



3B KARBON ELEKTRONİK CİHAZ MÜHENDİSLİĞİ: DİJİTAL ENDÜSTRİDE RÖNESANS

Serap ÇELEN^{a*}

^aEge Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 35100, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

*Sorumlu Yazar: serap.celen@ege.edu.tr

ÖZET

Endüstri 4.0 kavramının imalata getirdiği yenileşme hareketi gibi, üç boyutlu karbon elektronik cihaz mühendisliğide mühendislik bilimlerinde bir rönesans gibi görülebilir. Üç boyutlu baskı ilk zamanlarda sadece imalat öncesi tasarıma yardımcı olarak prototip hazırlama aşamasında kullanılmaktaydı. Günümüzde özellikleri geliştirilen üç boyutlu baskı ile eklemeli imalat sistemleri sayesinde kavramsal dijital modeller kısa sürelerde kullanıma hazır cihazlara dönüştürülebilmektedir. Halen net şekillere yüksek tamlıkta ulaşmada iyileştirilmesi gereken yönleri olsada, düşük üretim hacimleri için önemli bir imalat seçeneği olmuştur. Bu makalede mevcut elektronik cihaz mühendisliğinde imalatın genel bir değerlendirmesi yapılmış dijital çağda üç boyutlu baskı yönteminin geleceğin imalat sistemleri içerisindeki konumu bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: karbon elektronik cihaz mühendisliği, 3B baskı ile imalat, dijital endüstri

3D CARBON ELECTRONIC DEVICE ENGINEERING:RENAISSANCE OF THE DIGITAL INDUSTRY

ABSTRACT

3D carbon electronic device engineering can be considered as a Renaissance in Engineering Sciences similarly the regeneration movement which was brought by Industry 4.0 concept to the manufacturing. In its early times 3D manufacturing has been used only for the prototype preparation stage to support product design. Today conceptual digital models can be turned to ready-to-use devices in short times thanks to the additive manufacturing systems with the improved properties of 3D print. 3D print is an important manufacturing option, although it has some factors which need to be improved to achieve higher accuracy of net shapes. In this manuscript, manufacturing of current electronic device engineering was evaluated and the place of 3D print in the future manufacturing methods was reported in this digital age.

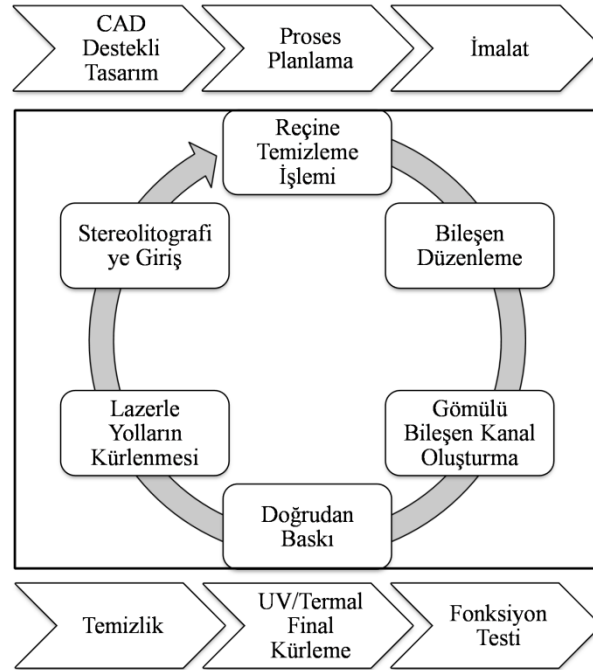
Keywords: carbon electronic device engineering, manufacturing with 3D print, digital industry

1. HASSAS CİHAZ MÜHENDİSLİĞİNE GİRİŞ

Dornfeld ve Lee'ye göre hassas cihaz mühendisliği çok küçük toleranslarla karakterize edilen küçük ve yüksek tamlıktaki ürünlerle çalışmaya gönderme yapmaktadır [1]. Günümüzde endüstride kullanılan karbon nanotüpler tek veya çok katmanlı grafen dikişsiz silindirik yapılardır. Endüstriyel fiberlere göre yüksek dayanımları ilk önce içi boş karbon nanofiber ve daha sonrada çok duvarlı nanotüp olarak imalatlarına yol göstermiştir. Böylece 1950'lerde karbon nanofiberlerle başlayan araştırmalar,

