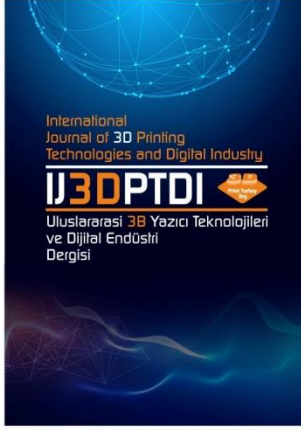




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

ENDÜSTRİ 4.0 ÇERÇEVESİNDE KATMANLI İMALATTA SENSÖR UYGULAMALARI

SENSOR APPLICATIONS with ADDITIVE
MANUFACTURING in INDUSTRY 4.0

Yazarlar (Authors): Ahu Çelebi , Damla Yağmur Koda 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çelebi A., Koda D.Y. “Endüstri 4.0 Çerçevesinde Katmanlı İmalatta Sensör Uygulamaları” Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 5(1): 85-97, (2021).

DOI:10.46519/ij3dptdi.837635

Derleme Makale/ Review Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

ENDÜSTRİ 4.0 ÇERÇEVESİNDE KATMANLI İMALATTA SENSÖR UYGULAMALARI

Ahu Çelebi^a , Damla Yağmur Koda^b 

^a Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

^b Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar: ahu.celebi@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 08.12.2020; Düzeltme/Revised: 12.04.2021; Kabul/Accepted: 29.04.2021)

ÖZ

Bu derleme makalesi, katmanlı imalat (Kİ) sensör entegrasyonuna odaklanmıştır. Devrim yaratma potansiyeline sahip katmanlı imalat, ürün tasarımı ve malzemelerinde benzeri görülmemiş bir esneklik sunmaktadır. Ayrıca Kİ diğer üretim yöntemlerine göre, birçok bileşeni tek bir bileşene indirgemeyi mümkün kılarak montaj işlemleri basamaklarını atlanabilir hale getirmektedir. Bu özellik, sensörü üretim sürecinde doğrudan sisteme entegre etmeyi mümkün kılmaktadır. Sensör entegrasyonu geleneksel üretim yöntemleriyle istenen mükemmellikte yapılamamaktadır. Katmanlı imalatla üretilen sensör entegreli parçalar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle Kİ uygulamaları ile Endüstri 4 çerçevesinde biyomedikal, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde uygulanabilmesi ile kilit unsurları oluşturabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı İmalat. Sensör uygulamaları. Endüstri 4. Dijitalizasyon.

SENSOR APPLICATIONS with ADDITIVE MANUFACTURING in INDUSTRY 4.0

This article focuses on sensor integration in additive manufacturing (AM). Additive manufacturing with the potential to revolutionize offers unprecedented flexibility in product design and materials. In addition, additive manufacturing differs from other manufacturing methods by enabling assembly with only one component. This feature makes it possible to directly integrate the sensor in the production process. Sensor integration cannot be performed properly with traditional production methods. Sensor-integrated parts produced by additive manufacturing have a wide range of applications. They are key elements in the biomedical, automotive and aerospace industries.

Keywords: Additive manufacturing. Sensor application. Industry 4. Digitalization.

1. GİRİŞ

Bilgi işlem kapasitesinin sürekli artması ve donanım fiyatlarının düşmesi tüm nesnelerin internete bağlanmasını ekonomik olarak mümkün hale getirecektir. Sonuçta 2022 yılına kadar 1 trilyon sensörün internete bağlanması beklenmektedir. Uzmanlar gelecekte tüm fiziksel ürünlerin her yerde iletişim alt yapısına bağlanabileceğini ve sensörler aracılığıyla insanlara kendi çevrelerini tam olarak algılama olanağı sağlayacağını ileri sürmektedir. Bu gelişmenin çok sayıda etkisinden söz edilmekte ve bunlar arasında yeni işlerin ve iş modellerinin yaratılması konusu girişimcilik açısından önem taşımaktadır. 3 boyutlu baskı veya diğer bir deyişle katmanlı imalat, dijital bir 3 boyutlu çizimin veya modelin katmanlar şeklinde basılarak fiziksel bir nesne oluşturma sürecidir. 3B yazıcılar, karmaşık ekipman olmadan çok karmaşık ürünler yaratma potansiyeline sahiptir. 3B yazıcılarda plastik, alüminyum, paslanmaz çelik, seramik ya da gelişmiş alaşımlar gibi birçok farklı malzeme kullanılarak bir fabrikanın yapabileceği işler yapılmakta, rüzgâr türbinlerinden oyuncak yapımına kadar, çeşitli uygulamalarda

kullanılmaktadır. 3B yazıcıların, ürün geliştirme, üretim çevrim süresinin kısalması, imalat gücünün şirketlerden bireysel üreticilere kayması, baskı malzemeleri tedarik eden yeni sektörler gibi yeni girişim fırsatlarının doğması şeklinde önemli etkilere sebep olacağı beklenmektedir. Farklı bileşimler, örneğin kemik yapmak için titanyum ve benzer alaşımlarının tozları kullanılarak organların katmanlı bir şekilde basılması öngörülmektedir. Uzmanlar 2024 yılında 3B baskılı ilk karaciğer naklinin yapılacağını tahmin etmektedirler. Bu yöntemle insan sağlığı açısından devrimsel bir gelişme olacağı, kişiselleştirilmiş tıp uygulamalarının yaygınlaşacağı ve bu alanda çalışan sektörlerin gelişeceği düşünülmektedir. 3B yazıcılar, elinde bu ürüne sahip olan herkesin imalat yapmasına olanak sağladığı için üretimde kişiselleşmeye doğru bir yönelim beklenmektedir. Bu aynı zamanda sipariş üzerine üretimi kolaylaştırarak, stok maliyetlerini azaltmaktadır. Uzmanlar 2025 yılına gelindiğinde tüketici ürünlerinin %5'inin 3B teknolojisiyle üretileceğini öngörmektedirler. 3B yazıcıların gelişmesi aynı zamanda tüketici ürünlerinin geliştirilmesi ve üretilmesiyle ilgili farklı sektörlerin de ortaya çıkacağına işaret etmektedir [1]. Dolayısıyla yapılan bu çalışma ile özellikle Endüstri 4 devriminin büyük bir hızla geldiği bu dönemde ve pandemi sürecinin de etkileri ile gündeme daha fazla gelen 3 boyutlu yazıcı ve katmanlı imalat proseslerinde uygulama alanı bulan ve bulabilecek sensörlerin hangi alanlarda nasıl kullanılacağına bir vizyon katmasının yanı sıra şimdiye dek yapılmış çalışmaların genel bir özeti sunulması hedeflenmiştir.

1.1. Katmanlı İmalat Tekniklerine Genel Bakış

Katmanlı İmalat (Kİ), malzemelerin ekstrüzyon, sinterleme, eritme, fotopolimerizasyon, laminasyon, biriktirme ve toz yataklı sistemler gibi özel tekniklerle katman katman biriktirildiği 3B model verilerinden nesneler üretmek için kullanılan teknolojileri ifade eder [2,3]. Günümüzde, çeşitli metal Kİ teknolojisi türleri bulunmaktadır. Kİ proseslerinin farklılıklarına dayanarak, 1) toz yatağı füzyonu, 2) yönlendirilmiş enerji biriktirme, 3) malzeme yığma, 4) tabaka laminasyonu, 5) malzeme ekstrüzyonu, 6) bağlayıcı püskürtme ve 7) fotopolimerizasyon dahil olmak üzere 7 Kİ kategorisi vardır [4,5]. Bir Kİ süreci, 3B CAD modelinin tanımı ile başlar. Bu sonuçlandırıldığında, içerdiği geometrik bilgiler, üçgen tabanlı bir mozaikleme yoluyla parça yüzeyini temsil eden bir STL veya benzer bir dosya formatına çevrilir. STL dosyası G kodu olarak adlandırılan Kİ makine diline çevrilir ve lazer gücü, katman kalınlığı gibi parametreler ayarlanır. Kİ makinesinde G kodu çalıştırıldıktan sonra parça katman katman oluşturularak yazdırma işlemi tamamlanır [6].

