SalehHudin vd., 2018; Teo vd., 2011).

Elektroğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler	Etkileri
Çalışma Mesafesi	- Mesafeyi optimum değer altına indirmek daha kalın fiberler ve morfolojik kusurlar oluşturmaktadır. - Mesafenin artması daha ince fiberler oluşturmaktadır. Ancak artan korona deşarjına ve Rayleigh kararsızlığına yol açarak kritik bir mesafenin ötesinde boncuklu veya erimiş fiber kusurlarına neden olabilmektedir.
Gerilim	- Polimer çözeltisinin yüzey geriliminin üstesinden gelmek ve bir jeti sürdürmek için kritik voltaj aşılmalıdır. - Voltajı arttırmak, uçuş süresini azaltır, fiber çapını artırır ve kritik bir noktanın üzerinde düzensiz jetleri ve boncuk oluşumunu indükler ve bunun tersi de geçerlidir.
Akış Hızı	- Akış hızını artırılması, düşük esneme, daha büyük gözenek boyutu ve kritik değer üzerinde fiber çapı oluşturmaktadır.
Düzenek Deliği	- Daha küçük düzenek delik çapı, daha dar fiberler oluşturur ve morfolojik kusurları azaltır. Böylece nozülün tıkanma olasılığını da artırır. - İçi boş veya karışık fiber morfolojisi mümkündür.
Toplayıcı Geometrisi	- Farklı toplayıcı şekilleri ile farklı fiber düzenlemeleri elde edilebilir. Dönen tambur, plaka, disk vb. dâhil olmak üzere geometrilerle hizalı, çapraz dizili, örgülü, nanoweb veya bobin fiberleri elde edilebilmektedir.
Polimer Yoğunluğu ve Viskozite	- Polimer yoğunluğu, elektroğirme yöntemi sırasında kullanılan polimer çözeltisinin konsantrasyonunu ifade etmektedir. Polimer yoğunluğu arttıkça, elde edilen nanofiberlerin çapı genellikle azalır. Ayrıca, yüksek polimer yoğunluğu, nanofiberlerin düzenliliğini artırabilir ve daha homojen bir yapı oluşturabilmektedir. - Polimer çözeltisinin viskozitesi, nanofiberlerin çekilme sürecini etkileyebilir. Viskozite düşük olduğunda, polimer çözeltisi daha kolay şekil verilebilir ve daha ince fiberler elde edilebilir. Ancak, çok düşük viskozite, nanofiberlerin stabilitesini azaltabilir ve polimer damlacıklarının oluşmasına neden olabilmektedir.
Polimer Çözeltisinin Elektrik İletkenliği	- Elektroğirme yönteminde, uygun iletkenlik özellikleri, polimer çözeltisinin yüksek gerilim alanında şarj birikimini teşvik ederek jet patlamasını daha az voltaj gerektirecek şekilde oluşmasına yardımcı olur. Ancak, yüksek iletkenliğin olması, çevredeki havaya elektrik boşalması nedeniyle kararsız çoklu püskürtmeye neden olabilir. Bu durumda, optimum iletkenliği sağlamak için, polimer çözeltisinin iletkenlik özellikleri dikkatlice kontrol edilmeli ve ayarlanmalıdır.
Çözücü Uçuculuğu	- Yeterince uçucu çözümler, fiberlerin toplayıcıda ıslak füzyonunu önlemektedir. Son derece uçucu çözümler, yeterli uzama olmadan erken katılaşarak, morfolojik kusurlar, ince fiber üretimini engellemekte ve düzenekte tıkanma riskini arttırmaktadır.
Bağıl Nem	- Artan nem, çökmeden önce katılaşmada gecikmeye neden olmaktadır. Bu nedenle uzama süresini artırır ve daha ince fiberler oluşturmaktadır. - Yüksek nemin (>%60), özellikle polivinil pirolidon (PVP) gibi higroskopik polimerler için düzgün olmayan erimiş fiberler ürettiği bilinmektedir. Polimer suda çözünmezse, polimerin çökmesi düzeneğin tıkanmasına, daha kalın çaplara, morfolojik kusurlara ve faz ayırmasına atfedilen diğer sorunlara neden olabilmektedir.
Sıcaklık	- Sıcaklık arttıkça çözelti viskozitesi azalır ve elektrik iletkenliği artar, bu da daha büyük polimer zincir hızına sahip ince tekdüze fiberlerin oluşumuna olanak tanımaktadır. Ancak, sıcaklığın artması, aynı zamanda katılaşmadan önce buharlaşma ve uzama süresinde azalmaya neden olabilir ve bu da daha ince fiberlerin oluşumunu engelleyebilmektedir.

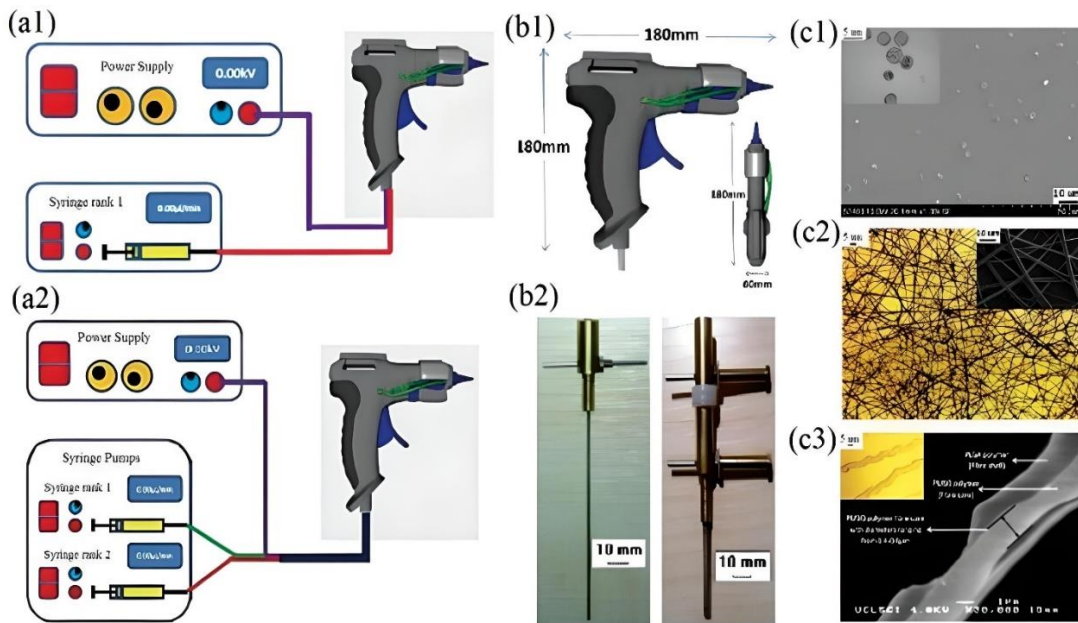
## TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME CİHAZLARININ TEMELLERİ

Taşınabilir elektroegirme cihazları, nanotıp ve nanoteknolojide geleneksel elektroegirme cihazlarının dezavantajlarından kaçınmak için tasarlanmıştır. Tek seferlik anlık fiber üretimi sağlayan bu cihazların hareketliliği, laboratuvar harici ortamlarda elektroegirme imkânı tanımaktadır. Taşınabilir elektroegirme cihazlarının hareketliliği ve yerinde elektroegirme imkânı, yara iyileştirme ve benzeri uygulamalar için birçok potansiyel fayda sağlamaktadır. Diğer birçok taşınabilir aygıtta olduğu gibi, makinenin geri kalanı elle taşınamayacak kadar büyük ve ağır olduğundan, bu aygıtların yalnızca düzeneğe bileşeni taşınabilir olan tasarımları da mevcuttur. Öte yandan, taşınabilir elektroegirme cihazları, ihtiyaç anında uygulama için yüksek verimli fiberler üretirken, esas olarak cilt yenileyici nitelikler (Dong vd., 2020; Liu vd., 2018) ve hızlı hemostaza (Zhou vd., 2020) sahip yara pansumanlarında uygulanmaktadır (Liu vd., 2020; Zhang vd., 2020).

Taşınabilir elektroegirme cihazı modelleri:

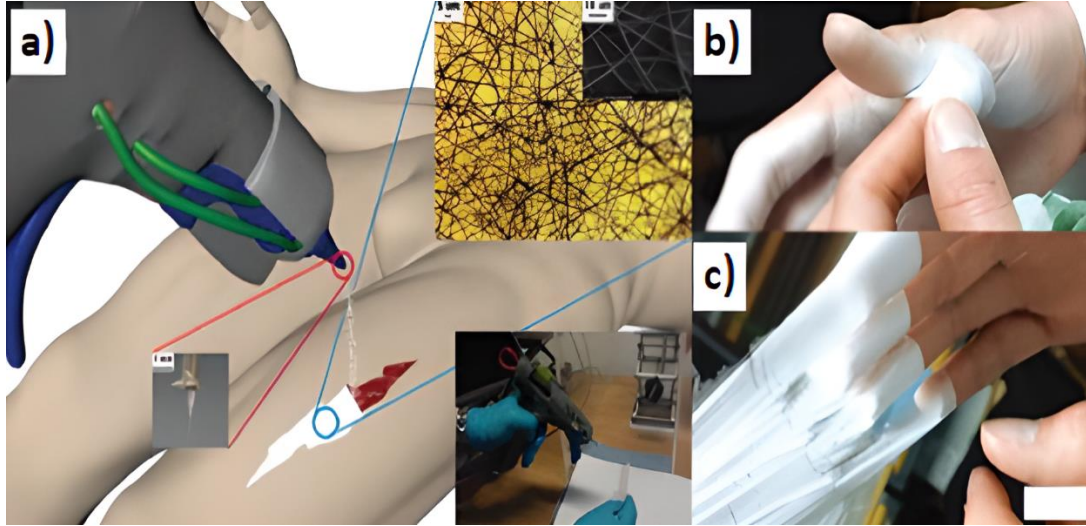
- Şebekeye (ana elektrik hattına) bağlı çalışan elektroegirme cihazları,
- Pille çalışan elektroegirme cihazları.

