



# Büyük ve Karmaşık Parçaların Katmanlı İmalatı için Robotik Sistem

T. Felsch<sup>1</sup>, U. Klaeger<sup>1</sup>, J. Steuer<sup>2</sup>, L. Schmidt<sup>3</sup>, M. Schilling<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer IFF, Magdeburg, Almanya<sup>2</sup>

Glamaco Engineering GmbH, Coswig,

Almanya<sup>3</sup> TU Ilmenau, Ilmenau, Almanya

<sup>4</sup>3D-Schilling GmbH, Sondershausen, Almanya

E-posta: torsten.felsch@iff.fraunhofer.de

**Özet-Bu makalede, büyük parçaların üretimi için endüstriyel robotların eklemeli üretim teknolojileri ile birlikte kullanımı sunulmaktadır. Bildiri, endüstriyel şirketler ve araştırma kuruluşları tarafından tamamlanan ve devam etmekte olan büyük bir ortak projenin sonuçlarını özetlemektedir. Amaç, 1.000x1.000x1.000 mm<sup>3</sup> hacimli herhangi bir termoplastik malzemeden büyük modelleri ve kalıpları uygun maliyetli bir şekilde inşa eden "gerçek" bir üç boyutlu eklemeli robotik sistem geliştirmektir. Sistem, esnek ve uygun maliyetli endüstriyel robotlar ile yüksek yenilikçi eklemeli üretim gibi her iki dünyanın avantajlarını bir araya getiriyor. Özellikle üretim teknolojisi, sistem mimarisi ve hareket planlaması sunulmaktadır.**

**Anahtar Kelimeler-endüstriyel robot; eklemeli üretim; robot işleme**

## I. GİRİŞ

İmalatın rekabet gücü büyük ölçüde üretkenliğine, esnekliğine ve pazar taleplerine tepki verme çevikliğine bağlıdır. Eklemeli imalat, özellikle kısa sürede büyük parçalar üretebildikleri takdirde, bu tür bir rekabet gücüne ulaşmak için kilit bir unsurdur. Mevcut katmanlı üretim sistemleri yalnızca sınırlı boyutta modeller üretmekte ve uygulama alanlarını büyük ölçüde kısıtlayan ince katmanlarda yavaş inşa hızları sağlamaktadır. Büyük parçaların üretimi muazzam zaman alıcıdır veya mevcut teknolojilerle hala mümkün değildir. Kalın katmanlı biriktirme, biriktirme sürelerini azaltmak için yaygın olarak kullanılan ince katmanlara bir alternatif olabilir, ancak yoğun bir son işlem gerektirir.

Diğer taraftan, robotla işleme genel olarak üretim sistemlerinin tasarlanma şeklini değiştirmektedir. Endüstriyel robotlar, ortak kullanımdan kaynak, frezeleme ve boyamaya kadar çeşitli üretim görevlerini gerçekleştiren yüksek verimli ve esnek üretim sistemlerinin geliştirilmesi için kanıtlanmış bir alternatif teknoloji sunmaktadır. Bu nedenle, robotların üretim süreçlerine eklenmesi dünya çapında sürekli artmaktadır.

## II. SON TEKNOLOJİ

### A. Robot İşleme

Büyük prototipler oluşturmak için robotik sistemlerin kullanımı çok sayıda araştırma projesinin odak noktası olmuştur [1]. Robotik öncelikle büyük parçaları frezelemek için kullanılmıştır. Dezavantajları şunlardır

CNC freze makinelerine göre mutlak doğruluğu ve robot kinematığının sertliğini azaltmıştır [2]. Yerleşik katkı uygulamaları, PU'yu önceden frezelenmiş (polistiren) modellere köpürtmek için portal robotları kullanır. Günümüzde, tek bir kontrol noktasından çalıştırılan çoklu robot sistemleri, büyük bileşenli kaynak veya çoklu işlem hücreleri gibi tekrarlayan üretim görevlerine sahip birçok uygulamada yaygındır [3]. Buna karşın, çok değişken görevlere sahip çoğu işleme süreci tek robot sistemleri tarafından gerçekleştirilmektedir.

