Teknik yazı

KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİNDE TERMAL SPREY TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİM KABİLİYETİ

Dr. Ekrem ALTUNCU Sakarya Üni. Uyg. Bil. Metalurji Ve Malzeme Müh./ SAÜ-TESLAB

GİRİŞ

Atomizasyon prosesleri (su, gaz ve plazma gibi) ile üretilen yüksek saflıkta metalik (saf metal ve alaşım) tozlar farklı termal sprey yöntemleri ile aşınmaya, korozyona, tribolojik özellikleri iyileştirmek için kaplama oluşturmak amacıyla kullanılabildiği gibi katmanlı imalat teknolojisi ile 3D yazıcılarda veya metal püskürtme sistemleri ile eklemeli imalata, hızlı prototiplemeye, yüzeyde dolgu, parçalarda tamir ve toleransa getirmeye de olanak sağlamaktadır. Toz özellikleri (fiziksel ve kimyasal) katmanlı imalat yöntemlerinde oldukça önemli rol oynamakta olup, boyutsal ölçüleri, akışkanlığı ve morfolojik yapısı son parça ve katman özelliklerini etkilemektedir. Kimyasal kompozisyonda metal kirliliği, süreksizlikler ve kalıntılar parçanın mekanik özellikleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında birçok açıdan benzerlik gösteren bu iki proses karşılaştırılmakta, proseslerin üstünlükleri ve endüstriyel uygulama fırsatları üzerinde durulmaktadır. Termal sprey yöntemleri arasında soğuk sprey (CGDM) prosesi gelecekte katmanlı imalatın bir parçası olacağı gözlenmektedir. Gerek soğuk sprey gerekse lazer esaslı proseslerde toz ve tezgah maliyetlerinin düşmesi ile katmanlı imalat yöntemleri endüstride yaygınlaşarak yakın gelecekte yeni bir teknolojik devrime neden olacağı öngörülmektedir.

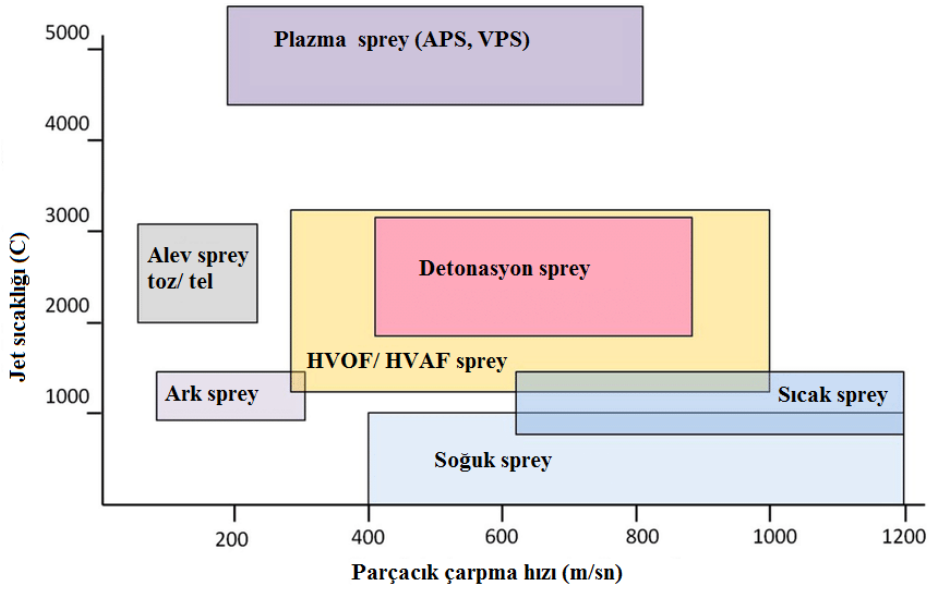
1. TERMAL SPREY TEKNOLOJİSİ

Termal sprey teknolojisi çok yönlü (aşınma, korozyon, yorulma, termal koruma, restorasyon, iletkenlik, tribolojik vb.) endüstriyel uygulama alanına (makine imalat, havacılık, otomotiv, demir çelik, maden, tekstil, medikal, enerji, uzay vb.) sahip yüzey ve kaplama mühendisliği kapsamına girmektedir. Toz, tel veya çubuk formunda malzemelerin bir ısı kaynağı (plazma, ark, alev) ile kısmen veya tamamen ergitilmesi ve hızla yüzeye püskürtülmesi ile katmanlar halinde lamelli bir kaplama tabakası oluşumuna imkan vermektedir **(Şekil 1)**. Genel olarak termal sprey yöntemleri ile üretilen bir kaplama tabakasının oluşumunda çoğunlukla toz formundaki malzemeler (metalik, seramik, sermet esaslı) kullanılmaktadır.