1980'lerin başlangıcında ilk endüstriyel sentezleri ile Karbon Nanotüp çalışmaları olarak devam etmiş ve 2006 yılından sonra büyük bir artış göstermiştir. Günümüzde bir çok nanotüp imalatı çeşitli nanotüp mimarileri ile kompozit malzemeler ve ince filmler üzerinde devam etmektedir. Üç boyutlu baskıya dayalı karbon cihaz imalatı bu maliyetli ve zor yönetime gelecek vaadeden bir alternatif çözüm oluşturmaktadır [2].

Entegre devrelerin ve elektronik cihazların imalatı ve geliştirilmesi sürekli olarak güncellenmekte olan bir imalat innovasyonuna sahiptir. Geleneksel entegre devreler basılı bir devre bordu üzerinde içsel bağlantılı düz iletken yolların iletimi sağladığı bir yapıya dayalıdır. Atık malzemenin fazlalığı ve süreçlerde kimyasal madde kullanımı bu yöntemin en önemli dezavantajıdır. Buna ilaveten, bir geleneksel devre bordu üzerine düzlemsel dizilimde yerleştirilen elektronik bileşenler yerleşim serbestliğini azaltmaktadır. Geometrik altyapı sağlayan substratlar üzerine farklı derinliklerde elektronik devrelerin yerleştirilebilmesi hacim ve ağırlık açısından önemli azalma sağlayabilmektedir. Üç boyutlu baskı istenen substrat yapılarının elde edilmesinde önemli bir imalat yöntemidir. Yeni bileşen ve yöntemlere olan ihtiyaç Mezoskopik Entegre Konformal Elektronik Programının İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı tarafından oluşturmasına yol göstermiştir. Zorlu çevre koşullarına dayanabilecek elektronik bileşenlerin, sensörlerin, antenlerin, konformal yüzeylerin imalatı amaçlanmıştır. “Doğrudan Baskı veya Yazma” olarak adlandırılan bu yeni imalat yöntemi ile bir çok malzeme üzerinde çalışma yapabileceği bildirilmiştir. Eklenebilir yaklaşımın üç boyutlu imalatta istenilen anda güncellenebilen dijital veriye dayalı doğası karmaşık cihaz bileşenlerinin son şekillerinin gerektiğinde tasarım değişiklikleri ile elde edilmesinde önemli bir esneklik sağlamaktadır. Şekil 1’de genel gömülü elektronik imalat proses çevrimi görülmektedir [3,4].



Şekil 1. Genel gömülü devre elektronik imalat proses döngüsü [3,4]

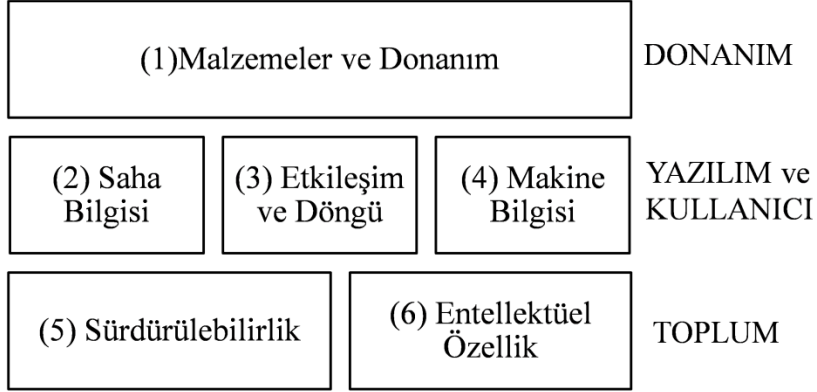
Baudish ve Mueller kişisel üretime geçebilmek için altı bileşen rapor etmişlerdir.

1) İstenilen objenin imalatı için donanım ve malzeme geliştirme gereklidir.

