

DÖNER TÜP TAKIM KULLANARAK ELEKTROKİMYASAL DELME YÖNTEMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ

H. Bekir ÖZERKAN* Can ÇOĞUN**

* Atatürk Meslek Yüksek Okulu, Gazi Üniversitesi, Ankara

** Mekatronik Müh. Böl., Çankaya Üniversitesi, Ankara

ozerkank@gazi.edu.tr, cogun@cankaya.edu.tr

(Geliş/Received: 25.06.2013; Kabul/Accepted: 14.11.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, alıılmamış imal usullerinden elektrokimyasal işleme yöntemi esaslı yeni bir hibrit elektrokimyasal delik delme (EKD) yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde takımın dönme hareketi yanında içinden elektrolit püskürtmesi de uygulanmaktadır. Yöntemin denemelerinin gerçekleştirilebilmesi için küçük boyutlarda bir prototip EKD tezgâhı tasarlanmış ve üretilmiştir. Yeni sistemin önemli özelliklerinden biri işlemede takım ilerleme hızının akım geri besleme kontrolü ile ayarlanmasıdır. Prototip tezgâhta, talaşlı imal usulleriyle gerinme pekleşmesinden dolayı işlenmesi çok güç olan Hadfield (mangan) çeliği ve işlenebilirliği iyi olan AISI 1040 çeliği aynı işleme koşullarında delinmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki çelikle yapılan deneylerde işleme geriliminin, takım dönüş hızının, elektrolit konsantrasyonunun ve püskürtme basıncının artışıyla işparçası işleme hızı değerleri artmıştır. Ortalama yanal açıklık değerleri takım dönüş hızının artışı ile artmıştır. AISI 1040 çeliğine açılan deliklerin Hadfield çeliğine göre daha düzgün olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar önerilen yeni hibrit EKD yöntemi ile işlenmesi güç malzemelere derin ve küçük çaplı deliklerin kolaylıkla açılacağını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrokimyasal delme, akım geri besleme kontrolü, döner takım, takım içinden püskürtme, Hadfield çeliği, AISI 1040 çeliği

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL DRILLING METHOD USING ROTARY TUBE TOOL

ABSTRACT

In this study, a new hybrid electrochemical drilling (ECD) method, based on electrochemical machining in non-conventional machining processes, was developed. In the developed method, tube tool makes rotary motion together with inner through hole flushing. A small scale prototype ECD machine has been designed and manufactured to test the developed method. One of the important features of the new system is the regulation of tool feed rate using current feedback control. The Hadfield (manganese) steel, whose strain hardening behavior makes it very difficult to machine with conventional methods, and AISI 1040 steel, whose machinability is fairly good, were drilled using the prototype machine and results were compared. Workpiece material removal rate increased with the increasing machining voltage, tool rotational speed, electrolyte concentration and flushing pressure in both types of steels. Average radial overcut values increased with the rotational speed of the tool. The AISI 1040 steel hole geometries were regular than that of Hadfield steel. Experimental results showed that deep holes can be drilled successfully with the proposed hybrid ECD method.

Keywords: Electrochemical drilling, current feedback control, rotary tool, tool inner flushing, Hadfield steel, AISI 1040 steel

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek sertlik, aşınma dayanımı, tokluk ve deformasyon pekleşmesi gibi özelliklerinden dolayı birçok metal malzeme geleneksel imalat yöntemleriyle istenilen hassasiyette, yüzey kalitesinde ve geometrilerde işlenememektedir. Geleneksel işleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı birçok alanda hibrit alışılmamış imalat usulleri öne çıkmaktadır. Hibrit alışılmamış imalat usulleri arasında delik delme işlemleri önemli bir yer tutmaktadır. İşlenmesi güç metallere elektrokimyasal yöntemle delik delmede (kısaca “elektrokimyasal delme-EKD”) artık gerilmelerin, takım aşınmasının, şekil bozulması ve çapak oluşumunun önemli seviyede engelleniyor olması yöntemi çekici kılmaktadır. EKD yönteminde elektrolit olarak halit tuzlu çözeltiler kullanılmakta olup küçük çaplı delik delmelerde geleneksel delme işlemlerine göre daha iyi “delik derinliği/delik çapı” (h/d) oranı vermektedir [1]. EKD’de delme sırasında katot takım, işparçasından çok küçük bir boşlukla ayrılmakta ve elektrik akımının elektrolit ortama uygulanmasıyla anot işparçası bölgesel olarak hızlı bir şekilde çözünmektedir. Bu yöntemde kurşun, bakır ve paslanmaz çelikten yapılmış, dış yüzeyi yalıtılmış tüp şeklindeki takım içerisinde yüksek basınçlı elektrolitin püskürtülmesiyle, takım-işparçası arasından işleme artıklarının uzaklaştırılması, ortamın soğutulması ve yüksek hızda işparçasından malzeme çözündürülmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yöntemde NaCl, NaNO₃, NaClO₃ ve bunların karışımları olan elektrolitler iyi sonuçlar vermektedir. Derin delme esnasında elektroliz sonucu oluşan iyonik artıkların ve katı çökeltilerin işleme boşluğunu tıkayarak istenen delik derinliğinin ve boyut hassasiyetinin elde edilememesi yöntemin en büyük sıkıntısıdır [1-3]. Yöntemde h/d oranını artırmak ve işleme performansını iyileştirmek amacıyla delme takımı (elektrot) tasarımında, takım hareketlerinde, elektrolit tipinde, işleme akımının uygulanmasında değişiklikler ve iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada literatürde hiç denenmemiş bir hibrit EKD tekniği önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemde delme esnasında ince pirinç tüp takımın içerisinde yüksek basınçta elektrolit püskürtülmüş ve beraberinde takıma dönme hareketi verilmiştir. Literatürde takıma sadece dönme hareketinin verildiği (içinden elektrolit püskürtmesiz) EKD çalışmaları da çok az sayıdadır [4-6]. Bu çalışmaların hepsinde işleme bölgesine sadece yanal püskürtme uygulanmıştır. Çalışmalarda yapılan deneylerin hepsi çok ince metal plakalara kısa süreli ve sığ mikro delik delme şeklindedir (küçük h/d uygulamaları). Bu çalışmada tasarlanan ve imal edilen hibrit EKD tezgâhında diğer önemli bir üstünlük ise takım ilerleme (delme) hızının akım geri beslemesi ile kontrol edilmesidir. Bu sayede ön boşlukta sabit aralıkta delme yapılabilmektedir. Geliştirilen hibrit yöntemin diğer çalışmalarından bir diğer farkı ve üstünlüğü ise, tüp takımın içerisinde püskürtülen elektrolit sıvısının işparçası yüzeyinde birikerek

oluşturduğu az miktardaki elektrolit kütesinin (göletinin) işleme ortamı olarak kullanılmasıdır. Bu farklılık sayesinde elektrolit sıvısının sıcaklık artışı engellenerek işleme performansına olan etkisi ortadan kaldırılmış ve elektrolit kullanım miktarı önemli seviyede azaltılmıştır. Yeni geliştirilen prototip tezgâhın testlerinde değişik delme parametrelerinde (işleme gerilimi (V), işleme akım (I), elektrolit sıvı konsantrasyonu (K), püskürtme basıncı (P), takım dönüş hızı (N)) Hadfield (mangan) çeliği ve AISI 1040 çeliğe delikler delinerek işparçası işleme hızı (İİH), ortalama yanal açıklık (OYA), boyutsal hata (BH) ve delik geometrisi çıktıları incelenmiştir.