### B. Katmanlı Üretim

Farklı avantajlarına rağmen, eklemeli üretim sistemleri seri üretim için sadece sınırlı ölçüde yerleşik hale gelmiştir. Mühendislik açısından, toz bazlı sistemler (metal, polimer, seramik) öncelikle üretim hızı ve yapı alanı ile ilgili eksikliklere sahiptir. Ayrıca, yüzey kalitesi ve mukavemet veya tutarlılık ve süreç güvenilirliği gibi temel parça özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir [4].

Mevcut eklemeli üretim makinelerinin çoğu ince katman biriktirme prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşımla üretilen nesnelerin yüzey kalitesi, katman kalınlığının bir fonksiyonudur. Uygun yüzey kalitesini garanti etmek ve yeniden işlemeyi en aza indirmek için genellikle 50 - 200 mikron aralığında çok ince katmanlar gereklidir [5]. İnce tabaka biriktirme işlemleri tipik olarak düşük yapı oranlarına sahip olduğundan, üretililecek parçaların boyutu sınırlıdır veya büyük nesneler için yapı süreleri çok uzundur.

Eklemeli üretim makineleri, 50 mikron veya daha ince katmanlar üretmek için son derece hassas bileşenlere ihtiyaç duyar. Çalışma alanı arttıkça makinelerin maliyeti önemli ölçüde arttığından, eklemeli üretim makinelerinin yaklaşık %95'i 300 x 300 x 250 mm<sup>3</sup> kadar küçük çalışma alanlarına sahiptir [6].

Katmanlı üretim makinelerinin çoğu, özellikle sıcaklık ve atmosfer olmak üzere tanımlanmış süreç koşullarını korumak için izole odalarla donatılmıştır. Bu aynı zamanda çalışma alanını ve parçaların boyutlarını da sınırlar. Bazı teknolojik yaklaşımlar, katman kalınlığını artırarak yaygın ince katman biriktirme işlemlerinin eksikliklerinin üstesinden gelmeyi vaat etmektedir. Büyük ölçekli yazarların son gelişmeleri, 1100 x 900 x 850 mm<sup>3</sup> kadar büyük boyutlara ve 1 mm kadar kalın katman kalınlıklarına sahip termoplastikleri işleyebilmektedir [7], [8].

Ayrıca 2½D'de de üretim yapmaktadırlar, ancak düşük üretim hızlarında ve nispeten düşük yüzey kalitesinde. 2010 yılında [9], uçaklar için büyük yapısal bileşenler üretmek üzere tel ve ark katkılı üretim geliştirmiştir. Bu yöntem, 4 mm kalınlığa kadar katman kalınlıklarında 2000 x 1000 mm boyut aralığında katman katman kaynak boncukları uygulamak için robotların kullanılmasını gerektirmektedir.

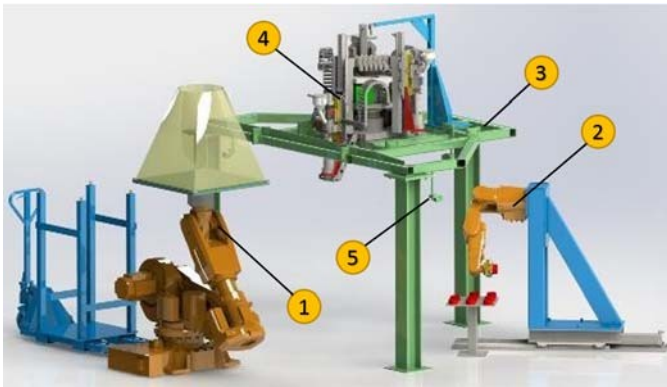
### III. ÜRETİM SİSTEMİNİN TASARIMI

Ortak araştırma projesi, termoplastik malzemeden geometrik olarak karmaşık büyük parçalar üreten yüksek performanslı bir sistemde eklemeli üretim ve evrensel endüstriyel robotiğin avantajlarını birleştirerek mevcut eklemeli üretim sistemlerinin mevcut eksikliklerinin üstesinden gelen yeni bir üretim yaklaşımına dayanmaktadır.

