

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

128719

ELEKTROLİTİK PİL KULLANILARAK METALLERİN
İYONLAŞTIRILMASI

Fizikçi Hüseyin Oğuz FETHANOĞLU

F.B.E Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Durul ÖREN

Prof. Dr. Nurten Öncan

Doç. Dr. Hasan Tatlıpınar

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
TEŞEKKÜR	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL METOD	2
2.1 Elektrokimyasal Reaksiyonlar	2
2.2 Faraday Kanunu	2
2.3 Elektrokimyasal Yarım Pil	2
2.4 Elektrokimyasal Tersinirlik	3
2.5 Elektrokimyasal Denge	3
2.6 Elektrot Potansiyelleri	3
2.6.1 Elektrokimyasal Potansiyel	4
2.6.2 Basit elektrot potansiyelleri	5
2.6.3 Nernst Denklemi	7
2.7 Elektrokimyasal Kinetik	7
2.7.1 Elektrokimyasal Çift Tabaka	7
2.7.2 Tek Bir Kimyasal Reaksiyonun Kinetiği	8
2.7.2.1 Aktivasyon Kontrolü	8
2.7.2.2 Çoklu Reaksiyonlar Kinetiği	9
3. MEKANİK OLMAYAN METAL AŞINDIRMA TEKNİKLERİ	10
3.1 EDM Teniği ile Metallerin Aşındırılması	10
3.1.1 EDM parametreleri	11
3.2 Elektrokimyasal İşleme (ECM)	12
3.2.1 ECM Parametreleri	16
3.2.2 Kullanılan Elektrolitler	18
3.2.3 ECM ekipmanı	19
3.2.4 Güvenlik ve Artık Madde Tahliyesi	19
4. ECM'İN ESASLARI	21

4.1.	Elektrokimyasal İşlemenin Temelleri.....	21
4.1.1.	Elektrokimyasal şekil vermenin prensibi.....	21
4.2	Akım dağılımı.....	28
4.3	Denge Mesafesi	33
4.4	Matematiksel Model	34
4.4.3	İdeal ECM.....	36
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
5.1	ECM nin kontrolü.....	38
5.1.1	Bilgisayar	38
5.1.1.2	AD/DA Dönüştürücü ve I/O Kartı.....	38
5.1.1.3	Güç kaynağı.....	39
5.1.2	Step Motor ve Takım İlerletme Kontrolü	39
5.1.2.1	Step Motor Kontrolü.....	39
5.1.2.2	İletme Kontrolü.....	40
5.1.3	Elektrod ve İş parçası.....	40
5.1.4	Reaksiyon Havuzu ve Elektrolit Akışı.....	41
5.2	Sürecin Kontrolü.....	41
5.3	Ölçümler.....	41
6	SONUÇLAR	44
7	DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR.....	55
KAYNAKLAR.....		57
ÖZGEÇMİŞ.....		58

SİMGE LİSTESİ

z	elektron sayısını,
m	mol sayısını
F	(96500 coulomb/mol) Faraday sabiti
Q	reaksiyonda geçen yük miktarı
$\Pi[O]$	yükseltgenen türlerin konsantrasyonlarının çarpımı
$\Pi[R]$	indirgenen türlerin konsantrasyonlarının çarpımı
χ	yüzey elektrik potansiyeli
ψ	dış elektrik potansiyeli
ϕ	iç elektrik potansiyeli
μ_i^n	n fazındaki i taneciği
$\bar{u}$	Guggenheim, elektrokimyasal potansiyeli
α_i	Çıkış işi
$\Delta\phi$	iç elektrik potansiyeli farkı
E	denge Galvani potansiyel farkıdır
μ_i^0	standart potansiyel
a_i	i oluşturanın aktivitesidir
T	sıcaklık
E^0	elektrot potansiyeli
i_0	Buttler Volmer eşitliğinde akım yoğunluğu
η	Buttler Volmer eşitliğinde potansiyel farkı
α_A	Buttler Volmer eşitliğinde anodik transfer katsayısı
α_C	Buttler Volmer eşitliğinde katodik transfer katsayısı
E_{corr}	korozyon potansiyeli
i_{corr}	korozyon akım yoğunluğu
V_f	ilerleme hızı
MRR	metal koparma
h	verim
A_w	iz-düşüm alanı
V_n	anodik çözünme hızı
η	Akım verimi
Δm	Δt zamanda ΔI_+ akımının koparttığı kütle
k	birim yükü taşıyan elektrokimyasal eşdeğer
A	M metalinin atom ağırlığı
Δh	ΔA yüzey elemanından kopartılan madde kalınlığı
ρ_m	numunenin (anot) yoğunluğu
K_v	elektrokimyasal işlenebilirlik katsayısı
i_a	anottaki akım yoğunluğu
Q_v	birim zamanda koparılan madde miktarı
e	anot malzemesinin birim hacmini kopartmak için gerekli enerji
i	akım
dE	birim zamanda harcanan enerji
α	yüzeyin birim vektörü ile z ekseni arasındaki açı
n_a	yüzey birim vektörü
V_n	n eksenindeki hız bileşeni
N_I	akı vektörü
u	elektrokimyasal potansiyel
D_i	difüzyon katsayısı
$\delta\delta$	difüzyon katmanının kalınlığı
α_T	elektrolit besleme sisteminin çıkışındaki elektriksel iletkenliğin sıcaklık katsayısı

β
⊗

hacim kesri
sıcaklıktaki artış



KISALTMA LİSTESİ

ECM	Electrochemical machining
EMK	Elektromotor kuvvet
EDM	Electrical Discharge Machining
MRR	Metal Removal Rate
ADAC	Analog to Digital Converter
I/O	Input Output
DC	Direct Current
HSS	High Speed Steel
DIN	Deutsche Industrial Norm



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	EDM'nin çalışma ilkesi	10
Şekil 3.2	Elektrokimyasal İşlemenin (ECM) ilkesi	12
Şekil 3.3	Elektrokimyasal Pil	13
Şekil 3.4	Anodik çözünme	13
Şekil 3.5	ECM yöntemiyle demirin sodyum klorür elektrolitle çözünmesi	14
Şekil 3.6	ECM de yer alan parametreler	16
Şekil 4.1	Elektrokimyasal yöntemle şekil vermenin şeması	21
Şekil 4.2	NaCl ve NaNO ₃ elektrolitler için K_v vs i fonksyonu	25
Şekil 4.3	NaCl ve NaNO ₃ elektrolitler için K_v vs T fonksyonu	25
Şekil 4.4	NaCl ve NaNO ₃ elektrolitler için K_v vs w fonksyonu	26
Şekil 4.5	Kartezyen koordinat sisteminde anot katod sistemi	26
Şekil 4.6	Elektrodlar için bağ koşulları	30
Şekil 5.1	Gerçekleştirilen Deneysel ECM Tertibatı	38
Şekil 6.1	NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	47
Şekil 6.2	NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	48
Şekil 6.3	NaNO ₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	48
Şekil 6.4	NaNO ₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	49
Şekil 6.5	Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	49
Şekil 6.6	Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü	50
Şekil 6.7	NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu	52
Şekil 6.8	NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu	53
Şekil 6.9	NaNO ₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu	53
Şekil 6.10	NaNO ₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait yüzey durumu	54
Şekil 6.11	Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu	54
Şekil 6.12	Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu	55

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	ECM deki çeşitli ilerleme hızları	17
Çizelge 3.2	Reaksiyon ürünlerinin azami güvenlik konsantrasyonları	20
Çizelge 4.1	Çeşitli elementler için Kv değerleri	23
Çizelge 4.2	Demir bazlı çeşitli alaşımlar için Kv değerleri	24
Çizelge 6.1	10mm'lik elektrodla alınan ölçümler	44
Çizelge 6.2	11mm çaplı elektrodla bilgisayar kontrollü olarak alınan ölçümler	45
Çizelge 6.3	11mm çaplı elektrodla bilgisayar kontrollü olarak alınan ölçümler devamı	46
Çizelge 6.4	NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait element kütle dağılımı.....	50
Çizelge 6.5	NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı	51
Çizelge 6.6	NaNO ₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı.....	51
Çizelge 6.7	NaNO ₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı.....	51
Çizelge 6.8	Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı.....	51
Çizelge 6.9	Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı.....	52
Çizelge 6.10	İşlenmemiş numuneye ait orjinal yüzdesel element kütle dağılımı	52

ÖNSÖZ

Bu tez, diğer mekanik olmayan işleme yöntemleri kadar üzerinde durulmamış olan ECM tekniğine farklı bir yaklaşımda bulunmuştur. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi ve arzu edilen hassasiyetin yakalanabilmesi için öncelikle güvenilir bir deney düzeneğine ihtiyaç vardır. Bu gerçekten yola çıkarak, ECM nin küçük bir prototipi mevcut imkanlar nispetinde oluşturulmuştur. Labaratuar ortamında yapılan çalışmalarla, ECM yöntemiyle daha önce denenmemiş durumlar irdelenmiştir.



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimime başlamamı ve Yıldız Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümündeki 3 yıl süresince, çalışmalarına değerli yorumları ile yön ve her türlü desteği veren Sayın Dr. Cevdet Süha AKÇİZ ve Sayın Dr. Reha BAŞARAN'a teşekkürlerimi sunmayı görev sayıyorum.

Ayrıca, hertürlü laboratuvar olanaklarını sağlayan ve tez yazımı sırasında değerli zamanlarını esirgemediğim yorum ve katkılarda bulunan kıymetli hocam Prof. Dr. Durul ÖREN'e, laboratuvar çalışmalarımda her zaman yanımda yardımcı ve destek olan Arş. Gör. Özgür AKÇALI ve Murat BEKEN'e ve bana bu çalışmam süresince maddi ve teknik destek veren TEKNİK VAKUM LTD'e, çalışmalarım sırasında bana her türlü kolaylığı ve yardımı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi, Fizik, Kimya ve Metalurji Bölümlerine ve çalışanlarına, ayrıca; Yüksek Lisans başladığım andan itibaren çalışmalarım ve ardından tezimin yazımı sırasında beni her yönden destekleyen aileme'e teşekkür etmeyi borç bilirim.



ÖZET

Metal işleme teknolojisi, yüksek kalitede ve hassasiyette üretimler yapma konusunda pek çok ilerlemelere sahne olmuştur; fakat metali aşındırmak verimli üretimler için hep bir sorun olarak değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal işleme (ECM), metalin elektrokimyasal çözünme yoluyla aşındırılmasıyla gerçekleştirilir ve kesilmesi, şekil verilmesi güç kontur ve profillerin işlenmesi için önemli bir teknolojidir. Takım aşınması olmadığı için geleneksel mekanik yöntemlerin sonuç vermediği durumlarda tercih edilir. Ayrıca en sert maddelerin en yumuşakları kadar hızlı ve güvenilir duyarlılıkta işlenebilmesini mümkün kılar. Bu çalışmada, ECM' nin karakteristik özellikleri, değişik elektrolitlerle yapılan denemelerin sonuçları ve işparçası üzerindeki fiziksel etkileri çeşitli deneylerle irdelenmiştir. Ayrıca diğer geleneksel olmayan metal işleme tekniklerinden farkına da karşılaştırmalı olarak değinilmiştir.



ABSTRACT

Metal processing technology have been devoloped in the fields of precision manufacturing and high quality machining, but metal removal is considered a difficult problem for high efficient production. Electrochemical machining(ECM) performed by anodic dissolution of metal, is an important manyfacturing technology for machining difficult-to-cut materials and to shape complicated contours and profiles with high metal removal rate without tool wear and inducing residual stress. ECM enables machining of the hardest metals as well as the easy-to-cut ones with the same accuracy and duration. In this study, the charecteristic properties of ECM, the results of expariments with using miscellaneous electrolites and their physical effects on the work-pieces is discussed with various expariments. Also, the distinction of ECM from the other non-conventional machining techniques, is comperatively touched ori.

1.GİRİŞ

Elektrokimyasal işleme (ECM), geleneksel olan mekanik yöntemlerle işlenmesi güç, ısıl-dirence sahip malzemelerin şekillendirilmesinde ekonomik ve etkili bir metoddur. ECM, bir elektrolitik pil içerisinde katod vazifesi gören takımla, iş parçasının (anod) kontrollü bir elektrokimyasal çözünme oluşturması esasına dayanır (Kozak, 1998). ECM sürecinde elektrodlar arasındaki küçük mesafede (0.2 - 0.8mm) yüksek akım yoğunluklarıyla ($10 - 400 \text{ Acm}^{-2}$) düşük gerilimler uygulanarak (8-30V) işlem yapılır ve 0.1 den 10 mm dak^{-1} kadar olan metal koparma oranları elde edilir (Khairy, 1996). Elektrolit olarak genelde NaCl veya NaNO_3 kullanılır ve reaksiyon bölgesine 10 ile 50 m/s arasında değişen yüksek hızlarla püskürtülür. Püskürtmedeki maksat çözünmenin yüksek oranlarda gerçekleşmesi için tepkime ürünlerinin (gaz ve hidroksitler) ve ısıнын o bölgeden uzaklaştırılmasını sağlamaktır. Mekanik olmayan bir işleme tekniği olması dolayısıyla ECM, herhangi bir elektriksel iletken maddenin, sertlik, parlaklık ve elastiklik gibi mekanik özelliklerine bağlı olmaksızın yüksek hızlarla işlenmesine olanak tanır (Choi ve Kim, 1997). Azami hassasiyet gerektiren parçaların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir (havacılık, uzay sanayi vb.)

Bu çalışmada ECM'nin kendiyle teorik ve pratik yönden benzerlik gösteren diğer metodlarla mukayesesi yapılmıştır. Ayrıca değişik işleme parametreleriyle çeşitli malzeme ve elektrolitler kullanılarak alınan sonuçlar irdelenmiştir. Çalışmalarda ECM'nin küçük bir prototipi geliştirilip aynı zamanda aşındırmanın metaller üzerindeki etkisi elektron mikroskopuyla incelenmiştir. İletkenlik eğrileri çıkartılan CH_3COOH , Na_2CO_3 , $\text{C}_4\text{O}_6\text{H}_4$, $\text{C}_6\text{O}_7\text{H}_8$ gibi daha önce denenmemiş elektrolitlerin ECM sürecinde nasıl davranış gösterdikleri, yüzey deformasyon sonuçları, hangilerinin tercih edilmesi gerektiği çeşitli denemelerle araştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda kullanılan NaNO_3 , NaCl, NaOH ve KOH de denenmiş elektrolitler arasında yer almaktadır.

2.MATERYAL METOD

2.1 Elektrokimyasal Reaksiyonlar

Bir elektrokimyasal reaksiyon, yük transferinin kimyasal reaksiyonun bir parçası olduğu durumlarda meydana gelir. Korozyondaki tipik elektrokimyasal reaksiyonlar, metal çözünmesi ve oksijen indirgenmesidir.



Kimyasal reaksiyona zıt olarak, aşağıdaki gibi bir metal hidroksit çökmesinin meydana geldiği durumlarda bir yük transferi olmaz.



2.2 Faraday Kanunu

Faraday'ın kanunu, elektrokimyasal reaksiyonla ilgili yükler ile, reaksiyona girenlerin mol sayısı ve reaksiyon için gereken elektron sayısı arasında bir bağ kurar.

$$Q = zmf \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte, z elektron sayısını, m mol sayısını ve F (96500 coulomb/mol) Faraday'ın sabitini temsil eder.

Faraday'ın öngördüğü sürece ek olarak, bu kurallara uymayan durumlar da oluşabilir. Bu tür süreçler, adsorbsiyon gibi elektrolitle metal arasında tam bir yük transferinin olmadığı durumlardır.

2.3 Elektrokimyasal Yarım Pil

Yarım pil, açık bir yük fazlalığı veya azlığından kaynaklanan bir elektrokimyasal reaksiyondur.

Oksidasyon veya anodik reaksiyonlar, elektron fazlalığından ileri gelir ve korozyon için aşağıdaki gibi çeşitli metal dissolüsyon reaksiyonuna karşılıktır.





İndirgenme veya katodik reaksiyonlar, elektron tüketimi sonucunda oluşur ve korozyonda, oksijen indirgenmesine veya hidrojen gazı oluşumu şeklinde karşımıza çıkar.



Dikkat edilecek olursa yukarıdaki reaksiyonlar tek yönlüdür. Halbuki, ters reaksiyonları da mümkündür. Anodik bir reaksiyonun tersi, katodik bir reaksiyondur aynı şey katodik reaksiyonlar içinde geçerlidir.

2.4 Elektrokimyasal Tersinirlik

Şayet bir reaksiyon tersinir ise, sistemin koşulları değişse de her iki yönde oluşabilir. Buna elektrokimyasal potansiyelin değişimi örnek gösterilebilir.

Çeşitli tersinirlik kabulleri vardır. Bunlar; kimyasal tersinirlik, termodinamik tersinirlik ve pratik tersinirliktir.

2.5 Elektrokimyasal Denge

Termodinamik tersinir reaksiyonlar, Nernts tarafından belirlenmiş bir denge potansiyeli oluştururlar.

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\Pi[O]}{\Pi[R]} \quad (2.10)$$

Yukardaki eşitlikte, logaritmik tanımda yer alan $\Pi[O]$ ve $\Pi[R]$ sırasıyla, yükseltgenen ve indirgenen türlerin konsantrasyonlarının çarpımını tanımlar.