Şekil 1. Termal Sprey yöntemi (şematik) ve tozlar

Termal sprey kaplama yöntemleri arasında plazma sprey (APS, VPS, SPPS) veya oksi- yakıt sprey (HVOF, HVAF, Alev sprey) yöntemleri ile farklı hızlarda yüzeye toz parçacıkları ivmelendirilmekte ve hızla katılaştırılmaktadır. Hızla katılaştırılan splat adı verilen katılaşmış yapılar üst üste katmanlar halinde biriktirilmektedir. Püskürtme koşullarına bağlı olarak kaplama tabakasında bu yapılar arasında porozite oranı ve yapışma dayanımı farklılıklar göstermektedir. Bu yöntemlerin tümü termal sprey ailesinin bir parçasıdır. Aşağıda **Şekil 2'** de püskürtme koşullarına bağlı olarak proses hızı ve sıcaklıkları sergilenmektedir. Ergime noktası yüksek malzemelerin (seramik malzemeler gibi) püskürtülmesinde plazma enerjisinden yararlanılmaktadır. Kaplama yoğunluğunun ve sertliğinin sağlanmasında ise yüksek hızlarda alev sprey yöntemleri ile üretilen sermet esaslı kaplama tabakaları üstün aşınma ve korozyon performansı sergilemektedir. Tüm bu yöntemlerde beslenen malzemeler kısmen veya tamamen ergiyik formunda bir droplete dönüşmekte ve yüksek ivmelendirme basıncı etkisiyle yüzeye farklı hızlarda ve atmosferik koşullarda püskürtülerek hızla katılaşma

sağlanmaktadır. Katılaşmış yapılarda birçok süreksizlik türü oksit, porozite, mikro çatlak, ergimemiş parçacık vb.) gözlenebilmektedir. Özellikle metalik kaplamalarda oksit oranının azaltılması amacıyla vakum, koruyucu atmosfer veya inert gaz akışı oluşturulması ve kullanılması önerilmektedir. Mikroyapıda standardların üzerinde süreksizlikler kaplama kalitesini olumsuz etkilemektedir.