Bu nedenle, özel olarak tasarlanmış bir ekstrüder malzemeyi sürekli olarak dikey olarak (yerçekimi yönünde) uygulayacak ve boncukların tanımlanmış ve tekrarlanabilir geometrilere sahip olmasını sağlayacaktır. Malzemenin uygulanması ve soğutulması, plastiklerin viskozitesini sabit tutmak ve parçaların küçülmesini veya deforme olmasını önlemek için sürekli olarak kontrol edilecektir. 6 eksenli bir endüstriyel robot, sabit ekstrüderin altındaki yapı platformunu tutarak ve yönlendirerek 2½D yapı sürecini yürütür. Diğer bir robot, ek işlev elemanlarını (kesici uçlar) doğrudan parçaya, üretim sürecine paralel olarak entegre eder. Sistem ilk etapta 1.000x1.000x1.000 mm<sup>3</sup> hacimli ve maksimum 25 kg ağırlığındaki parçalar için tasarlanmıştır.

Üretim sistemi aşağıdaki temel bileşenleri içerir (Şekil 1):

- parçaları tutan ve işleyen yapı platformuna sahip bir endüstriyel robot (1),
- kesici uçları konumlandıran bir başka robot (2),
- ekstrüder ünitelerini tutan bir taban çerçevesi (3),
- iğneli nozullara sahip üç ekstrüder ünitesi (4),
- sıcaklıkları (parça yüzeyi, eriyik sıcaklığı) ölçen ve geometri verilerini tarayan bir tarayıcı (5) ve
- çarpışma dedektörü ile komple sistem için bir kontrol ünitesi



Şekil 1. Üretim sisteminin CAD düzeni.

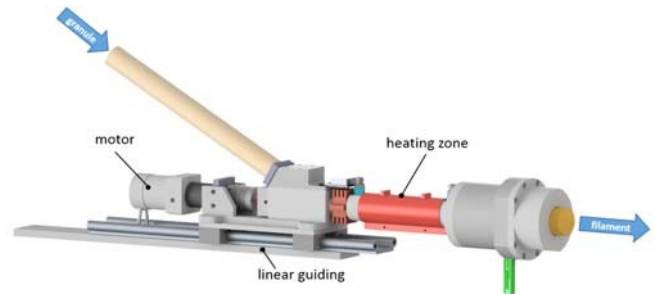
Sistem konsepti üç ekstrüder ünitesi içeriyor, böylece farklı malzemelerden parçalar üretmeyi mümkün kılıyor

sert-yumuşak kombinasyonları, farklı renkler ve cam ve karbon fiber dolgulu malzemeler. Yapı alanındaki sürekli çevrimiçi sıcaklık ölçümü, plastiklerin viskozitesini sabit tutar. Çok malzemeli sistemlerin kullanımı ve ek fonksiyon elemanlarının (insertler) entegrasyonu, plastik bir parçaya çok sayıda özel talebin dahil edilmesini mümkün kılar.

#### A. Ekstrüder Ünitelerinin Geliştirilmesi

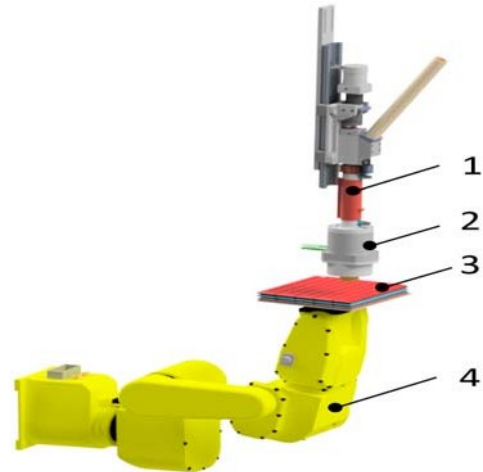
Ekstrüder üniteleri üretim sisteminin temel bileşenleridir. Üniteler granül formdaki standart termoplastik plastik malzemeyi doğrudan işler. Daha önce standart FDM sistemlerinde kullanılan filament malzemenin yerini alarak beş kata varan önemli bir maliyet avantajı sağlar. Bu da uygun maliyetli üretimi kolaylaştırarak yeni teknoloji için başka kullanım alanlarının da önünü açacaktır.

