



## An overview of the evolution of additive manufacturing in sensor and biomaterial production

Yunus Kartal\*<sup>ID</sup>, Memik Taylan Daş<sup>ID</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kırıkkale University, 71450, Kırıkkale, Türkiye

### Highlights:

- Sensor manufacturing by additive manufacturing method
- Biomaterials usage in additive manufacturing
- Advances in wearable technology

### Keywords:

- Wearable technology,
- Biomaterials
- Additive manufacturing

### Article Info:

Research Article

Received: 17.02.2022

Accepted: 13.10.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1075312

### Acknowledgement:

This study was supported by Kırıkkale University BAP Coordination Unit. Project Number: 2022/036.

### Correspondence:

Author: Memik Taylan Daş  
e-mail: mtdas@kku.edu.tr  
phone: +90 318 357 4242 / 1060

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, current developments in the field of wearable technology (sensor, biomaterials, etc.) is manufactured by using the additive manufacturing process is reviewed. Advances in the additive manufacturing of biomaterials are based on the research of liquids called "inks", however, research in sensor manufacturing aims to control the manufacturing method of sensors more precisely and more easily. Figure A shows two examples of the use of objects produced by additive manufacturing technology in living structures [96, 97].

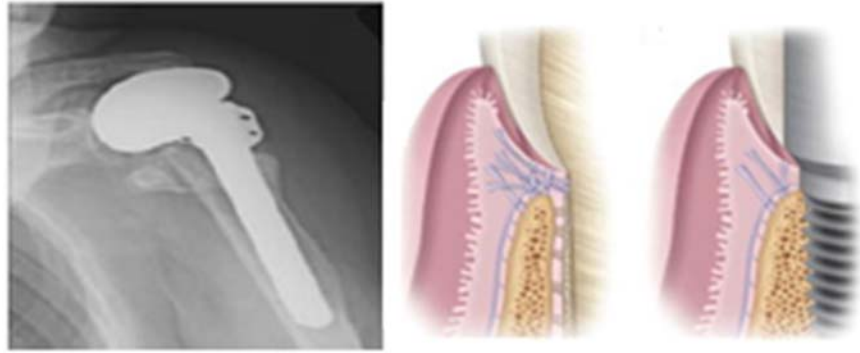


Figure A. Biomaterials and wearable technological equipment manufactured by the additive manufacturing method

### Purpose:

To observe evolution of the developments in the production of sensors and biomaterials by using additive manufacturing method.

### Theory and Methods:

Obtaining the studies carried out in the field of wearable technology and biomaterials and presenting these studies to the readers by making them a meaningful whole.

### Results:

When the developments in the field of biomaterials are examined, the materials called "ink" have been changed and the compatibility of these materials within the structure has been examined. In the manufacturing of wearable technology, different methods have been developed and a sensitive and error free manufacturing process has been developed.

### Conclusion:

In the field of wearable technology, microplotter method and aerosol jet printing method are mostly used. Although the microplotter method is slower than its competitor, it is a more precise and error-free manufacturing method.



## Algılayıcı ve biyomalzeme üretiminde eklemeli imalatın gelişimine genel bir bakış

Yunus Kartal\*<sup>ID</sup>, Memik Taylan Daş<sup>ID</sup>

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Eklemeli imalat yöntemi ile sensör imalatı
- Eklemeli imalatta biyomalzeme kullanımı
- Giyilebilir teknolojideki gelişmeler

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.02.2022

Kabul: 13.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1075312

### Anahtar Kelimeler:

Giyilebilir teknoloji,  
biyomalzeme,  
algılayıcı,  
eklemeli imalat

### ÖZ

Gelişen teknolojiyle beraber, eklemeli imalat tekniği farklı alanlarda önemi her geçen gün artan imalat alanlarından birisi konumuna gelmiştir. Eklemeli imalat, üretilecek olan nesnenin tabaka tabaka üretilmesi/serilmesi prensibine dayanan bir yöntemdir. Eklemeli imalat yöntemi karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla üretilmesi, maliyet, üretim hızı gibi avantajlı özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve biyomedikal olmak üzere farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sahip olduğu bu avantajlar nedeniyle yakın gelecekte çıkarımlı imalat yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır. Eklemeli imalat uygulama alanlarından giyilebilir teknoloji ve biyomalzemelerin üretimi ise son yıllarda artan bir ivme ile araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Eklemeli imalat tekniğinin söz konusu alanlardaki başarılı uygulamaları nedeniyle gerçekleştirilen bu derleme çalışması, başlığın güncel ilerlemesini ve gelecekteki çalışmaların gidiş şeklini izleyebilmek adına önem göstermektedir. Bu amaç doğrultusunda, giyilebilir teknoloji alanında özellikle algılayıcılar ve biyomalzemelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi üzerine mevcut gelişmelerinin aktarılması amaçlanmıştır.

## An overview of the evolution of additive manufacturing in sensor and biomaterial production

### HIGHLIGHTS

- Sensor manufacturing by additive manufacturing method
- Biomaterials usage in additive manufacturing
- Advances in wearable technology

### Article Info

Research Article

Received: 17.02.2022

Accepted: 13.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1075312

### Keywords:

Wearable technology,  
biomaterials,  
sensors,  
additive manufacturing

### ABSTRACT

With the developing technology, additive manufacturing technique has become one of the manufacturing areas whose importance is increasing day by day in different fields. Additive manufacturing is a method based on the principle of producing/laying the object to be produced layer by layer. The additive manufacturing method is widely used in different industries such as aviation, automotive and biomedical due to its advantageous features such as easy production of complex shaped parts, cost and production speed. Due to these advantages, it has started to replace subtractive manufacturing methods in the near future. The production of wearable technology and biomaterials, which are among the additive manufacturing application areas, has been the focus of attention of researchers with an increasing momentum in recent years. This compilation study, which was carried out due to the successful applications of the additive manufacturing technique in these areas, is important in order to follow the current progress of the title and the course of future studies. For this purpose, it is aimed to convey the current developments in the field of wearable technology, especially on the production of sensors and biomaterials by additive manufacturing method.

## 1. Giriş (Introduction)

Gelişen ve de değişen teknolojik yenilikler birçok farklı alanda yeniliği vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu değişimlerden bir tanesi de imalat sürecinde yaşanmıştır, ihtiyaçları karşılayacak malzeme gruplarında ve imalat süreçlerindeki farklılıkların neticesinde ortaya çıkan üretim yöntemlerinden birisi de eklemeli imalat yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemi, fiziksel parçaların geleneksel imalat yöntemleri kullanılmaksızın malzemelerin birbiri üzerine eklenmesiyle meydana gelen üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır [1, 2]. Eklemeli imalat yöntemi az alet gereksinimi, üstün mekanik özellikler [3], karmaşık formdaki yapıların kolay ve daha kısa zamanda üretilebilmesi, farklı özelliklerdeki malzemelerin aynı anda kullanımı gibi avantajları nedeniyle imalat sektöründe tercih sebebi olmaktadır. Örnek medikal sektörde eklemeli imalat, cerrahi operasyon sürelerinin kısaltılması, düşük seviyede implant reddi, daha ergonomik ve estetik sonuçların elde edilmesi nedeniyle tercih edilmektedir [4]. Söz konusu sektörler ek olarak eklemeli imalat yöntemi hafıza kartları, esnek tabanlı algılayıcı, esnek elektrik pilleri, biyomalzemeler gibi üretimlerde de kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yönteminin sahip olduğu avantajların yanı sıra dezavantajları da vardır. Bu dezavantajların dikkat çekenlerinden bir tanesi yüzey kalitesidir. Serilen ilk tabakanın üstüne bir sonraki tabakanın serilmesi prensibine dayanan eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ürünlerde tabakaların birleşim bölgelerinden dolayı yüzey kalitesi kötüdür. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ürünlerin bir diğer dezavantajı düşük mekanik özelliklerdir. Düşük mekanik özellikler tabakaların birbirine yapışmasından kaynaklanabildiği gibi ani ısınma ve soğuma sebebiyle malzeme iç yapısında oluşan gerilmelerden de kaynaklanabilmektedir [5].

Mevcut çalışma biyomalzeme ve algılayıcı konularında belirlenen çalışmaların genel yöneliminin nereye doğru gittiğini göstermek için yapılmıştır. Eklemeli imalat yöntemleri ile gerçekleştirilen akademik çalışmalar incelendiğinde esnek tabanlı algılayıcı ve biyomalzeme inceleme alanlarının ilgi çekici alanlar olduğu sonucuna varılabilir. Eklemeli imalat yöntemleriyle biyomalzeme ve algılayıcı üretimi genellikle implant, yapay organ ve algılayıcı gibi konularda uygulanmaktadır. Son zamanlarda, algılayıcı alanında gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, üretilen algılayıcıların kullanım alanlarındaki uyumluluğu (bu uyumluluk bazen canlı sağlığına uyum olarak karşımıza çıkarken bazen mekanik özelliklerin yeterliliğidir) incelenmiştir. Biyomalzeme alanında gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, genel eğilim mürekkep adı verilen ve içerisinde destek malzeme ile birlikte canlı dokuları da barındıran malzemelerin özelliklerini incelemeye yöneliktir. Bu alanlardaki malzemelerin, atomik yapı, viskozite, çalışma sıcaklığı ve kütleme yöntemi gibi genel özellikleri eklemeli imalatta kullanılabilirliklerini etkilediği bilinmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde eklemeli imalat teknolojilerine genel bir bakış daha sonraki bölümlerde sırasıyla malzeme, kütleme, serme tipleri gibi farklı özelliklerle biyomalzeme ve algılayıcı üretim araştırmaları derlenmiştir.

