

# GELİŞMİŞ İMALATTA SİBER, MODELLEME VE DEĞERLENDİRMENİN GELİŞEN BAĞLARI: VAKUMDA ARKLA ERİTME'NİN ÜÇ BOYUTLU BASKIDA KULLANIMI

Emerging Nexus of Cyber, Modeling, and Estimation in Advanced Manufacturing: Vacuum Arc Remelting to 3D Printing<sup>1</sup>

Joseph Beaman<sup>2</sup>, Felipe Lopez<sup>3</sup>

G eçtiğimiz onyılıda üç önemli teknik alanda muazzam gelişmeler yaşandı: programlama kapasiteleri, fiziğe dayalı modelleme ve değerlendirme metodları. Bu gelişmeler araştırma camiasında biliniyor olsa da henüz üretim endüstrisine büyük çapta yayılmadı. Üretim, Amerikan ekonomisinin canlılığı için birincil öneme sahip olduğu giderek daha da iyi anlaşılıyor. Küçük partili veya küçük hacimli imalat ve genellikle yüksek öneme sahip olan ürünler, üreticilere yepyeni iş alanları açmak için eşsiz bir fırsat sunuyor. Ürünün tasarım şartlarını karşılayıp karşılamadığını belirlemek ve onaylamak, küçük partili üretimde karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. Üretim sürecinin kontrolünde öncelikli hedef budur. Çağdaş proses

kontrolü istatistiklere dayalıdır ve büyük hacimli üretimde daha etkilidir. Bu tip proses kontrolü, tıpkı küçük partili üretimde olduğu gibi, ürün değiştiğinde pek etkili olmaz. Bu makale, küçük partili gelişmiş imalat için bu üç teknik alandan faydalanma fırsatlarını anlatıyor. Faydalı olabilecek iki uygulama alanı şunlardır:

1. Yeni bir üretim uygulama 3D Baskı veya Aditif İmalat
2. Bilinen bir üretim yöntemine uygulama-Süper Alaşım üretimi için Vakum Arkla Eritme

Buna özel olarak, küçük partili üretim için, kullanılan tekniğin bir örneği ile kontrol algoritmasını birleştiren, Siber Destekli İmalat Sistemleri (CeMs) ortaya konuldu ve müzakere edildi. Bu örnek, imalat görüntülemesi ve kontrol algoritmasının geniş kapsam-

lı ek deneyler yapılmaksızın değişen koşullara ayak uydurmasını sağlıyor. İmalattaki hata payının makul olması, üretim kusurlarının gerçek zamanlı tahmini, kusurların giderilmesi işleminin gerçek zamanlı kontrolü, küçük partili imalatın gerçek zamanlı görüntülenmesi ve kontrolü CeMs sisteminin temel hedefleri arasında yer alıyor. Bu hedeflere yüksek duyarlılık, hataların/kusurların modelini de içeren fiziğe dayalı modeller, belirsizlik ölçümü, gerçek zamanda çalışan indirgenmiş komut modelleri, ölçüm, gerçek zamanlı öngörü, gerçek zamanlı bilgisayar mimarisi, gerçek zamanlı zıt çözümler ve tek cins üretim yöntemleri için CeMs işlemlerini otomatikleştirme yollarıyla ulaşılabilir. Böylesi hassas kontrol algoritmalarının gelişimi ve bunların imalat proseslerine uygulanması rekabetçi bir avantaj sağlayabilir.

## ÜRETİMİN ÖNEMİ

Üretim, Amerika Birleşik Devletleri'nin ekonomisinin canlılığı ve ulusal güvenliği için büyük öneme sahiptir. Üretilen büyük miktardaki ürünlerin ve ortalamanın üzerinde maaş veren günümüz mesleklerinin yanı sıra, üretim sektörü geleceğin meslekleri haline gelecek yenilikler yaratmanın anahtarıdır.

Üretim, birçok iş imkanı sağlar ve günümüz mesleklerinin başında gelir. Fakat iş sağlamları ve geleceğin mesleklerini yaratmada oynadığı rol çok daha önemlidir. Üretim sektörü, AR-GE harcamalarının %72'sine karşılık gelir ve Amerikan endüstrisinin AR-GE iş gücünün %60'ına iş imkanı sağlar. Sonuç olarak üretim sektörü, hizmet sektörünün çoğunluğunu da kapsayan tüm ekonominin rekabetini ve gelişimini ilerleten birçok teknolojinin gelişimini ve üretimini sağlar [1].

Üretimin aynı zamanda ekonomik büyümeye de büyük katkısı vardır. Üretimin büyüme üzerinde diğer hiçbir sektörde görülemeyecek kadar çok etkisi vardır. Şekil 1'de de görüldüğü gibi, üretime yapılan 1 dolarlık talep, ekono-

mide 1,41 dolarlık destekleyici taleple sonuçlanır.

## İLERİ İMALAT

Kontrol sistemleri üretimde her zaman önemli bir rol oynamıştır; fakat bu makale, gelişmiş üretimde yer alan kontrol topluluğu için uygun ve eşsiz bir fırsatı konu alıyor. Gelişmiş üretim kesin hatlarıyla tanımlanmış olmasa da genellikle iki kategoriye ayrılır: 1) yeni üretim yöntemleri ve 2) mevcut üretim yöntemlerini zaman, maliyet ve verim açısından geliştirmek üzere teknolojinin kullanımı. Bu iki kategorideki kontrol toplulukları için fırsatlar biraz farklılık gösteriyor. Yeni üretim yöntemleri, genellikle modern fikirleri ya da teknolojiyi kullanmak için gerekli zamana ya da kaynağa sahip olmayan riskli başlangıç işleriyle bağdaştırılıyor. Ancak, yeni bir üretim yöntemi genellikle belirli onaylama prosedürlerinden yoksundur; bu nedenle teknoloji, prosese çok daha kolay bir şekilde dahil edilebilir. Mevcut yöntemler için yeni teknoloji ile ilgili uygun kaynaklar kolaylıkla bulunabilir; ama mevcut onaylama prosedürlerini değiştirmenin

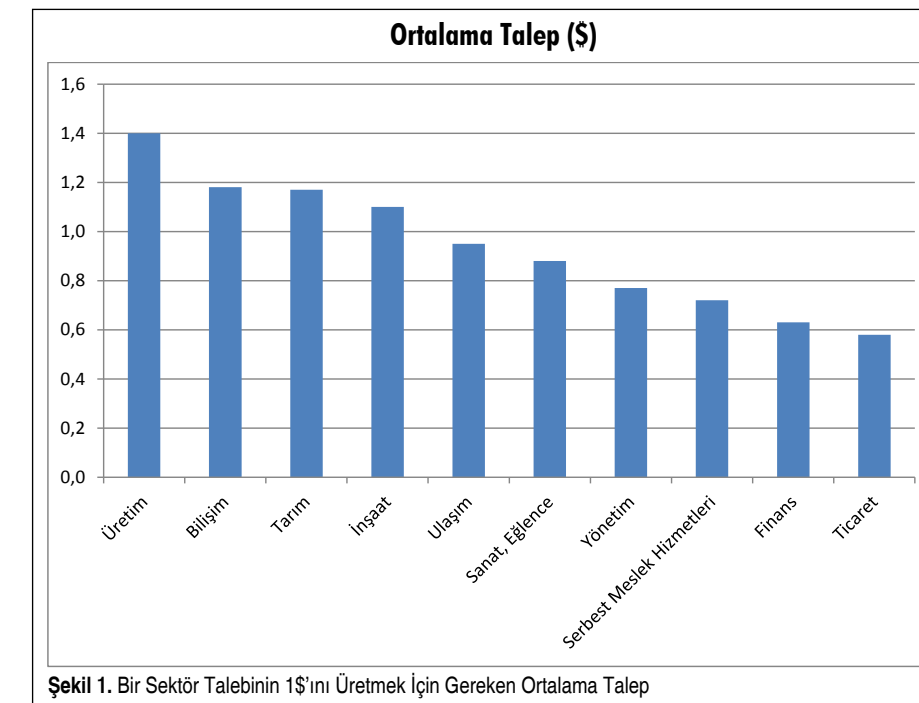
maliyeti biraz yüksek olabilir. Bu makale, hem yeni proseslere hem de uygulamaya geçirmek için engelleri aşma potansiyeline sahip mevcut proseslere uygun alanlara odaklanıyor.