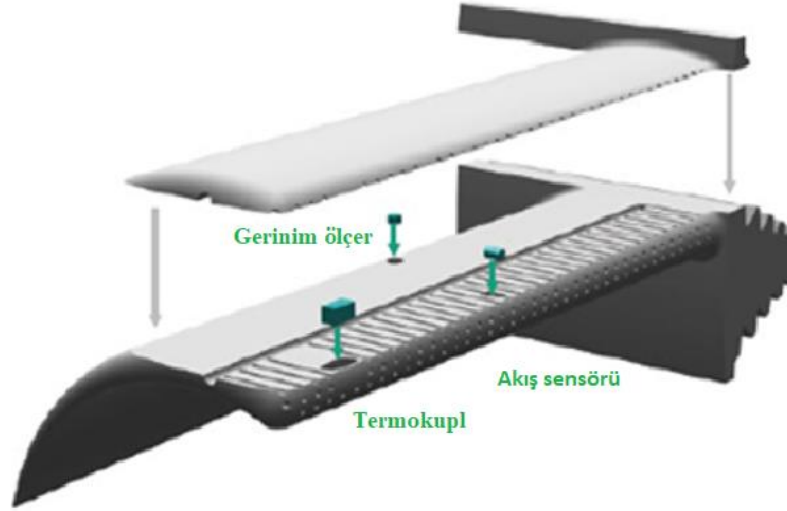
Toz yatağı füzyonu (TYF), termal enerjinin bir toz yatağının belirli bölgelerini seçici olarak birleştirdiği bir Kİ süreçlerini ifade eder [7]. Baskı tablasına bir toz malzeme tabakası yayılır. Bu toz tabakasının belirli alanları daha sonra lazer veya elektron ışını gibi bir enerji kaynağıyla seçici olarak eritilir (kaynaştırılır). Baskı tablası belirli bir miktar indirilerek üzerine yeni bir toz tabakası serilir ve tekrar ergitme işlemi uygulanır. Bu döngü parça inşa edilene kadar devam eder [8].

Kİ endüstrisi, 2022'ye kadar yaklaşık 7,3 milyar dolar olan mevcut satış hacmini dört kattan fazla arttırması beklenen hızla büyüyen bir endüstridir. Katmanlı imalatla yapılan mekatronik parçalar, geniş bir potansiyel uygulama yelpazesine sahiptir. Bunlardan biri, kullanım sırasında parça koşullarının izlenmesidir. Gömülü sensörlere veya akıllı parçalara sahip metalik bileşenler; enerji, biyomedikal, otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki zorlu ortamların izlenmesinde önemli yere sahiptir [9]. Örneğin, bir sıcaklık sensörü veya bir gerinim ölçer gibi sensörler, üretim işlemi sırasında bir parçaya entegre edilebilir. Böylece kritik koşullar izlenebilir ve bakım duruş süreleri en aza indirilebilir. Sensörün kendisini üretim sürecinde doğrudan entegre etmek mümkündür. Bir RFID etiketinin (radyo frekansı tanımlama) bir çelik fren koluna entegrasyonu ile ilgili ilk çalışmalar Sehr [10,11] tarafından yapılmıştır. Bunlar, pasif elektronik cihazlar oldukları için iletken yollara ihtiyaç duymazlar. Diğer araştırmalar arasında biyomedikal cihazlar, şekillendirme araçları alanındaki sıcaklık ve aşınma izleme sensörlerinin yanı sıra aktif sönümlenme için piezo-elektrik aktüatörlerin entegrasyonu bulunmaktadır. Bu yüksek sıcaklık sensörlerini entegre etme yaklaşımı, ergitme ve sinterleme aşamalarının anlaşılmasını arttırmak için toz yatağı füzyonu prosesinin kendisi için de kullanılmıştır [12-16].

1.2. Sensör Entegrasyonunun Kullanım Alanları

Ürünlerin özelleştirilmesi veya yaşam döngüsü verilerini elde etmenin yanı sıra mühendislik sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesi gibi "Endüstri 4.0" ile ilgili gelecekteki zorlukların üstesinden

gelmek için, parça entegre akıllı sistemler oluşturmak gerekir. Bu nedenle, sensörler ve aktüatörler, bir endüstriyel değer zincirinin küresel ve akıllı bir şekilde kontrol edilmesi için kilit unsurlardır. Mekatronik cihazların bir bileşen içerisindeki yapısal entegrasyonu, geleneksel üretim veya biçimlendirme süreçleriyle neredeyse gerçekleştirilemez. Buna karşılık, katmanlı imalat, katman katman üretim metodolojisi aracılığıyla bir parçanın içine doğrudan erişim sağlar ve bu nedenle, Kİ'nin evriminde potansiyel devrim niteliğinde bir adım olacak akıllı yapıların üretimini sağlar [17]. Katmanlı üretim yoluyla sensör entegrasyonu için çeşitli endüstriyel amaçlar tanımlanabilir: Bireylere özgü, özellikle tıp alanında, kişiselleştirme devrimi için, bir hastanın spesifik anatomisine yönelik gelişmiş biyomekanik cihazları tamamen kapalı RFID etiketi ile üretmek mümkündür [11]. Örneğin, sensör verileri, stabiliteyi iyileştirmek için implantların ve kemikli yapıların bağlantısını ayarlayabilir [18]. Ek olarak, entegre sensörler, makine parçası endüstrisinde bakımı tahmin etmek için [19] ve proses sıcaklığını ve aşınmayı izlemek için metal şekillendirme araçlarında [15] uygulama bulabilmektedir. Enerji sektörü de dahil olmak üzere hafif tasarımın birçok uygulama alanı, yerinde hasar tespiti ve ömür tahmini için mekatronik bileşenleri kullanabilir. Sonuç olarak, bu veriler, hafif parçanın ağırlık ve kritik yük yolu açısından yeniden yapılandırılmasına yol açar. Şekil 1, yapısal izlemesi için bir enerji santralinin sensöre entegre türbin kanadı konseptini göstermektedir. Kanadın mekanik ve sıcaklık yüklerini kritik konumların yanındaki sensörler ile sürekli izleme yeteneği, santrali optimum yüksek sıcaklıklarda çalıştırma ve verimliliği artırma avantajına sahip olur [17].



Şekil 1. Türbin kanadına ait entegre soğutma kanalları ve mekatronik bileşenlerinin gösterimi (gerinim ölçer, akış sensörü ve termokupl, türbin kanatları durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlar) [17].

3B baskı konusundaki 2017 VDI (Alman mühendisler Birliği) raporuna göre, elektronik alanında katmanlı üretim süreçlerini kullanma vizyonu, karmaşık geometrilere sahip bileşenlere elektronik işlevler gömmek ve böylece entegre elektronik ile bileşenler üretmektir [19]. Termokupllar, piezo sensörler, fiber optik sensörler, gerinim ölçerler veya RFID (Radyo Frekansı Tanımlama) çipleri gibi sensörleri ilave olarak üretilen bileşenlere entegre etme fikri, halihazırda birkaç araştırma grubu tarafından çalışılmaya devam etmektedir [20, 21]. Konuya esaslı bir genel bakış Lehmus ve diğerleri tarafından 2016 yılında verilmiştir [5]. Bununla birlikte, her sensör geometrik şekli, çalışma prensibi ve mümkün olduğunca genel sensör entegrasyon konseptlerine olan ihtiyacı gösteren montaj gereksinimleri bakımından farklılık gösterir. Önceki araştırma çalışmaları ardından, özellikle sensör uygulamaları açısından aşağıdaki alanlarla ilgili uygulama örnekleri beklenmektedir [20]:

- Sıcaklık ölçümü
- Titreşim ölçümü
- Stres ölçümü
- Optimize edilmiş lojistik / sahtecilik koruması (RFID aracılığıyla)

Yeterli tasarım konseptleri oluşturabilmek ve sensörlerin toz yatağı füzyonu parçalarındaki entegrasyonu üzerindeki etkileri sınırlandırmak için standart bir gömme prosedürü varsayılır. Standart

prosedür olarak, toz yatağı füzyonu sürecini önce tozun çıkarılmasıyla (bir emme ünitesi aracılığıyla) üretilen parçada bir boşluk oluşturmak ve ardından sensörü yerleştirmek (vakum tutucu) adımları sonrasında toz yatağı füzyonu işlemine devam edilir [20].