## 2. Literatürde Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing in Literature)

Eklemeli imalat yöntemleri malzeme ekstrüzyonu (material extrusion), fotopolimerizasyon (photopolimerization), malzeme püskürtme (material jetting), toz yatağı füzyonu (powder bed fusion), bağlayıcı püskürtme (binder jetting-bj), tabaka laminasyonu (sheet lamination) olarak 6 grupta literatürde toplanmıştır. Bu yöntemlerden malzeme ekstrüzyonu ile üretim, eklemeli imalat teknolojisi içerisinde gelişen en son yöntemlerden birisidir. Her ne kadar yaygın kullanılsa bile bu yöntem halen çalışılmaya değer konulardan birisidir [6]. Örnek bir çalışma olarak, ekstrüzyon yöntemiyle gelişmiş mekanik

özelliklerin istenmesi durumunda Sezer H. K., vd., polimer matrisi içerisine karbon fiber takviye kullanmışlardır [7]. Fotopolimerizasyon işleminde, ekstrüzyon yönteminde olduğu gibi serme yapılarak ışın enerjisi (lazer ya da ultraviyole (UV) ışını) ile katılaşabilen bir akışkan kullanılmaktadır. Malzeme püskürtme yönteminin fotopolimerizasyon yönteminden farkı çok sayıda nozuldan damlacık yüzeye yayılarak yine UV-ışını ile kürlenir [8].

Toz yatağı füzyonunu lazer ile sinterleme ve elektron ışını ile ergitme şeklinde iki gruba ayırmak mümkündür. Lazer ışını ile sinterleme yönteminde üretim tozların lazer ışını sayesinde birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Lazer ışını ile sinterleme tekniği karmaşık şekilli parçaların üretim prosesini kolaylaştırmaktadır [9]. Lazer ışını ile sinterleme yöntemi ile implant gibi canlı uyumlu malzemeler de üretilebilmektedir [10]. Elektron ışını ile ergitme yönteminde ise lazer ışını ile sinterlemeden farklı olarak, kullanılan tozlar önceden ısıtılır. Bağlayıcı püskürtme yöntemi üretimi yapılacak olan malzemenin parçacıklarının bir sıvı bağlayıcı kullanılarak birleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Tabaka laminasyon ve ultrasonik birleştirme yöntemleriyle metal ince levhalar birleştirilerek, ultrasonik kaynak ile eklemeli işlemi yapılır [11].

Eklemeli imalat inceleme çalışmalarımızda geçmiş bilimsel makaleleri incelendiğinde doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat daha yaygın kullanılmıştır. Doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat alanında incelenen malzeme ve yöntemler Tablo 1’de sınıflandırılmıştır.

### 2.1. Giyilebilir teknoloji (Wearable technology)

Giyilebilir teknolojiler özellikle son on yılda birçok alanda kullanılmaya başlandığı gibi üretim yöntemi olarak eklemeli imalatın kullanıldığı önemli bir alan haline gelmektedir. Giyilebilir teknoloji uygulamalarına, askeri malzemeler, tıp, teknoloji gibi birçok farklı alanda rastlanılmaktadır. Bu teknolojide kullanılacak malzeme insan sağlığına zarar vermemelidir. Giyilebilir teknoloji alanında gerçekleştirilen çalışmalar malzeme anlamında incelendiğinde, çalışılan malzemelerin önemli bir kısmı UV ışını kullanılarak kürlenmektedir. Tablo 2’de UV ışını ile kütleme yöntemiyle eklemeli imalat işleminin kullanıldığı çalışmalar malzeme grubuna göre sınıflandırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar daha çok deneysel uygulama olduğu görülmüştür. Tablo 2’den de anlaşılacağı gibi UV ışını ile kütleme yöntemi son zamanlarda yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Yöntemde mürekkep adı verilen sıvılar çeşitlendirilmeye çalışılmış ve bu mürekkeplerin genellikle mekanik ve iç yapı özellikleri incelenmiştir.

Son yıllarda giyilebilir teknoloji uygulama alanlarından biri de yapay organlardır. Bu teknolojide üretilecek olan organ eklemeli imalat temel prensibine göre (bilgisayar ortamında üç boyutlu tasarım ve CAD çizimlerinin gerçekleştirilmesi) üretilir. Kullanılan üç boyutlu cihaz atmosferin zararlı koşullarını engellemek amacıyla genellikle vakum ortamında çalışır. Bu yöntemle üretilen bu ürünler canlı vücudunda kullanılabilirler ve organ görevi görmektedirler. Şekil 1’de farklı imalat alanlarında giyilebilir teknoloji kullanımı gösterilmiştir. Şekil 1a [45] ve Şekil 1b [46], biyo-organ imalatında üretimine ait, Şekil 1c [47] enerji depolama aygıtına ve giyilebilir algılayıcıya ait, Şekil 1d [48] ise akıllı algılayıcı teknolojisine ait kullanım örnekleridir.

#### 2.1.1. Giyilebilir teknoloji örnek üretim yöntemi (Wearable technology sample production method)

Esnek algılayıcıların incelendiği çalışmalar ya esnek algılayıcı malzemesini [49, 50] ya da üretim yöntemini incelemişlerdir [51].

**Tablo 1.** Doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalatın sınıflandırılması  
(Classification of direct metal laser sintering and extrusion additive manufacturing)

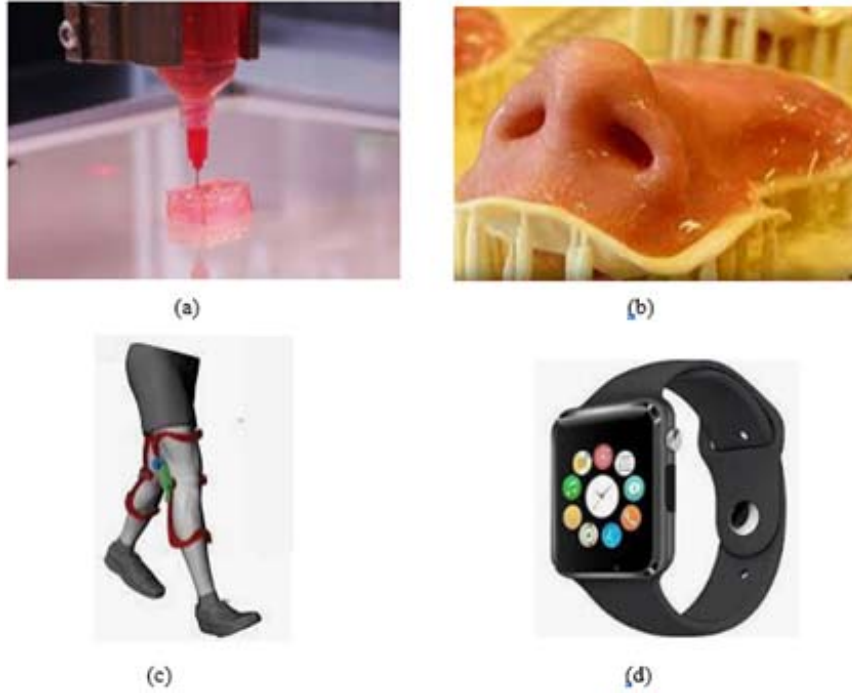
Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik & Nümerik analiz	Deneyisel
Alüminyum alaşımı	Metal lazer Sinterleme	Demiröz Ö. B., Dilibal S. [12]	X	X
AlSi10Mg alaşımı	Metal lazer Sinterleme	Aktürk M. ve Korkmaz M. E [13]	X	X
Inconel 718	Metal lazer Sinterleme	Karabulut Y. ve Kaynak Y [5]		X
PLA	Metal lazer Sinterleme	Wang, H. vd. [14]	X	X
ABS, PLA plus ve Verowhite plus	Ekstrüzyon ve malzeme püskürtme	Top N. ve Şahin İ.[15]	X	X
PLA	Ekstrüzyon yöntemi	Özdoğan S. ve Meram A [8]		X
ABS	Ekstrüzyon yöntemi	Claudia, E. vd. [16]		X
PLA	Ekstrüzyon yöntemi	Tsushima, N. vd. [17]	X	X
308 L paslanmaz çelik	Şekilli metal yığıma makinesi ile Hibrit Eklemeli İmalat	Atalay Y. ve Eyercioğlu Ö. [18]		X
Derleme	Derleme	Mohanavel, V. vd. [19]	Derleme	Derleme
Derleme	Derleme	Bhatia, A vd. [20]	Derleme	Derleme
Derleme	Derleme	Hashmi, A. W. vd. [21]	Derleme	Derleme