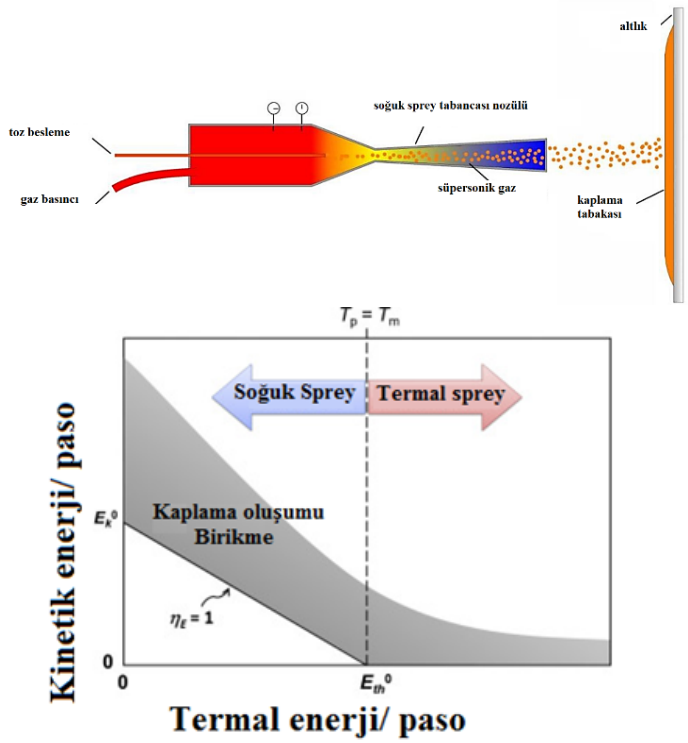


Şekil 2. Termal Sprey yöntemlerine bağlı olarak proses hızı ve sıcaklıkları

Farklı atmosferik koşullarda termal sprey teknolojileri endüstride uygulanabilmektedir. Vakum ortamında, koruyucu inert gaz ortamında uygulamalar kaplama kalitesini (düşük porozite, düşük oksit oranı) ve performansını (yüksek yoğunluk, iyi yapışma ve düşük iç gerilme, yüksek mekanik özellikler) önemli ölçüde artırmaktadır. Genel olarak kaplama kalınlıkları 1mm üzerinde kullanılmamasına karşın elektrik ark sprey gibi tel veya toz alev sprey gibi uygulamalarda kalınlıklar 10mm ve üzerine çıkabilmektedir. Tamir, toleransa getirme, restore etmek amacıyla uygulamalarda kalınlıklar artırılabilmektedir. Kaplama uygulaması sonrasında hedeflenen kalınlığa talaşlı işlem ile getirilebilmekte ve yüzey taşlama ile arzulanan yüzey kalitesi elde edilebilmektedir.

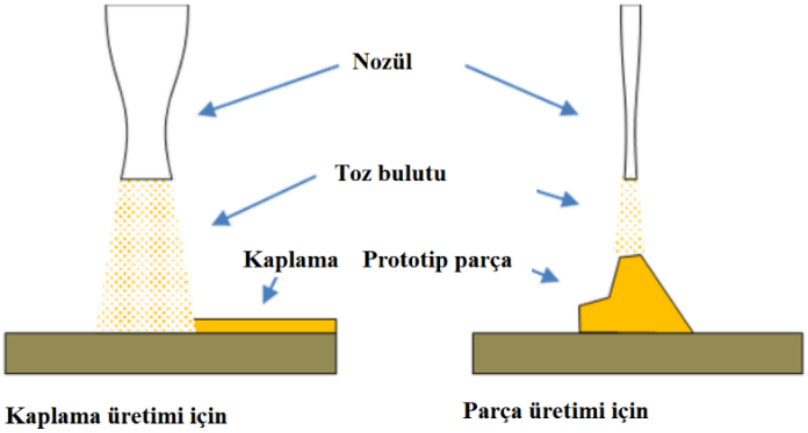
2. SOĞUK SPREY TEKNOLOJİSİ

Ergitme olmaksızın çok daha yüksek hızlarda püskürtme kabiliyetine sahip olunan bir önemli termal sprey kaplama yöntemi ise soğuk (kinetik) sprey olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak metalik (Al, Cu, Ni, Ti, Ta, Zn, Ag, Co, Nb ve alaşımları ve belirli metal matrisli kompozitler: Al-SiC gibi) esaslı toz parçacıklar sprey tabancasından ses hızına yakın hızlarda püskürtülerek termal sprey kaplama yöntemleri arasında en hızlı püskürtme kabiliyetine sahip yöntemlerin başındadır. Termal enerji yerine kinetik enerji ile kaplama tabakaları oluşturulmaktadır **(Şekil 3).**