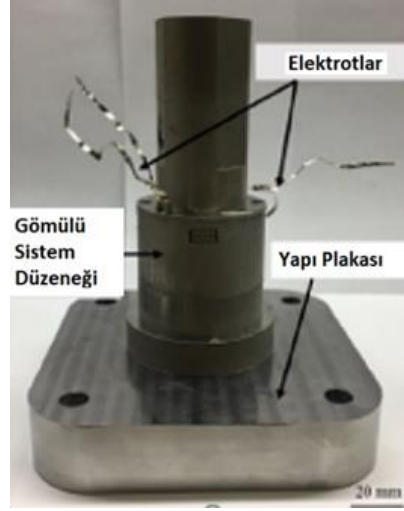
Katmanlı olarak üretilen metal bileşenlerde gömülü sensörler alanındaki ön çalışma, ilk olarak 2001 yılında Li tarafından fiber optik sensörleri ve Fiber Bragg Grating (FBG) sensörlerini metal katkılı üretilmiş bileşenlere entegre ederek yapılmıştır [21]. Ayrıca, FBG'lerin bir entegrasyonu Mathew tarafından sunulmuş ve fiber optik sensörlerin yerleştirilmesi, birkaç araştırma grubu tarafından çalışılmıştır [15,22]. Buna ek olarak, ince film sensörleri, RFID çipleri ve DC motorlar veya piezo aktüatörler [23-28] ve Stoll'un sıcaklık sensörleri [29] uygulama alanları için çalışılmıştır. Ön çalışmaların ortak noktası, her entegre elektronik bileşenin, bileşene özel olarak uyarlanmış kendi tasarımına veya entegrasyon konseptine sahip olmasıdır [21].

Metalik bir bileşen veya akıllı parçadaki gömülü piezoseramik sensör, gerçek zamanlı performans sıcaklığı ve basınç geri bildirimi elde etmenin etkili bir yolu olabilir. Enerji endüstrisi, verimliliği artırmak, dolayısıyla emisyonları düşürmek ve yanma işlemlerinin sistem güvenliğini sağlamak için yerinde proses izlemeden yararlanabilir. Yüzey kontakları, yapışkan bazlı kontaklar, enerji sistemi bileşenlerinde termokupllar ve basınç sensörleri için tipik yüzey yerleştirme yöntemleridir. Yüzey veya dış sensör yerleşimleri, parçanın tasarımında değişikliğe neden olabilir ve bu da normal çalışmayı etkileyebilir. Örneğin, aerodinamik performans veya bir rüzgâr türbini üzerindeki rüzgar akışı, tasarım değişiklikleri nedeniyle aerodinamik özellikleri azaltarak etkilenebilir. Dahası, zorlu ortamlar sensör ömrünü olumsuz etkileyebilir veya güvenilir sonuçlara neden olabilir. Harici termokupllar veya basınç sensörleri, örneğin bir yanma odasındaki harici koşulları ölçebilir, ancak bileşenlerin iç durumunu ölçemez. KI teknolojisi, sensör malzemesini istenen bir konuma yerleştirmek için duraklatılabilen karmaşık şekilli parçaları katman katman bir şekilde üretir ve dolayısıyla bileşenlerin bu iç durumlarının ölçülmesine olanak verir [30].

Piezoseramik sensör, dinamik bir yük uygulandığında bir basınç sensörü olarak çalışır. Piezoelektrik etki, piezoseramik malzeme üzerine uygulanan kuvvet varlığında bir elektrik yükü yaratır ve bunun tersi de geçerlidir. Elektrik tepkisi uygun kalibrasyondan sonra gerilme, basınç ve kuvvet değerlerine dönüştürülebilir. Piroelektrik etki, ısı akışına yanıt olarak elektrik yükü oluşturur, yük / ısı akışı bağlantısı, malzemenin polarizasyonuna bağlıdır [31, 32]. Li vd. şekil biriktirme modelleme (SDM) teknolojisini [33] kullanarak termo-mekanik sensörlerin metalik bir yapı içine yerleştirildiğini göstermiştir. SDM işleminde gömülmenin gerçekleştiği katmanlar arasında delaminasyon gözlemlenmiştir. Aguiler vd. elektronik bileşenlerin erimiş biriktirme modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak gömülmesini gerektiren elektromekanik bir cihazın imalat süreci üzerinde çalışmıştır [34]. Termoplastik malzeme kullanımı, yüksek sıcaklık uygulamalarındaki uygulamaları kısıtlamaktadır. Pille, basınçlı döküm çinko alaşımı parçalarının içine piezo sensör ve RFID aktarıcının yerleştirilmesi üzerinde çalışmıştır [35]. Rai vd. çalışma sıcaklığının $\sim 170^\circ \text{C}$ 'ye ulaştığı SLS sürecini kullanarak termokuplların ve gerinim ölçerlerin gömme tekniğini göstermiştir [36].

Toz yataklı sistem teknolojilerinin yüksek çalışma sıcaklığı üretim süreci (örneğin, EBM sistemleri tipik olarak $> 700^\circ \text{C}$ 'de çalışır) gömme amaçları için sensör malzemesi seçimini sınırlamaktadır. Toz yatağı füzyon teknolojilerinin yüksek üretim sıcaklığına dayanması için her türlü koruyucu tabaka veya yalıtım malzemesi gerekli olacaktır [9]. Kızılötesi termografi (IR) tabanlı görüntü analizi, EBM üretimi için tüm gereksinimleri karşılayan makul bir çözümdür, kurulum alanı, sıcaklığa maruz kalmayı sınırlamak için harici olarak monte edilir ve anlık izleme sağlar. Görüntü analizi tekniği, termal genleşme sorununun ihmal edilebilmesi için gerçek zamanlı bir izleme sistemi kullanır. Sensör kapasitesi, bir sıkıştırma-sıkıştırma yükleme testi kullanılarak gösterilmiştir. Karmaşık şekilli parçaların üretilmesi ve bileşen seviyesinde test yapılması yeteneklerini göstermek için SLM teknolojileri kullanılarak akıllı bir enjektör üretilmiştir (Şekil 2). Akıllı enjektör, sıcaklık değişikliklerine karşılık gelen sensör yanıtlarını göstermek için bir yanma odasında test edilmiştir. Parçanın konumlandırılması, parçanın hem doğrusal hem de açısız hizalanmasını hizalama yeteneğini göstermek için bir silindir ve dikdörtgen bir prizma kullanılarak gösterilmiştir. Burada gösterilen gelişmiş süreç, karmaşık şekilli parçaların enerji

sistemleri, havacılık endüstrileri, biyomedikal implantlar ve otomotiv endüstrilerindeki mühendislik uygulamaları için çok işlevli akıllı yapılara ulaşması için uygulanabilir [9].



Şekil 2. SLM teknolojisi kullanılarak üretilmiş akıllı enjektör [9].

