



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



DMLS eklemeli imalatta süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi

DMLS additive manufacturing process and cost model development

Yazar(lar) (Author(s)): Mevlüt Yunus KAYACAN¹, Nihat YILMAZ²

ORCID¹: 0000-0003-3557-9537

ORCID²: 0000-0002-8689-1048

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kayacan M. Y. Ve Yılmaz N., “DMLS eklemeli imalatta süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 763-770, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.428093

DMLS Eklemeli İmalatta Süreç ve Maliyet Modeli Geliştirilmesi

Araştırma Makalesi/Research Article

Mevlüt Yunus KAYACAN*, Nihat YILMAZ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Isparta

(Geliş/Received : 29.05.2018; Kabul/Accepted : 28.08.2018)

ÖZ

Bu çalışmada son yıllarda gelişim göstererek endüstrinin temel imalat metotlarından biri haline gelen eklemeli imalat üzerine, imalat süresi, süreçleri ve maliyetler ekseninde çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Toz yatak birleştirme teknolojilerinden bir tanesi olan “Doğrudan Metal Lazer Sinterleme” (DMLS) metodunun işlem süreleri ve süreç analizinin yapılması sonucunda literatürde yer alan mevcut denklemler ve ilave olarak imalatın tüm adımlarını ve her türlü gideri hesaplamaya dâhil ederek genel bir maliyet ve süreç hesaplaması denklemi türetilmiştir. Elde edilen denklem Türkiye örneklemini üzerinden kontrol edilmiş ve Türkiye şartlarına yönelik bir çalışma yapılmıştır. Geliştirilen model ile imal edilmesi planlanan parçaların DMLS ile eklemeli imalat süreleri, imalat verimliliği ve etkin tezgâh kullanımı hakkındaki verilere ulaşabilmek mümkün hale gelmiştir. Bunların yanında imalat tezgâhların amortisman hesapları ve başa baş noktası analizleri farklı işletme şartlarında incelenerek gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DMLS, eklemeli imalat, lazer toz yatak, imalat süresi, imalat maliyeti.

DMLS Additive Manufacturing Process and Cost Model Development

ABSTRACT

In this study, various analyzes have been carried out in terms of manufacturing time, processes and costs on the additive manufacturing, which has become one of the basic manufacturing methods of the industry. As a result of the processing times and process analysis of the "direct metal laser sintering" (DMLS) method, one of the powder bed fusion technologies, a general cost and process calculation equation has been derived, including the existing equations in the literature, plus all steps of manufacturing and all sorts of calculations. The resulting equation was checked on the sampling Turkey and a study was carried out for the conditions of Turkey. With the developed model, it is made possible to reach the data about the manufacturing time, manufacturing efficiency and effective use of the machine with DMLS parts planned to be manufactured. In addition, amortization calculations and head-to-head analyzes of manufacturing machines were carried out under different operating conditions.

Key Words: DMLS, additive manufacturing, laser powder bed, manufacturing time, manufacturing cost

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat 1980’li yılların başından itibaren gelişim göstermeye başlayan modern bir imalat metodudur. Zaman içerisinde uygulama alanları ve malzeme çeşitliliği açısından bu gelişim sürmüştür. Günümüzde eklemeli imalat metotları geniş malzeme yelpazesi ve imalat metoduna göre değişiklik göstermektedir. Eklemeli imalat bir parçanın katmanlara bölünerek her katmanın birbiri ardına imal edilmesi işlemidir. Bu yöntemlerle yeni bir parçanın imalatı yapılabilirken aynı zamanda hasar meydana gelmiş bir parçanın tamirati da yapılabilmektedir. Havacılık, sağlık, dişçilik, mücevherat, kalıpsız imalat, kalıp yapımı, denizcilik ve enerji materyalleri gibi önemli endüstri alanlarında etkin kullanımları ile önem kazanmaya başlamıştır. Eklemeli imalat yöntemleri; polimerler, metaller, kompozitler, seramikler gibi çok çeşitli malzemeleri kapsamaktadır.

Eklemeli imalat teknolojileri temelde geleneksel imalat metotlarından beslenmektedirler. Yaygın olarak plastik ekstrüzyon, kaynak, ergitme, sinterleme, kaplama, toz metalürjisi gibi geleneksel metotları temel almaktadır. Ancak bazı noktalardan yeni bir imalat metodu olarak incelenmeye ihtiyaç duyulmaktadır [1-3]. Bu alanlarda çok sayıda çalışma yapılmaya başlanmıştır. Malzeme olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılmaktadır. İmalat metoduna bağlı olarak ise birçok farklılık karşımıza çıkmaktadır. Ekstrüzyon, polimer kürlenme, püskürtmeli, toz yatak, enerji gönderimi ve levha tipi metotlar genel olarak ifade edilebilir [4].

