

Yusuf Tansel İç
ytansel@baskent.edu.tr

Başkent Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06810 Etimesgut, Ankara

Mustafa Yurdakul

Gazi Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü,
06570 Maltepe, Ankara

Bariş Keçeci

Başkent Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06810 Etimesgut, Ankara

Öykü Tokmak

Başkent Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06810 Etimesgut, Ankara

Gizem Gül Koç

Başkent Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06810 Etimesgut, Ankara

Gamze Buyruk

Başkent Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü,
06810 Etimesgut, Ankara

Bir İmalat Sisteminde Darboğaz Modeli ile Üretim Kapasitesinin Artırılması

İmalat sistemlerinin kapasiteleri genellikle bir ya da daha fazla darboğaz tarafından kısıtlanabilmektedir. Darboğazın tespiti ve darboğazların kullanım (doluluk) oranlarını en üst düzeyde tutacak şekilde üretim planlama yapılması imalat sistemlerinde üretim kapasitenin artmasını ve karma vermeyi kolaylaştırır. Böylece imalat sistemi müşterilerin artan taleplerine cevap verilebilir ve birim maliyetler düşürülebilir. Bu çalışmada, ilk önce bir saç metal işleme sisteminde üretimde kullanılan istasyonların kullanım oranları belirlenerek sistemin üretim kapasitesini kısıtlayan darboğaz belirlenecektir. Darboğaz modeli ile elde edilen sonuçlara göre imalat sisteminin performansının geliştirilmesine yönelik olarak öneriler hazırlanarak üretim kapasitesinin nasıl artırılacağı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İmalat Sistemi, Darboğaz Modeli, Üretim Kapasitesi, Performans Geliştirme..

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı darboğaz modellemesini kullanarak bir imalat sisteminde var olan darboğaz kaynakların belirlenmesi ve üretim kapasitesini artırmaktır. Çalışmanın yapıldığı firma saç metal şekillendirme işlemlerinin yapıldığı ve havacılık sanayiindeki büyük firmaların alt yüklenicisi konumunda olan bir firmadır. Firma yönetimi üretim alanında bulunan “detay üretim hattı”nın kapasite açısından incelenmesini ve hattın yıllık üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik öneriler oluşturulmasını hedeflemiştir. Çalışmanın başlangıcında hattı analiz edebilecek benzetim gibi farklı modeller gözden geçirilmiş ancak

basitliğinden ve araştırmacılar tarafından kolayca takip edilebilirliği açısından darboğaz modelinin kullanılması tercih edilmiştir.

Darboğaz modeli literatürde ilk olarak Solberg tarafından tanımlanmıştır [1-4]. Genellikle deterministik modellerin gerçek hayat problemlerinin çözümünde bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Bir deterministik model olan Solberg’in [3,4] darboğaz modeli; üretim sisteminin tasarım parametrelerinin başlangıç tahminlerinde ve nispeten basit ve deterministik sistemlerde kullanılabilirlik uygulanması kolay ve iyi sonuçlar veren bir modeldir. Jiang ve diğerlerinin [5] yaptığı bir çalışmaya göre darboğazları belirlerken tüm sistemin üretim kapasitesini belirleyen gerçek darboğazlar yerine

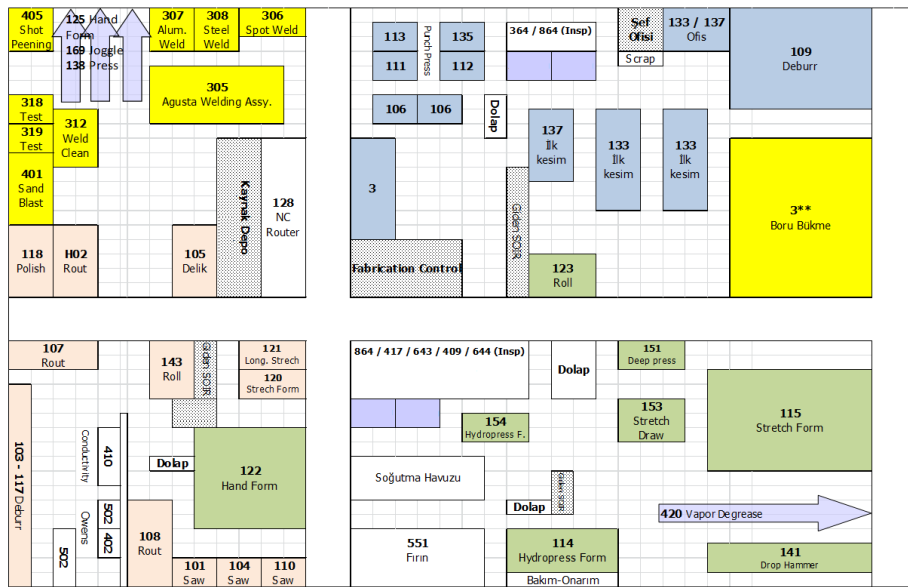
çözüm sırasında yanıtıcı, yerel ve bölgesel darboğazlar elde edilebilir. Zhang ve Wu'nun [6] tarafından yapılan bir diğer çalışmaya göre; uygulanabilir üretim planlama modellerinin genellikle birden fazla darboğaz kaynağı içermesi gerektiği saptanmıştır. Yapılan bu çalışmada, iş atölyesi çizelgeleme problemleri için darboğaz makineleri tanımlamak için taklit tavlama algoritması adlı yeni bir yöntem önerilmiş ve dönüştürülmüş bir planlama modeli oluşturularak istasyon iş yükü yerine son çizelgeleme performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma içerisinde çizelgeleme hedefleri değişikçe sistemin darboğazlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Li'nin [7] yaptığı başka bir çalışmanın sonuçlarına göre; darboğazın doğru ve hızlı olarak tanımlanması sistem kapasitesinin artışı, kaynakların verimli kullanılmasında ve birim maliyetlerin azaltılmasında önemli olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, karmaşık imalat sistemlerinde darboğazları tespit etmek için bir veri tabanlı çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen yöntem, gerçek bir üretim hattında verimliliği arttırmak için uygulanmıştır. Enns ve Costa'nın [8] yaptığı bir çalışmaya göre ise; toplam girdi temin yükü denetimine dayalı ve darboğaz kaynakların yüklerine göre karşılaştırılma yapılmıştır. El-Tamimi v.d. [9] gerçekleştirdikleri bir çalışmada, basit ve karmaşık iki esnek üretim sistem tipinin performansının belirlenmesinde darboğaz modeli, benzetim modeli ve Petri Netleri kullanmış ve performans sonuçlarını birbiriyle karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda basit esnek üretim sistemi için üç yöntemin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada ise Singholi v.d. [10] yine bir esnek üretim sisteminin performans analizi amacıyla darboğaz modelinin kullanıldığı bir

çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada öncelikle darboğaz istasyonunun tespiti amacıyla darboğaz modeli kullanılmış, ardından darboğaz istasyondaki makine sayısının artırılmasının performans üzerindeki etkilerini analiz amacıyla benzetim modeli oluşturularak farklı senaryolarda sistemin performansının gelişimi izlenmeye çalışılmıştır.

Literatürde özellikle basit imalat sistemlerin modellenmesi ve kontrolünde kullanılması önerilen darboğaz modeli çalışmamız kapsamında da kullanılarak imalat sisteminin darboğaz kaynakları belirlenecek ve üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik olarak öneriler oluşturulacaktır.

2. DETAY ÜRETİM HATTI

Uygulama yapılan firmanın üretim alanında 'detay üretim hattında' işlenen hammaddeler partiler halinde gelmektedir ve hat kesikli üretim özelliğine sahiptir [4]. Üzerinde çalışma gerçekleştirilen detay üretim hattı, 133-CNC pres istasyonu, 137-CNC zımba pres istasyonu, 106-bükme istasyonu, 122-elle şekil verme istasyonu, 109-çapak alma istasyonu, 864-muayene istasyonu, 747-parçaya numara verme istasyonu, 645-parçaya numara verme ve kontrol etme istasyonu, 551-fırın, 115-streç form istasyonu, 123-sarma istasyonu, 114-hidrolik pres form verme istasyonu, 113- ve 112- zımba pres istasyonları, 420-kimyasal yıkama istasyonu, 105-delik delme istasyonu, 104-, 110- ve 101- freze istasyonu ve 402-ısıtma işlem istasyonundan oluşmaktadır (Şekil 1). 'Detay üretim hattında' 10 farklı parça tipi işlenmekte ve Tablo 1 her parça tipinin (Parça A-J) hangi istasyonlarda işlendiğini, işleme sürelerini ve işlem frekansını (sıklığını) göstermektedir.

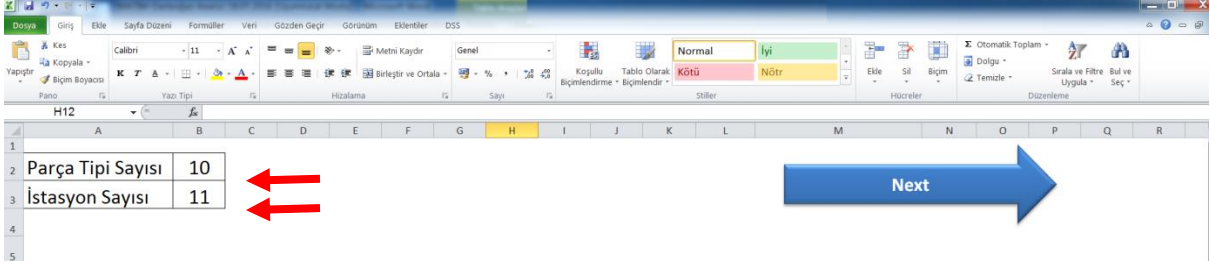


Şekil 1. Detay Üretim Biriminde Yerleşim Düzeni

3. DARBOĞAZ MODELİNİN OLUŞTURULMASI

'Detay üretim hattında' darboğaz istasyonları belirlemek için Excel Visual Basic aracı kullanılmıştır. Programın çalışma adımları aşağıda gösterilmiştir:

ADIM 1: Öncelikle programını çalıştırılması ile açılan pencerede imalat sisteminde işlenen parça tip sayısı ve sistemde bulunan istasyon sayısı bilgileri Şekil 2 de gösterildiği gibi kutucuklara girilmektedir.



Şekil 2. Toplam parça tip sayısı ve toplam istasyon sayısının girildiği ekran görüntüsü

ADIM 2: Açılan bir sonraki pencerede, program tarafından oluşturulan tablonun satırlarında parça tiplerinin kodları ve sütunlarında ise istasyonların kodları görülmektedir (Şekil 3). Tabloda, parçaların işlendiği istasyonlara karşılık gelen kutucuklara işleme süreleri girilir. Parça tiplerinin işlenmediği istasyonlara karşılık gelen kutucuklara herhangi bir veri girişi yapılmaz. Darboğaz istasyonunun belirlenmesi için yapılacak hesaplamada kullanılacak olan parça karışım oranlarının hesaplanabilmesi için her parça tipinin bir aylık üretim miktarı da Şekil 3 de verilen tablonun son sütununu takip eden sütuna girilir. Bir parça tipinin karışım oranı parça tipinin üretim miktarının hat üzerinde işlenen toplam parça sayısına bölümü ile elde edilir. Hesaplamalar için gerekli işlem frekans değerlerinin girişi Şekil 4 de gösterilen bir sonraki pencerede verilen tablo üzerinde yapılır.

İşleme frekansının üst limiti 1'dir. Eğer bir parça tipinin her parçasında bir işlem gerçekleştiriliyor ise o işlemin işleme frekansı 1'dir. Şekil 3 ve Şekil 4 de verilen tablolara veri girişi ile artık program darboğaz model yaklaşımını kullanarak hesaplamaları yapmaya hazırdır.

ADIM 3: Artık, program her istasyon için işlemler başına düşen iş yükünü hesaplamaya hazırdır. Hesaplanan en yüksek orana sahip olan istasyon hattın üretim kapasitesini belirleyen darboğaz istasyondur. Hesaplamalarda, i istasyon numarasını, j parça kodunu, k işlem sırasını, t_{ijk} i nolu istasyonunda j kodlu parçanın k nolu işlemde

geçirdiği süreyi ve f_{ijk} i nolu istasyonunda j kodlu parçanın k nolu işleminin frekansını (yapılma sıklığı) göstermektedir [5]. Darboğaz istasyonu bulmak için öncelikle her istasyon i için iş yükü, $WLi = \sum_j \sum_k (k) t_{ijk} \times f_{ijk} \times P_j$ eşitliğiyle hesaplanır. Ardından, WLi olarak hesaplanan her istasyondaki iş yükünün, Si ile gösterilen istasyondaki işlemler (tezgah) sayısına bölünmesi ile, $[(WL)_i / S_i]$, işlemler başına düşen iş yükü hesaplanır. En yüksek işlemler başına düşen iş yüküne sahip olan istasyon darboğaz istasyondur ve "*" ile gösterilir. Darboğaz istasyondaki üretim hızı $R_p^{*} = S^{*} [(WL)_i / S_i]$ eşitliğiyle hesaplanır ve imalat sisteminde ulaşılabilecek en yüksek üretim hızını verir [5]. Herhangi bir parça tipinin en yüksek üretim hızı $R_{pj}^{*} = P_j \times R_p^{*}$ eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte, P_j j parça tipinin karışım oranını ve R_{pj}^{*} en yüksek üretim hızını göstermektedir. İstasyonlardaki doluluk (kullanım) oranları ise $U_i = (WL_i) / S_i \times R_p^{*}$ eşitliğiyle hesaplanır [5]. Eşitlikte, U_i istasyon i'deki doluluk oranını göstermektedir. Tüm bu hesaplamalar sonucu elde edilen darboğaz istasyonu, hattın en yüksek üretim hızı, parça tiplerinin en yüksek üretim hızları, istasyonların doluluk oranlarını program tarafından sonuç ekranı Şekil 5 de sunulmaktadır. Şekil 5 de görüleceği gibi 114 nolu istasyon darboğaz istasyondur. % 100 doluluk oranı ile darboğaz istasyon, % 90,5 doluluk oranı ile 551 nolu istasyon ve % 84 doluluk oranı ile 864 nolu istasyon dışındaki diğer sekiz istasyonun doluluk oranları oldukça düşüktür. Hattın saatlik üretim hızı 114 nolu darboğaz istasyonu ile aynıdır ve 33,6 parça/saat dir

Tablo 1. Parça Tiplerinin İstasyonlarda İşleme Süreleri ve Sıklıkları

Parça Tipleri	İstasyonlar	Ortalama İşlem Süresi (dk.)	Frekans
A	109	4,2	1
	864	3,6	1
B	109	4,3	1
	420	0,6	1
	551	20	1
	114	55	1
	402	0,6	1
	864	4,6	1
C	109	5,2	1
	420	0,6	1
	551	20	1
	402	0,6	1
	864	4,4	1
D	109	6,4	1
	106	4,2	1
	864	7,5	1
E	109	3,2	1
	420	0,6	1
	551	20	1
	114	45	1
	122	13,2	1
	864	2,6	1
F	109	2,1	1
	420	0,6	1
	551	20	1
	114	25	1
	864	3,4	1
G	109	4,2	1
	114	0,6	1
	420	20	1
	551	25	1
	864	3,6	1
H	109	4,2	1
	420	0,6	1
	551	10	1
	114	25	1
	122	13,2	1
	864	3,6	1
I	109	4,2	1
	123	21	1
	864	3,6	1
J	109	4,2	1
	420	0,6	1
	551	10	1
	114	25	1
	H02	5,4	1
	103	11,4	1
	402	0,6	1
	864	3,6	1

Hattın üretim hızını artırmak darboğaz istasyonundaki işlemler sayısını artırmak veya darboğaz istasyonundaki işleme sürelerini azaltmak ile olasıdır. İşleme sürelerini azaltmak çoğu zaman oldukça zor olduğu için işlemler sayısını artırmak tercih edilebilir. Örneğin 114 nolu darboğaz istasyonundaki işlemler sayısı 2 den 3 e çıkarılırsa Şekil 6 da görüleceği gibi 551 nolu istasyon hattın üretim hızını belirleyen darboğaz istasyon haline gelir ve saatlik üretim hızı 33,6 dan 37,1 parça/saat e çıkar. Eğer hat sorumluları üretim hızını yeniden artırmak isterse yeni darboğaz istasyonunda işlemler sayısını 4 den 5 e çıkartılabilir ve Şekil 7 deki sonuç ekranında görüleceği gibi darboğaz istasyon değışir ve 864 nolu istasyon darboğaz istasyon olur. Bu durumda saatlik üretim hızı da 40 parça/saat olur.

Darboğaz istasyonundaki işlemler sayısını artırma kararını vermek için ekonomik bir analiz gerçekleştirilebilir. Örneğin, Şekil 5 de darboğaz olarak belirlenen 114- Hydro Press iş istasyonunda üretim hızını artırmak amacıyla 114'nolu darboğaz istasyonuna üçüncü bir işlemler (yeni bir hidrolik pres) alımı durumunun ekonomik analizi yapılmıştır. Yeni bir hidrolik pres alımında yıllık gider kalemleri olarak bakım-onarım, yağ, elektrik ve presi işletecek personel masrafları olacaktır. Presin satın alma bedeli, kurulumu ve işletmeye alımına giderleri başlangıçta (yıl 0) yapılan yatırım giderini oluşturacaktır. Yeni pres alımında ABB ve Alpha model iki alternatif arasında bir seçim yapılmıştır. Tablo-4 ve Tablo 5 te modeller için 10 yıllık gelirler ve giderler tahmin edilmiş ve tabloların son satırlarında yıllık net para akışları elde edilmiştir. Tabloların son satırlarında verilen para akışlarından modellerin Net Bugünkü Değerleri (NBD) ve Tablo 6 da görüldüğü gibi iskontolu geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. ABB modelinin NBD'si +412.369 TL ve iskontolu geri ödeme süresi 6,9 yıldır. Alpha modeli için yapılan hesaplamalar sonucu NBD'si +645.237 TL ve iskontolu geri ödeme süresi 5,9 yıl olarak hesaplanır. Sonuçlardan görüleceği gibi Alpha hidrolik presi ekonomik olarak daha avantajlıdır ve firmaya Alpha presini alması önerilmiştir.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															

Şekil 3. Parça işleme sürelerinin ve parça miktarlarının girildiği ekran görüntüsü

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													

Şekil 4. Parça tiplerinin işleme sıklık değerlerinin girildiği ekran görüntüsü

B31												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
4												
5	İstasyon	109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
6	WL	4,83519616	0,198014412	0,991321	6,464371	3,570056	0,030264	0,063891	1,173579	0,264211	0,017198	4,50056
7	WL/S	0,69074231	0,016501201	0,33044	1,616093	1,785028	0,015132	0,009127	0,586789	0,026421	0,002866	1,50019
8												
9												
10	Darboğaz İstasyon:	114										
11												
12												
13		109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
14	Doluluk Oranı	38,7%	0,9%	18,5%	90,5%	100,0%	0,8%	0,5%	32,9%	1,5%	0,2%	84,0%
15												
16												
17	Üretim Hızı	Parça/Saat	Yıllık Üretim*									
18	RpA*	12,707782	30.499									
19	RpB*	0,77506167	1.860									
20	RpC*	7,54608657	18.111									
21	RpD*	7,9336174	19.041									
22	RpE*	0,40367795	969									
23	RpF*	1,58241758	3.798									
24	RpG*	0,32832474	788									
25	RpH*	0,26911864	646									
26	RpI*	1,87844808	4.508									
27	RpJ*	0,18838305	452									
28												
29												

*Günde 8 saat, yılda 300 gün esasına göre

Şekil 5. Sonuç ekranı görüntüsü

B32												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
4												
5	İstasyon	109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
6	WL	4,83519616	0,198014412	0,991321	6,464371	3,570056	0,030264	0,063891	1,173579	0,264211	0,017198	4,50056
7	WL/S	0,69074231	0,016501201	0,33044	1,616093	1,190019	0,015132	0,009127	0,586789	0,026421	0,002866	1,50019
8												
9												
10	Darboğaz İstasyon:	551										
11												
12												
13		109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
14	Doluluk Oranı	42,7%	1,0%	20,4%	100,0%	73,6%	0,9%	0,6%	36,3%	1,6%	0,2%	92,8%
15												
16												
17	Üretim Hızı	Parça/Saat	Yıllık Üretim*									
18	RpA*	14,0361655	33.687									
19	RpB*	0,85608125	2.055									
20	RpC*	8,33490216	20.004									
21	RpD*	8,76294278	21.031									
22	RpE*	0,44587565	1.070									
23	RpF*	1,74783255	4.195									
24	RpG*	0,36264553	870									
25	RpH*	0,29725043	713									
26	RpI*	2,07480803	4.980									
27	RpJ*	0,2080753	499									
28												
29												

*Günde 8 saat, yılda 300 gün esasına göre

Şekil 6. Darboğaz (114 nolu) istasyonunda işlemci sayısının 2 den 3 e çıkması durumunda elde edilen yeni sonuç ekranı

F32		f3c											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
4													
5		İstasyon	109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
6		WL	4,83519616	0,198014412	0,991321	6,464371	3,570056	0,030264	0,063891	1,173579	0,264211	0,017198	4,50056
7		WL/S	0,69074231	0,016501201	0,33044	1,292874	1,190019	0,015132	0,009127	0,586789	0,026421	0,002866	1,50019
8													*
9													
10		Darboğaz İstasyon:	864										
11													
12													
13			109	420	106	551	114	H02	103	123	122	402	864
14		Doluluk Oranı	46,0%	1,1%	22,0%	86,2%	79,3%	1,0%	0,6%	39,1%	1,8%	0,2%	100,0%
15													
16													
17		Üretim Hızı	Parça/Saat	Yıllık Üretim*									
18		RpA*	15,1206148	36.289									
19		RpB*	0,92222301	2.213									
20		RpC*	8,97886572	21.549									
21		RpD*	9,43997723	22.656									
22		RpE*	0,48032449	1.153									
23		RpF*	1,88287198	4.519									
24		RpG*	0,39066392	938									
25		RpH*	0,32021632	769									
26		RpI*	2,23510994	5.364									
27		RpJ*	0,22415143	538									
28													
29													

*Günde 8 saat, yılda 300 gün esasına göre

Şekil 7. Darboğaz (551 nolu) istasyonunda işlemci sayısının 4'den 5'e çıkması durumunda elde edilen yeni sonuç ekranı

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, bir sac metal işleme sisteminde darboğaz analizi gerçekleştirilerek darboğaz istasyonun tespiti ve ardından darboğaz istasyonun iyileştirilmesine yönelik olarak bazı çözüm önerileri üretilmeye çalışılmıştır. Öncelikle sistemde yapılan gözlemlerle veri toplama işlemi gerçekleştirilmiş ve sistemdeki parça tipleri, işleme süreleri ve rotalarında bulunan istasyonlar gibi darboğaz modelini kullanabilmek için gerekli girdiler elde edilmiştir. Ardından, darboğaz modelinden elde edilen çıktılara göre sistemde üretimi kısıtlayan istasyonlar ve üretim miktarını artırmak için gerekli yeni işlemci alımları planlanmıştır. Üretimi artırmak amaçlı işlemci alımlarında farklı alternatifler arasında bir seçim yapabilmek için ekonomik analiz uygulanmıştır. Çalışmada darboğaz modeli Visual Basic alt yapısını kullanan MS Excel ile bir yazılıma dönüştürülerek sistemdeki değişmelere göre üretim kapasite değerlerinin hesaplandığı bir araç şeklinde firmaya sunulmuştur.

INCREASING PRODUCTION CAPACITY IN A MANUFACTURING SYSTEM USING BOTTLENECK MODEL

Production capacities of manufacturing systems are usually limited by one or more bottlenecks. Identification and proper management of

bottlenecks is a key factor to improve the throughput of a manufacturing system. Proper management of bottleneck resources leads to an improvement in the utilization ratios of bottlenecks and consequently an increase in the production capacity value of the system so that the system can meet the increasing demands of the customers and reduce the products' prices. In this study, usage of the bottleneck model is illustrated in a production company producing parts from sheet metal. In the application, first, the existing utilization ratios of resources and existing production capacity of the system are calculated and the bottleneck resource(s) is determined. Then, performance improvement strategies are developed based on the calculated results in the first phase and applied. The application of strategies shows important increases in production capacity of the system.