Sensör entegrasyonunun motivasyonu doğal olarak bir mühendislik bileşeninin geliştirildiği uygulama senaryosuna bağlıdır. Belirli bir ürüne fiziksel olarak bağlı bir sensör ağı, örneğin kullanıcı arayüzü olarak hizmet vererek, işlevselliğinin önemli bir parçasını oluşturabilir. Ayrıca, üretim sürecini ve / veya hizmet ömrünü izlemek için uygulanabilir [37-40]. Bununla birlikte, aynı zamanda, bunların birçoğu, Kİ'nin son yıllarda güçlü bir temel kazandığı havacılık gibi uygulama alanlarıyla hayata geçirilebilir [17].

Üretim mühendisliğindeki bazı araştırma eğilimleri, Bulut Tabanlı Tasarım ve Üretim (CBDMM) gibi yeni paradigmalarda beklenen değer zincirlerinin yeniden gündeme gelmesi ile, Kİ'nin birçok yönüyle son derece iyi uyduğu ve özellikle sensör entegrasyonu ile verilerin kullanılabilirliğini artırılacağı görülmektedir. Senaryonun uzun vadeli bir projeksiyonunda, yaşam döngüsü bilgilerinin toplanması ve değerlendirilmesi, sürekli bir ürün optimizasyon sürecini uygulamak için kurgulanabilir [40]. Sensörlerin entegrasyonunun yanı sıra, bu sürekli evrimin ekonomik olarak uygulanabilir olmasının birincil ön koşulu, Kİ gibi en yüksek esnekliği sunan bir üretim sürecidir. Kİ'yi bu anlamda entegre eden senaryolar, ilke olarak alternatif ürün üretmeye yönelik ayrık optimizasyon prosedürlerinin ötesine geçebilir.

2. KATMANLI İMALATTA SENSÖR UYGULAMALARI

Sensör entegrasyonunda en yüksek esnekliği elde etmek için birkaç katmanlı imalat işlemi birleştirme yaklaşımı kullanılmaktadır. Espalin [41] tarafından yapılan bir çalışmada ürün örnekleriyle birlikte açıklanan multi3D sistemi, çok çeşitli yapı oluşturma, malzeme biriktirme ve entegrasyon süreçlerini içermektedir;

- FDM (Hibrit sistem),
- mikro işleme,
- hassas dağıtım ve
- tel gömme.

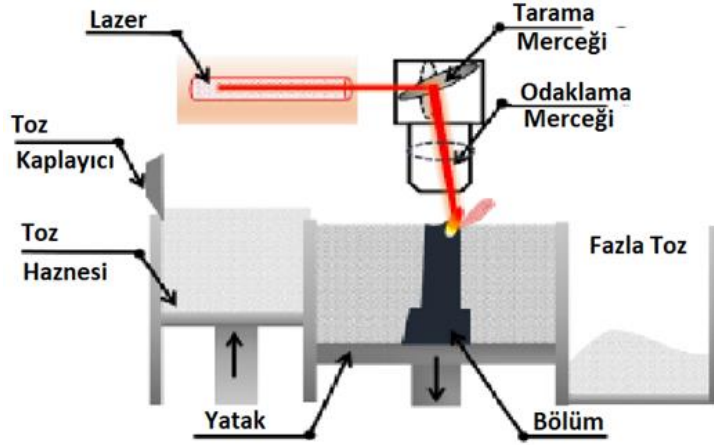
Bu seçeneklere, enerji depolama (piller, süper kapaklar) veya silikon mikro elektronik cihazlar gibi ayrı ayrı üretilen işlevsel birimlerin entegrasyonu için sensör yerleştirme işlemlerine izin veren taşıma cihazları da eklenmiştir. Sistem, çeşitli entegre süreçleri birbirine bağlayan özel, LabVIEW tabanlı bir kontrole sahiptir ve böylelikle tam, birleşik yapısal ve elektronik sistemler için tüm yapısal işlerin doğrudan sunulmasına izin verir [41]. Gelecekteki hedefler arasında, olası ürünlerin kapsamını daha da genişletmek için lazer ablasyon veya mürekkep püskürtmeli baskı gibi ek işlemlerin entegrasyonu öngörülmektedir. Bir üretim sistemi olarak bakıldığında, yakın süreçler arasındaki bağlantılar ve bir

parçanın elektronik, işlevsel ve yapısal özelliklerini tamamen tanımlama imkanı, uygulanan süreç içerisinde yer alan karmaşık geometrik 3B elektroniklerin üretimine imkan vermesi dolayısıyla katmanlı imalat süreçlerinde sensörlerin entegrasyonu cazip hale gelmektedir. Malzeme püskürtme işlemlerinin bir alt grubu, temel olarak, ışıkla sertleştirilebilen polimer bazlı malzemelerin mürekkep püskürtmeli baskısına dayanır. Bu, yöntemlerin örnekleri arasında PolyJet [42] ve Doğrudan Baskı Fotopolimerizasyonu (DPP) süreci [43] bulunmaktadır. Bu süreçler, çok malzemeli yapılar inşa etmeye gelince belirli bir esneklik sunar. Örneğin Stratasys Ltd., ilgili cihazları için Dijital Malzemeler konseptini sunar; bu, baskı sırasında belirli bir malzeme özellikleri kapsamına ulaşmak için belirli baz reçinelerin kontrollü kombinasyonuna izin verir. Ticari bir temelde sunulan malzemeler genellikle yapısal malzeme tipindedir veya özel uygulama ayarları (örneğin ayarlanabilir Shore sertliğine sahip kauçuk benzeri malzemeler) ya da şeffaflık gibi ikincil özellikler sunar. Portföyde hala eksik olan fonksiyonel malzemelerdir. Buna karşılık, DPP süreci, fonksiyonel malzemeleri gerçekleştirmek için araştırma düzeyinde özel olarak uyarlanmıştır. Burada da bir fotopolimerin işlenebilirliği garanti etmesi gerektiğinden, işlevsel malzeme özellikleri tipik olarak özel katkı maddeleri ile elde edilir. Yüksek çözünürlüklü, kontrollü malzeme biriktirme ile foto polimerizasyon olasılığı kombinasyonu, baskıdan sonra malzemenin anında katılaşmasına izin verir ve böylece süreci kolaylaştırır. Doğrudan birbirinin yanında farklı işlevsel veya yapısal rollere sahip malzemeler, yapısal bir elektronik sistemi doğrudan etkili bir şekilde yazdırmak için temel sağlar. Bu değerlendirme, çok malzemeli / mürekkepli baskı kafalarının doğal olarak son teknoloji olduğu gerçeğiyle de desteklenmektedir. Böylece, çoklu malzeme biriktirme için teknolojik temel tamamen kullanılabilir. Ayrıca, mürekkep püskürtmeli baskı önemli bir süredir çeşitli sensör türlerini, ara bağlantıları vb. gerçekleştirmek için doğrudan yazma teknolojisi olarak kullanıldığından [44-47], bu amaca uygun kullanılabilen birçok malzeme formülasyonu halihazırda mevcuttur ve test edilmiştir. Prensip olarak sadece PolyJet, DPP ve ilgili süreçlere aktarılması gerekir. Bununla birlikte, literatür taramalarına göre, bu yetenekleri tam olarak entegre eden gerçek bir "tek süreç" çözümü henüz bildirilmemiştir. Bunun bir nedeni, yukarıda bahsedilen, genellikle geometrik tasarım özgürlüğünün bir bedeli olabileceği gerçeği olabilir: DPP ve PolyJet işlemede, tüm fonksiyonel malzeme formülasyonlarının fotopolimerlere veya kürlenebilir polimer kombinasyonlarına dayanması gerekir. İşlemeyi kolaylaştırma ihtiyacının getirdiği malzeme seçimindeki bu kısıtlamalar, prensipte performanstan ödün verebilir. İşlenebilirlik ve özellikler arasında bir dengenin gerekli olduğu diğer durumlarda da benzer etkiler gözlemlenmiştir. Bu açıdan iyi bir örnek hem mürekkep püskürtmeli baskılı hem de mikro dağıtım ara bağlantıların sınırlı elektrik iletkenlikleri göz önüne alındığında, Wicker ve diğerleri tarafından geliştirilen bakır tel gömme işlemidir [48].