Toz yatak teknolojisinde bir tabla üzerine katman katman toz serme ve serilen tozların uygun bir araç vasıtasıyla birleştirilmesidir. Birleştirme işlemi en çok lazer ve elektron ışınları tercih edilmektedir. Burada lazer ve elektron ışınlarının amacı ortamdaki tozlara enerji göndererek tozların birleşmesini sağlamaktır. Ayrıca gönderilen enerji miktarına bağlı olarak eritme veya sinterleme mekanizması oluşmaktadır. Her bir yöntem,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mevlutkasyacan@sdu.edu.tr

malzeme, enerji kaynağı ve birleştirme mekanizması imal edilen parça özelliklerini tamamı ile değiştirmektedir [5-7]. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi eklemeli imalat yöntemlerinin bir tanesidir. Bu yöntemde toz metal teknolojisi kullanılır. Çalışması esnasında, metal tozlar üzerinde bilgisayardan alınan verilere göre bir lazer aracılığıyla sinterleme işlemi yapılır [8,9]. Sinterleme işlemi toz karışımının ana malzemesinin eritilmeden sinterlenmesi prensibine dayanır. İmalat esnasında bir toz havuzundan toz serici merdane veya bıçaklar aracılığıyla imalat bölgesine istenen kalınlıkta toz serilir. Serilen toz lazerin ortama verdiği enerjiyle sinterlenir. Tüm katmanlar ardı ardına sinterlendikten sonra ürün ortaya çıkmış olur.

DMLS ile metal eklemeli imalat genellikle sınırlı sayıda parça, prototip üretimi veya deneysel amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. İmalat süresinin geleneksel imalata göre çok daha fazla vakit alması ve üretimin çok aşamalı ve yüksek maliyetli olması kullanım alanlarını daraltmıştır. Bunların yanında özel geometrilere sahip parçaların üretiminde ise alternatifi olmayan bir yöntem olarak bilinmektedir.

Eklemeli imalat tezgâhları yüksek maliyetlerle edinilmektedir. Bu nedenle etkin bir şekilde kullanılması sağlanmalıdır. Etkin bir kullanım ise gereken şartlar; uzman personel, yeterli fiziki altyapı, yüksek parça kalitesi, minimum fire oranı ve uygun fiyatlandırma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada fiyatlandırmanın uygun seviyelerde olması durumu analiz edilmeye çalışılmıştır. Burada ise en önemli etkenlerden bir tanesi cihazın etkin kullanım süresi olarak karşımıza çıkmıştır. Bir parça maliyetinin, dolayısıyla ürün fiyatının minimuma inebilmesi için kapasite kullanımının maksimuma çıkması gereklidir [10]. Bunun yanında imalat süresinin azalması ile tüketilen enerji miktarı azalacak ve cihazın kullanılabilir süresi uzayacaktır. Fiyatlandırma konusunda bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca tasarım optimizasyonları yapılarak daha az malzeme tüketen ve daha kısa sürede tamamlanan imalatlara yönelmek fiyatı düşürecektir [11].

DMLS ile eklemeli imalatın maliyet hesaplamaları birkaç aşamaya ayrılarak incelenmektedir. Bunlar enerji maliyetleri, hammadde maliyetleri, kurulum maliyetleri, ilave işlem maliyetleri, firma giderleri, eleman giderleri, bakım giderleri, genel giderler şeklinde sıralanabilir. Yapılan çalışmalarda birbirine benzeyen bazı modeller kurulmuştur. Modeller ilk olarak imalat süresi ve sarfiyatına bağlı olarak başlamakta ve diğer değişkenlerle sürdürülmektedir [12,13]. Başka bir bulguya göre imalatların toplu olarak yapılması tek olarak yapılmasına kıyasla daha düşük maliyetler getirmektedir. Örneğin EOS M170 tezgâhında tekli imalattaki enerji tüketimi 339 MJ iken çoklu imalatta 241 MJ değerine kadar düşmüştür. Benzer şekilde tüm tezgâh tiplerinde benzer bir durum söz konusudur [14]. 1 ve 2 numaralı denklemlerde T_{imalat} ile toplam imalat süresi, $T_{boşta}$ ile imalatın başlamasından sonra hiçbir imalat işleminin

gerçekleşmediği süre T_{imalat} hızı ile mm^3/s cinsinden imalat hızı, N_i ile katman sayısı, $V_{toplami}$ ile imal edilen parçanın hacmini, $T_{tozserme}$ ile toz serme işleminin süresi ifade edilmiştir. Ayrıca; “C” ile başlayan simgeler TL cinsinden maliyetleri, “W” sembolü toz ağırlığını, “E” ise enerji miktarını ifade etmektedir. Buna göre imalat süresi hesabı yaklaşımları temel olarak şöyle şekillenmektedir [11]:

$$T_{imalat} = T_{boşta} + T_{imalat} \text{ hızı} * \sum i(N_i * V_{toplami}) + T_{tozserme} \quad (1)$$

