

Araştırma Makalesi / Research Article

Elektro Kıvılcım Biriktirme Yöntemi ile WC'nin Paslanmaz Çelik Üzerine Kaplanması İçin
Bir Mekatronik Sistem Tasarımı

Barış GÖKÇE^{1*}, Hasan Esat ÇELİK²

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6141-7625>, barisgokce@hotmail.com

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5194-4779>, hasanesata6@gmail.com

Geliş/ Received: 14.07.2021;

Kabul / Accepted: 11.01.2022

ÖZET: Günümüzde Elektro Kıvılcım Biriktirme (EKB) sistemleri ile yapılan uygulamaların otomotiv, kimya, uzay, tıp, gıda ve askeri alanlardaki kullanımı giderek artmaktadır. Bununla birlikte EKB ile kaplama işlemleri manuel olarak yapılmakta ve bunun için el kuvveti ve becerisi kullanılmaktadır. Bu sebeple, kaplama sistemlerinin otomatik olarak yapılabilmesi için kontrol teknolojisi ekipmanları ile donatılması ve çeşitli yardımcı sistemlerle birlikte kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, Elektro Kıvılcım Biriktirme yöntemi kullanılarak paslanmaz çelik üzerine otomatik kaplama yapmak için çok eksenli bir Mekatronik sistem tasarımı uygulanmıştır. Ayrıca bu sistem için iki farklı yardımcı tasarım belirlenerek üretilmiştir. Bunlar; Z ekseninde yay geri beslemeli kaplama sistemi ve ağırlık dengesi kontrollü kuvvet ölçüm geri besleme sistemleridir. Geliştirilen sistemde AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine volfram karbür (WC) kaplaması gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çeliğin kaplanması sırasında bilgisayar kontrollü olarak 100 µF, 80V ve 80 Hz olarak belirlenen parametrede, P:50, I:1.2, D:0,6 PID değerlerinde üç farklı kaplama deseninde otomatik kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda ağırlık-denge analizleri ile mikro ve makro yapı analizleri yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda paslanmaz çelik yüzeyinde istenilen 100 gram ağırlık kuvvet hassasiyetinde kaplamanın otomatik olarak yapıldığı gözlemlenmiştir. Manuel kaplamaya göre sürekli zamanda daha fazla kaplama işleminin otomatik olarak yapıldığı ve birim zamanda daha fazla verim sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektro Kıvılcım Biriktirme, Kaplama, Paslanmaz Çelik, Volfram Karbür (WC).

*Sorumlu yazar / Corresponding author: barisgokce@hotmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Gökçe, B., Çelik, H. E. (2022). Elektro Kıvılcım Biriktirme Yöntemi ile WC'nin Paslanmaz Çelik Üzerine Kaplanması İçin Bir Mekatronik Sistem Tasarımı. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 3(1), 20-32.

A Mechatronic System Design for The Coating of WC on Stainless Steel Using Electro Spark Deposition Method

ABSTRACT: Today, Electro Spark Deposition (ESD) systems are increasingly used in automotive, textile, chemistry, space, medicine, food and military fields. However, ESD coating processes are performed manually by hand force. For this reason, it is necessary to equip the coating systems with control technology equipment and to be used with various auxiliary systems in order to make the coating systems automatically. In this study, a multi-axis mechatronic system design has been applied in order to make automatic coating on stainless steel by using Electro Spark Deposition method. In addition, two different auxiliary designs were determined and produced for this system. These; Spring loaded coating system and weight balance-controlled force measurement feedback systems in the Z axis. In the developed system, WC coating was applied to the surface of AISI 304 stainless steel. During the coating of stainless steel, computer controlled automatic coating process was carried out in three different coating patterns at P: 50, I:1.2, D: 0.6 PID values at the parameter determined as 100 μ F, 80V and 80 Hz. At the end of the study, weight-balance analysis, micro and macro structure analysis were made. As a result of the studies, it has been observed that the stainless-steel surfaces are successfully coated with the desired 100-gram weight strength sensitivity. It is concluded that more coating processes are performed automatically in continuous time compared to manual coating and more efficiency is obtained per unit time.

Keywords: Electro Spark Deposition, Coating, Stainless Steel, Wolfram Carbide (WC).

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin her alanında geniş bir şekilde kullanılan çelik ve türevlerinin korozyon ve aşınma gibi temel sorunlara karşı korunması her zaman üzerinde çalışılan bir konu olmuştur. Bunun dışında çelik veya benzer metallere kullanıldığı yere göre temel mekanik özelliklerini iyileştirmek ve bununla birlikte başka özellikler de kazandırmak için çelik ve diğer metaller üzerine ESD yoluyla kaplamalar yıllardır yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir (Korkmaz, 2008; Felix, 2018). Elektro Kıvılcım yöntemi ile ilgili çalışmaların önemli bir kısmı Rusya'da gerçekleştirilmiştir. Rusya kaynaklı akademik çalışmaların birçoğunda ESD kaplama yönteminin aşınan makine parçaları (türbin bıçakları, torna takımları, miller, kalıplar, matkap uçları gibi) üzerinde uygulandığı ve söz konusu parçaların tamir, servis ve ticari kullanım ömürlerinin artırılması konusunda başarılı ve yaygın bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Coşkun, 2019). Demir esaslı malzeme yüzeylerinin nikel veya bakır elektrot ile malzeme yüzeyi kaplandığında sertliğinin arttığı tespit edilmiştir (Johnson ve Sheldon, 1986). Kıvılcım atlama sırasındaki malzeme transfer yönteminin birçok özelliği tanımlanmış ve bununla birlikte plaka kalınlıklarına göre enerji transfer üzerine çalışmalar yapılmıştır (Perju ve ark., 2014). 1943 yılında EKB yöntemi ile metalik araç yüzeyleri kaplanarak ilk çalışmaları gerçekleştirilmiş ve böylece EKB yöntemini geliştirmeye başlamıştır (Korkmaz, 2008). Daha sonra bu yöntem karbon ve metalik alaşımlarda ve toz metalürjisinde kullanılarak geliştirilmiştir (Młynarczyk ve ark., 2018; Vizureanu ve ark., 2018; Topalã ve ark., 2010)