EKD’de düşük h/d sorunu düşük konsantrasyonlu asit ilaveli EKD yöntemlerinin gündeme gelmesini sağlamıştır. Bunlardan kapiler delme (capilar drilling) işleminde küçük çaplı deliklerin açılması mümkün olabilmektedir [1,7,8]. Elektro akım delme yönteminde negatif kutuplu platin tel takım görevi yapmakta olup, çok küçük çaplı kılcal bir cam nozuldaki asit elektrolitin basınç altında işparçasına çarptırılarak işparçası malzemesinin çözündürülmesi sağlanmaktadır [8]. Jet elektrolitik delme işleminde ise nozul işparçasında açılan deliğe işleme esnasında girmemektedir. Yüksek basınçlı elektrolit işparçası yüzeyine çarptırılarak anodik çözünme işlemi ile delik delinmektedir [7-10]. Bu yöntemde nozul, negatif kutuplu takım olarak kullanılmakta ve elde edilebilecek en küçük çap nozul delik çapına ve elektrolit sıvı basıncına bağlı olarak değişmektedir.

EKD’nin, takım geometrisi ve elektrolit tipi değiştirilerek hibritleştirilmesini amaçlayan deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur. Bu alandaki deneysel bir çalışmada [11], işleme sıvısı olarak NaNO₃, NaClO₃ ve NaCl elektrolitleri değişik konsantrasyonlarda denenmiş ve işleme esnasında mikro kıvılcımların en düşük NaCl çözeltisinde olduğu ifade edilmiştir. Platin ve çelik teller kullanılarak bakır işparçasına kör delik delindiği bu çalışmada V değerinin ve gerilim frekansının artmasıyla I’nın arttığı ve İİH’nin artan I değeriyle artış gösterdiği vurgulanmıştır. EKD ile açılmış deliklerde karşılaşılan en önemli sorun işleme esnasında takımdan işparçasına mikro kıvılcımların atılması ve dağınık yönlü akımların işparçasından rastgele metal iyonu koparmasıyla oluşan geometrik şekil bozukluklarıdır. Munda ve arkadaşları [12] NaNO₃ katkılı elektrolit içerisinde 335 µm çaplı çelik tel ile bakır plakaya değişik koşullarda delikler delmişlerdir. Çalışmada uygun V’nin seçilmesi ve takımın titreşim frekansının artmasıyla işleme bölgesinde oluşan basınç dalgalanmasının işleme artıklarını ortamdaki kolaylıkla uzaklaştırdığı ve buna bağlı olarak mikro kıvılcımların ve dağınık yönlü akımın şekil bozukluğu üzerine etkisinin azaldığı ifade edilmiştir. Bhattacharyya ve arkadaşları [13], 250 µm’den küçük çaplı paslanmaz çelik takımlarla bakır işparçalarının işlendiği çalışmada, takıma titreşim hareketinin (150–200 Hz) verilerek mikro

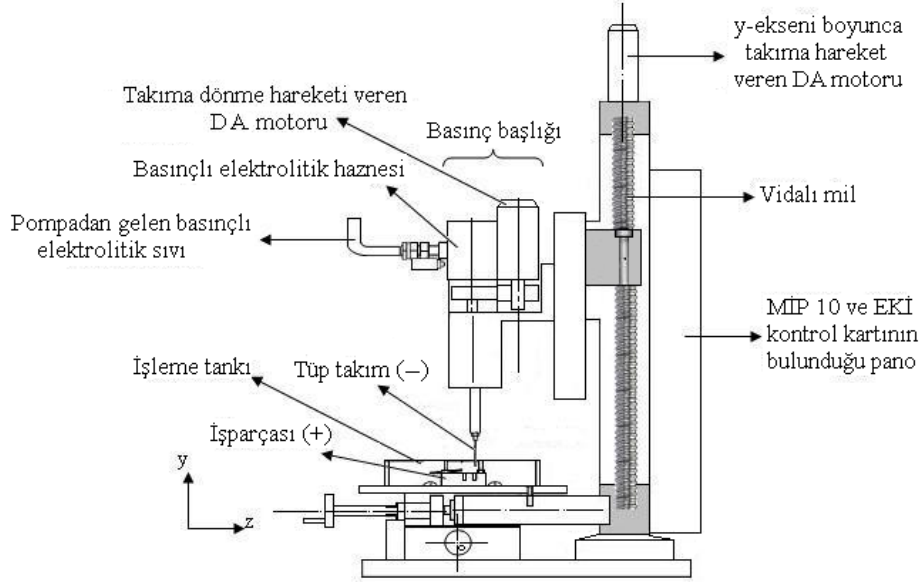
kıvılcıkların oluşumunun azaldığını, daha düzgün delik geometrilerinin elde edildiğini ve İİH'nin arttığını tespit etmişlerdir. Sharma, Jain ve Shekhar [2], 30x6,35x6,35mm boyutlarında üst üste yerleştirilmiş dört adet hız çeliği ve inconel numunelere %10 NaCl+%1 HCl katılmış elektrolitle değişik V ve ilerleme hızlarında (f) delikler delmişlerdir. Hız çeliğinde inconel alaşıma göre %25 daha yüksek İİH değerlerine ulaşıldığı, düşük V ve yüksek f seçilmesiyle en küçük yanal açıklık (YA) değerine erişildiği belirtilmiştir. Bütün işlemlerde en üstteki numunede açılan deliğin çapı alttaki iki numunedekinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. NaCl (%12.5) ve HCl (%2.5) karışımından oluşan elektrolitle, yüzeyi kaplı ince bakır borularla nikel esaslı süper alaşımlara delik delinmesine yönelik bir çalışmada [3] HCl asidin işleme artıklarını ve metali hızlı çözündürücü etkisi ile delik profili daha düzgün yapıda elde edilmiştir. Takım ucundaki yalıtılmamış uzunluğun artırılmasıyla güç kaynağından daha fazla akım çekilerek İİH'nin arttığı ifade edilmiştir. Diğer bir deneysel çalışmada [14], 0,3 mm çapında deliksiz ve düz uçlu bakır takım ile SKD 61 paslanmaz çelikten hazırlanmış numunelere NaNO₃ çözeltisinde delikler delinmiştir. İşleme süresi (t_m) olarak 60, 120 ve 240 s gibi küçük değerler seçilmiştir. Delik çapının V ve t_m'nin artışıyla büyüdüğü, K ve işleme boşluğu değerindeki artışın delik çapını çok az genişlettiği çalışmada elde edilen sonuçlardandır. Geleneksel yöntemlerle işlenebilirliği düşük olan vana çeliğinden (VV50) numunelerin EKD ile işlendiği bir çalışmada [15] delme işlemleri 8,6 mm çapında boru takıma içten püskürtme uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. NaCl (100g/l) ve NaNO₃ (250g/l) tuzlu elektrolitlerin ayrı ayrı denendiği delmelerde İİH'nin en çok f'den etkilendiği ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R_a) f'nin artışıyla azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, düşük İİH'da malzemeden düzensiz iyonik kopmalar meydana geldiği ve NaNO₃'lü işlemlerde NaCl çözeltisi kullanılan işlemlere göre daha iyi R_a ve YA değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Araştırmacılar bunun sebebinin NaCl elektrolitte meydana gelen çözünme reaksiyonlarındaki ürünlerin topaklaşarak işleme bölgesini tıkadığı ve tıkanma anında akım değerinin kısa süreli olarak yükselerek İİH'nı değiştirmesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [15, 16]. Diğer bir mikro delik delme çalışmasında [17], platin levha (5 µm kalınlığında) ve Co bağlayıcı wolfram karbür silindirik (7 µm çapta) takım paslanmaz çelik plakaya NaOH elektrolit ortamda mikro boyutlarda kanal ve delik açmada kullanılmıştır. Çalışmada, nano-saniye vurum sürelerinin (t_p) çok küçük çaplı, derin olmayan delik delinmesine uygun olduğu, kısa t_p'lerin mikro kıvılcım atlamalarını ve takım ucunun deformasyonunu engellediği belirtilmiştir. Kesikli (pulsed) V kullanıldığı bir çalışmada [18], 1 mm boyunda 5 µm çapında tungsten karbür takım ile paslanmaz çelik folyoya (80 µm kalınlık) delikler delinmiştir. Kesikli V uygulanmasında, t_p artışıyla İİH'nin arttığı ve küçük V değerlerinde bekleme