İmalat maliyeti yaklaşımları ise temel olarak şu şekildedir [15]:

$$C_{imalat} = C_{dolaylı} * T_{imalat} + W * C_{malzeme} + E_{imalat} * C_{enerji} \quad (2)$$

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma kapsamında türetilen denklemler tüm toz yatak birleştirme (PBF) tipi tezgâhları kapsamaktadır. Aynı zamanda tüm metal tozları ve tüm parça geometrileri için geçerli olmaktadır. Yapılan analizler Ti6Al4V metal malzemenin EOS M280 DMLS eklemeli imalat tezgâhı ile işlenmesi durumları özelinde gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V yalnızca çalışmanın sonuçlarını somut bir şekilde göstermek amacıyla örneklem olarak seçilmiştir. Tezgâhın ideal çalışma parametreleri kullanılarak sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışma ilk olarak tezgâhın imalat süresi tayinini yapma ile başlayacaktır. Tablannın 1/10'u dolu olacak şekilde ve 65 mm yüksekliğe kadar parçalar imal edilir. Hesaplamalara başlamadan önce imalata yönelik bazı veriler esas alınmıştır. Bu veriler tezgâhın en iyi sonuç verdiği durumların analizi ile elde edilmiştir. Bilinenler ışığında hesaplamalarda kullanılacak değerler çizelge 1 ve 2'de gösterilmiştir. Maliyet hesabı yapılırken literatürden alınan 1 ve 2 numaralı denklemler kullanılmış, ayrıca imalat içi maliyetler, ilave işlem maliyetleri, işçilik ve şirket giderleri şeklinde 3 temel başlık altında maliyet hesaplamalarına ilaveler yapılarak yeni bir genel denklem türetilmiştir. Bunlara ek olarak imalat süresi hesaplamaya yönelik olarak ortalama kesit alanı yaklaşımı geliştirilmiştir. Sonrasında Türkiye örnekleme için birim maliyetler yeniden revize edilerek sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlar başa baş noktası analizi ile ifade edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSIONS)

Giriş kısmında verilen formülasyonlar EOS M280 tezgâhı için düzenlenmiş ve geliştirilmiştir. Türkiye şartlarına göre gider kalemleri revize edilmiştir. Katman sayısı hesabı yapılırken destek yapıları boyu ile birlikte parçanın toplam boyunun, 1 katman yüksekliğine bölünmesi esas alınmıştır. Katman sayısı hesabı şu şekilde yapılmıştır:

$$N = \frac{L_p + L_s}{l_h} \quad (3)$$

Ortalama kesit alanı hesabı, destek malzemeleri dâhil toplam hacmin, toplam yüksekliğe bölünmesi ile elde edilmiştir. Hesaplama kolaylığı olması açısından değişken kesitler tek tek hesaplamaya katılmamıştır. Onun yerine ortalama bir kesit hesabı yapılması uygun görülmüştür. Hesaplama şu şekilde yapılmıştır:

$$A_{ort} = V_p / L_p \quad (4)$$

Toplam imalat süresi hesabı; bir katmanın imalatı için geçen süre, bir katmana toz sermek için geçen süre, toplam katman sayısı ve boşta bekleme süreleri bilinenleri hesaplamaya dâhil edilmiştir. “1” nolu denklemdeki ifadeler ortalama kesit alanı değişkeni ile geliştirilerek şu şekilde revize edilmiştir:

$$t_m = N \left(t_k + \frac{A_{ort}}{h_d \cdot v} \right) + t_s \quad (5)$$

İmalata ilişkin sarf edilen zaman hesabı yapılması ile tezgâhın ne kadar sürede bu işi tamamlayacağı anlaşılmıştır. Elde edilen denklemler gerçek sonuçlarla da kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar 4 farklı imalat süresi ile irdelenmiştir. İmalatlar sık karşılaşılabilecek geometrileri kapsayan şekil 1’de gösterilen geometrileri barındırmaktadır. Numuneler tablaya 2 mm yüksekliğe sahip tam dolu destek yapılar kullanılarak bağlanacaktır.

Denklem gerçek sonuçlar arasındaki hata %4-5 mertebelerindedir. Böylece hem tezgâh kullanıcıları hem de müşteriler açısından işin ne zaman bitebileceği kestirilebilecektir. Ancak yalnızca imalat süresinin bilinmesi hem imalat hizmeti sağlayan kurumun hem de müşterinin yapılan işi her yönüyle anlamasını sağlamayacaktır. Bu nedenle bir maliyet-satış fiyatı hesaplamasının yapılması zorunlu olacaktır.