**Tablo 2.** UV kürleme ile yapılan çalışmalar (Studies with the UV ray curing method)

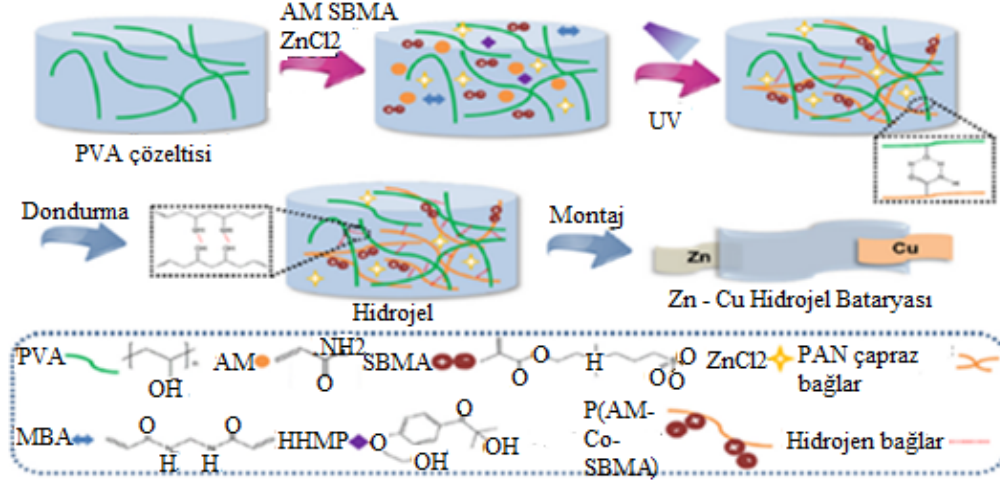
Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneyisel
Kompozit	UV kürleme	Gebel M. E. ve Ermurat M. [6]		X
İnsan koroner arter endotel hücreleri (HCAEC'ler) ile yüklü nano-güçlendirilmiş hibrit bir kalp yamasını	UV kürleme	Izadifar, M., vd. [22]		X
Kompozit	UV kürleme	Invernizzi, M., vd. [23]		X
Kompozit	UV kürleme	Mantelli, A., vd. [24]		X
Kompozit	UV kürleme	Postiglione G. vd. [25]		X
Bitkisel yağ	UV kürleme	Barkane, A., vd. [26]		X
Akrilik reçine	UV kürleme	Kim, Y. C., vd. [27]		X
Fotopolimer	UV kürleme	Hong, S. Y., vd. [28]		X
Bütül akrilat ve çapraz bağlayıcı olarak diüretan dimetakrilat	UV kürleme	Lee, S., vd. [29]		X
Polihehdraloligomerik silseskioksan (m-POSS) nanoparçacıkları	UV kürleme	Li, Y., vd. [30]		X
Gözenekli demir-mangan yapı	UV kürleme	Putra N. E., vd. [31]		X
Aljinat/jelatin kompozit hidrojeller	UV kürleme	Lin Z. vd. [32]		X
Fotreaktif jelatin nanopartikül	UV kürleme	Diba M. vd. [33]		X
Sodyum aljinat	UV kürleme	Kim M. H. vd. [34]		X
Mikrojel bazlı kompozit mürekkep	UV kürleme	Song K., ve ark [35]		X
Hidroksi etil selüloz bazlı biyo mürekkep	UV kürleme	Gospodinova A., vd. [36]		X
İpek fibroin nanofiberler	UV kürleme	Sakai S., vd. [37]		X
Silikon	UV kürleme	Ginestra P. S., vd. [38]		X
Carrageenan ile aljinat hidrojelleri	UV kürleme	Kim M. H. vd. [39]		X
Kalsiyum karbonat ve kalsiyum Hidrojen fosfat	DLP-UV kürleme	Liu Su vd. [40]	X	X
Nano-hidroksiapatit tozu ve nano-Zirkonya	DLP-UV kürleme	Zhang J., vd. [41]		X
Hidrojel/kalsiyum fosfat kompozit	DLP-UV kürleme	Preobrazhenskiy I. I., vd. [42]		X
Di-functional methacryloxypropyl Terminated polydimethylsiloxane (PDMS-DMA), mono-functional 2-ethyl hexyl acrylate (EHA) and bis(2,4,6-Trimethylbenzoyl)-phenylphosphine oxide (Irgacure 819)	DLP-UV kürleme	Foerster A. vd. [43]		X
Al2O3 mürekkebi	DLP-UV kürleme	Xing H. vd. [44]		X

Zhou Z., ve Shen X., algılayıcı malzemesini kendileri üretmiş ve özelliklerini incelemiştir. Üretilen malzemeden beklenen özellikler önceden belirtilmiş ve çalışma sonucunda bu hedeflere tutarlılık

irdelemiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'te sırasıyla Shen X., vd. [49], Zhou Z., vd. [50], üretimini gerçekleştirmiş olduğu algılayıcının üretim basamakları örnek olarak verilmiştir.



**Şekil 1.** Giyilebilir teknoloji kullanım alanları. a) biyo-organ ve doku basım aşaması b) üretilen bir biyo-organ görüntüsü c) enerji depolama aracı olarak kullanımı d) teknoloji alanında kullanımı, [45-48] (Wearable technology applications. a) bioorgan and tissue printing stage b) a produced bioorgan image c) its use as a means of energy storage d) its use in the field of technology)



**Şekil 2.** Zhou Z., vd. üretim şeması (Zhou Z., et al. production scheme) [49].

Shen X., vd. çözümlü örme polyester-spandeks kumaş üzerine indirgenmiş grafen oksit (RGO) ve polianilin (PANI) kaplanarak farklı 3D iletken ağlara sahip hassas ve esnek bir algılayıcı üretmişlerdir. Önce kumaş yüzeyine grafen oksit (GO) tabakaları kaplanmış, daha sonra GO, RGO'ya indirgenmiş ve RGO kumaş yüzeyinde kendinden montajlı yöntemle ve sodyum dodesil benzen sülfonat kullanılarak sıralı şekillerde PANI dizisi hazırlanmıştır.

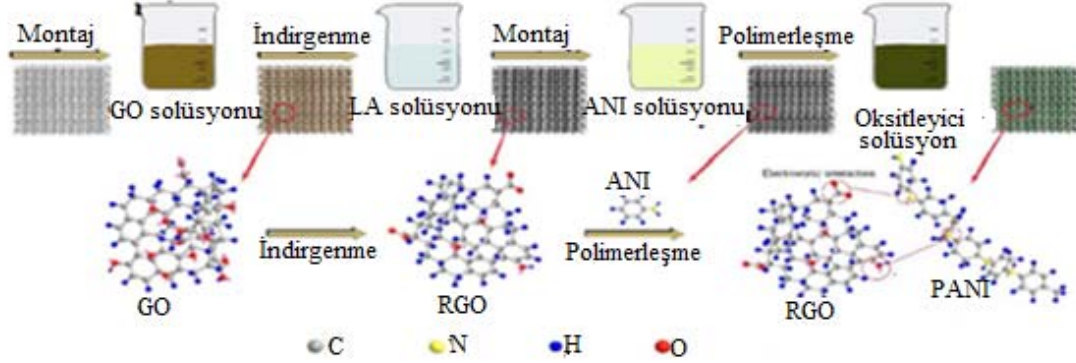
Üretilen algılayıcıların inceleme alanları, üretim malzemesinin yanı sıra alanı; üretim yöntemidir. Çalışmalarında üretim yönteminin etkisini inceleyen, Zhang Y. ve Cui Y., Annabestani M. vd., [51-52]., bu anlamda örnek olarak verilebilir. Guo X., vd., balığın bir duyu organı olan yanıl çizgi ölçeğinin yapısından esinlenerek, Zhang Y. ve

Cui Y. [51], hat sanatı yönteminin algılayıcıya işlenmesini incelemişlerdir. Şekil 4'te Zhang Y., ve Cui Y., [51], çalışmalarında kullanılan algılayıcı verilmiştir. Bu algılayıcı hat sanatı yöntemiyle üretilmiştir ve saydamdır. PEDOT:PSS elektrotu, kaligrafi metnine bir bez kullanılarak basılmış, ardından 160°C'de 10 dakika kurutulmuştur. Şekil 5'te ise Annabestani M. vd. üretimini gerçekleştirmiş olduğu algılayıcının üretim basamakları verilmiştir.

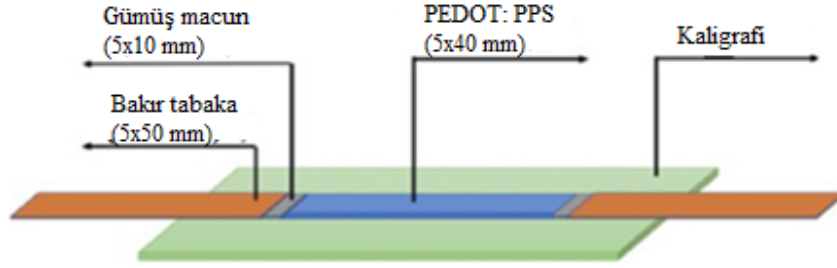
Buna göre üretim işlemi şu basamaklardan oluşmaktadır:

1. Öncelikle kalıp ve iskele 3D baskı ile hazırlanır. Baskı malzemesi olarak yaygın bir termoplastik polimer olan Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) kullanılır.