## 3D BASKI: YENİ BİR ÜRETİM YÖNTEMİ

3D Baskı terimi birkaç yeni üretim yöntemini tanımlamak için sık sık kullanılıyor. Bu proseslerden biri, Seçici Lazer Sinterleme (SLS), 1980'lerin ortasında, bu makalenin ilk yazarının da yardımıyla Texas Üniversitesi'nde geliştirildi. 3D Baskı için daha önce Katı Serbestform Üretimi adını veriyorduk. Katı Serbestform Üretimi'ni bir nesnenin bilgisayardaki örneğinden, parçaları özel olarak şekillendirmeden ya da insan müdahalesi olmadan karmaşık katı nesnelere üretme yeteneği olarak tanımladık. Aslında bu, bir tasarımcının bilgisayar tasarım programından basılı kopyayı bulmasını ve 3D şeklin yapılmasını sağlayan bir dönüştürme işlemidir (Şekil 2).

Katı Serbestform Üretimi, parçaları özel olarak şekillendirmeksizin ve insan müdahalesi olmaksızın bir şeyin hızlıca nasıl yapılacağını çözmeye çalışır. Cisimde voksel hacim verici madde olarak kullanıldığında, voksel üretimi, bu sorun için kavramsal bir çözüm sunuyor. Bu konsept iki tür voksel ortaya koyuyor: yapısal vokseller ve destekleyici vokseller (Şekil 3). İsimlerinden de anlaşıldığı üzere, destekleyici vokseller cisme yalnızca geçici destek sağlarken ve zamanla sökülürken yapısal vokseller daha güçlüdür.

Seçici Lazer Sinterleme yöntemi, Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir: Oluşturulacak bir parçanın enine kesit modelinde bir toz yatağının üst yüzeyine lazer ışını enerjisi uygulanır. Işının konumu, galvanometre ile çalıştırılan bir ayna seti yardımıyla titizlikle kontrol edilebilir. Işın nereye çarparsa, çarptığı yerdeki toz erir (Bu sinterleme değil erimdir.) ve hemen ardından yapısal olarak katılır. Tarama süresi ve ışın

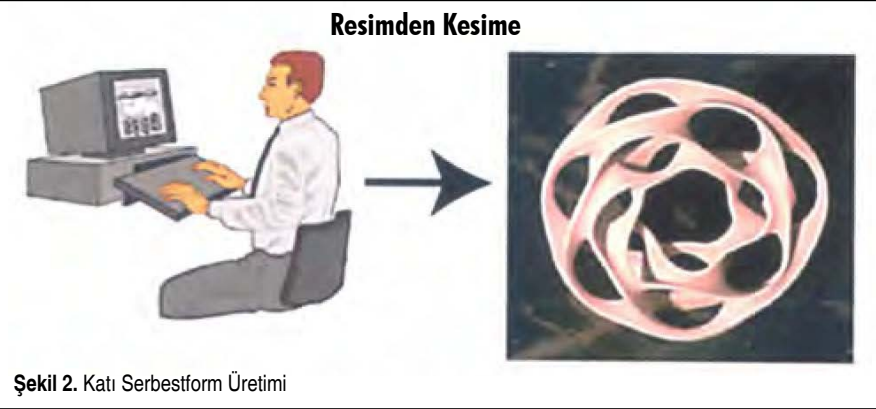


Şekil 1. Bir Sektör Talebinin 1\$'ını Üretmek İçin Gereken Ortalama Talep

<sup>1</sup> Mechanical Engineering (The Magazine of ASME) dergisinin Aralık 2014 sayısında yayımlanan yazı, Dilan Pamuk tarafından dilimize çevrilmiştir.

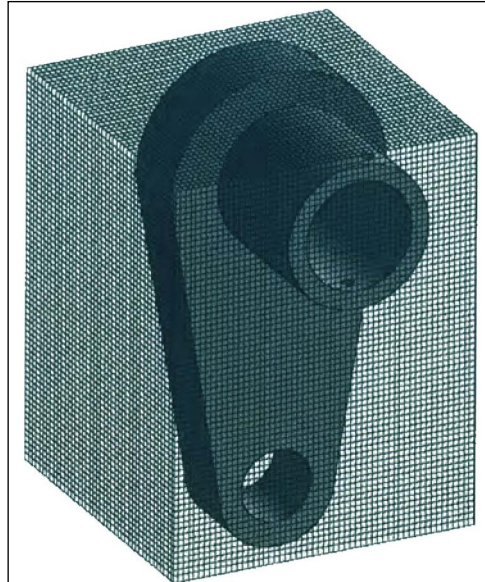
<sup>2</sup> DTM AŞ., Dynamic Systems, Measurement and Control (Dinamik Sistemler, Ölçüm ve Kontrol) Dergisi editörü

<sup>3</sup> Teksas Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ABD



Şekil 2. Katı Serbestform Üretimi

Beklendiği üzere, ilk sistemlerdeki proses kontroller oldukça zayıftı; şaşırtıcıdır ki proses kontroller günümüzde de zayıf olmaya devam ediyor. SLS, termal bir üretim yöntemidir ve polimer SLS'si için işlem bölmesine, bölmeli yüzey ısıtıcısı ve toz yatağı yüzey ısıtıcısı eklenir. Bölmeli yüzeye yönlendirilmiş tek noktalı kızılötesi sıcaklık sensörü, bölmeli ısıtıcılığı kontrol eder ve toz kartuşu yüzeyine yönlendirilmiş iki adet tek nokta kızılötesi sensör de toz kartuşu ısıtıcılarını kontrol eder. Bölmeli yüzeydeki ısı dağılımı, polimer SLS'sindeki başta gelen kontrol sorunlarından biridir. SLS makinelerindeki en iyi parçaları üreten polimerler genellikle yarı şeffaftır. Nispeten daha net erime noktaları olan yarı şeffaf polimerler, daha keskin kenarlar ve buna bağlı olarak daha hatasız parçalar üretilmesini sağlayabiliyor. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) polimerin önemli termal özelliklerini kaydeder. Temsili bir DSC çizimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu şekilde yer alan  $T_m$ , erime sıcaklığı;  $T_c$  ise yeniden kristalleşme sıcaklığıdır. Nesnenin şeklinin bozulmaması için, bölmeli yüzeyin çalışma sıcaklığı erime sıcaklığının altında, yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde olmalıdır. Ticari makinelerde gelişmiş kontrol prosesi, çok bölgeli ısıtıcıların