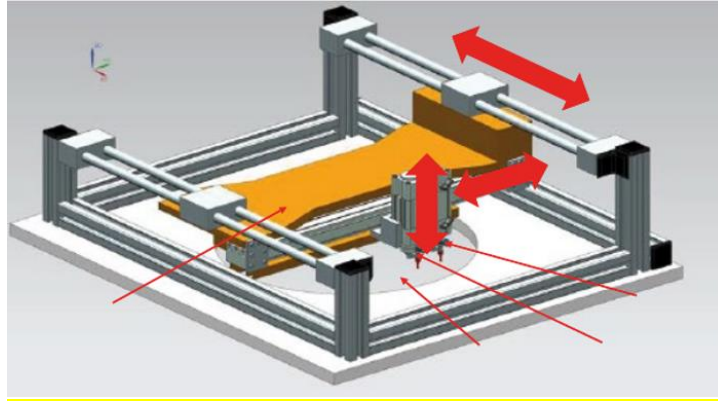
2.1. Toz yataklı Sistemde Uygulamalar

Lazer tabanlı toz yataklı sistemler (Şekil 3), en güvenilir ve en popüler katmanlı üretim teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Tamamen kapsüllenmiş elektronik bileşenleri oluşturmak için sensörleri veya aktüatörleri otomatik olarak entegre etmek gerekir. Bu otomatik süreç için, bir al ve yerleştir konsepti geliştirilmeli ve mevcut bir Lazer tabanlı toz yataklı makinesine entegre edilmelidir. İlk olarak, lazer tabanlı toz yatak sürecini çok malzemeli üretime doğru genişleten cihazlar, işlevsel olarak optimize edilmiş parçaların üretimi için yeni yollar sağlar. İkinci olarak, çok malzemeli cihazlar, al ve yerleştir bileşenlerinin elektrikle temas etmesini sağlar. Kombinasyon halinde hem işlevsel entegrasyon hem de hafif tasarımın ideal bir şekilde gerçekleştirilmesine izin veren mekatronik çok malzemeli parçalar üretilebilir [9].

Geliştirilen kinematik sistemin (Şekil 4) bir lazer ışını eritme makinesine entegrasyonu, akıllı parçaların katmanlı üretimine doğru bir sonraki adım olacaktır. Fraunhofer IGCv, işlev açısından optimize edilmiş mekatronik çok malzemeli parçaların katmanlı üretimini mümkün kılma vizyonunun bir parçası olarak sensör entegrasyonunu araştırmaktadır. Bununla birlikte hem sensör entegrasyonu hem de çoklu malzeme işleme, hala araştırma aşamasındadır ve endüstriyel uygulamada çok sınırlıdır [17].



Şekil 3. Toz yatağı füzyonu işleminin şeması [7].



Şekil 4. Örnek bir LBM makinesinin toz kaplayıcısına entegre edilmesi planlanan kinematik sistemin CAD modeli [17].

Daha önce 2011'de Sehrt, bir LPBF sistemini mümkün olduğunca az bozan bir kinematik sistemin uyarlanmış bir kurulum alanı aracılığıyla sensörlerin otomatik entegrasyonu ile ilgili bir çalışma yapmıştır [10]. Bosse ve diğerlerine göre, aynı Kİ üretim ortamındaki sensörlerin bir entegrasyon süreci yalnızca Kİ prosesi tarafından sensörün doğrudan üretimine bağlıdır [49]. Hoerber ve Glasschroeder vd. daha önce yaptıkları bir çalışmada, izotropik iletken yapıştırıcının sürekli olarak dağıtılmasıyla iletken yollar oluşturmuş ve elektronik bileşenleri otomatik olarak oluşturulan boşluklara gömmüşlerdir. Parçanın yüzeyine gömülü bu bileşenleri Aerosol Jet baskılı gümüş nanopartikül mürekkepleri ile birbirine bağlanması sağlamışlardır. Yüzey özellikleri, baskılı yapıların yüksek çözünürlükte ve çok ince tabakalarla uygulanmasını zorlaştırırsa da başarılı bir üretim gerçekleştirmiştir [50].

Akıllı bileşenleri otomatik olarak üretmek için, yaygın lazer ışını eritme işleminin geliştirilmesi gerekmektedir. Akıllı parça üretiminde çözülmesi gereken bazı zorluklar vardır. Katkıda bulunan tüm ilgili faktörleri göz önünde bulundurarak, küresel bir süreç gözlemi gereklidir. Daha önce gösterilen üretim sürecini takiben, küresel zorluk birkaç alt adıma bölünmüştür. Mekatronik cihazı parçanın içine yerleştirmek için bir boşluk tasarlayarak, LBM işleminin genel sınırlamaları dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, destek yapılarını önlemek için boşlukların 45° 'den daha düşük sarkma alanları olmamalıdır. Boşluk geometrilerinin farklı global kriterleri karşılaması gerekir, ancak bunlar çoğunlukla sensör veya aktüatör tipine bağlıdır. Genel olarak, herhangi bir destek yapısı olmayan basit bir geometri, kendi kendine merkezleme işlevi ve bir tür mekanik bağlantı düşünülmelidir. Bu boşluğa bir sensör entegre etmek için, ilk önce gevşek tozun çıkarılması gerekir. Bu nedenle, bir tür otomatik temizleme sistemi gevşek tozu giderir. Emme iğneli bir elektrikli süpürge, bu nedenle uygun bir seçenektir. Bir mekatronik bileşenin bir parçaya otomatik entegrasyonu, harici bir otomasyon birimi gerektirir. Sensör veya aktüatörün konumlandırılmasından sonra, elektrik için tanımlanmış bir temas tasarımı gereklidir. İletken

hatlar çoklu malzeme tekniği ile üretilebildiğinden, tam bir kapsüllenmiş mekatronik cihazın imalatı mümkün hale gelir. Lazerin yüksek enerji yoğunluğu ve bunun sonucunda ortaya çıkan çalışma sıcaklığı göz önüne alındığında, sensörün termal izolasyonu zorunludur. Sensörün mahfazası, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeden yapılmalıdır, örn. teknik seramikler, polimerler veya su camı entegrasyon öncesi ve sonrası etkili bir izolasyon oluşturur [17].

Toz yataklı sistemde bir diğer uygulama kusurların tespiti için sensör entegrasyonudur. LPBF'deki kusurların çok çeşitli olduğunu ve proses parametreleri, malzemeler, işleme koşulları ve makine dinamikleri arasındaki yeterince anlaşılmamış etkileşimlerden kaynaklandığını doğrulamaktadır [51-54]. Kusurların tespiti için sensörler LPBF metal Kİ prosesinde test edilmiştir. Yüksek hızlı video kameralar, kızılötesi termal sensörler ve LPBF makinelerine entegre edilmiş foto detektörler gibi çok sayıda sensör kullanan bu çalışmalar, Kİ' de kusur oluşumunun belirleyici olan sebeplerini, elde edilen sinyallerin laplacian eigenspectra'sında yakalandığını göstermektedir. Metal Kİ parçalar proses sonrası X-Ray Bilgisayarlı Tomografi (XCT) kullanılarak incelenmektedir. Bunun yerine önerilen yöntem, kusur oluşumunu tespit etmek için sensör verilerini kullanmaktır, böylece sürece uygun düzeltici eylemler gerçekleştirilebilir. Kusur tespit edildikten sonra gerekli sensör dönüşlerine göre işlem parametrelerinde değişiklikler yapılarak bu hatalar giderilmeye çalışılır. Örneğin, lazer gücü ve tarama hızı, kusuru doğrulamak veya düzeltmek için değiştirilebilir. Kusurların sonraki katmanlar tarafından örtülmeden önce tespit edildiği, izole edildiği ve kaldırıldığı bir Kİ yöntemi her açıdan çıktı açıcı bir proses olacaktır.