### Şebekeye bağlı yerinde elektroegirme cihazları



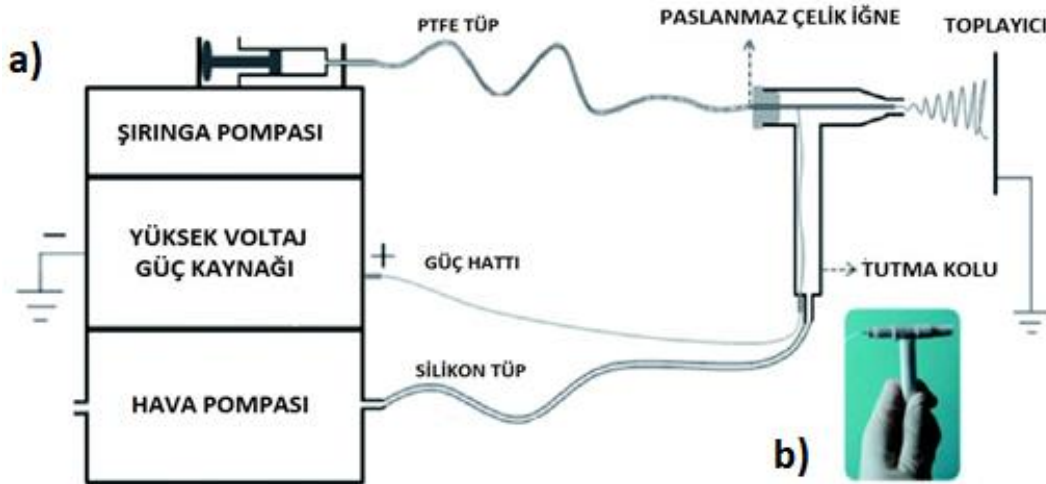
**Şekil 2:** (a1) Bir veya (a2) İki Şırınga ile Taşınabilir Bir Elektroegirme Düzeneginin Şeması. (b1) Elde Tutulan Düzenek Şu Şekilde Tasarlanmıştır: (b2) Tek Ve Çok Eş Eksenli Bir İğnenin (c1) Partiküller, (c2) Fiber Keçeler ve (c3) Eş Eksenli Fiberler Üretmek Üzere Bir Araya Getirildiği Bir Püskürtme Aracıdır (Sofokleous vd., 2013).

Sadece laboratuvar ortamında kullanılabilen makro büyüklükteki elektroegirme cihazları yerinde elektroegirme yapabilmek için çeşitli şekillerde küçültülüp taşınabilir hale getirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Edirisinghe ve ark. aittir. Şekil 2(a1-a2)' de tasarımı görülen taşınabilir elektroegirme cihazı Şekil 2(b1-b2)' de gösterildiği gibi tek veya çift koaksiyel iğne ucundan akacak şekilde tasarlanmış bir polimer püskürtme mekanizmasına sahiptir. Şekil 2(c1-c3)' te gösterildiği gibi sınırlı bir alanda cihazın çalışma performansı incelenip poli (laktik-ko-glikolik) asit (PLGA) partikülleri, fiberleri ve ayrıca PLGA/polimetilsilseksuoksan (PMSQ) çekirdek-kabuk fiberleri üretilmiştir. Şebekeye bağlı olarak çalışan bu cihazı Edirisinghe ve ark. çok iğneli elektrohidrodinamik (EHD) püskürtme tabancası olarak adlandırmışlardır. EHD püskürtme tabancasında tek iğneli sisteme 250 µl/dk sabit akış hızında %25' lik bir PLGA solüsyonu verilir optimum çalışma koşulları belirlemişlerdir. Edirisinghe ve ark. yaptıkları çalışmalara göre elektroegirme tabancasının kararlı koni jeti, 13.5 kV uygulanan bir voltajda oluştuğunu ortaya çıkarmışlardır. PLGA elektroegirme fiberleri mikroskop cam lamaları üzerinde toplanmış ve ~5 dakikada toplanan fiberlerle, 2 mm kalınlığında bir PLGA yaması üretmişlerdir (Lau vd., 2014; Sofokleous vd., 2013).



**Şekil 3:** (a) Yerde Kullanım İçin Portatif Bir Elektroğirme Düzeninin Şeması, (b) El Üzerine Oluşturulan Fiber Bazlı Film ve (c) Filmin Çıkarılması (Lau vd., 2014; Yan vd., 2019)

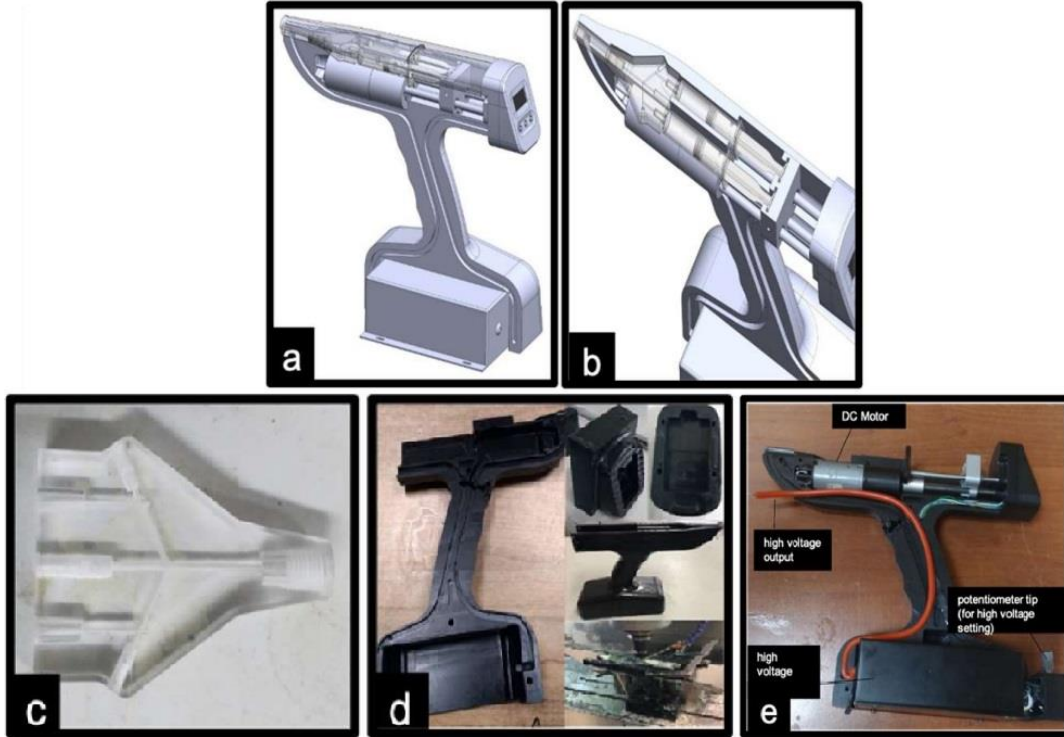
Doku mühendisliği çalışmalarında kullanılan elektroğirme cihazı, biyomalzemeleri yaranın etrafında toplayarak iyileşme sürecini hızlandırmak için nanofiberler üretmektedir. Kesik bir yaranın iyileşmesinde kullanılan bu nanofiberler, yaranın korunması amacıyla uygulanmaktadır. Şekil 3(a)' da gösterildiği gibi, taşınabilir cihaz PLGA fiberlerini kesik yara veya sıyrık yüzeyi gibi bir hedef alan üzerine yatırmak için pratik bir yöntem sağlamaktadır. Cihaz tarafından püskürtülen polimer, çözücünün buharlaşması ile kalıplaşıp ince bir film tabakası haline gelmektedir. Cihaz Şekil 3(b)' deki ince koruyucu film katmanını, 300 saniye içinde oluşturabilmektedir. Ayrıca şekil 3(c)' de yaralı yüzeyin iyileşmesine bağlı olarak ince filmin, değiştirilmek veya çıkarılmak istenildiğinde kolayca esnetilip soyularak çıkarılabildiği gösterilmektedir (Jiang vd., 2014).



**Şekil 4:** (a) Hava Akımı Yönlendirmeli Yerde Elektroğirme Cihazının Şematik Gösterimi. (b) Tasarlanan Başlık (Jiang vd., 2014).