2) İstenilen fonksiyonel özelliklere ulaşmak için fiziksel simülasyonlar gibi saha bilgisi gerekmektedir.

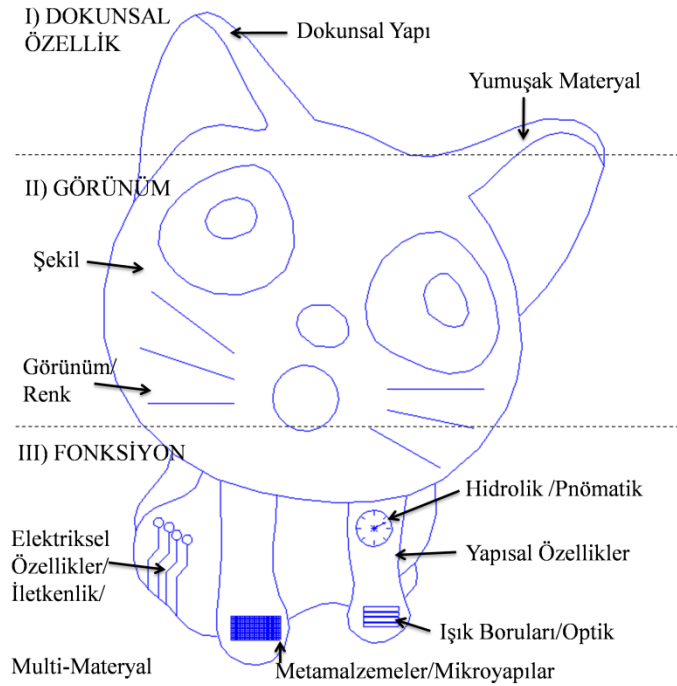
3) Alternatif olarak, objeler insan yargısına bağlı estetik unsurlar gibi subjektif düşüncelerle tasarlanabilirler. Tasarım prosesinde sistemler kullanıcılarına bir geri dönüşüm imkanı sağlamalıdır.

4) Sistemler objenin bir özel makina üzerinde imalatına olanak sağlayan spesifik makina bilgisini kapsamalidir [4-6]. (Şekil 2)



Şekil 2. Kişisel imalatın 6 bileşeni [4-6]

Yeni nesil baskı sistemleri ile imalatta objelerin istenilen dokunsal özelliğe, görünümüne (şekil, renk ve yansıtma) sahip olmasına ve istenilen fonksiyonel özellikleri yerine getirmesine odaklanan çalışmalar sürdürülmektedir [4-6]. (Şekil 3)



Şekil 3. Yeni Nesil Baskı Sistemleri ile İmalatta Nesne Özellikleri [4-6]

Etkileşimli imalatta tasarımda geri dönüşüm opsiyonunun önemi bildirilmiştir. Aslında bazı farklılıklar olsada temel konseptin doğrudan el ile işleme prensiplerinden esinlendiği Shneiderman tarafından 1983 yılında rapor edilmiştir [4-8].

Etkileşimli imalat konsepti sıralanan temel özellikleri taşımalıdır.

- Objenin sürekli olarak güncellenen gösterimi.

- Dijital imalata olanak sağlayan fiziksel etkiler.
- Hızlı, kademeli, ve tersinir operasyonlarla fiziksel etkilerin değiştirilebilme kabiliyeti.
- Bilgisayara dayalı sistemlerin kullanıcıya tasarım hedeflerine ulaşmada kolaylık sağlaması [4-8].

Baudish ve Müller etkileşimli imalatta geleceğe dair fikirlerini aşağıdaki maddeler halinde rapor etmişlerdir.