Kİ'de proses içi, sensör tabanlı proses kalitesi izlemenin iki motive edici nedeni vardır

1. LPBF parçalarının (özellikle kullanım açısından kritik havacılık ve savunma uygulamalarına yönelik olanların) kalite denetimi, şu anda külfetli ve pahalı bir süreç olan X-Ray Bilgisayarlı Tomografi (XCT) kullanılarak işlem sonrası taramaya dayanmaktadır. Dahası, XCT taramalarının çözünürlüğü, parçanın boyutundaki ve malzemenin yoğunluğundaki artışla aşamalı olarak azalır. Bu nedenle, her LPBF parçası için XCT tabanlı kalite sertifikası, endüstriyel üretim açısından geçerli değildir.
2. Lazer gücü (P, W), tarama aralığı (H, mm), tarama hızı (V, mm / s) ve tabaka kalınlığı (mm) gibi kritik işlem parametreleri belirli parça geometrileri için optimize edilebilir olsa da ve küresel hacimsel enerji yoğunluğu ($EV = PV \times H \times TJ / \text{mm}^3$) açısından bir araya getirildiğinde, parça kusurları hala meydana gelebilir. Bunun nedeni, küresel enerji yoğunluğunun, parçadaki ısı akışının büyüklüğünü ve yönünü hesaba katmamasıdır; bu, parça geometrisine, yönelimine ve baskı tablasındaki konuma bağlı olarak değişebilir. Enerji yoğunluğu, makineyle ilgili küçük arızaları da hesaba katmaz. Bu nedenle, Kİ' de süreç içi izleme yaklaşımları oluşturmak zorunludur. Böyle bir strateji, temsili parçalar için belirli kusurlara karşılık gelen bir sensör geri dönüşleri kitaplığı oluşturmaktır. Daha sonra bu kitaplık, parça kalitesinin hızlı kalifikasyonu için kullanılabilir. [55, 56].

2.2. Metal parçalara derinlemesine gömülü entegre sensörler

Sensörler ve elektrik kontrolleri tüm endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yaygın bir sorun, maruz kalan bileşenlerin zamanla korozyon, darbe ve aşınmaya bağlı olarak bozulmasıdır. Genellikle hasar, yüksek stres konsantrasyonu nedeniyle taban plakası ve yapı arasında oluşur. İdeal olarak, bu tür durumlarda, elektroniği katı metale gömmek en iyisidir. Geleneksel üretim teknolojileri kullanıldığında, bu işlem oldukça zor ve karmaşık bir süreçtir.

Fiber optik gerinim sensörleri ve diğer sıcaklığa duyarlı bileşenler, Fabrisonic'in patentli hibrit metal 3B baskı işlemi Ultrasonik Katmanlı İmalat (UKİ) ile doğrudan yoğun metale entegre edilebilir. Döküm ve kaynaklama gibi geleneksel işlemler denenmiştir, ancak gereken yüksek sıcaklıklar istenen devrelerin özelliklerine zarar verebilir, eriyebilir veya özelliklerini değiştirebilir. Fabrisonic'in UKİ süreci bu yaygın sorunların ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilir. Kullanılan teknoloji, UKİ, katı hal (erimesiz) metal 3B baskı sürecidir. Metallerin yapıştırılması için ısıtılması gerekmediğinden, birçok elektronik cihaz zarar görmeden gömülebilir. UKİ, metal folyoları senkronize bir şekilde bir araya getirmek için yüksek frekanslı (Ultrasonik) titreşimler kullanır. Bilgisayar sayısal kontrol (CNC) işleme işlemleri, iç

özellikler oluşturmak ve geometrileri sonuçlandırmak için ultrasonik biriktirme aşaması ile periyodik olarak kullanılır. UKİ, sıcaklığa duyarlı bileşenlerin fiber optik gerinim sensörleri de dahil olmak üzere hasar görmeden metal yapıya doğrudan entegrasyonunu sağlar [57].

Metal bileşenlere sensör entegrasyonu, son teknoloji bileşenlerin gelişmiş kontrol ve izleme amaçları için ilgi çekicidir. Teknoloji, havacılık, nükleer, petrol ve gaz ve diğer çeşitli endüstrilerle ilgilidir. Fabrisonic, sensörleri yazdırılırken sistem parçalarına yerleştirmek için ultrasonik katmanlı imalat (bir hibrit eklemeli ve eksiltici üretim süreci) kullanan benzersiz bir sisteme öncülük etmiştir. Teknolojinin erken başarısı, daha fazla çalışmayı teşvik etmekte ve algılama sistemlerinin imalatındaki ilerlemeler için büyük umut vaat etmektedir [58].

2.3. Katmanlı İmalatta Sensör Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar

Metal Kİ sistemleri için veri yönetimi üzerine birkaç çalışma yapılmıştır, ancak metal Kİ prosesine dayalı veri yönetim sistemleri eksikliği mevcuttur. Literatür taraması, veri modelinin hem veri yönetim sistemi hem de Dİ (Dijital İkiz) için kritik önemde olduğunu göstermektedir. Ancak, ürün kalitesi üzerinde etkisi olan kapsamlı bir spesifik veri listesi içeren bir metal Kİ ürün veri modeli eksikliği vardır. Ayrıca, alan düzeyindeki veri kaynakları ile veri yönetim sistemi arasındaki veri iletişimi, metal Kİ alanında nadiren incelenmiştir. Dahası, imalat alanında Dİ ile ilgili önemli miktarda literatür olmasına rağmen, metal Kİ alanında çok az sayıda çalışma [59,60] Dİ konseptini uygulamıştır ve hepsi bunun yerine metal Kİ süreçlerine odaklanmaktadır. Liu ve diğer araştırmacıların yaptığı çalışmada farklı ürün yaşam döngüsü aşamalarında metal Kİ verilerini tanımlayarak ve kategorize ederek bir metal Kİ ürün veri modeli geliştirilir. MANUELA projesinde geliştirilen gerçek bir metal Kİ sisteminde önerilen çerçevenin erken uygulaması yapılmıştır. Bulut tabanlı ve derin öğrenme özellikli metal Kİ, hata analizinde temsili bir uygulama senaryosu olarak gösterilir [1].

3. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Hem son teknolojiye genel bakış hem de vaka çalışmalarının gösterdiği gibi, Kİ' de sensör entegrasyonu söz konusu olduğunda bazı zorluklar devam etmektedir. Aynı zamanda, üretim hacmi, karmaşıklık, güvenlik, güvenilirlik ve dayanıklılık gereksinimleri ile özelleştirme ve işlevselleştirme ihtiyaçları açısından farklılık gösteren bir ürün dünyasında, en iyisinin ne olabileceği sorusuna tek bir cevap olmadığı açıktır. Yine de gelecek vaat eden araştırma yönlerini belirlemek mümkündür ve özellikle düşük üretim hacminin özelleştirme ve / veya karmaşıklık gereksinimlerini karşıladığı durumlarda, Kİ kendi başına gelecektir. Teknolojik düzeyde, en büyük sorunlardan biri entegrasyon seçenekleri açısından esnekliğin artırılmasıdır. Hibrit üretim sistemleri örneğin UTEP (University of Texas at El Paso) tarafından birkaç çalışmada öne sürülen, makine tasarımı ve yapımı açısından önemli bir çaba teşkil etmektedir. Aksine, hem işlevsel hem de yapısal malzemeleri işleyebilen ve bunlar arasında kolayca geçiş yapabilen yöntemler, işlem karmaşıklığı açısından önemli avantajlar sağlarken, aynı zamanda üretkenlik açısından da avantajlar sağlamaktadır. Bu perspektiften bakıldığında, mürekkep püskürtmeli veya aerosol püskürtmeli baskı gibi sensör üretimi / yapılandırma / biriktirme için genellikle uygulanan doğrudan yazma süreçleri odak noktası haline gelmektedir, çünkü onlar için çeşitli fonksiyonel malzemeler bugün halihazırda mevcut olarak çalışılmış ve bilgi birikimi oluşturulmuştur.