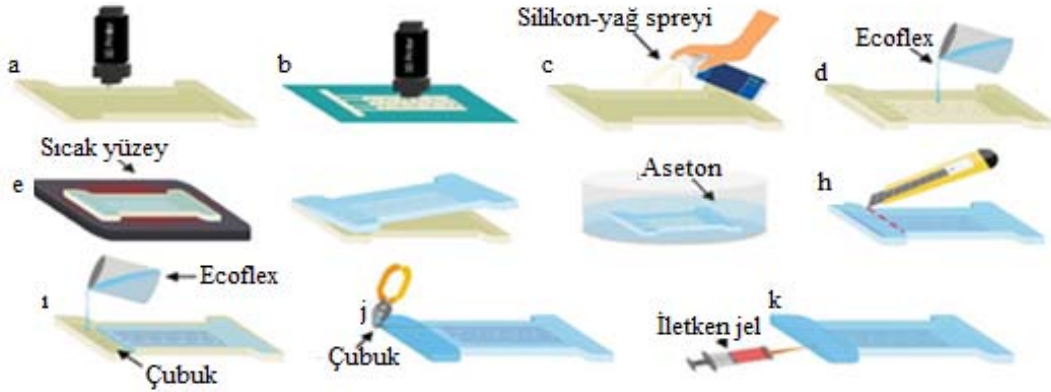




Şekil 3. Çözümlü örme tekniğiyle üretilmiş esnek algılayıcı (flexible sensor produced by knitting technique) [50].



Şekil 4. Algılayıcı konfigürasyonunun ve boyutunun bir diyagramı (A diagram of the sensor configuration and size) [51].



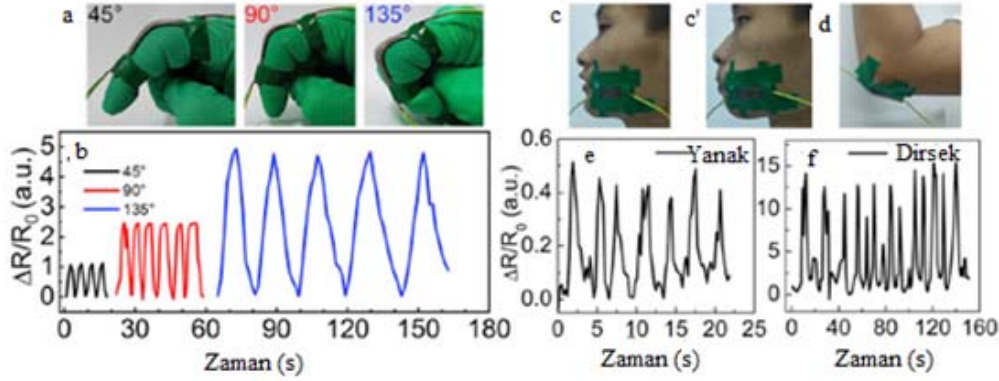
Şekil 5. Üretim süreci (a) ABS ile kalıbın 3 boyutlu yazdırılması. (b) İskeleyi ABS ile 3D olarak basmak. (c) Kalıbın üzerine silikon yağının püskürtülmesi (d) Ecoflex 00-30'un kalıba dökülmesi. (e) Ecoflex 00-30 kürlenme: 20 dakika boyunca 120°'ye ısıtılır. (f) talaşın kalıptan soyulması. (g) çipin asetona daldırılması. (h) kısıkaç bölgesinin kırılması. (i) Keleçe bölgesini Dragon Skin™ 30 (oda sıcaklığında vulkanize edici) silikon kauçuk ile doldurma. (j) çubukların çipten çıkarılması. (k) kanalı iletken jel ile doldurmak (su ve propilen glikol kombinasyonu) [52].

(Production process (a) 3D printing of the mold with ABS. (b) 3D printing the scaffold with ABS. (c) Spraying silicone oil on the mold (d) Pouring Ecoflex 00-30 into the mold. (e) Ecoflex 00-30 curing: heated to 120° for 20 minutes. (f) stripping sawdust from the mold. (g) dipping the chip in acetone. (h) clipping of the gripper region. (i) Filling the clamp area with Dragon Skin™ 30 (curing at room temperature) silicone rubber. (j) removing the rods from the chip. (k) filling the channel with conductive gel (combination of water and propylene glycol))

2. Ayrıca yumuşak malzemenin kalıba aşırı yapışmasını önlemek için yağlayıcı olarak silikon-yağ spreyi kullanılır, böylece kalıptan kolayca soyulabilir.
3. Daha sonra basılan iskele deseni kalıba yerleştirilir. Yumuşak malzeme olarak bir silikon kauçuk türü olan sıvı elastomer olan Ecoflex 00-30 kullanılmaktadır.
4. Ecoflex hazırlanıp desikatöre alınarak kalan baloncukların çıkması için kalıba dökülür.
5. Daha sonra bir sıcak plaka üzerine yerleştirilir ve Ecoflex kürlenene kadar 120°'ye ısıtılır. Sertleşme süresi, algılayıcının kalınlığına bağlı olarak yaklaşık 20 dakikadır.
6. Talaşı kalıptan çıkardıktan sonra asetona batırılacaktır. Bunu yaparak, aseton buharı ABS'yi çözer ve Ecoflex'te 3D mikro kanallar oluşturulur.
7. Bu adımda algılayıcı hazırdir ve iletken jel ile doldurulabilir ancak Ecoflex'in yüksek uzama özelliğinden dolayı kontak telleri kanala sabitlenemeyebilir, bu nedenle kelepçe bölgesi için başka bir malzeme kullanılmıştır.

8. Böylece ABS talaştan çıkarıldıktan sonra kenet bölgesi kesilerek talaş tekrar kalıba konulur ve kıskaç bölgesi tekrar Dragon Skin™ 30 silikon kauçuk ile doldurulur.
9. Dragon Skin™ 30, Ecoflex'e kıyasla daha düşük uzama özelliğine sahiptir ve sonuç olarak bu, kabloların yumuşak algılayıcıya iyi sabitlenmesini sağlar.
10. Jel içinde istenmeyen kabarcıkları önlemek için çip soyulduktan sonra kanallar, mL/dak akış hızı aralığında tasarlanmış bir şırınga pompası kullanılarak doldurulur.
11. Son olarak her bir hazneye ince tellerden yapılmış elektrik bağlantıları yerleştirilecektir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda öncelikle algılayıcı üretimi gerçekleştirilmiş daha sonra algılayıcı özellikleri yardımcı ara yazılımlar vasıtasıyla incelenmiştir. Algılayıcı özellikleri incelenirken, Zhang R. vd. [53]. Xiong, Y., vd. [54] çalışmalarında olduğu gibi algılayıcılar vücut üzerine yerleştirilmiş ve algılama özellikleri incelenmiştir. Şekil 6'da Zhang R. vd. Xiong, Y., vd. çalışmalarında algılayıcıların kullanım yerleri gösterilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 6.** İncelemelerde vücut üzerinde kullanılan ve dirençleri (hassasiyet amacıyla) ölçülen algılayıcıların kullanım yerleri. A) Zhang R. vd. [53] (b) Xiong, Y., vd. çalışmalarını göstermektedir [54]. (The places of use of sensors used on the body and whose resistance (for precision) are measured. A) Zhang R. et al. (b) Xiong, Y., et al. shows their work)

## 2.2. Biyomalzeme ve algılayıcıların üretim teknolojilerinin incelenmesi

(Researching biomaterial and sensor production technologies)

Biyosensörler ve algılayıcı malzemeler kişiselleştirilmiş ve hedefe yönelik tıbbi malzeme ihtiyacında kilit rol oynamaktadırlar. Bu malzemeler, modern moleküler biyolojinin sağladığı bilgileri uygulama imkânı sunmaktadırlar. Bu alanda, son zamanlarda umut vadeden teknolojik gelişmeler yaşanmıştır. Malzemelerin eklemeli imalat ile üretiminde mürekkep püskürtmeli yöntemler ve mikro serme baskı teknolojileri geleneksel tekniklere göre uygun maliyetli, hızlıdır. Ayrıca mürekkep püskürtmeli sistemleri ve mikro serme sistemleri gibi piezoelektrik yaklaşımlar temassız birleştirme imkânı sağlamaktadırlar. Söz konusu avantajlarından dolayı biyomalzeme ve algılayıcı alanında genel yönelim söz konusu teknolojilere doğrudur [55]. Biyomalzeme ve algılayıcı imalatında kullanılacak yöntemi seçerken gerekli depozitin ölçeği, çözünürlüğü ve modeline göre karar vermek gerekir [56]. Biyomalzemelerin söz konusu yöntemlerle üretilmesinde, genellikle polidimetilsiloksan (PDMS), poliviniliden florür (PVDF) gibi esnek malzemeler kullanılmaktadır.