2.6 Elektrot Potansiyelleri

Bir pilin toplam kimyasal reaksiyonu elektrotlarda oluşan reaksiyonların toplamından ibaret olduğu bilinir. Aynı şekilde bir pilin E.M.K ide, difüzyon potansiyeli ihmal edildiği takdirde ,

yarım pillerin yani basit potansiyellerin cebrik toplamına eşittir. Bu basit potansiyelleri daha iyi anlayabilmek için önce genel anlamda basit bir fazın potansiyelini incelemek yararlı olacaktır.

Elektrik bakımından yalıtılmış (izole), yüzeyinde iyon ya da elektron olarak bir elektrik yük fazlalığına sahip olan homojen bir katı ya da bir sıvı faz düşünelim. Bu potansiyel bir birim elektrik yükün sonsuzdan alınıp fazdan imaj kuvvetlerinin etki alanından biraz daha fazla bir uzaklığa kadar getirilmesi için gerekli olan iş olarak tanımlanır. ψ simgesiyle gösterilen bu potansiyele fazın dış potansiyeli ya da volta potansiyeli denir. Değeri ve işareti yük fazlalığının değerine ve işaretine bağlıdır. Bu büyüklük ölçülebilir. Fazın yüzeyinde bir elektrik çift tabaka vardır ve yüzeyinde bir χ potansiyeli oluşturur. Bu potansiyel, dış elektrik potansiyelinin tanımladığı noktadan, birim pozitif yükün faz içinde bir noktaya kadar getirilmesi sırasında colomb kuvvetlerine karşı yapılan işe karşılıktır ve χ simgesiyle gösterilen bu potansiyele *yüzey elektrik potansiyeli* denir. Bu potansiyel iletkenin yük fazlalığına bağlı değildir.

Birim yükü sonsuzdan fazın içine getirebilmek için gerekli olan iş, dış ve yüzey potansiyellerinin toplamıyla tanımlanır; bu miktara iç elektrik potansiyel ya da galvani potansiyeli adı verilir.

$$\phi = \psi + \chi \quad (2.11)$$

Şeklinde tanımlanabilen (2.11) bu miktar ölçülemez.

2.6.1 Elektrokimyasal Potansiyel

Elektriksel yüksüz taneciklerden oluşmuş iki faz arasında denge, oluşturanların kimyasal potansiyellerinin eşit olmasına bağlıdır. Birbiriyle temasta bulunan aynı türden tanecikleri içeren 1 ve 2 fazlarını göz önüne alalım. 1 taneciğinin 1 fazındaki μ_i^1 , 2 fazındaki μ_i^2 dir. Yüksüzsüz bir taneciğin 1 fazından 2 fazına geçebilmesi $\mu_i^1 - \mu_i^2$ farkına bağlıdır. Dengede $\mu_i^1 = \mu_i^2$ dir. Kimyasal potansiyel taneciğin faz içinden alınıp $\mu=0$ olan çok seyreltik bir ortama getirilmesi için gerekli işin işaretçe tersidir.

Bir mol elektrik yüklü taneciklerin benzer biçimde transferleri için sadece kimyasal kuvvetleri değil aynı zamanda elektrik kuvvetleride yenmek gerekir. Bu işin ölçüsüne Guggenheim, elektrokimyasal potansiyel ($\bar{u}$) adını verilmiştir.

Bir fazda bir i oluşturanın $\bar{u}_i$ elektrokimyasal potansiyeli şu bağıntıyla verilmiştir:

$$\tilde{u}_i = \mu_i + z_i F \phi \quad (2.12)$$

Bu bağıntıda μ_i , i oluşturanın kimyasal potansiyeli; $z_i F \phi$ terimi de oluşturanın $z_i F$ molar yüküyle fazın ϕ iç elektrik potansiyelin çarpımıdır. Burada $\tilde{u}_i$ ve μ_i Joule/Mol, ϕ volt, $F=96494$ C dur. (2.11) göz önüne alındığında (2.12) bağıntısı da şöyle yazılabilir:

$$\tilde{u}_i = \mu_i + z_i F \psi + z_i F \chi \quad (2.13)$$

Yukarıda da söylendiği gibi ψ dış potansiyeli ölçülebilen bir miktardır, çünkü aynı fazdaki potansiyel farkıdır. Buna karşılık χ (dolayısıyla ϕ) ölçülemezler. Bu zorluğu önlemek için, bir başka büyüklüğün yani,

$$\alpha_i = \mu_i + z_i F \chi \quad (2.14)$$

bağıntısıyla tanımlanan gerçek bir potansiyel kabul edilmiştir. (2.14) gözönüne alındığında gerçek potansiyel şöyle yazılabilir.

$$\alpha_i = \tilde{u}_i - z_i F \psi \quad (2.15)$$

α_i 'ye çıkış işi denir ve fazdan bir mol i cismini çıkarmak için gerekli iştir. (2.15)ye göre çıkış işi, kimyasal ve elektrik katkılardan oluşmaktadır; sonuncu, elektrik çift tabakayı geçmek içindir. α_i fonksiyonunu özellikle elektronlar halinde bir çok metal ve yarı iletken, fotoelektrik, termoiyonik ve kolorimetrik yöntemlerle belirlenmiştir. Metallerde pozitif iyonların çıkış işleri, termodinamik çevrimleri yardımıyla elektronlar için olan değerlerden hesaplanabilir.

2.6.2 Basit elektrot potansiyelleri

Ortak bir i türüne sahip 1 ve 2 fazları temasa getirildiğinde yüksüz tanecikler halinde 1 fazdan 2 fazına geçme eğiliminin ölçüsü $\mu_i^1 - \mu_i^2$ farkıyla verilmiştir. Oysa elektrik yüklü tanecikler için bu $\tilde{u}_i^1 - \tilde{u}_i^2$ farkıyla verilmiştir. Yüksüz tanecikler için denge koşulu $\mu_i^1 = \mu_i^2$ yüklü tanecikler için ise, (2.16) deki gibidir

$$\tilde{u}_i^1 = \tilde{u}_i^2 \quad (2.16)$$

Yani faz sınırın her iki yanında elektrokimyasal potansiyeller birbirine eşittir.

Eğer elektrot-elektrolit sınırından bir tek yüklü tanecik (iyon ya da elektron) geçerse böyle bir elektroda basit elektrod ya da birinci sınıftan elektrod denir ve bu halde birtek elektrod reaksiyonu vardır. Örneğin bir metal kendi iyonlarını içeren bir çözeltiye batırılacak olursa

katyona göre reversibil birinci sınıftan bir elektrot elde edilmiş olur. Örneğin bir gümüş elektrod şöyledir:



Bu basit elektrotta potansiyele neden olan reaksiyon şöyledir:



ve elektrokimyasal potansiyeller birbirine eşit oluncuya kadar devam eder ve şöyle yazılabilir:

$$(\mu_i + z_i F \phi)^1 = (\mu_i + z_i F \phi)^2 \quad (2.19)$$

$$\Delta \phi = \phi^1 - \phi^2 = (\mu_i^2 - \mu_i^1) / z_i F = E \quad (2.20)$$

E, denge Galvani potansiyel farkıdır. Öte yandan bir i oluşturanın kimyasal potansiyeli şu bağıntıyla verilmiştir:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (2.21)$$

Burada μ_i^0 standart potansiyel, a_i de i oluşturanın aktivitesidir. Katı fazın kimyasal potansiyeli standart potansiyeline eşit olduğu düşünülür ve $z_i = 1$ alınırsa (2.20) şu şekilde yazılır:

$$E = -\frac{\mu_{\text{Ag}^+}^0 - \mu_{\text{Ag}^0}^0}{F} + \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Ag}^+} \quad (2.22)$$

$$\frac{\mu_{\text{Ag}^+}^0 - \mu_{\text{Ag}^0}^0}{F} = E^0 \quad (2.23)$$

Alınırsa,

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln a_{\text{Ag}^+} \quad (2.24)$$

(2.24) bulunur. E standart Galvani potansiyel farkıdır ve $a_{\text{Ag}^+} = 1$ olduğu zamanki potansiyeldir.

Kimi metal temasta bulunduğu çözeltiye pozitif yüke, kimi ise negatif yüke sahiptir. Kendi iyonlarını içeren bir çözeltide bir metalin çözünme eğilimi metale özgüdür. Nernst bu eğilime metallerin çözünme basıncı demiştir. Nernst'e göre bir metal kendi iyonlarını içeren bir çözeltiye batırılmış ise, metal çözeltiye iyon (pozitif) göndermeye çalışır; çözeltideki iyonlar

da osmotik basınçların gereği olarak onlar da metalin yüzeyinde toplanmaya çalışırlar. O halde metalin pozitif ya da negatif oluşu bu iki karşıt basıncın değerlerine bağlıdır.

2.6.3 Nernst Denklemi

Yukarıda elektrokimyasal potansiyelden yararlanmak suretiyle gümüş elektrod halinde (2.24) basit elektrod potansiyel bağıntısını (Nernst Denklemi) bulduk. Aynı sonuca bir pilin E.M.K. bağıntısının eldesindeki yöntemle de varmak mümkündür.

Bir pilin toplam kimyasal reaksiyonu elektrotlarda oluşan reaksiyonların toplamıdır. Aynı şekilde bir pilin E.M.K. i de sıvı/sıvı temas potansiyeli ihmal edildiği takdirde, yarım pillerin yani basit potansiyellerinin cebrik toplamına eşittir. Elektrottaki tersinir reaksiyon şöyle olsun:



Burada z elektrot reaksiyonu anında taşınan elektrik yük sayısıdır. Daha önce bir pilin E.M.K. i için yapılan düşünce birimi tekrarlandığında elektrod potansiyeli için,

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_K^k \cdot a_L^l \dots}{a_A^a \cdot a_B^b \dots} \quad (2.26)$$

(2.26) bağıntısı bulunur. Burada a lar reaksiyonda yer alan cisimlerin aktiviteleridir. Genellikle saf katı ve sıvıların aktiviteleri 1'e eşit alınır Reaksiyonun her iki tarafındaki cisimlerin aktiviteleri bire eşit alındığında $E = E^0$ olur. E^0 'a elektrot potansiyeli denir.

2.7 Elektrokimyasal Kinetik

2.7.1 Elektrokimyasal Çift Tabaka

Yüklü parçacıklar için, metal-çözelti ara yüzeyine tutunma veya itilme gibi bir eğilim vardır. Bu durum yük farkında bir artışa neden olur ve elektrot yüzeyinde elektrottan farklı özelliklere sahip elektrokimyasal çift tabaka diye bilinen yeni bir arayüzey oluşur. Helmholtz, Gouy Chapman ve Gouy Chapman Stern modelleri dahil olmak üzere çeşitli kuramsal çalışmalarla, bu tabakanın yapısı incelemiştir. Uygulanan gerilimle yüklerin ayrılımlarındaki değişimin sonucu olarak, elektrokimyasal çift tabakanın bir kapasitansı olduğu bellidir.

2.7.2 Tek Bir Kimyasal Reaksiyonun Kinetiği

2.7.2.1 Aktivasyon Kontrolü

Aktivasyon kontrollü reaksiyon, reaksiyon oranının yalnızca elektrokimyasal yük transferiyle ayarlandığı reaksiyona denir. Bu, Buttler Volmer eşitliğinde tanımlanan kinetiğe bir artış verir.

$$i = i_o \left[\exp\left(\frac{\alpha_A n F}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_C n F}{RT} \eta\right) \right] \quad (2.27)$$

Buttler Volmer eşitliğinde i_o akım yoğunluğunu, η potansiyel farkı, n elektron sayısını, α_A ve α_C sırasıyla anodik ve katodik transfer katsayılarını belirtir.

ButtlerVolmer eşitliği bütün potansiyel aralıkları için geçerlidir, o zaman sınırlı potansiyel aralıklarına göre daha basit, yaklaşıma dayanan denklemler elde edilebilir.

Büyük potansiyeller için Tafel denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\log i = \log i_o + \frac{\alpha_A n F}{2.303 RT} \eta \quad (\eta > 50 mV) \quad (2.28)$$

$$\log i = \log i_o - \frac{\alpha_C n F}{2.303 RT} \eta \quad (\eta < -50 mV) \quad (2.29)$$

veya daha genel olarak

$$\eta = a + b \log i \quad (2.30)$$

Küçük potansiyeller için ($\alpha_A = \alpha_C = 0.5$)

$$i = i_o \frac{n F}{RT} \eta \quad (2.31)$$

$$R_{CT} = \frac{\eta}{i} = \frac{RT}{n F i_o} \quad (2.32)$$

2.7.2.2 Çoklu Reaksiyonlar Kinetiği

Birden fazla reaksiyonun olduğu durumlarda oluşan kinetik, karışık-potansiyel kuramı ile açıklanır. Bu kurama göre toplam akım, süreçte oluşan tüm münferit reaksiyonlardan ileri gelen akımların toplamına eşittir. Serbest korozyon koşullarında, negatif akımların toplamı pozitif akımların toplamına eşit olduğunu vurgular.

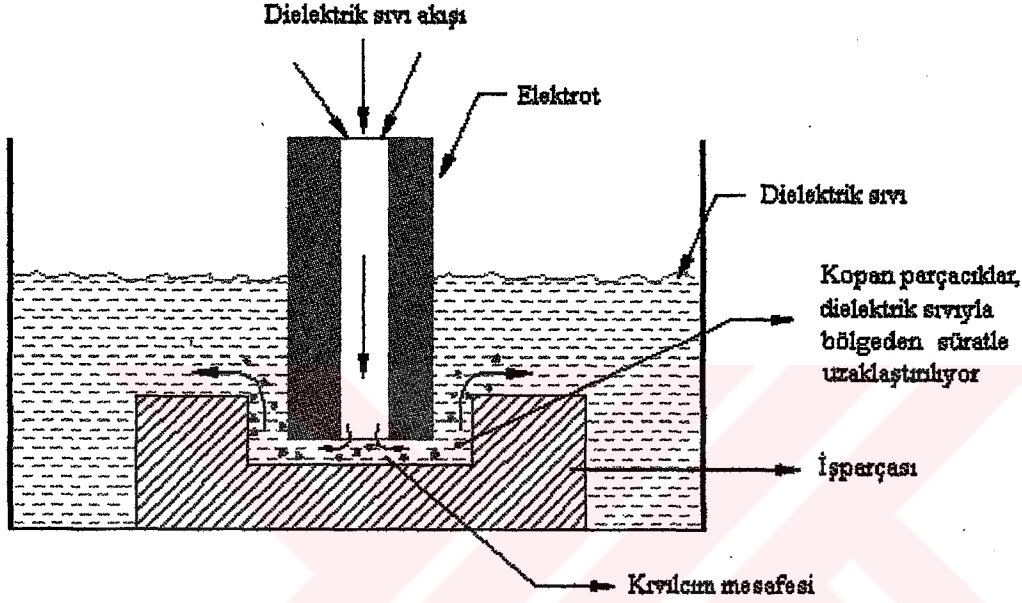
Karışık-potansiyel kuramı, korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve akım yoğunluğu (i_{corr}) kavramlarını da gündeme getirir. E_{corr} , anodik ve katodik akımların toplamının sıfır olduğu durumdaki potansiyeldir. Bazı durumlarda önemli bir parametre olan i_{corr} anodik ve katodik reaksiyonların oranını tanımlar. Bütün anodik reaksiyonların gerçekleşmesini sağlamak, metalin okside olmasını beraberinde getirir ve i_{corr} metalin korozyon oranıdır.



3. MEKANİK OLMAYAN METAL AŞINDIRMA TEKNİKLERİ

3.1 EDM Teniği ile Metallerin Aşındırılması

“Electrical Discharge Machining” (EDM) kısa adlı yöntem elektrik deşarjından veya arkından yararlanarak metali aşındıran bir yöntemdir. Aşındırılacak veya işlenecek yüzey, istenilen durum elde edilinceye değin güçlü elektrik pulslarıyla bombardıman edilir.



Şekil 3.1 EDM'nin çalışma ilkesi

Bu işlemi gerçekleştirmek için, elektrot - iş parçası ilişkisini kurabilmek üzere bir mekanik düzeneğe, elektrik sinyalleri için bir güç kaynağına ve arkların minimum uzaklıkta oluşabilmesi için bir dielektrik sıvıya gereksinim vardır. Elektrik boşalmaları bir DC gerilim kaynağı tarafından elektrod ve iş parçası arasındaki boşluğa uygulanır. Elektrotun iş parçasına yaklaştırılmasıyla aradaki boşluk yeterli değere ulaşır; o zaman dielektrik sıvı iyonize olur veya başka bir deyişle “yırılır” bu da boşalma oluşumunu sağlar (Hardisty vd.,1997).

Yüksek enerji arklarıyla malzemeden buharlaşma, eritme etkisiyle çok ufak parçalar birer kırater oluşturularak kopartılır. Kopan parçacık dielektrik sıvının soğutma etkisiyle katılaşır ve mikrotalaş halini alır.

Bir arkla meydana gelen kıraterin yada mikrotalaşın ufak oluşu, saniyede 200.000'den fazla arkın uygulanmasıyla kaydadeğer bir hal alır.

EDM tekniği geleneksel metal işleme yöntemlerinden iki noktada farklılık gösterir. EDM sadece elektriksel olarak iletken olan metallerde kullanılabilir ve aşındırma her zaman elektrottan daha büyük bir gedik açar. Arada dielektrik sıvı kullanılmasındaki amaç, elektrik arkının en kısa mesafede meydana gelmesini sağlamak içindir.