- Mobil İmalat: İlk taşınabilir bilgisayar Osborne 1'in kitlesele üretim yılı 1981 olarak bildirilmektedir [4,5,9].
- Katılımcı ve Sosyal İmalat: 1984 yılında Greif ve Cashman Bilgisayara dayalı katılımcı çalışmadan bahsedilmiştir. [4,5,10].
- Ubikuitöz Nüfuzlu İmalat: 1988 yılında Weiser 'ubikuitöz hesaplama' kavramından bahsetmiştir. Kişisel imalatta üretim cihazlarının çokluğu ve ulaşılmalarındaki kolaylık düşünülmektedir [4,5,11].
- Fiziksel Veri Paylaşımı: 1986 yılında Grune ilk veri havuzunu yazılım yönelik olarak geliştirmiştir [4,5,12].
- Fiziksel Nesne Sentezi: 2006 yılında Foto-turizm gibi "Foto-sentez yazılım sistemleri" rapor edilmiştir. [4,5,13].
- Ulaşılabilir (Açık Kaynak)/Toplu İmalat: 2009 yılında 'toplu hesaplama' konseptiyle dünyadaki insanların birlikte çalışabilme kabiliyeti bildirilmiştir [4,5,14].

Karbon malzemeye dayalı cihazların klasik imalatı çıkarımsal bir süreç olarak tanımlanan konvansiyonel işleme ile gerçekleştirilmekteydi. Buna karşın, üç boyutlu baskı yeni, katmanlı ve malzeme kullanımında tasarruflu etkileşimli eklemeli imalat orjinal tasarım anlayışında bir yenileşme hareketidir. Karbon ve grafitin elektriksel, ısıl iletkenlik, mekanik dayanım, kimyasal-yüksek sıcaklık stabilitesi, düşük ısıl genleşme gibi özellikleri metal, polimer ve silikon infiltrasyonu ile gözenekli yapıların imalatına yol göstermiştir [4,15]

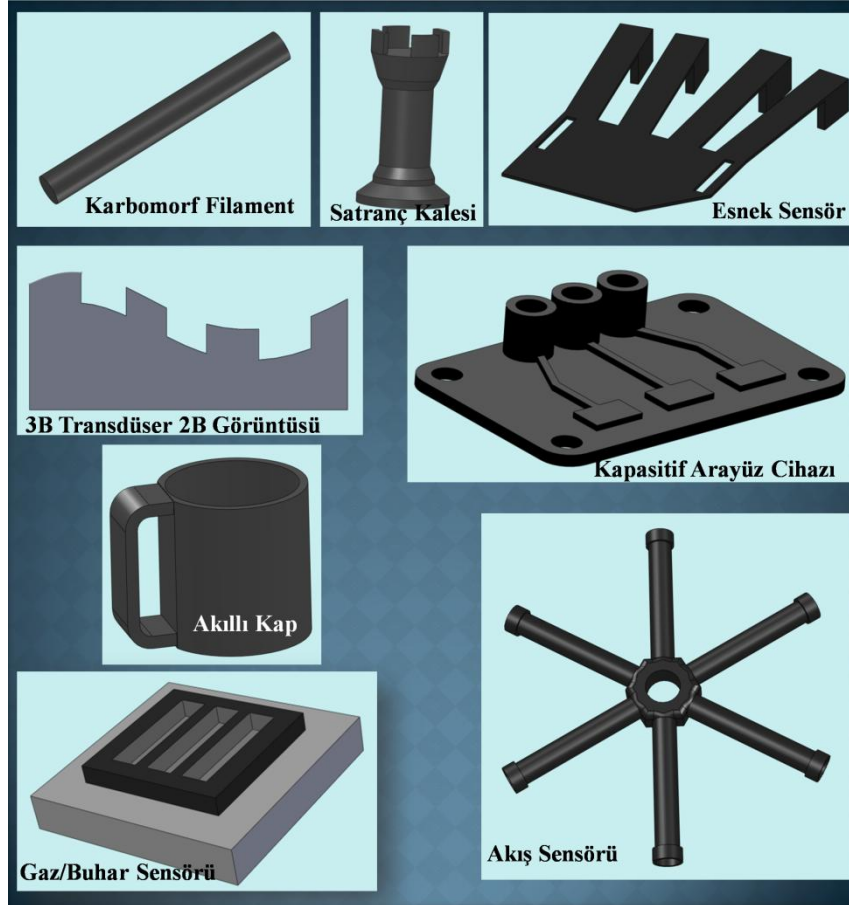
2. HASSAS CİHAZ MÜHENDİSLİĞİNDE SENSÖRLER