Biyomalzeme üretiminde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde aerosol jet yazdırma (aerosol jet printing) yönteminin son zamanlarda ilgi çekici bir konu olduğu Tablo 3'deki çalışmalardan anlaşılabilir. Aerosol jet printing (karışım halinde yazdırma) işleminin temelinde karışım halindeki sıvının (ki bu sıvı içerisinde iletken metallerin nano boyutlarda partikülleri vardır) bir tabaka üzerine basınç ya da titreşim ile damlatılması yöntemidir [57]. Aerosol jet printing yönteminin ilgi çekmesinin en önemli nedenlerinden birisi de nispeten yüksek hızda üretimin mümkün olmasıdır. Son zamanlarda aerosol jet printing

yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde kullanılan mürekkep sıvısının özelliklerini belirlemek en temel amaç olduğu ve çalışmaların deneysel gerçekleştirildiği sonucuna varılabilir. Bu yöntem çeşitli şekillerde uygulanabilir. Şekil 7'de aynı firmanın (Optomec) 2 farklı üretim şeması gösterilmektedir. Şekil 7'den de anlaşılacağı gibi bir banyoda ultrasonik olarak karıştırılan sıvı nozul ucuna getirilir. Nozula getirme prosesinde bu firmada koruyucu gaz kullanıldığı belirtilmiştir. Nozul ucuna gelen aerosol, tabaka üzerine bırakılır ve kütleme işlemi sıcaklık ya da UV ışını ile gerçekleştirildikten sonra işlem diğer katmanları için devam eder [79]. Aerosol jet printing işleminde önemli veriler; viskozite (viscosity), buhar basıncı (vapor pressure), konsantrasyon (concentration), yazdırma sıcaklığı (printing temperature), yazdırma hızı (printing speed), paso sayısı (printing passes) olarak verilebilir [80].

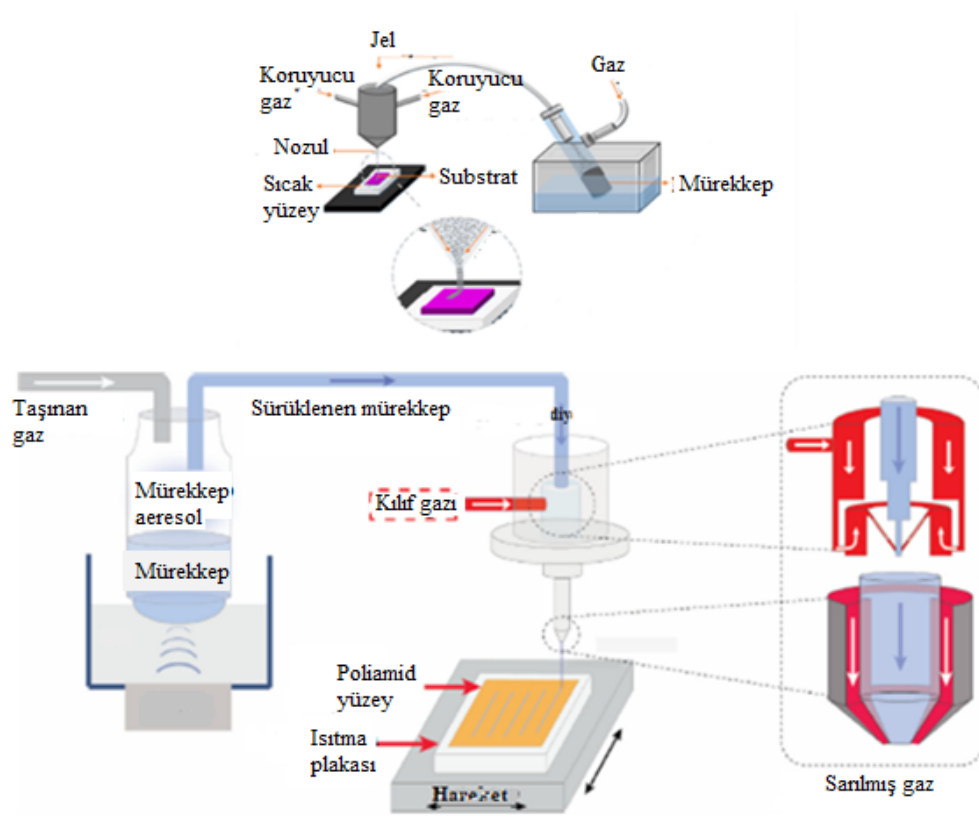
Algılayıcı ekipman üretiminde son zamanlarda ilgi çekici bir diğer yöntem ise mikro serme (microplotter) işlemidir [82]. Mikro serme işlemi nano partikül ve sıvı karışımının uygun oranlarda elde edilmesinden sonra sıvının içerisinde bulunduğu bir pipet vasıtasıyla aktarılması işlemidir.

Biyomalzemelerin ve algılayıcıların eklemeli imalat ile üretimini inceleyen bilimsel çalışmalar incelendiğinde; ilgi çekici mürekkep serme yöntemlerinden bir diğeri mikro serme (microplotter) yöntemidir. Mikro serme yönteminin ilgi çekici olmasının nedenlerinden en başta geleni yüksek hassasiyetli (5µm hassasiyetinde) imalat işlemlerine imkân vermesi olarak belirtilebilir. Tablo 4'te mikro serme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar ve bu çalışmaların özellikleri verilmiştir. Çalışmalarda mürekkep sıvının özellikleri incelenmiştir.

**Tablo 3.** Aerosol jet printing yöntemi ile yapılan çalışmalar (Studies with the aerosol jet printing method)

Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Karbon nanotüp	Aerosol jet printing	Jones C. S., vd. [58]		X
Gümüş nano partikül ve nano karbon takviyesi	Aerosol jet printing	Zhao D., vd. [59]		X
Zirkonyum ve NiO takviyeli mürekkep	Aerosol jet printing	Sukeshini M. A., vd. [60]		X
Organik gümüş mürekkep	Aerosol jet printing	Eckstein R., vd. [61]		X
Organik gümüş mürekkep	Aerosol jet printing	Seifert T., vd. [62]		X
Grafen bazlı mürekkep	Aerosol jet printing	Jabari E., vd. [57]		X
Grafen/gümüş bazlı mürekkep	Aerosol jet printing	Tait J. G., vd. [63]		X
Grafen gümüşü	Aerosol jet printing	Jabari E., vd. [64]		X
Poliimid/karbon nanotüp bazlı mürekkep	Aerosol jet printing	Wang K., vd. [65]		X
Karbon nanotüp	Aerosol jet printing	Goh G. L., vd. [66]		X
Organik gümüş mürekkep	Aerosol jet printing	Laurent Ph., vd. [67]		X
Altın bazlı mürekkep	Aerosol jet printing	Khan S., vd. [68]		X
Gümüş bazlı nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	He C., vd. [69]		X
Gümüş bazlı nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Zhang H., vd. [70]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Chen Y. D., vd. [71]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Catic N., vd. [72]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Deneault J. R., vd. [73]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Phuah E. W. C., vd. [74]		X
Grafen amonyak sensörü	Aerosol jet printing	Zhu Y., vd. [75]		X
Nikel nanoparçacıklı mürekkep filmler	Aerosol jet printing	Rahman M. T., vd. [76]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aerosol jet printing	Jing Q., vd. [77]		X
Polimetilmetakrilat bazlı mürekkep	Aerosol jet printing	Secor E. B., vd. [78]		X





Şekil 7. Optomec firmasının aerosol jet printing yöntemleri (Aerosol jet printing methods from Optomec) [81].

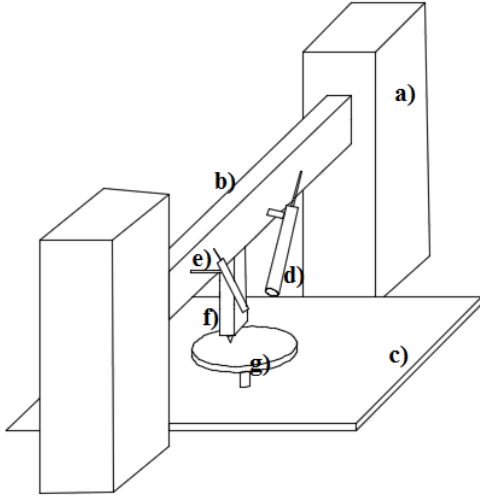
Tablo 4. Micro serme yöntemi ile yapılan çalışmalar (Studies with microplotter method)

Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneyisel
Sertleştirici (araldite M 960) and epoxy reçine (Araldite 506)	Microplotter	Zang Z., vd. [81]		X
-	Microplotter	Allanurov A. M., vd. [82]		X
Kurşun Zirkonat titanat	Microplotter	Larson B. J., vd. [83]		X
Kurşun Zirkonat titanat	Microplotter	Bau M., vd. [84]		X
Latmanyum alüminat	Microplotter	Driessche I. V., vd. [56]		X
Karbon nanotüp	Microplotter	Aminayi P., [85]	X	X
Silika ve silikon	Microplotter	Shancheng Y. vd. [86]	X	X
rGO–Pt dispersiyonu ve polimer çözeltisi	Microplotter	Sobolewski P., vd. [87]		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Rohit A., vd. [88]		X
Bakır nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Molazemhosseini A., vd. [89]		X
Silikon dioksit ve manyetik nanopatikül mürekkebi	Microplotter	Wang Y., vd. [90]	X	X
Kalsiyum titanyum oksit	Microplotter	Holeman T., vd. [91]		X
Karbon nanotüp ve grafen	Microplotter	Kwon K. S., vd. [92]	Derleme	Derleme
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Zymelka D., [93]		X
Karbon nanotüp mürekkebi	Microplotter	Li Q. vd. [94]		X

Mikro serme işlemi gerçekleşme temel prensibi şu şekildedir; içinde mürekkep sıvı bulunan pipete ultrasonik titreşimler vasıtasıyla sıvı damlacık halinde dökülür ve damlacıklar UV ışını vasıtasıyla kürlenir ve baskı için kullanılan mikro pipeti doldurmak için kılcallık özelliği kullanılır [82]. Mikro serme işleminde önemli veriler; viskozite (viscosity), buhar basıncı (vapor pressure), konsantrasyon (concentration), yazdırma sıcaklığı (temperature), yazdırma hızı (printing speed), paso sayısı (printing passes) ve serme genişliği (printing width) olarak gruplandırılabilir. Şekil 8'de mikro serme işlemi için kullanılan yapının örnek bir gösterimine yer verilmiştir.