Zamanla yıpranmaya maruz kalan makine elamanlarının yüzeylerinin iyileştirilmesi ve bu sayede makine elamanlarının çalışma ömürlerinin uzatılması araştırmaları yapılmıştır. Bu yöntem aşınmaya maruz kalan birçok parçanın ömrünü arttırmak için kullanılan bir yöntem haline gelmiş ve EKB en önemli yöntemlerden biri olmuştur (Johnson ve Sheldon, 1986). Bu kaplama türünün karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler ve alaşımlı çelikler gibi farklı çeliklere uygulandığı çalışmalar bulunmaktadır (Jiao, 2016; Jiao ve ark., 2018; Felix, 2018; Syed, 2010). EKB yöntemi genel olarak

bilinmesine ve kullanılmasına rağmen diğer batılı ülkelerde önemi daha sonra anlaşılmıştır. ABD’de 1974’te Johnson, nükleer reaktör uygulamalarının desteklenmesiyle başarılı EKB deneyleri gerçekleştirmiştir. Ancak bu kaplamaların tamamen kabul edilebilir hale gelmeden önce daha fazla gelişmeye ihtiyaç duyduğunu belirtmiştir (Johnson ve Sheldon, 1986). Farklı amaçlar için EKB ile kaplanmış sert faz çeliklerinin lazer ile işlenmesi ve karakterizasyon ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Bozkurt, 2019). Otomatik kontrol ve EKB sisteminin birlikte kullanılması ile kaplama sisteminin sistem veriminin dört kata kadar arttığı tespit edilmiştir (Korkmaz, 2008; Liu ve ark., 2005). Ancak elektrot kalınlıkları, alt malzeme, elektro malzemesi ve parametreler bu verimliliği de farklı olarak etkilemektedir. Bu yüzden her otomatik kontrol sürecinin ayrı olarak düşünülmesi gerekmektedir (Syed, 2010). Bununla birlikte kaplama parametrelerinin kaplama üzerinde etkisi özellikle kütle transferine etkisi oldukça önemlidir (Tang, 2009; Lešnjak ve Tušek 2002, Galinov ve Luban 1996). Bu parametreler dikkate alınarak farklı simülasyon çalışmalarının da yapıldığı literatür çalışmaları bulunmaktadır (Huang ve ark., 2016).

EKB kaplama yönteminde insan eli ile kaplama çok yoğun olarak kullanılmaktadır. Buda işçilik maliyetini arttırmakta ve bazen kalitede sürdürülebilirliği sağlayamamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada özellikle insan odaklı olan bu kaplama yöntemine alternatif olarak otomatik kaplama için farklı bir kontrol yaklaşımı önerilmiştir. Literatürdeki önceki çalışmalarda farklı tipte yük geri beslemeli çalışmalar varken bu çalışmada yay geri beslemeleri ve yük kontrollü bir yaklaşım geliştirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada EKB yöntemi ile malzeme üzerine otomatik kaplama yapabilmek için çok eksenli bir otomatik sistem geliştirmesi yapılmıştır. Bu sistemin geliştirilmesi için temel materyaller ve yöntemler şunlardır;

1. Üç eksen CNC tip bir kartezyen robot sistemi mekanik ekipmanlar,
2. X ve Y eksenleri için NEMA34 adım (step) motor ve sürücüleri,
3. Z Eksen için enkoder geri beslemeli redüktörlü DC motor,
4. HUYS Üniversal ESD kaplama güç kaynağı,
5. Dört adet yük hücresi,
6. STM32 Mikro denetleyici,
7. UART Haberleşme arabirim kartı,
8. X ve Y Eksenleri için MACH3 kontrol kartı ve yazılımı,
9. Sistem tanımlama araç kutusu,
10. Kapalı çevrim PID kontrol algoritması,
11. 3 mm çapında volfram karbür (WC) elektrot,
12. AISI 304 paslanmaz sac.

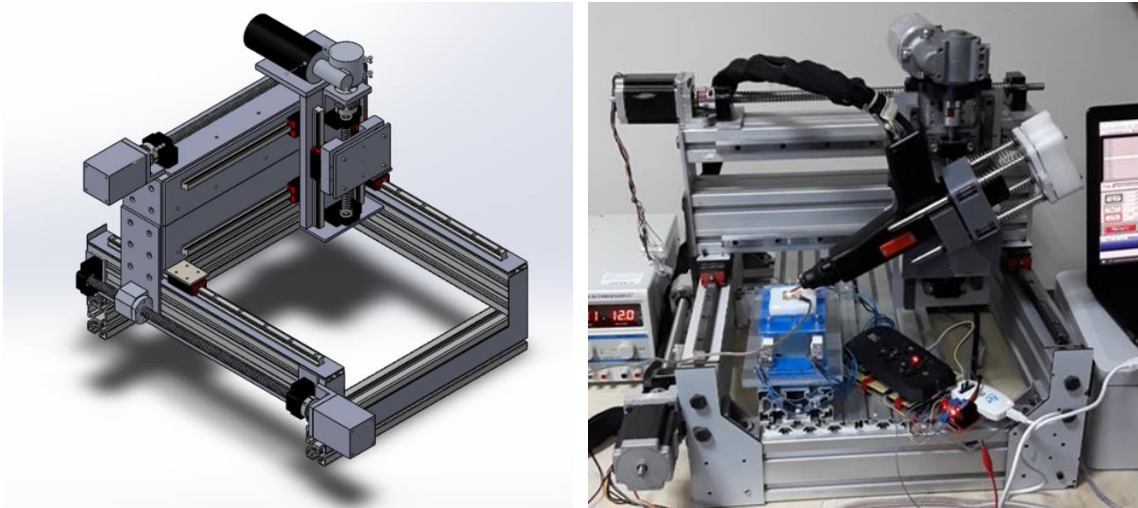
Burada özellikle WC, içerisinde %5-20 oranında kobalt bulunan, çelik üzerine uygulanabilen ve piyasada oldukça kolay bulunabilen bir karbür malzemedir. Paslanmaz çelikler ise özellikle tahıl aktarma ve taşıma sektöründe kullanılan çeliklerdir ve çok hızlı aşınmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada elektrot olarak WC ve altlık malzeme olarak paslanmaz çelik seçilmiştir. Temel robot türlerinin ve kontrol kinematiğinin bilinmesi doğru robot kontrolü için gereklidir. Endüstride farklı tür robotlar ile farklı uygulamalar bulunmaktadır (Bingül ve Küçük, 2020; Shah, 2016; Karaca, 2020).