Sarf edilen metal tozları maliyeti; kilogram cinsinden toz maliyetinin, toz ağırlığı ile çarpılması ile elde edilmiştir. Sarf edilen tozun ağırlığı ise yoğunluk ve hacim bilinenleri ile elde edilmektedir. Bu durumda hesaplama şu şekilde yapılmıştır:

$$M_{part} = d_p \cdot V_p \cdot M_p \quad (6)$$

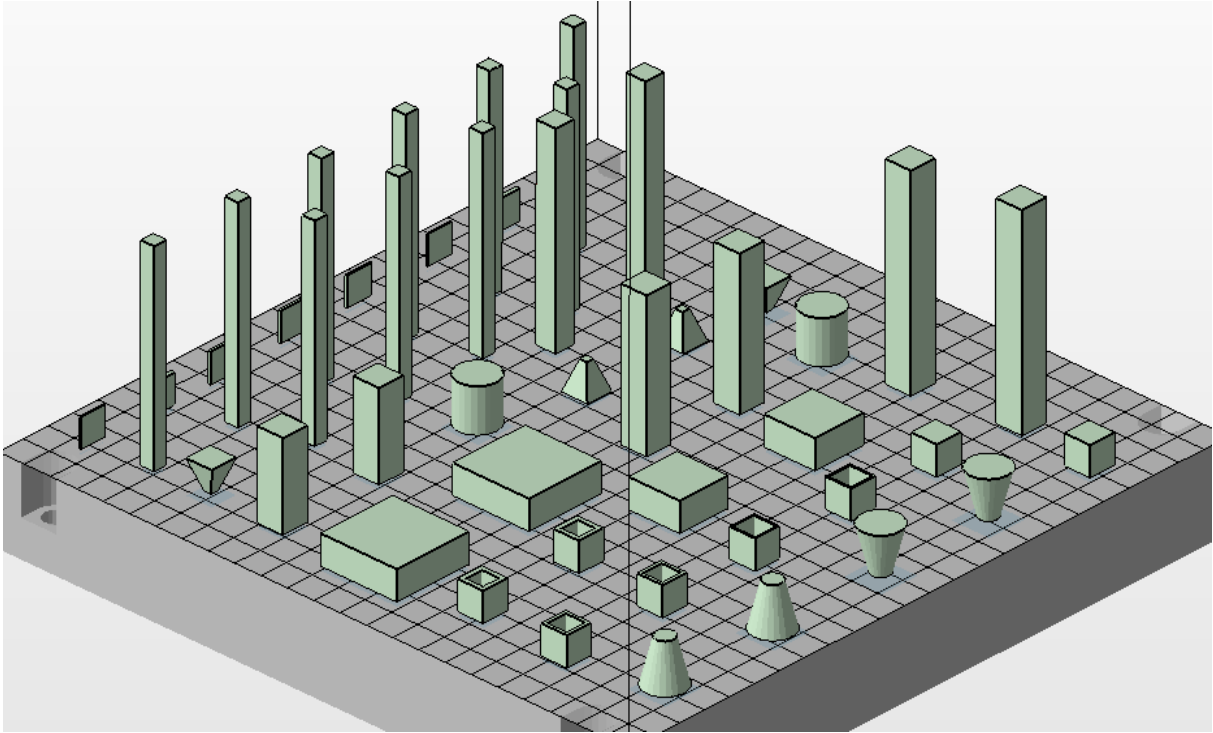
Bir seferdeki imalatın toplam maliyeti için; toz sarfiyatı, gaz sarfiyatı, enerji sarfiyatı, ilave işlem maliyetleri, işçilik gideri ve şirketin genel giderleri birlikte düşünülmüştür. Şu şekilde hesaplanmıştır:

$$M_t = (t_m \left((G_c \cdot M_g) + (E_c \cdot M_E) \right) + (t_h \cdot M_h) + (t_b \cdot M_b) + (t_w \cdot M_w) + (d_p \cdot V_p \cdot M_p) + M_{işçi}) \cdot 1,1 \quad (7)$$

Saatlik imalat maliyeti hesabı toplam maliyetin imalat maliyetine bölünmesi ile şu şekilde hesaplanmıştır:

$$M_{saatlik} = M_t / t_m \quad (8)$$

Çizelge 1’de imalat süresi ve maliyet hesaplamalarında kullanılan temel veriler yer almaktadır.



Şekil 1. İmalat süresi doğrulamasında tercih edilen parça geometrileri (*Part geometry preferred for manufacturing time verification*)

Çizelge 1. İmalat süresi ve maliyet hesaplamalarında kullanılan temel veriler. *:ele alınan örnek işin bilinenleri, **:tezgâh verileri, ***:piyasa verileri (*Fundamental data used in manufacturing time and cost calculations*)

Sembol	Birim	Miktar	Sembol	Birim	Miktar
N*	-	2233	E _c **	kWh	2,4
t _k **	s	8,35	G _c **	Lt/saat	3
h _d **	mm	0,1	M _p ***	TL/kg	2750
V*	mm/s	1250	d _p ***	g/cm ³	4,43
h _h **	mm	0,03	M _g **	TL/lit	10
V _p *	mm ³	525280	t _w **	Saat	3
L _p *	mm	65	M _w ***	TL/saat	120
L _s **	mm	2	t _n **	Saat	2
t _m *	saat	44,6	M _n ***	TL/saat	20
t _s **	saat	0,3	t _b **	Saat	0,25
A _{ort} *	mm ²	7840	M _b ***	TL/saat	10
M _E ***	TL/kWh	4,4	P _s **	Kg/saat	0,06

Hesaplamalar sonucunda toplam imalat süresi 44,6 saat, toplam imalat maliyeti 10570 TL, saatlik imalat maliyeti 237 TL olarak bulunmuştur. Hesaplamalara işçilik maliyeti ve %15 civarında genel ve beklenmeyen giderler olacağı öngörüsü de dâhil edilmiştir.