Keywords: Manufacturing System, Bottleneck Model, Production Capacity, Performance Improvement.

Tablo 4. ABB presi için nakit akım tablosu

Yıllar	0. yıl	1. yıl	2. yıl	3. yıl	4. yıl	5. yıl	6. yıl	7. yıl	8. yıl	9. yıl	10. yıl
A-Toplam Geler (Yıllık Üretim miktarı x birim fiyat) (TL)		1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600
ABB QUINTUS PRESS TYPE QFC 1.2x3-1400 ve Donanımı Yatırım Gideri	1.533.000										
Yıllık Motorin/Elektrik Gideri		804.000	804.000	804.000	804.000	804.000	804.000	804.000	804.000	804.000	804.000
Yıllık Yağ Gideri		4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800	4.800
Yıllık Bakım-Onarım Gideri		96.000	96.000	96.000	96.000	96.000	96.000	96.000	96.000	96.000	96.000
Yıllık Personel Gideri		114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200
B-Toplam Giderler (TL)	- 1.533.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000	1.019.000
C-NET NAKİT AKIMI (A-B)	- 1.533.000	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600	+316.600

Tablo 5. Alpha presi için nakit akım tablosu

Yıllar	0.yıl	1. yıl	2. yıl	3. yıl	4. yıl	5. yıl	6. yıl	7. yıl	8. yıl	9. yıl	10. yıl
A-Toplam Gelirler (Yıllık Üretim miktarı x birim fiyat) (TL)		1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600	1.335.600
Alpha 1300 Ton Çift Arabalı Kauçuk Presi ve Donanımı Yatırımı Gideri	- 1.490.000										
Yıllık Motorin/Elektrik Gideri		858.000	858.000	858.000	858.000	858.000	858.000	858.000	858.000	858.000	858.000
Yıllık Yağ Gideri		3.900	3.900	3.900	3.900	3.900	3.900	3.900	3.900	3.900	3.900
Yıllık Bakım-Onarım Gideri		12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000	12.000
Yıllık Personel Gideri		114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200	114.200
B-Toplam Giderler (TL)	- 1.490.000	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100	988.100
C-NET NAKİT AKIMI (A-B)	- 1.490.000	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500	+347.500

Tablo 6. ABB ve Alpha presleri için iskontolu geri ödeme sürelerinin hesaplanması

İskontolu Geri Ödeme Süresi (Yıl)	NBD (ABB presi)	NBD (Alpha presi)
0	- 1.533.000,00 TL	- 1.490.000,00 TL
1	- 1.245.181,82 TL	- 1.174.090,91 TL
2	983.528,93 TL	-886.900,83 TL
3	-745.662,66 TL	-625.818,93 TL
4	-529.420,60 TL	-388.471,76 TL
5	- 332.836,91 TL	- 172.701,60 TL
6	- 154.124,46 TL	+ 23.453,09 TL
7	+ 8.341,40 TL	

KAYNAKÇA

1. Klahorst, H. T., How To Plan Your FMS, *Manufacturing Engineering*, September (1983), 52-54.
2. Mohamed, Z. M., *Flexible Manufacturing Systems – Planning Issues and Solutions*, Garland Publishing, Inc., NY,1994.
3. Mejabi, O., Modelling in Flexible Manufacturing Systems Design, *PhDDissertation, LehighUniversity*, Bethlehem,PA,1988.
4. Groover, M.P., *Automation, Production System,Computer Integrated Manufacturing*, Pearson Inc. USA, 2008.
5. Jiang, Y-H., Wang, L., Jin, Y-H., *Bottleneck analysis for network flow model*,Department of Automation, Tsinghua University, Technical Report, Beijing, China,2003.
6. Zhang R., Wu, C., Bottleneck machine identification method based on constraint transformation for job shop scheduling with genetic algorithm, *Information Sciences* 188, (2012), 236–252.
7. Lin Li, *Bottleneck detection of complex manufacturing systems using a data-driven method*, International Journal of Production Research, 47, (2009) 24, 6929–6940.
8. Enns, S. T., Costa, M.P.A, The efectiveness of input control based on aggregate versus bottleneck work loads, *Production Planning & Control*, 13, (2002) 7, 614-624.
9. El-Tamimi, A.M., Abidi, M.H., Mian, S.H., Aalam, J., Analysis of performance measures of flexible manufacturing system, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 24 (2012) 2, 115–129.
10. Singholi, A., Chhabra D., Ali, M., Towards improving the performance of flexible manufacturing system: a case study, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3 (2010) 1, 87-115.

Hasan Demirtaş
Öğr. Gör.

Kilis 7 Aralık Üniversitesi
Meslek Yüksek Okulu
Kilis

Oğuzhan Yılmaz
Doç. Dr.

Gazi Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bahattin Kanber
Prof. Dr.

Bursa Teknik Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü
Bursa

Makro ve Mikro Boyutlarda Üretim Yapabilen Elektrokimyasal İşleme Tezgâhında İşlem Parametreleri Etkilerinin İncelenmesi

Son yıllarda gelişen teknoloji ile işlenmesi zor malzemelerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu kapsamda bu malzemelerin hassas ve kolay bir şekilde imal edilebilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de Elektrokimyasal İşleme (EKİ) yöntemidir. Bu çalışmada makro ve mikro boyutlarda işleme yapabilecek şekilde tasarlanmış bir masaüstü EKİ tezgâhı sunulmuştur. Ayrıca voltaj, anot-katot arası boşluk ve adım oranı gibi bazı EKİ parametrelerinin, malzeme işleme hızı (MİH) ve kesme boşluğu üzerindeki etkileri deneyler yapılarak incelenmiş ve sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak EKİ tezgâhının kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu deneyler sonucunda, voltajın diğer EKİ parametrelerine göre daha etkin bir role sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal İşleme (EKİ) Tezgâhı, Adım Oranı, Malzeme İşleme Hızı (MİH), Kesme boşluğu

GİRİŞ

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden biri olan Elektrokimyasal İşleme (EKİ), teoride Faraday ve elektroliz kanunlarına dayanmaktadır. Bu kanunlara göre doğru akım güç kaynağına bağlı iki elektrot arasında elektron transferi, elektrik iletkenliğine sahip bir sıvı (elektrolit) yardımıyla gerçekleşmektedir. EKİ yönteminde ise iş parçası ve takım, doğru akım güç kaynağının pozitif ve negatif kutbuna bağlı elektrotlar olup, sırasıyla anot ve katot olarak adlandırılmaktadırlar. İşlem sırasında bir pompa yardımıyla elektrolit anot ve katot arasındaki boşluktan belli bir hızla iletilmekte; böylece düşük voltaj yüksek akım değerlerinde anottan atomik boyutlarda malzeme kaldırılabilir. Bu kapsamda elektrik iletkenliğine sahip tüm malzemeler, mekanik özelliklerine bakılmaksızın, EKİ yöntemi ile üretilebilmektedir. Ayrıca takım aşınması ve iş parçası üzerinde artık gerilme oluşumu gibi bazı olumsuz faktörler EKİ yönteminde en aza indirgenmektedir. Bununla birlikte, EKİ ile parlak yüzeyli parçaların elde edilmesi, işlenmesi zor malzemelerin imalatı ve karmaşık yüzeyli parçaların üretimi mümkün hale gelmektedir [1]. Bu özelliklerinden dolayı EKİ, işlenmesi zor ve serbest şekilli 'freeform' parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Buna rağmen EKİ yöntemi sonrası işleme hassasiyetinin tahmin edilememesi gibi zorluklardan dolayı bu yöntem, elektro erezyon işleme yöntemlerinin gerisinde kalmıştır.

EKİ yönteminin uygulanabilirliğini arttırmak için literatürde bazı çalışmalar yapılmıştır. Bhattacharyya, vd. [2] eksenlerde takım hareketini vidalı mil ve somun ile yapan bir elektrokimyasal mikro işleme (EMİ) tezgâhı tasarlanmıştır ve motor olarak adım tip motorlar tercih edilmiştir. Yapılan deneyler ile elektrolit konsantrasyonu ve voltajın kesme boşluğu ve Malzeme İşleme Hızı (MİH) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Li vd. [3] darbe (pulse) frekansı, adım oranı, voltaj ve elektrolit konsantrasyonunun paslanmaz çelikte mikro delik delme üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, katot hareketi adım motorlar ile gerçekleştirmişlerdir. Başka bir çalışmada Vanderauwera vd. [4], bir elektro erezyon işleme tezgâhını EKİ kabiliyeti olan bir tezgâha dönüştürmüş olup, devamlı doğru akım (DA) ve darbeli doğru akım (DDA) işleme yöntemlerinin frezeleme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Özerkan ve Çoğun [5] küçük boyutlarda bir elektrokimyasal delme (EKD) tezgâhı tasarlamışlardır. Düşey yönde hareketini vidalı mil yardımı ile yapan bu tezgâhta katot hareketi ise anot katot arasındaki akım sabit olacak şekilde kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca takım içinden elektrolit püskürtme, farklı hızlarda katodun dönmesi gibi özellikleri bulunan bu tezgâhta Hadfield ve AISI 1040 karbon çeliğinde, işleme gerilimi, elektrolit konsantrasyonu, püskürtme basıncı ve takım dönüş hızı gibi parametrelerin EKD işlemi

üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Önel [6] yaptığı çalışmada ise anot ve katot arasındaki mesafeyi bir servo motor ile kontrolünü sağlarken X, Y ve Z yönlerindeki hareketi ise adım motorlar kullanarak gerçekleştirmiştir. Adım motorları ile tek eksenli hareketin mikro kontrolcü kullanılarak yapıldığı çalışmada Thanigaivelan vd. [7], asitli sodyum nitrat çözeltisinin paslanmaz çeliğin işlenmesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bir diğer çalışmada ise hareketli gantri tip X-Y-Z hareketi yapabilen bir EMİ tezgahı tasarlanmış olup, hareket adım motorlar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada anot olarak bakır, katot olarak tungsten kullanılmıştır [8]. Neto vd. [9] yaptıkları çalışmada EKİ için NaCl tipte elektrolit kullanıldığında adım oranının voltaj ve elektrolit debisinden daha etkili bir parametre olduğunu göstermiştir. Mukherjee vd. [10] yaptıkları çalışmada MİH'yi, aşırı gerilim ile modellemiş ve deneysel sonuçlar ile matematiksel modeli karşılaştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda seçilen parametreler ise, boşluk miktarı, adım oranı voltaj ve akım yoğunluğu olmuştur. Ayrıca anot ve katot arasındaki boşluk miktarının düşürülüp, akış debisinin artırılması ile MİH değerlerinin artırılabilirdiği tespit edilmiştir [11-12]. Thanigaivelan ve Arunachalam [13] çalışmalarında katot uç şeklinin MİH ve kesme boşluğu üzerindeki etkilerini incelemişler ve konik şekilli katot ile daha iyi MİH ve kesme boşluğu değerlerinin elde edildiği tespit edilmişlerdir. Titreşimli takım hareketi yaparak mikro boyutlarda delik delinebilen bir diğer çalışmada anot malzemesi olarak bakır, katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılmıştır [14]. Bir diğer çalışmada ise voltaj, elektrolit konsantrasyonu, darbe periyodu ve frekansının bakır iş parçasının mikro boyutlarda işlenmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir [15]. Munda vd. [16] yaptıkları çalışmada ise bakırın mikro boyutlarda işlenmesi sırasında kıvılcım oluşumunun engellenmesi için uygun voltaj ve frekans aralıklarını tespit ederek işleme bölgesinden artıkların uzaklaştırmışlardır.

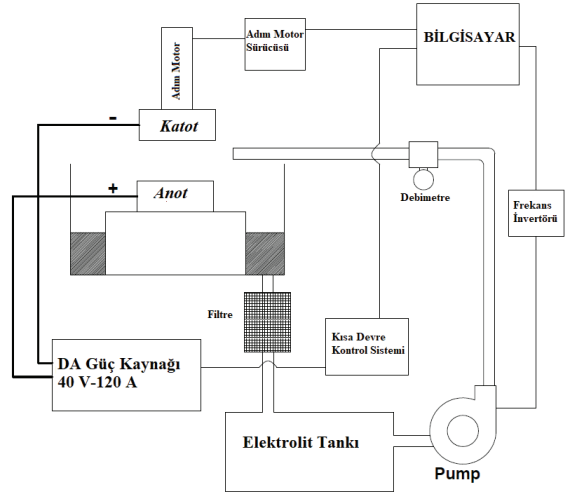
Bu çalışmada, makro ve mikro boyutlarda işleme kabiliyeti olacak şekilde tasarlanıp geliştirilen masaüstü boyutlarda bir EKİ tezgahı anlatılmış ve bu tezgahta gerçekleştirilen bazı deneylerle, EKİ parametrelerinin MİH ve kesme boşluğu üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve tezgahın kullanılabilirliği tartışılmıştır. Kullanılan malzemeler işparçası için bakır, takım ise pirinç malzemeden imal edilmiştir. Kullanılan EKİ parametreleri ise adım oranı, voltaj ve başlangıç boşluk miktarıdır. Bu çalışmada sıcaklık ve elektrolit debisi sabit tutulmuştur.

EKİ TEZGÂHI

Şekil 1'de gösterilen EKİ tezgâhı, çok amaçlı bir takım tezgâhından yola çıkılarak tasarlanmıştır. EKİ tezgâhı üç ana başlıkta tasarlanmış olup bunlar; (1) Makine gövdesi, (2) Elektrolit kontrol ünitesi, (3) Doğru akım (DA) güç kaynağı şeklinde belirtilebilir.



Şekil 1. EKİ tezgâhı



Şekil 2. EKİ tezgâhı şematiği

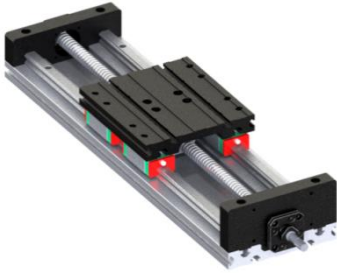
EKİ Tezgâhı Makine Gövdesi

Makine gövdesi, elektrolitin korozif etkilerine karşı dirençli olması için alüminyumdan imal edilmiş olup, üreticiden hazır şekilde temin edilmiştir. Ayrıca lineer ray ve vidalı mil ve somunların korozyona uğramaması için, tabla 10 mm kalınlığında pleksiglass levha ile kaplanmıştır. Üç eksenli katot hareketi ise G kodları kullanılarak Mach3® yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. X, Y ve Z eksenleri adım motorlar ve vidalı mil mekanizması yardımı ile hareket ettirilmektedir ve 25 µm hareket hassasiyetine sahiptir. Katot ise 10 mm kalınlığında 3 boyutlu yazıcı kullanılarak imal edilmiş olan özel bir bağlantı elemanı yardımıyla Z eksenine monte edilmiştir. EKİ tezgâhı makine gövdesinin bazı mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. EKİ tezgâhı makine gövdesi mekanik özellikleri

Çalışma Alanı (mm)	350 x 350 x 100
X-Y-Z hareket tipi	Lineer ray
Maks. Hareket hızı (m/min)	4
Motor tipi	Adım
Hareket iletimi	16/5 vidalı mil
Tabla	22.5 mm T-kanallı Alüminyum
Gövde Malzemesi	Alüminyum

Hassas pozisyonlama, başlama, durma ve geri harekete hassas cevap verme gibi bazı avantajlarından dolayı EKİ tezgâhında hareket kontrolü için adım motorlar tercih edilmiştir. Ayrıca kare tip ray kullanarak yüksek yük taşıma ve hareket hassasiyeti sağlanmıştır [17]. Dairesel hareketin doğrusal harekete dönüştürülmesi için vidalı mil kullanılmıştır.

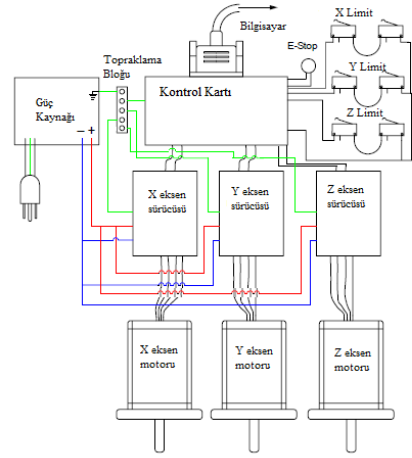


Şekil 3. Doğrusal hareket sistemi

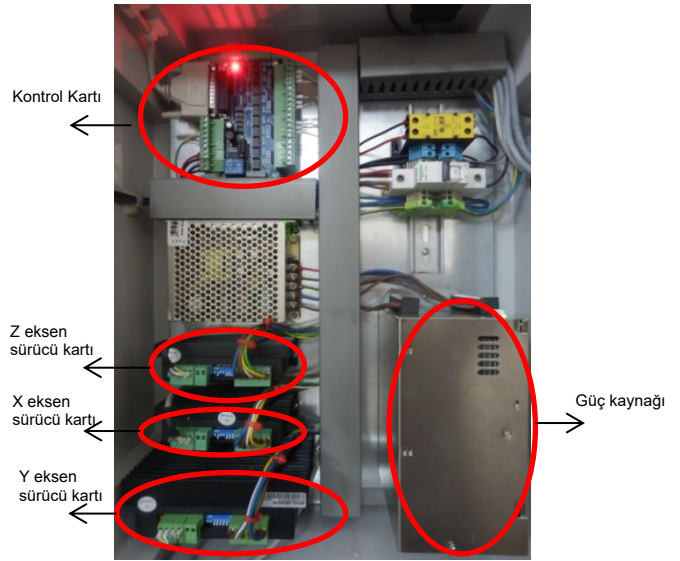
EKİ ve bilgisayar arasındaki bilgi alışverişi ise paralel bağlantı kablosu (LPT) ile yapılmaktadır. Bilgi alışverişi için en kolay yollardan biri olan LPT, sadece tezgâhların bilgisayar ile bağlantısı için değil; aynı zamanda yazıcı bağlantıları, bilgisayarlar arası bilgi alışverişi, tarayıcı bağlantıları gibi birçok alanda kullanılabilir.

Programlama sonucu oluşan hataların giderilmesi ve makine gövdesine zarar vermemesi için silindirik tipte fotoelektrik limit sensörleri kullanılmıştır.

EKİ tezgâhta her eksen için motor sürücüsü kullanılmış olup, eksen kontrol şeması Şekil 4'te kontrol panosu ise Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. EKİ eksen kontrol şematığı



Şekil 5. EKİ eksen kontrol panosu

Doğru Akım (DA) Güç Kaynağı

EKİ tezgâhında bir diğer önemli başlık ise doğru akım (DA) güç kaynağıdır. Elektroliz kanunlarına göre güç kaynağı anot ve katot arasındaki boşluktan yüksek akımı geçirebilecek kapasitede olmalıdır. Akım ve voltajın hassas bir şekilde kontrol edilmesi EKİ sırasında önemli faktörlerden biri olup, elektroliz kanunlarına göre malzeme yüzeyinden parça kaldırma işlemi düşük voltaj ve yüksek akım değerlerinde gerçekleşmektedir.- Bu yüzden EKİ tezgâhında, 2400

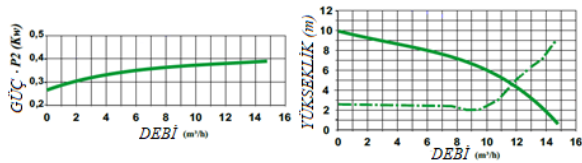
W gücünde ve programlanabilen bir DA güç kaynağı kullanılmıştır. Voltaj referans alındığında güç kaynağının maksimum çalışma aralığı 40V – 60A iken, akım referans alındığında bu aralık 20V-120A'dır. Programlanabilen özelliği yardımıyla güç kaynağını darbeleri (pulse) olarak kullanmak mümkündür. Ayrıca voltaj ve akım değerlerinin analog ve dijital sinyale dönüştürülerek, bir mikro işlemci veya PLC kart yardımıyla EKİ tezgâhında kısa devre oluşumu engellenmektedir. EKİ tezgâhında kullanılan DA güç kaynağının özellikleri Tablo 2 de gösterilmiştir.

Tablo 2. DA güç kaynağı teknik özellikleri

Voltaj Çıkış Aralığı	0 – 40 V
Akım Çıkış Aralığı	0 – 120 A
Güç Çıkış Aralığı	1200 – 2400 W
Voltaj Ölçümü	
Aralık	8 – 40 V
Hassasiyet	% 0.05 + % 0.05 F.S.
Akım Ölçümü	
Aralık	24 – 120 A
Hassasiyet	% 0.1 + % 0.1 F.S.

Elektrolit Kontrol Ünitesi

Konsatrasyon, debi ve sıcaklık gibi elektrolit özellikleri EKİ için önemli unsurlardır. Bu yüzden elektrolit transferini sağlayan pompanın dikkatle seçilmesi gerekmektedir. Sorunsuz çalışma ve hassas kontrol edilebilirliğinden dolayı, EKİ tezgâhında üç fazlı bir elektrolit pompa tercih edilmiştir. Pompanın salyangoz kısmı ise korozyona karşı dirençli olması için polipropilen malzemeden üretilmiştir. Bu pompanın teknik özellikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere pompa debisi tesisat yüksekliği ve pompa gücü ile değişmektedir. Tesisat yüksekliği tasarımdan dolayı değiştirilemeyeceğinden dolayı, debi kontrolü pompa gücünün kontrolü ile gerçekleştirilmelidir. EKİ tezgâhında güç kontrolü dolayısıyla debi kontrolü için bir frekans invertörü kullanılmıştır.



Şekil 6. Elektrolit pompası teknik özellikleri

Frekans invertörü yardımı ile elektrolit debisi 0.1-14 m³/h arasında istenilen bir aralıkta ayarlanabilmektedir. Pompa ile frekans invertörü arasındaki bilgi alışverişisi ise tesisata bağlanmış olan debimetre ile yapılmaktadır. Frekans invertörü teknik

özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Debinin okunması için kullanılan debimetre türbin tipte olup, bağlantı çapı 32 mm'dir.

Tablo 3. Frekans invertörü teknik özellikleri

Faz Tipi	P _N (kW)	P _N (hp)	R _{max} (Ohm)
Üç	0.55	0.75	390

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneysel çalışmaların amacı, EKİ de delik delme işlemi için voltaj, adım oranı ve anot-katot arası boşluk miktarı gibi bazı parametre etkileri inceleyerek, EKİ tezgâhının kullanılabilirliğini araştırmaktır. Deney sırasında kullanılan elektrolit tipi NaNO₃, sıcaklığı 25°C, debisi 2 lt/dk. ve konsantrasyonu ise 30 g/lt olarak alınmıştır. Deneylerde takım (katot) parçası olarak 3 mm çapında pirinç, iş parçası (anot) olarak ise 40x40x5mm ölçülere sahip saf bakır malzeme kullanılmıştır. Takımın (katodun) iki ucu da CNC torna tezgâhında işlenmiş olup, M8 diş açılarak takımın (katot) EKİ tezgâhına montajı sağlanmıştır. Takım (katot) ve iş parçası (anot) Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Pirinç katot ve bakır anot

MİH ve kesme boşluğu, EKİ performansını belirleyen en önemli sonuç parametreleridir. EKİ tezgâhının kullanılabilirliğinin tespiti için deneylerde, literatürde en çok kullanılan EKİ parametreleri olan voltaj, adım oranı ve başlangıç boşluk miktarı kullanılmıştır. Tablo 4 deneyler için kullanılan EKİ parametrelerini göstermektedir. Burada V_f adım oranını (mm/dk), Δb başlangıç boşluk miktarını (mm), V ise voltajı (Volt) göstermektedir. Deneysel sonuçlarda elde edilecek olan MİH (mm³/dk.) (1) numaralı denklem, kesme boşluğu (mm) ise (2) numaralı denklem yardımı ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin doğruluğu için her deney 3 kez tekrar edilmiş olup elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

$$MİH = \frac{m_{uw} - m_{mw}}{\rho_w \cdot t_m} \quad (1)$$

Burada m_{uw} (gr) deney öncesi iş parçası (anot) kütlelerini, m_{mw} (gr) deney sonrası işlenmiş iş parçası (anot) kütlelerini, ρ_w (gr/mm³) iş parçası (anot) yoğunluğunu ve t_m (dk.) ise işleme süresini ifade etmektedir.

$$\text{Kesme boşluğu} = \frac{D_h - D_c}{2} \quad (2)$$

Burada D_h (mm) deney sonrası malzeme üzerinde üretilen delik çapını, D_c (mm) ise takım (katot) parçasının çapını ifade etmektedir.