Bu çalışmada ana ve yan taşıyıcılar için 45×90 sigma profil ve 90×90 sigma profil, üç adet tahrik mili, üç adet vidalı mil somunu ve somun gövdesi, üç adet kaplin ve altı adet vidalı uç mil yatakları kullanılmıştır. X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda hareket etmesi için dört adet doğrusal kızak rayı ve altı adet kızak kullanılmıştır. Kaplama baskı kuvveti ölçme ve yaylı kuvvet dengeleme sistem tasarımı, çok eksenli otomatik sisteme entegre edilmiştir. Tasarlanan sistemin kinematik analizleri yapılmış ve sistemde gönderilen giriş sinyali karşılığında ağırlık sensörlerinden gelen ağırlık verileri ile sistem modeli tanımlanmıştır. Sistem bu modeller doğrultusunda 100 gramlık ağırlık-kuvvet düzeyinde DC motor ve ağırlık sensörü arasında kaplanan yüzey dengelenmiştir. Ağırlık dengesi sağlanan sistem belirlenen kaplama parametresinde kaplama işlemi yapılarak sistem tamamlanmıştır. Şekil 1’de çalışma kapsamında geliştirilen sistemin genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. Geliştirilen sistemin genel görüntüsü

Bu sistem için yaylı dengeleme sistemi, ağırlık ölçme sistemi, veri toplama ve kontrol devresi tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede AISI 304 paslanmaz çelik yüzeylerinde istenilen kuvvet dengesinde kaplama işlemi yapabilen çok eksenli bir yardımcı sistem geliştirilmiştir. Şekil 2’de bu sistemin üç boyutlu tasarımı ve tasarıma uygun üretimin tamamlanmış hali verilmiştir.



Şekil 2. Geliştirilen sistemin üç boyutlu tasarımı ve üretimi

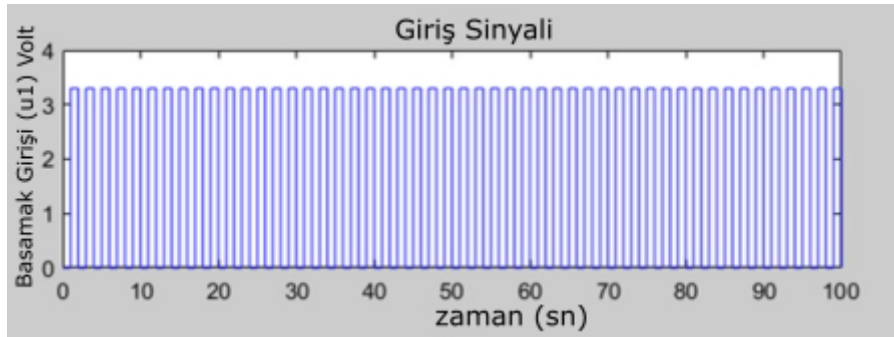
Sistemde kullanılan yaylı dengeleme sistemi kaplama tabancası için tasarlanmıştır. Zeminde oluşabilecek kaplama hataları en aza indirilmiştir. Ayrıca uç işlevcinin zeminle paralellliğini bozmayacak şekilde kaplama yapması sağlanmıştır. Bu sayede kaplama tabancası bulunduğu yerdeki duruş pozisyonun koruyarak istenilen kaplanan yüzeyi noktasında kuvvet dengesi oluşturulmuştur.

Bu yaylı sistemin farklı yüzeylerde de kullanılarak dengeleme özelliği yapabileceği keşfedilmiştir. Ayrıca bu sistem geliştirmeye açık olup farklı uygulamalarda kullanılabilir niteliktedir.

2.1 Tasarım için Kullanılan Gerçek Zamanlı Veriler

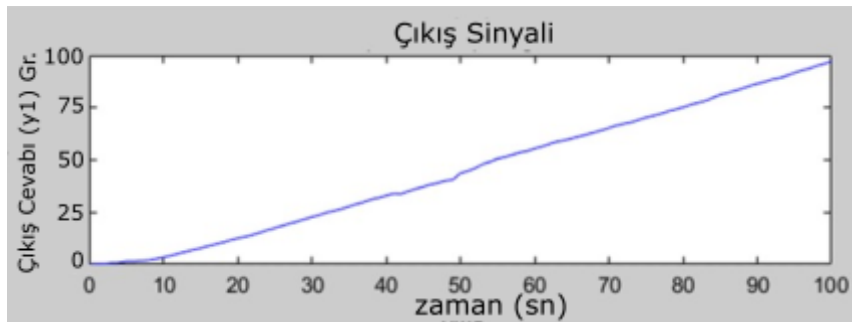
Sistem modeli tasarlamak için bazı verilerin olması gerekmektedir. Bunlar bu tasarlanan sistem için mikroişlemciden DC motora gelen sinyal verisi ve ağırlık sensörlerinin zamanla ölçülen verilerdir. Sistem belli bir süre çalıştırılmış ve verileri kayıt altına alınmıştır. Bu veriler sistem çalışırken çeşitli yazılım ve ara yüzlerden işlenerek belirlenmiştir. Bu veriler sistem tasarımı için Giriş (input) ve Kuvvet olarak belirlenmiştir.

Sinyallerin zamanla değişen kuvvet değeri gözlenmiştir. Sisteme uygulanan kuvvete karşılık gelen sinyal (3.3V) ve geçen zamana göre değişimi Şekil 3'te gösterilmektedir. Burada görüldüğü gibi başlangıç sinyali mikroişlemciden gelen giriş sinyal olarak değerlendirilmiştir. Sistem gerçek zamanlı verilere göre ölçülmüş ve sistem giriş sinyali veriye göre yapılandırılmıştır.



Şekil 3. Sistem basamak giriş sinyali (Volt)

Şekil 4'te giriş sinyaline göre zamanla değişen kuvvet değerlerine karşılık gösterilmiştir. Şekil 3'te u1 giriş sinyali (darbeli 3.3V) ve Şekil 4'te ise y1 çıkış (kuvvet) verisi gösterilmektedir. Burada çıkış cevabı olarak maksimum 100 gr referans alınmıştır.