Hesaplamalar yıllık çalışma süresi ve toplam yıl üzerinden elde edilen karın kurulum giderlerini karşılama hesabına dayanmaktadır. Buna göre hesaplamalarda kullanılan formülasyon şu şekildedir:

Çizelge 2. Karlılık, amortismanlar ve başa baş noktası hesaplamaları için bilinmesi gerekenler (*What to know about profitability, depreciation and head-to-head calculations*)

Sembol	Açıklama	Birim	Miktar
M _{DMLS}	Cihaz maliyeti (her şey dâhil)	TL	2080000
M _{bakım}	Bakım maliyeti	TL	20000
t _{yıllık}	Yıllık çalışma süresi	Yıl	4, 5, 6, 7, 8
t _{yıl}	Amortisman süresi	Yıl	Hesap sonucu belirlenecek
M _{saatücreti}	Saatlik belirlenen fiyat	TL	317, 417, 517, 617, 717
M _{saatkar}	Saatlik belirlenen %kar	-	84, 126, 168, 211, 253
M _{işçi}	İş süresince sarf edilen iş gücü	TL	583

Hesaplamalar için temel alınmış temel veriler çizelge 2'de verilmiştir.

DMLS sistemi etki işletme ve amortisman hesabı ve başa baş noktası analizi için gerekli veriler; Donanımsal maliyetler, bakım maliyetleri, imalat maliyetleri, yıllık çalışma süresi ve amortisman için gerekli toplam yıl olarak düşünülmüştür.

Ortalama bir imalat işi için yapılan hesaplama sonuçlarından elde edilen maliyetler ve imalat süreleri amortisman hesabı ve başa baş noktası analizleri için temel alınmıştır. Bu formüle göre

Çizelge 3 oluşturulmuştur. Tezgahın yıllık çalışma süresi arttıkça amortisman süresinin kısaldığı görülmüştür. Çalışma süresi ve toplam yıla bağlı olarak çizelge 3'te karlılık analizi sonuçları yer almaktadır

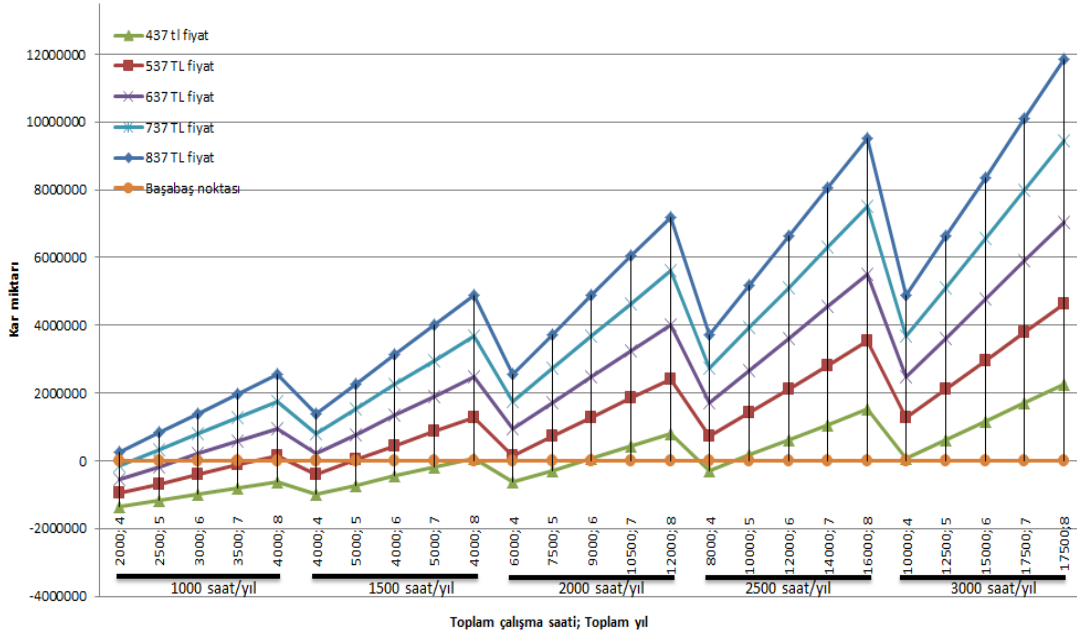
$$Kar = \left((t_{yıl} * t_{yıllık}) * \left(M_{saatkar} - \left(\frac{M_{bakım}}{1000} \right) \right) \right) - M_{DMLS} \quad (9)$$