Parça kopartıldıkça elektrodu işparçasına yaklaştırma işlemi geri besleme ile gerçekleştirilir. Elektrot hiç bir zaman iş parçasıyla temas haline gelmez. "Gap" adı verilen boşlukta meydana gelen potansiyel farkı, önceden belirlenmiş bir gerilimle karşılaştırma halindedir. Parça koptukça mesafenin artması ve bunun sonucunda gerilimin değişmesi, geri beslemenin temelini oluşturur. Gerilim değiştikçe, elektrodun hareketinden sorumlu servo motor harekete geçer. Elektrod gelen sinyaller doğrultusunda yaklaştırılır ya da uzaklaştırılır.

3.1.1 EDM parametreleri

EDM'de aşındırma oranı ve yüzey duyarlılığı, akım, frekans ve elektrot besleme sistemiyle kontrol edilir. Akım kesme işleminde kullanılan elektrik enerjisini veya kesme gücünü belirler. Bu parametre istenen yüzey haline ulaşabilmek için belirli bir aralıkta ayarlanarak kesme oranını belirler. Az önce anlatılanları iki faktör mümkün kılar; bunlar çıkış gücü ve yüzde-etkin(percent-on time)değeridir. Sabit akım ve on-time değerlerinde çıkış gücünün artırılması akımın yükselmesine, bu da metal kopartma oranının artmasını sağlar. 1 A'lık bir boşalma 2 A'lık bir boşalmanın yarısı kadar parça kopartır. Kopan parçanın büyüklüğü, arkın parçaya nedenli nüfuz ettiğinin bir ölçüsüdür.

Şayet frekans ve çıkış gücü sabit tutulursa on-time süresinin artırılması her boşalmada daha fazla parçanın kopartılmasını sağlar. Etkin-sürenin artırılması, akımın artırılmasıyla aynı etkiyi gösterir.

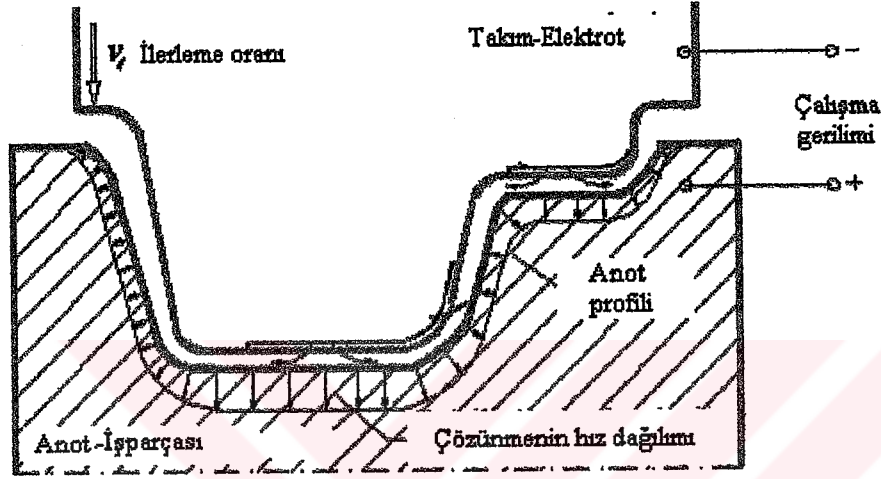
Çıkış gücü ve etkin-sürenin sabit olduğu bir durumda frekansı değiştirmek yüzey temizlik oranı ve deplasman boşluğunu etkiler. Toplam enerji yaklaşık olarak aynı kalır. Yüksek frekansta enerji pek çok küçük boşalmadan ibarettir. Frekans azaldıkça bu boşalmaların(deşarjların) sayısı azalır, ancak etki süresi artar.

Boşalmayı oluşturmanın iki yolu vardır. Bunlardan biri saf vuru (pure pulse) durumudur ve hiç kondansatör kullanılmadan gerçekleştirilir. Kesmenin hızını ve hassasiyetini etkin-süre ve çıkış gücü belirler. Diğeri ise vuruların kondansatörü beslediği kapasitör modudur. Bu modda gaptaki durum uygun oluncaya kadar enerji kondansatörde depolanır. Daha sonra enerji ani olarak boşaltılır. Dolayısıyla çok yoğun ve yüksek bir boşalma oluşur .

Metal koparma oranı kapasitör tarafından belirleneceği için, kapasitör modunda kondansatörün önceden belirlenmesi gerekir. Yüksek kapasitans yüksek koparma oranı elde edilmesini sağlar.

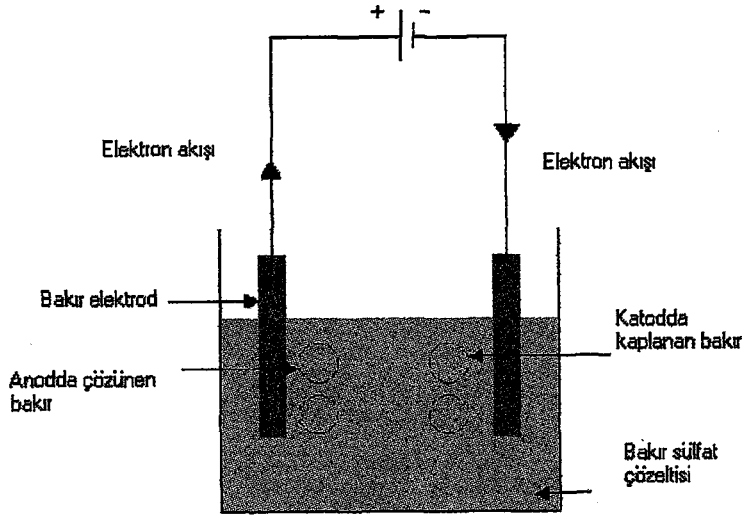
3.2 Elektrokimyasal İşleme (ECM)

Elektrokimyasal işleme (ECM), bir elektrolitik pil içerisinde işparçası(anot) ve takımın(katod) elektroliz sürecinde kontrollü bir elektrokimyasal çözünme meydana getirmesidir.



Şekil3.2 Elektrokimyasal İşlemenin (ECM) ilkesi

Elektroliz, bir sıvı çözelti içersine batırılmış iki elektrod arasından elektrik akımının geçmesiyle meydana gelen kimyasal olaya denir. En genel örneği bakır sülfat çözeltisi içersine batırılmış iki bakır elektrodun Şekil 3.3 deki gibi bir doğru akım kaynağına bağlanmasıyla gerçekleştirilenidir.

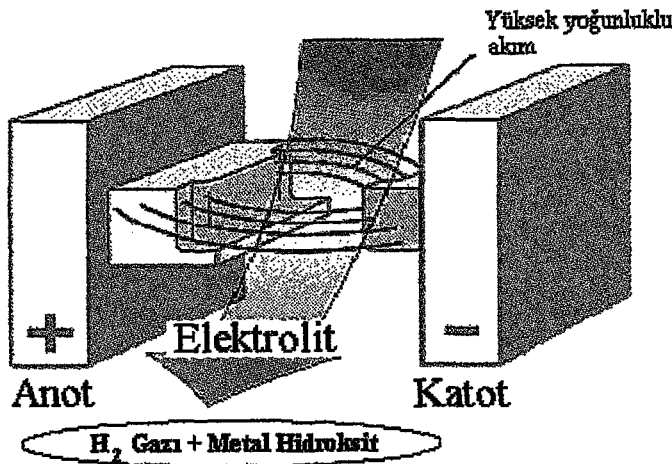


Şekil 3.3 Elektrokimyasal Pil

Şekil (3.3) teki gibi elektrot ve elektrolitten meydana gelen bir sisteme elektrolitik pil, elektrotlarda oluşan reaksiyonlara da anodik ve katodik reaksiyonlar denir.

Elektrolizin tipik bir uygulaması, katod-işparçasının yüzeyine metal moleküllerinin yapışmasıyla meydana gelen, elektrokaplama ve elektroform yöntemidir. Akım yoğunlukları 10^{-2} ile 10^{-1} A/cm² arasında değişir ve kaplamanın kalınlığı da bazen 1 mm'den kalın olabilir.

Anodik çözünme olayına bir örnek ise elektroparlatmadır. Burada parlatılacak olan işparçası, bir elektrolitik pil içersinde anodu oluşturur. 10^{-1} A/cm² gibi bir tipik akım yoğunluğundan bahsedilebilir ve parlatma genelde 10 nm civarındaki pürüzlerin işparçası yüzeyinden kopartılmasıyla meydana gelir. Her iki yöntemde de elektrolit durağan veya çok ağır hareketlidir.



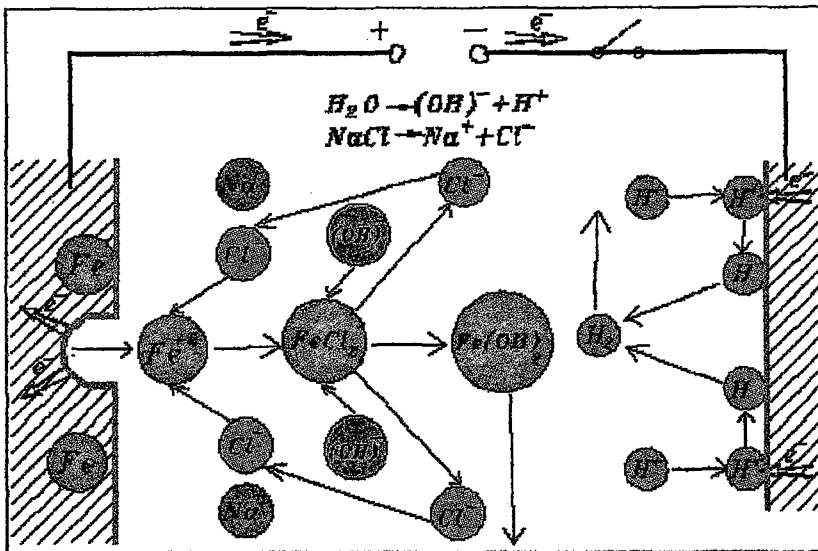
Şekil 3.4 Anodik çözünme

Elektroliz ile ECM prensibini birbirinden ayıran en önemli özellik, çözünen maddenin başka bir elektroda doğru hareket etmemesidir. Elektrokimyasal pilde dikkat edilecek olursa anodda çözünen bakır katoda sıvanmaktadır, yani çözünen madde yük farkından dolayı diğer elektroda doğru yönelir. Fakat ECM de, çözünen madde elektrolitle kimyasal olarak bir bileşik oluşturduğu için çöker. Burada olay, akımın akması için gerekli fiziksel şartların sağlanması için meydana gelir.

Düşük gerilimlerle, işparçası ile elektrod arasından yüksek yoğunluklu doğru akımın geçmesi yönünden elektrokimyasal işleme (ECM), bir anodik çözünme olan, elektrokimyasal parlatmaya benzer. Anodik yüzeyde (işparçası), ters kaplama reaksiyonuyla metal, metalik iyonlara ayrılır; böylece takımın veya elektrodun şekli işparçasına veya anoda ters olarak kopyalanmış olur.

Tepkimenin meydana geldiği bölgedeki talaşın (çözünme ürünlerinin ör: metal hidroksitleri), ısının ve gaz baloncuklarının uzaklaştırılması için; ayrıca anod civarındaki ara bölgede kütle/yük transferinin yoğunluğunun korunması için elektrolit, elektrotla işparçası arasındaki bölgeden hızla akmaya zorlanır.

Şekil (3.2) deki gibi takım yani elektrot işparçasıyla arasındaki gap adı verilen mesafeyi korumak için sürekli olarak iş parçasına yaklaştırılır. Bu yaklaşma aşınma oranında olur. Elektrotlar arasına bir gerilim uygulandığında anot ve katotta çeşitli reaksiyonlar meydana gelir.



Şekil 3.5 ECM yöntemiyle demirin sodyum klorür elektrolitle çözünmesi

Şekil (3.5) te tuzlu suyun elektrolit(NaCl) olarak kullanıldığı bir ortamda, demirin çözünme reaksiyonunu gösterilmiştir.



Negatif yüklü iyonlar: $(\text{OH})^-$ ve Cl^- anoda ve pozitif yüklü iyonlar: H^+ ve Na^+ da katoda doğru hareket ederler.

Anodda (3.2) reaksiyonu meydana gelir



Katoddaki reaksiyon, hidroksil iyonlarının ve hidrojen gazının eldesi şeklindedir.



Bu elektrokimyasal reaksiyonların sonucu olarak, demir iyonları diğer iyonlarla birleşerek, demir hidroksit $\text{Fe}(\text{OH})_2$ meydana getirerek çöker.

Demir hidroksit daha ilerde ferrik hidroksit oluşturarak ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), su ve oksijenle reaksiyona



girebilir; ama bu elektrolizin bir parçası değildir.

Tuzun(ör. NaCl) elektrokimyasal reaksiyonda tükenmemesinden dolayı, sabit elektrolit konsantrasyonu sağlamak için süreç ilerledikçe su eklenmesi gerekir. Sözü edilen bu metal-elektrolit kombinasyonunda, elektroliz anodda metalin çözünmesi ve katodda hidrojen gazının açığa çıkmasından ibarettir. Elektrodlarda başka hiçbir olay meydana gelmez.

ECM diğer işleme yöntemlerine göre yeni ve bazı avantajlar sunan bir anodik dissolüsyon yöntemidir. Metal kopartılması önceden şekillendirilmiş elektrodla gerçekleştirilir; böylece işlenen parçaların her biri kendine özgü şekile, ölçülere ve yüzey hassasiyetine sahip olur.

Süreç, genelde 8 den 30 V'a kadar olan düşük gerilime bağlı olarak 10 ile 100 A/cm² arasında değişen yüksek akım yoğunluklarıyla, 0.1 ile 20 mm/dk arasında değişen ilerleme hızları eşliğinde, elektrodun metal kopartılma yönüne doğru ilerletilmesi suretiyle, çok küçük bir işleme boşluğu sağlayarak gerçekleştirilir. İşlem bölgesinde açığa çıkan hidrojen gazı, ısı ve çözünmüş maddeler o bölgeden, yüksek süratli elektrolit akışıyla uzaklaştırılır(5-50m/s).

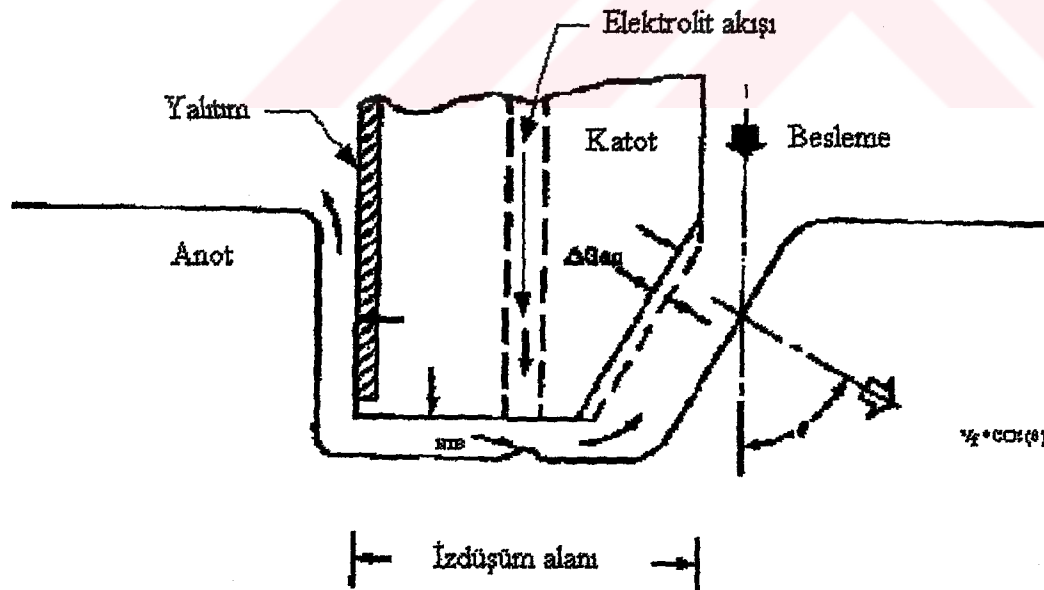
Mekanik olmayan bir işleme tekniği olması dolayısıyla, ECM elektriksel olarak iletken herhangi bir malzemenin, mekanik özelliğine bağlı olmaksızın yüksek talaş kaldırma oranlarıyla işlenmesini mümkün kılar. ECM’de talaş kaldırma oranının malzemenin sertliğine, yoğunluğuna ve mekanik özelliklerine bağlı olmadığına altını çizmek gerekir.

Başka malzemelerle fiziksel olarak(kesme) işlemesi güç karmaşık parçalar ECM ile rahatlıkla çalışılabilir; zira iş parçasından daha sert bir malzemeyle kesme zorunluluğu yoktur, dolayısıyla takım aşınmasından da söz edilemez (Khair, 1996).

İş parçasıyla elektrod arasında temas olmamasından dolayı ECM, ince duvarlı, narin, kırılgan ve yüksek yüzey temizlik hassasiyetine sahip parçaların üretiminde tercih edilir.

3.2.1 ECM Parametreleri

Elektrokimyasal işlemede metal kopartma oranı(MRR;metal removal rate) akım yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Temel olarak metal koparma oranını etkileyen faktörler; gerilim, elektrod ilerleme hızı, elektrolit iletkenliği, elektrolit kompozisyonu, elektrolit akışı ve iş parçasının cinsidir.