Şekil 3. Yapısal ve Destekleyici Voksellerle Voksel İmalatı

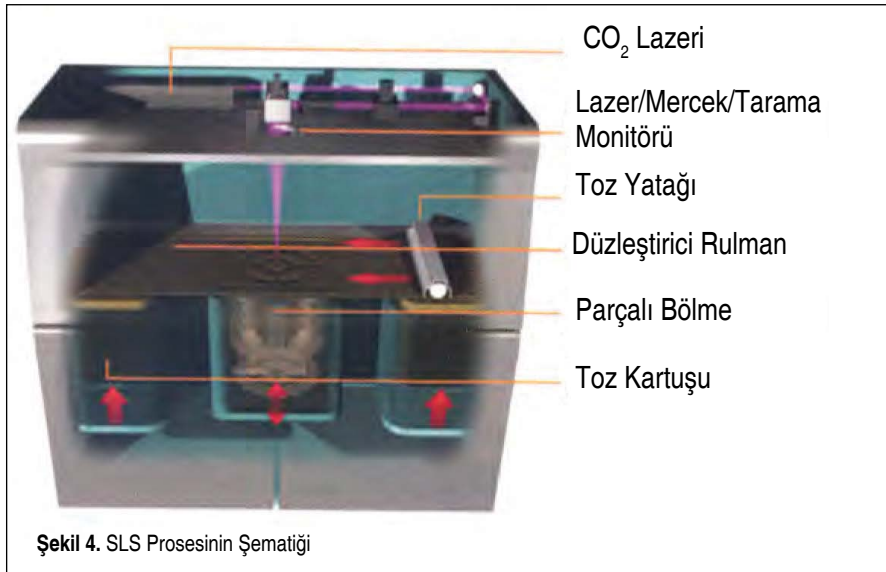
Katı modeller üç boyutlu nesnelere bilgisayarda ve monitörde kolaylıkla temsil edebilir. Katı Serbestform Üretimi'ndeki katı maddeyi katmanlara ayırma gibi işlemlerde bu katı modeller gereklidir.

2. Lazerler makul bir fiyata ulaşılabilir hale geldi. Lazerler, nesneyi katılaştırmak için gerekli olan enerjiyi sağlar ve geometrik açıdan hatasız parçalar üretebilmek için bu enerjiyi çok hatasızca kullanır.
3. Kişisel bilgisayarlar ticarileştirilmiştir. Katı Serbestform Üretimi'ndeki geometrik ve kesinlik gücünün işleyişi, kişisel bilgisayarlarda da ulaşılabilir olan bir hesaplama yetisi gerektiriyor.

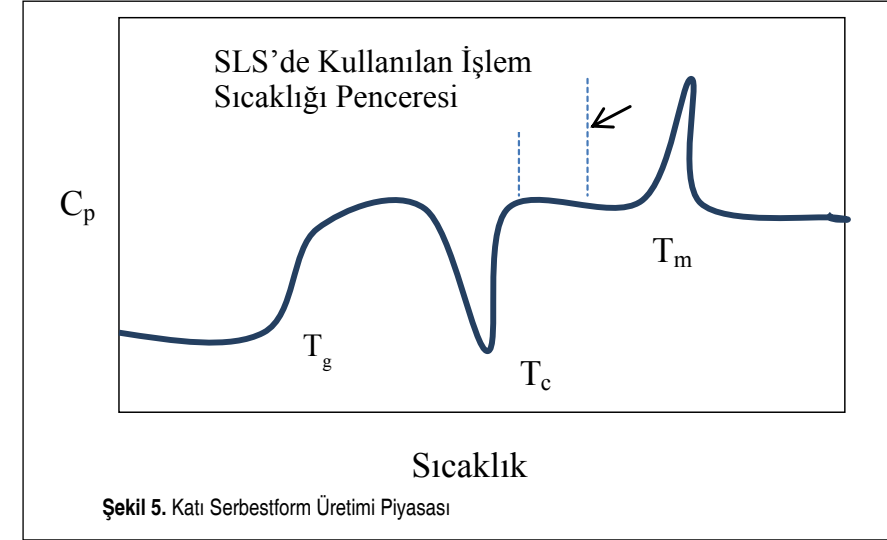
gücü, düzenli bir eriyik sızıntı derinliği elde edilecek şekilde düzenlenir. Bu cisimleştirmede toz, tozu katmanlara bırakan ve düzelten nokta dönüştürücü bir silindir tarafından, piston odaklı iki toz kartuşu aracılığıyla bölmeli silindire iletilir. Nesne, eriyik sızıntıyla birbirine yapıştırılmış tekrarlayan katmanlar halinde bölmeli silindirde dikey olarak oluşturulur. Bölmeli silindirde kontrol edilen bir piston, katman kalınlığını belirler. Tüm bu süreç boyunca eritilmeyen toz, nesneye tam destek sağlar.

SLS ve diğer Katı Serbestform Üretim yöntemleri 1980'lerde olgunlaşarak gelişime olanak veren üç teknoloji sayesinde mümkün olmuştur.

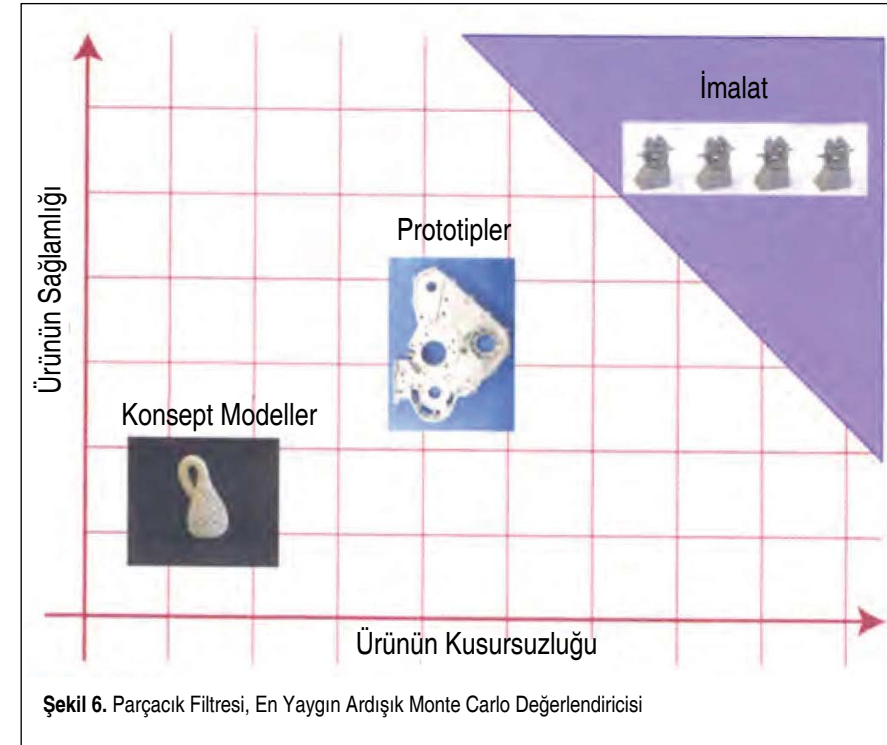
1. Katı modelleme ticarileştirilmiştir.