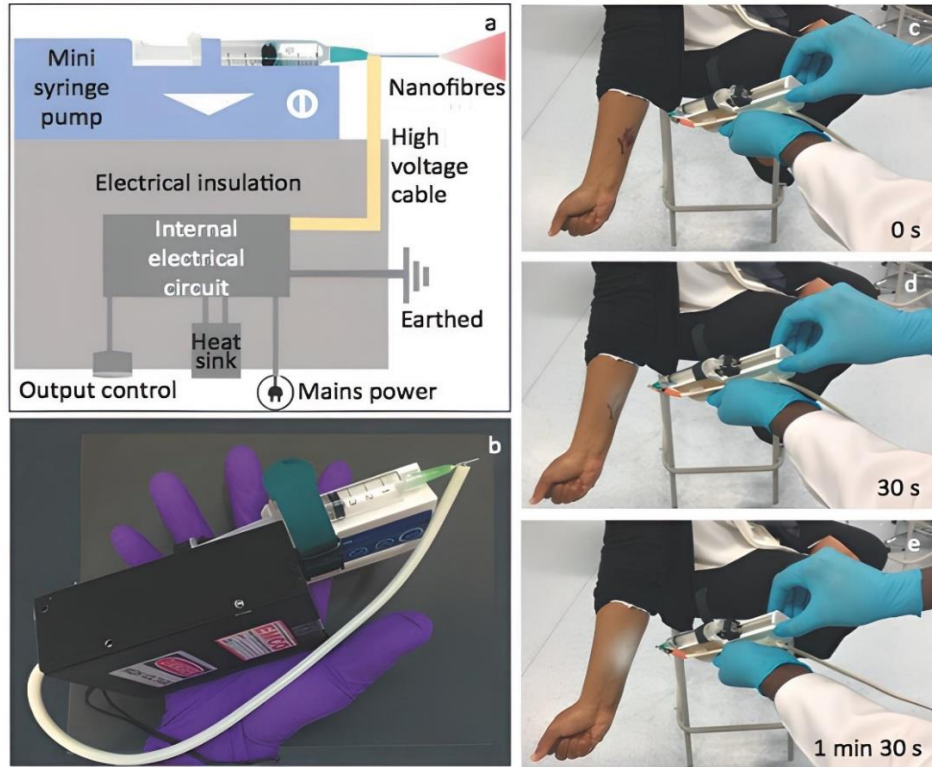
Edirisinghe ve ark. cihazına benzer olarak Long ve ark. hızlı hemostaz için hava akışı yönlendirmeli şebekeye bağlı bir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. Taşınabilir elektroğirme cihazı Edirisinghe ve ark. elektroğirme tabancasına benzer bir tasarımdadır. Şekil 4' de gösterildiği gibi, taşınabilir elektroğirme cihazı temel olarak dört öğeden oluşmaktadır: yüksek voltajlı bir güç kaynağı, bir şırınga pompası, bir hava pompası ve koaksiyel düzenek. Cihazın yüksek voltaj güç kaynağı 6-10 kV aralığında çalışmaktadır. Hava pompası, Şekil 4(a-b)' de gösterildiği gibi elektroğirmeye yardımcı olmak ve fiber biriktirme aralığını kontrol etmek için koaksiyel düzeye bağlanmıştır. Long ve ark. geliştirdiği elektroğirme cihazın deneylerini, küçük yaralarda ve kesiklerde iyileştirme uygulamaları amacıyla oktil siyanoakrilat (OCA) fiberlerinin doğrudan domuz karaciğer ve akciğer dokuları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile Long ve ark. *in vivo* domuz karaciğerinde hemostazı tamamlamışlardır. Yara,

yerinde elektroğirme ile hava yönlendirilerek fiber film tabakasıyla ort. 20 saniyede hızlıca kapatılmıştır (Jiang vd., 2014). Yerinde hassas elektro çekim ile *in vivo* hemostaz için OCA medikal yapıştırıcının geleneksel püskürtmesi karşılaştırıldığında, eski yöntemin hassas fiber biriktirme, yüksek verimlilik ve düşük doz gibi avantajları bulunmaktadır (Dong vd., 2015).



**Şekil 5:** (a,b) Cihazın 3D Görüntüsü, (c) Polimer Sıvının Enjekte Edilmek İçin Birleştiği Kısım (Mikroçip), (d) Cihazın Diğer Kısımları, (e) Cihazın İç Görünümü (Ekren & Karacan, 2022).

Karacan ve Ekren 30 kV' a kadar yüksek gerilim üretebilen kaynak kullanarak taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. 24 V anma gerilimi, 0,275 A anma akımı, 200 Ncm anma torku ve 14 RPM anma hızına sahip DC motor kullanılmış ve şırınga pompası çalıştırılmıştır. Karacan ve Ekren tarafından elektroğirme cihazı olarak adlandırılan bu cihaz şebekeye bağlı olarak tasarlanmış ve 220 V AC gerilim 24 V DC gerilime dönüştürülmüştür. Farklı yüksek voltaj değerlerinde test edilmiş ve yüksek voltaj sırasında herhangi bir ısınma sorunu ile karşılaşmamıştır. Şekil 6(a-b-e)' de 3D tasarımları verilen cihaz bir el matkabı boyutu ve şeklindedir. Cihaz aynı zamanda 128x64 piksel çözünürlüklü 3-5 V çalışma gerilimi ve SPI / I2C ara yüz desteğine sahip, 6 adet pin ile kontrol edilebilen OLED ekran eklenmiş ve 8 bitlik mikrodenetleyici ATmega16A üzerine C programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Karacan ve Ekren Şekil 5(c-d)' de görüldüğü gibi elektroğirme işleminde kullanılacak polimerlerin birleştiği bir mikroçip tasarlamış ve çift şırıngadan gelen polimeri tek bir polimer akışı haline getirmişlerdir. Karacan ve Ekren çift şırınga kullanmasının başlıca nedeni yaraya birçok polimer çeşidini aynı anda elektroğirilebilmektir. Bu sayede yaralı bölgenin ihtiyacına yönelik farklı çalışmalar yapılabilecektir (Ekren & Karacan, 2022; Karacan, 2019).



**Şekil 6:** Taşınabilir EHD Cihazının (a) Şematik Diyagramı, (b) Mini Cihaz El Ünitesinin Montajını Gösteren Bir Fotoğraf. (c-e) Fiberlerin Simüle Edilmiş Bir Yara Bölgesine Yerleştirilmesi Sırasında Cihazın Gerçek Zamanlı Kaydının Anlık Görüntüleri (Brako vd., 2018).

Brako ve ark. Şekil 6(a-b)' da gösterildiği gibi basit ve ucuz bir taşınabilir elektroegirme cihazı önermiştir. Bu, hem minyatürleştirilmiş yüksek hassasiyetli bir mikro şırınga pompası, hem de 10 W' ta 33 kV' a kadar üretebilen minyatür bir yüksek voltaj güç kaynağından oluşturulmuştur. Düzenek ve güç kaynağı ünitesinin bir el ünitesine tam olarak entegre edilmesiyle, cihazın tamamı ağırlık olarak daha hafif ve daha taşınabilir hale gelmiştir. Böylece Şekil 6(c-e)' deki gibi şebeke gücü olan herhangi bir yerde kolayca kullanılabilir. Bu cihaz kullanılarak, selüloz asetat (CA) ve gümüş nanoparçacıklarla katılanmış CA, Şekil 6(c-e)' de gösterildiği gibi, doğrudan simüle edilmiş yara bölgeleri üzerinde fiberler halinde başarıyla elektroegirilenmiştir. Şimdiye kadar gördüğümüz elektroegirme cihazları taşınabilir olmasına rağmen sadece düzenek elde tutulup geri kalan kısımları büyük ve ağır olması nedeniyle sabittir. Bu nedenle Ekren ve ark. ve Brako ve ark. diğer taşınabilir elektroegirme cihazlarına kıyasla daha kolay ve ucuz bir taşınabilir elektroegirme cihazı yapıp içerisine yüksek voltaj güç kaynağı da dahil etmeyi tercih etmişlerdir. Şebekeye bağlı bu dört elektroegirme cihazının özelliklerinin derlenmiş hali Tablo 2' de verilmektedir (Brako vd., 2018).