Şekil 3.6 ECM de yer alan parametreler

Pek çok ECM işleminde gerilim sabit tutulur. Akım koparma boşluğundaki dirence bağlıdır ve bu direnç iletkenlik ve gap etrafındaki mesafeye bağlıdır.

Koparma boşluğu (gap) ilerleme hızıyla ters orantılıdır: “Gap civarındaki mesafe ilerleme hızının bir fonksiyonudur çünkü; katod iş parçasına daha yüksek bir hızda yaklaştırılırsa gap, direnci düşürerek azalacaktır. Direncin düşmesiyle akım artış gösterir, bundan dolayı işleme hızı sistem dengeye oturuncaya kadar artar”.

Daha yavaş hızlarda bahsedilenin tam tersi meydana gelir. Gap’ın artmasıyla direnç yükselir ve akım düşer. Bunun sonucu olarak metal koparma oranında azalma gözlenir.

İlerleme hızı aynı zamanda akımla doğru orantılıdır. Örnek vermek gerekirse; ilerleme iki katına çıkartılırsa akım da iki katına çıkar.

Ayrıca ilerleme hızı gerçekleştirilen operasyonun cinsine göre de değişir ve en iyi sonuçlara ulaşabilmek üzere ayarlanabilir.

Çizelge 3.1 ECM deki çeşitli ilerleme hızları

Operasyon	İlerleme hızı [mm/min]
Yuvarlak delikler	2.2
Basit oyuklar	2.2
19 X 10 ³ mm ² yüzeyler	1.3
Açılı yüzeyler	7.6

$$\frac{MRR \cdot h}{A_w} = V_f \quad (3.5)$$

İlerleme hızını hesaplamak için V_f metal koparma oranı (MRR) iz-düşüm alanına bölünür. Eşitlik (3.5) de h verimi ve A_w iz-düşüm alanını temsil etmektedir. Genellikle verim yüzde 80-90 arasında değişir.

MRR, Formül (3.6) da olduğu gibi hesaplanır:

$$\frac{\text{atom ağırlığı}}{\text{valans} * \text{yoğunluk} * 96,494} = \text{spesifik koparma oranı}$$

(3.6)

Bu Faraday'ın metal koparmayla ilgili ikinci kanunudur. Formüldeki 96.494 bir gram maddeyi kopartmak için gereken elektrik enerjisini temsil eden bir sabittir. Süreç sırasında akımın hepsi madde kopartmak için kullanılmaz. Elektriksel iletkenlik kesme boşluğu civarındaki direnci etkiler. İletkenliği etkileyen başka faktörler de kontrol edilmesi gereken, konsantrasyon ve sıcaklıktır. Bu iki faktörden birinin artması iletkenliğin yükselmesini sağlar.

Elektrolit kompozisyonu iletkenliği, metal koparma oranını ve parçanın yüzey karakteristiğini doğrudan etkiler. Çünkü kompozisyondaki değişim, akım geçişini ve meydana gelen reaksiyonları etkiler. Hangi tür metale hangi elektrolitin uygun olacağı veya genel olarak elektrolit kompozisyonu önceden deneysel olarak bulunur.

Diğer bir konu da elektrolit akışıdır. Elektrolit akışı, elektrolitin sıcaklığının artışı etkiler. Akış karakteristiği yüzey hassasiyetini tayin eder. Şayet reaksiyon bölgesinde iyi bir türbülans tesis edilirse temiz (pürüzsüz) bir yüzey elde edilir. Ayrıca akış arda kalan talaşın da reaksiyon bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlar.

3.2.2 Kullanılan Elektrolitler

Elektrolit çözeltisi içerisindeki anyonlar, anodun yüksek hızda çözünmesine imkan tanımalıdır. Anyonlar, anodik metalle reaksiyona girerek anodda pasif bir film tabakası oluşturmamalıdır. Pratikte Cl, SO₄, NO₃, ClO₃ ve OH anyonlarını içeren elektrolitler tercih edilir.

Katod şeklinin değişmeden kalması için, elektrolit içerisindeki katyonlar katod yüzeyine yapışmamalıdır. Bunu sağlamak için alkalın potasyum ve sodyum gibi metalik katyonlar içeren elektrolitler kullanılır.

Elektrolit direncini ve ısı oluşumunu düşürmek için elektrolitin iyi iletken olmasına; ayrıca girintili şekillerde elektrolit akışının düzgün olarak gerçekleşmesini sağlamak için de düşük viskoziteye sahip olması gerekir.

Asit elektrolitler, reaksiyon ürünlerinin elektrotta çözünmesini gerektiren küçük delik delme işlemlerinde kullanılır. Genelde doğal tuzlar kullanılır.

İşleme süresince elektrolitin, PH ve içerik gibi karakteristik özelliklerini koruması, ayrıca sıcaklıktan ileri gelen viskozite ve iletkenlik değişikliklerinde küçük olması beklenir.

ECM’de ölçü kontrolünde elektrolit önemli bir rol oynar. Bu bağlamda elektrolitin en önemli özelliğini, akım verimiyle akım yoğunluğu arasındaki ilişki teşkil eder.

3.2.3 ECM ekipmanı

ECM de işlenecek parçalar geniş bir değişim alanına sahiptir. Şekil, büyüklük ve parça kopartma oranı buna örnek gösterilebilir. Bu değişik kullanım alanı ECM makinalarının tasarımlarını da etkiler. Genel maksatlı(üniversal), özel amaçlı veya tek işlemlik olabilirler.

Genel amaçlı ECM makinaları, adından da anlaşılacağı gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir ve işlenecek parçaların büyüklüğü dikkate alınarak tasarlanırlar. Çünkü işleme sırasında makinanın karşılaşılabileceği bir faktörü teşkil eder. ECM de elektrot tasarımı EDM den daha karmaşıktır hatta başlı başına bir uzmanlık alanıdır. Elektrot tasarlanırken pek çok faktör göz önünde bulundurulur. Yapılacak işe göre bu faktörler belirlenir ve elektrot tasarımına geçilir.

İş parçasında akımın nereye uygulanacağı önem taşır. Tabla işleme alanına yaklaştırıldıkça sızıntı akımlarında, güç kaybında ve işlenmeyecek bölgelere elektrolit sıçramalarında bir düşüş gözlenir. Bu nedenle iş ile elektrot arasındaki mesafe kontrolü tabla yerine elektrottan yapılır. Tabla koresiv bir ortamla iç içe olacağı da düşünülerek imal edilir. (Bhattacharyya ve Sorkhel, 1999)

3.2.4 Güvenlik ve Artık Madde Tahliyesi

ECM sürecinde açığa çıkan gazların ve kimyasal maddelerin solunması veya yutulması insan sağlığı açısından ciddi sorunlara yol açabilir.

ECM makinaları ayrı bir bölgede kurulup çalıştırılmalıdır. Reaksiyon sonucunda hidrojen gazının açığa çıkması, ortamdaki yangın alarmı sensörlerinin harekete geçmesini sağlar. Dolayısıyla sık aralıklarla hidrojen gazı seviyesi ölçülmeli ve havalandırma ihmal edilmemelidir.

Yüksek akımın meydana getireceği manyetik alanın engellenmesi için tek parça kablolar yerine koaksiyel kablolar tercih edilmelidir. Elektrik şokundan korunmak için de operatörün yerden isole edilmesi gerekir.

Zehirli gazların, tozların, buharların ve diğer maddelerin azami güvenlik konsantrasyonu çizelge (3.2) te verilmiştir.

Çizelge 3.2 Reaksiyon ürünlerinin azami güvenlik konsantrasyonları

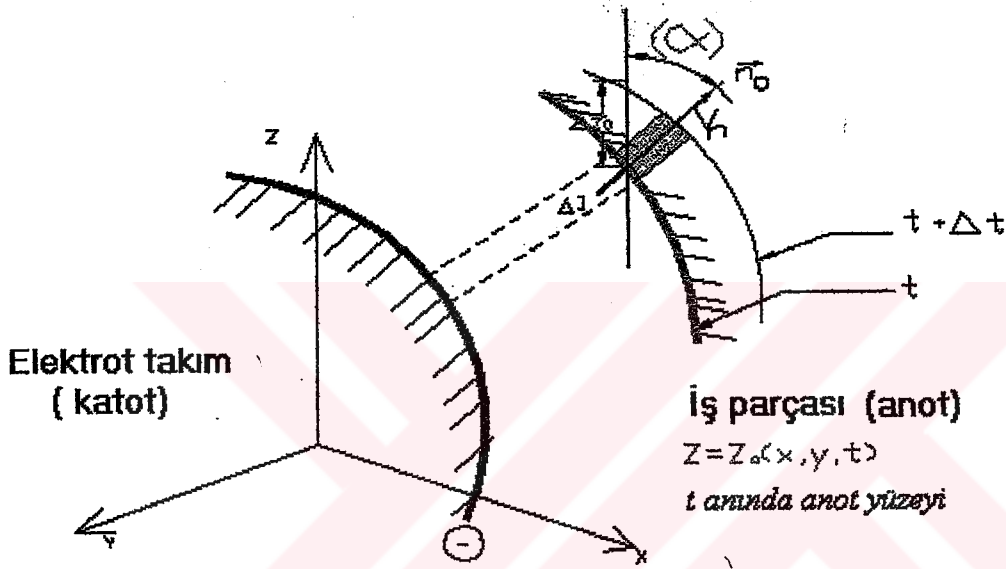
<u>Madde</u>	<u>MSC,mg/m³</u>
Asetik asid	5
Aseton	200
Alüminyum ve alaşımları	2
Amonyak	20
Karbonhidratlar	300
Karbon monoksit	30
Klor	1
Klordioksit	0.1
Hidroflorikler	1
Hidroklorik asid	5
Nikel, Nikeloksit	0.5
Nitrojenoksitler	5
Ozon	0.1
Fosforhidrat	0.1
Sülfirik Asid	10

4. ECM'NİN ESASLARI

4.1.Elektrokimyasal İşlemenin Temelleri

4.1.1.Elektrokimyasal şekil vermenin prensibi

İşleme yüzeyi üzerinde düzgün olmayan, metal koparma oranındaki dağılım, iş parçasının yüzeyinin değişmesine sebep olur. ECM de bu oran, anot yüzeyine dik olan anodik çözünmenin hızına eşittir (V_n).



Şekil 4.1 Elekytrokimyasal yöntemle şekil vermenin şeması

Anot'u referans alan koordinat sisteminde, çözünme hızı ifadesini basite indirmek için şekil (4.1) deki gibi anot yüzeyinde ΔA alanına sahip elemanter bir yüzey elemanı belirlenir ve bu yüzeyden ΔI akımı aktığı varsayılır. Çözeltiye, anottan metal iyonlarıyla beraber geçen elektrik yüklerinin transferi çözünme süreci açısından önemlidir ve anotta meydana gelen anyonlar (ör. Oksit, klorit) bir yan etki oluşturur. Metal kopartımından sorumlu olan ΔI_+ akımının toplam akım ΔI 'ya oranına, anodik çözünmenin akım verimi denir.

$$\eta = \frac{\Delta I_+}{\Delta I} \quad (4.1)$$

Akım verimini yüzdesel olarak vermek daha uygundur. Akım verimi η , iş parçasının malzemesine, elektrolitin cinsine, akış hızına ve sıcaklığına bağlıdır. %100 lük bir verim akımın tamamının çözünen metal iyonları tarafından sağlandığını; sıfır yüzde ise akımın metal çözünmesi olmadan aktığını gösterir.

Pek çok referansta akım veriminin, gözlemlenen kütle değişiminin Faraday kanunlarının öngördüğü kuramsal kütle değişimne oranı olduğu söylenir.

Metal koparma olayının sadece elektrokimyasal yolla meydana geldiği düşünüldüğünde, hidrodinamik erozyon, aşındırıcı erozyon gibi mekanik olayların olmadığı, metal koparma oranının sadece Faraday'ın birinci kanunundan hesaplandığı varsayılır. Faraday'ın birinci kanununa göre, Δt zamanda ΔI_+ akımının koparttığı kütle, Δm aşağıdaki gibidir.

$$\Delta m = k \Delta I_+ \Delta t \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklemde k , 1coulomb'luk birim yükü taşıyan iyonlarla eşit kütleye sahip olan anot malzemesinin, elektrokimyasal eşdeğeridir (ör. 1 A.s). Faraday'ın ikinci kanununa göre reaksiyon için elektrokimyasal eşdeğer aşağıdaki gibidir.



$$k = \frac{A}{zF} \quad (4.3)$$

Formül (4.3)'te A , M metalinin atom ağırlığı ve F Faraday sabitidir (96500 C). Reaksiyona katılan iyonların atom ağırlıkları ve valanslarının kullanıldığı A/z ifadesi kimyasal eşdeğeri vermektedir.

Örneğin, demir $A=55.85$ atom ağırlığına sahiptir. İki değerlikli durumda ($z = 2$) bu metal $k=29.10^{-5}$ g/As'lik bir elektrokimyasal eşdeğerliliğe sahiptir; üç değerlikli olgusunda ise $k=19.10^{-5}$ g/As olur.

Şayet bir alaşım, birbirinden bağımsız ve eş zamansız çözünmüş, her bir bileşeninin toplama göre n_i 'lik bir kesir olarak değerlendirileceği i elementten oluşmuş ise; bu elementlerin elektrokimyasal eşdeğerleri aşağıdaki formülden bulunabilir.

$$k = \frac{1}{F \sum \frac{n_i A_i}{A}} \quad (4.4)$$

Denklem (4.1)'den ΔI_+ çekilerek; denklem (4.2), çözünen madde Δm ve ΔA yüzey elemanından kopartılan madde kalınlığı Δh cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_m \Delta A \frac{dA}{dt} = \eta k \Delta I \Delta t \quad (4.5)$$

Yukarıda ρ_m iş parçasının (anot) yoğunluğudur. Türevin tanımında olduğu gibi tüm diferansiyel terimleri sıfıra doğru limitleri alınır, çözünme hızı için gerekli bağıntı aşağıdaki gibi olur.

$$V_n = \eta \frac{k}{\rho_m} i_a$$

$$V_n = K_v i_a$$

(4.6)

$$i_a = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A}$$

Formül (4.6)'ta göze çarpan parametrelerden i_a anottaki akım yoğunluğunu ve $K_v = \eta k / \rho$ elektrokimyasal işlenebilirlik katsayısını gösterir. K_v , birim elektrik yükü başına anotta çözünen madde miktarına eşittir ve çeşitli metotlar kullanılarak deneysel olarak bulunabilir. Çizelge 4.1 ve 4.2 te çeşitli malzemeler için K_v değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Çeşitli elementler için K_v değerleri

Metal	Atom ağırlığı (g)	Valans	Yoğunluk (g/cm ³)	İşlenebilirlik $K_v (\eta=1)$ (mm ³ /Adak)
Alüminyum	26.98	3	2.71	2.06
Bakır	63.546	1	8.97	4.39
		2		2.20
Demir	55.857	2	7.86	2.21
		3		1.47
Gümüş	107.9	1	10.5	6.39

Çizelge 4.2 Demir bazlı çeşitli alaşımlar için Kv değerleri

<i>Alaşım</i>	K_v ($h=1$) % 100 akım veriminde	
	$\text{mm}^3/\text{A.dak}$	$1000 \text{ in}^3/\text{A.dak}$
4340 Çeliği	2.18	0.133
17-4 PH	2.02	0.12324
A-286	1.92	0.117139
M252	1.8	0.109818
Rene41	1.77	0.107988
Udimet 500	1.8	0.109818
Udimet 700	1.77	0.107988
L605	1.75	0.106768

Faraday kanunundan, metal koparma oranı (MRR), birim zamanda koparılan madde miktarı olarak belirlenir ($Q_v = dm/dt$).

$$Q_v = K_v I \quad (4.7)$$

Metal koparma oranı ECM'de iş parçasının yapısal özelliklere bağlıdır ve toplam akımla orantılıdır. Örneğin, $K_v = 2 \text{ mm}^3/\text{Adak}$ olan ve 1000 A'lık bir güç kaynağının kullanıldığı ECM sürecinde metal koparma oranı Q_v , 2000 mm^3/dak dır.

ECM işleminde, spesifik enerji tüketimi diye bilinen kavram anot malzemesinin birim hacmini kopartmak için gerekli enerjiye denir ($e = dE/dv$). dt zamanında harcanan enerji şeklinde ve çözünen madde aşağıdaki gibidir.