Şekil 4. SLS Prosesinin Şematiği



Şekil 5. Katı Serbestform Üretimi Piyasası



Şekil 6. Parçacık Filtresi, En Yaygın Ardışık Monte Carlo Değerlendiricisi

bölmeli yüzeyin tamamında aynı sıcaklığa erişecek şekilde ayarlanmasından ve işlem sıcaklık penceresindeki bu yüzey sıcaklığını korumak üzere tek noktalı kızılötesi sıcaklık sensöründen oluşur. Elbette bu metodla bölmeli yüzeyin tamamının sıcaklığı ölçülemez; çünkü kontrol edilen yüzey noktasına göre büyük farklılık gösterir. Bu farklılığın sebebi, hem geriye kalan lazer sıcaklığı hem de konveksiyon soğutma olabilir.

Bu işlemin amacı farklı nesnelere oluşturmak olduğu için, farklılığın sebebi de nesneden nesneye değişkenlik gösterir.

Aditif İmalat makinelerindeki proses kontrol güvenilir değildir; çünkü SLS teknolojisi, ilk başta, prototiplerin hızlı üretimi için ticari bir ihtiyaçtan doğmuştur. Piyasanın teknik ve kalite kontrolü için gereken koşullar, geleneksel üretimdekinden farklıdır. Şekil

6'da gösterildiği gibi, konsept modeller daha az kesinlik ve daha az sağlamlığa ihtiyaç duyar. Proses kontrolü çok az olan ya da hiç olmayan ve giderek ucuzlamaya devam eden makineler, bu konsept modeller piyasasına elverişli bir ortam sağlar. Spektrumun diğer ucunda ise nispeten daha yüksek doğruluk ve güç gerektiren gerçek üretimi bulunuyor. Bu, hızlı prototip üretimi için tasarlanan makinelerin yaptığı Aditif İmalat için büyüyen bir piyasa sunuyor. Prototipler çoğunlukla biçim, uyum ve işlevin ilk hali için kullanılır; fakat uzun süre geçerli olmaları şart değildir. Ayrıca, prototip ürünler arasındaki çeşitlilik, üretilen nesnelere arasında olduğundan daha çok tolere edilebilir.

Gerçek Aditif İmalat'ın gelişimi geçtiğimiz 10 yılda oldukça yavaş ilerledi ve aeroskop endüstrisi tarafından benimsendi. Mevcut aeroskop sistemlerinde Aditif İmalat yoluyla üretilmiş birçok polimer parça bulunuyor. Bunların çoğunluğu tüpler gibi yapısal olmayan ürünlerdir. Bu ürünler, ürüne özel şekillendirme olmaksızın yapılar ve Aditif İmalat'taki geometrik çeşitlilik sayesinde hemen hemen her şekilde olabilir. Bu, ürün sayısında ve maliyetinde büyük bir düşüş sağlar. Hatta daha da önemlisi, tek bir nesnenin üretim maliyeti, herhangi bir sayıda nesnenin üretim maliyetiyle neredeyse aynıdır. Çoğu üretim şeklinde hacim arttıkça fiyatta büyük düşüşler görülür. Aditif İmalat'ın bu özelliği uzun kuyruk adı verilen ürünler için yeni bir iş modeli sağlayabilir [3]. Bu, özgün ürünlerin çok sayıda satışından daha kazançlı olduğu bir stratejidir.

Aditif İmalat'ın bir başka yönü de işlemlerin genellikle insan müdahalesi olmadan işleyebilmesidir. Bu da ucuz iş gücü olan ülkelerde yapılan üretimden daha ekonomik olan yerel üretim modelinin benimsendiği bir iş alanı sağlar. Bu ve başka sebeplerden ötürü, iş dünyası Aditif İmalat'ın sahip oldu-

ğu potansiyelden dolayı çok büyük bir heyecan içerisindedir. Ancak, Aditif İmalat'ta yeterli teknik kontrole ulaşamadığı sürece, bu potansiyellerin hiçbirini gerçeğe yaklaşılamayacaktır. Aditif İmalat'ın ekonomik üretimi 10.000'den fazla olabileceği halde [4], çoğunlukla küçük partili üretimler için kullanılır. Çağdaş proses kontrol, istatistiklere dayalıdır ve en çok büyük miktardaki üretimde işe yarar. Bu tip proses kontrol, şartlar ya da ürün değiştiğinde, küçük çaplı üretimde olduğu gibi, genellikle pek etkili olmaz. Aditif İmalat'a özgü bir durum olmasa da küçük partili üretimin proses kontrolü üretimin başarıya ulaşması için ciddi önem taşır. Bir sonraki bölümde, yalnızca Aditif İmalat'ın değil, diğer küçük partili üretim proseslerinde de bu kontrolün nasıl gerçekleştirileceğini anlatan bir metodolojiyi tanıtaacağız.

### KÜÇÜK PARTİLİ PROSES KONTROL

Üretim endüstrisinde sık sık kullanılan istatistiklere dayalı kalite kontrol prosesleri, küçük partili üretimde kullanmak için çok elverişli değildir. Geniş çaplı bir inceleme, ideal işleyiş şartlarında oluşan sapmaların kabul edilebilirlik miktarını belirleyen hata çubuklarının belirlenmesi için gereklidir; küçük partili üretimde veya ürünlerin kendilerine özgü özellikleri olduğunda ise bu işleyiş şartları iyi tanımlanmamıştır.

Üretim yöntemlerinde çok yaygın kullanılmamasına rağmen, kimyasal işlem endüstrisinde daha sık kullanılan modele dayalı prosesler, küçük partili üretim için farklı avantajlar sağlayabilir. Modellerin öngörülebilir doğasından ötürü, modele dayalı metodlarla, incelemenin çapı büyük ölçüde azaltılabilir veya incelemeye gerek duyulmayabilir. Bu prosesler, ürünlerin hatasız olduklarından emin olmak için niteliklerini düzenlemek amacıyla, üretime dair bilgileri üretim sırasında elde edilen ölçümlerle birleştirir.

Geleneksel modele dayalı yaklaşım-

larda bazı özgün indirgemeler yapılır. Örneğin ölçümlerin, iletişimin, ve veri işlemenin, zaman zaman bu elementlerin iç dinamiklerini görmezden gelen, eş zamanlı gerçekleştirilen görevler olduğu varsayılıyor. Bir CeMs proses kontrol sisteminde ise ölçümsel modeller, sensörler, işleticiler ve hesaplama üniteleri fiziksel üretim süreçleriyle etkileşim halindeki bir ağı parçası haline geldiği için durum farklıdır. Desteklediğimiz CeMs yaklaşımı, tüm ölçümsel bileşenleri ve fiziksel materyalleri tek bir kontrol sisteminde birleştirmeyi amaçlıyor.

CeMs, anında tepki için kontrol sistemiyle birleştirilirken bilgiyi etkin bir şekilde toplamak ve bu bilgileri işlemek üzere birbirine bağlanmış olan gömülü ve dağıtılmış sensörler, işleticiler ve ölçümsel ünitelerden oluşan genel siber-fiziksel bir sistemden kökenlerini alır. Bu yaklaşım, gözle görülür avantajlar sunar. Örneğin ölçümün ve bağlantının optimizasyonu, kapalı devre işleyişi için çok yavaş olduğu düşünülen metodların benimsenmesini sağlar. CeMs; üretim yöntemleri, ölçümsel modeller, hataların belirlenmesi, dağıtılmış sensörler, bağlantılar, ölçümlerin hızla işlenmesi ve kontrol algoritmaları gibi çalışmalarını kapsayan, birçok akademik branşı ilgilendiren bir çalışmadır. Bu yeni alan, teknik mühendisler, kont-

rol mühendisleri ve bilgisayar bilimcileri arasında bir işbirliği sağlamak üzere tasarlanmıştır.