Mevcut Kİ süreçlerini birkaç veya hatta tek bir sürecinde entegre "akıllılığı" gerçekleştirme kapasitesine doğru daha da güçlendirmek, araştırmacıların ilgisini hak eden umut verici bir yaklaşım gibi görünmektedir. Bunların arasında öne çıkanlar, bugün bile ve farklı malzeme sınıfları için, yapı hacmi içinde farklı malzemelerin kontrollü bir mekansal dağılımına yönelik ilk yaklaşımları sunanlardır. Tipik olarak, bunlar, yerel olarak birleştirilmiş sıvı veya partikül materyallerden oluşan bir yığınla (foto polimerizasyonu veya toz yatağı füzyon prosesleri) çalışan prosesler değil, malzeme ekstrüzyonu gibi, parçayı inşa ederken materyali besleyen proseslerdir. Kİ için özellikle malzeme entegre algılama ile ilgili olarak parlak bir gelecek görüyoruz, çünkü bu teknolojilerin kombinasyonu, gelişmiş, IoT özellikli ürünlerin geniş bir şekilde tanıtılmasının önünü açacaktır. Bu bağlamda aşağıda belirtilen sorular gelecekteki çalışmalar açısından önem arz etmektedir.

i. İşlem içi sensör verilerinden mikro yapı heterojenliği gibi başka hangi farklı türler ve kusurlar tespit edilebilir?

- ii. Belirli kusurlar ve sensör sinyal modelleri arasındaki bağlantı nedir? Başka bir deyişle, bir kusur türü ile bağlantısını ortaya koyduğu sensör çıktısı arasında bire bir bağlantı var mı?
- iii. Algılama gecikmesi nedir; algılama doğruluğu sensör yedekliliği ile artıyor mu?
- iv. Sensör gürültüsünün ve konumunun algılama doğruluğu üzerindeki etkisi nedir?
- v. Farklı geometriler ve malzemeler göz önüne alındığında yaklaşımın etkinliği nasıl etkilenir? geçerlidir.

4. SONUÇ

Akıllı parça üretimi ve parça üretiminde kusur tespitinin yapılabilmesi gibi birçok alanda sensör entegrasyonu oluşturmak gerekir. Katmanlı imalat parçanın içine doğrudan erişim sağladığı için katmanlı imalat yöntemi kullanılarak sensör entegrasyonu yapılmasının çığır açıcı gelişmeler açısından çok önemli bir üretim prosesidir.

KAYNAKLAR

1. Liu, C., Le Roux, L., Körner, C., Tabaste, O., Lacan, F., Bigot, S., “Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems”, Journal of Manufacturing Systems, 2020.
2. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., “Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing”, Springer, New York, 2010.
3. Qin, Y., Qi, Q., Scott, P.J., Jiang, X., “Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data”, Computer-Aided Design, Cilt 111, Sayfa 44–64, 2019.
4. Özsoy, K., Duman, B., İçkale Gültekin, D., “Metal Part Production with Additive Manufacturing for Aerospace and Defense Industry”, International Journal of Technological Sciences, Cilt 11, Sayı 3, Sayfa 201-210, Aralık 2019.
5. Lehmhus, D., Aumund-Kopp, C., Petzoldt, F., Godlinski, D., Haberkorn, A., Zöllmer, V., Busse, M., “Customized smartness: a survey on links between additive manufacturing and sensor integration”, Procedia Technology, Cilt 26, Sayfa 284-301, 2016.
6. Çelebi, A., Korkmaz, A., Yılmaz, T., Tosun, H., "3 boyutlu yazıcı ile 6 eksenli robot kol tasarım ve imalatı", International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 3, Sayı 3, Sayfa 269-278, 2019.
7. Montazeri, M., “Smart additive manufacturing: in-process sensing and data analytics for online defect detection in metal additive manufacturing processes”, Doktora tezi, Nebraska Üniversitesi, Lincoln, 2019.
8. Binder, M., Anstaett, C., Reisch, R., Schlick, G., Seidel, C., Reinhart, G., “Automated manufacturing of mechatronic parts by laser-based powder bed fusion”, Procedia Manufacturing, Cilt 18, Sayfa 12-19, 2018.
9. Hossain, M.S., Gonzalez, J.A., Hernandez, R.M., Morton, P., Mireles, J., Choudhuri, A., Lin, Y., Wicker, R.B., “Smart parts fabrication using powder bed fusion additive manufacturing Technologies”, Additive Manufacturing, Cilt 10, Sayfa 58-66, 2016.
10. Sehrt, J.T., Witt, G., “Part management by direct integration of RFID tags into beam melted parts”, RAPID 2011 Conference & Exposition, 2011.
11. Sehrt, J.T., Witt, G., “Additive Manufacturing of smart parts and medical instruments, Proceedings of AEPR’12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing”, 2012.
12. Lachmayer, R., Lippert, R.B., “Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik”, Springer Viewg, Berlin, 2017.
13. MacDonald, E., Wicker, R., “Multiprocess 3D printing for increasing component functionality”, Science, Cilt 353, Sayı 6307, 2016.
14. Gebauer, M., “High performance tooling for sheet metal forming by Laser Beam Melting”, Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing, Sayfa 140–150, 2017.

15. Mathew, J., Hauser, C., Stoll, P., Kenel, C., Polyzos, D., Havermann, D., MacPherson, W.N., Hand, D.P., Leinenbach, C., Spierings, A., Koenig-Urban, K., Maier, R.R.J., "Integrating Fiber Fabry-Perot Cavity Sensor Into 3-D Printed Metal Components for Extreme High- Temperature Monitoring Applications", IEEE Sensors Journal, Cilt 17, Sayı 13, Sayfa 4107–4114, 2017.
16. Stoffregen, H.A., "Strukturintegration piezoelektrischer Vielschichtaktoren mittels selektiven Laserschmelzens", Doktora Tezi, Darmstadt Teknik Üniversitesi, Darmstadt, 2015.
17. Binder, M., Illgner, M., Anstaett, C., Kindermann, P., Kirchbichler, L., Seidel, C., "Automated manufacturing of sensor-monitored parts", Laser Technik Journal, Cilt 15, Sayı 3, Sayfa 36-39, 2018.
18. Töppel, T., Lausch, H., Brand, M., Hensel, E., Arnold, M., Rotsch, C., "Structural Integration of Sensors/Actuators by Laser Beam Melting for Tailored Smart Components", JOM, Sayfa 321-327, 2018.
19. Ehrenberg-Silies, S., Kind, S., Jetzke, T., Bovenschulte, M., "3D-Druck: Anwendungen und Potenziale", <https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/additive-fertigungsverfahren-3d-druck-2017.pdf>, Kasım 20, 2018.
20. Binder, M., Kirchbichler, L., Seidel, C., Anstaett, C., Schlick, G., Reinhart, G., "Desing concepts fort he integration of electronic components into metal laser-based powder bed fusion parts", Procedia CIRP, Cilt 81, Sayfa 992-997, 2019.
21. Li, X., Prinz, F., Nelson, D., "Embedded sensors in layered manufacturing", 2001.
22. Mathew, J., Schneller, O., Polyzos, D., Havermann, D., Carter, R.M., MacPherson, W.N., Hand, D.P., Maier, R.R.J., "In-Fiber Fabry–Perot Cavity Sensor for High-Temperature Applications", Journal of Lightwave Technology, Cilt 33, Sayı 12, Sayfa 2419–2425, 2015.
23. Hehr, A., Norfolk, M., Wenning, J., Sheridan, J., Leser, P., Leser, P., Newman, J.A., "Integrating Fiber Optic Strain Sensors into Metal Using Ultrasonic Additive Manufacturing", JOM, Cilt 70, Sayı 3, Sayfa 315–320, 2018.
24. Norfolk, M., Wenning, J., Hehr, A., Johnson, H., "3D Printing Embedded Sensors Using Solid State Welding", Berlin, 2016.
25. Stoll, P., Mathew, J., Spierings, A., Bauer, T., Maier, R., "Embedding fibre optical sensors into SLM parts", 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Sayfa 1815-1825, 2016.
26. Sehr, J.T., "Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren", Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., Shaker, Aachen, 2010.
27. Pille, C., "In-Process Embedding of Piezo Sensors and RFID Transponders into Cast Parts for Autonomous Manufacturing Logistics", 4th European Conference & Ehibition on Integration Issues of Miniaturized Systems in Como Conference, Como, 2010.
28. Binder, M., Anstaett, C., Horn, M., Herzer, F., Schlick, G., Seidel, C., Schilp, J., Reinhart, G., "Potentials and challenges of multi-material processing by laser-based powder bed fusion", Solid Freedom Fabrication, Texas, 2018.
29. Stoll, P., Leutenecker, B., Spiering, A., Klahn, C., Wegener, K., "Temperature Monitoring of a SLM Part with Embedded Sensor", International Conference on Additive Manufacturing in Product and Applications – AMPA, Zurich, 2017.
30. Vives, A. A., "Piezoelectric Transducers and Applications", Springer, Berlin, 2004.
31. Sirohi, J., Chopra, I., "Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors", Journal of Intelligent Material System Structures, Cilt 11, Sayı 4, Sayfa 246-257, 2000.
32. Webster, J. G., Eren, H., "Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement", CRC Press, Boca Raton, 2014.