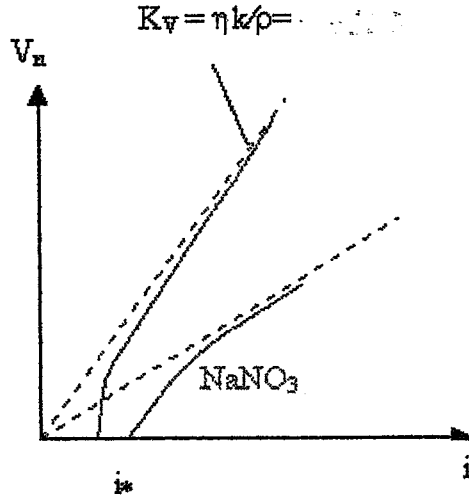
$$dE = U i dt \quad (4.8)$$

$$dv = K_v i dt \quad (4.9)$$

Dolayısıyla,

$$e = \frac{U}{K_v} \quad (4.10)$$

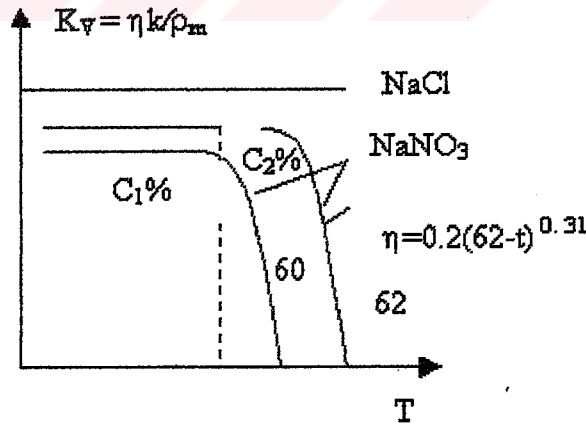
Akım verimi ve K_v elektrolite ve akım yoğunluğuna bağlıdır. Şekil 4.2 NaCl ve NaNO₃ elektrolitler için $K_v = K_v(i)$ fonksiyonunu gösterir.



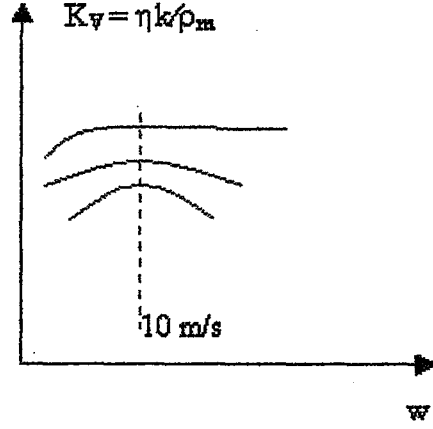
Şekil 4.2 NaCl ve NaNO₃ elektrolitler için K_v vs i fonksiyonu

Şekil 4.1.3 NaCl ve NaNO₃ elektrolitler için V_n vs i fonksiyonu

Bu şartlara uygun olarak, akım yoğunluğuna bağlı olarak çözünme hızındaki değişim yukarıda verilmiştir. İşleme hassasiyeti bakımından akım yoğunluğu azaldıkça K_v 'nin artması istenen bir durumdur.



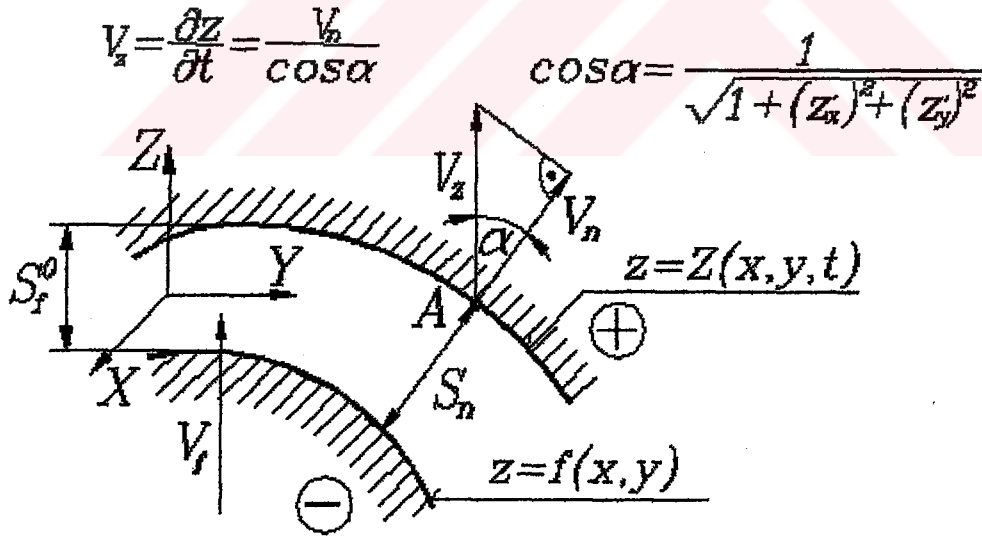
Şekil 4.3 NaCl ve NaNO₃ elektrolitler için K_v vs T fonksiyonu



Şekil 4.4 NaCl ve NaNO₃ elektrolitler için K_v vs w fonksyonu

Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4 te de görüldüğü gibi NaNO₃ NaCl'e göre daha düşük metal koparma oranına sahiptir ancak; hassasiyet açısından NaNO₃ elektrolit daha iyi sonuç verir. Anot üzerinde, zamanın fonksyonu olarak çözünme hızındaki bilinen dağılımla V_n , oluşacak şeklin değerlendirilmesi, kabul edilen yüzey tanımına göre değişir.

Anot yüzeyi aşağıdaki gibi, kartezyen koordinat çatısında $z = z_a(x, y, z)$ fonksiyonuyla temsil edilirse;



Şekil 4.5 Kartezyen koordinat sisteminde anot katod sistemi

Anotta z -eksenindeki yer değiştirme aşağıdaki hızda meydana gelir.

$$V_z = \frac{\partial z_a}{\partial t} \quad (4.11)$$

$$V_z = \frac{V_n(x_a, y_a, t)}{\cos \alpha(x_a, y_a, t)} \quad (4.12)$$

$x_a, y_a, z = z_a(x_a, y_a, t)$ anot üzerinde bulunan noktalardır. α ise yüzeyin birim vektörüyle (n_a) z-ekseni arasındaki açıdır.

$$\vec{n}_a = \left(\frac{\partial z_a}{\partial x}, \frac{\partial z_a}{\partial y}, -1 \right) \quad (4.13)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2}} \quad (4.14)$$

Yukarıda, yüzey birim vektörünün bileşenleri ve z-ekseniyle yaptığı açı görülüyor. Hız dağılımı V_z , eşitlik (4.14)'ta yerine konulursa, elektrokimyasal şekillenmenin kartezyen koordinatlardaki ifadesi elde edilmiş olur.

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_{v,z}(x_a, y_a, t) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y} \right)^2} \quad (4.15)$$

Anot yüzeyinin açıkça $F = (x, y, z)$ gibi bir formülle tanımlandığı varsayılır ve bu fonksiyonun da zamana göre türevi alınır,

$$\frac{DF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{dz}{dt} = 0 \quad (4.16)$$

(4.16) fonksiyonun gradyentiyle beraber,

$$\nabla F = \text{grad } F = \frac{\partial F}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \vec{k} \quad (4.17)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_x, \quad \frac{dy}{dt} = V_y, \quad \frac{dz}{dt} = V_z \quad \text{çözünme hızı vektörünün bileşenleri olduğunu hatırlatarak,}$$

aşağıdaki sonuç elde edilir

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V}_a, \nabla F) = 0 \quad (4.18)$$

Denklem (4.6)'ye göre;

$$\vec{V}_n = K_j j_n \vec{n}_n \quad (4.19)$$

ve

$$\vec{n}_n = \frac{\nabla F}{|\nabla F|} \quad (4.20)$$

yüzey birim vektörüdür.

Denklem (4.20), (4.18) de yerine konursa ve sadeleştirilirse, elektrokimyasal işlemin genel denklemi elde edilmiş olur:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + K_j j_n |\nabla F| = 0 \quad (4.21)$$

Şekillenme denkleminin çözümünü bulabilmek için başlangıç şartlarını ve süreç esnasında anottaki akım yoğunluğu dağılımını $i_a(x_a, y_a, t)$, bilmek gerekir.

Başlangıç şartı $z = z_0(x, y, 0)$ veya $F_0(x, y, 0)$ dir. z_0 veya F_0 işlemeye başlanmadan önceki yüzey durumunu gösterir (Kozak vd., 1998).

4.2 Akım dağılımı

Her iki elektrod arasındaki elektiriksel alan ve kütle taşınması, akım yoğunluğu dağılımını belirler. Elektrolitten geçen akım, yüklü taneciklerin hareketiyle aynı yöndedir. Bu bölümün maksadı akım dağılımını, süreçteki şartlar cinsinden ele almaktır. Bir elektrolit çözeltisi içersindeki kütle transferi; hareketli (mobil) yükler, madde dengeleri, akım geçişi, elektronötrallik ve akışkanlar mekaniği türünden açıklama gerektirir. Sözü edilecek ortam, konsantrasyonlarının bükülüğü sırasıyla ve çözücünden daha az olan n tane yük taşıyıcısı ($c_1, c_2, \dots, c_n$) ve ayrışmamış çözücünden ibarettir.

Belirli bir yöne doğru hareket eden ve birim zamanda birim yüzeyden geçen iyonlar olarak tanımlanan her bir çözünmüş i iyonun, N_i akısı difüzyon, göç, ve konveksiyon yönüne doğrudur. Akı vektörü N_i , aşağıdaki gibi üç terimin vektörel toplamı şeklinde yazılabilir.

$$\vec{N}_i = -z_i u_i F c_i \nabla u - D_i \nabla c_i + c_i \vec{W} \quad (4.22)$$

İlk terim, iyonlara etkiyen elektriksel kuvvetten ileri gelen göçü temsil eder. u_i iyonların elektrokimyasal mobilitelerini, u ise elektrokimyasal potansiyeli ifade eder. İkinci terimde ifade edildiği gibi çözeltideki herhangi bir i bileşenin konsantrasyonu değiştiği zaman difüzyon meydana gelir. Bileşenler, yüksek konsantrasyonlu bölgelerden düşük konsantrasyonlu bölgelere doğru hareket ederler. Difüzyon akısı aşağıda ifade edilmiştir.

$$\vec{N}_i^{diff} = D_i \nabla c_i \quad (4.23)$$

Yukarıda D_i difüzyon katsayısıdır.

En son terim, konveksiyonu oluşturan partiküllerin sıvı içersindeki hareketlerini tasvir eder. Hız vektörü $\vec{W}$ sıvı hareketini belirler.

Elektrolitten geçen akımını incelemek için iyonlar ve konsantrasyonları iredelenmelidir. Her bir iyonun akısını bulabilmek için akım yoğunluğu, akıların herbirine eşlik eden mol başına düşen elektrik yüküyle çarpılır ($z_i F$).

$$\vec{i} = F \sum_{i=1}^n z_i \vec{N}_i \quad (4.24)$$

Denklem (4.24) denklem (4.22) 'te yerine konulursa aşağıdaki halı alır.

$$\vec{i} = -F \sum_{i=1}^n c_i u_i z_i \nabla u - F \sum_{i=1}^n D_i z_i \nabla c_i + F \vec{W} \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (4.25)$$

En son terim elektronötrallik şartlarından dolayı sıfıra eşittir.

$$\sum_{i=1}^n z_i c_i = 0 \quad (4.26)$$

$$\kappa = F \sum_{i=1}^n z_i c_i u_i \quad (4.27)$$

Elektriksel iletkenlik veya elektrolitin spesifik iletkenliği aşağıdaki hale indirgenir.

$$\vec{i} = -\kappa \nabla u - F \sum_{i=1}^n z_i D_i \nabla c_i \quad (4.28)$$

Yukarıdaki denklemden anlaşıldığı üzere akım, elektriksel potansiyelin (ϕ) ve konsantrasyonların ($c_i, \dots$) gradyentine doğrudur. Konsantrasyon gradyentinin ihmal edilebilir olabileceği durumlarda Ohm kanunun diferansiyel formu akım yoğunluğunu belirtir.

$$\vec{i} = -\kappa \nabla u \quad (4.29)$$

Konsantrasyon gradyentinin ihmal edilemeyecek mertebede olduğu durumlarda Ohm kanunu uygulamak mümkün değildir. Konsantrasyonlar asimtotik olarak esas değerlerine, (c_b) yakınsarlar. Modeli basitleştirmek için, konsantrasyon profili doğrusallaştırılır ve ortam iki bölüme ayrılır bunlar:

Difüzyon katmanı diye tabir edilen ince bir katmandır ve kalınlığı δ_s ile ifade edilir.

Konsantrasyonun sabit olduğu, çözeltinin esasının olduğu bölge.

Difüzyon katmanının kalınlığı esasen sıvı akış şartlarına bağlıdır ve sadece basit durumlarda δ_s , hidrodinamik bir fonksiyon parametresi olarak hesaplanabilir. Tübbülans akışta δ_s 'nın değeri çok küçüktür, dolayısıyla difüzyon tabakasının kalınlığını bulmak çok karmaşık bir hal alır. Elektrokimyasal sistemlerde, kütle transferinin hidrodinamik kabulleri konu içersinde ele alınmıştır.

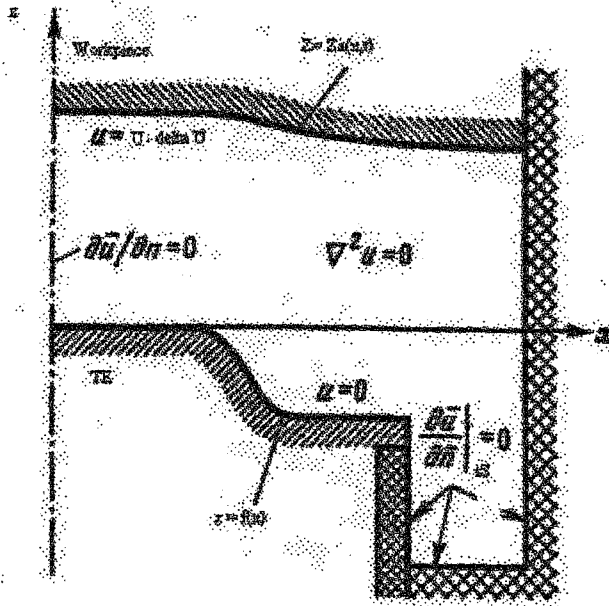
Difüzyon tabakasının işleme mesafesine oranla çok küçük olduğundan dolayı, bu tabakanın elektrodların yüzeylerine ait olduğu kabul edilebilir. Az önceki kabulle birlikte, elektrodlara yakın bölgelerde Ohm kanunundan yararlanarak ekstrapolasyon yapılır ve potansiyel düşmesinin de eklenmesiyle elektrodlardaki süreç (ör. difüzyon) hesaba katılır. Şayet hesaplamalara, elektrodlardaki potansiyel düşmesi ile akım yoğunluğu arasındaki gerçek ilişki dahil edilirse, bu yaklaşımın getireceği hatalar da ihmal edilebilir mertebede olacaktır.

Bundan dolayı (4.29) formülü reaksiyon bölgesindeki akım dağılımının bulunmasında kullanılabilir. Zamanın parametre rolü oynadığı, elektrik alanın değişken tutum sergilediği

$$\text{div}(\kappa \nabla u) = 0 \quad (4.30)$$

Bir ortamda, çözeltinin elektronötrallüğinden ileri gelen gerçeği ve yukarıda sözü edilen bağıntı uygulandığında elektrolitler içersindeki elektrik potansiyeli dağılımını veren formülün en bilinen haliyle karşılaşılanır.

$$\kappa \nabla^2 u + (\nabla \kappa, \nabla u) = 0 \quad (4.31)$$



Ş3kil 4.6 Elektrodlar için bağ koşulları

Denklem (4.30) un son hâlinde, reaksiyon bölgesinde elektrodlar arasındaki ısı ve gaz oluşumundan kaynaklanan iletkenlik değişimleri de hesaba dahil edilmiştir.

Yukarıdaki denklemler için bağ koşulları şekil (4.6)de olduğu gibi, elektrodlar ve yalıtkan duvarlar sistemini tarafından verilmiştir

Harici bir U , gerilim kaynağına bağlanmış çok iyi elektriksel iletkenliğe sahip elektrotlar olduğu varsayılırsa bağ koşulları aşağıdaki gibi olur:

$$u = -E_c \quad (4.32)$$

$$u = U - E_a \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (4.34)$$

En son ifade, yalıtkanlarda elektrik akımının akmadığını gösterir. Anodik potansiyel E_a ve katodik potansiyel E_c akım yoğunluğuna bağlıdır ve her bir elektrod için konsantrasyonun ve aktivasyon potansiyelinin toplamıyla bulunur.

$$E_c = a + b \ln i_c \quad (4.35)$$

Katodik potansiyel E_c , 10^{-5} 'ten 10^2 (A/cm²)'ye kadar olan geniş akım yoğunluğu yelpazesi içerisinde yukardaki ifadeyle gösterilebilir.

Formüldeki a katsayısı elektrodun yapıldığı malzemeye bağlıdır. b katsayısı NaCl için 0.11-0.14V ve NaClO₃ için 0.24 tür. E_c deki değişim U 'ya kıyasla çok küçük olduğundan hesaplamalarda E_c sabit kabul edilebilir. Örneğin NaCl ile yapılan ECM işleminde E_c yaklaşık olarak 1.5V'tur.

Geniş ve ince işparçalarının söz konusu olduğu ECM'nin bazı uygulamalarında, elektrodların dirençleri göz ardı edilemez. Yüksek akım geçişlerinde, gerilimde oluşacak bir düşme bu etkinin bağ şartlarına eklenmesi ihtiyacını doğurur. Denklem (4.29) ve (4.31) den de görüldüğü gibi elektrodlar arasındaki bölgedeki iletkenlik, κ , akım yoğunluğu ve elektriksel potansiyel dağılımı konusunda etkilidir. Deneysel sonuçlar ve hesaplamalardan varılan sonuçlar göstermiştir ki; iletkenliğin değişmesi işlemede meydana hassasiyetsizliğin başlıca sebebidir. Dolayısıyla elektriksel iletkenlikteki değişimi deneylerde incelenmelidir. κ_0 daki değişim için, sistemin girişindeki durumla reaksiyon bölgesindeki durumu birbirinden ayırdetmek gerekir. Bilindiği gibi, κ_0 elektrolit içerisindeki komponentlerin konsantrasyonuna ve elektrolitte reaksiyon ürünü olarak oluşan safsızlıkların bir derecesi olarak, sıvının sıvının

sıcaklığına bağlıdır. Bu faktörün elektrolit besleme sisteminin kontrolüyle sabitlenmesi, iletkenliğin, κ_0 'ın gereken tolerans sınırları içerisinde tutulmasını sağlar.