### FİZİĞE DAYALI MODELLER

Yüksek duyarlılıklı, fiziğe dayalı modellerin bir kontrol mekanizmasında bir araya getirilmesi bundan on yıl önce oldukça zor olurdu. Son yıllarda, modelleme alanında muazzam gelişmeler yaşandı. Ticari modelleme için kullanılan paket programlar, bu modelleri geliştirmek için harcanan zamanda büyük bir düşüş sağladı. Bu modelleme araçları, kimyasal işlem endüstrisinde değişken parametrelerin elde edilen ürünlerin kalitesi üzerindeki etkisini incelemek üzere kullanılıyor ve böylelikle açık devre optimizasyonuna olanak sağlıyor. Küçük partili üretimlerde, ürünün kalitesini etkileyen modellenmemiş bozuklukların etkisi göz ardı edilemez. Ölçümsel modellerin değişken işleyiş şartlarına ayak uydurabilmesi gerekir; bu da modellerle sistem arasında kurulacak bir bağlantıyla ve gerçek zamanlı güncellemelerle gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım, üretim sürecinde çeşitlenen teknik dinamiklerine dair daha fazla bilgi edinilmesiyle sonuçlanır ve fiziksel olarak ölçülemeyen durumların gözlemlenebilmesini sağlar. Eğer ölçümsel bir model, algılama amaçlı kullanılıyorsa, bilgiye, kontrol meka-

nizmaları tarafından kullanabilmesi için yeterli olacak kadar hızlı dönüş yapabilmelidir; bu nedenle, bu modellerin hızlandırılmaları gereklidir.

Yüksek duyarlılıklı modellerin karmaşıklığı, işlem değerlendiricilerinin ve işleticilerin tasarımında kullanılmalarına engel oluşturabilir; bu nedenle, indirgenmiş düzendeki modellerin bazı özelliklerinin köreltilmesine ihtiyaç duyulur. İşin zor yanı, bunu yaparken giriş parametre uzayından çok çıkışa bağlı kalabilmektir. Doğrusal modellerde denge ve kesim, tekil pertübyasyon tahminleri, Hankel standart tahminleri, durum-uzay gerçekleştirmelerinin düzenini azaltmak için kullanılır; fakat bu metodların doğrusal olmayan modellerde kullanımı kolay değildir [5]. Bu tip senaryolarda, indirgenmiş düzenli modeller genellikle giriş parametre uzayını örnekleyen bağlantı noktalarından alınan anlık görüntülerle üretilir [6]. Böylelikle, indirgenen model bir kontrol döngüsü içerisinde ya da olasılıksal parametre uzaylarını örneklerken hızlıca değerlendirilebilir. Karşılaşılan zorluklardan biri de indirgenmiş düzeydeki modellerin çok sayıda girişlerine rağmen, söz konusu çıkışlara bağlı kaldığından emin olabilmektir.

### DEĞERLENDİRME

Üretimdeki anormalliklerin vaktinde saptanması ve düzeltilmesi zor bir iştir. Bunlar, genellikle net olarak ölçülemeyen parametrelerle ifade edilir veya zahmetli gözlemler yoluyla anlaşılması gerekir. Bu da duruma ve parametreye dair kesin tahminleri gerekli kılar.

Üretimde kullanılan materyal işleyimi, nakil denklemleri tarafından kontrol edilen süreçler içerir: sıvı mekaniği, ısı iletimi, ve kütle iletimi [7]. Bu denklemler yaygın olarak bilinirler; fakat bunlar oldukça doğrusal olmayan bir hale getiren duruma bağlı katsayılar tarafından kontrol edilirler. Doğrusal Gaussian senaryolarında kullanılabilen en

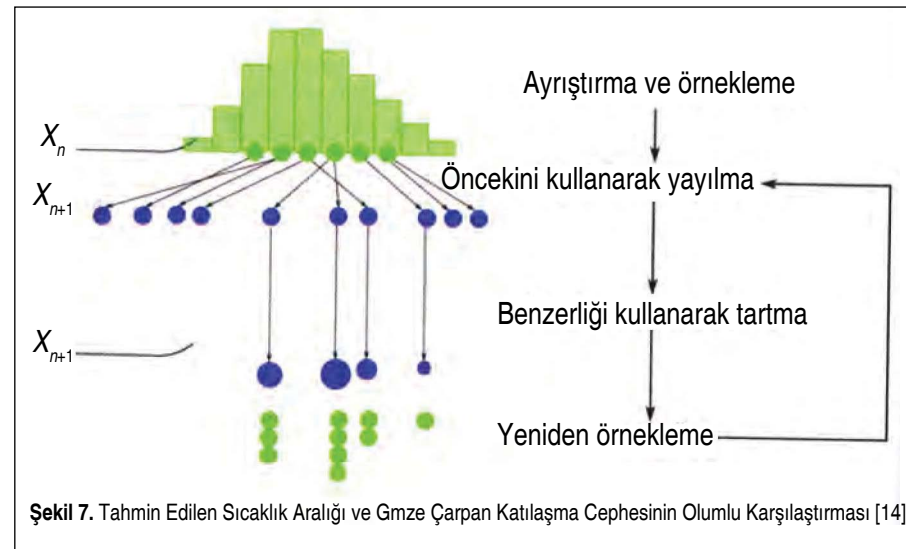
iyi çözümler, doğrusalsızlıklar ortaya çıktığında kullanışlı olmadığı için doğrusal olmayan değerlendirmeler hâlâ ilgi çekici bulunmaktadır. Literatürde kullanımı mümkün doğrusal olmayan değerlendirmeler üç gruba ayrılabilir: 1) klasik Kalman filtrelerinin eklentileri, genişletilmiş ve kokusuz Kalman filtreleri gibi, 2) model öngörücü kontrol literatüründe yaygın görülen hareketli çevren değerlendiricileri ve 3) Ardeşık Monte Carlo metodları.