**Tablo 2:** Şebekeye Bağlı Çalışan Taşınabilir Elektroegirme Tabancaları ve Özellikleri.

Referans	Çalışma Voltajı	Çift Şırınga	Ağırlık	Patent
Edirisinghe ve ark.	0-13.5 kV	Var	1000 g	Yok
Long ve ark.	6-10 kV	Yok	-	Var (Patent Numarası: WO2015074454A1)
Ekren ve ark.	0-30 kV	Var	1750 g	Yok
Brako ve ark.	0-33 kV	Yok	-	Yok

Makalenin başında iki kategoriye ayırdığımız taşınabilir elektroegirme cihazlarının, kendilerine özgü avantajlar ve dezavantajları bulunmaktadır. Tablo 3' te şebekeye bağlı yerinde elektroegirme cihazlarının avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

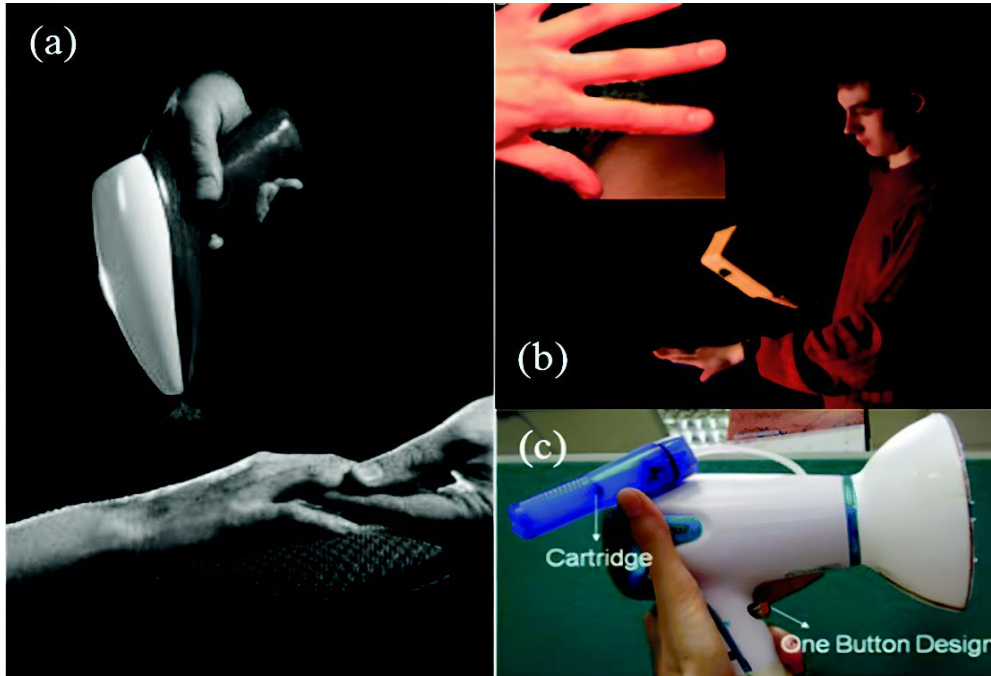


**Tablo 3:** Şebekeye Bağlı Çalışan Taşınabilir Elektroeğirme Tabancalarının Avantajları ve Dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, sürekli bir üretim kapasitesine sahiptir. Bu sayede, büyük miktarda nanofiber üretimi yapmak mümkündür.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, düzenli bakım gerektirir. Bakım işlemleri zaman alıcı ve pahalı olabilmektedir.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, otomatik olarak çalışır ve insan müdahalesi gerektirmez. Bu sayede, üretim sürecinde insan hatalarından kaynaklanabilecek sorunların önüne geçilmektedir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, yüksek gerilim gerektirir. Bu nedenle, güvenlik önlemlerine uyulması gerekmektedir.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, enerji verimliliği yüksek olduğu için işletme maliyetleri düşüktür.</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, işlem kontrolü için gerekli sensörleri ve yazılımı içermektedir. Bu sayede, işlem parametreleri kolayca ayarlanabilmekte ve izlenebilmektedir.</li></ul>	

### ***Pille çalışan taşınabilir elektroeğirme cihazları***

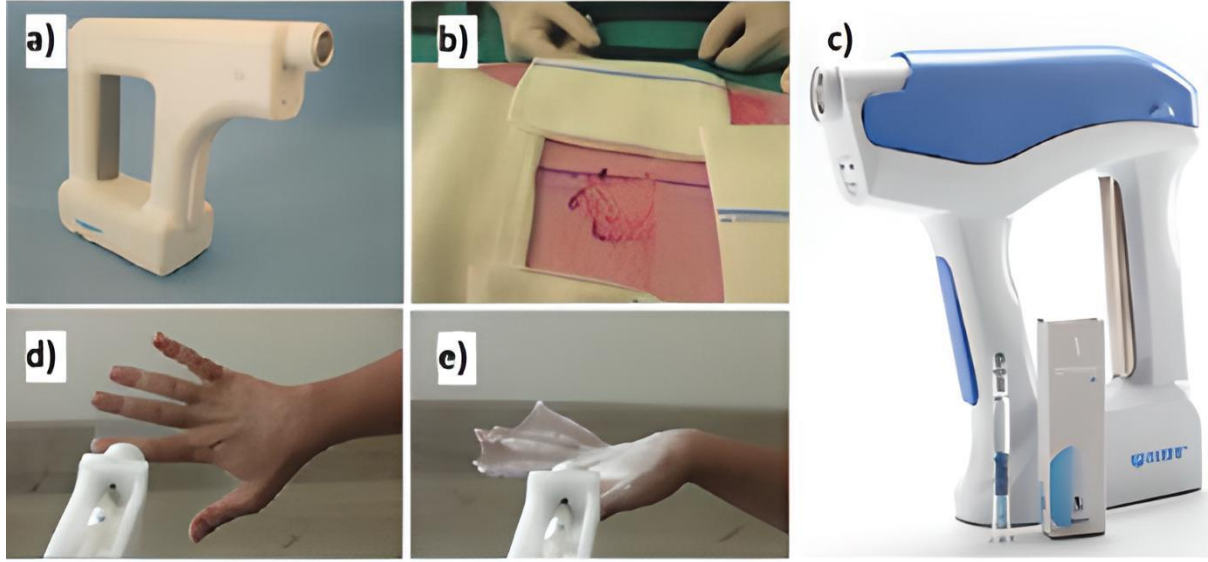
Şimdiye kadar tartışılan yerinde elektroeğirme cihazları, ağır bir güç kaynağına sahip ve şebekeye bağlı olmaları nedeniyle güç kaynağından ayrı bir şekilde elde tutulan düzeneklerden oluşturulmuştur. Bu nedenle bir dereceye kadar taşınabilirliğe sahiptirler. Pille çalışan cihazların ortaya çıkmasına neden olan başlıca etken budur. Şebekeye bağlılığın oluşturduğu sınırlandırmayı ortadan kaldırmak için birkaç girişimde bulunulmuştur.



**Şekil 7:** Pille Çalışan Taşınabilir Elektroeğirme Aparatına Örnekler (Huang vd., 2003).

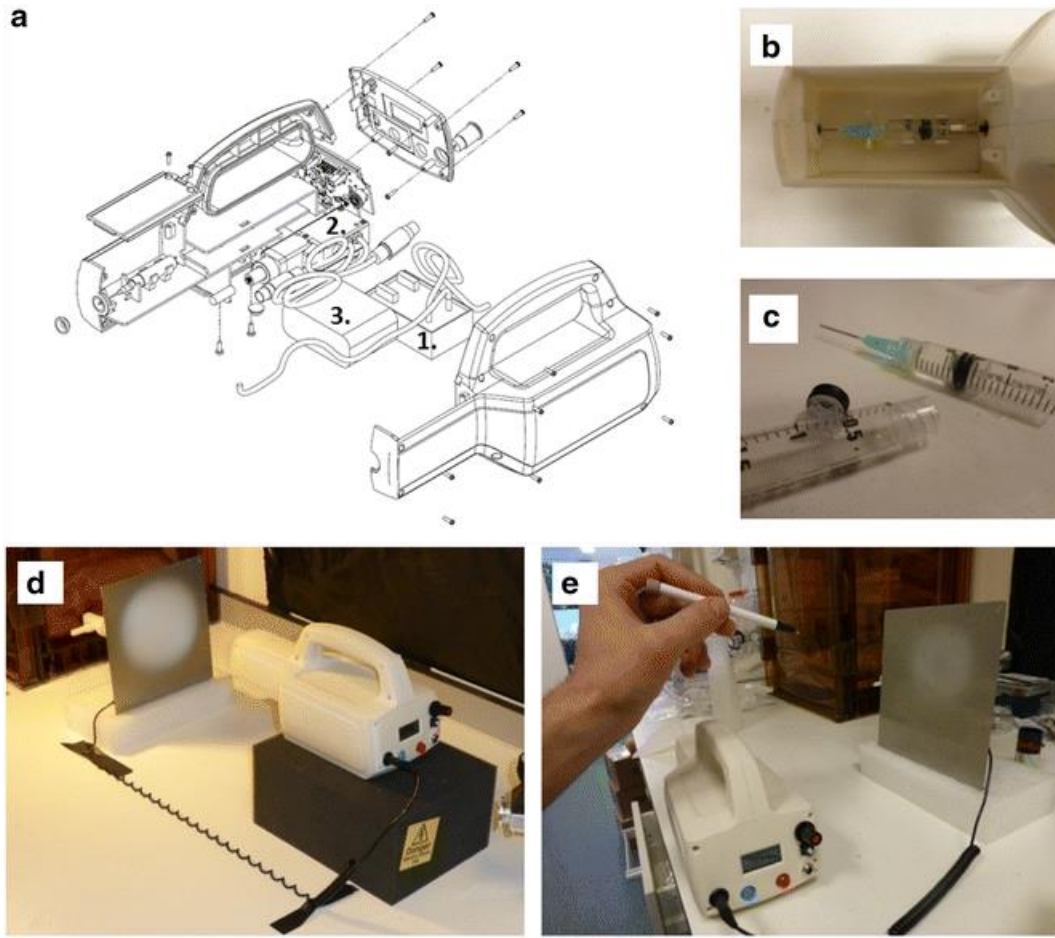
Şekil 7(a)' da gösterildiği gibi, Smith ve Reneker yara ve yanıkların üzerine, pille çalışması sayesinde yerinde pansuman oluşturmak için doğrudan biyolojik olarak parçalanabilen fiberler üreten taşınabilir bir elektroeğirme cihazı geliştirmişlerdir (Huang vd., 2003). Smith ve Reneker belli bir hazneye sahip pille çalışan cihaz önermiştir. Bu fiber ağının doğrudan etkilenen cilt bölgelerine elektroeğirildiği süreci açıklamışlardır (Smith vd., 2004). Ayrıca benzer şekilde Şekil 7(b)' de gösterildiği gibi Greiner ve Marburg Üniversitesi'nden araştırmacılar, nanofiberlerin