Şekil 4. Sistem çıkış cevabının zamanla değişimi gösterilmiştir

Giriş ve çıkış verileri simülasyon yazılım ortamında sistem tanımlama araç kurusu kullanılarak bir transfer fonksiyon modeli seçilmiş ve sistemin pay (zeros) ve paydaları (poles) kutuplar ve sıfırlar olarak belirlenmiştir. Burada pay birinci (1.) dereceden payda ise ikinci (2.) dereceden olarak belirlenmiştir. Kutup-(sıfır) sayısı belirlendikten sonra transfer fonksiyonu tahmin etme işlemi yapılmıştır.

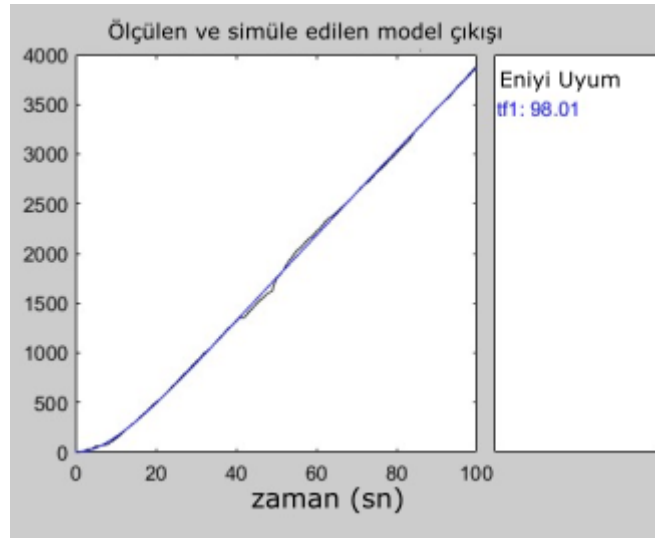
Çizelge 1'de yapılan tahminleme işlemi sonuçları görülmektedir. Bu tahmin sonuçları için çalışma alanında bulunan giriş ve çıkış sinyallerine karşılıklı örnekleyerek kıyaslamaktadır.

Kıyaslamadan transfer fonksiyon modeli oluşturmak için kutuplar (poles) ve sıfır (zero) değerleri girilmiş ve sonucunda Çizelge 1’de gösterilen tahmini sonuç oranı %98.01 olarak elde edilmiştir. Tahmin sonucunda transfer fonksiyon modeli verisi gerçek zamanlı veriye benzerlik-uyum oranının yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Transfer fonksiyon tahmin verisi

Birinci Dereceden İyileştirme Normu					
İterasyon	Maliyet	Adım	Optimallik	Beklenen	Gerçekleşen
0	569.152	-	9.18E+03	7.16E-05	-
1	568.909	0.848	1.74E+03	7.16E-05	0.0426
2	568.907	0.0267	34.6	4.87E-07	0.000293

Şekil 5’de verilerin uyumluluk sonuçları karşılaştırıldığı sonuç grafiği gösterilmektedir. Burada ölçülen ve simüle edilen veri arasındaki uyum %98,01 olduğu görülmektedir. Böylece elde edilen transfer fonksiyonu gerçek sistem üzerinde uygulanabilmektedir.



Şekil 5. Transfer fonksiyon sonucunun ölçülen veriyle kıyaslanması

Sistem mimarisi belirlendikten sonra veriler sistem tasarım modelinde (Şekil 6) işlenir ve transfer fonksiyonu çıkartılır. Şekil 7’de çıkarılan bu transfer fonksiyonu (tf1) gösterilmektedir. Burada “tf1” kontrol sisteminde transfer fonksiyonu temsil etmektedir. Kontrol sistemi, kapalı çevrim olarak oluşturulmuştur.



Şekil 6. Veriler ile tasarlanan sistemin model gösterimi

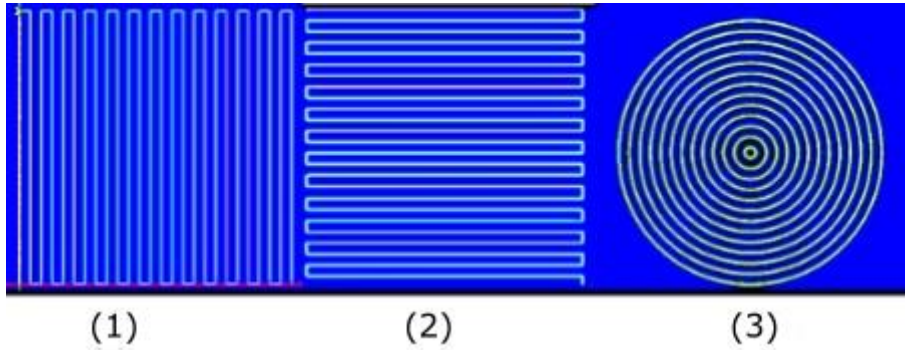
Simülasyon süreçlerinde kapalı kutu sistemi olarak belirlenen sistem tanımlama araç kutusunda “u1” giriş sinyali olarak girilmiş ve “y1” çıkış sinyali alınmıştır. Bu sinyaller sayesinde sistem tanımlama araç kutusunda kestirim yoluyla transfer fonksiyon verisi oluşturulmuştur. Burada

oluşturulan veriler kontrol sistem tasarımı tarafından transfer fonksiyon tespiti için kullanılmıştır. Tasarlanan sistemin transfer fonksiyonu eşitlik 1’de verilmiştir.