süresinin değiştirilmesinin boyutsal hassasiyetin, şekil düzgünlüğünün ve R'nin kontrolünde daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, V ve t_p'nin artmasıyla delik çapının büyüdüğü de ifade edilmiştir. Delme işlemlerinde yanal püskürtme uygulaması nedeniyle takımın titreştiği ve kısa devreler meydana geldiği gözlenmiştir. Kurita ve arkadaşları [19], V, t_p, K ve takımın hareket genliğini değiştirerek 0,2 mm boyutunda kare kesitli Ni tel takımlarla, 0,2 mm kalınlığında Ni plakalara klasik EKD ile delik delmişlerdir. Takımın akım geri beslemeli kontrolünde işleme esnasında kısa devre oluşmadığı, işleme artıklarının işleme boşluğundan etkili bir şekilde uzaklaştırıldığı, sabit hızlı işlemlerde ise işleme boşluğunda elektrolitin direncinin değişmesine bağlı olarak az da olsa kısa devre meydana geldiği gözlenmiştir. Reaktör, boru ve pompalarda yüksek korozyon direnci gereksinimlerinde tercih edilen nikel esaslı alaşımlardan Hastelloy B-2 geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi esnasında gerinme pekleşmesine uğrayarak işlenemeyecek kadar sertleşmektedir. Bu malzemenin EK delinmesine yönelik bir çalışmada [20], HCl karışımı elektrolitte 5µm çaplı tungsten takımla 3µm derinliğe kadar değişik t_p'lerde delikler delinmiş, artan t_p'nin deliğin çapını artırdığı ifade edilmiştir. Çalışmada f'nin küçük değerlerde seçilmesiyle delik hassasiyetinin arttığı ve t_p'nin artmasıyla YA'nın büyüdüğü belirtilmiştir.

2. ELEKTROKİMYASAL DELME (EKD) ÜNİTESİNİN TASARIM VE İMALATI (DESIGN AND PRODUCTION OF THE ELECTROCHEMICAL DRILLING UNIT)

Tasarlanan ve imal edilen EKD tezgâhının takım bağlama ve ilerletme, işparçası bağlama ve işleme tankının bulunduğu sistemin ana parçaları şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Tezgâh başlığı düşeyde vidalı mil yardımıyla hareket ettirilmektedir. Gövde üzerinde bulunan iki adet d.a. motoru takıma dönme ve ilerleme hareketi vermektedir. İlerleme hareketini sağlayan d.a. motoru bilgisayar yazılımıyla, dönme hareketini sağlayan motor ise ayrı bir kontrol paneli ve d.a. güç kaynağı ile kontrol edilmektedir. Takıma aynı anda dönme hareketini ve elektrolitin basınçlı bir şekilde içerisinden püskürtülmesini sağlayan basınç başlığı da tezgâh başlığı üzerine monte edilmiştir.

Prototip EKD tezgâhının en önemli bölümü, delme esnasında takımın işparçasına göre belirli bir işleme boşluğu mesafesinde sabit kalmasını sağlayan d.a. servo motor ilerleme ve kontrol kısmıdır. Prototipte servo motor olarak "Maxon A-Max15" motor kullanılmıştır. Bu tip d.a. motor MIP 10 adı verilen bir sürücü kontrol ünitesi ve PC'ye kayıtlı kendi yazılımı ile kontrol edilebildiği gibi kullanıcı tarafından geliştirilen yazılımlarla da kontrol edilebilmektedir.

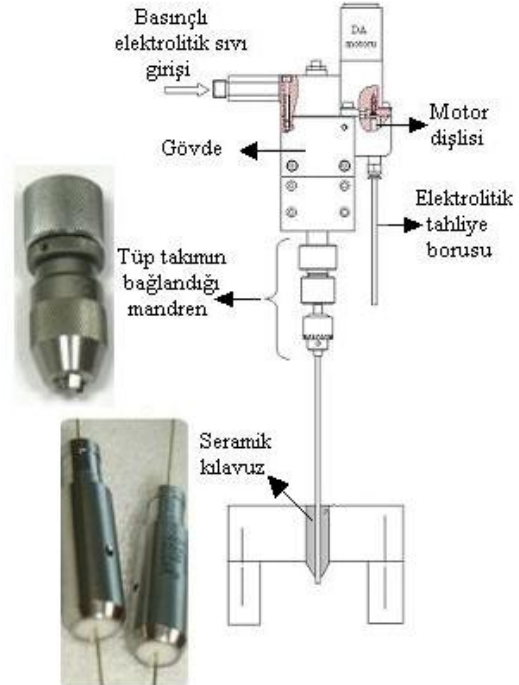


Şekil 1. Tasarlanan deney düzeneği mekanik gövdesinin şematik görünümü (Schematic view of mechanical body of the designed experimental setup)

Bu çalışmada Delphi dili kullanılarak yazılmış bir program yardımı ile servo motora gerekli dönme hareketi verilmiştir. Dönme miktarı işleme süresince takım ile işparçası üzerinden sürekli olarak ölçülen akım değerlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Delme esnasında akım değerinin tespiti için bir akım algılayıcısı kullanılmıştır. Ölçülen değerler analog/dijital dönüştürücü'den çıktıktan sonra bilgisayardaki yazılımın akım değerlendirme modülüne gönderilmiştir. Burada gelen veriler işlendikten sonra takım konumlandırma, takım ilerleme hızı ve takım-işparçası arasındaki işleme boşluğu kontrolü için gerekli bilgiler MIP10 üzerinden servo motora gönderilmektedir. Doğru akım güç kaynağından takım-işparçası çiftine akım verilince isteğe bağlı olarak sabit hızda veya akımda işleme gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada seçilen V değerine bağlı olarak güç kaynağından çekilen I değeri kontrol edilmiştir. Deneylerde işleme boşluğu (H_g) ile I arasında $I=V/(H_g R_e)$ bağıntısı kullanılmıştır [7]. Burada, R_e elektrolitin iç direncidir ($\Omega\text{-m}$). I'nın geri beslemeli kontrolü sayesinde işleme aralığı sabit tutulmuştur. Bu çalışmada güç düzeltme faktörlü, programlanabilir ve kısa devre durumunda kendinden akım ve gerilim korumalı XRF-1200 model d.a. güç kaynağı (çıkış gerilimi 0-7,5 V, çıkış akımı 0-140 A ve çıkış gücü maksimum 1200 W) kullanılmıştır.

Çalışmada elektrolitin basınçlandırılmasında yüksek basınçlar sağlayabilen 950 dev/dakika'lık bir alternatif akım motoru ile tahrikli pistonlu pompa kullanılmıştır. Basınç başlığı (Şekil 2) bir hortum vasıtasıyla pistonlu pompadan gelen yüksek basınçlı elektrolitin (maksimum 200 bar) takım içerisinde işleme boşluğuna gönderilmesini, takıma dönme hareketinin verilmesini ve aynı anda elektrokimyasal işleme için gerekli olan işleme akımının takıma iletilmesini sağlayan bir elektro-mekanik yapıdır.