yaraların üzerine doğrudan yerleştirilmesi için kullanılacak elde tutulan bir elektroğirme ekipmanı geliştirmişlerdir (Greiner & Wendorff, 2007). Bu şekilde çalışan bir cihazda, standart pillerle yüksek voltaj sağlanabileceği ve modüler bir yapı ile farklı polimer çözeltilerinden fiber üretmenin mümkün olduğu bildirilmiştir. Bu sayede istenilen bölgelere, yaranın ve bölgenin türüne bağlı olarak çeşitli polimer taşıyıcıların ve ilaçların uygulanabileceğini bildirmişlerdir. Şekil 7(c)'de gösterildiği gibi Singapur Üniversitesi tarafından da benzer prensibe dayanan bir cihaz daha önerilmiştir. Ancak, pille çalışan bu cihazlar hakkında çok az teknik ayrıntı ortaya konmuştur ve pratik uygulamalarla ilgili araştırmaları takip edilmektedir (Liu vd., 2010).



**Şekil 8:** (A) Nicast Ltd. Lod, İsrail Tarafından İmal Edilen Bir El Elektroğirme Cihazının Görüntüsü. (B) Bir Domuz Modelinde Yara Bölgesi Ve (C) Fiberler, Aynı Cihaz Kullanılarak Bir İnsan Eline Doğrudan Elektroğirme Ve (D) Fiberler, Aynı Cihaz Kullanılarak Bir İnsan Eline Doğrudan Elektroğirme. (Haik vd., 2017; Yan vd., 2019). (E) Satışta Bulunan Spincare Cihazının Güncel Tasarımı Ve İçerisinde Çözelti Bulunan Tek Kullanımlık Kapsül (Nanomedic's Spincare, 2023).

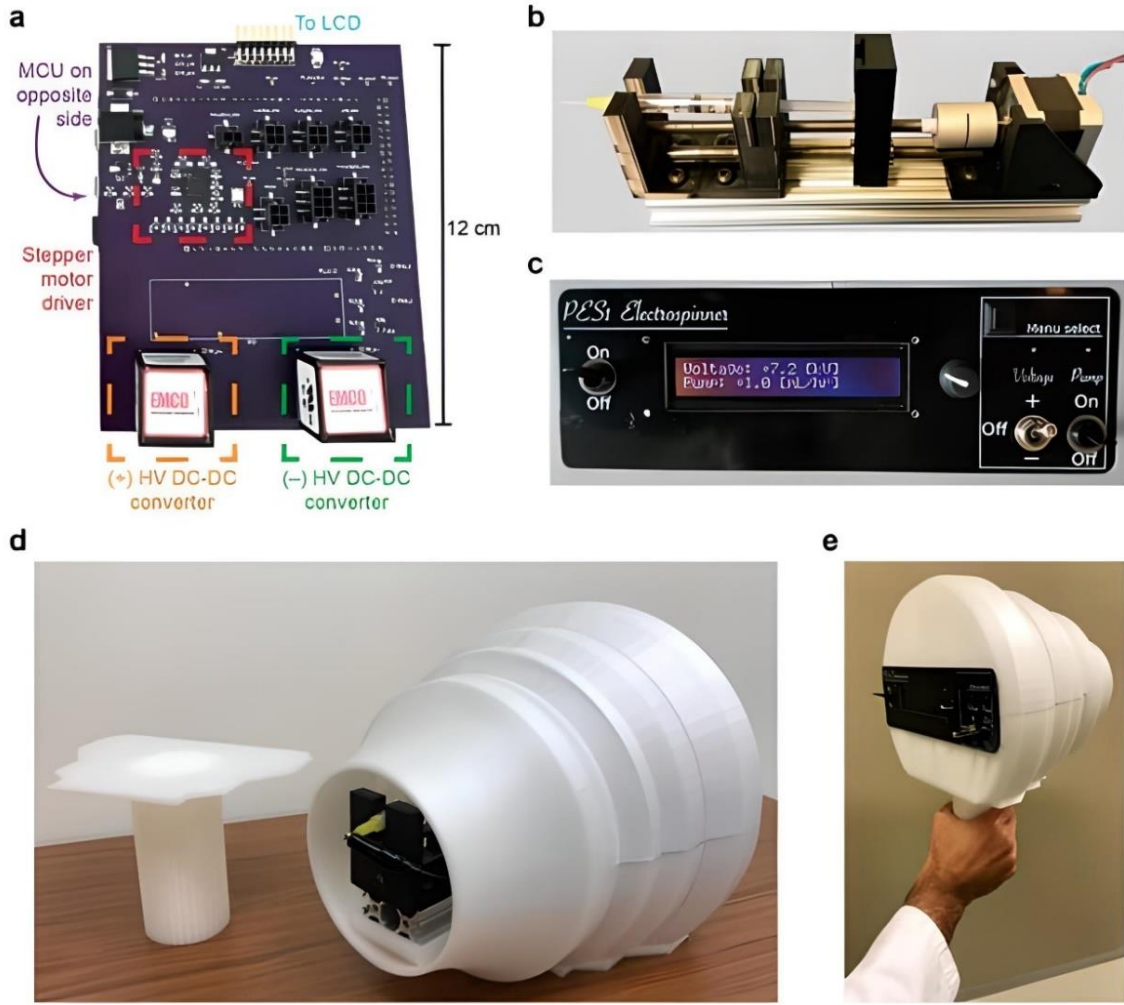
Şekil 8(a-c)'de görüldüğü gibi Josef Haik ve ark. yaraya doğrudan uygulanan yara örtülerinin üretimi için taşınabilir bir elektroğirme cihazının fizibilitesini incelemişlerdir (Haik vd., 2017). Nicast Ltd, Lod, İsrail tarafından üretilen yeni bir taşınabilir el cihazı Şekil 8(a)'da görülmektedir. Canlı deneyleri için biyouyumlu tıbbi sınıf polyeater, polikarbonat ve poliüretan polimerlerini doğrudan bir yara bölgesine elektroğirmelemek için kullanılmış ve yara örtüsü oluşturulmuştur. Yara örtüsünün yapışması, yara eksüdası, eskar varlığı, ters deri reaksiyonu, yara kapanması, pansuman çıkarma kolaylığı ve tam iyileşme süresi açısından 2, 7 ve 14. günlerde değerlendirmeler yapılmıştır. Cilt reaksiyonu, yara kapanması, pansuman çıkarma kolaylığı ve tam iyileşme süresi incelenmiştir. Şekil 8(d-e)'de gösterildiği gibi arzu edilen ve uygulanabilir kalınlıkta bir pansumanın oluşturulması için sadece bir dakika yeterlidir. Elde taşınan cihazın, enfeksiyon ve çapraz kontaminasyon oranlarını azaltma potansiyeline sahip, yaradan belli bir mesafede uygulanan yerinde nanofiberli pansumanların üretilmesinde etkili ve kullanımının uygun olduğu iddia edilmiştir. Şekil 8(c)'de gösterilen şu an satışta olan bu cihaz, önceden doldurulmuş kapsüller içerisinde çözelti bulunan SpinKit™, SpinCare™ olarak yeniden adlandırmıştır (Josef Haik ve ark. Nanomedic™ firması Spincare™ cihazına patent almış ve aktif olarak satış yapmaktadır (Haik vd., 2017).



**Şekil 9:** Taşınabilir Elektroğirme Aparatının Tasarımı, (a) Cihazın CAD Çizim Düzenine Patlatılmış Görünümü (1. Yüksek Gerilim Konvertörü, 2. Lineer Aktüatör, 3. Pil Paketi), (b) Kartuşlar için Ayrı Bölme, Şu Adresten Erişilebilir: Çıkarılabilir Kapak, (c) Bu Çalışmada Kullanılan Kartuşlar. (d) Fiberler Doğrudan Cihazdan Eğiriliyor, (e) Cihaza Bağlı Bir Kalem Uzantısı Aracılığıyla Manuel Olarak Elektrikle Eğirilen Fiberler (Mouthuy vd., 2015).