$$\frac{0.29938s + 2.73304002}{s^2 + 0.100878s + 0.00009475362} \quad (1)$$

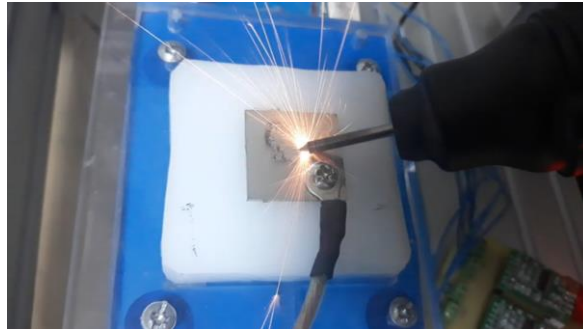
2.2 Kaplama Çalışması

Sistemde kaplanan her bir metal 30×30×1 mm boyutlarında ve 10×10 mm alanda AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyindeki biriken maddenin yüzey kalitesini, kaplanan madde özelliklerini incelemek için üç farklı kaplama deseninde, kapasitans 100 µF, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz. olarak belirlenen parametrede, PID değerleri P:50, I:2, D:0,6 olarak belirlenmiştir. Kaplamada zemine uygulanan 100 gramlık ağırlık denge kontrolü ve PID değerleri STM32F103 mikrodenetleyici ile kontrol edilmiştir. Kaplama sisteminin yüzey kaplama desenleri X ve Y eksenindeki hareketi ile Mach3 arayüzü ile kontrol edilmiştir. Kaplama desenleri sırasıyla Şekil 7’de gösterilmektedir. Kaplama desenleri, 10×10 mm alanda kaplama yapacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 7(1)’deki kaplama deseni No:1 olarak belirlenmiştir, (2)’deki kaplama deseni No:2 ve (3)’deki kaplama deseni ise No:3 olarak belirlenmiştir. Bu desenler kullanılarak kaplama işlemini gerçekleştirmek amacıyla X ve Y eksenleri için Mach3 ara yüzü için hazır işlem kodları oluşturulmuştur. Kuvvet dengeleyen yaylı sistemin ve kaplama işleminin gerçekleştiren kaplama tabancasının açısı 60° olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Kaplama desenleri sırasıyla No:1, No:2 ve No:3 kaplama deseni

Kaplama işlemi geliştirilen üç eksenli sistem aracılığıyla otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de belirlenen parametreler ile yapılan kaplama işlemi sırasında alınmış bir görsel verilmiştir.



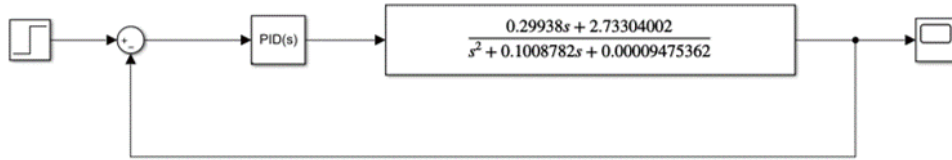
Şekil 8. Belirlenen parametreler ile yapılan otomatik kaplama işlemi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada EKB yöntemi ile paslanmaz çelik üzerine WC'ü 100 gram dengede otomatik kaplama için bir Mekatronik sistemi geliştirilmiştir. Çok eksenli kuvvet geri beslemeli bir sistem tasarlanmış ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarım için birçok farklı model konseptleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Farklı birçok sistemin araştırılmasıyla çalışmanın kapsamına uygun hareket ve kontrol modelleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tasarımlar ve geliştirmeler, Z eksenli yaylı kaplama sistemi, ağırlık sensörü kontrolü için ağırlık ölçüm sistemi, aksel tahrik sistemleri, veri toplama ve işleme sistemleri ve STM32F103 mikro denetleyici sistemidir. Üç eksenli sistemin Z ekseninde bulunan uç işlevcisine Kanada Huys endüstrisinden elde edilen EKB kaplama cihazı el uygulayıcısı entegre edilmiştir. Geliştirilen bu sistemle otomatik olarak paslanmaz çelik yüzeylere WC malzemesi kaplanmıştır.

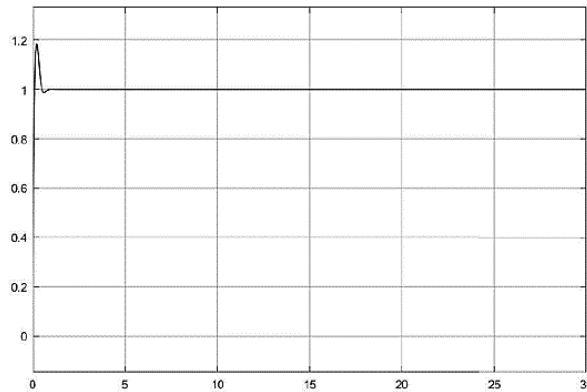
3.1. Sistem için PID Katsayılarının Belirlenmesi

Tasarlanan sistemde kaplama işleminin kaplanan malzeme üzerindeki 100 gram ağırlıkta dengelemesi amacıyla sistemin çalışma durumuna göre PID değerleri belirlenmiştir. Şekil 9'da tasarlanan sistem için belirlenen PID değerleri P için 50, I için 1.2 ve D için ise 0.6 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. 100 gram ağırlıkta sistemin dengelenmesi için oluşturulan sistem modeli

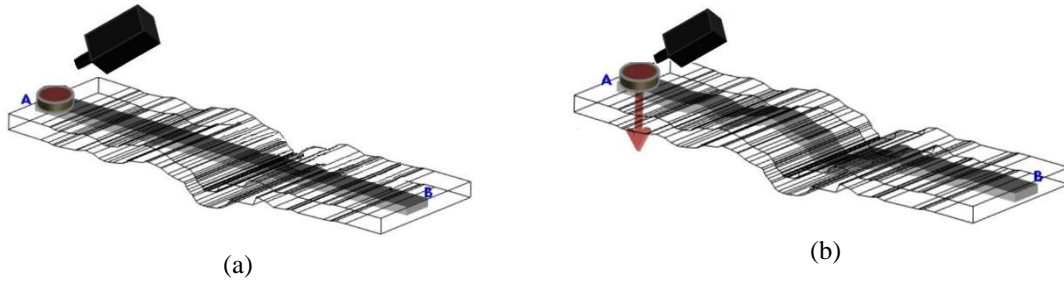
Buna göre sistemde kullanılan PID değerleri sistemin çalışması için optimum değerler P değeri 50 olarak belirlenmiştir. I değeri 1.2 ve D değeri ise 0.6 olarak belirlenmiştir. Filtre katsayısı varsayılan değer olan $N = 100$ alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda tasarlanan sistemin PID değerinin sistem üzerindeki etkisi şekil 10'da görülmektedir. Grafikte sistemin PID sonrası adım yanıtını (step response) incelendiğinde ani bir taşma ile çok kısa sürede oturduğu görülmektedir. Bu yöntem ideal PID katsayılarının bulunmasında yardımcı olmuştur. Biçimsel olarak bir sistemin kararlılığı ve optimum duruma ulaşma yeteneği hakkında bilgi vermiştir. Veriler doğrultusunda kullanılarak sistem kontrolü yapılmıştır. Sonuçta sistem yazılımında kullanılan PID değerler $P=50$, $I=1.2$ ve $D=0.6$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 10. Tasarlanan sistemin adım cevabı (Step response)