Takıma akımının uygulanması için gerekli kablo bağlantısı basınç başlığı üzerine yapılmıştır. Buradan geçen elektrik akımı başlığın içinde bulunan iki adet grafit çubuğa aktarılmakta ve bu çubuklar takımın içine yuvalandığı dönen silindirik parçaya sürterek takıma akım iletimini sağlamaktadır. Takımın delmede kullanılacak uç kısmı takım çapından çok az büyük olan bir seramik kılavuzdan geçirilmektedir (Şekil 2). Bu sayede işleme esnasında dönen pirinç takımın salgı yapması engellenmektedir.



Şekil 2. Takımın bağlandığı basınç başlığının şematik görünümü (Schematic view of tool mounted on pressure head)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

Deneylede pirinç tüp takımlarla Hadfield çeliği ve AISI 1040 çeliği işparçalarına EKD ile çeşitli I, P, N ve K değerlerinde delikler delinmiş ve işleme performans çıktıları (İİH, OYA, BH ve delik geometrisi) değerlendirilmiştir. Düşük I değerlerinde elde edilen deliklerin boyut hassasiyetinin daha iyi olduğu bilindiğinden bu çalışmada da düşük V ve I değerleri seçilmiştir. Ayrıca, EKD'de halit tuzlu çözeltilerle derin delik delme denemeleri yapılmadığından literatürde mikro işleme adı altında bahsedilen çalışmalarda kullanılan NaCl konsantrasyon değerleri bu çalışmada referans alınmıştır. Hadfield ve AISI 1040 çeliği işparçaları ile toplam 96 deney yapılmıştır. Hadfield çeliğinin delme testlerinde 8 mm derinliğin üzerinde işleme bölgesinin tıkandığı görülmüş, bu nedenle deneylerde işleme derinliği 8 mm ile sınırlandırılmıştır. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Kullanılan işleme parametrelerinin bazılarının seçiminde yazarların daha önceki bir çalışmasından faydalanılmıştır [21]. İşparçası malzemelerinden biri olan Hadfield çeliği geleneksel talaşlı imalatı esnasında gerinme pekleşmesine uğradığından dolayı işlenmesi zor bir malzemedir. Genellikle ekskavatörlerde, maden kırma ve öğütme makinelerinde, hapishane demir kafeslerinin yapımında ve demiryollarında makas geçiş raylarının yapımında kullanılır. Hadfield çeliği işparçaları (numuneler) silindirik bir parçadan tel erozyon ile kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3). AISI 1040 çeliği makine ve otomotiv sanayilerinde özellikle vinç kancaları, dişliler, kazıcılar, transmisyon milleri, ray, kazma ve kürek yapımında yaygın kullanılır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile işlenebilirliği kolaydır. AISI 1040 çeliği numunesi 50x10 mm kesitli lamadan 8 mm kalınlığında kesilerek hazırlanmıştır. Hadfield ve AISI 1040 çeliklerinin kimyasal özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Her iki işparçası malzemesinde de aynı ölçüdeki iki numune delme öncesi yan yana getirilerek mengene ile sıkıştırılmıştır. Takım iki numunenin birleşme çizgisine konumlandırılarak delik delinmiştir. Böylece oluşan delik geometrileri işparçalarını ortadan kesme işlemine gerek kalmadan incelenebilmiştir (Şekil 4). Deneylerde elektro erozyon ile hızlı delik delme tezgâhları için üretilmiş tüp formunda pirinç takım kullanılmıştır (Tablo 1). Takımın uç 1 mm'lik boyu hariç delik içerisine giren dış kısmında siyanoakrilik (cyanoacrylate) yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Böylece takımla derine inildikçe delik yanal duvarlarının işlenmesi sonucunda koniklik oluşumu engellenmiştir. Elektrolitik sıvı olarak NaCl tuzunun üç farklı konsantrasyonda sulu çözeltisi kullanılmıştır. Bu çalışmada takımın içinden püskürtülen elektrolitin işparçası yüzeyinde (takım ucunun etrafında) oluşturduğu küçük birikintide EKD gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri (Machining parameters used in the experiments)

İşleme Gerilimi, V (volt)	4,5-5,5-6,5-7,5
Başlangıç İşleme Boşluğu, h	600 mm
Elektrolit	Su+NaCl çözeltisi
Elektrolit Konsantrasyonu, K	100, 125, 150 g/l
Elektrolit Uygulaması	Takım içinden püskürtme
Püskürtme Basıncı, P	20, 40 bar
Takım Dönüş Hızı, N	200, 400 dev/dakika
Kutuplama	Takım (-)
Tüp Takım Malzemesi	Pirinç
Tüp Takım Boyutları	Dış çap 0,5, iç çap 0,18, boy 400 mm
İşleme Derinliği	8 mm

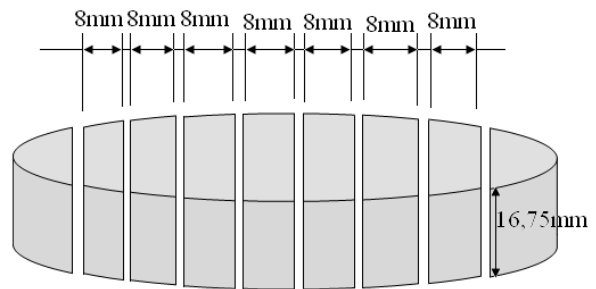
İşleme sırasında takım konumu, f, I ve t_m 0,5 s'de bir kaydedilmiştir. Sistem veriyi RS232 veri yoluyla, tezgah kontrol kartı ve MIP10 entegre kontrol kartı üzerinden bilgisayara aktarmaktadır. Böylelikle, işleme esnasında akım değişimleri, kısa devre ve mikro kıvılcımların oluşup oluşmadığı, işleme derinliği ve takım hızı sürekli sayısal olarak gözlenmiştir. Ölçülen değerler açılan EXCELL dosyasına kaydedilmiştir. Delme performansının ve delik kalitesinin belirlenmesinde kullanılan İİH, OYA ve BH aşağıdaki eşitliklerden elde edilmiştir.

İİH (mm^3/dak)= işparçası toplam işleme hacmi/işleme süresi

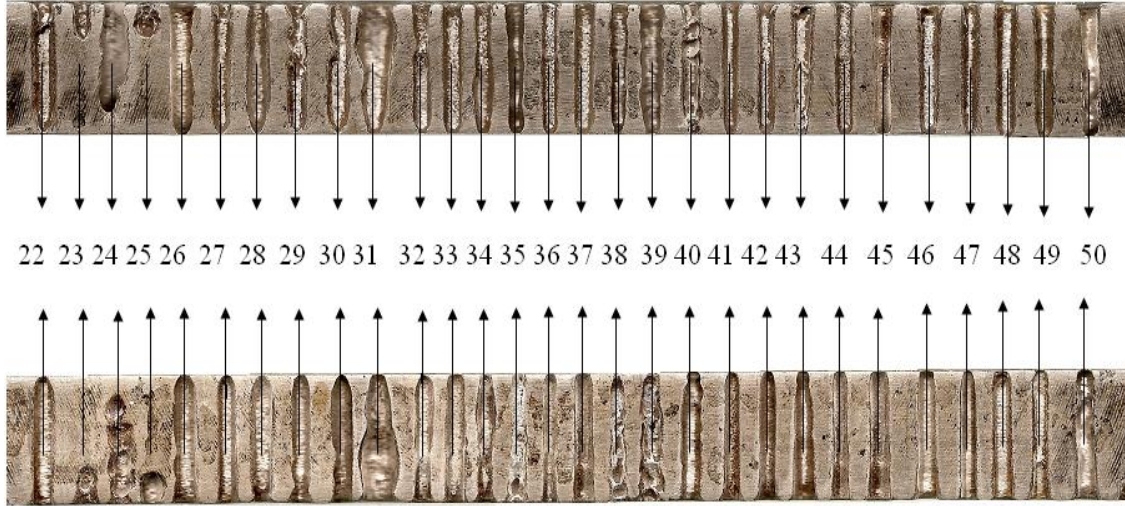
$$\text{OYA (mm)} = 1/n \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Delik çapı} - \text{Takım çapı}}{2} \right)$$

BH (%)= (delikteki en büyük çap-delikteki en küçük çap) $\times 100$ / delik boyu

Burada, n delik derinliği boyunca ölçülen delik çaplarının sayısıdır.