Çizelge 3. Çalışma süresi ve toplam yıla bağlı olarak karlılık analizi (*Year dependent Working duration and profitability analysis*)

				%84 kar, 437 TL fiyat	%126 kar, 537 TL fiyat	%168 kar, 637 TL fiyat	%211 kar,737 TL fiyat	%253 kar, 837 TL fiyat
Toplam çalışma süresi	Yıl	Yıllık çalışma süresi	Saatlik maliyet	Toplam kar	Toplam kar	Toplam kar	Toplam kar	Toplam kar
4000	4	1000	237	-1360000	-960000	-560000	-160000	240000
5000	5	1000	237	-1180000	-680000	-180000	320000	820000
6000	6	1000	237	-1000000	-400000	200000	800000	1400000
7000	7	1000	237	-820000	-120000	580000	1280000	1980000
8000	8	1000	237	-640000	160000	960000	1760000	2560000
6000	4	1500	237	-1000000	-400000	200000	800000	1400000
7500	5	1500	237	-730000	20000	770000	1520000	2270000
9000	6	1500	237	-460000	440000	1340000	2240000	3140000
10500	7	1500	237	-190000	860000	1910000	2960000	4010000
12000	8	1500	237	80000	1280000	2480000	3680000	4880000
8000	4	2000	237	-640000	160000	960000	1760000	2560000
10000	5	2000	237	-280000	720000	1720000	2720000	3720000
12000	6	2000	237	80000	1280000	2480000	3680000	4880000
14000	7	2000	237	440000	1840000	3240000	4640000	6040000
16000	8	2000	237	800000	2400000	4000000	5600000	7200000
10000	4	2500	237	-280000	720000	1720000	2720000	3720000
12500	5	2500	237	170000	1420000	2670000	3920000	5170000
15000	6	2500	237	620000	2120000	3620000	5120000	6620000
17500	7	2500	237	1070000	2820000	4570000	6320000	8070000
20000	8	2500	237	1520000	3520000	5520000	7520000	9520000
12000	4	3000	237	80000	1280000	2480000	3680000	4880000
15000	5	3000	237	620000	2120000	3620000	5120000	6620000
18000	6	3000	237	1160000	2960000	4760000	6560000	8360000
21000	7	3000	237	1700000	3800000	5900000	8000000	10100000
24000	8	3000	237	2240000	4640000	7040000	9440000	11840000

Başa baş noktası hesabında, toplam hesabının 0 TL olarak bulunduğu nokta esas alınmıştır. Bu noktada, sistemin içerisindeki toplam gelir ve giderler dengelenmiştir. Bundan sonraki kısımda ise sistem kar üretmeye başlayacaktır. Ancak makul durumlar düşünülmelidir. Yapılan çalışmada sistemin kendini amorti etme süresi 5 yıl olarak düşünülmüştür. Çünkü böyle bir sistemin ekonomik çalışma ömrü yaklaşık 15 sene olacaktır [16]. Sistemin yüksek karlılığı düşünüldüğünde ilk 5 yıl içinde kendini amorti edip sonrasında kar üretmeye başlaması yeterli olacaktır. Şekilde başa baş noktası hesaplama sonuçları gösterilmiştir. 8 yıla kadar bir hesap yapılmıştır. Daha uzun süreli yapılacak hesaplamaların çok fazla bilinmezlik barındıracak olması nedeniyle 8 yıldan

sonrası hesaplanmamıştır. Tüm hesaplama durumlarında 5 yıl içinde kendini amorti etme ve 8 yılda kara geçme durumu görülmektedir. 8 yılın sonunda 2-12 milyon TL civarında kar elde etmek mümkün hale gelmektedir. Ancak fiyatların düşük tutulduğu durumda müşteri tercih oranı artacağı için en ulaşılabilir hedef olarak, 537 TL fiyat belirlemesi ve yıllık 2000 saat (83 aktif gün) çalışma ile 8 yılın sonunda 2,4 milyon TL kar elde etmek düşünülmelidir. Bu durumda yıllık ortalama kar elde etmek mümkün olacaktır. Tezgâhın ekonomik ömrü boyunca kapsamlı hesaplamalar yapılabilmesi durumunda ise ortalama kar miktarları çok daha yüksek seviyelere ulaşacaktır. Şekil 2’de başa baş noktası analizi ve karlılık durumları gösterilmiştir



Şekil 2. Başa baş noktası analizi ve karlılık grafiği (Head-to-head point analysis and profitability chart)