Ekstrüder ünitesi (Şekil 2) standart granüllerden (ABS, SAN, PMMA, PP, PC, PC / ABS, PLA, PVA) maksimum 5 kg/saat parça üretim hızı için tasarlanmıştır. Ekstrüder nozülünün çapı 1 ila 3 mm aralığında değiştirilebilir.



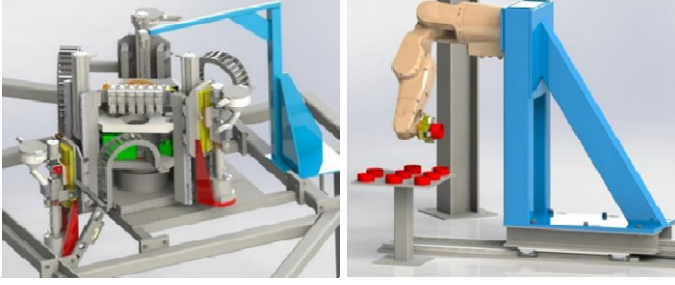
Şekil 2. Ekstrüder ünitesi.

Ekstrüder ünitesinin modüler tasarımı, yapı malzemesine dayalı sistem değişikliklerine esnek bir şekilde yanıt verilmesini sağlar ve kurulum sürelerini en aza indirir (Şekil 3). Özel tasarım iğne nozülü (2), sürekli ve tutarlı bir malzeme akışı sağlamak için ekstrüdere (1) monte edilmiştir. Bu, yapı işlemi sırasında kontrolsüz filament oluşumunu önler. Isıtılmış yapı platformu (3), kontrol programı aracılığıyla ekstrüderlerle etkileşime giren endüstriyel robot (4) üzerine kenetlenir.



Şekil 3. Ekstrüder ünitesi ve yapı platformlu robot.

Üç ekstrüder ünitesi döner bir magazin içinde düzenlenmiştir (Şekil 4 solda). Bir dizi pnömatrik silindir, ekstrüderlerin her birini ayrı ayrı dikey yönde çalışma düzlemine hareket ettirebilir. Bu, gantry'ye güvenli bir mesafe sağlar ve aynı zamanda robotun çalışma aralığını artırır. Parçalar, mafsallı bir robota monte edilmiş bir üretim platformu üzerinde katman katman üretilir. Yapı platformu, anizotropi olmadan üç boyutlu bir parça üretmek için 6 eksenli harekete sahip olduğundan, malzemenin uygulandığı nokta her zaman ekstrüder nozulüne diktir. İkinci bir robot, parçaya ek bileşenler (örneğin metalik uçlar) yerleştirir. Bu, sistemle basılamayan diğer işlev öğelerinin otomatik olarak entegre edilmesini mümkün kılar (Şekil 4 sağda).

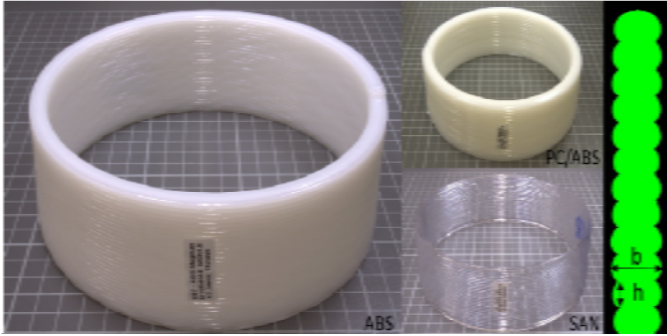


Şekil 4. Ekstrüder magazini (solda) ve kesici uç taşıma robotu (sağda).