Şekil 3. Tel erozyonla kesilmiş Hadfield çeliği işparçaları (Hadfield steel workpieces cut by wire EDM)



Şekil 4. Hadfield çeliği işparçasına delinmiş örnek delik görüntüleri (Sample holes drilled to Hadfield steel workpiece)

Tablo 2. AISI 1040 ve Hadfield çeliği işparçası malzemelerinin temel bileşimleri (Compositions of ISI 1040 steel and Hadfield steel)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
Hadfield	1,08	0,62	13,6	0,72	0,26	0,3	0,18	83,2
AISI1040	0,38	0,21	0,74	0,07	0,01	0,1	0,15	98,1

Literatürdeki çalışmalarda BH, delinen deliğin istenen mükemmel (teorik) delik boyutlarına uyumunu göstermede kullanılan bir çıktıdır. Küçük BH, delikte istenen boyut özelliklerine yaklaşıldığını gösterir. Delik geometrilerinin incelenmesi amacıyla işparçaları çözünürlüğü yüksek bir tarayıcıda (HP Photosmart C4280) taranmıştır. Datinf Measure görüntü analizi ve ölçüm paket programıyla her deliğin görüntüsü üzerinden çap ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar OYA ve BH değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

4.1. Hadfield çeliği EKD sonuçları (ECD results of Hadfield steel)

Hadfield çeliğine delinmiş örnek delik kesitleri Şekil 4'te görülmektedir. Delik geometrileri incelendiğinde delik giriş ve çıkış çapları arasında işleme parametrelerine bağlı belirgin bir değişim görülmemiştir. Ancak büyük N değerleri için delik giriş çaplarında artış tespit edilmiştir. Bu bulgu literatürdeki sonuçlarla uyumludur [2,3]. Bütün işlemlerde malzemeye ilk giriş yaklaşık 3-4 dakika gibi bir zaman diliminde geçilmiştir. Böylelikle delik ağzı oluşurken daha fazla malzeme çözünmüş ve çap büyümüştür. Bazı delik kesitlerinde bölgesel çap değişimleri görülmektedir. Araştırmacılar, delikteki çap değişimini NaCl elektrolit kullanımında meydana gelen çözünme reaksiyonlarındaki artıkların toplanarak işleme bölgesini tıkaşına ve tıkanma anında akım değerinin kısa süreli olarak yükselerek İİH'yı artırmasına bağlamışlardır [15,16]. Çap değişimlerinde etkili diğer bir faktör ise takım yalıtımının bozulmasıdır.



Şekil 5. Delik duvarlarındaki bazı geometrik bozukluklar (Some geometric misforms on hole walls)

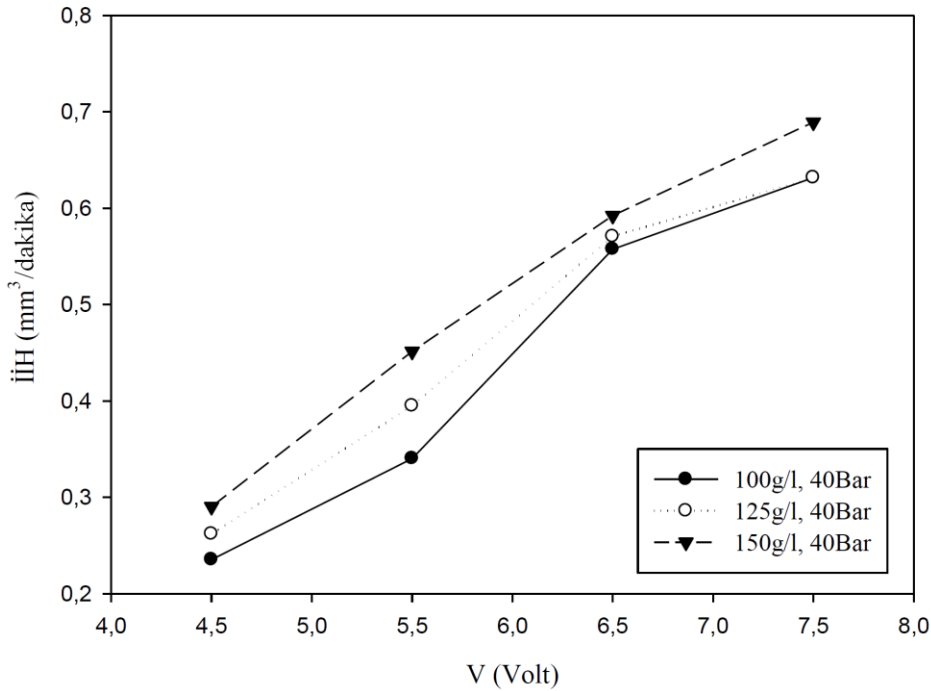
Takımın dönme esnasındaki radyal salgısından dolayı yalıtım tabakası delik iç yüzeyine temas ederek soyulmakta, yalıtımı yer yer bozulmuş takım ise karmaşık delik geometrilerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bazı delik kesitlerinde ise tek taraflı çıkıntı biçiminde geometrik bozukluklar meydana gelmiştir (Şekil 5). Bazı deliklerde rastlanan geometrik kusurlara rağmen, Hadfield çeliğine çalışmada EKD ile delinen küçük çaplı delik derinliklerine geleneksel yöntemlerle (matkapla delme) inilmesi çok zordur.

Deney sonuçları incelendiğinde V ve K artışıyla İİH değerlerinde belirgin artış görülmektedir. Artan V elektrolitten daha fazla elektron akışını ve sonucunda daha fazla metal atomunun iyonik forma dönüşmesini sağlamaktadır [1]. K artışıyla ise daha fazla tuz iyonunun işleme ortamında bulunması sağlanır. Bu da işleme ortamının iletkenliğini artırarak güç kaynağından daha fazla akım çekilmesini sağlamaktadır. Böylelikle, her iki durumda da daha fazla elektron akışı nedeniyle anodik çözünme hızlanmaktadır. Deney sonuçları arasında örnek olarak sunulan P=40 bar ve N=200 dev/dakika değerlerinde V ve K artışıyla İİH'daki artış belirgindir (Şekil 6).