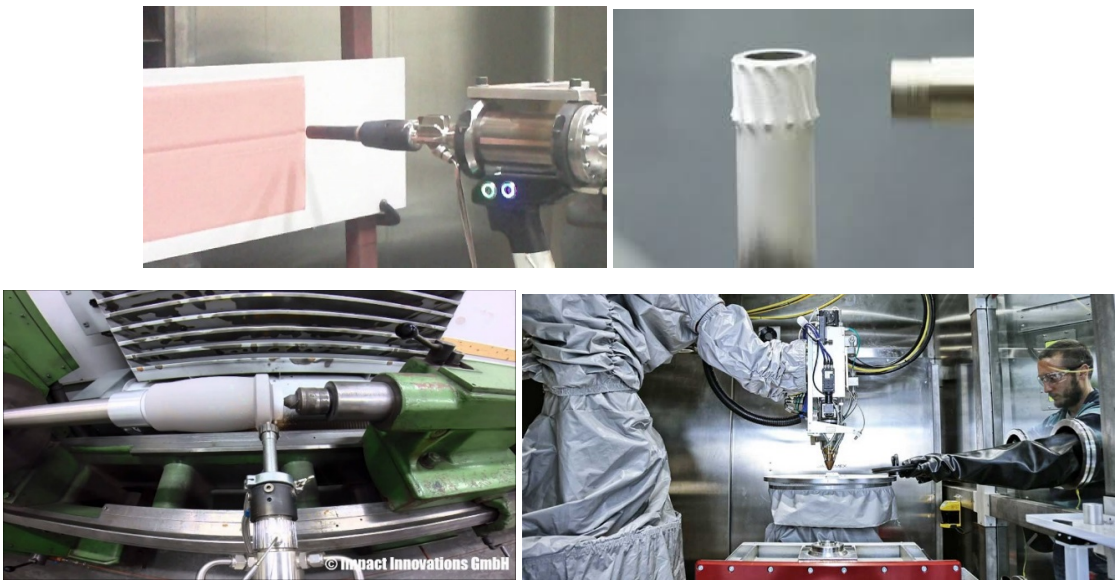


Şekil 3. Soğuk sprey prosesinin termal sprey yöntemlerinden kinetik ve termal enerji açısından farkı

Kaplama oluşumu ergime mekanizması yerine toz malzemelerin deformasyon kabiliyetine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Kritik bir püskürtme hız aralığına kadar kaplama oluşumu gerçekleşmemektedir. Çok yüksek hızlarda yüzeyde erozif aşınmaya veya düşük hızlarda ise saçılmaya neden olmaktadır. Oluşan kaplama tabakasında oksit oluşumu neredeyse çok düşük veya hiç yoktur. Ergime olmaması ve yüksek hızlarda püskürtülmesi nedeniyle oksit ve porozite oranı çok düşük seviyelerde kaplama ve katmanlarının üretimine imkan sağlanabilmektedir. Soğuk sprey prosesi bu üstün özellikleri ile hem kaplama üretimine hemde katmanlar halinde arzulanan katman oluşturma kabiliyeti ile parça üretimine imkan veren bir prosestir **(Şekil 4-5)**.



Şekil 4. Soğuk sprey prosesi ile kaplama ve parça üretimi

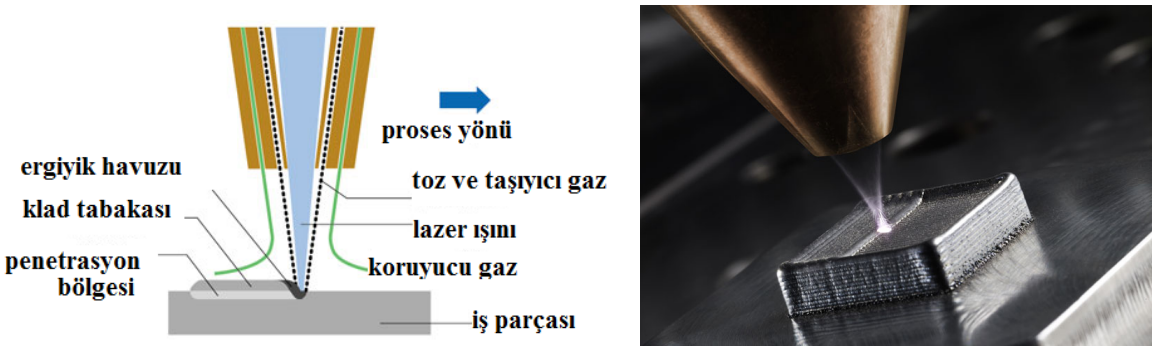


Şekil 5. Soğuk sprey prosesi ile kaplama ve parça üretimi uygulama örnekleri

Soğuk sprey prosesi ile Mg, Al, Ti gibi reaktif metaller ergime olmaksızın oksit içermeyen tabaka oluşumlarına imkan vermekte ve 3D parça imalatı gerçekleştirilebilmektedir.

3. LAZER SPREY TEKNOLOJİSİ VEYA LAZER İLE 3D METAL BİRİKTİRME TEKNOLOJİSİ

Lazer ışını ile toz veya tel formundaki malzemeler ergitilerek katman tabakalarının oluşturulması işlemi lazer sprey, lazer kladlama olarak tanımlanmaktadır. Bir lazer ışını kaynağından elde edilen yüksek enerji ile koruyucu gaz akışı altında toz veya tel ergitilerek katmanlar oluşturulabilmektedir. Bu sayede 3D metal parçaların üretimi de mümkündür.