#### B. Baskı Malzemesinin Geliştirilmesi

3D baskı işlemi, farklı polimerlere dayalı özelliklere sahip uygun termoplastik malzemelere ihtiyaç duyar. Ekstrüzyon hattında sabit ve tekrarlanabilir bir malzeme akışı, termal katsayıların azaltılması kadar önemlidir. Geniş bir sıcaklık aralığında tek tip bir yapım süreci kalitesi talep edilmektedir.

Farklı boyutlardaki peletlerle yapılan ön testler, ekstrüder ünitesinin herhangi bir standart peleti ilave modifikasyon olmadan işleme kapasitesine sahip olduğunu belirlemiştir. Bu da yeni karışımlar üretmek için karmaşık ve pahalı özel tasarımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmayı mümkün kılmıştır. Mevcut testler, sert ve yumuşak bileşenleri birleştiren bir malzeme spesifikasyonunun geliştirilmesiyle ilgilidir. İlk bulgular iç gerilimlerin özellikle çatlamaya neden olduğunu ortaya koyduğundan, farklı SEBS ve TPE, yapıştırma malzemesi olarak kullanılmak amacıyla test edilmektedir. Ekstrüzyon polimer köpüklerinin ilk testleri de yapılmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Ekstrüde polimer köpük.

Sonraki adımlar, su ve/veya alkolde çözünen substratlar için özel reçinelerin geliştirilmesi ve test edilmesini kapsayacaktır. Suda çözünen PVA'nın salın ajanlarıyla ve salın ajanları olmadan karıştırıldığı çalışmalar şu anda yürütülmektedir. Bazı katkı maddelerinin cam geçiş sıcaklığı üzerindeki etkisi burada özellikle ilgi çekicidir.

#### C. Süreç Kontrol Sistemi

İşlenmiş granüllerin stabil viskozitesinin sağlanması, homojen parçaların üretimi için temel bir kriterdir. Bu, üretim sürecinin sürekli izlenmesini gerektirir. Sistemin farklı sıcaklıklara ısıtılan münferit alt sistemlerinin tanımlanması gerekir. Polimerler 150-300° C sıcaklıklarda işlenirken, bir parçanın aynı anda 50-100° C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulması gerekir.

İzleme ünitesi en az 70°'ye kadar ısıya dayanıklı olmalıdır.

C. Bu talepler, 150° C çalışma alanı sıcaklıklarında 2 mm çapında bir noktayı (yapı platformundan 600 mm mesafede) tarayan ve maksimum 75° C ortam sıcaklıklarına dayanabilen bir video pirometrenin geliştirilmesine temel oluşturmıştır.

#### D. Yapı Platformunun Tasarımı

Sistemin farklı boyutlardaki parçalar için kullanılacak olması, parça boyutuna bağlı olarak yapım platformlarının kolayca değiştirilmesini veya bitmiş parçaların çıkarılmasını gerekli kılmaktadır. Bu, tüm yapım sürecinde yüksek bir esneklik sağlar. Bir parça doğrudan robot tarafından tutulan döner bir platform üzerine inşa edildiğinden, konumlandırma doğruluğu taleplerini karşılamak için özelleştirilmiş bir sıfır noktalı bağlama sistemi geliştirilmiştir. Böylece platform, belirli toleranslara sahip bir adaptörle robotla tutarlı bir şekilde birleştirilebilir. Platformun ilk yükseltmesi, dört farklı boyutta plastik plaka monte etmek için noktalar ve maksimum 1.000x1.000x1.000 mm<sup>3</sup> yapı boyutu sağlar.

### IV. ÇOKLU ROBOTLARIN HAREKET PLANLAMASI VE KONTROLÜ

#### A. Hareket Planlama

Çoklu robot sisteminin yörüngelerini hesaplamak amacıyla üretim sistemini çalıştırmak için karmaşık bir yazılım mimarisi gereklidir. Bu, bir CAD sisteminde tasarlanan veya 3D tarayıcılar gibi tersine mühendislikten elde edilen parçanın 3D CAD verilerinden robot yolunun otomatik olarak oluşturulmasına yönelik stratejileri içerir.