İletkenliğin sistemin girişinde sabit tutulması, elektrodlar arasındaki bölgede süreçten ileri gelebilecek iletkenlik (κ) değişimine mani olamaz.

Elektrolitten geçen akım, azımsanmayacak kadar ısının açığa çıkmasına neden olur; bu da elektrolit sıcaklığını artırır. Sıcaklığın, elektrolit iletkenliğine tesiri yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir.

$$\kappa = \kappa_0 [1 + \alpha_T (T - T_0)] \quad (4.36)$$

Yukarıdaki formülde, α_T elektrolit besleme sisteminin çıkışındaki elektriksel iletkenliğin sıcaklık katsayısıdır ve ECM'de kullanılan genel elktrodlar için 0.01 den 0.03 K⁻¹'e kadar değişen değerler alır.

Isınmayla eş zamanlı olarak çoğu zaman işleme bölgesinde gaz baloncukları oluşur. Gaz-elektrolit dağılımının iletkenliği, gaz baloncuklarının olmadığı durumdan önemli ölçüde küçük olabilir. İletkenlik, gazın dağılımdaki hacim kesri, β ile doğrudan ilişkilidir. Elektrodlar arasındaki bölgede β , hem reksiyon bölgesi civarında hem de ana elektrolit akış yönünde değişim gösterir.

Düzgün dağılmış gaz baloncuklarının oluşturduğu sistemin efektif iletkenliği, 100 seneden beri, baloncukların yalıtkan küresel parçacıklar gibi var sayılmasıyla irdelenmiştir ve hala günümüzde de yoğun ilginin odağıdır. Baloncuksuz elektrolit iletkenliği κ_e ile ilişkili olarak,

$$\kappa_f = \kappa_e (1 - \beta)^{3/2} \quad (4.37)$$

efektif iletkenlik κ için çeitli teorik ve ampirik denklemler mevcuttur.

Aynı anda iki faktörün etkisi hesaba katıldığında, reaksiyon bölgesinin belirli bir noktasında ortamın iletkenliği aşağıdaki gibi olur.

Yukarıda, $\Theta = T - T_0$ sıcaklıktaki artışı temsil eder. Aynı denlem (4.31) daki elektrik alan ifadesinde yerine konulursa aşağıdaki sonuca varılır.

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \alpha_T \Theta) (1 - \beta)^{3/2} \quad (4.38)$$

$$\nabla^2 u = \frac{3}{2(1-\beta)}(\nabla\beta, \nabla u) - \frac{\alpha_T}{1+\alpha_T}(\nabla\Theta, \nabla u) \quad (4.39)$$

Denklem (4.29) ve (4.38) dan da yararlanarak akım yoğunluğu aşağıdaki gibi olur.

Böylece, sıcaklık dağılımı ve hacim kesirleri formunda yeni faktörler gösterilmiş oldu. Dağılımlar birbirlerinden bağımsız değildir. Elektrodlar arası bölgedeki fiziksel şartlardan

$$i = -\kappa_0(1 + \alpha_T\Theta)(1 - \beta)^{3/2} \nabla u \quad (4.40)$$

ve alanlardan isole edilemezler (Kozak, 1998).

Bu bölümde anlatılanların çok daha basitleştirilmiş hali pratik olarak pek çok problemin çözümüne ışık tutabilecek niteliktedir. Yukarıdaki denklemin özel şartlar için çözümü ECM araştırmalarının önemli bir bölümünü teşkil eder.

4.3 Denge Mesafesi

Elektrokimyasal işlemede elektrodlar arasında, reaksiyon tarafından belirlenen sabit bir mesafe vardır ve bu mesafe işlemin hızını belirler.

Elektrodu iş parçasına yaklaştırırken, iş parçasının konumu y ve ilerleme hızı arasındaki ilişki (4.41) ve (4.42) bağıntısındaki gibidir.

$$y = y_0 + (\eta \cdot Vs \cdot k \cdot E \cdot t / y) - vt \quad (4.41)$$

$$dy / dt = (\eta \cdot Vs \cdot k \cdot E / y) - v = (K / y) - v \quad (4.42)$$

Burada elektrolit sabiti (3.43) bağıntısında gösterildiği gibidir. Elektrolit kombinasyonu ve elektrodların çeşidine göre değişir. Denge mesafesini tayin etmek için birim olarak kabul edilir ve (4.44) te olduğu gibi iki boyutsuz parametrede görev alır.

$$K = \eta \cdot Vs \cdot k \cdot e \quad (4.43)$$

$$y' = v \cdot y / K, \quad t' = v^2 \cdot t / K \quad (4.44)$$

Bunlar (4.42) bağıntısında yerine konulursa, şartlar (4.45) bağıntısında anlatıldığı gibi olur ve şu sonuca varılır; işleme mesafesinin zamanla değişimi başlangıçtaki işleme mesafesi farklı olsa dahi zaman geçtikçe bir sabite ulaşır ve buna elektrokimyasal işlemin denge mesafesi

denir. Denge mesafesi, y_b , $y'=1$ durumunda denklem (3.46) da gösterildiği gibidir.

$$t' = (y_0' - y') + \ln[(1 - y_0') / (1 - y')] \quad (4.45)$$

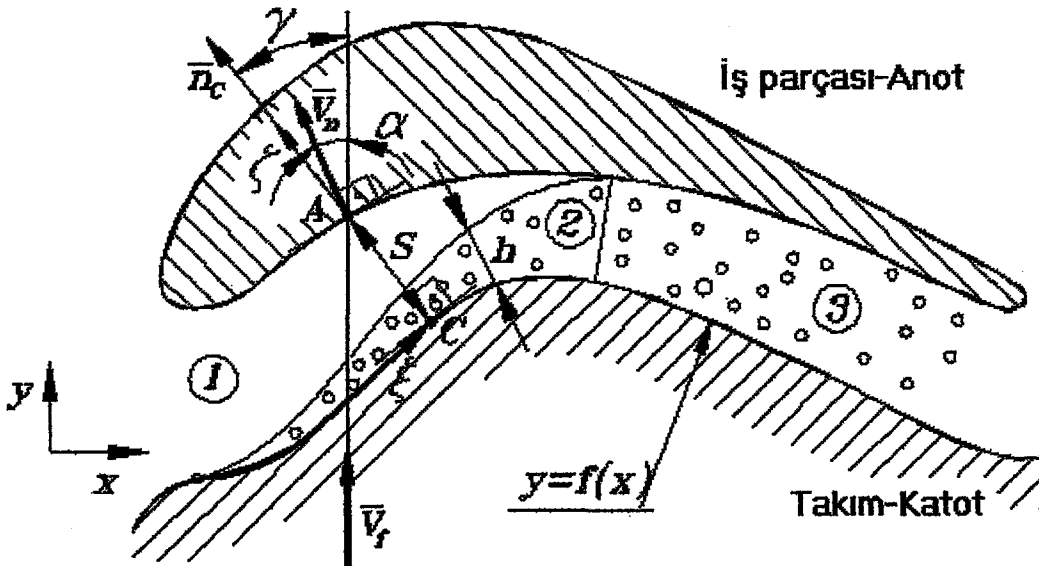
$$y_b = K / v = \eta_s V_s k E / v \quad (4.46)$$

Bu değerin fiziksel anlamı işparçasının materyali ve elektrolit sıvısı değiştirilmediğinde, denge mesafesinin elektrod beslemesi ve uygulanan gerilime bağlı olduğudur. Geribesleme mantığıyla elektro kimyasal işleme otomatik olarak kontrol edilir (Khairy, 1996).

4.4 Matematiksel Model

Bu bölümde, silindirik bir takım-elektrot kullanılarak, durağan ve sabit elektrotlar arası mesafe (gap) için, işleme yüzeyinde ve fiziksel şartlarda meydana gelen değişimlerin belirlenmesi konu alınır.

Elektrolit akışı, L uzunluğuna ve S lokal mesafesine sahip ince bir elektrotlar arası boşluktan, soldan sağa doğru akmaktadır. Alt yüzey, yukarıya doğru V_f hızıyla hareket eden takım-elektrottur. Takıma zıt yönde olan bir noktada, iş parçasının yüzeyi V_n bileşke hızıyla yukarı doğru hareket etmektedir. Durağan ECM sürecinde V_n , $V_f \cos \alpha$ 'e eşittir. Çözünmedeki hız dağılımı ve akış boyunca fiziksel şartlarda meydana gelen değişiklikler, zihinde gap mesafesinin (S), düzgün olmadığını doğurur. Bunun sonucunda iş parçasında hatalı sonuçların gözlenmesi doğaldır.



Şekil 4.7 ECM sürecinin matematiksel modelini konu alan şema

ECM sürecinin matematiksel modeli, yukarıdaki şartlara bağlı olarak, kısmi modellerden yararlanarak ortak bir sonuçtur ve aşağıdaki parametrelere bağlıdır.

- Elektrotlar arası mesafenin, S zamana karşı değişim ve dağılımı.
- Akışkan parametrelerinin değişimi, (statik basınç p ve hız w)
- Sıcaklık dağılımı T
- Hacim kesrinin dağılımı b (birim hacimsel gaz konsantrasyonu) veya iki faz akışındaki tabaka (elektrolit ve gaz), h

Aşağıdaki kabullere bağlı olarak geliştirilen fiziksel model, matematiksel modelin temelini oluşturur. Gap'ta üç belirgin bölge vardır bunlar:

Sadece elektrolit olan bölge.

Elektrolit ve gaz karışımından ibaret, kalınlığı $h < S$ olan , katot civarında bulunan baloncuk bölgesi. Bu bölgede hidrojenin hacim kesri sabittir ve b 'ye eşittir.

b 'nin sabit kalmadığı ikili faz akış bölgesi.

Akım yoğunluğu i gaptaki ortamın iletkenliğine ve uygulanan gerilime (U) bağlıdır. U gerilim Ohm kanunundan tüm gap bölgesine uyarlanabilir. Elektrokimyasal reaksiyon, toplam eşik potansiyeliyle birlikte hesaba katılır. E_a ve E_c sırasıyla anot ve katot potansiyelleridir ve toplam eşik potansiyeli $E = E_a - E_c$ şeklinde ifade edilebilir. Gaz baloncuklarının sebep oldukları, yüzey gerilim etkisi ihmal edilmiştir. Böylece $K_v = K_v(i)$ ve $E_v = E_v(i)$ ifadeleri geçersizdir. Teorik model, deneysel sonuçlarla birlikte kullanılırlarsa anlam ifade eder. Baloncuk tabakalarının, elektrolit akış hızı ve basıncına etkileri iki fazlı homojen akış modeli kabul edilerek hesaba katılır. Model uyarınca, elektrotlar arasından geçen elektrolit, ortalama bölgesel hacim kesrine sahip düzgün dağılmış bir sıvı gaz karışımıdır.

$$\beta = \beta_0 \frac{h}{S} \quad 0 < h < S () \quad (4.47)$$

İki fazlı ortamın elektriksel iletkenliği Bruggeman formülüyle belirlenir.

$$\kappa = \kappa_0 \left[1 + \epsilon_T \beta (1 - \beta)^{3/2} \right] \quad (ss) \quad (4.48)$$

$q = T - T_0$ ve T_0 elektrolitin ilk sıcaklığıdır.

α_T , T_0 sıcaklığında elektrolitin iletkenlik katsayısıdır ve κ_0 elektrolitin T_0 sıcaklığındaki iletkenliğidir.

Matematiksel modeli formüle etmek için, iş parçasını referans alan bir koordinat sistemi kullanılarak, iş parçasının yüzey şeklindeki değişikliği tasvir eden genel bir durum düşünülür ve iş parçası sabit tutulur (şekil 4.7). Herhangi bir anda iş parçasının yüzeyi, $z = Z(x,y)$ şeklinde ifade edilir. Elektrokimyasal şekillendirme teorisine göre, iş parçasının şeklinin değerlendirilmesi, $F(x,y,t)$ aşağıdaki gibi izah edilebilir.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = k_v(i_A) \cdot i_A \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (4.49)$$

İşlemin başında : $t=0$, $z=z_0(x,y)$. Burada $z_0(x,y)$ iş parçası yüzeyinin başlangıç halidir.

İş parçası yüzeyinde akım yoğunluğunu (i_A) bulmak için, anot ve katot arasındaki en yakın noktalar arası mesafe, d boyunca elektriksel potansiyelin doğrusal dağılımını kullanan yaklaşım uygulanır. Akım yoğunluğu, gap civarındaki iletkenlik değişimi nispetince, Ohm kanunu vasıtasıyla bulunur.

$$i = \rho_E \rho_{EG} \frac{U - E}{S} \quad (4.50)$$

$$\rho_{EG} = \frac{1}{S} \int_0^d \frac{d\xi}{(1 + \epsilon_T T)(1 - A^2)^{3/2}} \quad (4.51)$$

Hidrojen oluşumu için kütle korunum formülü, kütle dengelerinden elde edilebilir.

$$\rho_E A_E \int_0^d w(\xi) d\xi = \eta_H K_H \int_0^d i d\xi \quad (4.52)$$

$$\rho_E = \frac{P}{RT} \quad (\text{hidrojenin spesifik gaz yoğunluğu}) \quad (4.53)$$

Formül (4.53)'de R , 1kg hidrojenin gaz sabiti; h_H , hidrojen oluşumunun akım yoğunluğu verimi; K_H , hidrojenin elektrokimyasal denkliği; $w(\xi)$ gap kesitindeki ortalama hızdır.

4.4.3 İdeal ECM

En basit yaklaşım modeli olan, ideal ECM modeli şu kabüller dayanır:

- Ohm kanunu elektrotlar arasındaki tüm bölgede varlığını gösterir.
- Elektrotlar arasındaki bölgede elektriksel iletkenlik zamana ve konuma göre sabittir.
- Süreç sırasında elektrolar üzerindeki potansiyel sabittir.

Anot üzerindeki her hangi bir noktada, metal çözünmesinin akım verimi sabittir.

Yukarıdaki dört kabule göre, elektrokimyasal süreç genel olarak şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \kappa K_v \nabla u \cdot \nabla F = 0 \quad (4.54)$$

$$\text{at } t = 0, F = F_0;$$

$$\nabla^2 u = 0; \quad \text{takım üzerinde - katot } f$$

$$u(f) = 0$$

$$u(F) = U - \Delta U \quad \text{iş parçası üzerinde - anot } F$$

$$\nabla u = \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (4.55)$$

yalıtkan yüzeylerde ve simetri eksenlerinde (4.55)deki gibi olur. (Kozak, 1998)

Anot yüzeyi kartezyen koordinat sisteminde açıkça, $z = z_a(x, y, z)$ formülüyle ifade edilirse, şekillenme süreci aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{\partial z_a}{\partial t} = K_v j_a(x_a, y_a, t) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_a}{\partial y}\right)^2} \quad (4.56)$$

$$z_a(x, y, 0) = z_0(x, y)$$

$$\nabla^2 u = 0$$

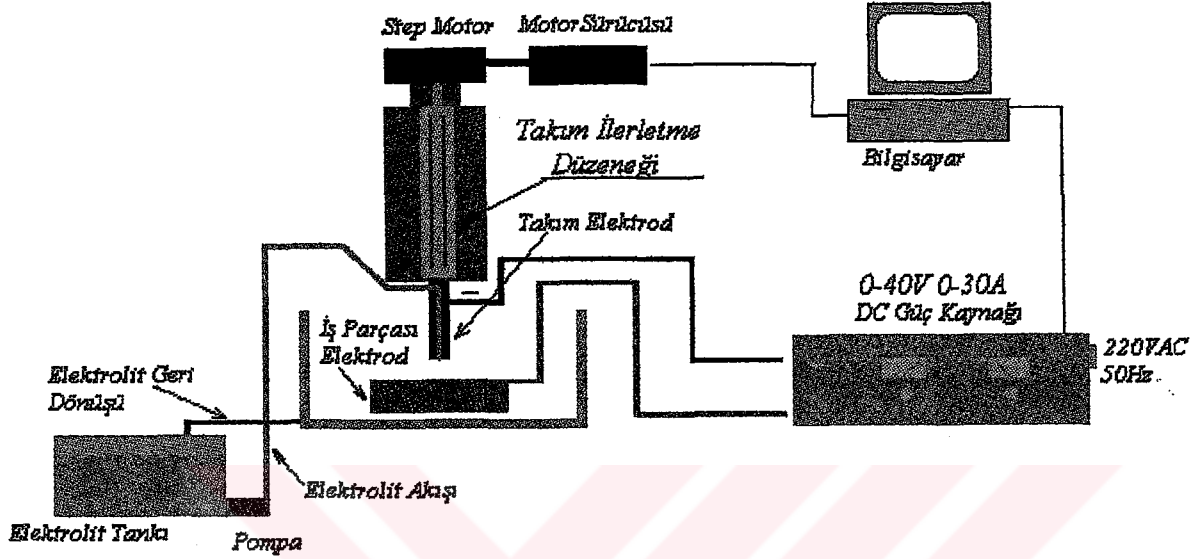
$$u(\text{katot}) = 0$$

$$u(z_a) = U - \Delta U$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\text{yalıtkan}) = 0 \quad (4.57)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın deneysel kısmını gerçekleştirebilmek için, ECM'nin bilgisayar kontrollü küçük bir modeli geliştirildi. İlerlemelerin hassasiyeti açısından, Şekil (5.1)'de gösterildiği gibi, step motorlu bir ileri-besleme tertibatı kullanıldı ve bilgisayarla kontrol edildi.