33. Li, X. C., Golnas A., Prinz, F. B., "Shape deposition manufacturing of smart metallic structures with embedded sensors", in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000.
34. Aguilera, E., Ramos, J., Espalin, D., Cedillos, F., Muse, D., Wicker, R., Macdonald, E., "3D printing of electro mechanical systems", in Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2013.
35. Pille, C., "In-process-embedding of piezo sensors and RFID transponders into cast parts for autonomous manufacturing logistics", Smart Systems Integration, Sayfa 1-10, 2010.
36. Rai, R., Campbell M., Wood, K., "Extracting product performance by embedding sensors in SFF prototypes", in Proceedings of International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2004.
37. Wuest, T., Hribernik, K., Thoben, K-D., "Assessing servitisation potential of PLM data by applying the product avatar concept", Production Planning & Control, Cilt 26, Sayı 14, Sayfa 1198-1218, 2015.
38. Bosse, S., Lechleiter, A., "A hybrid approach for Structural Monitoring with self-organizing multi-agent systems and inverse numerical methods in material-embedded sensor networks", Mechatronics, Cilt 34, Sayfa 12-37, 2016.
39. Boll, D., Schubert, K., Brauner, C., Lang, W., "Miniaturized Flexible Interdigital Sensor for In Situ Dielectric Cure Monitoring of Composite Materials", IEEE Sensors Journal, Cilt 14, Sayı 7, Sayfa 2193-2197, 2014
40. Lehmhus, D., Wuest, T., Wellsandt, S., Bosse, S., Kaihara, T., Thoben, K-D., Busse, M., "Cloud-based Automated Design and Additive Manufacturing: A Usage Data-Enabled Paradigm Shift", Sensors, Cilt 15, Sayı 12, Sayfa 32079-32122, 2015.
41. Espalin, D., Muse, DW., MacDonald, E., Wicker, RB., "3D Printing multifunctionality: structures with electronics", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Cilt 72, Sayfa 963-978, 2014.
42. <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>, 29 Şubat, 2016.
43. Lu, Y., Vatani, M., Kim, H-C., Lee, R-C., Choi, J-W., "Development of direct printing/curing process for 3D structural electronics", Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Diego, 13-21 Kasım, 2013.
44. Maiwald, M., Werner, C., Zoellmer, V., Busse, M., "INKtelligent printing® for sensorial applications", Sensor Review, Cilt 30, Sayı 1, Sayfa 19-23, 2010.
45. Maiwald, M., Werner, C., Zoellmer, V., Busse, M., "INKtelligent printed strain gauges", Sensors and Actuators A: Physical, Cilt 162, Sayı 2, Sayfa 198-201, 2010.
46. Pal, E., Zöllmer, V., Lehmhus, D., Busse, M., "Synthesis of Cu_{0.55}Ni_{0.44}Mn_{0.01} alloy nanoparticles by solution combustion method and their application in aerosol printing", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Cilt 384, Sayı 1-3, Sayfa 661-667, 2011.
47. Pal, E., Kun, R., Schulze, C., Zöllmer, V., Lehmhus, D., Bäumer, M., Busse, M., "Composition-dependent sintering behaviour of chemically synthesised CuNi nanoparticles and their application in aerosol printing for preparation of conductive microstructures", Colloid and Polymer Science, Cilt 290, Sayı 10, Sayfa 941-952, 2012.
48. Wicker, RB., Medina, F., MacDonald, E., Muse, DW., Espalin, D., "Methods and systems for embedding filaments in 3D structures, structural components, and structural electronic, electromagnetic and electromechanical components/devices", 2013.
49. Bosse, S., Lehmhus, D., Lang, W., Busse, M., "Material-integrated intelligent systems: Technology and applications", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2018.
50. Hoerber, J., Glasschroeder, J., Pfeffer, M., Schilp, J., Zach, M., Franke, J., "Approaches for Additive Manufacturing of 3D Electronic Applications", Procedia CIRP, Cilt 17, Sayfa 806–811, 2014.

51. Montazeri, M., Yavari, R., Rao, P., Boulware, P., "In-Process Monitoring of Material Cross-Contamination Defects in Laser Powder Bed Fusion", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Cilt 140, Sayı 11, Sayfa 111001-111020, 2018.
52. Grasso, M., Colosimo, B. M., "Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review", *Measurement Science and Technology*, Cilt 28, Sayı 4, Sayfa 1-25, 2017.
53. Zarreh, A., Saygin, C., Wan, H., Lee, Y., Bracho, A., Nie, I., "Cybersecurity Analysis of Smart Manufacturing System Using Game Theory Approach and Quantal Response Equilibrium", *Procedia Manufacturing*, Cilt 17, Sayfa 1001-1008, 2018.
54. Malekipour, E., El-Mounayri, H., "Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt 95, Sayı 1, Sayfa 527-550, 2018.
55. Malekipour, E., Tovar, A., El-Mounayri, H., "Heat Conduction and Geometry Topology Optimization of Support Structure in Laser-Based Additive Manufacturing", *Springer International Publishing*, Sayfa 17-27, 2018.
56. Seifi, M., Gorelik, M., Waller, J., Hrabe, N., Shamsaei, N., Daniewicz, S., Lewandowski, J. J., "Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification", *JOM*, Cilt 69, Sayı 3, Sayfa 439-455, 2017.
57. Norfolk, M., "Fabrisonic-building fiber optic strain sensors into metal components", <https://additivemanufacturing.com/2018/02/26/fabrisonic-building-fiber-optic-strain-sensors-into-metal-components/>, Şubat 26, 2018.
58. White, D., "Ultrasonic consolidation of aluminum tooling", *Advanced Materials Processes*, Cilt 161, Sayı 1, Sayfa 64–65, 2003.
59. Mukherjee, T., DebRoy, T., "A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components", *Applied Materials Today*, Cilt 14, Sayfa 59–65, 2019.
60. Knapp, GL., Mukherjee, T., Zuback, JS., Wei, HL., Palmer, TA., De, A., DebRoy, T., "Building blocks for a digital twin of additive manufacturing", *Acta Materialia*, Cilt 135, Sayfa 390–399, 2017.