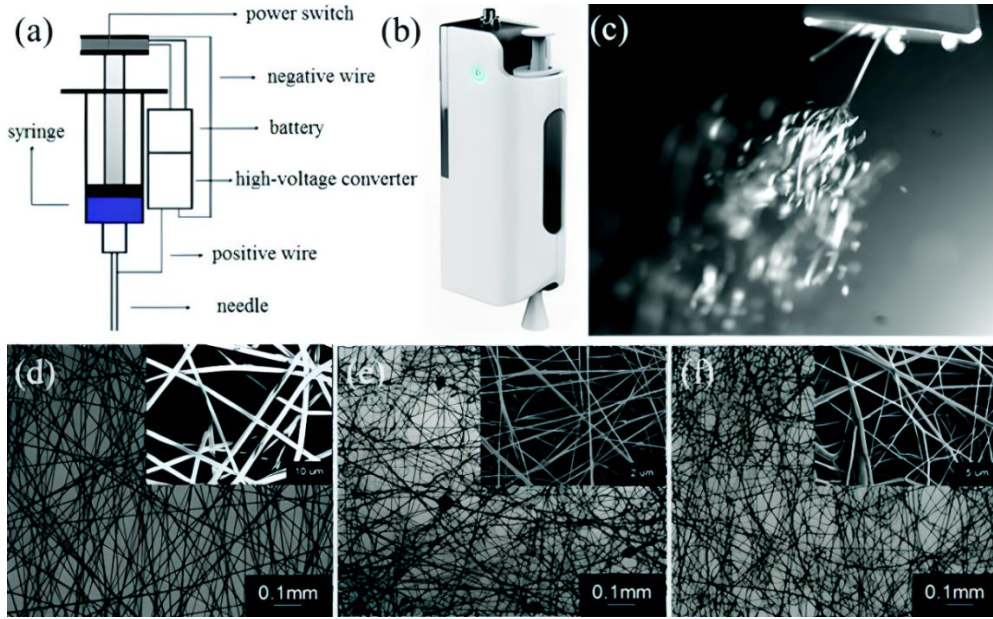
Ye ve ark. mikrodenetleyici aracılığıyla voltajın ve akış hızının kontrol edilebildiği, çoğu elektroğirme ve elektrosprey uygulaması için uygun bir değer aralığında ayarlanıp çalışabilen yeni bir taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmiştir. Manuel eğirme için bir kalem uzantısına sahiptir. Şekil 9(a)' da görüldüğü gibi elektroğirme cihazının boyutunu en aza indirmek için yüksek voltaj dönüştürücü, lineer aktüatör ve pillerden oluşan muhafaza içinde paketlenmiştir. Cihazın toplam ağırlığı 1,11 kg'dır (Chui vd., 2018; Mouthuy vd., 2015).

Polimer bulunduğu kartuşlar Şekil 9(a-b)' de gösterildiği gibi, güvenli ve kolay değiştirilebilmeleri için ayrı bir bölmeye yerleştirilmiştir. Kartuş olarak kullanılan değiştirilmiş şırıngalar, Şekil 9(c)' de görülmektedir. Elektroğirme, Şekil 9(d-e)' de gösterildiği gibi doğrudan kartuştan veya kalem uzantısıyla döndürülerek yapılmıştır. Voltajlar 0 ile 14 kV arasında seçilebilir ve 0 ile 10 ml/h arasında çok çeşitli akış hızları önceden ayarlanmıştır. Ye ve ark. elektroğirme işlemi sırasında değerleri LCD ekranda görülebilecek şekilde tasarlamışlardır. Piller, cihazın 13 kV ve 1 ml/h' de yaklaşık 105 dakika çalışması için yeterli gücü sağlayabilmiştir. Fiberler hem domuz hem de insan derileri üzerinde başarılı bir şekilde elektroğirilenmiştir. Özellikle kalem uzatma cihazı kullanılarak, fiberler bir maske kullanılarak belirgin bir alana hassas bir şekilde bırakılabilmıştır. Elektroğirme süresi, toplama alanını kolayca gözlemlenebilir hale getirmek için seçilmiştir. Ancak birkaç dakikalık elektroğirme işlemi birkaç kat fiber biriktirmek için yeterlidir. Ye ve ark. geliştirdikleri bu cihazda poli p-dioksanon (PDO), poli 3-hidroksibutirat (PHB), polivinil alkol (PVA), polietilen oksit (PEO) ve polivinil bütiral (PVB) gibi diğer bazı polimerler sorunsuz bir şekilde elektroğirmiştir (Chui vd., 2018; Mouthuy vd., 2015).



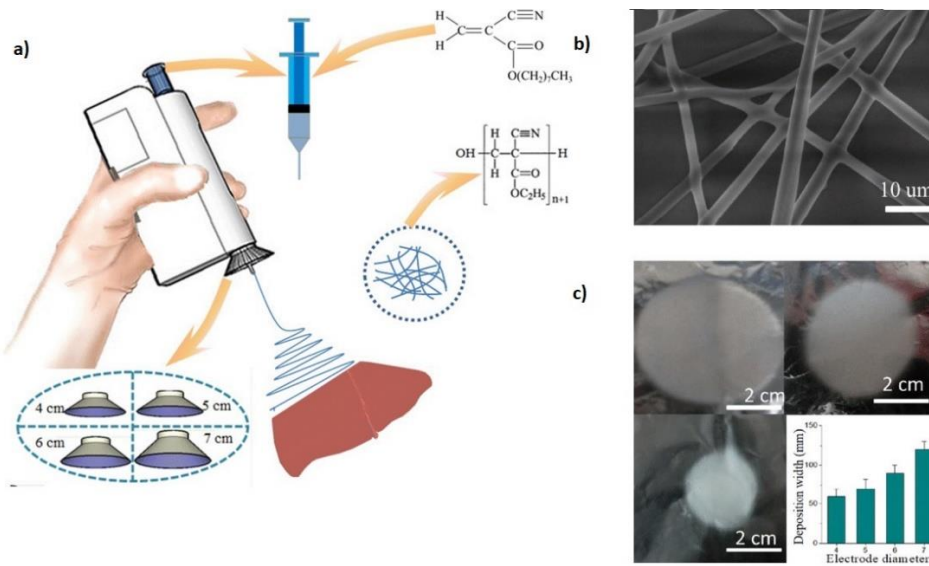
**Şekil 10:** Taşınabilir Elektroğirme Cihazı. (a) İki DC-DC Yüksek Voltaj Dönüştürücü Ana PCB: Pozitif (Sol) ve Negatif (Sağ). (b) Kademeli Motorla Çalıştırılan Şırınga Pompası. (c) Ön Panel Kullanıcı Arabirimi. (d) Sapın Ayrılmış ve (e) Sapın Takılı Olduğu, Tamamen İnşa Edilmiş Elektroğirme Cihazı (Revia vd., 2019).

Şekil 10'deki gösterildiği gibi Zhang ve ark. kozmetik olarak saç kalınlaştırma tedavileri için doğrudan cilde fiber üretimi için taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. 3D baskı ile muhafaza içine yerleştirilen bu elektroğirme cihazı 1,5 kg ağırlığında ve 250 mm × 265 mm × 225 mm boyutlarındadır. Cihaz, dört adet 9 V pil ile çalıştırılabilirdiği gibi 24 V, 2.5A AC/DC adaptörü ile de çalıştırılabilmektedir. Bu cihazın yüksek gerilim kaynağı 1 ila 10 kV arasındadır. 24 V adaptörden veya pillerden gelen güç, 12 V ve 5 V değerinde iki voltaj regülatörünü çalıştırmak için kullanılmıştır. Şekil 10(a)'da ana baskı devresi (PCB), büyük bileşenler ve bağlantılar gösterilmiştir. Şekil 10(c)'de yer alan ATmega2560 MCU, elde tutulan elektroğirme cihazının ön panelindeki döner kodlayıcı ve anahtarlarla etkileşime girerek Şekil 10(b)'deki şırınga pompasının akış hızını ve yüksek voltaj kaynaklarının büyüklüğünü ve polaritesini kontrol etme imkânı sağlamaktadır. Bu işlev, yüklenen yazılım sayesinde gerçekleştirilir ve kullanıcının elektroğirme cihazının kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Cihazda güç kaynakları doğrultusunda ve PCB'den önce aşırı akım koruması için 2 mA sigorta kullanılmıştır. Şırınga pompa, bir adım motoru tarafından çalıştırılır ve 3D baskılı bir muhafazaya yerleştirilmiştir. Şekil 10(d-e) sapı bağlı ve bağlı olmayan elde taşınabilen elektroğirme cihazının fotoğraflarını göstermektedir (Revia vd., 2019).



**Şekil 11:** (a) Pille Çalışan Portatif El Elektroğirme Aparatının Şematik Diyagramı, (b) Çin'de Ticari Olarak Bulunan Cihazın Görüntüsü. (c) Yüksek Hızlı Bir Kamera Tarafından Yakalanan Cihazdan Elektroğirme Jetleri Ve Sonuçta Elde Edilen Elektroğirme Fiber Morfolojileri: (d) PVP, (e) PVDF ve (f) PCL (Xu vd., 2015).