Ardeşık Monte Carlo metodları, esnekliklerinden dolayı genellikle en çok umut vaat eden alternatif olarak görülür [8]. Bu metodlarda, süregelen bir olasılık yoğunluğu fonksiyonu, dayanağın sınırlı sayıdaki parçacıkla tanımlandığı, ve yayılım şeklinin parçacıkların üzerindeki ağırlıkla belirlendiği farklı olasılık ölçümleri ile benzerlik gösterir. Yeni bir ölçüm düzeni uygulanabilir hale geldiğinde bu parçacıklar ve ağırlıkları güncellenir. En yaygın iki Ardeşık Monte Carlo değerlendiricisi, parçacık filtre-

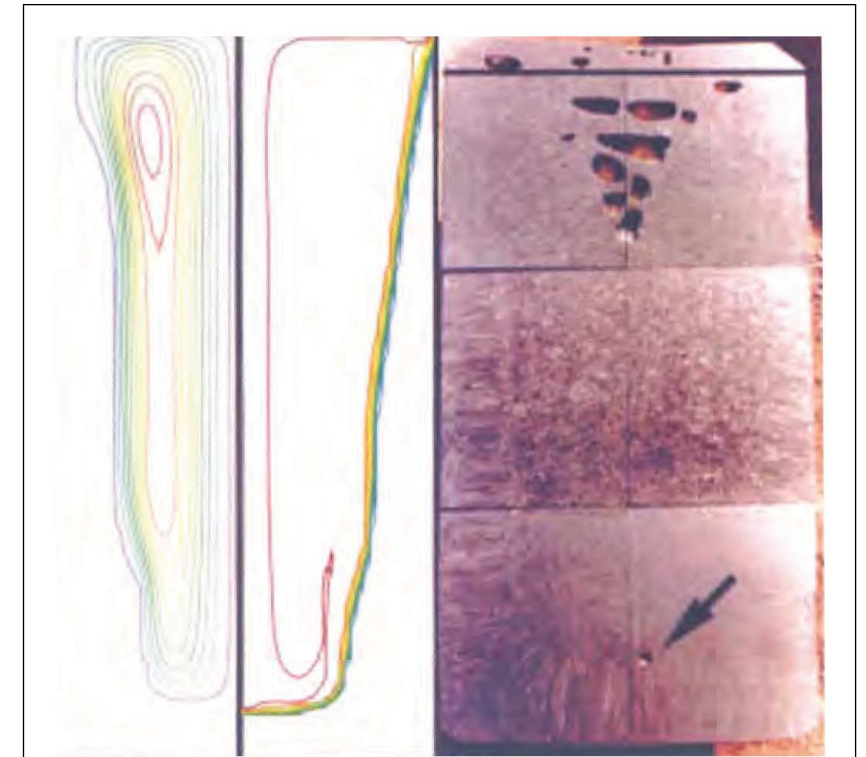
si ve yardımcı parçacık filtresi (Şekil 7), genellikle bilgisayar görüntüsü, finans, robotbilim vb. gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır. Son zamanlara kadar, çevrimiçi değerlendirme uygulamalarında Monte Carlo'nun benimsenmesinin önündeki en büyük engel, sayısal maliyetleri olmuştur.

### BİLGİSAYAR YAPISI VE ŞEBEKELERİ

İmalat sürecinin ve Monte Carlo metodunun gerçek zamanlı zorluklarını karşılayabilecek sayısal bir yapı, CeMs yaklaşımının başarısı için vazgeçilmezdir. Ölçümlere hız kazandırmanın bir yolu da onları ölçümsel bir ünite içerisinde kusursuz bir yapıyla ortaya koymaktır. Örneğin Ardeşık Monte Carlo metodları doğayla paralellik gösterir ve CPU'dan grafik işleme üniteleri (GPU) gibi daha uygun bir üniteye taşındıklarında performansları büyüklük sırasına göre gelişme gösterir [9]. İhtiyaç duyulursa, fiziğe dayalı modelleri hızlandırmak için de benzer yaklaşımlar izlenebilir [10].



Şekil 7. Tahmin Edilen Sıcaklık Aralığı ve Gmze Çarpan Katılışma Cephesinin Olumlu Karşılaştırması [14]



Şekil 8. Tahmin Edilen Sıcaklık Aralığı ve Göze Çarpan Katılışma Cephesinin Olumlu Karşılaştırması [14]

## VAKUMDA ARKLA ERİTME

Günümüzde bu metodoloji ile çalışmakta olan üretim tekniklerinden biri de Vakumda Arkla Eritme'dir (VAR). VAR da Aditif İmalat gibi küçük partili, yüksek değerli bir üretim tekniğidir. VAR, pahalı rotor sınıfı materyallerin üretimi için süperalaşım endüstrisinde kullanılır. Üretim, kesintili olarak gerçekleştirilir ve her bir ürünün üretimi tam bir gün ya da daha uzun sürer. Bu da üreticileri, üretim maliyetini azaltmak için daha yüksek verim sağlayan alternatif yaklaşımlar aramaya iter.

Aditif İmalat'ın tersine VAR, 1950'lerden beri kullanılmakta olan tam gelişmiş bir üretim tekniğidir ve sabit bir ekonomik makine kaidesine dayanır. Ayrım hassasiyeti olan süperalaşımın üretimi sırasında değişken bileşenleri gidermek ve homojenize etmek için kullanılır. Endüstride, vakum indüksiyon eritme (VIM), iletken cürüfla elektrikli eritme (ESR), yoğunlaştırılmış metal sünger veya diğer temel teknikler yoluyla elde edilen ingotların kalitesini artırmak için VAR'ın kullanımını oldukça yaygındır. Bu teknikte, içerisinde vakum bulunan ve suyla soğutulan bakır bir potanın içine bir metal elektrot yerleştirilir. Elektrodu eritmek için doğru akım kullanılır ve elektrot, potanın dibine düşerek ingot halinde

katlaşır. CeMs stratejisi VAR'da kullanılmak amacıyla halen geliştirilmeye devam ediyor.

Metodun birçok avantajına rağmen, VAR ingotları, çözünmemiş materyal çökeltileri (beyaz lekeler), konveksiyon değişkenliği (benekler) ve eriyik havuzundaki sapmaların (ağaç halkaları) yol açtığı ayrışma kusurlarına yatkınlık gösterebilir [11]. Bu tip kusurların oluşumu, istenilen erime ve katılma şartları sağlanarak engellenebilir. Suyun kaldırma kuvvetine bağlı akımlara yatkınlık azaldığı için, daha sığ olan sıvı havuzlarında eritmenin benek oluşumuna yatkınlığı azalttığı bilinmektedir. Öte yandan, sıvı havuzunun, katılmanın habercisi olabilecek herhangi bir çökelti materyalin çözünebileceği kadar derin olması da önemlidir. Beneklerin ve beyaz lekelerin oluşumunun engellenmesi, sıvı havuzunun benekleri engelleyecek kadar sığ; fakat beyaz lekeleri engelleyecek kadar derin olması arasında bir denge bulma işi gibi düşünülebilir [12].

Katılma cephesinde hiçbir ölçümün uygulanabilir olmaması, bu tip kusurların tamamen önlenmesinin önündeki en büyük engeldir. Buna rağmen, bir sonlu hacim modeli, zamanla değişen kontrol verilerini ve işlem parametrelerini açıklayacak şekilde güncellenerek, diğer türlü gözlemlenemeyen katılma

cephesine dair tahminleri bir araya getirmek üzere ocağa paralel olarak kullanılabilir. Şekil 8'de de görüldüğü gibi, bu metodoloji, sıvı havuzunun tahmin edilen derinliklerinin manuel olarak ölçülene kıyasla daha doğru olduğunu gösteren bir laboratuvar ölçekli deneyde yürütülmüştür [13].

1990'larda teknik optimizasyonları ve otopsi analizleri için kullanılan bir ölçümsel model, günümüzde katılma şartlarının gerçek zamanlı tahminlerini yansıtabilmektedir. Ölçümsel modellerin bir sensör şebekesinde bir araya getirilmesi, kontrol mekanizmalarının kapasitelerini artırdı; ama yine de yalnızca nominal şartlarda işlerken hatasız olan doğrusal bir modele dayalıydı. VAR sürecinin başında (start-up) ve sonunda (hot-top) oldukça kısa süren bir durum gözlenir. Bu şartlar altında kontrol daha zordur ve ayrım kusurları yaygın olduğundan ingotların bu parçalarının elden çıkarılması da yaygın bir uygulamadır. Süperalaşım üreticileri, bu kısa süren alanda kusurların önlenmesindeki kontrol kapasitelerini geliştirmeye de ilgi duyuyorlar ve bu da doğrusal olmayan değerlendirme uygulamaları ve kontrol tekniklerini gerekli kılıyor.