Şekil 5.1 Gerçekleştirilen Deneysel ECM Tertibatı

5.1 ECM nin kontrolü

5.1.1 Bilgisayar

Reaksiyon sürecini etkileyen parametreler, çıkacak sonucu belirleyeceğinden, işlem sırasında bunların birbirleriyle olan ilişkilerini ve sergiledikleri değişim davranışlarının dinamik olarak gözlemlemek ve müdahale etmek ancak mikroişlemci denetimli bir sistemle kusursuz olarak gerçekleştirilebilir. Bu gerçekten yola çıkarak, elektrolit akışı hariç tüm parametreler Pentium 75MHz işlemcili bir bilgisayar ile kontrol edildi.

5.1.1.2 AD/DA Dönüştürücü ve I/O Kartı

Süreçte rol oynayan parametrelerin, bilgisayar ortamına aktarılmasını ve bilgisayar ortamındaki sinyallerin, dış ortama fiziksel birer büyüklük olarak yollanabilmesi A/D-D/A konvertör(ADAC) ve I/O kartları ile gerçekleştirilebilir. Mikroişlemcinin dış ortamdaki bir bilgiyi alabilmesi için o bilginin kendisinin anlayabileceği cinsten, sayısal sinyaller olması gerekir. Aynı zamanda bilgisayarın yolladığı sinyalleri de analog elektriksel büyüklüklere

çevrilmesi gerekir. Bunları A/D-D/A konvertör gerçekleştirir.

ADAC'ın sayısal sinyallere çevirdiği bilgiler I/O kart aracılığı ile mikroişlemci ortamına aktarılır.

Çalışmalarda 12bit A/D-D/A konvertör kart kullanıldı. Kartta bir adet 12 bitlik D/A ve onaltı tane 12bitlik A/D kanal mevcuttur. Giriş ve çıkışlar bipolar 0-9V veya polar -9V - +9V aralıklarında çalışacak şekilde seçilebilir.

I/O birimi olarak 8255/8233 işlemcilerini bulunduran bir arayüz kartı kullanıldı. Programlanabilen giriş/çıkış fonksyonları olan bu kartın 48 kanalı mevcuttur.

5.1.1.3 Güç kaynağı

ECM de kopartma işleminin, elektrodlar arasından geçen akımla gerçekleştirilmesi, yüksek akım değerlerini de beraberinde getirir. Bu akım değerlerinin süreç boyunca muntazam tutulması ve akım sınırının dinamik olarak kontrol edilebilmesi için profesyonel bir güç kaynağına ihtiyaç vardı.

Geliştirilen prototipin güç ünitesini 0-40V 0-30A çıkış aralığında çalışan, kısa devre ve ark korumalı, dinamik olarak akım ve gerilim sınırı ayarlanabilen bir doğru akım güç kaynağı oluşturur.

Cihaz, sekiz saat boyunca %0.025 oranında bir enerji kaybı oranıyla çalışabilmektedir. Ayrıca çıkışta, çok düşük gerilim(1mV) ve akım(8mA) dalgalanmalarına sahiptir.

5.1.2 Step Motor ve Takım İlerletme Kontrolü

5.1.2.1 Step Motor Kontrolü

Genel olarak motorların doğru pozisyonlanmasını yapmak oldukça zordur. Doğru akım(DC) motorları servo geri besleme mekanizmasıyla doğru pozisyonlanabilirler. Ancak bu pahalı ve komplekstir.

Step motorlar standart DC motorlardan farklıdır. Motorun dönüşü, iç dizaynının belirlediği adımlar kadardır. Step motorlarda, hareket olmasa bile servo motorlarda olmayan bir tutma torku vardır. Yapı itibarıyla düşük hızlarda bile yüksek torklara sahiptirler. Bu özellik pozisyonlama açısından çok önemlidir, ayrıca shaftın konumunu belirlemek için bir geribesleme devresine ve durdurmak için de bir fren mekanizmasına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Sürücünden gelen sinyaller motora ne kadar dönmesi gerektiğini ve nerde durması

gerektiğini bildirir. ECM'de bu sinyaller, bilgisayardan sürücüye iletilerek gerçekleştirildi. Step motorun sürücüsü aynı zamanda, normalde 200 adım/tur olan, adımlarının hassasiyetini, üzerindeki taksimatla arttırmayı mümkün kıldı. Yani, normalde 18° olan her adımı istenilen nispette daha küçük adımlara böldü. (400 – 50000 adım/tur)

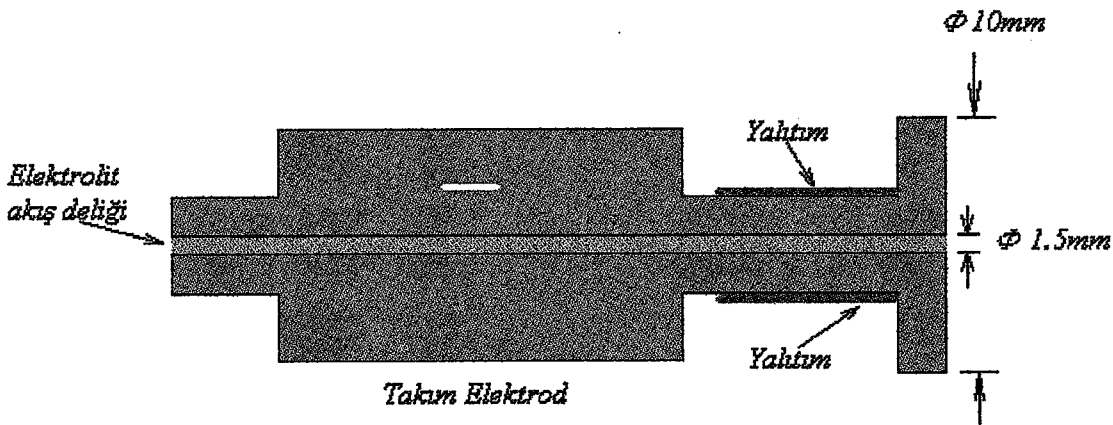
5.1.2.2 İletme Kontrolü

Elektrod ile iş parçası arasındaki mesafenin kontrolü, elektrodun iş parçasına doğru yaklaştırılması suretiyle gerçekleştirildi. Bunun için doğrusal bir hareket mekanizması oluşturuldu.

İki baştan yataklanmış, bir bilyalı flanş içerisinden geçen sonsuz vida(Newton vidası), şayet dışındaki flanş da vidanın eksenine paralel olarak yataklanmışsa, kendi eksenine etrafında döndürüldüğünde, flanşta, vidanın eksenine paralel bir doğrusal hareket elde edilir. Bu yöntem hassasiyetin kaçınılmaz olduğu pek çok uygulamada kullanılır.

5.1.3 Elektrod ve İş parçası

ECM sürecinde iş parçası ve elektrodun aynı malzemeden olması gerektiği bilinir. Aynı zamanda, mekanik yöntemlerle işlenmesi zor malzemelerde geleneksel yöntemlere nazaran daha verimli sonuçlar vermesi, denemelerde sert demir bazı metallerin tercih edilmesini sağladı. Elektrod olarak, içersu elektrolit akışına imkan verecek şekilde delinmiş silindirik demir çubuklar kullanıldı. Ayrıca elektrodun ucu, istenmeyen yanak akımların meydana gelmemesi için T şeklinde tasarlandı. Böylelikle, iş parçası içersine girildiğinde deformasyona sebep olacak istenmeyen akımlar asgariye indirgenmiş oldu. Şekil (5.2) kullanılan elektrodun yapısını göstermektedir.



Şekil 5.2 Elektrodun kesiti

5.1.4 Reaksiyon Havuzu ve Elektrolit Akışı

ECM sürecinde, reaksiyon ürünlerinin reaksiyon bölgesinden hızla uzaklaştırılması önem taşır. Çünkü bu ürünler, elektrolitin iletkenliğini ve akışkanlığını değiştirir. Düzgün ve simetrik bir elektrolit akışı sağlamak için, elektrolit, elektrodun ortasından delinen delikten verildi. Reaksiyon havuzunda biriken sıvının tekrar elektrolit havuzuna geri dönmesi sağlandı.

Havuzun alt kısmında bulunan bir sıvı pompası, elektrolitin 10cm/sn lik hızlarla reaksiyon bölgesine püskürtülmesini sağladı.

5.2 Sürecin Kontrolü

Elektrik akımı, DC gerilim kaynağı tarafından elektrod ve iş parçası arasındaki boşluğa uygulanır. Elektrodun iş parçasına yaklaştırılmasıyla aradaki boşluk yeterli değere ulaşır, o zaman mesafenin nispetine göre elektrodlar arasında bir akım meydana gelir, bu da anodik çözünmeyi beraberinde getirir.

Kopan parçacıklar, dielektrik sıvı ile bir bileşik oluşturarak çökerler. Kullanılan elektrolite göre bu değişir.

Kesme işleminden arda kalan tortu, sürecin kararlı olabilmesi için iş bölgesinden uzaklaştırılır. Parça kopartıldıkça elektrodu iş parçasına yaklaştırma işlemi geri besleme ile gerçekleştirilir. Elektrod hiç bir zaman iş parçasıyla temas haline gelmez. "Gap" adı verilen boşlukta meydana gelen akım, önceden belirlenmiş bir akımla mukayese halindedir. Çözünme meydana geldikçe, mesafenin artması ve bunun sonucunda akımın değişmesi, geribeslemenin temelini oluşturur. Akım değiştikçe, elektrodun hareketinden sorumlu step motor harekete geçer. Elektrod gelen sinyaller doğrultusunda numuneye doğru yaklaştırılır ya da uzaklaştırılır.

5.3 Ölçümler

Çalışmanın deneysel kısmında kullanılacak elektrolitlerden, ECM sürecinde en sık kullanılan ve iletkenlikleri birbirlerine yakın olan ve NaCl ve NaNO₃ öncelikle tercih edildi. Bu elektrolitlerden, NaCl ve NaNO₃ için sırasıyla 0.0083 ve 0.0085 (Ωcm)⁻¹ spesifik iletkenlik değerlerine sahipolan, 1M'lık konsantrasyonları kullanıldı. Reaksiyon sırasında açığa çıkan Fe(OH)₂ elektrolitin süratle kirlenmesini de beraberinde getirdi, ancak yük dengesi

değişmediğinden dolayı elektrolitin iletkenliğinde de bir değişiklik oluşmadı.

Sürecin kararlı olabilmesi için, reaksiyon ürünlerinin reaksiyon ortamından hızla uzaklaştırılması gerekmektedir çünkü elektrodlar arasında kalan $\text{Fe}(\text{OH})_2$ iletkenliği olumsuz yönde etkiler, nitekim elektrolit akış hızı azaltıldığında elektrodların kısa devre olması ve kıvılcım oluşması gözlenmiştir. İletkenliği doğrudan etkilemeyen ancak elektrodlar arasında süreci olumsuz yönde etkileyen bu reaksiyon ürünleri filtre edilmediği takdirde uzun süreli çalışmalarda sıvıda kayda değer bir kirlenme meydana getirir. Dolayısıyla elektrolitin bol miktarda hazırlanması çalışmanın süresini uzun kılmak için gerekmektedir. Denemelerde, destile su kullanılarak yapılan eriyiklerden 1 ila 2 litrelik hacimlerde hazırlanmıştır. Reaksiyonda koparma işlemi, elektrodlar arasından geçen akımın bir fonksiyonudur, yani demir hidroksit oluşumundaki miktar da buna bağlıdır. Çalışmalarda asetik asid hariç hiçbir elektrolitte 10A'ın altına inilmedi. Böyle bir akım değeri de 2 litrelik bir çözeltinin yaklaşık 10-15 dakika gibi kısa bir sürede kirlenmesini beraberinde getirdi. Ölçümler bu zaman aralığında alındı. İlerleyen sürelerde akımın kararlı olabilmesi için elektrolit akış hızının artırılması gerektiği gözlenmiştir.

ECM tekniğinde elektrolit akış hızı genel olarak 5-10m/s lik hızlarda sağlanır, fakat mevcut test düzeneği ancak 5m/s lik bir değere imkan veriyordu. Ölçümlerin bu zaman aralığına sığdırılmasının nedeni de budur.

Numune olarak, 3343 DIN standart numaralı HSS-yüksek hız çeliği kullanıldı. 3343, kesici takım, freze, gibi aşındırıcı mekanik işlemler için kullanılan sert bir malzemedir. Geleneksel mekanik yöntemlerle aşındırılması güçtür. Takım-elektrod ya da katod olarak da daha önce ayrıntılı olarak değinilen, silindirik civa çeliği kullanıldı. Katodun kompozisyonunun anot kadar önemli olmamasının nedeni, reaksiyonun esas kısmının, yani çözünmenin, anodda meydana gelmesidir. Sadece demir bazlı olması yeterlidir. Demiri çelikten farklı kılan katkı maddeleri eser miktarda olduğundan dolayı, bu tür metallerde elektrod potansiyelleri, çeliğin kompozisyonuna bağlı değildir.

Aleminyum, bakır gibi sanayide sıkça kullanılan elementlerin alşımları da ECM sürecinde işlenebilir. Malzeme teknolojisindeki ilerleme, metallerin uygulama alanlarına göre, çok sayıda alaşımın geliştirilip hizmete sunulmasını sağlamıştır. Bu engin yelpaze içerisinde, işlenecek malzemeye ait elektrodun bulunması güç ve pahalıdır. ECM'de elektrod sadece, malzemenin ne bazlı olduğuna bağlıdır. Örneğin, 3343 DIN standartlı bir numuneyi yine aynı malzemedan yapılmış bir elektrodla işleme mecburiyeti yoktur. Elektrodun demir bazlı olması

kafidir. Aynı Şey diğler metal alaşımları için de geçerlidir. Bu serbestlik, zor bulunan veya pahalı olan malzemelerin işlenmesini ekonomikleştirmesi açısından oldukça önemlidir.



6 SONUÇLAR

Bu çalışmada sadece, demir bazlı 3343DIN standartlı yüksek hız çeliği kullanılmıştır. Aşağıda, çeşitli akım ve gerilim değerleriyle yapılan ölçümlere dair elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Çizelge 6.1 10mm'lik elektrodla alınan ölçümler

	NaCl	Na NO3	Faust
<i>Konsantrasyon</i>	1M	1M	
<i>Akım</i>	15A	15A	15A
<i>Gerilim</i>	20V	20V	20V
<i>Elek. Çapı</i>	10mm	10mm	10mm
<i>Elek. Alanı</i>	78.57mm ²	78.57mm ²	78.57mm ²
<i>Zaman</i>	10dk	10dk	15dk
<i>K_v(mm³/Adk)</i>	1.62 mm ³ /Adk	1.324 mm ³ /Adk	0.598 mm ³ /Adk
<i>Kopan Miktar</i>	1.9gr	1.55gr	1.05gr
<i>Kopan Hacim</i>	243.5mm ³	198.7mm ³	134.6mm ³
<i>Malzeme</i>	3343 DIN	3343 DIN	3343 DIN
<i>MMR</i>	24.35mm ³ /dk	19.695mm ³ /dk	8.97mm ³ /dk
<i>Elek. Akış Hızı</i>	5.5m/sn	5.5m/sn	5.5m/sn

Faust çözeltisi, elektroparlatmada kullanılan, %20 sülfirik asid, %50 fosforik asid ve %30 su içeren bir eriyiktir. Yukarıdaki çizelgede değerleri görünen denemeler, otomatik kontrol sistemi devreye sokulmadan, 10mm çaplı elektrod kullanılarak yapılmıştır. Reaksiyon sürecinde, akım-mesafe ve adım ilişkisinin önemini gözlemlemek için başlangıçta düzenek manual olarak çalıştırılmıştır. Step motorun sürücüsü, 1.8° olan her bir adımın istenilen değerde bölünebilmesine imkan sağladığı için, elle gerçekleştirilmesi güç olan, çok küçük ilerlemeleri mümkün hale getirir.

Aşağıdaki çizelgelerde, otomatik olarak alınan ölçümlere dair değerler yer almaktadır.