Tablo 4. EKİ parametreleri

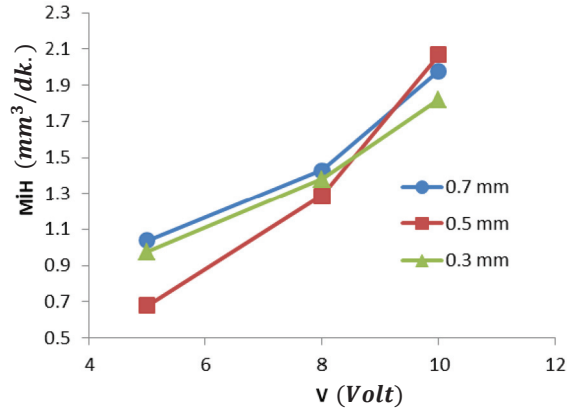
Deney Koşulu	Δb (mm)	V_f (mm/dk)	V (Volt)
1	0.3	3	5
2	0.3	3	8
3	0.3	3	10
4	0.5	3	5
5	0.5	3	8
6	0.5	3	10
7	0.7	3	5
8	0.7	3	8
9	0.7	3	10
10	0.3	5	5
11	0.3	5	8
12	0.3	5	10
13	0.5	5	5
14	0.5	5	8
15	0.5	5	10
16	0.7	5	5
17	0.7	5	8
18	0.7	5	10

İşleme öncesi ve sonrası iş parçası anot kütlesi 0.01 gr hassasiyetinde bir terazi yardımı ile ölçülmüştür. Ayrıca kısa devre etkisinin incelenmesi için işleme süresi, deneyin başlangıcından sonuna kadar bir süreölçer yardımıyla ölçülmüştür.

DeneySEL Sonuçlar ve Tartışma

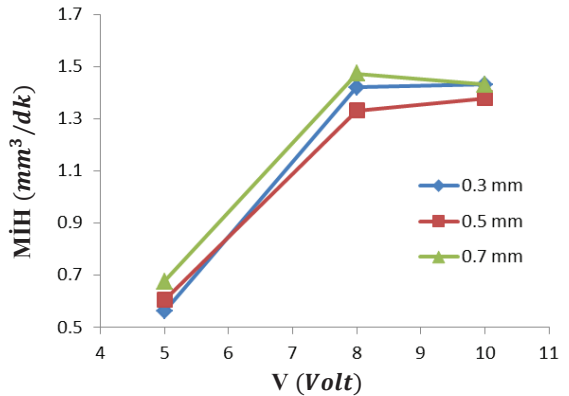
Voltajın Etkisi

DeneySEL sonuçlar, EKİ işlem parametrelerinin kesme boşluğu ve MİH üzerindeki etkilerinin daha kolay bir şekilde anlaşılabilmesi için grafikler şeklinde gösterilmiştir. Şekil 8. 5 mm/dk. adım oranı için artan voltaj ile MİH' nun arttığını göstermektedir. Faraday kanunlarına göre MİH ile akım doğru orantılı olarak değişmektedir. Ohm kanunları incelendiğinde artan voltaj ile akım değerinin artacağı düşünüldüğünde, aşağıdaki şeklin bu ifadeyi doğrular nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca bu sonuçlar literatürde yapılan bazı çalışmaları [2,4,5,10] doğrular niteliktedir.



Şekil 8. Voltajın $V_f=5\text{mm/dk.}$ için MİH üzerindeki etkisi

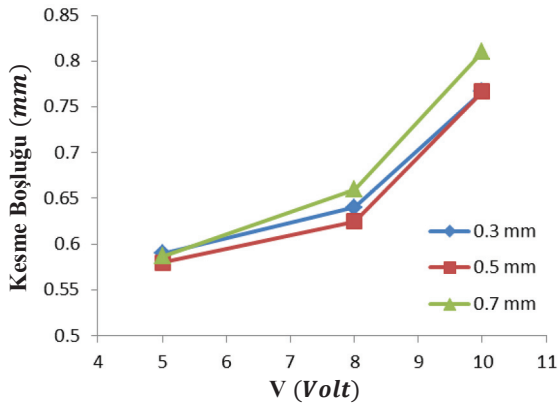
Fakat Şekil 9 incelendiğinde 3 mm/dk. adım oranı için, 8 volt değerinden sonra MİH' da önemli bir değişim olmadığı gözlenmektedir. Bunun nedeni ise düşük adım oranlarında ve yüksek voltaj değerlerinde kısa devre oluşumunun azalmasıdır ki; bu da anot katot arasındaki kimyasal reaksiyonların oluşumu için gerekli sürenin elde edildiğini ve parçaların birbirine temas etmeden ya da kısa devre oluşumu gerçekleşmeden birbirine yakın sürelerde (t_m) delik delme işleminin gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 9. Voltajın $V_f=3\text{mm/dk.}$ için MİH (MRR) üzerindeki etkisi

Ayrıca Şekil 10'da görüldü üzere yükselen voltaj miktarı ile kesme boşluğu miktarı artmaktadır. Bunun nedeni ise yukarıda belirtildiği üzere artan akım değerlerinin, takım (katot) üzerinde oluşturduğu H₂ gaz baloncuklarından kaynaklanmaktadır. Bu gaz baloncuklarının işlem sırasında sürekli olarak hacim değiştirmesi, iş parçası (anot) ve takım (katot) arasındaki oluşan elektriksel alanın mesafesini sürekli değiştirmektedir. Bu ise mikro boyutlarda kıvılcımlara neden olmaktadır. Böylece delik delme

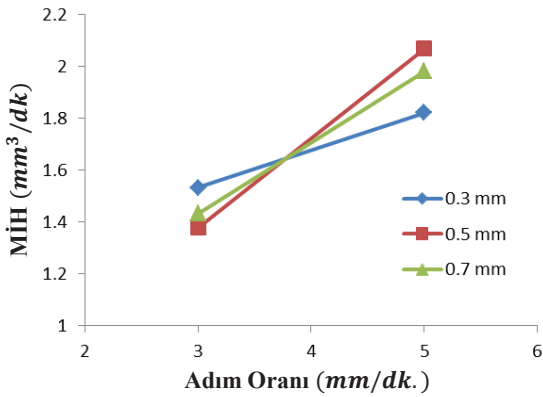
işlemi kontrolsüz bir şekilde gerçekleştiğinden yüksek voltaj değerleri kesme boşluğu değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu sonuçlar ise literatür [2,3,15] ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 10. Voltajın $V_f=5\text{mm/dk.}$ için kesme boşluğu üzerindeki etkisi

Adım Oranının Etkisi

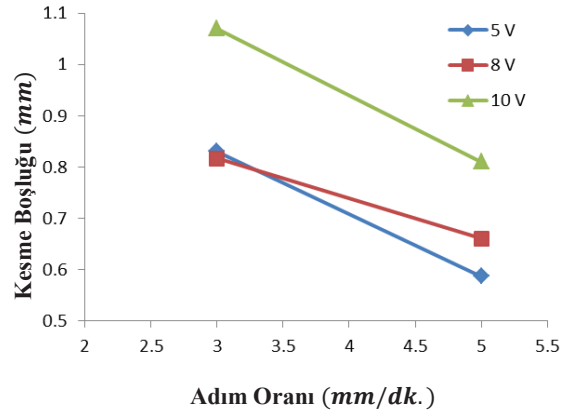
Şekil 11 ise adım oranlarına göre MİH değerlerindeki değişimi 10 V için göstermektedir. Görüldüğü üzere artan adım oranı ile takımın z eksenindeki hareketi artacağından, işleme süresi t_m düşerek MİH' yi arttıracaktır. Ayrıca Klocke F. vd. [18] yaptıkları deneysel çalışma incelendiğinde artan adım oranı ile akım yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiş olup, Şekil 11 de elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.



Şekil 11. Adım oranının MİH üzerindeki etkisi ($V=10\text{V}$)

Şekil 12 0.5 mm başlangıç boşluk miktarı için, tüm voltaj değerlerinde adım oranı ile kesme boşluğu arasındaki değişimi göstermektedir. Bu durumda artan adım oranı ile kesme boşluğu miktarı ters orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla sistemin delik delme hassasiyetinin artırıldığı görülmüştür. Artan adım oranı ile işlem sırasındaki boşluk miktarı düşmekte olup, parça çözünmesi kısıtlı bir bölgede gerçekleşerek kesme boşluğu miktarı azalmıştır.

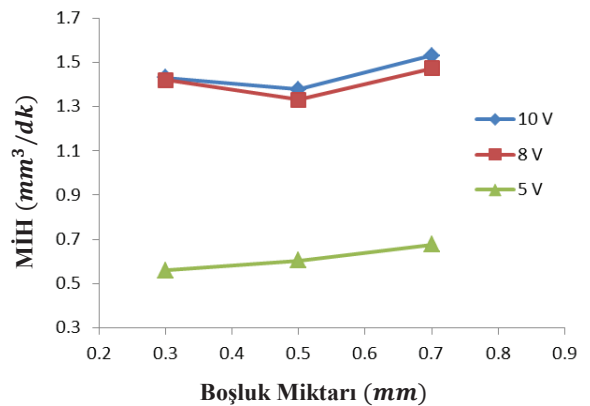
Böylece NaNO_3 kullanarak elde edilen Neto vd. [9] yapmış oldukları çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir.



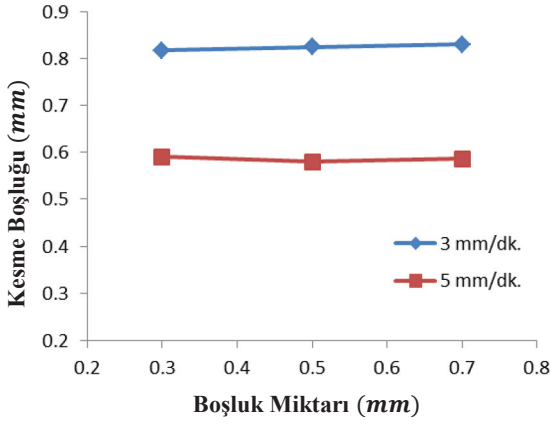
Şekil 12. Adım oranının kesme boşluğu üzerindeki etkisi ($\Delta b=0.5\text{ mm}$)

Anot-Katod Arası Boşluk Miktarının Etkisi

Şekil 13, MİH ve anot-katod arası boşluk miktarı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil incelendiğinde boşluk miktarının MİH üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlenmektedir. Fakat deney sonuçları göstermiştir ki; 5V üzerindeki değerlerde boşluk miktarının kesme boşluğu üzerindeki etkisi artmaktadır. Şekil 14, 5V için farklı adım oranlarında boşluk miktarının, kesme boşluğu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Bunun nedeni ise 5V için seçilen boşluk miktarlarının, anot katod arasında kimyasal reaksiyonların oluşumu için gerekli akım değerlerini oluşturamamasıdır. Eğer boşluk miktarı 0.3 mm altına indirilirse, 5V için kesme boşluğu değerlerinde değişimler gözlemlenmek mümkün hale gelecektir.

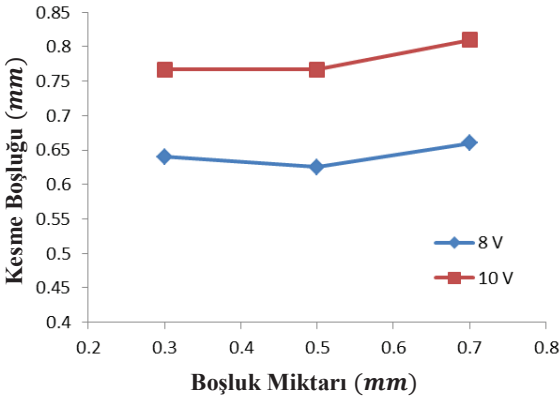


Şekil 13. Boşluk miktarının MİH üzerindeki etkisi ($V_f=3\text{mm/dk.}$)



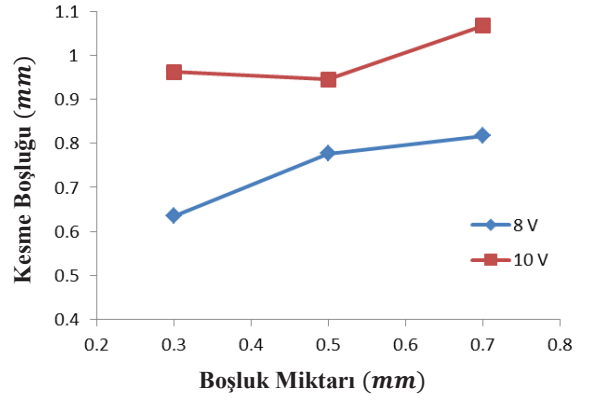
Şekil 14. Boşluk miktarının kesme boşluğu üzerindeki etkisi ($V_f=5V$)

Fakat belirlenmiş boşluk miktarları için 5V'tan sonra kesme boşluğu değerinin arttığı gözlenmiştir. Şekil 15'te görüldüğü üzere 5 mm/dk. adım oranı için kesme boşluğu; 0,7 mm boşluk miktarı için 8 V ve 10 V voltaj değerlerinde benzer şekilde değişmektedir. Bunun nedeni ise 0,7mm mesafeyi kat etmek için gerekli sürede metal atomları yeteri miktarda çözünmekte ve kesme boşluğu miktarı değişmemektedir.



Şekil 15. Boşluk miktarının kesme boşluğu üzerindeki etkisi ($V_f=5 \text{ mm/dk.}$)

3mm/dk. adım oranı kullanıldığında belirtilen mesafeler arası kat etme süresi daha da uzayacağı için, kesme boşluğu miktarı artmakta olup bu durum [15] doğrular niteliktedir. Şekil 16, boşluk miktarının kesme boşluğu üzerinde önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 16. Boşluk miktarının kesme boşluğu üzerindeki etkisi ($V_f=3 \text{ mm/dk.}$)

SONUÇ

Bu çalışmada masaüstü boyutlarda geliştirilmiş mikro/makro boyutlarda işleme kabiliyeti olan bir EKİ tezgâhının tasarım aşamaları sunulmuştur. Geliştirilmiş olan tezgah ile aşağıda belirtilmiş olan EKİ parametreleri kontrol edilebilmektedir.

- Elektrolit özellikleri
 - Sıcaklık
 - Debi
 - Konsantrasyon
- Adım Oranı
- Voltaj
- Akım
- Kısa Devre oluşumu

Ayrıca geliştirilmiş olan bu EKİ tezgâhının kullanılabilirliğinin tespiti için bazı deneyler yapılmış ve literatürde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ise;

- Voltajın, MİH ve kesme boşluğu üzerinde önemli bir rol oynadığı ve elde edilen çıktılar neticesinde aralarında doğrusal bir orantının olduğu görülmüştür.
- Düşük adım oranı ve artan voltaj ile kısa devre oluşumu en aza indirgenerek MİH değerlerinde iyileştirmeler yapılmıştır.
- Belirli voltaj değerleri için artan adım oranı ile, düşük kesme boşluğu ve yüksek MİH çıktıları elde edilmiştir.
- Düşük voltaj değerleri için anot-katot arasındaki boşluk değerlerinin, MİH ve kesme boşluğu için önemli bir parametre olmadığı; fakat artan voltaj ile bu parametrenin, kesme boşluğu üzerindeki etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.

INVESTIGATION OF MACHINING PARAMETER EFFECTS IN ELECTROCHEMICAL MACHINING PROCESS FOR MACRO/MICRO MANUFACTURING

Difficult-to-cut materials have been extensively used in recent years with the increasing technology. In this context Electrochemical machining (ECM) is one of the processes that is used to machine these type of materials with high precision. In this study, a designed and developed desktop size EC machine is presented for micro/macro manufacturing. Additionally validating experiments were conducted to investigate the ECM parameters like gap distance between anode and cathode, voltage, and feed rate effects on material removal rate (MRR) and overcut. The results were compared with the literature in order to show the usability of the machine. Also the experimental results showed that the voltage is more effective one among the ECM parameters than the others.

Keywords: Electrochemical Machining (ECM), ECM Machine, Voltage, Feed Rate, Material Removal Rate (MRR), Overcut.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje (BAP) birimi tarafından MF.14.19 numaralı ve "Mikro ve Makro Boyutlarda İşleme Kabiliyeti olan Elektro-Kimyasal İşleme Tezgâh Tasarımı ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

1. Rajurkar, K. P., Wei, B., Kozak, J. ve McGeough, J. A., Modelling and Monitoring Interelectrode Gap in Pulse Electrochemical Machining, *Annals of the CIRP*, 44 (1995) 1, 177-180.
2. Bhattacharyya, B., ve Munda, J., Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process, *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003) 2, 287-291.
3. Li, Z. ve Yuan, G., (2008), Experimental Investigation of Micro-holes in Electrochemical Machining Using Pulse Current, *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 151-154, China, 2008.
4. Vanderauwera, W., Vanloffelt, M., Perez, R., Lauwersa B., Investigation on the performance of macro electrochemical milling, *Procedia CIRP*, 6 (2013), 356-361.
5. Özerkan, H. B., Çoğun, C., Döner tüp takım kullanarak elektrokimyasal delme yönteminin deneysel incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 28 (2013) 4, 885-895.

6. Selis, Ö., Otomatik kontrollü elektrokimyasal işlemenin (EKİ) incelenmesi ve uygulanması, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 29 (2014) 1, 1-8.
7. Thanigaivelan, R., Arunachalam, R., M., Karthikeyan, B., Loganathan, P., Electrochemical micromachining of stainless steel with acidified sodium nitrate electrolyte, *Procedia CIRP*, 6 (2013), 352-356.
8. Malapati, M. ve Bhattacharyya B., Investigation into Electrochemical Micromachining Process during Micro-Channel Generation, *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (2011) 8, 1019-1027.
9. Neto, J., Silva, E., Silva, M., Intervening variables in electrochemical machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 179 (2006), 92-96.
10. Mukherjee, S., K., Kumar, S., Srivastava, P., K., Effect of Over Voltage on Material Removal Rate During Electrochemical Machining, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 8 (2005) 1, 23-28.
11. Costa, H., L. and Hutchings, I., M., Development of a maskless electrochemical texturing method, *Journal of materials processing technology*, 209 (2009) 8, 3869-3878.
12. Tehrani, A., F. ve Atkinson, J., Overcut in pulsed electrochemical grinding, *Journal of Engineering Manufacture*, 214 (2000) 24, 259-269.
13. Thanigaivelan R. ve Arunachalam R. M., Experimental Study on the Influence of Tool Electrode Tip Shape on Electrochemical Micromachining of 304 Stainless Steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 25 (2010) 10, 1181-1185.
14. Bhattacharyya, B., Malapati, M., Munda, J., Sarkar, A., Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, (2007), 335-342.
15. Bhattacharyya, B., Malapati, M., Munda, J., Experimental study on electrochemical micromachining, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, (2005), 485-492
16. Munda, J., Malapati, M., Bhattacharyya, B., Control of micro-spark and stray-current effect during EMM process, *Journal of Materials Processing Technology*, 194, (2007), 151-158
17. López de Lacalle L.N. ve Lamikiz A., *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer Press, Spain, 2009.
18. Klocke, F., Zeis, M., Klink, A., Veselovac, D., Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components, *Procedia CIRP*, 6 (2013), 369-373.

15-5 PH Çelik Malzemesinin Kriyojenik Talaşlı İmalat Sürecinde Yüzey Bütünlüğü Analizi

Erkin DUMAN

Mak. Müh.
İstanbul

Yusuf KAYNAK

Doç. Dr.

Marmara Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul

Havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan birçok parçanın üretiminde talaşlı imalat yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen imalat süreçlerinde meydana gelen termal ve mekanik etkiler imal edilen malzemelerde mikroyapısal dönüşümlere sebep olabilmekte olup bu durum nihai ürünün yorulma ömrü, korozyon direnci ve fonksiyonel performansını etkileyebilmektedir. Bu çalışmada 15-5 PH çelik malzemesinin kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırmadan elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Düşük kesme hızlarında kriyojenik soğutma yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde mikroyapıda plastik deformasyon ve bunun sonucu olarak mikrosertlik artışı meydana gelmiş, kriyojenik koşullar altında kesici takımında meydana gelen lokal kırılmalar diğer kesme yöntemlerine oranla daha pürüzlü bir yüzey oluşumuna neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik Talaşlı İmalat, Yüzey Bütünlüğü, Martenzitik Paslanmaz Çelik

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler yüksek mukavemet, korozyon direnci ve tokluk gibi özelliklerinden dolayı pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1]. Martenzitik paslanmaz çelikler grubunda yer alan ve bileşiminde ~% 3 bakır (Cu) içeren 15-5 PH malzemesi martenzit matris içerisinde dağılmış bakır (Cu) partiküllerinin çökmesi sonucu sertleştirilir [2]. Çökme sertleştirilmesi işlemi ile oldukça yüksek mukavemet değerine sahip olan 15Cr-5Ni PH çeliği sahip olduğu yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra yüksek kaynak edilebilme, korozyon direnci [2] ve yüksek sıcaklıklarda bahsi geçen özelliklerini muhafaza edebilme kabiliyeti [3] dolayısıyla havacılık ve savunma sanayilerinde modern savaş uçaklarının motor [4] ve bağlantı elemanlarında [5] kullanılmaktadır. Bahsi geçen uygulama alanları düşünüldüğünde bu malzemenin nihai boyut ve toleranslarına getirilmesinde faydalanılan imalat operasyonlarından birisi de talaşlı imalat yöntemidir [3,5,6]. Öte yandan şekillendirilebilme kabiliyetlerinin düşük olması 15-5 PH malzemesinin kesilmesi zor malzemeler grubunda yer almasına neden olmaktadır [7]. Bu malzemelerin talaşlı imalat sürecinde oluşan yüksek kesme kuvvetleri (mekanik etki), kesme sıcaklığı (termal etki), kesici takım aşınması vb. etkiler nihai ürünün yüzey ve yüzey altı özelliklerini etkileyebilmekte olup kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirebilmektedir [8, 9].

Literatürde ve endüstride kesilmesi zor malzemelerin talaşlı imalat performansını geliştirmek amacıyla kesme sıvısı, yüksek basınçlı soğutma (HPC), minimum miktarda yağlama (MQL), hava ile soğutma, kriyojenik soğutma vb. pek çok soğutucu ve yağlayıcı yöntemler kullanılmaktadır [10]. Bu yöntemler içerisinde kriyojenik soğutma yöntemi kesme performansını arttırmasının [11] ve yüzey bütünlüğünü iyileştirmesinin [12] yanı sıra çevre ve insan sağlığı açısından faydalı kabul edilmektedir ve dolayısıyla yaygın olarak tercih edilmektedir [13].

Literatür incelendiğinde 15-5 PH malzemesinin talaşlı imalat süreci ve yüzey bütünlüğü ile ilgili olarak sınırlı sayıda çalışma yer aldığı görülmekte olup [5, 7, 9, 14-16], bu çalışmalar içerisinde kriyojenik soğutucu (sıvı azot, karbondioksit vb.) yöntemlerine başvurulmadığı görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde Mondelin ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmalarda [5, 6], 15-5 PH çeliğinin kesme sıvısı yöntemi ile gerçekleştirilen tornalama operasyonu sonucu mikroyapıda beyaz tabaka oluşumu meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Benzer bir çalışma Chomienne ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş, 15-5 PH çeliğinin talaşlı imalat sürecinin yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme oluşumu üzerine etkilerini incelemişlerdir [14]. İşlenmiş yüzeyde kalıntı gerilme oluşumu meydana geldiği gözlemlenmiştir [17].

Literatür incelendiğinde bu malzemenin talaşlı imalat sürecinde kriyojenik soğutma koşulu kullanılarak gerçekleştirilen talaşlı imalat uygulamasının yer almadığı görülmektedir.