İmalat metodunu maliyetler ve karlılık açısından dinamik olarak da ele almak önem arz edecektir. Çünkü amortisman gibi uzun süreçler isteyen hesaplamalarda paranın zaman değerinin göz önüne alınarak değerlendirilmesi yapılması gerekecektir. Böylece maliyet analizleri dinamik olarak yapılmış olacaktır. Dinamik yöntemlerden gelecek değer yöntemi ile ilerleyen yıllarda ne kadar kar elde edilebileceği daha düşük hata ile hesaplanabilecektir. Ancak böyle bir hesaplamada da çeşitli sapmalar olacaktır. Hesaplama yıllık faiz endekslü bir yöntemle dayanmaktadır. Yani yıllık faizlerin bugünkü değerleri üzerinden hesaplama yapılmaktadır. Ancak faizler de zaman içerisinde çok değişken olabilmektedir. Hesaplama denklem 10'da gösterilmiştir [17]. F gelecek değeri, P bugünkü değeri, i yıllık faiz oranını, n ise toplam yılı göstermektedir.

$$F = P * (1 + i)^n \quad (10)$$

Baş baş noktası hesaplamaları ile gelecek değer bulunurken hem yıllık gelirler hem de yıllık giderler hesaplamaya dâhil edilmelidir. Bu durumda baş baş noktası hesaplamalarında yıllara göre elde edilecek gelecek değerler çizelge 4'te gösterilmiştir. Yıllık faiz %12 olarak kabul edilmiştir. Gelecek değer katsayısı değerleri ile kar miktarları çarpılarak gelecekteki kar varsayımı değerleri elde edilecektir.

Çizelge 4. Gelecek değer yaklaşımı ile dinamik gelecek değer katsayısı (Dynamic profitability analysis with future value approach)

Yıl	Gelecek değer katsayısı
4	1,57
5	1,76
6	1,97
7	2,21
8	2,47

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan çalışma sonucunda mevcut tezgâh kullanıcıları, imalatçılar, hizmet alacak müşteriler ve araştırmacılar açısından çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. İmalatın en uygun maliyetle hızlı bir şekilde tamamlanması için denklem 3, 4 ve 5'ten anlaşılacağı üzere;

Tablaya yerleştirilen parça sayısı arttıkça birim parça imalatı geçen süre kısalmaktadır. Böylece imalat maliyetleri de azalmış olacaktır.

İmal edilecek parçaların dikey olarak yerleştirilmesi katman sayısını artırdığı için denklemlerden anlaşılacağı üzere imalat süresi artacaktır. Parçalar, geometrilerinin imkân verdiği sürece yatay olarak yerleştirilmesi daha avantajlı olacaktır.

Denklem 6, 7, 8, 9, Çizelge 3 ve Şekil 2'de gösterilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

- Tezgâhın etkin kullanılması ile maliyetler düşecek ve hem kullanıcılar hem de müşteriler açısından makul fiyatlar ve kar oranları elde edilmiş olacaktır. Yani yıllık çalışma sürelerinin artması ile kar elde etme hızında da artış sağlanmış olacaktır. Böylece tezgâh amortismanları daha erken tamamlanmış olacaktır.

437 TL fiyat için 4 yılda 10000 saat, 537 TL fiyat için 4 yılda 6000 saat, 637 TL fiyat için 4 yılda 4000 saat, 737 TL fiyat için 4,5 yılda 2500 saat, 837 TL fiyat için 4 yılda 2000 saat çalışma ile sistemin amortismanı en kısa sürede tamamlanacak ve sonrasında kara geçilecektir. Bu değerler başa baş noktası değerleridir. Sonrasında ise yüksek kar miktarlarına erişmek mümkün hale gelmeye başlayacaktır. 537 TL/saat fiyatlandırması yapılarak yılda 1000 saat yani aktif olarak 41,6 gün tezgâh çalışması cihaz amortismanlarının tamamlanmasını sağlayacaktır. 537 TL fiyat düşünülürken, minimum ve maksimum değil ara bir değer olması ve tezgâh sahipleri açısından ulaşılabilir bir hedef olması nedeniyle dikkate alınmıştır. Fiyatların yüksek olması müşteri potansiyelini

azaltırken, fiyatların düşük olması sistemin amortisman süresini uzatacaktır. Bu nedenle ara bir değer olan 5 yıl düşünülmüştür. Bu düşünce aynı zamanda tezgâhın ekonomik ömrü değerlendirildiğine 1/3'lük ömrüne tekabül etmektedir.

- Kullanım alanlarının ve sıklığının artması ile yıllık kullanım sürelerinin artması sonucunda 537 TL fiyat ve yılda 3000 saat çalışma ile 5. yılsonunda 2,12 milyon TL tutarında net kar elde etmek de mümkün hale gelecektir. 8. yılsonunda ise 4,64 milyon TL tutarında kar elde edileceği hesaplaması yapılmıştır.
- Tezgâh sahiplerinin fiyatları ortalama bir değerde tutmaları iş başına düşen kar miktarına azaltıyor olsa da daha fazla müşteri çekileceği için kar tutarının artacağı görülmüştür.