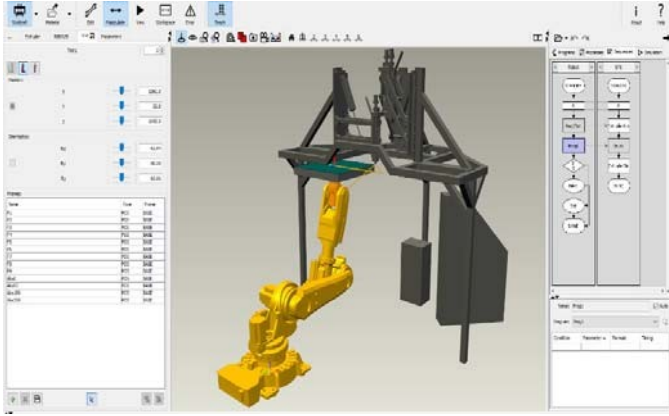
CAD modeli standart STL formatına dönüştürülmeli ve yüzeylerin fiziksel konumu hakkındaki bilgilere dayanarak farklı bölümlere ayrılmalıdır. Belirli kontur elemanları seçilerek ya da kenarlar otomatik olarak tespit edilerek etkileşimli olarak bölünebilir. Tek yönlü dilimleme algoritması, STL modelini yapı platformuna paralel bir dizi eşit aralıklı katmana böler. Bu dilimlere dayanarak, takım yolu yapı stratejilerine göre hesaplanır. Yazılım, yarıçaplar çok küçük olduğunda tutarsızlıkları tespit eder ve anında düzeltir. Çok hassas bir şekilde hesaplanması gereken ofset yüzeyler için hareket planlaması önemli bir görevdir. Takım yönü ile hizalanmış eşit mesafeli elemanlar kullanılır ve böylece doğru bir ofset düzlemi oluşturulur.



Diğer yazılım rutinleri, destek yapılarının oluşturulmasının yanı sıra bunu yapmak için gereken 3D inşa stratejileriyle de ilgileniyor.

### B. Çoklu Robotlar için Kontrol Sistemi

Projedeki en önemli öncelik, üretim sistemi için kontrol sisteminin geliştirilmesidir. Yenilikçi kontrol sistemi tasarımının bileşenleri arasında bileşen kontrolü, hareket planlama ve makine izleme ve çalıştırma yer almaktadır. Bu alt projede, simülasyon makine kontrolörü (PLC, gerçek zamanlı bir arayüzle robot kontrolü) ile birleştirilmekte ve çalışma alanlarındaki çarpışmaları önleyen (hatalı makine durumlarını ortadan kaldıran) bir güvenlik spesifikasyonu geliştirilmektedir. Ayrıca, iş parçaları ve malzemeler tüm operasyonlara dahil edilmekte ve oluşturulan modellerin gerçek zamanlı kabiliyeti gerçek koşullar altında gösterilmektedir. Fraunhofer IFF tarafından geliştirilen entegre simülasyon ve yazılım aracı VINCENT, karmaşık üretim operasyonlarına yönelik kontrol sistemini geliştirmek için kullanılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. VINCENT ile simülasyon tabanlı geliştirme.

Hareket planlama ve olay simülasyonuna yönelik bu yeni bütünleştirici yaklaşım, sistem inşa edilmeye başlamadan önce bile geometri ve işlevin test edilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece makine ve yapısal unsurların yanı sıra kontrolör, montajlar ve ortam da paralel olarak geliştirilebilir ve optimize edilebilir. Sistemin sanal modelinin gerçek kontrol sistemine çevrimiçi olarak bağlanması, farklı sistem bileşenleri ile üretilmekte olan karmaşık parça arasındaki olası çarpışmaların görev yerine getirilmeden önce belirlenmesini mümkün kılar. Hem kısa hareket dizileri hem de birkaç saat süren eksiksiz üretim programları önceden test edilebilir. Yazılım aracı, yerleşik sistemleri ve standartları birbirine bağlar (IEC61131-3 ile uyumlu bir program kodu oluşturur) ve CAD verilerini (STEP dosyaları) kolayca içe aktarır.