Long ve ark. Şekil 11' de gösterildiği gibi şırınga, pille çalışan basit ve kolay taşınabilir bir elde taşınabilir elektroğirme cihazı tasarlamışlardır. Herhangi bir pompa veya motor olmadan el kuvvetiyle itilen bu şırınga manuel olarak çalışmaktadır. Bu cihazdaki yüksek voltaj kaynağı pillere ve bir yüksek voltaj dönüştürücüye dayanmaktadır. Dönüştürücünün pozitif elektrotu şırınganın üzerindeki iğneye, negatif elektrot ise cihazı çalıştırmak için kullanılacak iletken bir metal folyoya bağlanmıştır. Yük birikimini önlemek için metal folyoya dokunarak yükün vücut (el) yoluyla aktarılacağı bildirilmiştir. Cihazın pratik uygulaması için, iki adet 3 V AAA pil, 10 kV'a kadar yüksek voltaj sağlamıştır. Long ve ark. geliştirdiği bu taşınabilir elektroğirme cihazı ihmal edilebilir bir akım ve optimum çalışma mesafesiyle (2 ila 10 cm) 15 saatten fazla süreli çalışma potansiyeline sahiptir. Cihazın hem yüksek gerilim kaynağı hem de pompa olmaksızın çalışması hafif ve küçük olmasını sağlamıştır. Ağırlığı yaklaşık 120 g, boyutu 5 cm uzunluktadır. Şekil 11(c-f)' de cihazın polimer elektroğirme performansı da incelenmiş ve polivinilpirolidon (PVP), poliviniliden florür (PVDF) ve polikaprolakton (PCL) dâhil olmak üzere çeşitli polimerler başarıyla fiber haline getirilmiştir (Xu vd., 2015).



**Şekil 12:** (a) Karaciğer Rezeksiyonu Hemostazı İçin Üretilen Elektrik Alanıyla Modifiye Edilmiş NOCA Fiberlerinin Şematik Diyagramı, (b) Metalik Koni Çapının Bir Fonksiyonu Olarak Biriktirme Alanının Boyutu, (c) NOCA Tıbbi Yapışkan Bazlı Fiberler Hemostaz İçin Bu Elektrik Alanı Destekli Elektroğirme Cihazı Kullanılarak Karaciğer Dokusunun Yüzeyine Biriktirilir (Dong vd., 2016; Luo vd., 2018).

Long ve arkadaşları, Şekil 12' de gösterildiği gibi karaciğer hemostazı için NOCA (N-oktil-2-siyanoakrilat) tıbbi yapıştırıcının elektroerme yöntemiyle doğrudan elektroerilenmesi amacıyla pille çalışan bir elektroerme cihazı tasarlamışlardır. Bu özel uygulama, ameliyattan sonra doku yapışmasını kontrol etmek için oldukça önemlidir. Şekil 12(b)' de gösterildiği gibi cihaz, metal koni ile birlikte kullanılarak fiber birikim aralığının ayarlanabileceği şekilde değiştirilmiştir. Bu değişiklik, fiberlerin fare karaciğerinin rezeksiyon sahasına yerleştirilmesiyle hızlı hemostaz sağlamış ve doku adezyonunda azalmaya neden olmuştur. Ancak, Şekil 12(c)' de görüldüğü gibi voltaj sabitlendiği için fiberlerin fiziksel özellikleri ve boyutları değiştirilememiş, tutarsız fiber birikimi sorunuyla karşılaşmıştır. Bu cihazın taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı, acil tıbbi prosedürler, hasta bakımı veya evde bakım durumları için geliştirilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak, cihazın tasarımındaki sınırlamaların giderilmesi gerekmektedir. Örneğin, voltajın değiştirilebilir hale getirilmesi ve fiber birikiminin daha tutarlı olmasını sağlamak için cihazın tasarımı optimize edilmelidir (Dong vd., 2016; Luo vd., 2018). Pille çalışan elektroerme cihazı olarak bu zamana kadar literatüre giren çalışmalar ve özellikleri Tablo 4' de ana hatları ile verilmektedir.

**Tablo 4:** Pille Çalışan Taşınabilir Elektroerme Tabancaları ve Özellikleri

Referans	Çalışma Voltajı	Çift Şırınga	Ağırlık	Patent
Smith ve Reneker	0-13.5 kV	Var	-	Yok
Haik ve ark.	0-30 kV	Yok	-	Var (Patent numarası: US10639203B2 )
Ye ve ark.	0-30 kV	Var	1110 g	Yok
Zhang ve ark.	0-10 kV	Yok	1500 g	Yok
Long ve ark.	0-10 kV	Yok	120 g	Var (Patent numarası: CN201210229010)

Tablo 5'te pille çalışan taşınabilir elektroerme cihazlarının avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

**Tablo 5:** Pille Çalışan Taşınabilir Elektroerme Cihazlarının Avantaj ve Dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha fazla hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Bu sayede, farklı yerlerde kullanılabilirlerdir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha düşük üretim kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, büyük ölçekli üretimler için uygun değildir.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha fazla hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Bu sayede, farklı yerlerde kullanılabilirlerdir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, pil ömrü ile sınırlıdır. Bu nedenle, uzun süreli kullanımlar için uygun değildir.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, küçük boyutlu ve hafiftir. Bu nedenle, kolayca taşınabilirlerdir.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, düzenli pil değiştirme maliyetleri gerektirir. Bu nedenle, işletme maliyetleri artabilmektedir.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha düşük yatırım maliyetlerine sahiptir. Bu nedenle, küçük ölçekli üretimler için uygun olabilmektedirler.</li></ul>	

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektroerme teknolojisi, günümüzde nanofiber üretimi için oldukça yaygın bir yöntemdir. Ancak, çoğu tezgah üstü elektroerme cihazı büyük ve ağırdır, bu nedenle taşınabilir elektroerme cihazlarına olan ihtiyaç artmaktadır. Bu makalede, bu zamana kadar geliştirilen taşınabilir elektroerme cihazları, çalışma prensipleri ve mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir.

Esasen biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan taşınabilir elektroerme cihazları, biyolojik olarak uyumlu polimerler kullanılarak yara bakımı ve onarımı, doku üretimi, ilaç salınımı ve antibakteriyel kaplamaların

oluşturulması vb. birçok uygulama alanı sahiptir. Elektronik cihazların üretiminde kullanılacak malzeme ve kaplamaların oluşturulması, tekstil alanında mikrofiber materyallerin üretimi veya fotovoltajik panellerin üzerine verim artırıcı kaplamalar yapılması bu alanlara örnek olarak verilebilmektedir. Taşınabilir elektroçirme cihazları, yüksek üretkenlikleri, düşük maliyetleri ve kolay kullanımları nedeniyle bu uygulama alanlarında büyük bir potansiyele sahiptir.

Taşınabilir elektroçirme cihazlarının çalışma prensibi, geleneksel elektroçirme cihazlarına benzerdir. Ancak, bu cihazlar küçük ve hafif olduğundan, kullanımı daha kolaydır. Taşınabilir elektroçirme cihazları, yüksek gerilim kaynağı, pompa ve iğne ucu gibi temel parçalardan oluşur. Elektroçirme işlemi, polimer çözeltilsinin iğne ucuyla alınması ve yüksek gerilimle yüklü bir hedef yüzey üzerine farklı şekillerde püskürtülmesiyle gerçekleştirilir.

Sonuç olarak, taşınabilir elektroçirme cihazları, nanofiberlerin üretimi için yaygın bir yöntem olan elektroçirme teknolojisinde önemli bir gelişmedir. Bu cihazlar, biyomedikal, elektronik, tekstil, enerji ve çevre gibi birçok alanda kullanılabilirler. Elektroçirme cihazı, güç elektroniğindeki ilerlemelere bağlı olarak geliştirilmektedir. Yüksek üretkenlikleri, düşük maliyetleri ve kolay kullanımları sayesinde taşınabilir elektroçirme cihazları, gelecekte daha da yaygınlaşacak ve birçok farklı uygulama alanında kullanılmaya devam edecektir.