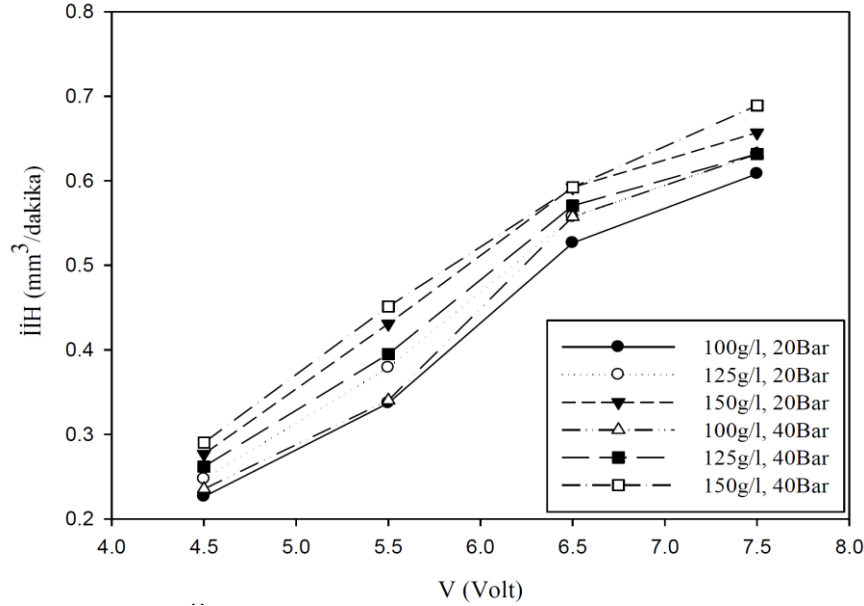
Deneylerde P'nin artırılmasıyla İİH değerleri artmış ve bunun sonucunda işleme süreleri kısalmıştır. Şekil 7'de örnek olarak N=200 dev/dakika ve farklı V değerlerinde artan P ile İİH'da meydana gelen artış görülmektedir. Bu artışın sebebi yüksek P'nin işleme artıklarını işleme ortamından daha hızlı uzaklaştırması ve temiz elektrolitin işleme boşluğuna sürekli takviyesi ile yüksek iletkenliğin sağlanmasıdır. İki

farklı N değerinde (200 ve 400 dev/dakika) yapılan delmelerde yüksek N, İİH değerlerinde küçük artışlar yaratmasına rağmen delik geometrilerinde belirgin iyileşme sağlamıştır. Hızlı takım dönüşü sayesinde işleme ortamından işleme artıklarının etkili bir şekilde uzaklaştırılması ile kısa süreli tıkanmalar daha nadir oluşmuş, işleme süresi kısalmıştır.

Deneylerde, OYA değerleri artan V ve K ile azalmış, N artışıyla artmıştır. Bu durum işleme bölgesinde V ve K artışı ile akım yoğunluğunun artması ve buna bağlı olarak f'nin artmasıyla daha kısa süreli bölgesel işlemler yapılmasından dolayıdır [1-4]. Örnek olarak Şekil 8'de P=40 bar için OYA değerlerinin V, K ve N parametrelerine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Hadfield çeliği işlemlerinde N artışına bağlı olarak delik çapı ve OYA büyümüştür. Bunun sebebi ise takımın dönmesiyle işleme boşluğunda bulunan anodik çözünme artıklarının daha iyi uzaklaştırılması ve elektriksel iletkenliğin artarak daha kısa zamanda daha fazla malzeme çözündürülmesidir. OYA değerleri P değerindeki artış ile hafif bir azalma göstermiştir. Hadfield çeliğinin delinmesi deneylerinde BH işleme parametrelerine bağlı olarak belirgin bir değişim göstermemiştir. Ancak, P=40 bar ve N=400 dev/dakika değerlerinde yapılan delmelerde genellikle daha düzgün delik profilleri (küçük BH) elde edilmiştir. Deliklerde rastlanan en düşük ve en yüksek BH % 1,1 ve % 7,6 olmuştur. Sonuç olarak basınçlı elektrolit ve döner takım kullanımı delik geometrisinin daha düzgün elde edilmesini sağlamıştır. Hadfield çeliklerin delinmesinde takım aşınması meydana gelmemiştir.



Şekil 6. Farklı K değerleri için İİH'nın V ile değişimi (P=40 bar, N=200 dev/dakika) (Variation of workpiece removal rate (WRR) with machining voltage (V) for various electrolyte concentrations (K) (P=40 bar, N=200 rev/min))

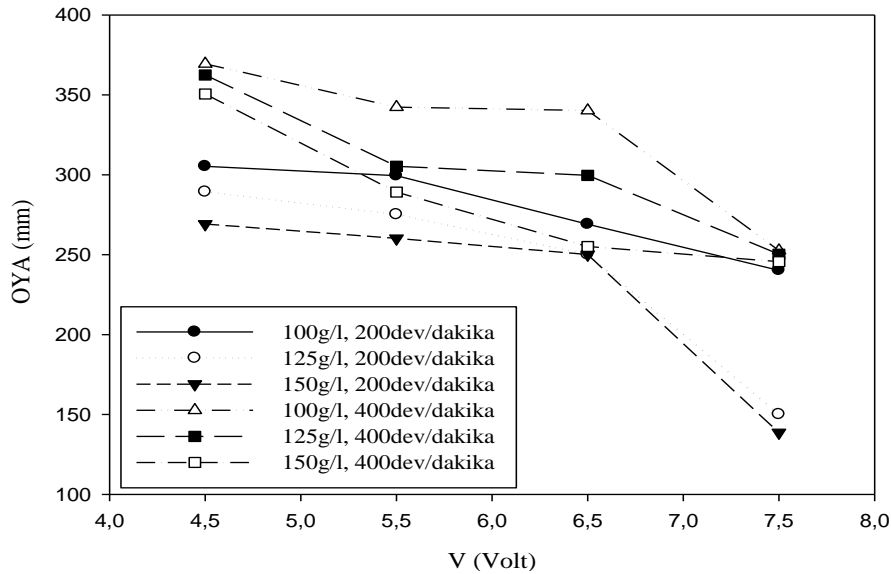


Şekil 7. Farklı P değerleri için İİH'nin V ile değişimi (N=200 dev/dakika). (Variation of WRR with V for various flushing pressures (P) (N=200 rev/min))

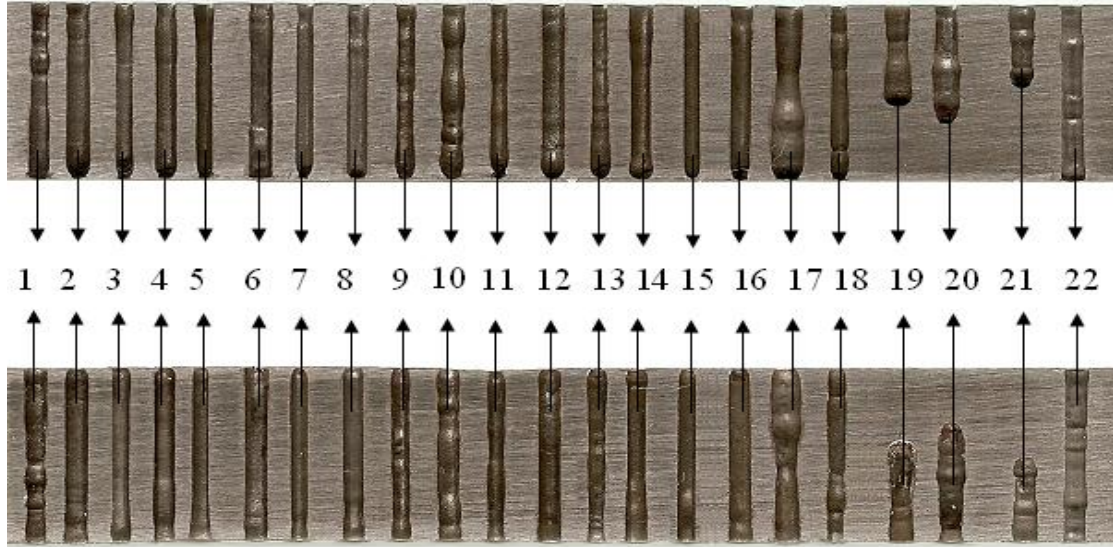
4.2. AISI 1040 çeliği EKD deney sonuçları (ECD results of AISI 1040 steel)