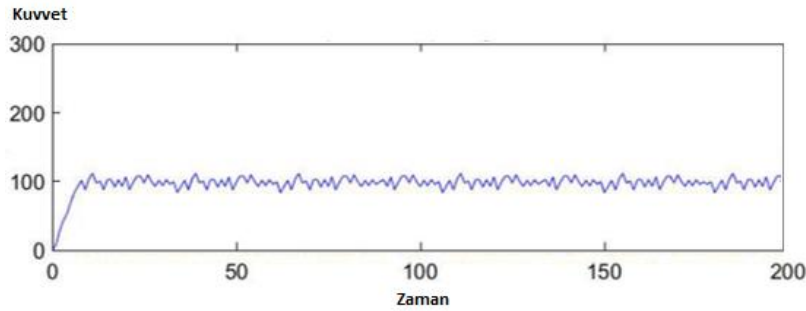
3.2 Kuvvet Algılaması ve PID Kontrollü Sonrasındaki Sistem Davranışları

EKB elektrotunun aralıklı ve lokal temasını sağlamak için bazı küçük kuvvetler gerekmektedir. X ve Y eksenlerinin hareketi için G-kodu verileri ile $30 \times 30 \times 1$ mm AISI 304 paslanmaz çelik zemin üzerinde kaplama yapmak için A ve B noktaları arasındaki doğrusal mesafede hareket sağlanmıştır. Uygulanan aşırı kuvvet elektrotun kısa devre yapmasına ve ark sürecinin kesilmesine, az kuvvet ise kaplamanın istenilen özellikleri karşılamamasına sebep olmaktadır. Şekil 11 (a)'da sistemin kuvvet geri beslemeli ve PID kontrollü olmadan çalışma simülasyonu gösterilmiştir. Şekil 11 (b)'de ise kaplama zemin yüzeyine bakmaksızın belirlenen bir hat üzerinde kuvvet dengesi olmadan kaplama işlemini gerçekleştirmiştir. Bu kaplamanın bazı yerlerinde istenilen özellikte kaplama olmamasına neden olmaktadır. Bu nedenle zemine uygulanan kuvvetin algılanması ve bu yüke göre sistemin kontrol edilmesini gerekli hale gelmiştir.



Şekil 11. Sistemin Kuvvet geri beslemesiz (a) ve kuvvet geri beslemeli (b) ve PID kontrollü çalışma sistemi

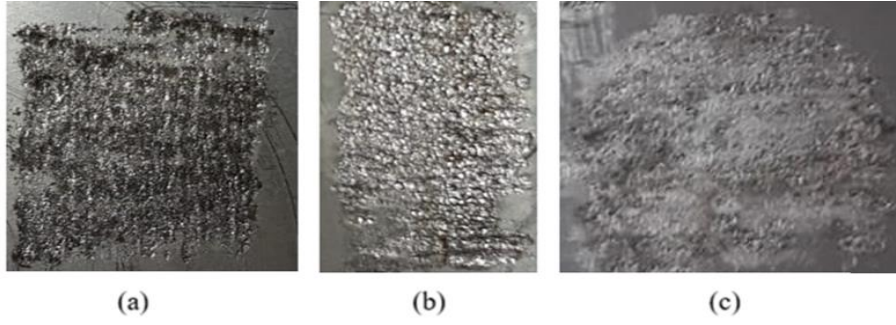
Şekil 12'de sistemin kararlılığı incelenmiş ve referans değerleri olan 100 gram kuvvet ile istenilen değerde kaplanan paslanmaz çelik yüzeyinde dengelemiştir. Buradaki dengede sensörlerden okunan gram değeri, yardımcı yaylı dengeleme sistemi ve belirlenen PID değerlerinde 100 gramda dengelenmesi sağlanmıştır. İstenilen referans değerinde kuvvet uygulaması için beklendikten sonra kaplama sistemi çalıştırılmıştır. Yani sistem dengesi 0 gramdan 100 grama geldikten sonra kaplama işlemi başlatılmaktadır. PID ve yaylı sistem sayesinde yüzeyde kaplama işlemi gerçekleştirilirken tüm kaplanan yüzeylere ortalama olarak eşit miktarda ve belirlenen sabit yük değerinde kaplama işleminin gerçekleştirildiği görülmektedir.



Şekil 12. PID sonrası 100 gr'da kaplamanın zemine uyguladığı kuvvetin zamanla değişimi