VAR, nispeten daha yavaş ilerleyen bir süreçtir ve bu yüzden de Aditif İmalat gibi hızlı teknikler kadar kısıtlayıcı olmadığı için, zaman hassasiyeti olan teknikleri test etmek için iyi bir başlangıçtır. Tipik bir VAR deneyi tam bir gün sürer ve saniye düzeyinde örnekleme süresi vardır (küçük ingotlar için 2 saniye ve üretim ingotları için 5 saniye). Bir araştırma, yalnızca hatasız değil, aynı zamanda uygun bir bilgisayar yapısı tercihiyle hızlandırılabilen uygun bir kontrol mekanizmasının seçimine ayrılmıştı.

VAR tekniğini anlatan olasılıksal model, Bayesian değerlendirmesinde ayrıntılı önsel, en muhtemel problem olarak bilinir. Bu da durumun evrim denkleminin gözlem denkleminin çok daha belirsiz olduğu anlamına gelir. Bu,

elektrik arkındaki akım dağılımının bilinmezliği, metal elektrodun homojen olmayışı, soğutma sistemindeki değişken helyum basıncı ve erimenin başlangıç ve bitişindeki uç etkiler gibi sistem bozukluklarından kaynaklanır. Öte yandan, hareketli elektrodun konumunun izlenimi ve kütlesi gibi bazı ölçümler oldukça hassastır; ancak elektrot açıklığı gibi fazla zahmetli olanlar da bulunur.

Ardışık Monte Carlo tekniklerinin uygulanması en muhtemel senaryolarda etkisiz kalabilir; çünkü ön bilgilere dayanarak çözüm olarak görülen parçacıkların büyük bir kısmı, gözlemlenen ölçümlere dayalı düşük olasılıklı durum-uzay alanlarında ortaya çıkacak ve yeniden örneklerken gözden kaybolacaklardır. Durum-uzayı keşfederken akım ölçümünü göz önünde bulunduran alternatif bir yaklaşımın daha verimli olduğu fark edildi. Yardımcı parçacık filtresinde kabul edilebilir kesinlik için gereken %87'lik parçacık sayısında bir düşüş görüldü.

Yardımcı parçacık filtreleri hesaplanan maliyette büyük bir azalma ile sonuçlansa da sistemin çok boyutluluğun-

dan dolayı gerekli parçacık sayısı hâlâ çok yüksekti ve kontrol sisteminin eksikliklerini karşılayabilmek için değerlendiricinin hızlandırılması gerekiyordu. Şekil 9'da gösterildiği gibi, NVIDIA'nın GK110 tarafından güç sağlanan ve CUDA'ya (Bilgisayarla Birleşik Cihaz Yapısı) dayanan GeForce GTX TITAN'ı daha hızlı bir uygulama için kullanıyordu [15]. GPU üzerindeki algoritmanın uygulaması, binlerce parçacık kullanıldığında bile, milisaniyelerde değerlendirmeler elde etti. Böylelikle, yalnızca bu eritme uygulaması için değil, daha hızlı dinamiklere sahip diğer üretim şekilleri için de yeterince hızlı olduğunu kanıtladı.

Benzer bir yaklaşım, teknik kontrolde karşılaşılan bir sınırlı optimizasyon problemine hız kazandırmak için kullanılabilir. Model öngörücü kontrol gibi sonlu çevreni kısıtlayıcı bir optimizasyon problemi olarak açıklanabilir [16]. Bu da değerlendirme problemi halinde olduğu sürece, paralel yapılar kullanılarak hızlandırılabilir. Değerlendirmenin ve kontrolün, Ardışık Monte Carlo metodu kullanılarak gerçekleştirildiği doğrusal

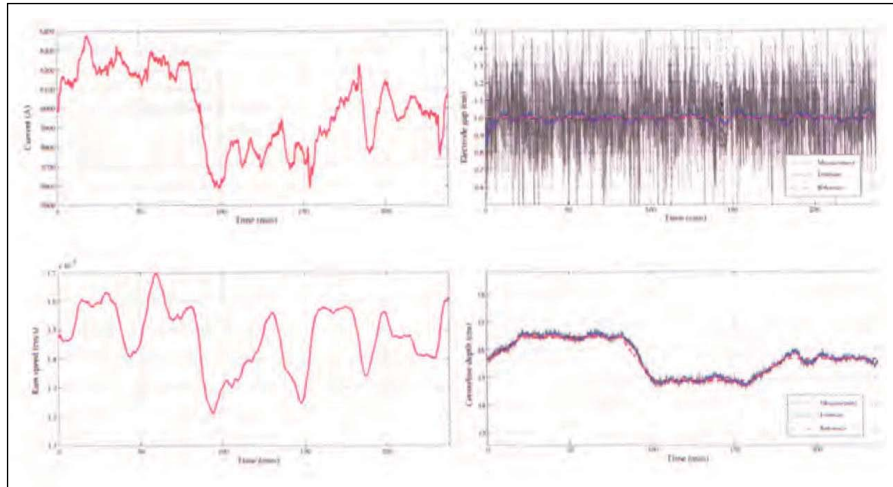
olmayan model tahmin kontrolünün bir örneği Şekil 10'da gösterilmiştir.

Şimdiye dek VAR için yürütülen CeMs araştırmaları, modelleme (hem hata öngörülerini için yüksek duyarlılıklı hem de değerlendirme ve kontrol için indirgenmiş düzen), değerlendirme ve hızlandırılabilir kontrol algoritmaları ile bilgisayar yapısının geliştirilmesine odaklanmıştır. Projenin sonraki aşamaları, elverişli bir şebeke çalışmasının dahil edileceği bir deneme cihazının tasarımını da içeriyor. Bu çabaların, süperalaşım endüstrisinde kullanılan güncel kalite kontrol tekniklerini tamamlamak için gereken kalite standartlarının yenilenebilirliğini garantiemesi bekleniyor.