Bu çalışmada havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan 15-5 PH paslanmaz çelik malzemesinin kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik soğutma (sıvı karbondioksit ile) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen talaşlı imalat sürecinde iş parçasının yüzey ve yüzey altında meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı deformasyonu, mikrosertlik değişimi ve faz dönüşümü incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalar kapsamında Ø25x110 mm boyutlarında hazırlanan, H1025 standartlarında çökeltme sertleştirilmesi işlemi uygulanmış ve 310±5 Hv sertliğine sahip 15-5 PH martenzitik paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır. 15-5 PH iş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, talaşlı imalat testleri 18.5 kW motor gücüne sahip Doosan Puma CNC torna tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) yöntemler ile gerçekleştirilen deneylere ait deneysel düzenek gösterilmektedir. Kesme deneylerinde CNMA 120408 K68 kaplamasız karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Düşük, orta ve yüksek deformasyon hızlarının iş parçası mikroyapısında neden olabileceği değişimleri belirleyebilmek amacıyla kesme hızları geniş bir aralıkta (30-60-120-240 m/dak) olarak seçilmiş, ilerleme ve talaş derinliği değerleri sırasıyla 0,12 mm/dev ve 1,2 mm olarak sabit tutulmuştur. Kuru kesme, kesme sıvısı ve kriyojenik (sıvı karbondioksit ile) kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilen deneylere ait deneysel şema Tablo 2 ‘de gösterilmektedir. Çalışmalar kapsamında kullanılan soğutucu ve yağlayıcı sistemlerden kesme sıvısı ile gerçekleştirilen deneylerde sıvı çıkış basıncı 5-10 bar aralığında ölçülmüştür. Deneyler süresince kriyojenik (sıvı CO₂) sistemin çalışma basıncı, literatür [18] ve karbondioksit faz diyagramı [18] dikkate alınarak, regülatör vasıtasıyla 45-50 bar aralığında düzenlenmiştir.

Tablo 1. 15-5 PH iş parçası kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri

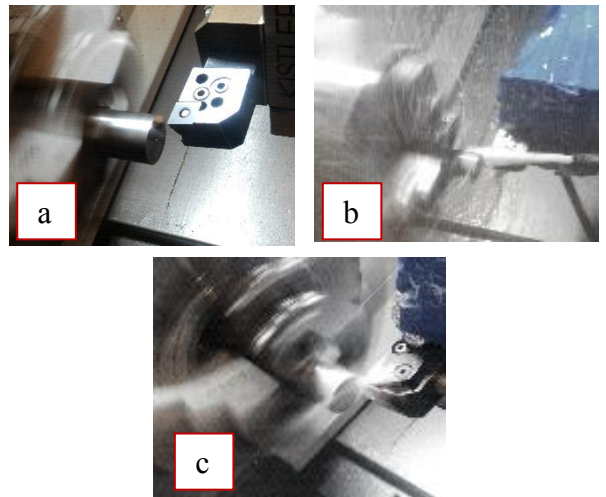
Kimyasal Bileşim	% Cu	% Mn	% Cr	% Ni
15-5 PH	3,1	0,78	15,24	4,82
Mekanik Özellikler	Akma Gerilmesi [19]	Çekme Gerilmesi [19]	% Uzama	Sertlik [20]
15-5 PH	1000	1200	12	310

Farklı kesme koşulları ve kesme hızına bağlı olarak iş parçası işlenmiş yüzeyinde meydana gelen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılmıştır. Faz dönüşüm analizi kapsamında kesme bölgesinde meydana gelen kesme sıcaklığı değerlerinin ölçümünde ise Optris PI 400 infrared kamera kullanılmış, yayım kabiliyeti (emissivity) değeri 0,8 [21] olarak seçilmiştir.

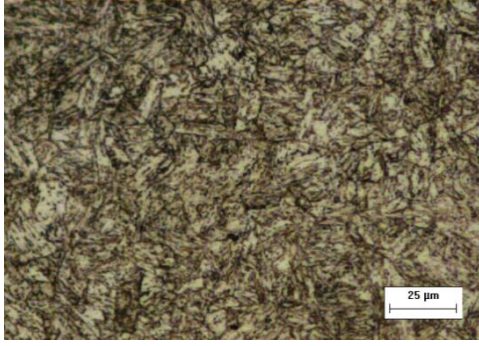
Tablo 2. Deney parametreleri

Kesme Hızı (m/dak) V_c	30, 60, 120, 240
Talaş Derinliği (mm) a_p	1.2
İlerleme miktarı (mm/dev) f	0.12
Kesme Koşulları	Kuru, Kesme Sıvısı, CO ₂
Kesici Uç	CNMA 120408 K68

Kesme sürecinin iş parçası yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelerinde neden olduğu mikroyapısal değişimlerin incelenmesinde işlenmiş parçalardan kesilen ve soğuk kalıba alınan numuneler konvansiyonel yöntemler kullanılarak zımparalanmış, parlatılmış ve ardından dağlanarak mikroyapıda meydana gelen deformasyon Olympus BX51M optik mikroskop cihazı kullanılarak gözlemlenmiştir. İş parçasının işlem görmemiş mikroyapı görüntüsü Şekil 2’de gösterilmektedir. İşlenmiş numunelerin mikrosertlik değişimi yüzeyden itibaren 200 µm derinlik boyunca Future-Tech FM3 mikrosertlik cihazı kullanılarak ve 25 g yük, 15 saniye uygulanarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın bir diğer çıktısı olarak ölçülen işlenmiş yüzeylere ait kristal yapıdaki değişim ve faz dönüşüm analizleri 1,54060 Å dalga boyuna sahip CuK α katot kullanılarak Bruker XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzenek; kuru kesme (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik kesme (c)



Şekil 2. 15-5 PH çeliği mikroyapı görüntüsü

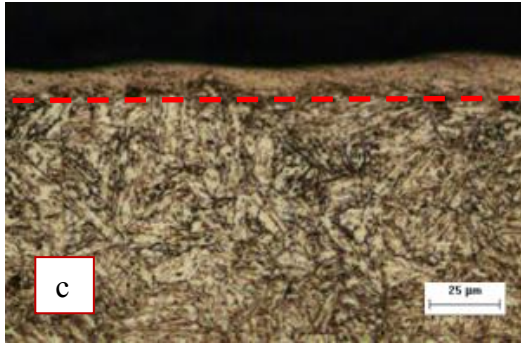
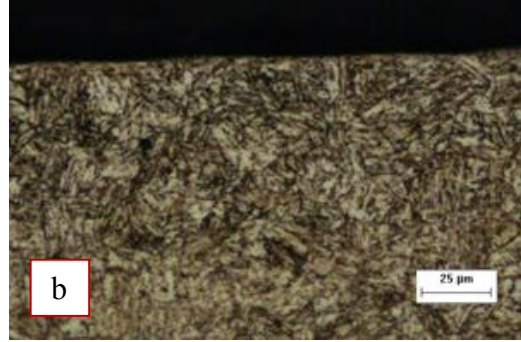
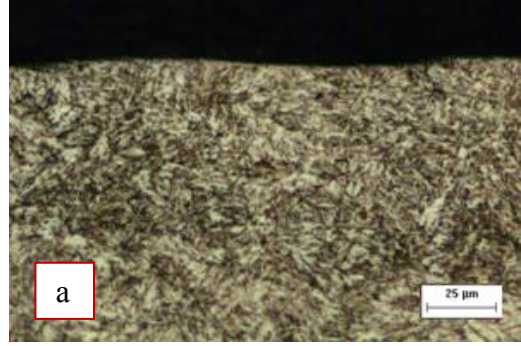
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Mikroyapı Deformasyonu

Şekil 3'te kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) kesme koşulları kullanılarak 30 m/dak kesme hızı değerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri kullanılarak işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde optik mikroskop altında tane küçülmesi vb. etkiler gözlemlenmezken, kriyojenik yöntem ile işlenmiş iş parçası mikroyapısında $\sim 15-20 \mu\text{m}$ etkilenmiş alan meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3 (c)).

Kriyojenik koşullar altında mekanik etkilerin daha baskın olmasının bir sonucu olarak meydana gelen beyaz tabaka (white layer) oluşumu (temperlenmemiş martenzit), küçülmüş tanelere veya faz dönüşümüne işaret edebilmektedir [22]. Öte yandan soğuk deformasyon ve kriyojenik sıcaklıkların bir sonucu olarak yapıda martenzit \rightarrow östenit faz dönüşümü meydana gelmesi muhtemeldir. Şekil 5'te gösterilen mikrosertlik değerinde meydana gelen artış, tane küçülmesine işaret etmektedir. Şekil 4'te 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikro yapı görüntüleri gösterilmektedir.

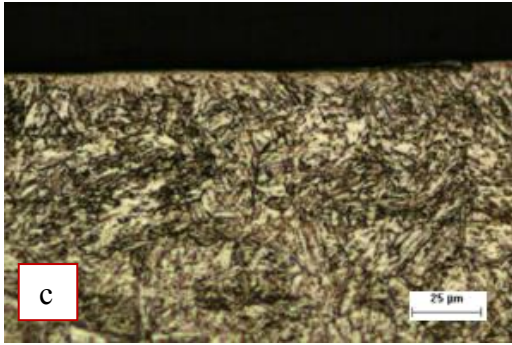
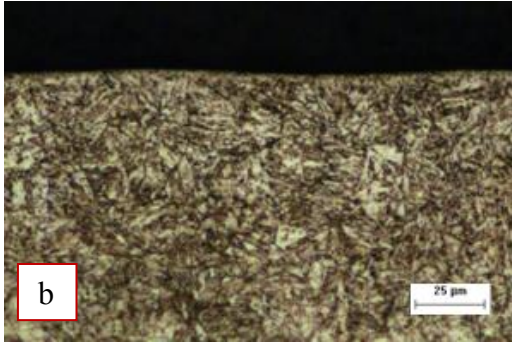
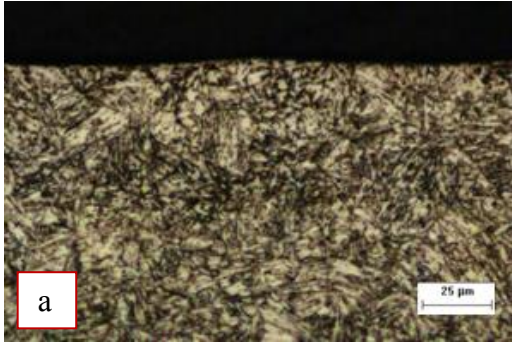
Şekil 4'te görüldüğü gibi kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile gerçekleştirilen talaşlı imalat süreci sonucu optik mikroskop incelemesi altında 30 m/dak kesme hızı değerinde elde edilen mikroyapı görüntülerine benzer şekilde etkilenmiş alan net olarak görülememektedir. Kriyojenik koşullar altında ise $\sim 3-5 \mu\text{m}$ derinliğinde etkilenmiş alan meydana geldiği anlaşılmaktadır. Görüldüğü gibi kriyojenik soğutma yöntemi düşük (30 m/dak) ve yüksek (240 m/dak) kesme hızlarında mikroyapıda tane deformasyonuna neden olmuştur. Ancak yüksek kesme hızlarında artan sıcaklık yüzey alanında meydana gelen plastik deformasyonun azalmasına neden olmaktadır. Bu durumda etkilenmiş derinlik düşük kesme hızına nazaran daha az olmaktadır.



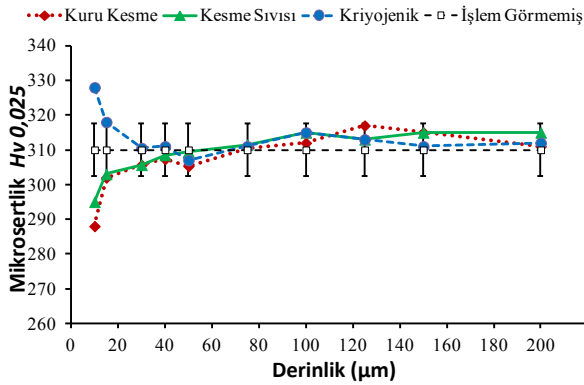
Şekil 3. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru(a), kesme sıvısı(b) ve kriyojenik(c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri

Mikrosertlik Değişimi

Talaşlı imalat prosesi termal ve mekanik etkilerin eş zamanlı olarak meydana geldiği ve bu süreç neticesinde iş parçasının yüzey ve yüzey altı özelliklerinde değişimin oluşabildiği bir üretim yöntemidir [12,23,24]. İşlenmiş parçaların mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler nihai ürünün fonksiyonel özelliklerinin kontrollünde önemli bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır [24]. Şekil 5'te düşük kesme hızlarında (30 m/dak) kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik (sıvı CO₂) koşullar kullanılarak işlenmiş iş parçalarının yüzey ve yüzey altında meydana gelen mikrosertlik değişimleri gösterilmektedir.

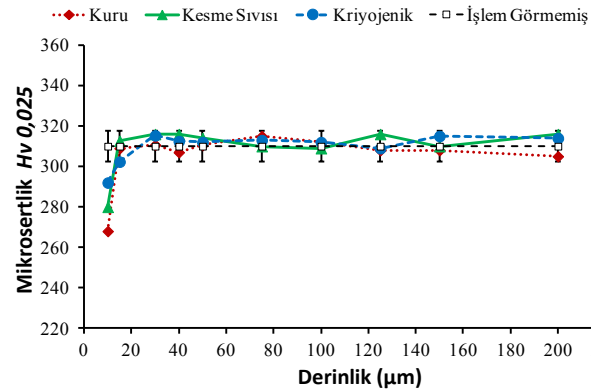


Şekil 4. 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru(a), kesme sıvısı(b) ve kriyojenik (c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri



Şekil 5. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar ile işlenmiş iş parçalarında meydana gelen mikrosertlik değişimi

Şekilde görüldüğü gibi düşük kesme hızlarında (30 m/dak) her üç kesme koşulu kullanılarak işlenmiş iş parçalarının yüzeyden itibaren 10 µm bir derinlikte mikrosertlik değişimi meydana geldiği anlaşılmaktadır. Kuru kesme esnasında kesme bölgesinde talaş üzerinden ölçülen maksimum sıcaklık değeri 321°C olarak kaydedilmiştir. Bu sıcaklığın bir sonucu olarak işlenmiş iş parçası yüzeyinden itibaren 10 µm derinlikte bir alanda mikrosertlik değerinde %7 azalma meydana gelmiştir. Öte yandan kriyojenik koşul altında ise belirtilen maksimum sıcaklık değeri 110 °C olarak kaydedilmiş, işlenmiş iş parçasının sıcaklığı ise -20 °C olarak ölçülmüştür. Kriyojenik talaşlı imalat süreci 15-5PH martenzit çeliği malzemesinin yüzey altında pekleşme etkisine neden olmuştur. Bu koşullar altında soğuk deformasyonun bir sonucu olarak mikrosertlik değerinin işlenmiş yüzeyden itibaren 10 µm bir derinlikte %6 artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Mikrosertlik değerinde meydana gelen bu artış, malzemenin aşınma direnci, yorulma ve servis ömrünü etkilemektedir [25]. Şekil 6'da yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) işlenmiş iş parçalarının mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmektedir.

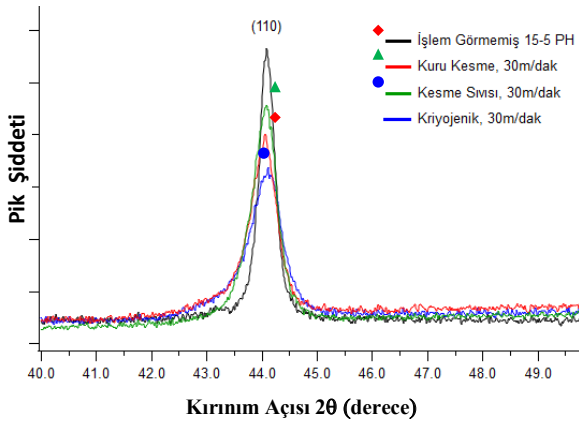


Şekil 6. 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar kullanılarak işlenmiş iş parçalarında meydana gelen mikrosertlik değişimi

Şekilde görüldüğü gibi kesme hızının artması ve buna bağlı olarak kesme bölgesinde ısı konsantrasyonunun artması ile birlikte her üç kesme yöntemi ile işlenmiş iş parçalarının mikrosertlik değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Mikrosertlik değerleri kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar için işlenmiş yüzeyden itibaren 10 µm derinlikte sırasıyla %14, %9, %6 oranlarında azalmıştır. Kesme bölgesinde ölçülen maksimum talaş sıcaklık değerleri kuru kesme için 391 °C olarak ölçülürken, kriyojenik yöntemde ise 178 °C olarak ve işlenmiş iş parçasının sıcaklık değeri 18 °C olarak ölçülmüştür.

Faz Dönüşüm Analizi

Talaşlı imalat sürecinde meydana gelen yüksek ısı oluşumu, plastik deformasyon ve gerilmelerin bir sonucu olarak işlenmiş parçalarda faz dönüşümü meydana gelebilmektedir [12]. Özellikle düşük kesme hızlarında (30 m/dak) kriyojenik koşullar altında mikroyapıda görülen etkilenmiş alan (Şekil 3c), mikrosertlik değerinde meydana gelen artış (Şekil 5), tane küçülmesi ve beyaz tabaka oluşumu gibi etkiler, işlenmiş iş parçasında martenzit-östenit faz dönüşümüne yol açmış olabilir. Bahsi geçen etkilerin ve kristal kafeste meydana gelen deformasyonun anlamlandırılabilmesinde X-Ray faz analizi önemli rol oynamaktadır. Şekil 7’de ön işlem görmemiş iş parçası ve kuru, kesme sıvısı, kriyojenik kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu işlenmiş parçaların kristalografik dokusundaki değişim ve faz dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil 7. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar altında işlenmiş iş parçalarının kristal dokusunda meydana gelen değişim

Görüldüğü gibi 15-5 PH malzemesine ait $2\theta = 44^\circ$ ve (110) düzleminde bulunan Hacim Merkezli Kübik (HMK) yapıdaki martenzit ana pikinde değişken soğutucu ve yağlayıcılar ile gerçekleştirilen imalat operasyonu sonucu martenzit-östeniz faz dönüşümü gerçekleşmediği görülmektedir. Kriyojenik koşullar altında yoğun mekanik etkilere bağlı olarak pik büyüklüğünde (intensity) belirgin bir azalma görülmektedir.

Kesme sürecinde kuru ve kriyojenik koşullar ile gerçekleştirilen deneyler esnasında meydana gelen kesme sıcaklıklarının 15-5PH çeliği için geçerli olan östenit başlangıç ve bitiş sıcaklık değerlerine ($A_s=462^\circ\text{C}$ ve $A_f=645^\circ\text{C}$) ulaşamadığı görülmektedir. Kesme sıvısı yönteminde ise kesme bölgesinde sıcaklık ölçülemediği olup, meydana gelen kesme sıcaklığı değerinin kuru ve kriyojenik kesme

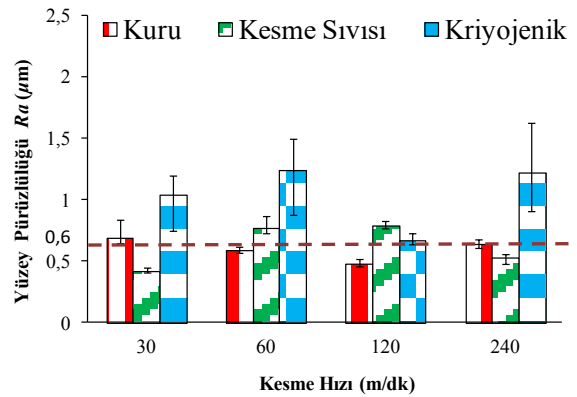
koşulları ile elde edilen sıcaklık değerleri arasında olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda ölçülen kesme sıcaklığı ve sertlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin bu koşullar altında 15-5 PH malzemesinde doğrudan bir faz dönüşümüne neden olmadığı görülmektedir.

Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalat yöntemi ile işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğü, nihai ürünün yorulma ve korozyon özelliklerine doğrudan etki edebilmesinden [12] dolayı pek çok araştırmacı tarafından en çok odaklanılan yüzey bütünlüğü karakteristiklerinden birisi olarak ön plana çıkmaktadır [26].

Havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan ve birbirleri ile temas halinde çalışan hassas parçaların çoğu zaman belirli bir yüzey kalitesi değerini aşmaması tasarım kriterleri açısından tercih edilir.

Şekil 8’de farklı kesme hızı ve kesme koşulları kullanılarak işlenmiş iş parçalarının ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri gösterilmektedir.



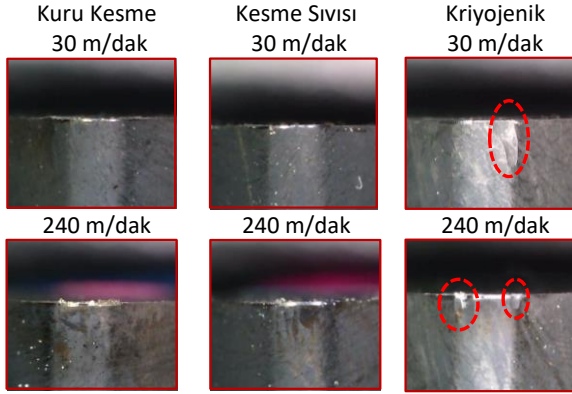
Şekil 8. Farklı kesme parametre ve koşulları kullanılarak işlenmiş iş parçalarında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü

Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile farklı kesme hızı değerlerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin $0,8 \mu\text{m}$ değerinin altında olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm kesme koşulları için oluşan yüzey pürüzlülüğü değerleri ile kesme hızı arasında net bir korelasyonun oluşmadığı görülmüştür. Teorik olarak değerlendirildiğinde yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme (f) ve kesici takım burun radiusüne (r_c) bağlı olduğu bilinmektedir [27]. Deneysel yüzey pürüzlülüğü değerleri denklem 1’de [27] yer alan ampirik olarak geliştirilmiş ifade kullanılarak değerlendirilmiştir.

$$R_a = \frac{0.0321xf^2}{r_c} \quad (1)$$

Bu denklem aracılığıyla, çalışmada kullanılan ilerleme (0,12 mm/dev) ve kesici uç burun radiusü (0,8 mm) parametreleri kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri $\sim 0,6 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmaktadır. Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri kullanılarak elde edilen deneysel yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, teorik olarak hesaplanan değere yakın olduğu görülmektedir. Kriyojenik soğutma yöntemi ile işlenmiş parçalarda meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ise genel olarak $1 \mu\text{m}$ değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey pürüzlülüğünde neden olduğu artışın anlamlandırılabilmesi aşamasında kesici takımında meydana gelen aşınma mekanizmaları önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 9'da 30 ve 240 m/dak kesme hızı değerlerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu kesici takım burun bölgelerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarına ait görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 9. 30 ve 240 m/dak kesme hızı değerlerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik yöntemler ile gerçekleştirilen deneyler sonucu kesici takım burun bölgelerine ait görüntüler

Kriyojenik yöntem ile gerçekleştirilen deneylerde kesici takım burun bölgesinde lokal kırılmaların meydana geldiği görülmekte ve bunun bir sonucu olarak burun yarıçap bölgesinde hacimsel anlamda meydana gelen değişimin yüzey pürüzlülüğü değerinde artışa yol açtığı görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan 15-5 PH martenzit çelik malzemesinin kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey bütünlüğü (surface integrity) karakteristiklerinden mikroyapı deformasyonu, mikrosertlik değişimi, yüzey pürüzlülüğü ve faz dönüşümü üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiş, elde edilen bulgular

literatür ve endüstride yaygın olarak kullanılan kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Kriyojenik soğutma koşulu ile özellikle düşük kesme hızı (30 m/dak) değerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu işlenmiş iş parçası mikroyapısında yüzeyden itibaren $\sim 15-20 \mu\text{m}$ derinliğe kadar olan bir alanda tane deformasyonu meydana gelmiştir. Kuru ve kesme sıvısı yöntemlerinde ise optik mikroskop altında etkilenmiş alan görülebilmiştir. Yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) ise etkilenmiş alan net olarak gözlemlenememiştir. Bu bağlamda taramalı elektron mikroskopu (SEM) gibi daha ileri yöntemlere başvurularda deforme olmuş taneler görülebilir.