Şekil 6. Lazer sprey prosesi ile kaplama ve/veya katmanlı parça üretimi

4. ELEKTRON IŞINI TEKNOLOJİSİ İLE 3D METAL BİRİKTİRME TEKNOLOJİSİ

Elektron ışını ile tel formundaki malzemelerin ergitilerek altlık yüzeyinde tabaka oluşturmak kaydıyla parça üretimi mümkündür. Lazer sistemine göre çok daha yüksek enerjisi ile daha yüksek besleme hızlarına sahip olması nedeniyle tabaka ve 3 boyutlu parça üretim hızı daha yüksektir.

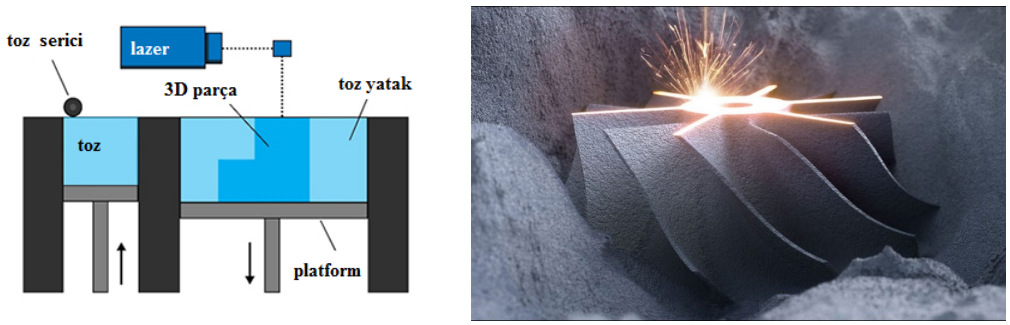
Şekil 7. Elektron ışını ile katman oluşturma, parça üretimi

5. KATMANLI İMALAT (3D METAL BİRİKTİRME) TEKNOLOJİSİ

Yüksek bir enerji kaynağı (termal veya kinetik) ile toz veya tel malzemelerin katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek oluşturulan tabakaların kalınlıklarının artırılması ile 3 boyutlu farklı geometrik özelliklere sahip yapılar elde edilebilmektedir. Bu uygulamalar; hızlı prototipleme/ eklemeli imalat/ katmanlı imalat/3D yazıcılar olarak adlandırılmaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak çok karmaşık geometrik parçaların üretimine, tasarımda sayısız revizyona, hızlı prototip üretimine, parça tamir ve toleransa getirilmesine, parça yüzeyinin alaşımlandırılmasına ve farklı malzemeler ile katmanlar oluşturulmasına imkan veren ileri bir imalat teknolojisidir. Çoğunlukla belirli özelliklere sahip metalik tozların ve tellerin kullanıldığı bu uygulamalarda lazer veya elektron ışını enerjisi ile ergitme veya sinterleme gerçekleştirilerek katmanlar oluşturulmaktadır. Oluşturulan katman tabaka kalınlıkları 20-100µm aralığındadır. Katmanlı imalat yöntemlerini metalik parça üretiminde iki gruba ayırmaktayız. 1. Grup toz yatak sistemleri (powder bed), 2. Grup laser/elektron enerjisi ile malzeme püskürterek biriktirme sistemleridir.

5.1. Toz yatak sistemleri

Katmanlı imalat uygulamalarında toz yatak sisteminin ana bileşenleri arasında bir lazer, lazer ışınını yönlendirici aynalar, toz yatağı ve toz yatağını hareket ettiren bir platform, ilave toz besleme haznesi ve tozu seren ekipmanlar ve ana gövdeden oluşmaktadır **(Şekil 8)**. Bu sistemler arasında da birkaç farklı uygulama söz konusudur. Lazer ile ergitme (SLM) , lazer ile sintelerme (SLS, DMLS), elektron ışını ile ergitme (EBM). Toz yatağı içerisinde parçanın 3 boyutlu hacmi toz partiküllerin lazer ile kontrollü bir şekilde katmanlar halinde sinterlenmesi/ergitilmesi ve katmanlar halinde parçanın yatak içerisinde oluşturulması sonrasında parça etrafında artık ve fazla tozların süpürülmesi veya vakumla emilmesi sonrası parça ortaya çıkarılmaktadır.