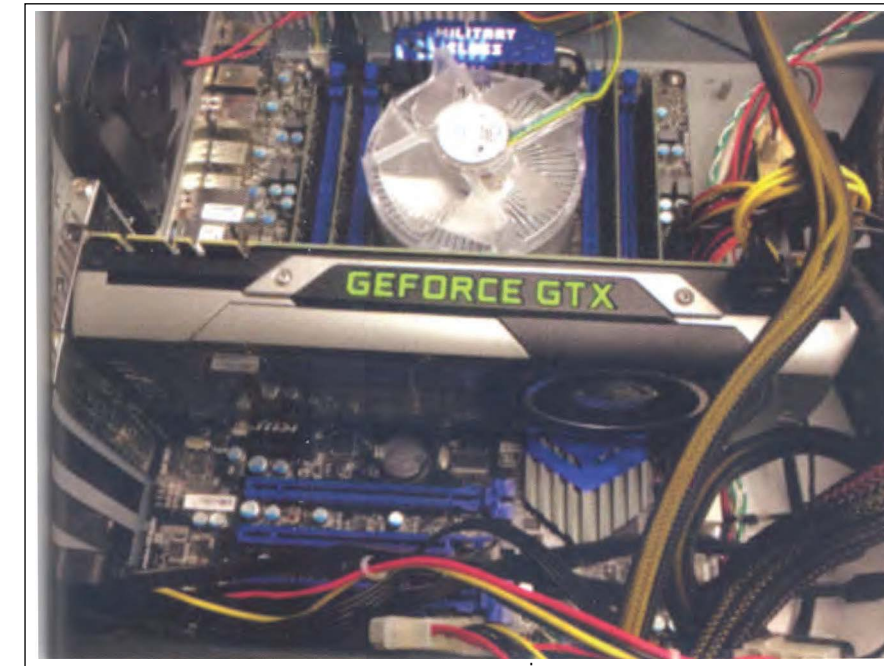
## ADİTİF İMALATTA CEMS PROSES KONTROLÜ

SLS'de kullanılan CeMs geliştirilmeye devam ediliyor. VAR gibi SLS de ısıya dayalı bir yöntemdir; ancak VAR'dan farklı olarak en az iki ayrı termal bölgesi bulunur. Birincisinde, hızlı erime ve katılma sürecini de içeren lazer materyal etkileşiminin mikroskobik bir bölgesi bulunur. Eğer bu mikroskobik termal bölgenin kontrolü yetersiz kalırsa, tabakalar arasındaki bağ, kısmi aksaklığa yol açarak aşınmaya uğrayabilir. Bu bölge, VAR tekniğinin dinamiklerinden çok daha hızlı işler ve hatta VAR'da kullanılanlardan daha hızlısını gerektirir. İkincisinde, kısmi bölgeyi de kapsayan tüm inşa odasında mikroskobik bir alan yer alır. Bir parçanın tüm süre-sıcaklık geçmişinin, parçanın niteliklerini etkileyebileceği herkesçe bilinir. Bu bölgenin zaman içindeki değişimi çok yavaştır ve VAR tekniğiyle benzerlik gösterir. (Bir SLS işlemi 24 saat sürebilir.) Bu nedenle, birbirini karşılıklı besleyen iki ayrı model geliştirilmektedir.

SLS tekniğinin VAR'dan bir başka üstünlüğü de gidişatı değiştirebilme yetisidir. Bu, gelişmekte olan bir teknik olduğu ve Aditif İmalat kullanıcıları tekniği kavramaya yeni yeni başladığı için mümkün hale gelmiştir. Özel olarak hazırladığımız bir SLS laboratuvar



Şekil 9. Paralel Değerlendirme ve Kontrol Algoritmalarının Hızlandırılmasında Kullanılan GeForce GTX TITAN



Şekil 10. Referans Sıvı Havuzu Derinliği Değiştirildiğinde Bile, İşlemin Kusursuz Kontrolünü Gösteren VAR Tekniğinin Yardımcı Parçacık Filtreli Model Öngörücü Kontrolü

makinesi üzerindeki kontrolümüzü ilerletmeye devam ediyogruz. Örneğin bu makinada, bölmeli yüzeyin tamamını görüntüleyebilen bir IR kamerası ve tüm inşa bölmesini yansıtan fazladan sensörler bulunur. Bunu gerçekleştirebilmek, gelişimini tamamlamış bir ticari makinede ve sistemde zor olurdu. Bu sistemde her bir katmanın termal ölçümü hazır bulunuyor. Ayrıca bu sistem, lazer aynalarına bakan bir sensör yoluyla mikroskobik bölgenin erimesini de ölçebiliyor.

Tüm bu sensörlerle bile, SLS'nin teknik kontrolünde CeMs veya VAR metodlarını kullanmak arasında temel düzeyde hiçbir fark olmayacak. Her iki şekilde de ölçümsel multi-fizik modelleri, modern (doğrusal olmayan) değerlendirme metodları ve ölçümleri ve yüksek performanslı ölçümsel üniteler yer alacak.

## ÖZET & GELECEĞE BAKIŞ

Gelişmiş imalatta büyük bir etki yaratabilmesi için, kontrol topluluklarının elinde müthiş bir fırsat bulunuyor. Bu fırsatların arasında VAR gibi gelişmiş üretim tekniklerinin performansını artırmak ya da 3 boyutlu baskı gibi gelişmekte olan üretim yöntemlerinin kritik kontrolünü geliştirmek de yer alıyor. Multi-fizik simülasyon yazılımı, modern değerlendirme metodları ve gerçek zamanlı bilgisayar yapısı ve donanımı arasındaki bağlardan dolayı, bu fırsatların tam zamanında ortaya çıktığı görülüyor.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, araştırmaya verdikleri destekten dolayı ONR, NSF ve AFRL'ye teşekkürlerini sunar.

## KAYNAKÇA

1. Executive Office of the President, National Science and Technology Council, A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing, Feb., 2012, [www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/iam\\_advancedmanufacturing\\_strategic-plan\\_2012.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/iam_advancedmanufacturing_strategic-plan_2012.pdf).
2. **Popkin, J and K. Kobe**, Manufacturing Resurgence: A Must for U.S. Prosperity National Association of Manufacturers and Council of Manufacturing Associations, 2010.
3. **Anderson, Chris**. "The Long Tail" Wired, October 2004.
4. **Hopkinson, N. and P. Dickens**, "Analysis of Rapid Manufacturing-Using Layered Manufacturing Processes for Production", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v.217, n.1, p.31-40, 2003.
5. **S. Skogestad, I. Postlethwaite**, Multivariable feedback control, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, 2005.
6. **A. T. Patera, G. Rozza**, Reduced Basis Approximation and A Posteriori Error Estimation for Parametrized Partial Differential Equations, MIT, 2012.
7. **R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot**, Transport phenomena, John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, 2006.
8. **A. Doucet, N. de Freitas, N. Gordon**, Sequential Monte Carlo methods in practice, Springer, 2001.
9. **M. Chitchian, A. Simonetto, A. S. van Amesfoort, T. Keviczky**, Distributed Computation particle filter on GPU architecture for real-time control applications, Control Systems Technology, v.21 (6), pp. 2224-2238, 2013.
10. **C. Cecka, A. J. Lew, E. Darve**, Assembly of finite element methods on graphics processors, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 85, 640-669, 2011.
11. **K. O. Yu, J. A. Domingue**, Control of Solidification Structure in Var and ESR Processed alloy 718 ingots, Superalloy 718- Metallurgy and applications, TMS, 1989.
12. **T. Watt, E. Taleff, F. Lopez, J. Beaman**, Solidification mapping of a Nickel alloy 718 laboratory VAR ingot, International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting, pp. 261-270, TMS, 2013.
13. **J. Beaman, F. Lopez, R. Williamson**, Modeling of the vacuum arc remelting process for Estimation and control of the liquid pool profile, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, v. 136, n.3, pp. 031007-1, 2014.
14. **L. A. Bertram, P. R. Schunk, S. N. Kempka, F. Spadafora, R. Minisandram**, The macroscale simulation of Remelting processes, JOM, pp. 18-21, 1998.
15. <http://www.geforce.com/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-titan>.
16. **D. Stahl, J. Hauth**, PF-MPC: Particle filter-model predictive control, Systems & Control Letters, v. 60, n. 8, pp. 632-643, 2011.