Mikro serme işlemi ile bir yüzey üzerine sıvı yerleştirme adımları şunlardır:

- Üretimi gerçekleştirilmesi için bir bilgisayar yazılımı kullanarak hassas konumlandırmanın yapılması
- Piezoelektrik elemanın çalıştırılması (piezoelektrik elemanın uygun bir AC akımı uygulandığında, eksenini boyunca uygun frekansta (400-700 kHz) titreşime neden olur ve ultrasonik alan oluşturur) [81]
- İçi boş konik cam dağıtıcıya sıvıyı yüklemek ve dağıtıcıyı ilk konumuna getirmek (dağıtıcı, yüzeyden çok yükseğe (>2 µm) yerleştirilirse, sıvı teması oluşmayabilir ve mikro damlacıklar birikmeyebilir. Bu adım aslında konumlandırma yazılım sistemi tarafından kontrol edilebilir.)
- Dağıtıcı içerisindeki ilk karışımın serilmesi
- Mevcut karışım bitene kadar serme işleminin tekrarlanması ve sıvı kalmayana kadar boşaltmak
- Dağıtıcının ucunun yıkanması
- Gerekli ise bir sonraki serme işlemi için dağıtıcıya karışımın yüklenmesi [83]



**Şekil 8.** Mikro serici şematik diyagramı. Gösterilen konfigürasyonda (a) X, (b) Y ve (c) Z konumlandırma aşamalarına sahip hassas bir konumlandırma sisteminden ve (d) kamera e) UV ışın kaynağı f) mikropipete bağlı piezoelektrikten oluşan dağıtıcı g) döndürerek kaplama (Micro-layout schematic diagram. In the configuration shown, diffuser consisting of a precision positioning system with (a) X, (b) Y and (c) Z positioning stages and (d) camera e) UV light source f) distributor consisting of piezoelectric connected to a micropipette g) spin coating)

### 3. Sonuçlar (Conclusions)

Gerçekleşen teknolojik gelişmeler neticesinde ortaya çıkan bu durumun geleneksel malzemeler kullanarak çözülmesinin oldukça zor

olduğu söylenebilir. Özellikle medikal ve tıbbi uygulama alanlarının gereksinim duyduğu ihtiyaçların etkin ve canlı yapısına uygun bir şekilde karşılanması amacıyla katmanlı imalat yöntemiyle üretilen biyomalzemeler ve algılayıcılar hayatımızda yer almaya başlamışlardır. Bu avantajlarından dolayı biyomalzemeler ve algılayıcılar medikal ve tıbbi uygulama alanlarının geleceği olarak görülmektedir. Ancak biyomalzemeler ve algılayıcıların yapısı, kullanılan malzemelerdeki kısıtlar, üretim yöntemlerindeki dinamikler ve belirsizlikler söz konusu problemlerin optimal şekilde çözülmesini oldukça zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, biyomalzeme ve algılayıcı üretiminin eklemeli imalat yöntemi kullanılarak geldiği son nokta ve gelecek üretim yöntemleri hakkında genel bir bakış açısı sunulmaktadır. Eklemeli imalat yöntemiyle biyomalzemeler ve algılayıcıların üretilmesiyle ilgili çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır. Bu konuda malzeme kaybı ve hassas üretimle ilgili sorunların pek çoğuna çözüm getirilmesi amacıyla yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla geliştirilen yöntemlerin ikisi mikro serme ve aerosol jet yazdırma yöntemleridir. Her iki eklemeli imalat yöntemi de malzeme kaybını en aza indirmekle beraber mikron seviyede hassasiyetle malzeme üretimine imkân sağladığı çalışmalarda belirtilmiştir. Aerosol jet printing, yöntemi mikro serme yöntemine kıyasla daha kısa sürede malzeme üretirken; mikro serme işlemi, aerosol jet printing işlemine göre daha hassas üretilmeye izin verdiği vurgulanmıştır. Ancak her iki yöntemde de mürekkep sıvılarının viskozitesi, yazdırma sıcaklığı gibi sistem parametrelerinin, sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu da ayrıca belirtilmiştir. Mevcut üretim yöntemi kaynaklı belirsizlikleri ortadan kaldırmak için bu zamana kadar gerçekleştirilen akademik ve teknolojik verileri kullanılabilecek karşılaştırmalar bu çalışmada sunulmaya çalışılmıştır.

Gelecek çalışmaların, biyomalzemelerin ve algılayıcıların geleneksel yöntemlerle elde edilmesi yerine, malzeme kaybı ve hassasiyeti kapsamında ideale yakın çözümler üretebileceği öngörülmektedir. Bu kapsamda, hızlı ve güvenilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların başladığı literatür taramasında gözlenmiştir. Bu alanda yapılan araştırmaların, eklemeli imalat için yeni yöntemlere yol açması ve bu yolla üretilen ürünlerin kullanımının yaygınlaşmasını sağlaması beklenmektedir. Eklemeli imalat yöntemiyle geliştirilen bir ürünün hızlı şekilde benzer özelliklere sahip başka bir ürüne dönüştürülebilmesi için, yapay zekâ tabanlı, akıllı üretim sistemlerinin yakın zamanda kullanılmaya başlaması kaçınılmazdır.

### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2022/036.

### Kaynaklar (References)

1. Kalaycıoğlu Ş. G., Mechanical Behaviour of Polymeric Lattice Structures Produced by Additive Manufacturing, Mater Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.
2. Gebel M.E., Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (1), 57-67, 2021.
3. Öksüzcan İ., The Effect of Aging Atmosphere on Mechanical and Degradation Properties of Maraging Steels Produced by Additive Manufacturing, Master Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir, 2022.
4. Gebel, M. E., Ermurat M., Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing, 36 (1), 57-67, 2021.
5. Aycan M.F., Investigation on manufacturability of bone plates used in humerus fractures by additive manufacturing method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2007-2016, 2019.