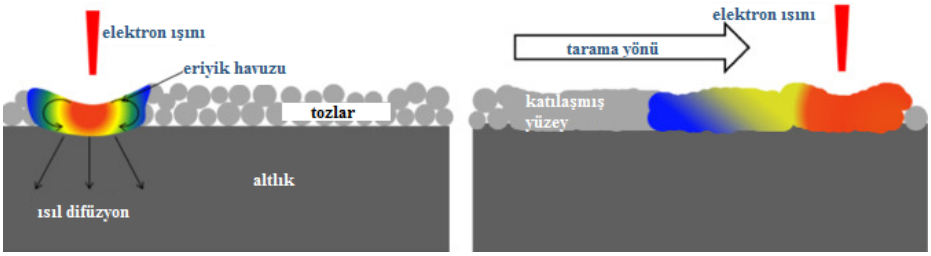


Şekil 8. Toz yatak sistemi (şematik)

5.2.Toz/ Tel püskürterek biriktirme sistemleri

3 boyutlu metalik parçaların kalıp imalatı gerektirmeksizin üretiminde kullanılan bir diğer önemli yöntem ise lazer ile metal biriktirme (LMD), elektron ışını ile ergiterek biriktirme (EBM) sistemleridir **(Şekil 9-10)**.

Şekil 9. Lazer ile toz ergiterek parça üretimi(örnek uygulamalar)



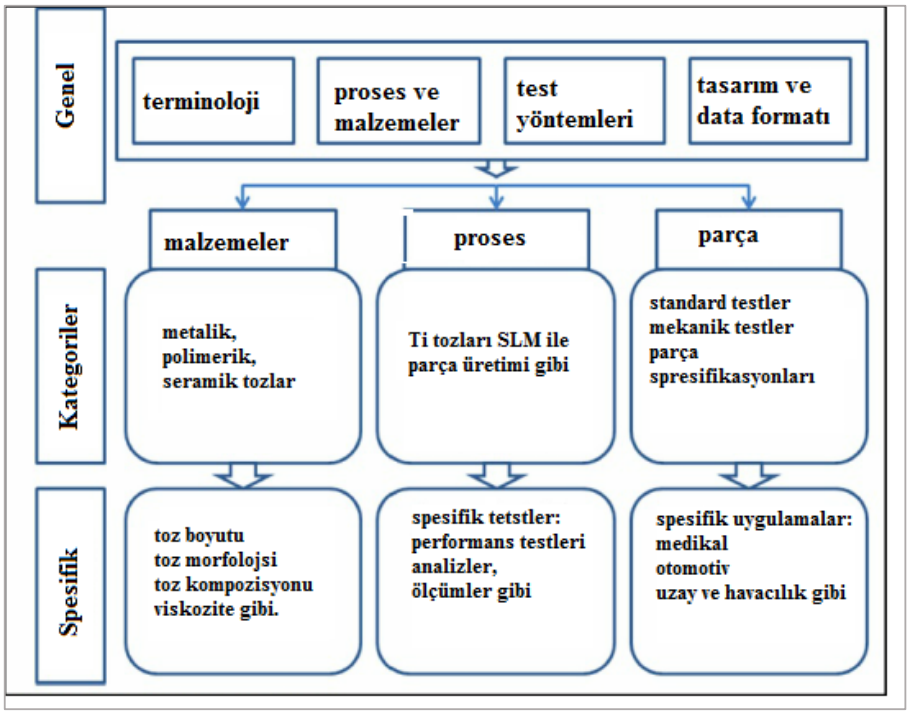
Şekil 10. Elektron ışını ile tel ergiterek parça üretimi(örnek uygulamalar ve şematik proses)