VINCENT'in en güçlü yanlarından biri, sınırlayıcı geometrileri bozmadan ayrıntılı CAD yüzey verilerini kullanarak hızlı çarpışma tespiti yapması ve sistem bileşenlerinin her biri için güvenlik bölgesi oluşturarak hareket aralığını eksiksiz ve doğrulanabilir bir şekilde analiz etme yeteneğidir. Bu verimli program, bilgiyi tasarım mühendislerinden kontrol mühendislerine güvenilir ve eksiksiz bir şekilde aktarır. Programdaki diziler

Makine, veri alışverişi için yerleşik standart formatlar kullanılarak baştan sona kolayca tanımlanır.

### V. DOĞRULAMA VE GENEL GÖRÜNÜM

Bu yeni yaklaşımın teknolojik olarak uygulanabilirliği ve uygun maliyetli kullanımı, büyük parçalar için üretim sisteminin prototipi ile yapılan ilk testlerde gösterilmiştir. Temel sistem bileşenlerini ve malzeme bileşimini optimize etmek için daha ileri testler devam etmektedir. Parçalar üretilirken, örneğin farklı katkı maddeleri kullanarak malzemelerin termostabilitesini iyileştirmek çok önemlidir. Bir başka görev de, ekstrüder ünitelerinin bir fonksiyonu olarak üretim sürecinin optimizasyonu ve üretim alanının genişletilmesidir. Kontrol modülü için elektrikli bileşenlerin (sürücüler, sensörler, kontrol döngüleri, vb.) teknik özellikleri, ekstrüderin nihai portal tasarımını ve kesici uç taşıma elemanlarını içerecek şekilde derlenmeli ve ilerici mühendisliğe uyarlanmalıdır. Bir diğer önemli hedef de potansiyel çarpışma bölgelerinin güvenilir bir şekilde tespit edilmesi ve gerçek zamanlı çarpışma kontrolüdür.

### TEŞEKKÜR

Bu araştırma ve geliştirme projesi, Alman Federal Eğitim ve Araştırma Bakanlığı (BMBF) tarafından "Yarının Üretimi, Hizmetleri ve Çalışması için Yenilikler" (fon kodu 02P14A027) kapsamında finanse edilmekte ve Proje Yönetim Ajansı Karlsruhe (PTKA) tarafından yönetilmektedir.



### REFERANSLAR

- [1] Iglesias, I.; Sebastian, M.A.; Ares, J.E.: Robotik işlemenin durumuna genel bakış: mevcut durum ve gelecekteki potansiyel. Procedia Engineering Cilt 132, 2015, s. 911-917, MESIC Manufacturing Engineering Society International Conference 2015.
- [2] Pan, Z.; Zhang, H.: Programlamadan süreç kontrolüne robotik işleme: kuvvet kontrolü ile eksiksiz bir çözüm. Endüstriyel Robot: An Int. Journal 35 (2008) 5, s. 400-409.
- [3] Chen, Y. & Dong, F.: Robot işleme: son gelişmeler ve gelecekteki araştırma konuları. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2013) 66: 1489. doi:10.1007/s00170-012-4433-4.
- [4] Wein, S.: Überwachung des Maschinenzustandes zur Qualitätssicherung bei Lasersintermaschinen. 3D-Druck & Industrie, Jena, Eylül 2015.
- [5] Gebhardt, A.: Hızlı Prototipleme: Werkzeug für die schnelle Produktentstehung. Münih: Hanser 2012.
- [6] Wohlers Raporu 2015. ISBN 978-09913332-1-9, Wohlers Associates Inc.
- [7] Kosinüs Katkılı, <http://www.cosineadditive.com/am1>.
- [8] PICCO's 3D World GmbH, <http://www.piccos-3d-world.com>.
- [9] McKenna, B.: 3 boyutlu baskıda bir sonraki büyük şey: büyük alan katkılı üretim veya BAAM. The Motley Fool. 28. Eylül 2014.