6. Karabulut Y., eklemeli imalat yöntemiyle üretilen farklı cidar kalınlıklarında üretilen inonel 718 alaşım malzemesine uygulanan ikincil işlemlerin malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Master Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.
7. Gebel M., Polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretimi için bir eklemeli imalat yönteminin geliştirilmesi, Master Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2018.
8. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34 (2), 663–674, 2018.
9. Özdoğan S., Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçaların baskı parametrelerinin üç nokta eğilme davranışlarına etkisinin incelenmesi, Master Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, 2021.
10. Aygül E., Yalçinkaya S., Şahin Y., Characterization of Co-24,7Cr-5,4W-5 Mo-Si alloy used dental applications produced by additive manufacturing method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 571–580, 2022.
11. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using Ti6Al4V alloy powder. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 127–143, 2018.
12. Song, P., Wang, G., & Zhang, Y., Preparation and performance of graphene/carbon black silicone rubber composites used for highly sensitive and flexible strain sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 323, 112659, 2021.
13. Demiröz Ö. B., Eklemeli imalat ile yüzeyi güçlendirilen termoelektrik modül yüzeyindeki ısı dağılım etkisinin analizi, Master Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Gedik Üniversitesi İstanbul, 2021.
14. Aktürk M., Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanması, Master Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2021.
15. Wang, H., Du, W., Zhao, Y., Wang, Y., Hao, R., & Yang, M., Joints for treelike column structures based on generative design and additive manufacturing. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106794, 2021.
16. Top N., Doku mühendisliği için eklemeli imalat kullanılarak yeni bir kemik iskelesi tasarımı ve üretimi, Master Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
17. Claudia, E., Fischer, D., & Nickel, D., Challenges in electroplating of additive manufactured ABS plastics. 68(June), 1378–1386, 2021.
18. Tsushima, N., Tamayama, M., Arizono, H., & Makihara, K., Geometrically nonlinear aeroelastic characteristics of highly flexible wing fabricated by additive manufacturing. *Aerospace Science and Technology*, 117, 106923, 2021.
19. Atalay Y., Hybrid additive manufacturing by shaped metal deposition, Master Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2020.
20. Mohanavel, V., Ali, K. S. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S., The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409, 2021.
21. Bhatia, A., & Sehgal, A. K., Additive manufacturing materials, methods and applications : A review. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>, 2021.
22. Hashmi, A. W., & Meena, A., Proceedings Improving the surface characteristics of additively manufactured parts : A review. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.223>, 2021.
23. Izadifar, M., Chapman, D., Babyn, P., Chen, X., Kelly, M. E., UV-Assisted 3D Bioprinting of Nanoreinforced Hybrid Cardiac Patch for Myocardial Tissue Engineering. *Tissue Engineering - Part C: Methods*, 24 (2), 74–88, 2018.
24. Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., Griffini, G., UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites. *Materials*, 9 (7), 2016.
25. Mantelli, A., Romani, A., Suriano, R., Diani, M., Colledani, M., Sarlin, E., Turri, S., Levi, M., Uv-assisted 3d printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. *Polymers*, 13 (5), 1–15, 2021.
26. Postiglione G., UV-assisted 3D printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. *Polymers*, 13 (5), 1–15, 2021.
27. Barkane, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., & Gaidukovs, S., Thermal stability of UV-cured vegetable oil epoxidized acrylate-based polymer system for 3D printing application. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109347, 2020.
28. Kim, Y. C., Hong, S., Sun, H., Kim, M. G., Choi, K., Cho, J., Choi, H. R., Koo, J. C., Moon, H., Byun, D., Kim, K. J., Suhr, J., Kim, S. H., & Nam, J. Do. UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials. *European Polymer Journal*, 93(February), 140–147, 2017.
29. Hong, S. Y., Kim, Y. C., Wang, M., Kim, H. I., Byun, D. Y., Nam, J. Do, Chou, T. W., Ajayan, P. M., Ci, L., & Suhr, J., Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials. *Polymer*, 145, 88–94, 2018.
30. Lee, S., Kim, Y., Park, D., & Kim, J., The thermal properties of a UV curable acrylate composite prepared by digital light processing 3D printing. *Composites Communications*, 26(May), 100796, 2021.
31. Li, Y., Zhong, J., Wu, L., Weng, Z., Zheng, L., Peng, S., & Zhang, X., High performance POSS filled nanocomposites prepared via UV-curing based on 3D stereolithography printing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117(July 2018), 276–286, 2019.
32. Putra, N. E., Leeftang, M. A., Taheri, P., Fratila-Apachitei, L. E., Mol, J. M. C., Zhou, J., & Zadpoor, A. A., Extrusion-based 3D printing of ex situ-alloyed highly biodegradable MRI-friendly porous iron-manganese scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 134 (xxxx), 774–790, 2021.
33. Lin, Z., Jiang, T., Kinsella, J. M., Shang, J., & Luo, Z., Assessing roughness of extrusion printed soft materials using a semi-quantitative method. *Materials Letters*, 303(July), 130480, 2021.
34. Diba, M., Koons, G. L., Bedell, M. L., & Mikos, A. G., 3D printed colloidal biomaterials based on photo-reactive gelatin nanoparticles. *Biomaterials*, 274 (April), 120871, 2021.
35. Kim, M. H., & Nam, S. Y., Assessment of coaxial printability for extrusion-based bioprinting of alginate-based tubular constructs. *Bioprinting*, 20 (July), e00092, 2020.
36. Song, K., Zhang, D., Yin, J., & Huang, Y., Computational study of extrusion bioprinting with jammed gelatin microgel-based composite ink. *Additive Manufacturing*, 41 (January), 101963, 2021.
37. Gospodinova, A., Nankov, V., Tomov, S., Redzheb, M., & Petrov, P. D., Extrusion bioprinting of hydroxyethylcellulose-based bioink for cervical tumor model. *Carbohydrate Polymers*, 260(January), 117793, 2021.
38. Sakai, S., Yoshii, A., Sakurai, S., Horii, K., & Nagasuna, O., Silk fibroin nanofibers: a promising ink additive for extrusion three-dimensional bioprinting. *Materials Today Bio*, 8 (July), 2020.
39. Ginestra, P. S., Rovetta, R., Fiorentino, A., & Ceretti, E., Bioprinting process optimization: Evaluation of parameters influence on the extrusion of inorganic polymers. *Procedia CIRP*, 89, 104–109, 2020.
40. Kim, M. H., Lee, Y. W., Jung, W. K., Oh, J., Nam, S. Y., Enhanced rheological behaviors of alginate hydrogels with carrageenan for extrusion-based bioprinting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 98(February), 187–194, 2019.
41. Liu, S., Mo, L., Bi, G., Chen, S., Yan, D., Yang, J., Jia, Y. G., & Ren, L., DLP 3D printing porous  $\beta$ -tricalcium phosphate scaffold by the use of acrylate/ceramic composite slurry. *Ceramics International*, 47 (15), 21108–21116, 2021.
42. Zhang, J., Huang, D., Liu, S., Dong, X., Li, Y., Zhang, H., Yang, Z., Su, Q., Huang, W., Zheng, W., & Zhou, W., Zirconia toughened hydroxyapatite biocomposite formed by a DLP 3D printing process for potential bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering C*, 105 (July), 110054, 2019.
43. Preobrazhenskiy, I. I., Tikhonov, A. A., Evdokimov, P. V., Shibaev, A. V., & Putlyaev, V. I., DLP printing of hydrogel/calcium phosphate composites for the treatment of bone defects. *Open Ceramics*, 6 (April), 100115, 2021.
44. Foerster, A., Annarasa, V., Terry, A., Wildman, R., Hague, R., Irvine, D., De Focatiis, D. S. A., Tuck, C., UV-curable silicone materials with tuneable mechanical properties for 3D printing. *Materials and Design*, 205, 109681, 2021.
45. Xing, H., Zou, B., Lai, Q., Huang, C., Chen, Q., Fu, X., & Shi, Z., Preparation and characterization of UV curable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspensions applying for stereolithography 3D printing ceramic microcomponent. *Powder Technology*, 338, 153–161, 2018.