Tablo 1. Lazer esaslı katmanlı imalat yöntemleri karşılaştırma

Toz Yatak Teknoloji	LMD Laser metal deposition	LMF Laser metal fusion
Birikme hızı	300 cm^3/ saat	70 cm^3/ saat
Pürüzlülük	10-200 µm	5-10 µm
Boyutsal hassasiyet	<0.5 mm	<0.1mm
Parça boyutları	Robot kolu ile sınırlı	Tezgah boyutları ile sınırlı
Altlık	İç yüzey, dış yüzey	Düz yüzey
Katman kalınlığı (min.)	0.3-1.5 mm	0.03-0.1 mm

5.3.Katmanlı imalat standardizasyonu

Hızla gelişen katmanlı imalat sektöründe standardizasyon çalışmaları sürmektedir. **Şekil 11'** de görüleceği üzere 3 grupta standardlar oluşturulmaktadır. İlk grup genel tanımlar, genel proses açıklamaları ve üç boyutlu tasarım ve data formatı konusunu kapsamaktadır. İkinci grup katmanlı imalatı sınıflandırmaktadır. Bu grup kapsmında farklı malzemeler, farklı yöntemler ve testleri için gerekli standardları tanımlamaktadır. Üçüncü grupta ise spesifik uygulamalar, malzemeler ve testler için özel standardlar oluşturulmaktadır. Katmanlı imalat sürecinde toz türü, morfolojisi ve tozların fiziksel özellikleri katmanlı imalat sürecinde parça kalitesi açısından oldukça önemlidir. Uygulamalar sonrasında talaşlı imalat ve ek işlem süreçleri takip edilmektedir. Bunlar gerekli duyulması halinde yüzey işlem ve ısıl işlemlerdir. Parçanın nihai yüzey kalitesi ve arzulanan mekanik özellikleri kontrol edilebilmektedir.



Şekil 11. Katmanlı imalat sürecinde standardizasyon

6. GENEL DEĞERLENDİRME

Termal sprey veya ısıl püskürtme adından da anlaşılacağı üzere beslenen malzemelerin bir ısı girdisi ile etkileşimi (ergitilmesi) ve püskürtme basıncı ile yüzeye püskürtülerek (ivmelendirilmesi) bir kaplama/ tabaka oluşturulması esasına dayanan bir kaplama yöntemleri ailesidir. Toz metalürjik yöntemler ile belirli morfolojide ve kimyasal kompozisyona ve uygun boyut aralığında üretilen metalik tozlar farklı termal sprey yöntemleri ile tekrarlanabilir katman kalitesi eldesine

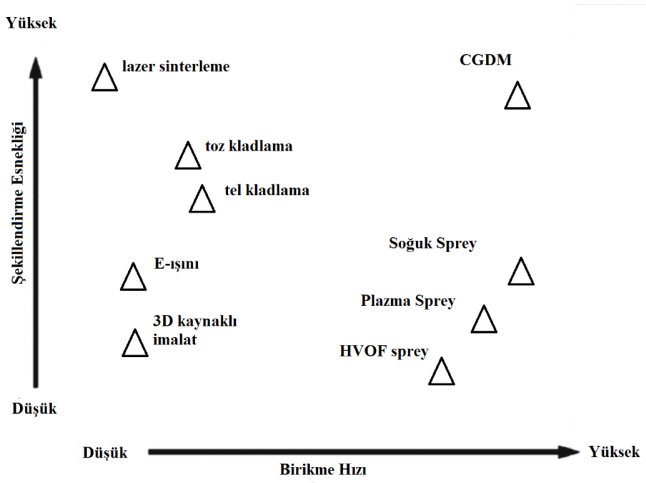
imkan vermektedir. Termal sprey yöntemleri gelecekte katmanlı imalat sürecinde de önemli rol alacak bir teknolojiye sahiptir. Termal sprey yöntemleri ailesinin en son üyeler arasında olan soğuk sprey prosesi ve bunun yanında hızla gelişen ve uygulamaları artan lazer ile katman (kaplama, dolgu ve parça üretimi vb) oluşturma kabiliyeti olan lazer kladlama prosesi oldukça ilgi çekmektedir.