Yapılan çalışma kapsamında, bu teknolojinin yeni gelişim gösteren ve ilgi görmeye başlayan bir yöntem olması dikkate alınmıştır. Önümüzdeki süreçlerde sıklıkla bu tezgâhların satın alınması ve kullanımı görülecektir. İmalatçı ve hizmet talebinde bulunacak kişi ve kurumların karşılıklarına çıkacak maliyetler ve fiyat öngörülere açısından önemli bir kaynak ve rehber olan bu çalışma gerçekleştirilmiştir

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

Sembol	Açıklama	Birim
E_c	Enerji tüketimi	kWh
G_c	Gaz tüketimi	Lt/saat
M_p	Toz maliyeti	TL/kg
d_p	Parça yoğunluğu	g/cm ³
M_g	Gaz maliyeti	TL/lit
t_w	Tel erozyon işlem süresi	Saat
M_w	Tel erozyon maliyeti	TL/saat
t_h	Isıl işlem süresi	Saat
M_h	Isıl işlem maliyeti	TL/saat
t_b	Bilyalı dövme süresi	Saat
M_b	Bilyalı dövme maliyeti	TL/saat
M_t	Toplam maliyet	TL
M_{part}	Parça maliyeti	TL
M_E	Elektrik fiyatı	TL/kWsaat
P_s	Toz sarfiyatı	Kg/saat
N	Katman sayısı	-
t_k	Katman serme süresi	s
h_d	Tarama mesafesi	mm
V	Tarama hızı	mm/s
l_h	Katman kalınlığı	mm
V_p	Parça hacmi	mm ³
L_p	Parça yüksekliği	mm
L_s	Support yüksekliği	mm
t_m	İmalat süresi	saat
t_s	Makine ön bekleme süresi	saat
A_{ort}	Ortalama kesit alanı	mm ²

M_{DMLS}	Cihaz maliyeti (her şey dâhil)	TL
$M_{bakım}$	Bakım maliyeti (1000 saatlik)	TL
t_{yillik}	Yıllık çalışma süresi	Yıl
$t_{yıl}$	Amortisman süresi	Yıl
$M_{saatücreti}$	Saatlik belirlenen fiyat	TL
$M_{saatkar}$	Saatlik belirlenen kar miktarı	-
$M_{işçi}$	İş süresince sarf edilen iş gücü	TL

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W., "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties", *Progress in Materials Science journal*, 92: 112–224, (2018).
2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R., "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", *International Materials Reviews*, 57: 133–164, (2012).
3. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, 117: 371–392, (2016).
4. Wong K. V., Hernandez A., "A Review of Additive Manufacturing", *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, 2012: 1–10, (2012).
5. Everton S. K., Hirsch M., Stravroulakis P., Leach R. K., Clare A. T., "Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing", *Materials and Design*, 95: 431–445, (2016).
6. Frazier W. E., "Metal additive manufacturing: A review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23: 1917–1928, (2014).
7. Kayacan M. Y., Sayer S., Ürün geliştirme sürecinde hızlı prototip uygulamaları. *Plastik Dergisi*, 125: 122–130, (2014).
8. ASTM International F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", (2013).
9. Manfredi D., Calignano F., Ambrosio E. P., Krishnan M., Canali R., Biamino S., Pavese M., Atzeni E., Luliano L., Fino P. Badini C., "Direct Metal Laser Sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications", *Metallurgia Italiana*, 105: 15–24, (2013).
10. Baumers M., Tuck C., Wildma, R., Ashcroft I., Rosamond E., Hague R., "Combined Build-Time, Energy Consumption and Cost Estimation for Direct Metal Laser Sintering", *Proceedings of Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*, 53: 1689–1699, (2012).
11. Barclift M., Joshi S., Simpson T., Dickman C., "Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing", *Solid Freeform Fabrication Symposium*

- *An Additive Manufacturing Conference*, 2007–2028, (2016).
12. Baumer M., Dickens P., Tuck C., Hague R., “The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push”, *Technological Forecasting & Social Change*, 102: 193–20, (2016).
 13. Amini M., “Time Estimation Additive Manufacturing”, *Master of Science in technology*, Texas State University, (2014).
 14. Thomas, D., Gilbert, S., “Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing - A Literature Review and Discussion”, *NIST Special Publication*, 1176: 1–77, (2014).
 15. Piili H., Happonen A., Väistö T., Venkataramanan V., Partanen J., “Cost Estimation of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel”, *Physics Procedia*, 78: 388–396, (2015).
 16. Sahu A. K., Narang, H. K., Sahu, A. K., Sahu, N. K., “Machine economic life estimation based on depreciation-replacement model”, *Cogent Engineering*, 3: 1–15, (2016).
 17. Üçüncü K.,”Mühendislik Ekonomisi”, *KTÜ Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü*, 44-46, (2016).