Hassas cihaz imalatında sensörler önemli bir yere sahiptir [1]. Leigh ve diğerleri tarafından 2012 yılında rapor edilen " Elektronik sensörlerin 3B Baskısı için basit, düşük-maliyetli iletken kompozit malzeme" başlıklı makalede İngilizce "Carbomorph" (Karbomorf) olarak adlandırdıkları yeni malzemedan bahsedilmiştir [4,16]. Araştırmalarında iletken polimer kompoziti oluşturmak için kullandıkları karbon siyahı filamentin yarı-yanma sonucu elde edilen kömür veya katran zifti ile bitkisel yağ karışımından oluştuğunu bildirmişlerdir. Karbomorf ince bölündüğünde oksidasyona açık hale gelen ve iletkenliğini yitiren bakıra karşı iyi bir alternatif malzeme olmuştur. Kompozit malzemeye basılabilir bir kompozit matris oluşturmak için piyasada bulunan polimorf malzemeyi kullanmışlardır. Ticari formülasyonu polikaprolakton olarak adlandırılan biyo-bozunur polyesterin ergime noktası 60 °C ve cam geçiş sıcaklığında -60 °C civarındadır. Böylece üç boyutlu baskı esnasında pahalı ekstrüzyon bileşenleri veya yüksek sıcaklıklara gerek kalmamıştır. Dolgu oranını seçerken kompozition vizkozite ve perkolasyon eşliğini dikkate almışlardır. Karbomorf'un elektriksel iletkenliğinin elektronların rahatlıkla karbon siyahı malzeme içerisinden sızabileceği iletken ve yalıtkan malzeme fiziksel karışımına bağlı olduğu bildirilmiştir. Standart nozul 1.5 mm'ye genişletilmiş ve baskı 260 °C ve üzerinde gerçekleştirilmiştir. Modifiye edilmemiş bir helyum piknometre kullanılarak ölçülen yoğunluklar polimer malzeme için 1.1505 g/cm³ ve karbon siyahı için 2.47 g/cm³tür [4,16-18].

Elektriksel perkolasyon testi için 3 mm çapında bir karbomorf filament kullanarak oluşturulan basit bir elektronik devrede bir LED'in yakılabildiğini bildirmişlerdir. Basımı gerçekleştirilen kompozit malzemenin çift-probu direnç ölçümleri 5 mm'lik karbomorf küp üzerinde ölçüm yapılan her iki yüzeye temas direncini azaltan gümüş iletken boya sürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kompozitin katmanlı

düzleminde direnç $0.09 \pm 0.01 \Omega/m$, ve katmanlara dik düzlemde direnç $0.12 \pm 0.01 \Omega/m$ olarak ölçülmüş, imalat yönüne bağlı olarak % 25'lik bir direnç düşüşü gözlenmiştir. Katmanların oluşturduğu yatay düzlemdeki filamentler elektrotlar arasında iletken tam bir yol oluşturmuştur. Dikey düzlemde ise iletken yollar basılı katmanların ergimesine bağlı olarak oluşmuştur. Baskısı yapılmış kompozit küp malzemenin Akım-Voltaj analizi bir potansiyostat kullanımıyla -5 ve +5 V yönlerinde gerçekleştirilmiş ve her iki yönde doğrusal akım-voltaj tepkisi gözlenmiştir. Ayrıca karbomorf malzemenin piezorezistif davranışa sahip olduğu rapor edilmiştir [4,16-20].

Karbomorf malzeme kullanımıyla satranç kalesi, elin esneme duygusu için esnek sensör, kapasitif arayüz cihazı, akıllı kap, akış ve gaz buhar sensörleri, transdüser imalatları gerçekleştirmişlerdir [4,16-20]. (Şekil 4)



Şekil 4. Leigh ve diğerleri tarafından imal edilen karbomorf cihazlar [4, 16-20]