Bu iki proses birbirinden teknolojik açıdan farklılıklar sergilemesine karşın her iki proses de katmanlı imalat işlemlerine cevap verebilmektedir. Katmanların yüksek birikme verimliliği, yüksek birikme hızı ve karmaşık parça geometrileri, son şekle yakın parçalar ve tek aşamada kompleks parçalar üretilebilmektedir. Robotik bir kola monte edilen sprey tabancası ve toz besleme ünitesi yardımı ile sprey tabancası önünde oluşan yüksek ısı girdisi veya çok yüksek gaz basıncı etkisiyle oluşan kinetik enerji sonucunda metalik toz parçacıklar ergitilerek veya yüksek hızlarda yüzeyde deforme edilmek koşuluyla kaplama veya katman kalınlığı sınırı olmaksızın karmaşık üç boyutlu geometrik parça üretimine olanak sağlanmaktadır. Toz boyutuna bağlı olarak yüzey kalitesi ve proses optimizasyonu ile porozite kontrol edilebilmektedir. Tamir, toleransa getirme, prototip parça üretimi uygulamaları için avantajlar sunmaktadır. Aşağıda **Tablo 2'** de termal sprey prosesi ile katmanlı imalat teknolojileri teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2. Termal Sprey ve Katmanlı İmalat Teknolojileri Karşılatırma

Teknoloji	Termal sprey	Katmanlı İmalat
Enerji kaynağı	Elektrik ark, plazma, lazer, kinetik	Lazer, elektron ışını, kinetik
Besleme malzemesi	Toz, tel, çubuk	Toz, tel
Maks. Tabaka kalınlıkları	>2mm	Sınır yok
Katman kalınlıkları	20 µm	20 µm
Malzeme çeşitliliği	Metalik, seramik, polimerik	Metalik, polimerik
Uygulama	Robotik, manuel, otomasyon	Robotik, otomasyon
Yüzey işlem gereksinimi	Var	Var
Isıl işlem gereksinim	İhtiyaca bağlı	Var
Yapışma	Mekanik kilitlenme	Metalurjik bağ, sinterleşme
3B data gereksinim	Yok	Var
Yatırım gereksinimi	Orta	Çok Yüksek
Toz maliyetleri	Düşük-Orta	Çok Yüksek
Kalifiye personel gereksinim	Düşük-Orta	Çok Yüksek

Şekil 12 de birikme hızı ve şekillendirme esnekliğine bağlı olarak termal sprey ve katmanlı imalat yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Görüleceği üzere termal sprey yöntemlerinde birikme hızı oldukça yüksektir.



Şekil 12. Katmanlı imalat ve soğuk sprey proseslerinin birikme hızı ve şekillendirme esnekliğine bağlı karşılaştırması

Referanslar

- *Handbook of Thermal Spray Technology, Edited by J.R. Davis, ASM International (2004).*
- *Adrita Dass, Atieh Moridi, State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design, Coatings, 9, 418, 1-26; (2019).*
- *Julio Villafuerte, Considering Cold Spray for Additive Manufacturing, Advanced Materıals & Processes, 50-52, (2014).*
- *Sunil Pathak, Gobinda C. Saha, Development of Sustainable Cold Spray Coatings and 3D Additive Manufacturing Components for Repair/Manufacturing Applications: A Critical Review, Coatings, 7, 122; (2017).*
- *ASTM Standard F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2012).*
- *Layers of complexity: making the promises possible for additive manufacturing of metals JOM, 66 pp. 2194-2207, (2014).*
- *K.V. Wong, A. Hernandez, A review of additive manufacturing, ISRN Mech. Eng., pp. 1-10, (2012).*
- *A. Sova, S. Grigoriev, Anna Okunkova, I. Sumurov, Potential of cold gas dynamic spray as additive manufacturing technology, Int J Adv Manuf Technol 69:2269 – 2278, (2013)*
- *L. Costa, R. Vilar Laser powder deposition Rapid Prototyp. J.15, pp. 264-279, (2009).*
- *Antonio Candel-Ruiz, Sebastian Kaufmann, Oliver Müllerschön, Strategies for high deposition rate additive manufacturing by Laser Metal Deposition, Lasers in Manufacturing Conference (2015).*
- *Wenya Li, Congcong Cao, Guoqing Wang, Feifan Wang, Yaxin Xu, Xiawei Yang, Cold spray +' as a new hybrid additive manufacturing technology: a literature review, Science And Technology Of Welding And Joining , Vol. 24, No. 5, 420–445,(2019).*