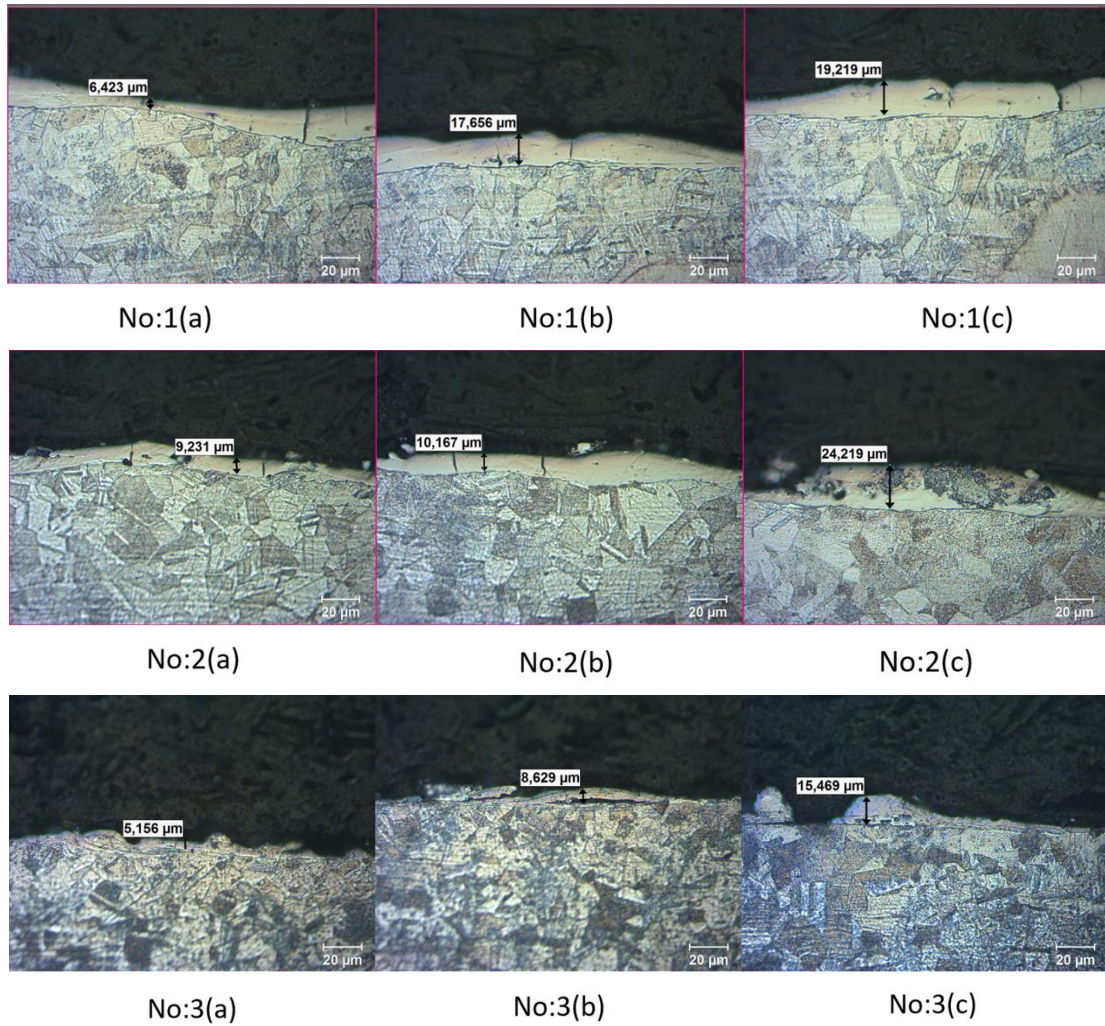
3.3. Kaplama Kalınlık Analizi

Lazer kesme yöntemi ile $30 \times 30 \times 1$ mm ebatlarında kesilmiş olan AISI 304 numune kuponlar üzerine yaklaşık 10×10 mm alana volfram karbür (WC) kaplanmıştır. Otomatik olarak yüzeye uygulanan 100 gramlık kuvvet dengesinde, üç farklı kaplama deseni ve kapasitans $100 \mu\text{F}$, voltaj 80 V ve frekans 80 Hz olarak belirlenmiştir. Şekil 13(a), kaplama deseni (Şekil 7) no:1, (b)'de desen No:2, (c)'deki ise No:3'e göre makro kaplama görüntüleri verilmiştir.



Şekil 13. Kaplamaların makro görüntüleri

Kesilen numunelerin mikro yapısı incelenmeden önce dağlama yapılmıştır. Dağlama işlemi %65'lik nitrik asit ile %35'lik klorik asitli ortamda 15 saniye sürede yapılmıştır. 500x büyütmede ölçülen, WC kaplanan numunelerin mikro yapı kalınlık kıyası, Çizelge 3'teki verilere göre ortalaması alınarak kıyaslanmıştır. WC ile kaplanan AISI 304 paslanmaz çelik numuneler daha sonra kesilerek mikro yapısı incelenmiştir. Kaplanan numunelerin kaplama analizlerinde 500x büyütmede ölçülen mikro yapı kalınlıkları Şekil 14 No:1(a)(b)(c) 1 numaralı kaplama desenine ait 3 farklı bölgeden alınan resimlerdir, No:2(a)(b)(c) 2 numaralı kaplama desenine ait 3 farklı bölgeden alınan resimlerdir ve No:3(a)(b)(c) ise 3 numaralı kaplama desenine ait 3 farklı bölgeden alınan resimlerdir.



Şekil 14. No:1, No:2 ve No:3, sırası ile 1, 2 ve 3 nolu desenlere ile kaplama numunenin mikro yapı görüntüsü

Şekil 14’te verilen mikro yapı özellikleri ve tüm kaplama kalınlıkları karşılaştırılması çizelge 2’de gösterilmiştir. Hem grafikte hem de tabloya bakıldığında No:1 ve No:2 ile belirtilen örüntülerin otomatik kaplama sistemi ile daha fazla kalınlık performansı sergilediği görülmektedir. Mikro yapı görüntülerinde de anlaşıldığı gibi No:3 ile belirtilen örüntünün kaplamanın kalınlık ve altlık malzeme ile birleşme konusunda zayıf kaldığı görülmektedir.

Çizelge 2. Desen numarasına göre mikro yapı özellikleri

Numune Kaplama Deseni	Kaplama Kalınlığı a (µm)	Kaplama Kalınlığı b (µm)	Kaplama Kalınlığı c (µm)	Kaplama Kalınlığı Ortalama (µm)	Kaplanan Malzeme	Kaplama Elektrodu
No:1	6.423	17.656	19.219	14.4326	AISI 304	WC
No:2	9.231	10.167	24.219	14.539	AISI 304	WC
No:3	5.156	8.629	15.469	9.7513	AISI 304	WC

Literatüre bakıldığında son yıllarda Wang (2020) ve arkadaşlarının hazır bir dik işlem CNC üzerinde benzer bir çalışma yaptıkları görülmüştür. Wang (2020) ve arkadaşları altlık malzeme olarak 2A12 alüminyum malzeme kullanmışlar ve yük geri beslemeli bir sistem kullanmamışlardır. Alüminyum üzerinde CoCuFeNiCr elektrot kullanmışlardır. Burada elektro manyetik kuvvet ile titreşim hareketi verilerek baskı kuvveti uygulanmıştır. Yapılan bu çalışma literatür ile karşılaştırıldığında öncelikli olarak elektrot ve altlık malzeme farkları bulunmaktadır ki bunlar tamamen farklı karakteristikler sergilemektedir. Baskı kuvvetleri için kullanılan yöntemleri tamamen farklıdır ve bu çalışmada maliyet ve uygulama etkin bir yöntem tercih edilmiştir. Bu çalışmada ölçeklenebilir bir CNC yapısı tasarlanmış ve üretilmiştir, oysa literatürde hazır CNC sistemlere entegrasyon yapılmıştır buda yapılan işlemin laboratuvar ortamında kalmasını sağlamaktadır.