Çalışma kapsamında incelenen bir diğer yüzey bütünlüğü karakteristiği işlenmiş parçaların mikrosertlik değişimi olmuştur. Düşük kesme hızı (30 m/dak) değerinde kriyojenik talaşlı imalat sürecinin bir sonucu olarak $10 \mu\text{m}$ derinlikte mikrosertlik değerinde artış meydana gelmiş, kuru ve kesme sıvısı yöntemlerinde ise kesme bölgesinde meydana gelen yüksek kesme sıcaklığının sonucu olarak mikrosertlik değerinde azalma meydana gelmiştir. Yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) ise her üç kesme koşulu için termal yumuşamaya bağlı olarak mikrosertlik değerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Mikroyapı ve mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin işlenmiş iş parçalarında muhtemel martenzit-östenit faz dönüşümüne yol açmış olabileceği için X-ray analizi gerçekleştirilmiştir. (110) hacim merkezli kübik (HMK) yapı korunurken, mekanik etkilerin bir sonucu olarak pik şiddetlerinde azalma ve tane küçülmesinin bir sonucu olarak piklerde yanlara doğru genişleme (peak broadening) gözlemlenmiştir. Piklerde meydana gelen değişim doğrudan bir faz dönüşümü meydana gelmediğini göstermesine karşın, yapıda yüzdesel anlamda kalıntı östenit oluşumu daha ileri analizler ile belirlenebilecektir.

Gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü analizlerinde tüm kesme koşulları için yüzey pürüzlülüğü değerlerinde meydana gelen değişim ile kesme hızı arasında korelasyonun bulunmadığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik soğutma yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde kesici takım burun bölgesinde meydana gelen lokal kırılmaların yüzey pürüzlülüğünde artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik koşullarda yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu artışa önleyebilmek amacıyla daha büyük burun yarıçapına sahip kesici uçlar ile işlem yapılmasının bu şartlar altında daha olumlu sonuçlar vereceği bulgusuna ulaşılmıştır.

ANALYSIS OF SURFACE INTEGRITY IN CRYOGENIC MACHINING OF 15-5 PH STEEL

Machining process is widely used in production of many components which are used in aerospace and defense industries. The thermal and mechanical effects that occur during the manufacturing processes can cause microstructural transformations in the manufactured materials and this may affect the fatigue life, corrosion resistance and functional performance of the final product. In this study, the effects of cryogenic machining process of 15-5 PH steel on surface integrity were investigated experimentally. The obtained results were compared with dry and flood cutting strategies. In cryogenic machining at low cutting speeds, microhardness increases on account of grain deformation of microstructure. In cryogenic conditions, poor surface roughness occurred due to the local fracture on the nose region of the cutting tool.

Keywords: Cryogenic Machining, Surface Integrity, Martensitic Steel

KAYNAKÇA

1. Stephenson DA, Agapiou JS. *Metal cutting theory and practice*: CRC press; 2016.
2. Lee C. Phase transformations accompanying low-temperature carburization of martensitic stainless steels under paraequilibrium conditions: Case Western Reserve University; 2012.
3. Kumar A, Balaji Y, Prasad NE, Gouda G, Tamilmani K. Indigenous development and airworthiness certification of 15-5 PH precipitation hardenable stainless steel for aircraft applications. *Sadhana* 2013,**38**:3-23.
4. Garrison W. Ultrahigh-strength steels for aerospace applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 1990,**42**:20-24.
5. Mondelin A, Valiorgue F, Rech J, Coret M, Feulvarch E. Modeling of surface dynamic recrystallisation during the finish turning of the 15-5PH steel. *Procedia CIRP* 2013,**8**:311-315.
6. Mondelin A, Valiorgue F, Coret M, Feulvarch E, Rech J. Surface integrity prediction in finish turning of 15-5PH stainless steel. *Procedia Engineering* 2011,**19**:270-275.
7. Ganta V, Chakradhar D. Multi objective optimization of hot machining of 15-5PH stainless steel using grey relation analysis. *Procedia Materials Science* 2014,**5**:1810-1818.
8. Okushima K, Kakino Y. Study on the generating process of machined surface. *Bulletin of JSME* 1969,**12**:141-148.
9. Chomienne V, Verdu C, Rech J, Valiorgue F. Influence of surface integrity of 15-5PH on the fatigue life. *Procedia Engineering* 2013,**66**:274-281.
10. Debnath S, Reddy MM, Yi QS. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of cleaner production* 2014,**83**:33-47.
11. Kaynak Y, Karaca H, Noebe R, Jawahir I. Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear* 2013,**306**:51-63.
12. Kaynak Y, Lu T, Jawahir I. Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. *Machining science and technology* 2014,**18**:149-198.
13. Pereira O, Rodríguez A, Fernández-Abia A, Barreiro J, de Lacalle LL. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. *Journal of Cleaner Production* 2016,**139**:440-449.
14. Chomienne V, Valiorgue F, Rech J, Verdu C. Influence of Part's Stiffness on Surface Integrity Induced by a Finish Turning Operation of a 15-5PH Stainless Steel. *Procedia CIRP* 2016,**45**:19-22.
15. Palanisamy D, Senthil P. Machinability Study of Laser Surface Treated 15-5 PH Stainless Steel. *Materials and Manufacturing Processes* 2016,**31**:1755-1762.
16. Braghini Junior A, Diniz AE, Filho FT. Tool wear and tool life in end milling of 15-5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009,**43**:756-764.
17. Chomienne V, Valiorgue F, Rech J, Verdu C. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2016,**13**:90-96.
18. Machai C, Biermann D. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. *Journal of Materials Processing Technology* 2011,**211**:1175-1183.
19. Montevecchi F, Grossi N, Takagi H, Scippa A, Sasahara H, Campatelli G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *Procedia CIRP* 2016,**46**:476-479.
20. Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG, Wikelski M. Bats use magnetite to detect the earth's magnetic field. *PLoS One* 2008,**3**:e1676, 1671-1676.
21. Nayak S, Yip K, Ahrens L, Montag C. Calculation of mechanical and thermal stress in

- the RHIC beam dump windows. In: CA/AP/456 2012 by IEEE—cc Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0)—cc Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0); 2012.
22. Li J, Umemoto M, Todaka Y, Tsuchiya K. A microstructural investigation of the surface of a drilled hole in carbon steels. *Acta Materialia* 2007,**55**:1397-1406.
 23. Pusavec F, Hamdi H, Kopac J, Jawahir I. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy—Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* 2011,**211**:773-783.
 24. M'Saoubi R, Outeiro J, Chandrasekaran H, Dillon Jr O, Jawahir I. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 2008,**1**:203-236.
 25. Jawahir I, Pu Z, Yang S, Rotella G, Kaynak Y, Lu T, *et al.* Cryogenic processing of materials for enhanced product life, performance and sustainability. In: *Proc. of 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Wollongong, Australia*; 2012.
 26. Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2011,**51**:250-280.
 27. Groover MP. *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*: John Wiley & Sons; 2007.

Orhan Gülcan

Dr.
Türk Havacılık Ve Uzay Sanayii A.Ş.
Ankara

Erhan İlhan Konukseven

Doç. Dr.
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makina Mühendisliği Bölümü
Ankara

Selen Temel

Mak. Müh.
Türk Havacılık Ve Uzay Sanayii A.Ş.
Ankara

Katmanlı İmalatla Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri

Bu çalışmada, katmanlı imalat yöntemiyle üretilen Ti alaşım parçalarının mekanik özellikleri ve bu özellikler üzerine etki eden faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yanal kayma mesafesi, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin yanı sıra, üretim yöntemi, üretim sonucu parçada oluşan artık gerilmeler ve ısıl işlem uygulanması gibi faktörlerin de mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatür taraması sonucu elde edilen bulgulara göre, sonuç bölümünde çalışmaların yetersiz olduğu konular listelenerek ileriki muhtemel uygulamalarından bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı İmalat, Tarama Hızı, Katman Kalınlığı, Artık Gerilmeler

GİRİŞ

Katmanlı İmalat

Katmanlı imalat, farklı yöntemlere göre değişmekle birlikte genelde toz veya tel ham malzemenin ergitilip, bir parçanın katman katman üretilmesinde kullanılması prensibine dayanır [1]. Konvansiyonel yöntemlere göre düşük boyutsal hassasiyet, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yöntemin tekrarlanabilirliği konusundaki sıkıntılara rağmen [2], katmanlı imalat, kalıba gereksinim duymadan üretime olanak vermesi, kısa sürede az miktarda karmaşık tasarımların üretilmesini sağlaması, ham malzeme/parça ağırlığı oranının (Buy-to-Fly ratio) düşük olması avantajlarından dolayı biyomedikal, havacılık, otomotiv ve hızlı prototipleme/kalıplama alanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [3]. Konvansiyonel yöntemlerle üretilmesi çok zor veya imkansız olan parçaların üretimine olanak vermesi ve bu sayede daha hafif parçalar elde edilebilmesi nedenleri ile katmanlı imalat günden güne özellikle havacılık sanayiinde tercih edilebilir bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. Yapılan tasarımlarda neredeyse sınırsız geometri ve karmaşıklık esnekliğine olanak vermesi, katmanlı imalatın ortopedi ve kemik naklinde de kullanılma oranını artırmaktadır [5] (Şekil 1). Katmanlı imalatın şekil optimizasyonuna izin vermesi, ürün performansının artırılması ve daha düşük üretim maliyetleri elde edilmesi noktasında önemli gelişmeler sağlamıştır [6, 7].

Pazarının, 2020 yılına kadar 21 Milyar Dolara kadar büyüyeceği tahmin edilen [9] katmanlı imalat, konvansiyonel yöntemlerin aksine, malzeme çıkarma değil malzeme ekleme prensibine dayanır. Bu amaçla

da bilgisayar destekli lazer veya elektron ışını gibi kaynakları enerji kaynağı olarak kullanır [10].



Şekil 1. Medikal sanayiinde kullanılan ve katmanlı imalatla üretilen Titanyum implantlar [8].

Katmanlı imalatın kendine has özellikleri aşağıdaki kazanımların elde edilebilmesini sağlamıştır [11];

- Parça üretimi için herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmaması nedeni ile, üretim zamanının ve maliyetinin azalması.
- Ekonomik olarak düşük miktardaki üretimlerin yapılabilmesi
- Tasarımda hızlı değişiklik yapılabilmesine olanak vermesi
- Hemen hemen hiç artık malzeme çıkmaması.

F2792 nolu ASTM standardına göre katmanlı imalat 7 farklı kategoride tanımlanmıştır. Katmanlı imalat çeşitlerini farklı firmalar ve kurumlar farklı şekillerde adlandırsa da, genel olarak kullanılan üç farklı türü vardır; lazer sinterleme, lazer ergitme, lazer metal biriktirme [12]. Enerji kaynağı olarak elektron ışının kullanıldığı yöntem ise elektron ışınıyla ergitme yöntemi denir.

Lazer sinterleme 1980'li yıllarda Texas Üniversitesinde görevli Carl ve Joe tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Daha önceden serilen tozların, lazer kullanılarak sinterlenmesi esasına dayanır. Her bir toz taneciği üzerinde lazerin çarpma süresi 0,5-25 ms olduğu için, tozlar kısmen ergitilir ve soğutulur, dolayısıyla katı bir cisim oluşturmak için birbirlerine bağlanır [10].

Lazer ergitme yöntemi, lazer sinterleme yöntemi ile aynıdır. Tek fark, lazer ergitmede, daha yüksek lazer gücü ve daha küçük odaklanmış nokta büyüklüğü kullanılarak metal tozlarının tamamen ergitilmesi ve soğutulmasıdır. Bu sayede % 99,9 yoğunlukta parçalar elde edilebilmektedir [12, 13].

Lazer metal biriktirme yönteminde ise, odaklanmış bir lazer ışını, hedef parçanın yüzeyini erterek küçük bir ergimiş havuz oluşturur. Bu bölgeye gönderilen metal tozları, bu havuz içinde ergir ve parçanın bir katmanını oluşturur, bu sayede üç boyutlu bir yapı, her seferinde tozların havuzun içinde ergimesi ve soğuması neticesinde katman katman oluşur [10].

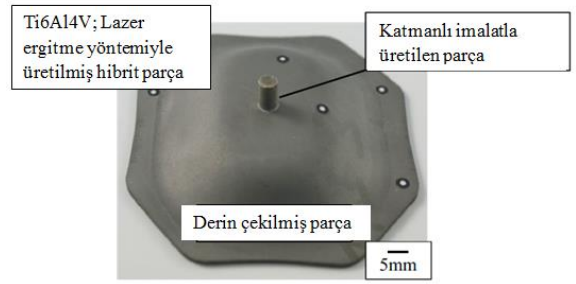
Uçak Sanayiinde Katmanlı İmalat Kullanımı

Uçak sanayiinde, üretilecek parçaların ağırlıkları çok önemlidir. Konvansiyonel yöntemlerle yapılan üretimin getirdiği kısıtlar çoğu zaman az ağırlığa ve yeterli dayanıma sahip bir tasarım yerine üretilebilir ancak daha ağır parçaların kullanımına yol açmaktadır. Katmanlı imalatla konvansiyonel yöntemlerle üretimi neredeyse imkansız olan uçak parçaları, optimize edilerek üretilebilmektedir (Şekil 2).

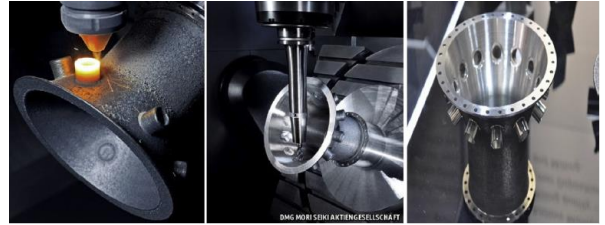


Şekil 2. Topoloji optimizasyonu yapılarak katmanlı imalatla üretilen uçak parçaları [8].

Katmanlı imalat teknolojisi özellikle çok büyük parçaların üretiminde yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, konvansiyonel yöntemlerle yapılan üretime destek olmak için katmanlı imalatın da üretime dahil edilmesi (hibrit katmanlı imalat) son yıllarda uçak sanayiinde artan oranda araştırılmaktadır [14] (Şekil 3 ve 4).



Şekil 3. Derin çekme ve lazer ergitme yöntemleriyle üretilmiş hibrit parça [14].



Şekil 4. Katmanlı imalat ve CNC işleminin beraber kullanıldığı türbin kutusu [15].

Uçak parçalarının üretim ve malzeme fiyatlarının yüksek olması, bu parçaların bir hasar durumunda değiştirilmesinden ziyade tamir edilmesini zorunlu hale getirmektedir. Katmanlı imalat bu amaçla kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde, hasar görmüş kısım önce katmanlı imalat yöntemiyle doldurulur, daha sonra CNC işleme ile son haline getirilerek tamir edilmiş olur [16]. Şekil 5'te yüksek maliyetli bir dahili kanatlı helikopter pervanesinin katmanlı imalat ve CNC işleme ile tamir edilmesi görülmektedir.



Şekil 5. Önce katmanlı imalatla hasarlı kısmının doldurulduğu, sonra CNC işlemle son haline getirildiği bir helikopter pervanesi [15].

Katmanlı İmalatta Titanyum (Ti) Kullanımı

Katmanlı imalatla alaşım malzemeleri daha çok kullanılmaktadır ve kullanılan toz boyutları farklı üretim yöntemlerine göre 10-200 µm arasında değişmektedir [17]. Bunun sebebi, saf metallerin, mekanik özellikler, paslanma dirençleri vs. gibi özelliklerinin alaşım malzemelerinkine göre daha düşük olmasıdır [12].

Ti alaşımları, özellikle Ti6Al4V, düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve yüksek paslanma direncinden dolayı, havacılık sanayii başta olmak

üzere birçok alanda kullanılmaktadır [18]. Konvansiyonel yöntemlerle üretim maliyetinin yüksek, üretim süresinin uzun olması, araştırmacıları, Ti alaşım parçalarını katmanlı imalat yöntemiyle üretime yönlendirmektedir [1].

Diğer malzemelere göre Ti fiyatının yüksek olması, Ti parçalarının üretimini kısıtlamaktadır. Ti parça üretimini arttırmak için katmanlı imalat alternatif bir üretim yöntemi olarak denenmektedir. Çünkü bu yöntem sayesinde neredeyse sifira yakın artık malzeme oluşmaktadır. Ham malzeme/parça ağırlığı oranı konvansiyonel yöntemlerde ortalama 10-20 iken, katmanlı imalatla 1'e düşebilmektedir [19]. Katmanlı imalatla her bir işlemede kullanılmayan ve artan tozlar, bir sonraki işlemede kullanılabilir. Katmanlı imalatla üretilen parçaların malzeme özellikleri, form verme veya döküm gibi konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçaların özellikleri ile karşılaştırılabilir seviyededir. Özellikle katmanlı imalatla üretilen parçaların çekme özellikleri ve sertlikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir [20].

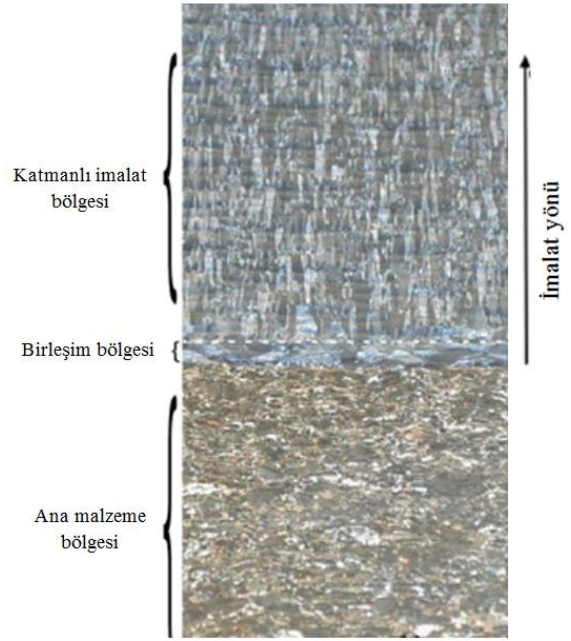
KATMANLI İMALATLA ÜRETİLEN Ti ALAŞIM PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE BUNLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Katmanlı imalatla üretilen parçaların malzeme özellikleri, form verme veya döküm gibi konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçaların özellikleri ile karşılaştırılabilir seviyededir. Özellikle katmanlı imalatla üretilen parçaların çekme özellikleri ve sertlikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir [20].

Katmanlı imalatla üretilen parçalar, konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalardan daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Bu yüksek yüzey pürüzlülüğü, gerilim yoğunlaşmasını artırır ve parçanın, yorulmadan dolayı daha erken hasara uğramasına yol açar. Her ne kadar parçada meydana gelen gözenekli yapı ve katmanlar arasındaki birleşimin yetersiz olması, yorulma süresini azaltsa da, parçaya yüzey işlemlerinin uygulanması veya sıcak izostatik presleme ile parçanın yoğunluğunun artırılması (gözeneklerin azaltılması), yorulma özelliklerinin işlenmiş veya döküm parçalarla kıyas edilebilir seviyeye yükselmesini sağlar [1].

Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 6 kW lazer ışın gücü, 800-1200 mm/s tarama hızı, 4-6 mm ışın çapı ve 500-1000 g/s toz besleme hızı kullanarak Ti alaşım parçalar ürettişlerdir. Katmanlı imalatla üretilen parçada üç farklı bölge oluştuğu belirtilmiştir; katmanlı imalat bölgesi, ana malzeme bölgesi, birleşim bölgesi (Şekil 6). Birleşim bölgesindeki çekme dayanımı ve uzama sırasıyla 1033 ± 13 MPa ve $6,8 \pm 0,2$ iken, bu değerler katmanlı imalat bölgesinde 1103 ± 12 MPa, $14,0 \pm 1,1$, ana malzeme bölgesinde ise 982 ± 10 MPa, $8,9 \pm 2,7$ 'dir. Görüldüğü gibi ana malzemeden katmanlı

imalat bölgesine doğru gidildikçe, çekme dayanımı sürekli artmaktadır [20].



Şekil 6. Katmanlı imalatla üretilen parçalardaki üç farklı bölge [21]

Carroll ve arkadaşları metal biriktirme yöntemi ile üretilen Ti6Al4V parçaların çekme özelliklerini incelemiştir. Çalışmada 2000 W lazer gücü ve 10,6 mm/s tarama hızı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bütün numunelerin akma ve azami çekme dayanımları yaklaşık 959 ± 22 ve 1064 ± 23 MPa çıkmıştır (İşlenmiş Ti6Al4V plakanın aynı değerleri ise sırasıyla 973 ± 8 ve 1050 ± 8 MPa'dır) [22].

Ren ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanyum alaşım parçalarının mekanik özelliklerini incelemiştir. Yazarlar, elde edilen numunelerin akma ve azami çekme dayanımlarının (1030 ve 1101 MPa), işlenmiş malzemeninkilere (998 ve 1119 MPa) yakın çıktığını belirtmişlerdir. Lazer ergitme yöntemiyle üretilen numunelerin sünekliklerinin çok düşük olduğu, bunun sebebinin ise yükleme yönüne dik yöndeki tanecik sınırlarının çok olması olduğu belirtilmiştir [23].

Song ve arkadaşlarının lazer ergitme yöntemiyle yaptığı çalışmalar sonucunda elde ettikleri Ti6Al4V parçaların yüzey pürüzlülüğü 2,1µm, mikrosertliği ise 450 HV çıkmıştır. 110W lazer gücü ve 0,4 m/s tarama hızının kullanıldığı çalışmalarda elde edilen yoğunluk ($4,13 \text{ g/cm}^3$), ham Ti6Al4V alaşımıninkine ($4,30 \text{ g/cm}^3$) yakın çıkmıştır [24].

Yu ve arkadaşları lazer metal biriktirme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Biriktirme işlemi zemindeki 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V plaka üzerine yapılmıştır. Üretilen parçaların sertlikleri, zemindeki plakaninkinden yüksek (360 ± 10 HV) çıkmıştır. Yine akma ve azami çekme dayanımları da (976 ± 24 MPa ve 1099 ± 2 MPa) döküm veya tavllanmış Ti6Al4V malzemeninkilerden yüksek çıkmıştır. Diğer taraftan uzama miktarı ($4,9 \pm 0,1$), döküm veya tavllanmış Ti6Al4V malzemeninkinden düşük çıkmıştır [25].

Katmanlı imalatla üretilen Ti alaşım parçalarının mekanik özellikleri üzerinde birçok faktörün etkisi vardır;

Tarama Hızının Etkisi

Eş zamanlı olarak ergitilen noktaların miktarını belirleyen parametreye tarama hızı denilmektedir.

Wang ve arkadaşları 30-50 μm çapında tozlar ve elektron ışınıyla ergitme yöntemini kullanarak Ti6Al4V parçalar üretmişlerdir. 70 μm katman kalınlığı ve dört farklı tarama hızının (214 mm/s, 376 mm/s, 529 mm/s ve 689 mm/s) kullanıldığı çalışmada, işlenmiş Ti6Al4V alaşımları ile kıyaslanabilir seviyelerde Young modülüne (111,7 ~ 119,0 GPa) ve ortalama sertliğe (5,24 ~ 6,52 GPa) sahip parçalar elde edilmiştir. Hem Young modülünün hem de sertliğin, tarama hızı ile arttığı ve bunun sebebinin daha ince mikroyapıların oluşması olduğu belirtilmiştir [26].

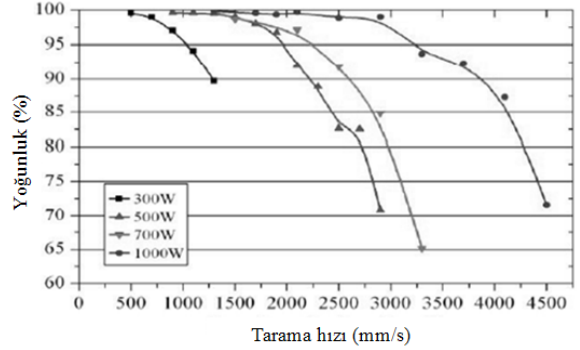
Farklı bir sonuç, Kempen ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir. Lazer ergitme yönteminde, işleme parametreleri olarak 100 W lazer gücü, 30 μm katman kalınlığı, 150 mm/s tarama hızı ve 112 μm yanal kayma mesafesi kullanılmıştır. Yazarlar, tarama hızı arttıkça, yoğunluğun azaldığını, bunun da sertlikte düşüşe sebep olduğunu belirtmişlerdir [27].