Klomp ve diğerleri 2015 yılında yayınladıkları makalelerinde Voxel 8 baskı makinası kullanımıyla tek seferde imal edilen bir 'dört pervaneli robot helikopter (drone)'den bahsetmişlerdir. Ergimiş filament imalat kapasitesine sahip makineye bir iletken gümüş mürekkep ünitesi eklenmiştir. PLA malzemenin ve iletken devrenin iç içe kullanıldığı uygulamada, pil, motor ve elektronik bileşenler baskı esnasında konulmuştur [4,19-22]. Savunma hizmetleri ve sporcuların sağlık durumlarının izmesi için miğferde ivme sensör sistemi üretiminde üç boyutlu baskı kullanımı bildirilmiştir. Amaç aşırı ivmelenmeye bağlı travmatik kafa darbelerinin saptanmasıdır [4,19-24].

Kwok ve diğerleri ilerleyen yıllarda aynı yöntemle farklı devreler ve sensörler imal ettiklerini bildirmişlerdir [25]. En büyük dezavantajı sınırlı iletkenlik olan karbomorf'un bileşimi üzerine halen araştırmalar yapılmakta olup, geleneksel elektronik cihaz imalatındaki iletken boya, yapıştırıcı ve dış soket zorunluluğunu ortadan kaldırmış olması gelecek vaat etmektedir [4,16-20].

Elektronik cihaz imalatında kullanılan diğer çift ekstrüderli baskı makinaları Prusa I3 ve Ultimaker Original olarak rapor edilmiştir. Çift baskı malzemesi imalat sistemine nozul hizalama zorunluğunu ve malzeme geçişleri esnasındaki sızma durumunda beraberinde getirmiştir. Hareket kontrolü için Bowden tüplerinin kullanımı gibi çözümler önerilmiştir [4,19,20,24,26].

Cihaz imalatında baskı makinaları kadar iletkenlik sağlayabilecek filament malzemelerinin geliştirilmeside önem taşımaktadır. Bu alanda kullanılan malzeme, imalatçıları ve malzeme bilgileri Çizelge 1'de özetlenmiştir [4,19-33].

Çizelge 1. İletken baskı malzeme imalat şirketleri ve malzemelerinin özellikleri, *Katalog değerleri [4,19-33]

Şirket	Malzeme	Ölçülen Direnç (100 mm Filament)	Baskı Sıcaklıkları (°C)
Protoplant	Proto-Pasta 1.75 mm	987 Ω 1.8 kΩ*	230*
	Proto-Pasta 2.85 mm	600Ω*	215-230*
3DXTech	3DXTech	10 ⁴ -10 ⁵ kΩ* (Yüzeysel)	220-240*
ZenToolworks	ZenToolworks 1.75 mm	10 kΩ/cm*	200-250*
Esun	Esun 3 mm	172 kΩ	
	Esun 1.75 mm	123 kΩ	
Electric Paint	Bare İletken 10ml-50ml	167 kΩ 55Ω/kare-50 mikron*	Oda Sıcaklığı 10-15 dk.
	Mürekkep Bronzefill 1.75-2.85 mm	-	195-220*

Kwok ve diğerleri iletken polimer kompozit filamentlerin metal malzemeye dayalı imalata göre önemini maddeler halinde bildirmiştir.

- Karbon esaslı kompozitler baskıyı takiben metal-iyon ve metal-kolloidlerde gerekli olan ekstra ısı işlem ve solventin buharlaştırılma imalat aşamalarına ihtiyaç duymazlar.
- Filamente dayalı olarak düşük maliyetli yazıcı sistemlerinde kullanılabilirler.
- Metal esaslı mürekkeplere göre uzun bir süre bozulmadan depolanabilirler [4,25,34,35].