AISI 1040 çeliği işparçalarının delinmesi sırasında Hadfield çeliği deneylerinde karşılaşılan takım deliğinin ve işleme aralığının tıkanması sorunu fazla görülmemiştir. Bu durum iki tip çelikteki anodik çözünme reaksiyonları sonucu oluşan işleme ürünlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. AISI 1040 çeliği deneyleri aynı işleme koşullarındaki Hadfield çeliği deneylerine göre daha kısa sürelerde tamamlanmış (daha yüksek İİH) ve daha düzgün delik geometrileri elde edilmiştir (Şekil 9). AISI 1040 çeliğine açılan deliklerin giriş çapları delik kesit çapından çok az büyüktür. Delik çıkış çapları ise ortalama çaptan daha küçüktür. Delik giriş ve çıkış

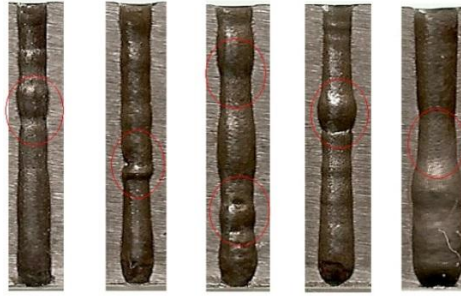
çapları işleme parametrelerine göre belirgin bir değişim göstermemiştir. Az sayıda deneyde takımın tıkanması sonucu delme işlemleri durmuştur (Şekil 9, 19-21 nolu delikler). Takımın tıkanması Hadfield çeliği deneylerinde de görülmüş olup, bu oluşumun muhtemel sebebi basınç pompasında elektrolitin temas ettiği metal parçaların korozyona uğrayarak korozyon ürünlerinin takım elektrolit giriş deliğini tıkamasıdır. Düşük P değeri (20 bar) uygulanan deliklerde çap genişlemesi ve boğum oluşumu şeklinde bozukluklar oluşturmuştur (Şekil 10). Hadfield çeliği deneylerinde olduğu gibi bu deneylerde de artan P ve N delik duvarlarının daha düzgün olmasını sağlamıştır. İİH değerleri V ve K artışıyla belirgin artış göstermiştir (Şekil 11).



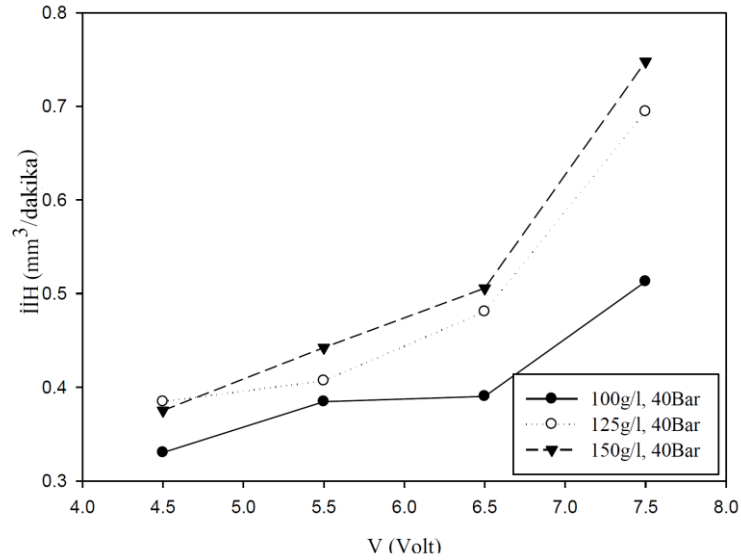
Şekil 8. Farklı K ve N değerleri için OYA'nın V ile değişimi (P=40 bar) (Variation of average radial overcut (ARO) with V for various K and tool rotational speeds (N) (P=40 bar))



Şekil 9. AISI 1040 çeliğinde delinmiş örnek delik görüntüleri (Sample holes drilled to AISI 1040 steel workpiece)



Şekil 10. Düşük P değerinde (P=20 bar) delik çap değişimleri (Diameter variations of holes under low P values)



Şekil 11. Farklı K değerleri için İİH'nın V ile değişimi (P=40 bar, N=200 dev/dakika) (Variation of WRR with for various K values (P=40 bar, N=200 rev/min))

İşlemlerde P artışıyla işleme bölgesinde anodik çözünme daha hızlı gerçekleşmiş ve örnek olarak sunulan N=200 dev/dakika delme parametresinde İİH değerleri az da olsa artış göstermiştir (Şekil 12).

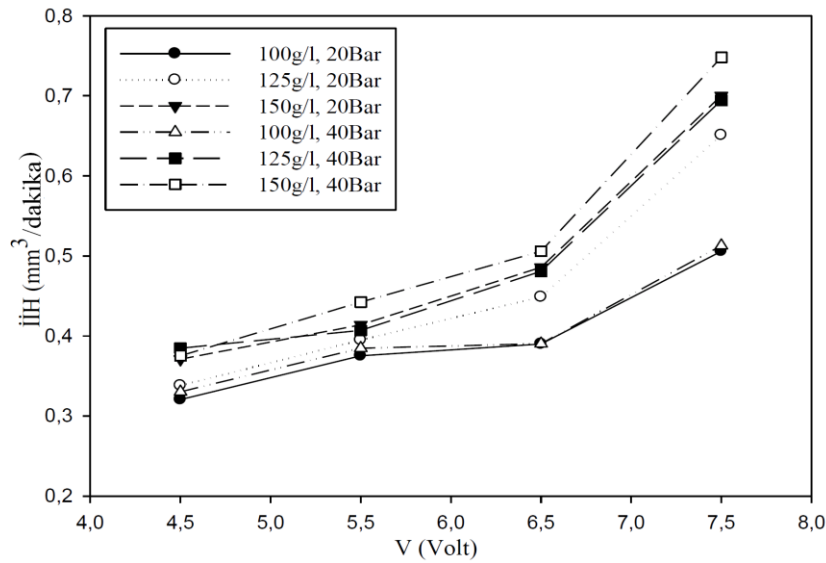
Hadfield ve AISI 1040 malzemelerine derin (8 mm derinlik) delik açılmasında püskürtme basıncı çok etkili olmuştur. Literatürde EKD ile bu derinlikte delik açılmasına yönelik bir çalışma

bulunmamaktadır. N değerindeki artış ile ön ve yan işleme boşluklarında elektrolitin hareketlenmesi ile işleme artıklarının delikten uzaklaştırılması kolaylaşmış ve İİH artmıştır. Artan V ve K ile Hadfield deneylerinde olduğu gibi OYA değerleri azalmış, N artışıyla artmıştır. Örnek olarak P=40 bar için V, K ve N'nin artışı ile OYA'nın değişimi Şekil 13'de sunulmuştur. Delik çaplarındaki büyümeler Hadfield çeliğine göre daha azdır. Deneysel sonuçlardan K'nın yanıl açıklığın değişimine olan etkisinin P'den daha fazla olduğu anlaşılmıştır. N=400 dev/dakika için P artışıyla OYA değerlerinde meydana gelen azalma belirgindir. Elde edilen deliklerin çoğunda BH değerleri % 1'in altındadır. Deliklerde tespit edilen en küçük ve en büyük BH değerleri % 0,25 ve % 4,37'dir. Elde edilen sonuçlar AISI 1040 çeliğine açılan deliklerin Hadfield çeliğine