## KAYNAKLAR

- Acar, G. Ö. (2007). Doku Mühendisliği ve Hücre Kültürü Kaynaklı Yeni Tedavi Seçenekleri. *Cerrahpaşa Tıp Dergisi*, 38(1), 32-39.
- Alharbi, A. R., Alarifi, I. M., Khan, W. S., & Asmatulu, R. (2016). Highly hydrophilic electrospun polyacrylonitrile/polyvinylpyrrolidone nanofibers incorporated with gentamicin as filter medium for dam water and wastewater treatment. *Journal of Membrane and Separation Technology*, 5(2), 38-56.
- Asmatulu, R., & Khan, W. S. (2018). *Synthesis and applications of electrospun nanofibers*. Elsevier.
- Bhushani, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. *Trends in Food Science & Technology*, 38(1), 21-33.
- Brako, F., Luo, C., Craig, D. Q., & Edirisinghe, M. (2018). An Inexpensive, Portable Device for Point-of-Need Generation of Silver-Nanoparticle Doped Cellulose Acetate Nanofibers for Advanced Wound Dressing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(5), 1700586.
- Chen, J.-P., Chang, G.-Y., & Chen, J.-K. (2008). Electrospun collagen/chitosan nanofibrous membrane as wound dressing. *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*, 313, 183-188.
- Chui, C.-Y., Mouthuy, P.-A., & Ye, H. (2018). Direct electrospinning of poly (vinyl butyral) onto human dermal fibroblasts using a portable device. *Biotechnology letters*, 40, 737-744.
- Deng, X.-L., Sui, G., Zhao, M.-L., Chen, G.-Q., & Yang, X.-P. (2007). Poly (L-lactic acid)/hydroxyapatite hybrid nanofibrous scaffolds prepared by electrospinning. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 18(1), 117-130.
- Dong, R.-H., Jia, Y.-X., Qin, C.-C., Zhan, L., Yan, X., Cui, L., Zhou, Y., Jiang, X., & Long, Y.-Z. (2016). In situ deposition of a personalized nanofibrous dressing via a handy electrospinning device for skin wound care. *Nanoscale*, 8(6), 3482-3488.
- Dong, R., Qin, C., Qiu, X., Yan, X., Yu, M., Cui, L., Zhou, Y., Zhang, H., Jiang, X., & Long, Y. (2015). In situ precision electrospinning as an effective delivery technique for cyanoacrylate medical glue with high efficiency and low toxicity. *Nanoscale*, 7(46), 19468-19475.
- Dong, W.-H., Liu, J.-X., Mou, X.-J., Liu, G.-S., Huang, X.-W., Yan, X., Ning, X., Russell, S. J., & Long, Y.-Z. (2020). Performance of polyvinyl pyrrolidone-isatis root antibacterial wound dressings produced in situ by handheld electrospinner. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188, 110766.
- Durmuş, F., Ekren, M., & Gürol, Ö. (2017). Elektro-çirme Yöntemiyle ÇCKNT Takviye Edilerek Güçlendirilmiş Naylon-6, 6 Nanoelyafların Üretimi ve Karakterizasyonu. *El-Cezeri*, 4(2), 146-155.
- Ekren, N., & Karacan, C. E. (2022). Manufacturing Of A Portable Electrospinning Gun For Biomedical Applications. *Revista Romana de Materiale*, 52(3), 213-219.

- Esentürk, İ., Erdal, M. S., & Güngör, S. (2016). Electrospinning method to produce drug-loaded nanofibers for topical/transdermal drug delivery applications. *Journal of Faculty of Pharmacy of Istanbul University*, 46(1), 49-69.
- Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2007). Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30), 5670-5703.
- Haik, J., Kornhaber, R., Blal, B., & Harats, M. (2017). The feasibility of a handheld electrospinning device for the application of nanofibrous wound dressings. *Advances in wound care*, 6(5), 166-174.
- Huang, C., Chen, S., Lai, C., Reneker, D. H., Qiu, H., Ye, Y., & Hou, H. (2006). Electrospun polymer nanofibres with small diameters. *Nanotechnology*, 17(6), 1558.
- Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites science and technology*, 63(15), 2223-2253.
- Jiang, K., Long, Y.-Z., Chen, Z.-J., Liu, S.-L., Huang, Y.-Y., Jiang, X., & Huang, Z.-Q. (2014). Airflow-directed in situ electrospinning of a medical glue of cyanoacrylate for rapid hemostasis in liver resection. *Nanoscale*, 6(14), 7792-7798.
- Karacan, C. E. (2019). *Biyomedikal Uygulamaları İçin Taşınabilir Elektroğirme Sprey Tabancasının Tasarımı, Üretimi Ve Performansı* Marmara Üniversitesi (Turkey)].
- Kim, T. G., Lee, D. S., & Park, T. G. (2007). Controlled protein release from electrospun biodegradable fiber mesh composed of poly ( $\epsilon$ -caprolactone) and poly (ethylene oxide). *International journal of pharmaceuticals*, 338(1-2), 276-283.
- Lau, W. K., Sofokleous, P., Day, R., Stride, E., & Edirisinghe, M. (2014). A portable device for in situ deposition of bioproducts. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 3(2), 94-105.
- Liu, G.-S., Yan, X., Yan, F.-F., Chen, F.-X., Hao, L.-Y., Chen, S.-J., Lou, T., Ning, X., & Long, Y.-Z. (2018). In situ electrospinning iodine-based fibrous meshes for antibacterial wound dressing. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 1-7.
- Liu, X.-F., Zhang, J., Liu, J.-J., Zhou, Q.-H., Liu, Z., Hu, P.-Y., Yuan, Z., Ramakrishna, S., Yang, D.-P., & Long, Y.-Z. (2020). Bifunctional CuS composite nanofibers via in situ electrospinning for outdoor rapid hemostasis and simultaneous ablating superbug. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126096.
- Liu, Y., Ramaseshan, R., Dong, Y., Kumar, A., & Ramakrishna, S. (2010). A portable electrospinning apparatus. *WO Patent App PCT/SG2008/000,444*.
- Long, Y.-Z., Zhang, J., Liu, Z., Wang, B.-C., Yu, M., & Ramakrishna, S. (2022). Application of Hand-Held Electrospinning Devices in Medicine. *Electrospun Nanofibers: Principles, Technology and Novel Applications*, 605-630.
- Luo, W.-L., Zhang, J., Qiu, X., Chen, L.-J., Fu, J., Hu, P.-Y., Li, X., Hu, R.-J., & Long, Y.-Z. (2018). Electric-field-modified in situ precise deposition of electrospun medical glue fibers on the liver for rapid hemostasis. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 1-8.
- Ma, Z., Kotaki, M., Yong, T., He, W., & Ramakrishna, S. (2005). Surface engineering of electrospun polyethylene terephthalate (PET) nanofibers towards development of a new material for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 26(15), 2527-2536.
- Maretschek, S., Greiner, A., & Kissel, T. (2008). Electrospun biodegradable nanofiber nonwovens for controlled release of proteins. *Journal of Controlled Release*, 127(2), 180-187.
- Mouthuy, P.-A., Groszkowski, L., & Ye, H. (2015). Performances of a portable electrospinning apparatus. *Biotechnology letters*, 37, 1107-1116.
- Nanomedic's Spincare*. (2023). Retrieved 10.05.2023 from <https://nanomedic.com/>
- Reneker, D. H., & Yarin, A. L. (2008). Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.
- Revia, R. A., Wagner, B. A., & Zhang, M. (2019). A portable electrospinner for nanofiber synthesis and its application for cosmetic treatment of alopecia. *Nanomaterials*, 9(9), 1317.



- SalehHudin, H. S., Mohamad, E. N., Mahadi, W. N. L., & Muhammad Afifi, A. (2018). Multiple-jet electrospinning methods for nanofiber processing: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(5), 479-498.
- Santangelo, S. (2019). Electrospun nanomaterials for energy applications: Recent advances. *Applied Sciences*, 9(6), 1049.
- Smith, D. J., Reneker, D. H., McManus, A. T., Schreuder-Gibson, H. L., Mello, C., & Sennett, M. S. (2004). Electrospun fibers and an apparatus therefor.
- Sofokleous, P., Stride, E., Bonfield, W., & Edirisinghe, M. (2013). Design, construction and performance of a portable handheld electrohydrodynamic multi-needle spray gun for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), 213-223.
- Suepueren, G., KANAT, Z. E., Ahmet, Ç., Kirci, T., Gueluemser, T., & TARAKÇIOĞLU, I. (2007). Nano fibres (Part 2). *Textile and Apparel*, 83-89.
- Şimşek, M. (2018). Elektroeğirme Yöntemi ile Fibröz Doku İskelelerinin Üretimi. *Natural and Applied Sciences Journal*, 1(1), 31-34.
- Teo, W.-E., Inai, R., & Ramakrishna, S. (2011). Technological advances in electrospinning of nanofibers. *Science and technology of advanced materials*.
- Williams, G. R., Raimi-Abraham, B. T., & Luo, C. (2018). *Nanofibres in drug delivery*. UCL Press.
- Xu, S.-C., Qin, C.-C., Yu, M., Dong, R.-H., Yan, X., Zhao, H., Han, W.-P., Zhang, H.-D., & Long, Y.-Z. (2015). A battery-operated portable handheld electrospinning apparatus. *Nanoscale*, 7(29), 12351-12355.
- Yan, X., Yu, M., Ramakrishna, S., Russell, S. J., & Long, Y.-Z. (2019). Advances in portable electrospinning devices for in situ delivery of personalized wound care. *Nanoscale*, 11(41), 19166-19178.
- Yan, X., Yu, M., Zhang, L.-H., Jia, X.-S., Li, J.-T., Duan, X.-P., Qin, C.-C., Dong, R.-H., & Long, Y.-Z. (2016). A portable electrospinning apparatus based on a small solar cell and a hand generator: design, performance and application. *Nanoscale*, 8(1), 209-213.
- Zhang, J., Zhao, Y.-T., Hu, P.-Y., Liu, J.-J., Liu, X.-F., Hu, M., Cui, Z., Wang, N., Niu, Z., & Xiang, H.-F. (2020). Laparoscopic electrospinning for in situ hemostasis in minimally invasive operation. *Chemical Engineering Journal*, 395, 125089.
- Zhou, T., Wang, Y., Lei, F., & Yu, J. (2020). In-situ electrospinning for intestinal hemostasis. *International Journal of Nanomedicine*, 3869-3875.