Karbomorf araştırmaları devam ederken, Hohimer ve diğerleri 2018 yılında, termoplastik poliüretan/çok duvarlı karbon nanotüp malzemelerin üç boyutlu baskısını gerçekleştirdiklerini bildirmişlerdir. Çalışmalarında algılama elemanlarının tek bir katmanlı imalat sistemi ile eldesinin imalatı kolaylaştırdığını, çoklu malzeme entegrasyonunun özellikle akıllı malzeme ve çok fonksiyonlu özelliklerle halen geliştirilmesi gereken bir alan olduğunu belirtmişlerdir. Katman yüksekliği, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı gibi üç boyutlu yazdırma parametrelerinin baskısı yapılmış nano-kompozit malzemenin elektriksel iletkenlik ve piezorezistif tepkisini araştırmışlar ve bu özelliklerin imalat parametrelerinden düşük bir şekilde etkilendiklerini belirtmişlerdir. Gömülü, çok yönlü esnek şekil değiştirme sensörlerinin düşük maliyetli olarak imal edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır [36]. Ayrıca yapısal dayanım alanında Sugiyama ve diğerleride üç boyutlu baskı yöntemi ile karbon fiber kullanarak balpeteği, eşkenar dörtgen, kare ve daire şekilli sandviç yapıların imalatını yapmışlardır. Eşkenar dörtgen şeklinin en dayanıklı yapı olduğunu üç-nokta eğme testi sonucu ile gözlemlemiş, istenilen dayanım ve rijitliğe esnek tasarım altyapısı sağlayan üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile ulaşabileceğini bildirmişlerdir [37].

3. SONUÇLAR

Elektronik cihaz mühendisliğinde üç boyutlu baskı teknolojisi malzeme ve imalatta halen bazı sınırlamalara sahip olsada gelecek vaatetmektedir. Devre bileşenlerinin ve sensörlerin bu yeni teknoloji ile imalatı devam etmektedir [1-37]. İletkenlik ve taşıyıcı sistemlerin yapısal dayanım araştırmaları büyük bir hızla devam ederken, fotonik alanında üç boyutlu baskı teknolojisi ile basımı gerçekleştirilen optik sistemler ve esnek baskı devre sistemleri halen güncel olarak çalışılan konulardır [4,5,16-18,36-39].

TEŞEKKÜR

İKON Makine A.Ş.'ye teşekkürler.

KAYNAKLAR

1. Dornfeld D., Lee D.E., "Precision Manufacturing", Springer Verlag, 2008.
2. De Volder M.F.L., Tawfick S.H., Baughman R.H., Hart A.J., "Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications", *Science*, 339 (6119), Pages 535-539, 2013. DOI: 10.1126/science.1222453
3. Lopes A.J., MacDonald E., Wicker R.B., "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication", *Rapid Prototyping Journal*, 18 (2), Pages 129-143, 2012.
4. Çelen S., Dijital Endüstri Mimarisinin Siyah Tuğlaları: 3 Boyutlu Karbon Elektronik Cihazlar, 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2018, 19-21 April 2018, Antalya, Turkey, Sayfa 514-521, 2018.
5. Baudish P., Mueller S., *Personal Fabrication, Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 10 (3-4); Pages 165-293, 2016.
6. Umetani N., Koyama Y., Schmidt R., Igarashi T., *Pteromys: Interactive design and optimization of free-formed free-flight model airplanes. ACM Transaction on Graphics Article*, 33,(4), 65, 2014.
7. Shneiderman B., *Direct manipulation: A step beyond programming languages, Computer*, 16,(8), Pages 57-69, 1983.
8. Willis K. D. D., Xu C., Wu J. K., Levin G., Gross M. D., *Interactive fabrication: New interfaces for digital fabrication. In Proceedings of the Fifth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '11)*, Pages 69-72, 2011.
9. Osborne 1, *Portable Microcomputer*, 1981. <http://www.computinghistory.org.uk/det/504/osborne-1/>
10. Schael T., *Workflow Management Systems for Process Organisations*, Springer, 208, 2013.
11. Weiser M. *The computer for the 21st century. In Mobile Computing and Communications Review -Special issue dedicated to Mark Weiser (SIGMOBILE)*, 3, (3), Pages 3-11, 1999.
12. Deek F.P., McHugh J. A. M., *Open Source: Technology and Policy*, Cambridge University Press, 2007.
13. Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R., *Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. ACM Transactions on Graphics*, 25,(3), Pages 835-846, 2006.
14. Lafreniere B., Grossman T., Anderson F., Matejka J., Kerrick H., Nagy D., Vasey L., Atherton E., Beirne N., Coelho M. H., Cote N., Li S., Nogueira A., Nguyen L., Schwinn T., Stoddart J., Thomasson D., Wang R., White T., Benjamin D., Conti M., Menges A., Fitzmaurice G., *Crowdsourced fabrication, In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16)*, Pages 15-28, 2016.
15. SGL Group, https://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/innovation/future-carbon-technologies/CARBOPRINT_additiv_manufacturing_with_carbons_e.pdf, 2019.
16. Leigh S.J., Bradley R.J., Pursell C.P., Billson D.R., Hutchins D.A., *A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors., PLoS ONE*, 7,(11), e49365, 2012. doi:10.1371/journal.pone.0049365
17. Sumita M., Sakata K., Asai S., Miyasaka K., Nakagawa H., *Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black, Polym Bull*, 25, Pages 265-271, 1991.
18. Leigh S.J., *Polymer Composites for 3D Printing of Functional Sensors and Transducers, IEEE*, 2016.
19. Klomp S., *Printing Conductive and Non-Conductive Materials Simultaneously on Low-End 3D Printers, Master's dissertation, Universiteit Gent*, 2015.
20. Klomp S., Vandeveld C., Saldien J., *Printing Conductive and Non-Conductive Material Simultaneously on Low-end 3D Printers*, 2015.