4. SONUÇ

Geliştirilen sistemde ağırlık ölçme sisteminde zeminde istenilen kuvvet dengesini oluşturmak amacıyla kontrol devresi yapılmıştır. Bu devre kaplama işlemi yapılırken AISI 304 paslanmaz çelik zeminde 100 gram kuvvetle kaplama işlemi yapılabilmesi için ağırlık faktörünü kontrol etmiştir. Ayrıca bu devre sayesinde sistemden gerçek zamanlı veriler toplanmış, sistem testleri yapılmıştır. Kaplama sisteminin çalışması için optimum PID değerleri tespit edilmiştir. Bunun sonucunda sistemin PID değerleri P:50, I:1.2, D:0,6 olarak belirlenmiştir. Bunun yanında kaplama kalınlığı için desenin son derece önemli olduğu görülmüştür. Bu parametreler doğrultusunda elde edilen sonuçlar şunlardır;

1. AISI 304 Paslanmaz çelik yüzeyde uygulanan kuvvet dengesi istenilen ağırlıkta belirlenebilmektedir.
2. Geliştirilen bu sistemde 100 gramlık ağırlık dengesinin daha verimli kaplama yaptığı gözlemlenmiştir.
3. 100 gramdan az kuvvet dengesinde yüzeydeki kaplama kalitesi bozulmaktadır.
4. 100 gramdan fazla kuvvet dengesi ise kaplamanın verimli bir şekilde oluşumuna engel olmaktadır.

Bu çalışmada gözlemlenen en önemli noktalardan biri ise yük ölçme sensörlerinin kaplama metalinin altında olmasıdır. Bu durum geniş ve ağır parçalar için sorun olabilme ihtimalini barındırmaktadır. Bu durumu minimize etmek için ağırlık ölçme sistemini zemine montajlamak yerine kaplama tabancasının üzerine monte etmek daha uygun olduğu düşünülmektedir. Bu sayede gerçek zamanlı veri sonuçları daha verimli kayıt altına alınarak sistemin kontrolcü tasarımı ve PID değerleri optimum değere ulaşabilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Verdiği desteklerden dolayı Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim dalına ve HUYS Industries (Kanada) firmasında teşekkürlerimizi sunarız.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Barış GÖKÇE ve Hasan Esat ÇELİK çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesine katkı sağlamışlardır ve Barış GÖKÇE son onay ve tam sorumluluk kısmında da katkıda bulunmuştur.

8. KAYNAKLAR

- Bingül Z., Küçük S., Robot Kinematiği, Umuttepe Yayınları, 4. Baskı, Kocaeli, 2017.
- Bozkurt A., ESD ile Sert Faz Kaplanmış Titanyum Alaşımlarının ve Çeliklerin Lazer ile İşlenmesi ve Karakterizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2019.
- Coşkun A., Elektro kıvılcım yöntemi ile yapılan balistik amaçlı kaplamaların test edilmesi ve karakterizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2019.
- Felix L.M., The effect of Electro Spark Deposition on the microstructure and mechanical properties of IN718, University of Waterloo, Master Thesis, 2018.
- Galinov I.V., Luban R.B., Mass transfer trends during electro spark alloying. Surface and Coatings Technology 79(1-3), 9-18, 1996.
- Huang H., Liu C., Guo S., Simulation Study of Electro Spark Deposition on Die Steel. 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering, Wuhan, China, October 15-16, 2016, pp: 728-731.
- Jiao Z., Peterkin S., Felix L., Liang R., Oliveira J. P., Schell N., Zhou Y., Surface Modification of 304 Stainless Steel by Electro-Spark Deposition. Journal of Materials Engineering and Performance 27(9), 4799-4809, 2018.
- Jiao Z., Surface Modification of Stainless Steel by Electro-Spark Deposition, University of Waterloo, Master Thesis, 2016.

- Johnson R.N., Sheldon, G.L., Advances in the electrospark deposition coating process. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 4(6), 2740-2746, 1986.
- Karaca M.M., Endüstriyel Amaçlı Küresel Robot Kolu ve Tutucunun Tasarımı ve Kontrolü. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya 2020.
- Korkmaz K., Elektrosпарк Biriktirme Yöntemiyle Mikro Alaşımli Çeliklerin Volfram Karbür ile Kaplanması. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri, Doktora Tezi (Basılı), 2008.
- Lešnjak A., Tušek J., Processes and properties of deposits in electrospark deposition. *Science and Technology of Welding and Joining* 7(6), 391-396, 2002.
- Liu J., Wang R., Qian Y., The formation of a single-pulse electrospark deposition spot. *Surface and Coatings Technology* 200(7), 2433-2437, 2005.
- Młynarczyk P., Spadło S., Bartos' J., Selected properties of electro-spark deposition on carbon steel using the Alloy 400 electrodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 461, 012055, 2018.
- Perju M. C., Vizureanu P., Nejneru C., The study of energy transfer on thin layers achieved by electro-spark deposition with TiC electrode, *Proceedings of the Scientific Conference AFASES; Vol. 1*, p79, 2014.
- Syed M., Automation of Electrospark Deposition of TiCp/Ni on RSW Copper Electrodes, University of Waterloo, Master Thesis, 2010.
- Topală P., Slătineanu L., Dodun O., Coteață M., Pinzaru N., Electrospark deposition by using powder materials. *Materials and Manufacturing Processes* 25(9), 932-938, 2010.
- Vizureanu P., Perju M. C., Achiței D. C., Nejneru C., Advanced Electro-Spark Deposition Process on Metallic Alloys. *Advanced Surface Engineering Research, Section II*, InTechOpen Open Access Publishing, 2018.
- Shah B. C., Nagal D. D., Sharma D. S., Coordinate Systems for Industrial Robots. *International Journal for Technological Research in Engineering* 2347-4718, 2016.
- Wang X. R., Wang Z. Q., Lin T. S., He P., Wang R. J., Bao M. Y., Preparation of complex surface coatings based on electrospark computer integrated deposition system. *Assembly Automation* 40(2), 165-173, 2020.