Buchbinder ve arkadaşlarının yoğunluk ve mikrosertlik üzerinde lazer gücü, tarama hızı ve yanal kayma mesafesinin etkisinin incelendiği çalışmada, yoğunluğun, tarama hızıyla azaldığı belirtilmiştir. Mikrosertlik ise bu parametrelerden doğrusal olarak etkilenmemiştir (Şekil 7) [28].

Lazer Gücünün Etkisi

Ergitme kapasitesi ve tarama için gerekli olan enerji lazer gücü ile sağlanır. Buchbinder ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre, yoğunluk, lazer gücü ile orantılı olarak artmaktadır [28].

Casalino ve arkadaşları, ergitme yönteminde, lazer gücü ve tarama hızının, sertlik, azami çekme dayanımı, uzama ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 57, 86 ve 100 W lazer gücü ve 180, 200 ve 220 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, enerji yoğunluğu (lazer gücünün, tarama hızı, katman kalınlığı ve yanal kayma mesafesinin çarpımına oranı) arttıkça, parçanın yoğunluğunun arttığı belirtilmiştir. Parçanın yoğunluğunun artması sertlik, azami çekme dayanımı ve uzamada artışa, yüzey pürüzlülüğünde ise azalışa sebep olmuştur [29].



Şekil 7. Yoğunluk üzerinde lazer gücü ve tarama hızının etkisi [28]

Katman Kalınlığının Etkisi

Katmanlı imalat yöntemlerinde geometri inşa yönünde eşit aralıklarla bölünerek üretilir. Her bir aralığın yüksekliği ise katman kalınlığı olarak adlandırılır.

Guan ve arkadaşlarının lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş numunelerin statik özellikler üzerinde, katman kalınlığı, işleme yönü ve işleme açısının etkisini inceledikleri çalışmalarında, 200 W lazer gücü, 15 m/dak tarama hızı, 20, 30 ve 40 μm katman kalınlığı, 90, 105, 120, 135 ve 150 işleme açısı ve 0, 45 ve 90° işleme yönü kullanmışlardır. Katman kalınlığının statik özellikler üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir [30].

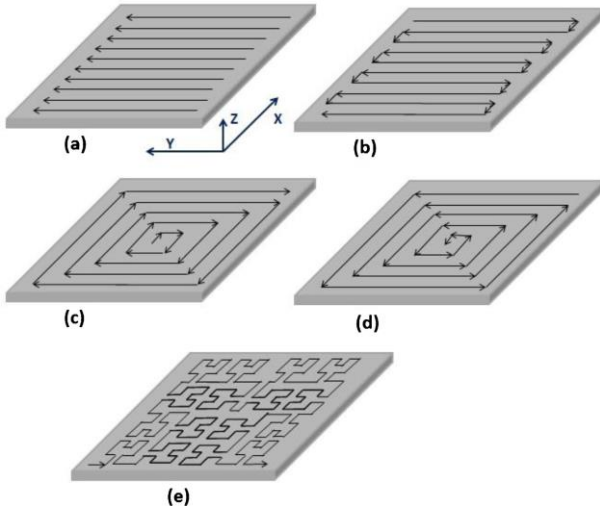
Bu çalışmadan farklı olarak, Kempen ve arkadaşların yaptığı çalışmaya göre, katman kalınlığı arttıkça, mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmektedir. Yazarlar bu düşüşü parçanın yoğunluğundaki düşüşe bağlamaktadır [27].

Basalah ve arkadaşları, sinterleme sıcaklığını ve katman kalınlığını değiştirerek ürettikleri katmanlı imalat numunelerinde farklı gözeneklilik (% 17-44), Young modülü (0.77-11.46 GPa) ve akma dayanımı (27-383 MPa) değerleri elde etmişlerdir. Yazarlar katman kalınlığı arttıkça (62,5, 87,5, 105, 125, 150 ve 175 μm) gözenekliliğin arttığını ama Young modülü ve akma dayanımının azaldığını belirtmişlerdir.

Sinterleme sıcaklığı arttığında ise (800, 1000, 1200, 1400 °C) tam tersi sonuç çıkmıştır [31].

Tarama Deseni ve İnşa Yönünün Etkisi

İnşa yönü, üretilen geometrinin katmanlara dik olan kurulum yönünü nitelendirir. Katmanlı imalatta kullanılan genel olarak dört farklı tarama deseni vardır; ızgara deseni, çift yönlü desen, kaçıklık deseni ve fraktal deseni (Şekil 8). Kaçıklık deseni ve fraktal deseni, daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu ve geometrik olarak hassas parçaların üretimine olanak sağladığı için diğer desenlere göre daha çok tercih edilir [32]



Şekil 8. Farklı tarama desenleri: (a) ızgara, (b) çift yönlü, (c) dışa doğru kaçıklık, (d) içe doğru kaçıklık, (e) fraktal [33].

Katmanlı imalatta parçanın inşa yönü, elde edilen parçanın mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Çekme testi uygulanacak parçalarda, çekme yönüne paralel yönde oluşturulan parçalar, çekme yönüne dik olarak oluşturulan parçalara göre daha yüksek çekme dayanımlara sahiptirler [33].

Farklı inşa yönlerindeki farklı soğuma oranları da parçanın mikroyapısını, dolayısıyla mekanik özelliklerini etkilemektedir. Örneğin, X eksenini boyunca parça oluştururken (çekme yönüne paralel), lazerin, katmanlar arasındaki geçiş süresi, Y veya Z eksenini boyunca parça oluşturulurken gerekli geçiş süresinden daha fazladır. Dolayısıyla, X eksenini boyunca parça oluştururken daha yüksek soğuma oranları ve daha ince mikroyapı elde edilir [34].

Guan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, dikey biriktirme yönü (çekme yönü) ile daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edildiği belirtilmiştir [30].

Lazer ergitme yönteminde biriktirme yönünün Ti6Al4V'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi

Wauthle ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. 45° yönünde işlenmiş parçaların akma ve maksimum çekme dayanımlarının, dikey ve yatay işlenmiş parçalarından % 35 daha az olduğu belirtilmiştir [35].

Casati ve arkadaşları, yatay yönde üretilen numunelerin azami çekme dayanımlarının (684,7 MPa) ve sünekliklerinin (% 36,3) dikey yönde üretilen numunelerinden (580,7 MPa, % 25,7) daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [36].

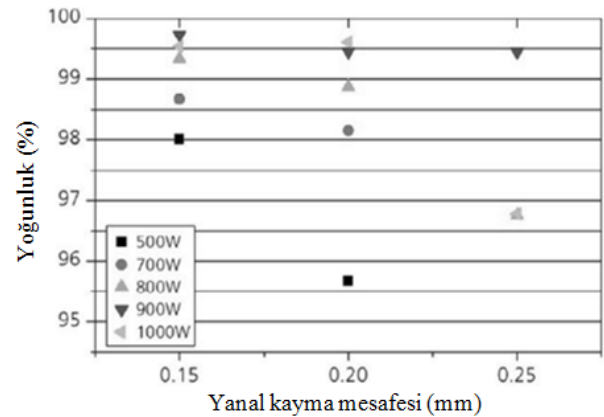
İnşa yönünün Ti6Al4V parçaların yorulma performanslarına etkisi Wycisk ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, zemine göre 45° ve 90° yönlerinde inşa edilen parçaların yorulma performansında ciddi bir değişimin olmadığını göstermiştir [37].

Hrabe ve Quinn, elektron ışınıyla işlemede inşa yönünün Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, inşa yönü değişikçe parçanın akma ve azami çekme dayanımlarının değişmediğini (azami çekme dayanımı: X-Y yönünde 1017-1030 MPa, Z yönünde 1009-1033 MPa, akma dayanımı: X-Y yönünde 967-983 MPa, Z yönünde 961-984 MPa) ama uzamanın X-Y yönünde, Z yönüne göre % 30 daha fazla çıktığını belirtmişlerdir (X-Y yönünde % 12,2, Z yönünde % 7,0-9,0) [38].

Yanal Kayma Mesafesinin Etkisi

Yanal kayma, katmanlar oluşturulurken kullanılan tarama desenleri arasındaki geçiş mesafesidir.

Buchbinder ve arkadaşları yoğunluğun yanal kayma mesafesiyle azaldığını belirtmişlerdir. (Şekil 9) [28].



Şekil 9. Yoğunluk üzerinde lazer gücü ve yanal kayma mesafesinin etkisi [28]

Yapay protezlerde titanyum kullanımının önündeki en büyük engel, Titanyumun Young modülü ile (110 GPa), kemiğin Young modülünün (10–30 GPa) farklı olmasıdır. Bu sorunu çözmek için Zhang ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle ürettikleri gözenekli implantların mekanik özellikleri üzerinde yanal kayma mesafesinin etkisini incelemişlerdir. 65 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip tozların kullanıldığı çalışmada, işleme parametreleri olarak 130 W lazer gücü, 300 mm/s tarama hızı ve 35 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre yanal kayma mesafesi 200 µm'den 700 µm'ye çıkartıldığında, akma dayanımı 862 MPa'dan 467 MPa'a, Young modülü ise 85 GPa'dan 16 GPa'a düşmüştür. Bu sayede kemik dokusunun mekanik özelliklerine yakın özelliklere sahip implantlar üretilebilmiştir [39].

İmalat Yönteminin Etkisi

Zhai ve arkadaşları Ti6Al4V tozu kullanarak lazer ergitme ve elektron ışınıyla ergitme yöntemlerini kullanarak parça üretmişlerdir. Yazarlar giriş parametreleri olarak iki farklı lazer gücü kullanmışlardır (330 W, 780 W). Çalışma sonucunda, lazer gücü artırılınca, lazer ergitme yöntemi ile üretilen parçaların akma ve azami çekme dayanımlarının sırasıyla 1005 ve 1103 MPa'dan 990 ve 1042 MPa'a düştüğü belirtilmiştir. Elektron ışınıyla ergitme yöntemiyle üretilen parçalarda ise lazer gücü artırılınca, bu özellikler yatay yönde oluşturulan numunelerde 1006 ve 1066 MPa'dan 973 ve 1032 MPa'a, dikey yönde oluşturulan numunelerde ise 1001 ve 1073 MPa'dan 1051 ve 1116 MPa'a düşmüştür. Yazarlar, inşa yönünün yataydan dikeye yani çekme testinin uygulanacağı yöne çevrildiği durumda, akma ve azami çekme dayanım değerlerinin arttığını belirtmişlerdir [40].

Literatürde, lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların akma dayanımları 976 ± 24 MPa, azami çekme dayanımları 1099 ± 2 MPa ve uzaması $\% 4,9 \pm 0,1$ çıkarken [24], elektron ışınıyla üretilen Ti6Al4V parçaların akma dayanımları 883,7-938,5 MPa, azami çekme dayanımları 993,9-1031,9 MPa ve uzaması ise $\% 11,6-13,6$ çıkmıştır [41].

Artık Gerilmelerin Etkisi

Bir malzeme içerisindeki, dış veya kütleles kuvvetlerin yokluğunda, dengede ve sabit sıcaklıkta kalan gerilmelere artık gerilmeler denilmektedir. Katmanlı imalat sırasında farklı katmanlardaki ısınma/soğuma hızlarının farklı olması üretilen parçada artık gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda oluşan anizotropik mikroyapıdaki parçalardaki bu artık gerilmeler, parçanın çekme veya yorulma dayanımları gibi diğer

malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte, parçanın ömrünü veya dayanımı azaltmaktadır. Malzeme özellikleri (ısıl iletkenlik, elastik modül, akma dayanımı vs.), faz dönüşümleri, parça geometrisi, işlem parametreleri ve tarama şekli, üretilen parçadaki artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımını etkilemektedir. Bir parçadaki artık gerilmeler, parçanın akma dayanımının %75'ine kadar çıkabilmektedir [32]. Bu gerilme malzemenin akma dayanımından fazla ise eğrilme veya plastik deformasyon, azami çekme dayanımından fazla ise çatlama meydana gelir. [42].

Shuangyin ve arkadaşlarının Ti6Al4V alaşımını lazer biriktirme yönteminde kullanırken belirttiği gibi, biriktirme düzlemindeki artık gerilmeler lazer tarama yönü ile aynı hizadadır. Ayrıca, lazer taramanın başlangıç noktasında artık gerilmeler düşük, taramanın sonlarına doğru ise artmaktadır. İlk katmanlarda artık basma gerilmeler daha fazladır, katman kalınlığı arttıkça daha düşük artık çekme gerilmeleri görülür [43].

Popovich ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, lazer ergitme yöntemiyle üretilen numunelerin azami çekme dayanımlarının, sıcak haddelenmiş parçalarına göre $\% 20-25$ daha az olduğunu belirtmişlerdir. Bunun muhtemel sebebinin ise lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş parçalarda kalan artık gerilmeler olduğunu belirtmişlerdir [44].

Katmanlı imalatla üretilen parçalar hemen hemen tam yoğunlukta ($\sim \%98-99$) olmasına rağmen, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda, çok az artık gerilmeler bile sorun olabilmektedir. Artık gerilmeleri asgari seviyeye indirmek için tekrar ergitme yöntemi uygulanabilmektedir. Bu yöntemde, bir katman tarandıktan sonra, üzerine yeni bir katman sermeden, mevcut katman tekrar taranır. Yasa, bu yöntem sayesinde artık gerilmelerin $\% 0,036$ 'ya kadar azaltılabileceğini belirtmiştir [45].

İşleme parametrelerini değiştirerek, özellikle kenarlarda olmak üzere parça boyunca mümkün olduğu kadar homojen bir sıcaklık dağılımı yapıldığı takdirde, artık gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir [46].

Mikroyapı ve Gözenekliliğin Etkisi

Katmanlı imalatla tozların ergitme sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklara çok hızlı bir şekilde ısıtılması ve devamında ergiyen tozun hızlı bir şekilde soğutulması ve her bir katmanda bu işlemin devam etmesi, uzamış tanecik yapılı, anizotropik özelliklere sahip parçaların oluşmasına yol açmaktadır [32].

Yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü, parçada daha yüksek soğuma hızına ve daha ince bir

mikroyapıya yol açar. Tarama hızı azaltılıp, lazer gücü artırıldıkça tam tersi (daha düşük soğuma hızı ve daha kaba bir mikroyapı) sonuçlar elde edilir [47].

Ahn ve arkadaşları elektron ışını enerji kaynağı olarak kullandıkları çalışmalarında Ti parçaların mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. 4-18 mA elektron ışın gücü, 60 kV ivme voltajı ve 400 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, % 76 gözenekli yapıdaki parçalar elde edilmiştir. Gözenek miktarının artması ile akma geriliminin ve elastik modülünün azaldığı belirtilmiştir [48].

Attar ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen ticari saf Ti parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 70-250 W lazer gücü, 20-180 mm/s tarama hızı, 100 µm katman kalınlığı ve yanal kayma mesafesinin işleme parametreleri olarak kullanıldığı çalışmada, lazer gücü ve tarama hızının artmasıyla, yoğunluğun ve artık gerilimlerin artacağı, α 'dan α' fazına geçişin olacağı ve bu sayede üretilen parçanın yüzey mikrosertliğinin (261 HV'ye kadar), akma dayanımının (555 ± 3 MPa'a kadar) ve azami çekme dayanımının (757 ± 12,5 MPa'a kadar) arttığı belirtilmiştir. Ticari saf Ti'nin 890 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda α yapıdan (altıgen sıkı yapı) β yapıya (hacim merkezli kübik yapı), allotropik bir faz dönüşümü gerçekleştirdiği ve bu α - β - α faz dönüşümünün doku, mikroyapı ve kayma sistemleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Lazer ergitme ile üretilen Ti parçaların mekanik özelliklerinin (akma ve azami çekme dayanımı), levhadan form verilmiş (280 MPa, 345 MPa) veya tavllanmış parçalardan (432 MPa, 561 MPa) daha yüksek olduğu belirtilmiştir [49].

Furumoto ve arkadaşlarının deney sonuçlarına göre; enerji yoğunluğu artıkça, ergimenin artmasından dolayı gözeneklilik azalmaktadır. Gözenekliliğin azalması, geçirgenliği azaltmakta ama mikro sertlik ve çekme dayanımını arttırmaktadır [50].

Lazer ergitme yönteminde işleme parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkisi Kasperovich ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, Ti6Al4V tozlarla birlikte, 100-200 W lazer gücü, 200-1100 mm/s tarama hızı, 40-180 µm yanal kayma mesafesi ve 30 µm katman kalınlığı parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, diğer bütün parametreler sabit iken gözeneklilik üzerinde tarama hızının en fazla etkili, yanal kayma mesafesinin ise en az etkili olduğu belirtilmiştir [51].

Qiu ve arkadaşları lazer ergitme yöntemi ve farklı işleme parametreleri kullanarak Ti6Al4V numuneler üretmişlerdir. 20-50 µm boyutlarında tozların

kullanıldığı çalışmada, giriş parametreleri olarak 75 µm yanal kayma mesafesi ve 1,5 g/s toz besleme hızı kullanılmıştır. Lazer gücü ve tarama hızı arttıkça gözenekliliğin azaldığı belirtilmiştir. Yatay yönde işlenmiş numunelerin gözenekliliği dikey yönde işlenmiş numunelerinkinden daha yüksek çıkmıştır. İşlenmiş parçalarda yüksek dayanımlar göze çarparken süneklilik düşük çıkmıştır [52].

Isıl İşlemin Etkisi

Katmanlı imalatla üretilen parçalarda müteakip katmanların mikrosertlikleri ilk katmandan sonra düşmekte, sonradan ise son katmana doğru artmaktadır. Bunun sebebi orta katmanlardaki soğuma hızının ilk ve son katmanlardakine oranla çok daha düşük olmasıdır. Ayrıca, önceki ve sonraki katmanlardaki ısınma/soğumadan dolayı orta katmanlar sürekli ısı değişimine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla daha yüksek soğuma hızına sahip üst ve alt katmanların mikrosertlikleri, orta katmanlara göre daha yüksek çıkmaktadır [32]. Daha homojen bir mikrosertlik dağılımı ve yoğunluğun artırılması için katmanlı imalatla işlemeden sonra ısıl işlem uygulanabilmektedir.

Vrancken ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V test numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde ısıl işlemin etkisini incelemişlerdir. 1600 mm/s tarama hızı, 250 W lazer gücü, 60 µm yanal kayma mesafesi ve 30 µm katman kalınlığının kullanıldığı çalışmada, üretilen parçaların akma ve azami çekme dayanımlarının (1110 ve 1267 MPa) referans parçaya göre (960 ve 1006 MPa) daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Bunun sebebinin ise hızlı soğuma sonucu oluşan ince mikroyapı olduğu belirtilmiştir. Isıl işlem uygulandığında ise akma ve azami çekme dayanımları azalmıştır [53].

Leuders ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 40 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip tozlar ve 30 µm katman kalınlığının kullanıldığı çalışmada, 1008 MPa akma dayanımı, 1080 MPa azami çekme dayanımı ve % 1,6 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Parçalar ısıl işleme tabi tutulduğunda, akma ve azami çekme dayanımı azalırken, kopma uzaması artmıştır [54].

Uhlmann ve arkadaşları küresel Ti6Al4V tozları kullanarak lazer ergitme yöntemiyle uçak parçaları üretmişlerdir. 275 W lazer gücü ve 975 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, eğer katmanlı imalattan sonra sıcak izostatik presleme uygulanırsa, parça yoğunluğunun % 96,95'ten % 99,19'a çıktığı belirtilmiştir [55].

Tozların Tekrar Kullanılmasının Etkisi

Katmanlı imalatta her bir serimde tezgâha serilen ama kullanılmayan tozlar bir sonraki işlemede kullanılabilir. Fakat tozların bu birden fazla kullanıma durumu, tozların özelliklerinde değişime neden olabilir. Kullanım sayısı arttıkça tozlar daha küresel hale gelir, akışkanlıkları artar, tozların içerisindeki oksijen miktarı ve dolayısıyla akma ve azami çekme dayanımları artar. Bu konuda yakın zamanda yapılan bir çalışmada, elektron ışınıyla işlemede, Ti6Al4V tozlarının 21 defa kullanılmaları durumunda, tozlardaki oksijen miktarının ağırlıkça % 0,08'den 0,19'a arttığı, alüminyum miktarının % 6,47'den 6,37'ye düştüğü, vanadyum miktarının da % 4,08'den 4,03'e düştüğü belirtilmiştir [56].

SONUÇ

Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek paslanma direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı, havacılık sanayinde kullanımı sürekli artan Ti alaşımların, katmanlı imalat yöntemiyle üretimde kullanılmasıyla elde edilen parçaların mekanik özellikleri ve bu özellikler üzerine etki eden faktörlerin incelendiği bu çalışmada, aşağıdaki genel sonuçlar çıkartılabilmektedir;

- Katmanlı imalatla üretilen parçaların mekanik özellikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir.
- Tarama hızı, katman kalınlığı ve yanal kayma mesafesi arttıkça yoğunluk ve mekanik özellikler azalmakta, lazer gücü arttıkça artmaktadır.
- İnşa yönü parçanın çekme yönünde ise, diğer yönlere göre mekanik özellikler yüksek çıkmaktadır.
- Isıl işlem uygulandığında, parçalarda gözeneklilik, artık gerilmeler ve mekanik özellikler düşmektedir.

Literatürden elde edilen bilgilere göre aşağıdaki konularda detaylı çalışmaların yapılması gerektiği, literatürde bu alanlarda eksiklikler olduğu görülmüştür;

- Katmanlı imalatla üretilen parçaların mikroyapı özellikleri imalat sırasındaki yüksek ısınma/soğuma oranları, hızlı sıcaklık yükselmesi gibi ısıl etkenlerden ciddi oranda etkilenmektedir. Birçok üretim parametresi bu ısıl etkenleri değiştirdiği için, katmanlı imalatla üretilen parçaların mikroyapı özellikleri ve bunların işleme

parametreleriyle nasıl değiştiği konusunda önemli araştırma eksikliği vardır [32].

- Uçak parçalarının üretiminde katmanlı imalatın CNC işleme ile beraber kullanılması (hibrit üretim) konusunda araştırma eksikliği vardır.
- Maliyeti yüksek uçak parçalarının hasar görmesi durumunda, bu parçaların yeniden üretilmesinden ziyade, katmanlı imalatla tamir edilmesi noktasında literatürde daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.
- Literatürde, katmanlı imalatla üretilen parçaların yorulma dayanımları konusunda çalışmalar olmasına rağmen, katmanlı imalata özgü gerinim ve/veya gerilim tabanlı yorulma modeli çıkartılması konusunda önemli araştırma eksikliği vardır.

MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

In this study, mechanical properties of Ti alloy parts produced by additive manufacturing and factors that have effects on these properties are investigated in detail. The effect of not only production parameters such as hatch spacing, scanning speed and layer thickness, but also factors such as production type, residual stresses after production and heat treatment on mechanical properties are investigated. According to the findings from literature review, possible future implementations of this process are mentioned in the result section by listing the subjects on which works are insufficient.

Keywords: Additive Manufacturing, Scanning Speed, Layer Thickness, Residual Stress

KAYNAKÇA

1. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, 117, 2016, 371-392.
2. Baumann, 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, 2016, 193-201.
3. Yamanaka, K., Saito, W., Mori, M., Matsumoto, H., Chiba, A., "Preparation of weak-textured commercially pure titanium by electron beam melting", *Additive Manufacturing*, 8, 2015, 105-109.
4. Thomas, M., Malot, T., Aubry, P., Colin, C., Vilaro, T., Bertrand, P., "The prospects for additive manufacturing of bulk TiAl alloy", *Materials at High Temperatures*, 33(4-5), 2016, 571-577.

5. Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Klein, T.J., Malda, J., Bartolo, P.J., Huttmacher, D.W., "Additive manufacturing of tissues and organs", *Progress in Polymer Science*, 37, 2012, 1079-1104.
6. Chu, C., Graf, G., Rosen, D. W., "Design for additive manufacturing of cellular structures", *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), 2008, 686-696.
7. Gardan, J., "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends", *International Journal of Production Research*, 54(10), 2016, 3118-3132.
8. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuj, B., Martina, F., "Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 2016, 737-760.
9. Wohlers, T., "Wohlers Report 2015: Global Reports", Wohlers Associates, Belgium, 2015.
10. Wang, M, Lin, X., Huang, W., "Laser additive manufacture of titanium alloys", *Materials Technology*, 31(2), 2016, 90-97.
11. Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M., "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 2010, 687-697.
12. Gu, D. D, Meiners, W., Wissenbach K., Poprawe, R., "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", *International Materials Reviews*, 57(3), 2012, 133-164.
13. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. V., Kruth, J. P., "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V", *Acta Materialia*, 58, 2010, 3303-3312.
14. Merklein, M., Junker, D., Schaub, A., Neubauer, F., "Hybrid additive manufacturing technologies, an analysis regarding potentials and applications", *Physics Procedia*, 83, 2016, 549 – 559.
15. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., Newkirk, J., "Aerospace applications of laser additive manufacturing", *Laser Additive Manufacturing*, 2017, p. 354.
16. Graf, B., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., "Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys", *Physics Procedia*, 39, 2012, 376-381.
17. Zekovic, S., Dwivedi, R., Kovacevic, R., "Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2007, 112-123.
18. Banerjee, D., Williams, J. C., "Perspectives on titanium science and technology", *Acta Materialia*, 61(3), 2013, 844-879.
19. Szost, B. A., Terzi, S., Martina, F., Boisselier, D., Prytuliak, A., Pirling, T., Hofmann, M., Jarvis, D. J., "A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components", *Materials and Design*, 89, 2016, 559-567.
20. Körner, C., "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review", *International Materials Reviews*, 61(5), 2016, 361-377.
21. Zhu, Y., Li, J., Tian, X., Wang, H., Liu, D., "Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy by laser additive manufacturing", *Materials Science & Engineering A*, 607, 2014, 427-434.
22. Carroll, B. E., Palmer, T. A., Beese, A. M., "Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing", *Acta Materialia*, 87, 2015, 309-320.
23. Ren, H., Tian, X., Liu, D., Liu, J., Wang, H., "Microstructural evolution and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy", *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 25, 2015, 1856-1864.
24. Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H., Coddet, C., "Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V", *Materials and Design*, 35, 2012, 120-125.
25. Yu, J., Rombouts, M., Maes, G., Motmans, F., "Material properties of Ti6Al4V parts produced by laser metal deposition", *Physics Procedia*, 39, 2012, 416-424.
26. Wang, X., Gong, X., Chou, K., "Scanning speed effect on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 1, 2015, 287-295.
27. Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V., "Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel", *Physics Procedia*, 12, 2011, 255-263.
28. Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., Bültmann, J., "High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts", *Physics Procedia*, 12, 2011, 271-278.
29. Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Ludovico, A. D., "Experimental investigation

- and statistical optimization of the selective laser melting process of a maraging steel”, *Optics & Laser Technology*, 65, 2015, 151-158.
30. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., “Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel”, *Materials and Design*, 50, 2013, 581–586.
 31. Basalah, A., Esmaeili, S., Toyserkani, E., “On the influence of sintering protocols and layer thickness on the physical and mechanical properties of additive manufactured titanium porous bio-structures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 2016, 341-351.
 32. Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Material Science and Engineering A*, 528, 2011, 1094-1104.
 33. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M., “An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control”, *Additive Manufacturing*, 8, 2015, 12–35.
 34. Blackwell, P.L., “The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718”, *Journal of Material Processing Technology*, 170, 2015, 240–246.
 35. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J., Humbeeck, J. V., “Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures”, *Additive Manufacturing*, 5, 2015, 77–84.
 36. Casati, R., Lemke, J., Vedani, M., “Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting”, *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 2016, 738-744.
 37. Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., Walther, F., “High cycle fatigue (HCF) performance of Ti–6Al–4V alloy processed by selective laser melting”, *Advanced Materials Research*, 816, 2013, 134-139.
 38. Hrabe, N., Quinn, T., “Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location”, *Material Science and Engineering A*, 573, 2013, 271-277.
 39. Zhang, S., Wei, Q., Cheng, L., Li, S., Shi, Y., “Effects of scan line spacing on pore characteristics and mechanical properties of porous Ti6Al4V implants fabricated by selective laser melting”, *Materials and Design*, 63, 2014, 185–193.
 40. Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D. A., “Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques”, *Procedia Engineering*, 114, 2015, 658-666.
 41. Al-Bermani, S. S., Blackmore, M. L., Zhang, W., Todd, I., “The origin of microstructural diversity, texture and mechanical properties in electron beam melted Ti–6Al–4V”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 2010, 3422-3434.
 42. Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., Babu, S. S., “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing”, *International Materials Reviews*, 61(5), 2016, 315-360.
 43. Shuangyin, Z., Xin, L., Jing, C., Weidong, H., “Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 38, 2009, 774-778.
 44. Popovich, A., Sufiiarov, V. Polozov, I., Borisov, E., Masaylo, D., Orlov, A., “Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy”, *Materials Letters*, 179, 2016, 38–41.
 45. Yasa, E., Kruth, J. P., “Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting”, *Procedia Engineering*, 19, 2011, 389-395.
 46. Rangaswamy, P., Griffith, M.L., Prime, M.B., Holden, T.M., Rogge, R.B., Edwards, J.M., “Residual stresses in LENS® components using neutron diffraction and contour method”, *Material Science and Engineering A*, 399, 2005, 72–83.
 47. Bontha, S., Klingbeil, N.W., Kobryn, P.A., Fraser, H.L., “Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 178, 2006, 135–142.
 48. Ahn, Y. K., Kim, H. G., Park, H. K., Kim, G. H., Jung, K. H., Lee, C. W., Kim, W. Y., Lim, S. H., Lee, B. S., “Mechanical and microstructural characteristics of commercial purity titanium implants fabricated by electron-beam additive manufacturing”, *Materials Letters*, 187, 2017, 64–67.
 49. Attar, H., Calin, M., Zhang, L.C., Scudino, S., Eckert, J., “Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium”, *Materials Science & Engineering A*, 593, 2014, 170–177.
 50. Furumoto, T., Koizumi, A., Alkahari, M. R., Anayama, R., Hosokawa, A., Tanaka, R., Ueda, T., “Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing”,

- Journal of Materials Processing Technology, 219, 2015, 10–16.
51. Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., Requena, G., “Correlation between porosity and processing parameters in Ti6Al4V produced by selective laser melting”, *Materials and Design*, 105, 2016, 160-170.
 52. Qiu, C., Adkins, N. J. E., Attallah, M. M., “Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V”, *Materials Science & Engineering A*, 578, 2013, 230–239.
 53. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V., “Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties”, *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 2012, 177–185.
 54. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., Maier, H. J., “On the mechanical behaviour of titanium alloy Ti6Al4V manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance”, *International Journal of Fatigue*, 48, 2013, 300–307.
 55. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., Borille, A. V., “Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components”, *Procedia CIRP*, 35, 2015, 55–60.
 56. Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y., Wang, J., “Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti–6Al–4V by selective electron beam melting”, *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67(3), 2015, 1-9.

Endüstri 4.0: Üretimde Kavram ve Algı Devrimi

Orhan Dengiz

Yrd. Doç. Dr.

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi,
Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri
orhan.dengiz@gmail.com
+90 543 514 64 65

Geleceğin üretim modellerini geliştireceği söylenen ve hızlıca içine girmekte olduğumuz yeni bir sanayi devrimi, “Endüstri 4.0” veya “4. Endüstri devrimi” olarak adlandırılıyor. Endüstri 4.0’ı oluşturacak akıllı sistemler, yenilikçi yaklaşımların, yeni teknolojilerin, ileri teknolojilere sahip bilgisayarların, yeni yazılımların ve nitelikli insan kaynağının etkileşimli çalışması ile sağlanabilmektedir. Bu süreç geleceğin endüstrisini nasıl şekillendirecek? “Nesnelerin İnterneti,” “Bulut Bilişim,” “Üretim Bulutu,” “Artırılmış Gerçeklik” gibi kavramlar bu süreçte Endüstri 4.0 devriminin neresinde olacak? gibi sorular bu yazıda ele alınacak ve açıklanmaya çalışılacaktır. Yakın gelecekte tasarım ve üretim ortamlarının nasıl şekilleneceği ve bu döneme nasıl hazır girilebileceği konuları tartışılacaktır. Bir inceleme ve öngörü yazısı olan bu makalede bu sorulara cevap aranırken, saha tecrübelerinden edinilen gerçek uygulamaların bilişim sistemleri tarafındaki temel adımları tarif edilerek bir başlangıç yol haritası önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, 4. Sanayi Devrimi, Siber Fiziksel Sistemler, Nesnelerin İnterneti

GİRİŞ

21. Yüzyılın neredeyse otuzuncu yılına girerken endüstriyel dünyanın; giderek hayatın her alanında artan dijitalleşme hareketinden kaynaklı büyük bir değişim dalgası içinde olduğunu gözlemliyoruz. İş ve sanayi dünyasındaki karşılığı “Dördüncü Sanayi Devrimi” veya “Endüstri 4.0” olarak adlandırılan bu değişim dalgası, modern endüstriyel süreçlerin devrim niteliğinde değişimlere uğraması ve imalat, lojistik, sağlık, turizm, perakende vb. birçok sektörde işin yeniden tanımlanması, bugün var olmayan birçok mesleğin yaklaşık 10 yıl içinde doğması anlamına gelecektir.

İmalat sektöründe ileri teknolojilerin kullanılmasıyla değişime uğrayan geleneksel sanayi artık akıllı sistemlerin yer aldığı bir süreç olarak anılmaktadır. Bilindiği gibi Almanya’nın bir yüksek teknoloji stratejisi 2020 aksiyon planı projesi olarak ortaya çıkan bu yaklaşım aslında günümüz teknolojisindeki hızlı gelişmelerin getirdiği yenilikçi yaklaşımların doğal bir sonucu olarak ortaya çıkmış ve hem araştırmacıların hem de sektörün büyük ilgisini çekmiştir [7,8]. Bu değişimin önümüzdeki yıllarda her sektörü hızla etkisi altına alacağı açıktır ve bu dönüşüme ayak uyduramayan kuruluşlar çok

uzak olmayan bir gelecekte mevcut şekli ile operasyonlarını sürdüremeyecekleri gerçeği ile karşılaşacaklardır.

İnsanlık tarihinin en önemli dönüm noktası olan tarım ve insan gücüne dayalı ekonomiden makine ve seri üretimin öne çıktığı ekonomiye geçişi içeren “Birinci Sanayi Devrimi” İngiltere’den başlayarak bütün Avrupa’ya, oradan da Dünya’ya yayılmıştır. Birinci Sanayi Devrimi enerjisini fosil yakıtlardan temin ederek yeni bir enerji türü olan buhar gücü ile çalışan makinelerin üretimde kullanılmasıyla gelişmiştir. “İkinci Sanayi Devrimi” döneminde ise endüstri elektrik enerjisine dayalı olarak gelişmiştir. Henry Ford’un seri üretim otomobili bu dönemde üretilmiştir. Endüstri mühendisliğine giriş derslerinde verilen en tipik örneklerden biri olan Henry Ford montaj hattında Taylor’un ilkeleri ve hareketli montaj hattı uygulanarak düşük maliyetli seri üretime geçilmiştir. “Üçüncü Sanayi Devrimi” elektronik ve bilişim teknolojilerinin kullanımı ile ortaya çıkmış ve böylece bilgisayar destekli tasarım ve üretim kavramı endüstriye büyük bir hızla girmiştir. “Dijital Devrim” olarak anılan bu devrim sürecinde bilgisayar ve iletişim teknolojisi hızlı gelişerek beraberinde

bilgisayar destekli tasarımı, kontrol sistemleri ve üretim sistemlerinde otomasyonu getirmiştir. Bu dönem “*Bilişim Teknolojisi Dönemi*” olarak da anılmaktadır. Amerika’da 1960’lı, Türkiye’de 1990’lı yıllarda yaşamımızın her alanına giren internet sosyal ve teknik alanda bilgiye erişimi hızlandırarak büyük bir toplumsal değişime yol açmıştır.

Endüstri 4.0 veya Dördüncü Sanayi Devrimi bir transformasyon anlayışı veya zihniyeti ile beslenen sürekli bir gelişim hareketidir. Bu anlayışın nihai hedefi; dijital gelişmelerin getirdiği imkân ve yenilikler ile birlikte üretimde daha verimli ve efektif yani daha rekabetçi hale gelmektir.

Endüstri 4.0 anlayışını yaratan ve onu sürekli motive eden temel lokomotif; bilgi teknolojileri, sensör teknolojileri ve telekomünikasyon alanında gerçekleşen gelişme-yaygınlaşma ve ucuzlamadır. Nesnelerin interneti olarak adlandırılan; temelde bilgisayar olmayan nesnelerin internet protokolü ile veri alabilen ve gönderebilen hale gelmeleri bu teknolojik gelişmeler ile birlikte mümkün olmuştur. Yeterince küçültülebilen mikroişlemciler, küçülmekle birlikte kat kat artan hafıza ve veri depolama aygıtları, gelişen telekomünikasyon sistemleri ile birlikte kablolu geniş alan ağlarının getirdiği hareket serbestliği gibi imkanlar nesnelerin internetini doğurmuştur. Buna paralel olarak özellikle bulut bilişim teknolojisi ile elde ettiğimiz yüksek işlemci ve veri depolama kapasiteleri çok noktadan sürekli toplanan veri veya daha yaygın ismi “*Büyük Veri*” ile çalışmayı mümkün kılmıştır [6]. Nesnelerin interneti, Endüstri 4.0 kavramlarının hayata geçirilmesi için en önemli bileşen kabul edilebilir [15].

Nesnelerin interneti McKinsey&Company tarafından şöyle tanımlanmıştır: “Bilgisayar sistemlerine bir ağ ile bağlanabilen sensörler ve aktüatörler (çalıştırıcılar). Bu sistemler üzerinde buldukları nesnelerin fiziksel şartlarını ölçebilir, sağlık durumlarını algılayabilir ve işlemlerini yönetebilirler. Benzer nesnelere doğal yaşam, insan veya diğer canlılarla ilgili de algılama amaçlı uygulamalarda kullanılabilir.” [1]

Sensör ve nesnelerin interneti teknolojisinin gelişmesi akıllı sistemleri günlük yaşamımıza içine hızla sokmaktadır. Günümüzde akıllı sistemler kullandıkları ileri teknolojiyle çok farklı alanlarda uygulama bulmaktadır. Akıllı iletişim, akıllı şehirler, akıllı binalar, akıllı evler, akıllı televizyon, akıllı üretim, akıllı tarım sistemleri gibi daha birçok alanda benzeri tabirler sıkça duyulmaktadır. İçinde “*akıllı*” geçen tüm kavramlar da nesnelerin interneti ile bu özelliğe sahiptirler [3].

Doğal fiziksel dünyamızdaki algılamaların sensörler vasıtası ile bir elektronik sinyale, sonrasında da iletim, işlem ve depolama amacı ile dijital veriye dönüştürülmesi dijitalleşmenin en temel adımıdır. Tüm bu işlemlerin yapılabilmesini sağlayan teknolojilerin tamamı da dijital teknoloji olarak adlandırılabilir. Endüstri 4.0 kavramı ile birlikte sıklıkla geçen başka bir kavram ise “*Dijitalleşme*” veya “*Dijital Dönüşüm*”dür. Dijitalleşme de dijital teknolojiler kullanılarak iş modellerini değiştirmek ve yeni gelir kaynakları sağlayacak veya değer üretecek fırsatlar yaratmak olarak tanımlanmaktadır [5].

Fiziksel dünyanın dijital veriler ile algılanması ve komuta edilebilmesi “*Siber Fiziksel Sistem*” olarak ifade edilen kavramı da doğurmuştur [13]. Siber fiziksel sistemler entegre edilmiş iletişim, bilgi işlem, kontrol ve sensör sistemleri olarak tanımlanabilir [2]. Siber fiziksel sistemler gerçek/fiziksel ve sanal/dijital dünyayı bir araya getiren sistemlerdir [8]. Yukarıda bahsedilen Nesnelerin İnterneti, İletişim ve Bulut Bilişim Sistemleri gibi tüm teknolojilerin entegrasyonu ile bir sonraki adım olan siber fiziksel sistemler mümkün hale gelmiştir. Fiziksel dünya ile dijital dünyanın bu birleşimi yine sanayide çokça duyulmaya başlayan; fiziksel nesne veya sistemlerin bire bir dijital karşılıklarını ifade eden “*Dijital İkiz*” kavramını yaratmıştır.

Tüm bu yeni türetilen isimlendirmeler ve kavramlar aslında vizyonerlerin hayal ettikleri bu ileri düzey sanayi ortamının bileşenlerinin ifade edilmesi amacı ile oluşmakta ve araştırmacıların üzerinde yoğunlaştıkları alanları belirtmektedir. Hedeflenen nokta, teknolojinin tüm olanaklarının ortak bir platformda birleştirilmesi ve insanlığın geleceğindeki sanayi ortamının tamamen bilgiye dayalı, gerçek ve güvenilir veri kullanılarak analitik çözümler ile yönetilen, akıllı robotik ve otomasyon sistemlerinin ağırlıklı olarak kullanıldığı bir şekle sokulmasıdır.

Bugün Endüstri 4.0’ın dünyada ve ülkemizdeki uygulamalarına baktığımızda bazı alanlarda uygulamaların öncelik kazandığını söyleyebiliriz. İmalat sanayi alanındaki önemli konulardan biri olan ürün tasarımından ürünün pazara, oradan da müşteriye ulaştırılmasına kadar olan ve “*Tedarik Zinciri Yönetimi*” (Supply Chain Management) olarak isimlendirilen lojistik sürecin izlenmesi ve daha verimli yönetimi, akıllı sistemlerin kullanılması ile kolaylaşarak yaygınlaşacaktır. Başta imalat sanayi olmak üzere tüm sektörlerde “Enerji Verimliliği” konusunda Endüstri 4.0 teknolojileri ile canlı izleme ve analiz sistemleri yaygınlaşmaktadır. Kaynakları kısıtlı veya çok maliyetli olan operasyonların gerçek zamanlı veri ile optimize

edilmesi önemli kazanımlar yaratmaktadır. Bu da teknolojik yatırım kararlarının kısa süreli geri dönüşler sayesinde kolay verilmesini sağlamaktadır. İmalat sanayinin yanı sıra Lojistik, Enerji Verimliliği, Sağlık Hizmetleri, Hizmet Sektörü vb. alanlar da Endüstri 4.0 teknolojilerinin önemli uygulama alanlarıdır.

ENDÜSTRİ 4.0 HAYATIMIZI NASIL ETKİLEYECEK?

Endüstri 4.0 devrimi ile fabrikadaki makineler ve sistemler ile dijital iletişim sağlanarak verimlilik artışı nasıl sağlanacak? Giderek robotlara devredilen imalat işleri sonucunda daha az sayıda insan kaynağı mı gerekecek? Bu ve benzeri soruların artması kaçınılmazdır. Diğer yandan bu gelişimin işsizliği tetikleyeceği kaygısı da beraberinde düşünülmesi gereken bir olgu olarak karşımızdadır. Bundan önceki sanayi devrimlerinin de benzer sorgulamalara maruz kaldığını düşünecek olursak, her defasında aslında ekonomilerin büyüdüğünü, refahın arttığını ve daha fazla iş imkânı yaratılmış olduğunu biliyoruz. 4. Sanayi devrimi de benzer bir etki yaratacaktır. Bütün bu teknolojik yatırımların gerçekleştirilebilmesi için elbette zaman ve daha da önemlisi niteliksiz insan gücü yerine yetişmiş nitelikli insan gücü gereksinimi artacaktır.

Bu projeleri gerçekleştirecek olan nesiller bugün dünyada ilkokul çağlarından itibaren yaşlarına uygun seviyede kodlama dersleri almakta, ortaokul ve lise çağlarında 3 boyutlu tasarım programları ile ekip olarak tasarladıkları robotları 3 boyutlu yazıcılar ile üretip, gömülü yazılımlarını geliştirdikleri mikro işlemciler ile kontrol ederek yarıştırmaktadırlar. Endüstri 4.0 kavramı hayatın her alanında bugün bilinmeyen meslekler yaratacak ve yeni nesillere yepyeni iş imkanları yaratacaktır.

ENDÜSTRİ 4.0 SAHA UYGULAMALARI

Bu bölümde, giriş bölümünde Endüstri 4.0 ile birlikte sözü edilen “*Siber Fiziksel Sistemler*,” “*Dijital Teknolojiler*,” ve belki en önemlilerinden “*Nesnelerin İnterneti*” teknolojilerinin geçek bir uygulama için nasıl bir araya getirilerek nihayetinde bir sanayi uygulaması yaratıldığı anlatılmaktadır.

Uçtan uca bir nesnelerin interneti uygulaması dört fazdan meydana gelir: 1- Makinelerin, cihazların veya sistemlerin gerekiyorsa modernize edilerek bir ağa bağlı hale getirilmesi. 2- Bağlı hale getirilen sistemden toplanan veriler için bir veri tabanı sistemi oluşturulması ve bu verileri kullanacak tüm uygulamalar için erişilebilir olması 3- Nesnelerin interneti uygulamalarının geliştirileceği, başka bir deyişle iş zekasının programlanacağı ortamın oluşturulması 4- Son kullanıcı uygulamalarının grafik ara yüz sistemlerinin barındırılacağı ortamların

oluşturulması ve uygulamanın hayata geçirilmesi [14]. Bu dört ana faz aşağıda detaylı olarak incelenecektir.

1. Makine ve sistemlerin bağlı hale getirilmesi

Makine, cihaz ve sistemlerin bağlı hale getirilmesi herhangi bir nesnelerin interneti uygulaması için en temel adım olmaktadır. Eğer sistemler üretici tarafından bağlı ve veri iletişimine hazır imal edilmemişler ise bir modernizasyon yapılarak bağlı hale getirilebilir. Bu modernizasyon genellikle makineye ilave edilen sensörler (algılama), aktüatörler (kontrol) ve bağlantıyı sağlamak üzere kurulacak olan bir ağ geçit cihazı (iletişim) ile yapılır. İnternete bağlı hale getirilen makineler, nesnelerin interneti teknolojisi kullanılarak bir “*Cihaz Bulutu*” platformu üzerinden kontrol edilebilir duruma gelmiştir. Makinelerin anlık durumları, performans ölçümleri, alarmları ve bakım kayıtları gibi veriler cihaz bulutu üzerinden canlı olarak erişilebilir hale gelmiş, operasyon esnasında makinelerin gönderdiği veriler periyodik olarak kayıt altına alınır hale gelmiş ve gerektiğinde yüzlerce veya binlerce makine tek bir merkezden kısa sürede talimat alabilen veya yazılımı güncellenebilen büyük bir sistem haline getirilmiş olur.

2. Bağlı sistemler için bir veri tabanı oluşturulması

Endüstri 4.0 kavram olarak tamamen veriye dayalı bir sistemi tanımlar. Herhangi bir operasyon için alınan tüm kararlar, analitik işlemler, çözelgeleme, rotalama, sıralama gibi tüm optimizasyon işlemleri gerçek veri ile; çoğu zaman gerçek zamanlı veri ile yapılmalıdır. Sensör verileri başta olmak üzere makineler ve üretim sistemleri tarafından üretilen tüm veriler gerektiğinde yazılım uygulamalarının erişimine açık olacak şekilde saklanmalı ve yüksek performansla kullanılabilir. Bu verilerin kullanılabilmesidir.