21. Molitch-Hou M., Voxel8: 1st Electronics 3D Printer - 3D Printing Industry, 2015.
<https://3dprintingindustry.com/news/voxel8-unleashes-electronics-3d-printer-ces-world-39060/>
22. Voxel8 Unveils New Electronics 3D Printer At 2015 CES-3DPrint.com, <http://3dprint.com/35085/voxel8-electronics-3d-printer/>.
23. Castillo S., Muse D., Medina F., Macdonald E., Wicker R., Electronics Integration in Conformal Substrates Fabricated with Additive Layered Manufacturing, 730–737, 2009.
24. Frauenfelder M., Make: Ultimate Guide to 3D Printing 2014, Make: Magazine, 2012.
25. Kwok S.W., Goh K.H.H., Tan Z.D., Tan S.T.M., Tjiu W. W., Soh J.Y., Glenn Ng Z. J., Chan Y. Z., Hui H.K., Goh K.E.J., Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors, Applied Materials Today, 9, Pages 167–175, 2017.
26. Erik's Bowden Extruder; http://reprap.org/wiki/Erik's_Bowden_Extruder, 2019.
27. Esun, www.esunchina.net, 2019.
28. Proto-Pasta, www.proto-pasta.com, 2019.
29. Makergeeks, www.makergeeks.com, 2019.
30. 3DXTech, www.3dxtech.com, 2019.
31. Zen Toolworks, www.zencnc.com, 2019.
32. Bare, <https://www.bareconductive.com>, 2019.
33. Bronzefill, <https://colorfabb.com/bronzefill>, 2019.
34. Ahn B.Y., Duoss E.B., Motala M.J., Guo X., Park S.-I., Xiong Y., Yoon J., Nuzzo R.G., Rogers J.A., Lewis J.A., Omni directional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes, Science, 323, Pages 1590–1593, 2009.
35. Walker S.B., Lewis J.A., Reactive silver inks for patterning high-conductivity features at mild temperatures, J. Am. Chem. Soc., 134, (3), Pages 1419–1421, 2012.
36. Hohimer C.J., Petrossian G., Ameli A., Mo C., Pötschke P., Electrical conductivity and piezoresistive response of 3D printed thermoplastic polyurethane/multiwalled carbon nanotube composites, Proceedings Volume 10596, Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII; 105960J, 2018
<https://doi.org/10.1117/12.2296774>
37. Sugiyama K., Matsuzakia R., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y., 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension, Composites Part A, 113, Pages 114–121, 2018.
38. Willis K. D. D., Brockmeyer E., Hudson S. E., Poupyrev I., Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices, In Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '12), Pages 589–598, 2012.
39. Wessely M., Tsandilas T., Mackay W. E., Stretchis: Fabricating highly stretchable user interfaces, In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16), Pages 697–704, 2016.