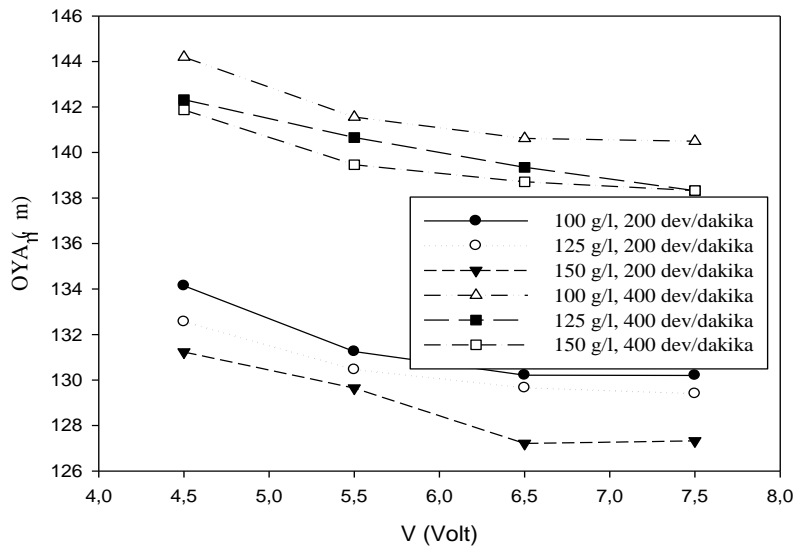
göre boyutsal açıdan (çap ve derinlik) istenene daha yakın olduğunu göstermektedir. AISI 1040 çeliklerin işlenmesinde Hadfield çeliğinde olduğu gibi takım aşınması meydana gelmemiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada büyük derinlik/çap (h/d) oranında delik delmede döner takımın içinden yüksek basınçlı halit tuz (NaCl) katkılı elektrolit püskürtmesinin yapılabildiği akım geri besleme kontrollü elektrokimyasal delme (EKD) tezgâhı geliştirilmiştir. Çalışmada geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle delinmesi güç olan Hadfield çeliği ve delinmesi kolay olan AISI 1040 çeliği EKD tekniğiyle delinmiş ve performans çıktıları karşılaştırılmıştır.



Şekil 12. Farklı P değerleri için İİH'nin V ile değişimi (N=200 dev/dakika) (Figure 12. Variation of WRR with V for various P values (N=200 rev/min))



Şekil 13. Farklı K ve N değerleri için OYA'nın V ile değişimi (P=40 bar) (Variation of ARO with V for various K and N values (P=40 bar))

EKD tekniği ile her iki malzeme için şu ana kadar literatürde denenmemiş yüksek derinlikte delik delinmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun temel nedeni, geliştirilen yöntemde döner tüp takım içinden yüksek basınçla püskürtülen elektrolitin katı çökelti formundaki işleme artıklarını işleme bölgesinden uzaklaştırarak tıkanmayı önemli ölçüde engellemesidir. Her iki malzeme ile yapılan delme deneylerinde işparçası işleme hızı değeri işleme gerilimi, elektrolit konsantrasyonu, elektrolit püskürtme basıncı ve takım dönüş hızının artırılmasıyla artış göstermiştir. İH'nın AISI 1040 çeliğinde daha yüksek olması sonucunda delikler daha kısa sürede delinmiştir. Her iki çeliğin delinmesinde de takım aşınması oluşmamıştır. Yanal boşlukların tıkanması Hadfield çeliğinde daha sıklıkla görülmüştür. Hadfield ve AISI 1040 çeliklerinde ortalama yanal açıklık değerleri takım dönüş hızının artırılması ile büyümüş, işleme gerilimi ve elektrolit konsantrasyonunun artışı ile küçülmüştür. AISI 1040 çeliğinde geometrisi daha düzgün delikler elde edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sen, M. ve Shan, H.S., "A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes", **Int. J. of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 45, No 2, 137-152, 2005.
2. Sharma, S., Jain, V.K. ve Shekhar, R., "Electrochemical Drilling of Inconel Superalloy with Acidified Sodium Chloride Electrolyte", **Int. J. of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 19, 492-500, 2002.
3. Bilgi, D.S., Jain, V.K., Shekhar, R. ve Mehrotra, S., "Electrochemical deep hole drilling in super alloy for turbine application", **J. of Materials Processing Technology**, Cilt 149, 445-452, 2003.
4. Wansheng, Z., Li, X. ve Wang, Z., "Study on micro electrochemical machining at micro to meso-scale", **Proc. 1st IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, 568-581, 2006.
5. Tsui, H.P., Hung, J.C., You, J.C. ve Yan, B.H., "Improvement of Electrochemical Microdrilling Accuracy Using Helical Tool", **Materials and Manufacturing Processes**, Cilt 23, 499-505, 2008.
6. Sekar, T. ve Marappan, R., "Improving Material Removal Rate of Electrochemical Machining by Using Rotating Tool", **Manufacturing Engineering**, Cilt 2, 60-63, 2008.
7. El-Hofy, H., **Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes**, McGraw-Hill Comp., USA, 2005.
8. Kozak, K.P. Rajurkar ve R. Balkrishna, "Study of electrochemical jet machining processes", **Trans. ASME, J. of Manufacturing Science and Engineering**, Cilt 118, 490-498, 1996.
9. Sen, M. ve Shan, H.S., "Analysis of hole quality characteristics in the electro jet drilling process", **Int. J. of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 45, No 15, 1706-1716, 2005.
10. Sen, M. ve Shan, H.S., "Electro jet drilling using hybrid NNGA approach", **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Cilt 23, No 1, 17-24, 2007.
11. Bhattacharyya, B., Malapati, M. ve Munda, J., "Experimental study on electrochemical micromachining", **J. of Materials Processing Technology**, Cilt 169, No 3, 485-492, 2005.
12. Munda, J., Malapati, M. ve Bhattacharyya, B., "Control of micro-spark and stray-current effect during EMM process", **J. of Materials Processing Technology**, Cilt 194, 151-158, 2007.
13. Bhattacharyya B., Malapati, M., Munda, J. ve Sarkar, A., "Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper", **Int. J. of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 47, 335-342, 2007.
14. Hocheng, H., Sun, Y.H., Lin, S.C. ve Kao, P.S., "A material removal analysis of electrochemical machining using flat-end cathode", **J. of Materials Processing Technology**, Cilt 140, 264-268, 2003.
15. Neto, J.C.S., Silva, E.M. ve Silva, M.B., "Intervening variables in electrochemical machining", **J. of Materials Processing Technology**, Cilt 179, 92-96, 2006.
16. Datta, M., "Anodic dissolution of metals at high rates", **IBM J. of Research Development**, Cilt 37, No 2, 207-226, 1993.
17. Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. ve Chu, C. N., "Fabrication of WC micro-shaft by using electrochemical etching", **Int. J. of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 31, 682-687, 2007.
18. Lee, E. S., Baek, S. Y. ve Cho, C. R., "A study of the characteristics for electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses", **Int. J. Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 31, 762-769, 2007.
19. Kurita, T., Chikamori, K., Kubota, S. ve Hattori, M., "A study of three-dimensional shape machining with an ECM system", **Int. J. of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 46, 1311-1318, 2006.
20. Maurer, J.J., Mallett, J.J., Hudson, J.L., Fick, S.E., Moffat, T.P. and Shaw, G.A., "Electrochemical micromachining of Hastelloy B-2 with ultrashort voltage pulses", **Electrochimica Acta**, Cilt 55, 952-958, 2010.
21. Sarıkavak, Y. ve Çoğun, C. "Thermal Modelling of Machining Mechanism In Electrical Discharge Machining", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 3, 517-531, 2010.