Endüstri 4.0 veya nesnelerin interneti uygulamalarında uzun zamandır geliştirilmekte olan ilişkisel veri tabanlarının yanında “*NoSQL*,” “*Çizge*,” ve “*Zaman Serisi*” veri tabanları gibi yeni nesil veri tabanı sistemleri kullanılmaktadır. Bir Endüstri 4.0 uygulaması için kullanılan veri tabanı sistemleri birçok farklı noktadan gelen verileri kayıt etmesi beklenen ve birçok farklı noktadan erişim ve sorgu için emre amade olması beklenen sistemlerdir. Bu sebeple Endüstri 4.0 veya nesnelerin interneti uygulamaları için kullanılacak olan veri tabanı sistemlerinin bulut tabanlı olması gereklidir. Bu gereklilik aynı zamanda hem performans hem de depolama kapasitesi açısından ölçeklenebilir olma avantajını getirecektir.

Günümüzde bulut bilişim hizmeti sağlayan kuruluşlar farklı tiplerde veri tabanlarını kullanıcıların hizmetine kısa sürede verebilmekte, depolama alanı ve işlem gücü açısından ölçeklenebilir çözümler sunmakta ve yine bulut teknolojisinin yardımı ile paralel yedekleme yaparak veri güvenliği konusunda da önemli servisleri sağlamaktadırlar. Endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti uygulamaları için bu tip sistemler kesintisiz servis sağlanması yönünden de tercih edilmektedir.

3. İş zekasının geliştirileceği ortamın oluşturulması

Makalenin giriş bölümünde tarif edilen siber fiziksel sistemler bu fazda geliştirilen uygulamalar ve bunların fiziksel sistemlerle entegrasyonu ile sağlanır. Bir Endüstri 4.0 uygulaması veya nesnelerin interneti uygulaması doğası itibarı ile internet veya lokal ağ üzerinden erişilebilen bir uygulama olmalıdır. Sistemler arası entegrasyon sağlanması gerekliliği, cihaz bulutları ile yönetilen makinelere bağlanma gerekliliği, bulut üzerinde var olan veri tabanı sistemlerine bağlanma gerekliliği gibi sebepler iş zekâsı katmanının da erişilebilir bir ağ üzerinde olmasını şart koşmaktadır.

Gerçek bir Endüstri 4.0 uygulamasında sahada var olan birçok sistemin üretici kaynaklı bir yazılım sistemi olacaktır. Her biri farklı bir markanın ürünü olabilir ve sistemler, bu yazılımlar vasıtası ile farklı iletişim protokolleri ile dış dünya ile haberleşiyor olabilir. Tüm bu farklı sistemleri ortak bir platformda bir araya getirmek, veri analizlerini gerçekleştirmek, optimizasyon işlemlerini gerçekleştirmek ve siber fiziksel sistemin beyni olmak bu iş zekâsı geliştirme ortamının görevidir.

İş zekâsı ortamı her türlü dış sistem ile entegre olabilecek bir yapıya sahip olmalıdır. Uygulamanın gerektirdiği değişik veri tabanlarına bağlanabilmeli ve bu veriler ile kendi üzerinde geliştirilecek olan algoritmaları koşturabilmelidir. İş zekâsı ortamı olay güdümlü programlamayı desteklemelidir. Gerçek zamanlı veri akışı ile tespit edilen bazı özel durumlarda alarm oluşturmak, belirli kuralları uygulamak, sistemlere komut göndermek, yetkililere uyarı mesajları atmak vb. konuları olay güdümlü mekanizmalar ile gerçekleştirmelidir.

Dış sistemlere tam entegre olabilme yeteneği, iş zekâsı ortamının üzerinde geliştirilen tüm fonksiyonların, algoritmaların ve işleyişin de dış sistemler tarafından kullanılabilir olması demektir. Veri tabanı sistemlerine benzer şekilde; iş zekâsı ortamları için de bulut çözümleri ideal platformlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir uygulama altyapısı geliştirilirken halihazırda var olan birtakım özel

algoritmalarından faydalanmak, ölçeklenebilir kapasitelerden ve yedekleme sistemlerinden yararlanmak büyük avantajlar doğurmakta ve sistemlerin kısa sürede kurularak hizmet vermesini sağlamaktadır [13].

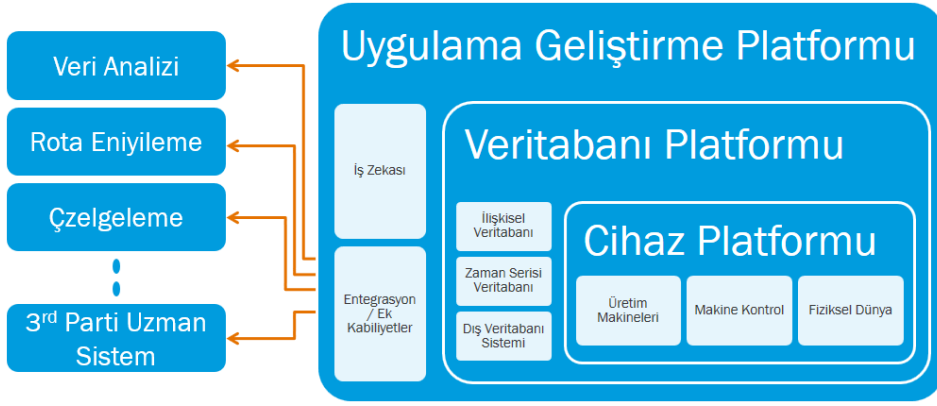
4. Son kullanıcı ara yüzlerinin geliştirilmesi

Endüstri 4.0 uygulamaları, nihayetinde bir sistem işleten insanların faydalanacağı uygulamalardır. Son kullanıcı bir şirketin CEO'su olabileceği gibi daha alt kademe yöneticiler, mühendisler, şefler ve saha operatörleri olabilir. Uygulama ara yüzleri kullanıcı grubuna ve yetkilerine göre dinamik olarak ilgili içeriği sunacak şekilde geliştirilmelidir. Kullanıcının görmesi gerektiği kadar bilgiyi ve yetkileri dahilinde sistem kontrol mekanizmalarını sunması gerekir.

Endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti son kullanıcı uygulamalarının da ortak özelliği ağ üzerinden erişilebilir uygulamalar olmasıdır. Dolayısı ile son kullanıcı ara yüzleri web tarayıcılar üzerinde çalışan web uygulamaları olmaktadır. Bu katmanın geliştirilmesinde modern web teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Son kullanıcı ara yüzü iş zekâsı katmanı ile direkt entegre olmuş ve onun üzerinden siber fiziksel sistem ile son kullanıcının etkileşimini sağlamıştır. Arka plandaki sistemlerin farklılıkları, iletişim protokolleri veri kaynaklarındaki farklılıklar son kullanıcı için tek bir ortamda toplanarak efektif bir şekilde amaca hizmet eden bir uygulama olarak sunulmuştur.

ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMA PLATFORMLARI

Endüstri 4.0 uygulamaları, çok farklı sistemleri bir araya getiren uygulamalar olmaları dolayısı ile sistematik geliştirmeye imkân tanıyan yazılım geliştirme platformları ortaya çıkmıştır. Bugün dünya üzerinde ulusal ve uluslararası arenada onlarca nesnelerin interneti veya Endüstri 4.0 uygulama platformu sunulmaktadır. Her biri farklı özelliklere sahip olan bu platformlardan bazıları ağırlıklı olarak cihaz bulutu yönetimi sağlarken bazıları da yalnızca web tabanlı uygulama geliştirme konusunda yeteneklidir. Genel bir tanımlama ile nesnelerin interneti platformları bir yazılım geliştirmek için kullanıcının farklı yazılım modüllerinin maliyet ve karmaşıklıklarından koruyan, farklı makine ve yazılım sistemleri ile kolay entegre olabilen, gerektiğinde kullanabilmek üzere internet üzerindeki paylaşımlı ağlara, sunuculara, uygulamalara ve servislerle kolaylıkla açılan, seri biçimde provizyon ve ölçeklenebilme yeteneği olan sistemlerdir [14]. Uçtan uca bir Endüstri 4.0 uygulaması geliştirmek için gereken platform aşağıdaki özellikleri barındırmalıdır:



Şekil 1. Endüstri 4.0 Uygulama Geliştirme Platformu Katmanları

- 1- Cihaz bulutu yönetimini sağlamalı
- 2- Farklı tiplerde veri tabanı yönetimini sağlamalı
- 3- Olay güdümlü mimariye sahip olmalı
- 4- İçinde iş zekası geliştirilebilmeli
- 5- İnternet üzerindeki her türlü 3. Parti sistemin servislerini kullanabilmeli
- 6- Tüm özellikleri uygulama programlama ara yüzü (API) ile dışarıya açılabilmesi
- 7- Son kullanıcı ara yüzü geliştirme mekanizmaları olmalı
- 8- Çok kullanıcı, farklı yetkilere sahip farklı kullanıcı gruplarına hizmet verebilmeli
- 9- Modern siber güvenlik mekanizmalarına sahip olmalı

Şekil 1, yukarıda tarif edilen uygulama geliştirme platformunun genel yapısını ve entegre katmanlarını göstermektedir. Sanayide farklı Endüstri 4.0 projeleri hayata geçirilmeye devam edildikçe bu tip platformların yetenekleri de gelişecektir. Farklı siber fiziksel sistemleri ortak bir dilde buluşturmak ve sistemler arası veri akışını daha büyük faydalar sağlamak amacı ile gerçekleştirmek için bu platformların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir.

ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDA API'LERİN ÖNEMİ

“Uygulama Programlama Ara yüzü” veya daha sık karşımıza İngilizce’deki karşılığının kısaltması (Application Programming Interface) olarak çıkan API, yazılım dünyasında uzun zamandır var olan bir kavramdır. Geçmişteki yaygın kullanımı itibarı ile API; bir bilgisayar programının işlevinin farklı programlar tarafından kullanılmasını sağlamak üzere yazılımcılar tarafından geliştirilen ve diğer yazılımcıların kullanımına sunulan bağlantı modülleri idi. Bir yazılıma eklentiler veya 3. Parti yazılımlara

entegrasyonlar geliştirmek için bu yazılımın API bilgilerine ve erişimine sahip olmak gerekir.

Bulut bilişim teknolojilerinin gelişimi ve internet üzerinden bir bulut servisi olarak hizmet vermeye başlayan yazılımlara dönüşüm, beraberinde “Bulut API” (Cloud API) gibi yepyeni bir kavramı getirmiştir. Bulut API kavramı sayesinde bugün milyarlarca dolar ciro yapan bulut platformları oluşmuştur. Yazılım teknolojisinin geldiği bugünkü noktada artık API ekonomilerinden söz edilmektedir [9].

Bulut API’leri sayesinde internet üzerinde herhangi bir sunucuda hizmet vermekte olan yazılım platformları veya daha ufak ölçekli servisler (mikroservis) dünyanın herhangi bir yerinden gelen taleplere anında yanıt verebilmektedir. Örneğin, bulut üzerinde yüksek kapasiteli çizelgeleme eniyilemesi yapan bir servis, ihtiyacı olan işletmelere API’lerini açarak internet üzerinden gönderilen bir çizelgeleme problem verisinin çözümünü aynı API üzerinden istemciye gönderir. Problem başına belirli bir ücret karşılığı verilen bu hizmet sayesinde problem sahibi işletmenin bu yazılımı satın almasına ve üzerinde koşturacağı bir donanım sistemi yatırımına katlanmasına gerek kalmaz. Bulut üzerinden aynı hizmeti binlerce müşterisine veren algoritma sahibi ise kurmuş olduğu API ekonomisi ile ticari faaliyetlerini sürdürebilir ve hizmetini sürekli olarak geliştirebilir.

Bugün internet ve bulut bilişim sistemlerinin bu denli başarılı hizmetler üretmesi tamamen gelişen API teknolojisi sayesinde mümkün olmuştur. Farklı platformların birbirleri ile ortak çalışabilmesi de API’ler sayesinde mümkün olmaktadır [11]. API’lerin önemli bir özelliği ortak bir iletişim protokolü olmayan yazılım ve donanım sistemlerinin kolayca birbiri ile entegre olmasını sağlamaktır.

Günümüzde API'ler sadece yazılım sistemlerinin iletişim ucu olmanın yanında artık makinelerin ve donanım ürünlerinin de dış sistemler ile haberleşme birimidir. Makinelerin sensör bilgilerini almak veya makinelere komut göndermek için makine API'leri kullanılır.

İnternet protokolü bazlı API'ler ile nesnelere interneti teknolojileri hız kazanmış ve Endüstri 4.0'ın tarif ettiği Siber Fiziksel Sistemler bu API'ler vasıtası ile kurulmaya başlanmıştır [10]. Nesnelere interneti ve Endüstri 4.0 uygulamalarında bahsi geçen tüm katmanlar birbirleri ile API'ler üzerinden haberleşir [11,12]. Veri tabanı sistemlerinin veri girişi için, sorgulamalar için belirli API'leri bulunur. Benzer şekilde iş zekâsı katmanı uygulamalardan gelen hesaplama ve benzeri işlem taleplerini kendi API'si üzerinden alır. Makineler ile yapılan tüm haberleşme de ilgili makine API'leri üzerinden gerçekleştirilir.

ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARI VE PLATFORMLARDA GELİR MODELLERİ

“ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMA PLATFORMLARI” bölümünde özellikleri tarif edilen Endüstri 4.0 uygulama platformu tüm bu dış sistem API'leri ile entegre olarak uçtan uca fayda sağlayacak olan uygulamanın geliştirilmesini ve hizmet vermesini sağlar. API ekonomisi olarak tarif ettiğimiz ve “ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDA API'LERİN ÖNEMİ” bölümünde örneği verilen uygulama gibi bulut üzerinde hizmet vermek üzere geliştirilen platformlar tekrarlayan lisanslama modeli ile kullanıcı sunulmaktadır.

Yazılım lisanslama modellerinde, neredeyse tüm yazılım ürünlerinde bulut sistemleri ile birlikte periyodik (çoğunlukla yıllık) lisanslama modellerinin sunulduğunu görmekteyiz. Bununla birlikte özellikle API vasıtası ile yararlanılan hizmetler “kullandığın kadar öde” mantığı ile sunulmaya başlanmıştır. Bunun yine İngilizce'deki karşılığı kısaltması “SAAS” (software as a service) veya “PAAS” (platform as a service) yazılımın son kullanıcıya lisanslanmak yerine bir servis veya hizmet olarak sunulması anlamına gelmektedir. Yazılım firmaları artık ürünlerini son kullanıcıya satmamakta bunun yerine onlara kullandıkları oranda hizmet satmaktadır. Bu aslında bulut bilişim sistemlerinin yazılım dünyasında platform ekonomilerini nasıl yarattığının ve geliştirdiğinin bir göstergesidir.

ÜRETİM BULUTU

Endüstri 4.0 ile gözlemlenmekte olduğumuz bir diğer gelişme ise benzer gelir modellerinin makineler için de denenmekte olduğudur. Bugün makine üreticileri müşterilerine makineleri satmak yerine

kullandıkları kadar ödeyecekleri sistemler sunmaya başlamışlardır. İngilizce karşılığı ile “MAAS” (machine as a service) nesnelere interneti teknolojileri ile sürekli performansı ve operasyonları takip edilen makinelerin müşteri işletmelerinde hizmete verilmesini ifade eder. Bu makinelerin kullanım verilerine göre faturalandırılması ile gelir elde edilen modeller sıkça görülmeye başlanmıştır. Makinenin üreticinin sahipliğinde kalması, bakımlarının aksatılmaması, gerekli zamanda gerekli parçalarına bakım yapılarak maliyetlerin azaltılması, makineden sürekli alınan veriler ile önleyici bakım faaliyetlerinin planlanması ve kullanım oranlarının yüksek tutulması gibi faydalar sağlanmaktadır [6]. Bu şekilde makine üreticileri sürekli bir gelir modeline kavuşurken müşteriler de operasyonlarında ekonomi sağlamakta, tüm taraflar kazanmaktadır. Bulut bilişim kavramının makinelerle uyarlanması ile “Üretim Bulutu” kavramı doğmuştur [16]. Üretim bulutu yalnızca API'ler ile kontrol edilen bir makine grubunu ifade eder ve bu makineler tamamen dijital otomasyon ile yönetilerek kendilerine gönderilen üretim emirlerini yerine getirir. Gerekli zaman gerektiği sayıda makine üretim projelerine atanarak makine kaynağının verimli kullanımı ve dinamik kapasite seviyeleri hedeflenen bu kavram, Endüstri 4.0 ile ulaşılabilecek son derece ileri seviye bir kurguyu tanımlamaktadır.

ÇEVİK ÜRETİM

Endüstri 4.0 ile birlikte dönüşüme uğrayan üretim sistemlerinin yanında üretimden çıkan akıllı ürünlerin de fabrikadan ayrıldıktan sonra başlayan hayatlarında nesnelere interneti teknolojileri ile bağlı kalmaya devam edeceği ve hayat döngüsünü tamamlayana kadar üreticisine veri sağlayacağı bir dönem başlıyor. Bu da ürün tasarımında sürekli iyileştirme ve üretimde atık veya çevik olmak demek. Fabrikadan ayrılan bir ürünün ne tip ortamlara maruz kaldığı, hangi şartlar altında nasıl davranış gösterdiği, son kullanıcıdan ne tip geri bildirimler aldığı gibi veriler üreticiye anında ulaşacaktır. Bir tasarım, üretim halinde iken bile değişikliğe uğrayabilecek ve yeni versiyon ürün olarak hattan çıkabilecek [4].

SONUÇLAR

Endüstri 4.0 üretimde büyük değişimlere yol açacak teknolojileri geliştirmeyi ve uygulamayı öngören bir anlayış. Bu anlayış üzerine geliştirilen kavramlar gelecekte sanayinin nasıl bir üretim ortamına sahip olacağı konusunda yol göstericilik yapmaktadır. Bugün gelinen noktada tamamı internete bağlı makine ve sistemlerden oluşan ve sanal ortamda bir “Dijital İkizi” olan fabrikalardan söz edilmektedir. Çevik üretim teknikleri ile sürekli iyileştirilen ürün tasarımları, sürekli veri analizi ile

anormallikleri tespit ederek önleyici bakım faaliyetlerini yönetmek, artırılmış gerçeklik (AR) ile operatörlerin algılarını ve becerilerini artırmak, bu sayede operatörlerden kaynaklı varyasyonları minimize etmek mümkün olacaktır. Robotik üretim hatlarında sürekli ölçüm teknolojileri ile robotların tekrarlayan pozisyon veya boyutsal kaymalara yol açan kalibrasyon hataları insansız ve anında düzeltilenecektir. Endüstri 4.0, tam otomatik imalat sistemlerinin tasarlanması, yönetilmesi ve işletilmesi ile ilgili yeniliklerle fabrikaya, dolayısıyla mühendis ve operatörlerin iş hayatına girmiş olacaktır.

Endüstri 4.0 arayışları arasında bulut bilişim gelişmeleri ile birlikte bulut üretim kavramı da ortaya atılmıştır. Kavram olarak her yerde tasarla her yerde üret (Design Anywhere Manufacture Anywhere – DAMA) fikrini bulut teknolojileri ile hayata geçirmek mümkün olabilecektir. Özellikle 3 Boyutlu üretim teknolojilerin gelişmesi ile birlikte üretim bulutu ile tamamen uzaktan yönetilebilen makine gruplarına MAAS servisleri ile üretim yaptırmak mümkün olacaktır. Bu sayede tıpkı bulut bilişim sistemlerinde olduğu gibi kapasite artışları dijital olarak kontrol edilebilecek ve makine kaynakları dinamik olarak farklı müşteriler tarafından kullanılabilir.

Şu bir gerçek ki yeni sanayi devrimi, gelişen teknoloji ve know-how ile birlikte adım adım yaşanan bir değişim olacaktır. Bu yüzden Endüstri 4.0 aslında bir kavram veya bir anlayıştır. Bu anlayış ile sürekli geliştirilmeyen işletmeler piyasada rekabet güçlerini yavaş yavaş yitireceklerdir. Doğru yerde kullanılan teknolojiler üretim maliyetlerini düşürecek, kapasiteleri ve kaliteyi artıracak sonuçları doğuracaktır. Kısacası dünyanın kısıtlı kaynakları üretimi ve sanayinin diğer alanlarında Endüstri 4.0 ile birlikte çok daha verimli kullanılabilir hale gelecektir. Almanya'dan başlayan bu kavramsal hareketin Türkiye'de de karşılık bulması önemlidir ve büyük bir fırsattır. Ülkemizde oluşturulan kamu veya özel Endüstri 4.0 platformları, bilinç oluşturulması ve bu teknoloji değişiminin bir kültür olarak yerleşmesi için önemli adımlardır. Bununla birlikte Endüstri 4.0 içine giren tüm teknolojik konularda Ar-Ge ve alt yapı desteklerinin artırılması ve sanayinin bu konuda sürekli teşvik edilmesi çok önemlidir. En az bunun kadar önemli olan; orta okul seviyelerinde geleceğin mühendis ve teknik elemanına bu kavramları öğretmek için atılması gereken eğitim adımlarıdır.

Özel sektör firmalarının da kendi alanlarına uygun bir Endüstri 4.0 hedef planı doğrultusunda gelecek yıllarını planlamaları, bu yatırımlara mutlaka bütçe ve kaynak ayırmaları gerekmektedir. Bu teknolojileri geliştiren ve kullanabilen ülke ve kuruluşlar rekabette önde olacaklardır.

Industry 4.0: A Revolution of Concepts and Perceptions

The new industrial revolution that we are diving into; named as “Industry 4.0” or “4th Industrial Revolution” is expected to redefine the production models of the future. Industry 4.0 will be structured by interactive coordination of smart systems, innovative technologies, advanced software and qualified human resources. How is this process going to reform the future of the industry? Where and how concepts like “Internet of Things,” “Cloud Computing,” “Cloud Manufacturing,” “Augmented Reality” will fit in? Questions like this are discussed in this paper along with suggestions on how the industry can prepare for the change in the near future. Initial steps on the information technology layer for implementation of Industry 4.0 projects will be discussed as a suggested road map based on real life field experiences.

Keywords: Industry 4.0, 4th Industrial Revolution, Cyber Physical Systems, Internet of Things

Kaynakça

1. McKinsey Global Institute, The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype, June 2015.
2. Jirkovský V., Obitko M. and Mařík V., Understanding Data Heterogeneity in the Context of Cyber-Physical Systems Integration, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, (April 2017) no. 2, pp. 660-667.
3. Milinković A., Milinković S., and Lazić L., Some experiences in building IoT platform, *22nd Telecommunications forum TELFOR*, 1138-1141, Serbia, Belgrade, Nov 25-27, 2014.
4. Scheuermann C., Verclas S and Bruegge B., Agile Factory - An Example of an Industry 4.0 Manufacturing Process, *2015 IEEE 3rd International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, 43-47, Hong Kong, 2015.
5. Gartner IT Glossary,
6. <https://www.gartner.com/it-glossary/digitalization/>
7. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H., Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment, *Manufacturing Letters*, Volume 1, Issue 1, (2013), 38-41.
8. Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J., *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*, Final Report, Acatech National Academy of Science and Engineering, April 2013.

9. MacDougall, W. *Industrie 4.0 Smart Manufacturing for the Future*, Germany Trade and Invest, July 2014
10. Murphy, M., *The Rise of The APIs*, Tech Crunch, Online Resource, May 21, 2016.
11. Grønbaek I., Architecture for the Internet of Things (IoT): API and Interconnect, *2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008)*, 802-807, Cap Esterel, 2008.
12. Bröring A. et al., *Enabling IoT Ecosystems through Platform Interoperability*, Focus: Software Engineering for the Internet of Things, Published by the IEEE Computer Society, Jan-Feb 2017.
13. Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O., Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon, *International Federation of Automatic Control, IFAC-PapersOnLine*, 49-25, 008–012, 2016.
14. Saldivar A. A. F., Li Y., Chen W. n., Zhan Z. h., Zhang J. and Chen L. Y., Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective, *2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 1-6, Glasgow, 2015.
15. Ray P.P., A survey of IoT cloud platforms, *Future Computing and Informatics Journal*, Volume 1, , (2016) Issues 1–2, Pages 35-46.
16. D Amy J.C. Trappey, Charles V. Trappey, Usharani Hareesh Govindarajan, Allen C. Chuang, John J. Sun, A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0, *Advanced Engineering Informatics*, (2017), Volume 33, 208-229.
17. Xun Xu, From cloud computing to cloud manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 28, (2012) Issue 1, 75-86.