46. 3D3 teknoloji. 3D baskı organ. <https://3d3teknoloji.com/blog/3d-baski-organ-en-umut-verici-projeler>, Yayın tarihi Kasım 03, 2020. Erişim tarihi Şubat 2, 2023.
47. Teknoloji projeleri. 3B Biyo Yazıcı Nedir? Nasıl Çalışır? 3D Yazıcı ile Organ Üretimi. <https://teknolojiProjeleri.com/3d-yazici/biyo-yazici-nedir-organ-uretimi>, Yayın tarihi Ağustos 12, 2018. Erişim tarihi Şubat 2, 2023.
48. Fu, H., Rotational Energy Harvesting for Low Power Electronics. Thesis, February 2018.
49. Tecnodia. Akıllı saat teknolojisi. [https://www.hepsiburada.com/tecnodia-t500-akilli-saat-arama-bildirim-okuma-spor-ve-saglik-android-ve-apple-iphone-destekli-p-HBCV00002P3MOB?magaza=TEKNOD%C4%B0A&utm\\_source=pc&utm\\_medium=cimri&utm\\_campaign=c&utm\\_content=c&utm\\_term=5068&wt\\_pc=cimri.c.5068.pc](https://www.hepsiburada.com/tecnodia-t500-akilli-saat-arama-bildirim-okuma-spor-ve-saglik-android-ve-apple-iphone-destekli-p-HBCV00002P3MOB?magaza=TEKNOD%C4%B0A&utm_source=pc&utm_medium=cimri&utm_campaign=c&utm_content=c&utm_term=5068&wt_pc=cimri.c.5068.pc), Yayın tarihi Ağustos 21, 2022. Erişim tarihi Şubat 2, 2023.
50. Zhou, Z., He, Z., Yin, S., Xie, X., & Yuan, W., Adhesive, stretchable and antibacterial hydrogel with external/self-power for flexible sensitive sensor used as human motion detection. *Composites Part B: Engineering*, 220(April), 108984, 2021.
51. Shen, X., Zhao, S., & Wan, A., A sensitive and flexible sensor enhanced by constructing graphene-based polyaniline conductive networks. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 330, 112862, 2021.
52. Zhang, Y., & Cui, Y., A flexible calligraphy-integrated in situ humidity sensor. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 147, 106853, 2019.
53. Annabestani, M., Esmaili-dokht, P., Olianabas, S. A., Orouji, N., & Alipour, Z. (n.d.). A novel fully 3D , microfluidic-oriented , gel-based and low cost stretchable soft sensor, <https://www.researchgate.net/publication/352396655>.
54. Zhang, R., Lv, A., Ying, C., Hu, Z., Hu, H., Chen, H., Liu, Q., Fu, X., Hu, S., & Wong, C. P., Facile one-step preparation of laminated PDMS based flexible strain sensors with high conductivity and sensitivity via filler sedimentation. *Composites Science and Technology*, 186, 1–7, 2020.
55. Xiong Y., Shen Y. Tian L., Hu Y., Zhu P., Sun R., Wong C. P., A flexible, ultra-highly sensitive and stable capacitive pressure sensor with convex microarrays for motion and health monitoring. *Nano energy*. 70 (October 2020), 104436, 2020.
56. Sobolewski P., Goszczyńska A., Aleksandrak M., Urbaś K., Derkowska J., Bartoszewska A., Podolski J., Mijowska E. and El Fray M., A bifunctionalizable ink platform composed of catechol-modified chitosan and reduced graphene oxide/platinum nanocomposite, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 8 (1):1508-1514, 2017.
57. Van Driessche, I., Feys, J., Hopkins, S. C., Lommens, P., Granados, X., Glowacki, B. A., Ricart, S., Holzapfel, B., Vilardell, M., Kirchner, A., & Bäcker, M., Chemical solution deposition using ink-jet printing for YBCO coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 25 (6), 2012.
58. Jabari, E., & Toyserkani, E., Micro-scale aerosol-jet printing of graphene interconnects. *Carbon*, 91, 321–329, 2015.
59. Jones, C. S., Lu, X., Renn, M., Stroder, M., & Shih, W. S., Aerosol-jet-printed, high-speed, flexible thin-film transistor made using single-walled carbon nanotube solution. *Microelectronic Engineering*, 87(3), 434–437, 2010.
60. Zhao, D., Liu, T., Park, J. G., Zhang, M., Chen, J. M., & Wang, B., Conductivity enhancement of aerosol-jet printed electronics by using silver nanoparticles ink with carbon nanotubes. *Microelectronic Engineering*, 96, 71–75, 2012.
61. Sukeshini A., M., Meisenkothen, F., Gardner, P., & Reitz, T. L., Aerosol Jet® Printing of functionally graded SOFC anode interlayer and microstructural investigation by low voltage scanning electron microscopy. *Journal of Power Sources*, 224, 295–303, 2013.
62. Eckstein, R., Hernandez-Sosa, G., Lemmer, U., & Mechau, N., Aerosol jet printed top grids for organic optoelectronic devices. *Organic Electronics*, 15 (9), 2135–2140, 2014.
63. Seifert, T., Baum, M., Roscher, F., Wiemer, M., & Gessner, T., Aerosol Jet Printing of Nano Particle Based Electrical Chip Interconnects. *Materials Today: Proceedings*, 2 (8), 4262–4271, 2015.
64. Tait, J. G., Witkowska, E., Hirade, M., Ke, T. H., Malinowski, P. E., Steudel, S., Adachi, C., & Heremans, P., Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 µm width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes. *Organic Electronics*, 22, 40–43, 2015.
65. Jabari, E., & Toyserkani, E., Aerosol-Jet printing of highly flexible and conductive graphene/silver patterns. *Materials Letters*, 174, 40–43, 2016.
66. Wang, K., Chang, Y. H., Zhang, C., Wang, B., Conductive-on-demand: Tailorable polyimide/carbon nanotube nanocomposite thin film by dual-material aerosol jet printing. *Carbon*, 98, 397–403, 2016.
67. Goh, G. L., Agarwala, S., Tan, Y. J., Yeong, W. Y., A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 260, 227–235, 2018.
68. Laurent, P., Stoukatch, S., Dupont, F., Kraft, M., Electrical characterization of Aerosol Jet Printing (AJP) deposited conductive silver tracks on organic materials. *Microelectronic Engineering*, 197 (April), 71–75, 2018.
69. Khan, S., Nguyen, T. P., Lubej, M., Thiery, L., Vairac, P., & Briand, D., Low-power printed micro-hotplates through aerosol jetting of gold on thin polyimide membranes. *Microelectronic Engineering*, 194 (March), 71–78, 2018.
70. He, C., Jin, N., Yu, H., Lin, J., Ma, C. Q., The electrical sintering and fusing effects of Aerosol-Jet printed silver conductive line. *Materials Letters*, 246, 5–8, 2019.
71. Zhang, H., Choi, J. P., Moon, S. K., & Ngo, T. H., A hybrid multi-objective optimization of aerosol jet printing process via response surface methodology. *Additive Manufacturing*, 33 (December 2019), 101096, 2020.
72. Chen, Y. D., Nagarajan, V., Rosen, D. W., Yu, W., & Huang, S. Y., Aerosol jet printing on paper substrate with conductive silver nano material. *Journal of Manufacturing Processes*, 58 (January), 55–66, 2020.
73. Čatić, N., Wells, L., Al Nahas, K., Smith, M., Jing, Q., Keyser, U. F., Cama, J., & Kar-Narayan, S., Aerosol-jet printing facilitates the rapid prototyping of microfluidic devices with versatile geometries and precise channel functionalization. *Applied Materials Today*, 19, 2020.
74. Deneault, J. R., Bartsch, C., Cook, A., Grabowski, C., Berrigan, J. D., Glavin, N., & Buskohl, P. R., Conductivity and radio frequency performance data for silver nanoparticle inks deposited via aerosol jet deposition and processed under varying conditions. *Data in Brief*, 33, 106331, 2020.
75. Phuah, E. W. C., Hart, W. L., Sumer, H., & Stoddart, P. R., Patterning of biomaterials by aerosol jet printing: A parametric study. *Bioprinting*, 18 (August 2019), e00081, 2020.
76. Zhu, Y., Yu, L., Wu, D., Lv, W., & Wang, L., A high-sensitivity graphene ammonia sensor via aerosol jet printing. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 318, 112434, 2021.
77. Rahman, M. T., & Panat, R., Aerosol jet 3D printing and high temperature characterization of nickel nanoparticle films. *Manufacturing Letters*, 29, 5–10, 2021.
78. Jing, Q., Pace, A., Ives, L., Husmann, A., Čatić, N., Khanduja, V., Cama, J., & Kar-Narayan, S., Aerosol-jet-printed, conformable microfluidic force sensors. *Cell Reports Physical Science*, 2 (4), 2021.
79. Secor, E. B., Light scattering measurements to support real-time monitoring and closed-loop control of aerosol jet printing. *Additive Manufacturing*, 44 (April), 102028, 2021.
80. Sukeshini A., M., Meisenkothen, F., Gardner, P., & Reitz, T. L., Aerosol Jet® Printing of functionally graded SOFC anode interlayer and microstructural investigation by low voltage scanning electron microscopy. *Journal of Power Sources*, 224, 295–303, 2013.
81. Zhang, H., Choi, J. P., Moon, S. K., & Ngo, T. H., A hybrid multi-objective optimization of aerosol jet printing process via response surface methodology. *Additive Manufacturing*, 33 (December 2019), 101096, 2020.
82. Zang, Z., Tang, X., Liu, X., Lei, X., & Chen, W., Fabrication of high quality and low cost microlenses on a glass substrate by direct printing technique. *Applied Optics*, 53 (33), 7868, 2014.
83. Allanurov, A. M., Zdrok, A. Y., Loschilov, A. G., & Malyutin, N. D., Problem of Ink Evaporation while Using Plotter Systems to Manufacture Printed Electronic Products. *Procedia Technology*, 18 (September), 19–24, 2014.
84. Larson, B. J., Gillmor, S. D., & Lagally, M. G., Controlled deposition of picoliter amounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette. *Review of Scientific Instruments*, 75 (4), 832–836, 2004.
85. Baù, M., Ferrari, M., Tonoli, E., Ferrari, V., Sensors and energy harvesters based on piezoelectric thick films. *Procedia Engineering*, 25, 737–744, 2011.

86. Aminayi P., Development and evaluation of matrix material formulations for potential integration into immunodiagnostic biosensors, Michigan University, Chemical and Paper Engineering, Doctoral Thesis, Michigan, 2016.
87. Shancheng Y., Wavelength tuning of the soft approached whispering gallery mode microlasers for display and sensing, Nanyang Technological University, Doctoral Thesis, 2016.
88. Sobolewski, P., Goszczynska, A., Aleksandrak, M., Urbas, K., Derkowska, J., Bartoszevska, A., Podolski, J., Mijowska, E., Fray, M. El., A biofunctionalizable ink platform composed of catechol-modified chitosan and reduced graphene oxide/platinum nanocomposite. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 8 (1), 1508–1514, 2017.
89. Rohit A., Optimization and characterization of a capillary contact micro-plotter for printed electronic devices, Master Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ohio University, Ohio, 2017.
90. Molazemhosseini, A., Magagnin, L., Vena, P., Liu, C. C., Single-use nonenzymatic glucose biosensor based on CuO nanoparticles ink printed on thin film gold electrode by micro-plotter technology. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 789, 50–57, 2017.
91. Wang, Y., Zhao, C., Wang, C., Cerica, D., Bajiot, M., Xiao, Q., Stoukatch, S., & Kraft, M., A mass sensor based on 3-DOF mode localized coupled resonator under atmospheric pressure. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 279, 254–262, 2018.
92. Holeman T., The systematic approach to microplotter printing of perovskite precursors, Master Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ohio University, Ohio, 2018.
93. Kwon, K. S., Rahman, M. K., Phung, T. H., Hoath, S. D., Jeong, S., Kim, J. S., Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*, 5 (4), 2020.
94. Zymelka, D., Yamashita, T., Sun, X., Kobayashi, T., Printed strain sensors based on an intermittent conductive pattern filled with resistive ink droplets. *Sensors (Switzerland)*, 20 (15), 1–14, 2020.
95. Li, Q., Liu, J., Combined Printing of Highly Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films with Liquid Metal for Direct Fabrication of Functional Electronic Devices. *Advanced Electronic Materials*, 6 (9), 2020.
96. Karaci A., Detection and classification of shoulder implants from X-ray images: YOLO and pretrained convolution neural network based approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 283–294, 2022.
97. Aydoğan D. T., Development of antibacterial coatings on titanium based biomaterials, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2022.