Çizelge 6.2 11mm çaplı elektrodla bilgisayar kontrollü olarak alınan ölçümler

	<i>NaCl</i>	<i>Na NO₃</i>	Asetikasit
<i>Numune</i>	1	4	5
<i>Konsantrasyon</i>	1M	1M	3M
<i>Akım</i>	15A	15A	5A
<i>Gerilim</i>	25V	25V	25V
<i>Elek. Çapı</i>	11mm	11mm	11mm
<i>Elek. Alanı</i>	95.07mm ²	95.07mm ²	95.07mm ²
<i>Derinlik</i>			
<i>Zaman</i>	10dk	15dk	13dk
<i>K_v(mm³/Adk)</i>	2.05 mm ³ /Adk	1.28 mm ³ /Adk	2.057 mm ³ /Adk
<i>Kopan Miktar</i>	2.4gr	2.25gr	1.043gr
<i>Kopan Hacim</i>	307.7mm ³	288.5mm ³	133.7mm ³
<i>Malzeme</i>	3343 DIN	3343 DIN	3343 DIN
<i>MMR</i>	30.77 mm ³ /dk	19.2 mm ³ /dk	10.28 mm ³ /dk
<i>Elek. Akış Hızı</i>	5.5m/sn	5.5m/sn	5.5m/sn

Ölçümlerin ikinci aşamasında Faust çözeltisinden vazgeçilmiştir. Bunun sebebi diğer elektrolitlere nispeten çok büyük bir iletkenlik değerine sahip olduğundan ötürü, kontrolsüz reaksiyon meydana getirmesidir. İletkenliğin büyük oluşu, elektrodla numune arasındaki mesafenin küçük olmasına aldırmaksızın, her noktadan akımın geçmesini beraberinde getirir. Diğer elektrolitlerde elektrodlar arası mesafe yaklaşık 1 - 1.5 mm arasındadır; fakat Faust kullanılarak yapılan denemelerde, yüzey şekillerinden de anlaşıldığı gibi bu değer birkaç milimetreyi bulmaktadır. Akımın uzun mesafelerden de geçmesi, elektrodun yan kısımlarının da reaksiyona katılmasını sağlar. Bu da istenmeyen bir durumdur.

Çizelge 6.3 11mm çaplı elektrodla bilgisayar kontrollü olarak alınan ölçümler devamı

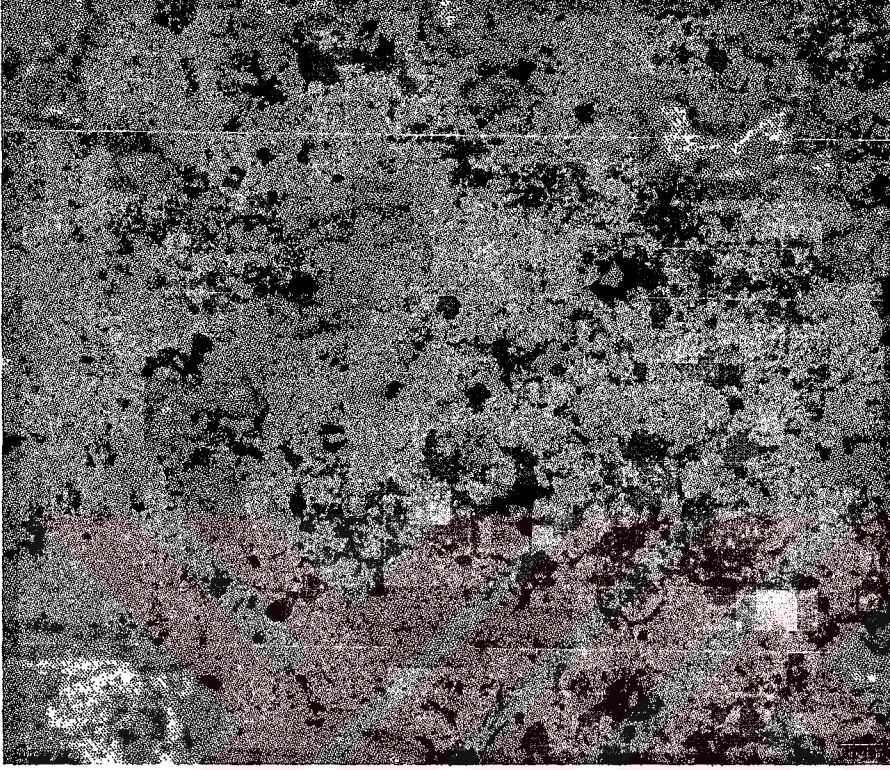
	<i>NaCl</i>	<i>Na NO₃</i>	Asetikasit
<i>Numune</i>	2	3	6
<i>Konsantrasyon</i>	1M	1M	3M
<i>Akım</i>	20A	20A	10A
<i>Gerilim</i>	25V	25V	25V
<i>Elek. Çapı</i>	11mm	11mm	11mm
<i>Elek.Alanı</i>	95.07mm ²	95.07mm ²	95.07mm ²
<i>Derinlik</i>			
<i>Zaman</i>	10dk	10dk	10dk
<i>K_v(mm³/Adk)</i>	2.083 mm ³ /Adk	1.73 mm ³ /Adk	2.23 mm ³ /Adk
<i>Kopan Miktar</i>	3.25gr	2.7gr	1.74gr
<i>Kopan Hacim</i>	416.6mm ³	346.15mm ³	223mm ³
<i>Malzeme</i>	3343 DIN	3343 DIN	3343 DIN
<i>MMR</i>	41.6 mm ³ /dk	34.615 mm ³ /dk	22.3 mm ³ /dk
<i>Elek. Akış Hızı</i>	5.5m/sn	5.5m/sn	5.5m/sn

Çizelge 6.1, 6.2 ve 6.3 te yer alan akım, konsantrasyon, gerilim, elek.çapı ve elek.alanı, sırasıyla sürecin başında belirlenen akım, gerilim, konsantrasyon değerleriyle kullanılan elektrodun çapını ve izdüşüm alanını belirtmektedir. Kütlesi önceden belirlenmiş numunelerin işlem sonrasındaki azalma miktarları, kopan miktar değerini oluşturur. Bu miktardan türetilerek, kopan hacim, K_v ve MRR değerleri elde edilir.

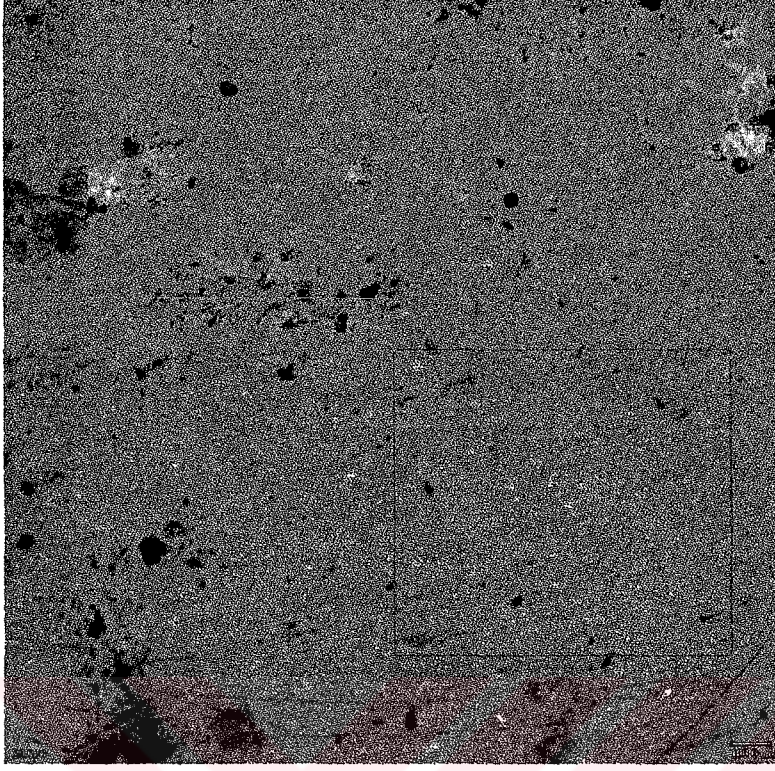
CH₃COONa, Na₂CO₃, C₄O₆H₄, C₆O₇H₈, KOH, ve NaOH gibi elektrolitlerle yapılan denemelerde anotta koparılma gerçekleşmemiştir. Bunun sebebi iletkenliğin iyi olmadığından, gap aralığının kısa olması, dolayısı ile elektrotla anotun sürekli temas durumunda kalmasıdır.

ECM nin kimyasal bir metodla metali çözmesi, kullanılan elektrolitlerden ileri gelen, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey kompozisyonu SEM kısa adlı, tarama elektron mikroskopuyla

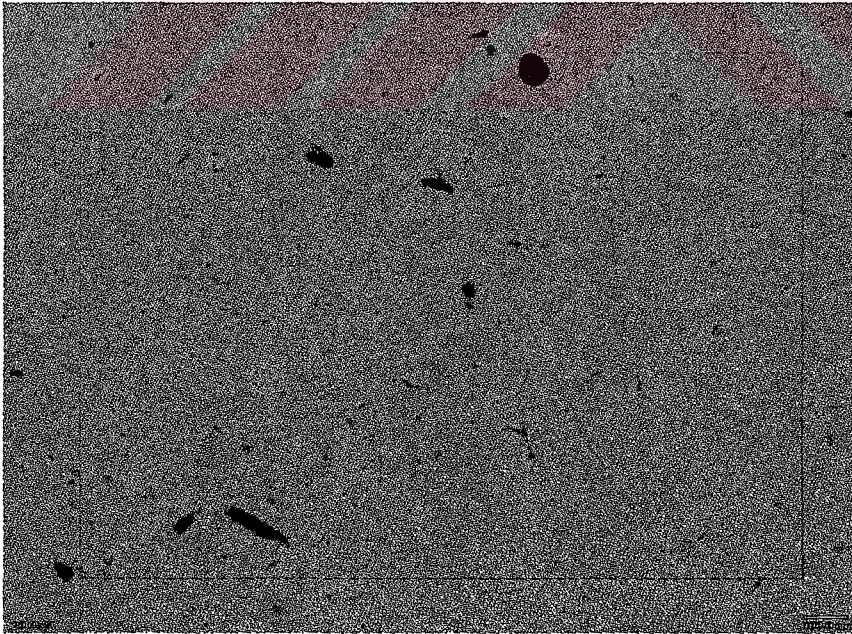
incelendi . Şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 6.5, 6.6'da yüzey görüntüleri yer almaktadır. Aynı zamanda yüzey görüntüleri üzerinde, analiz yapılan bölgelerde belirtilmiştir.



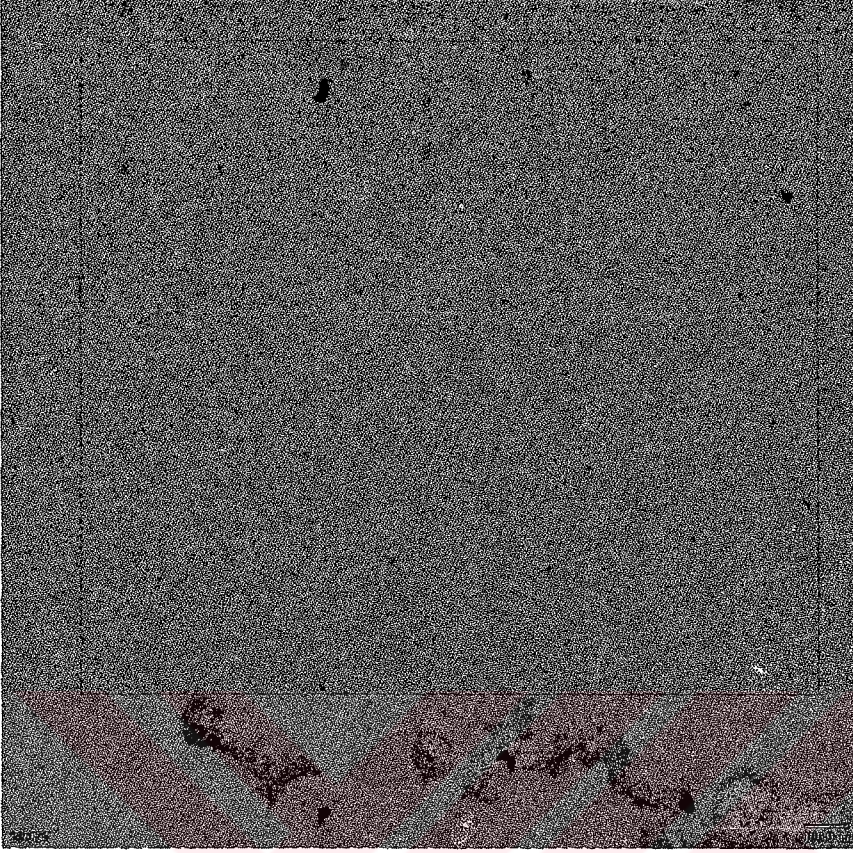
Şekil 6.1 NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü



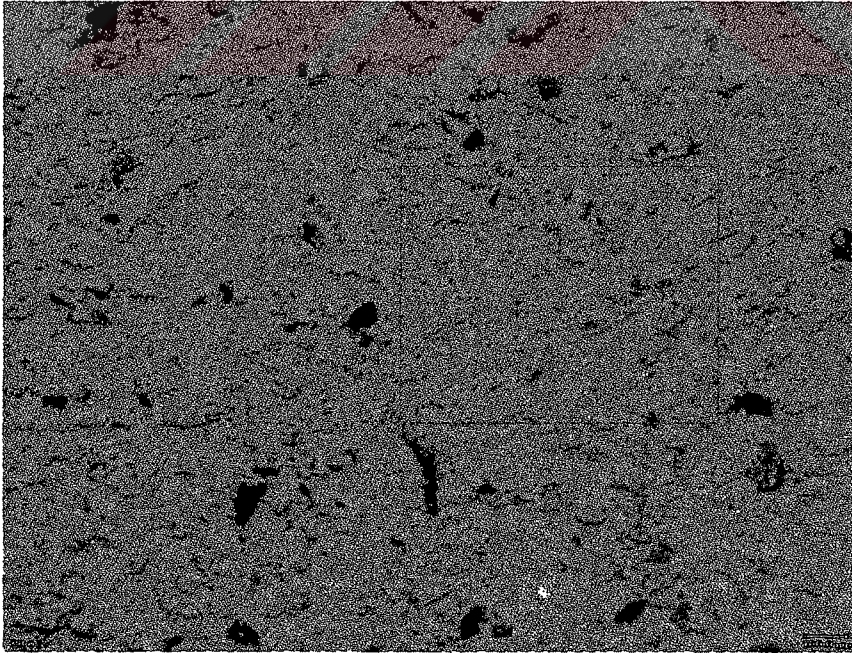
Şekil 6.2 NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü



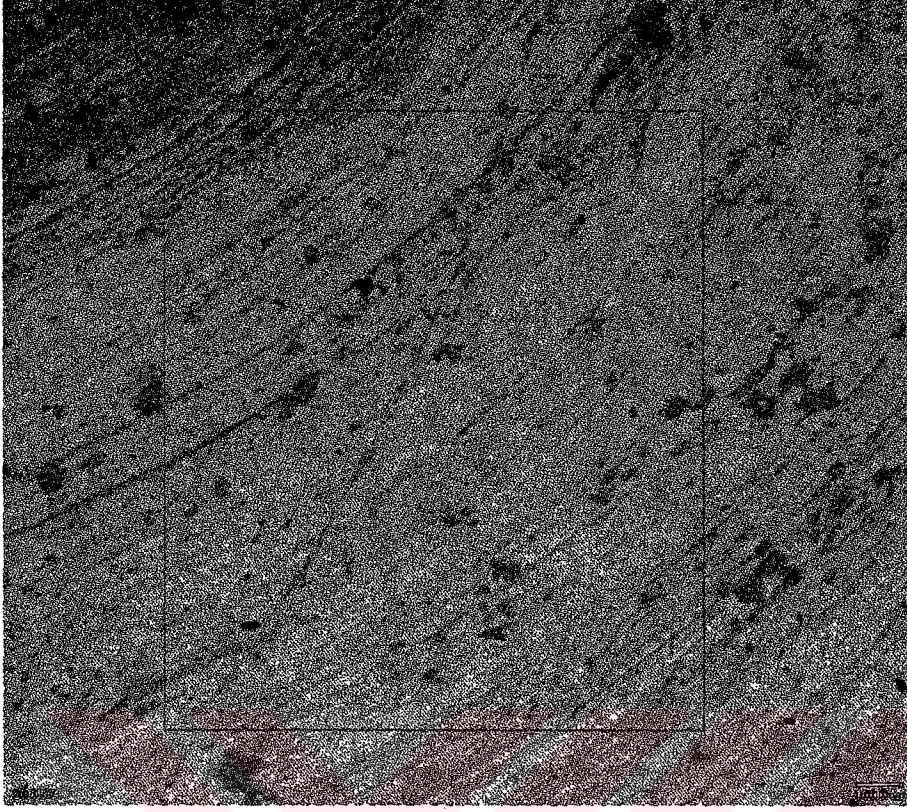
Şekil 6.3 NaNO₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü



Şekil 6.4 NaNO₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü



Şekil 6.5 Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü



Şekil 6.6 Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait 100 büyütme yüzey görüntüsü

Yüzey görüntülerinde işaretlenmiş bölgelere eşlik eden yüzey analizleri aşağıda çizelgelerde anlatılmıştır.

Çizelge 6.4 NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	1.099
Cr	2.199
Fe	76.645
Mo	2.168
W	4.889

Çizelge 6.5 NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	2.387
Cr	4.073
Fe	78.122
Mo	4.739
W	10.768

Çizelge 6.6 NaNO₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	1.058
Cr	3.13
Fe	80.225
Mo	4.89
W	10.697

Çizelge 6.7 NaNO₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	1.219
Cr	2.964
Fe	80.837
Mo	4.142
W	10.838

Çizelge 6.8 Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	4.655
Cr	7.283
Fe	61.512
Mo	7.25
W	19.3

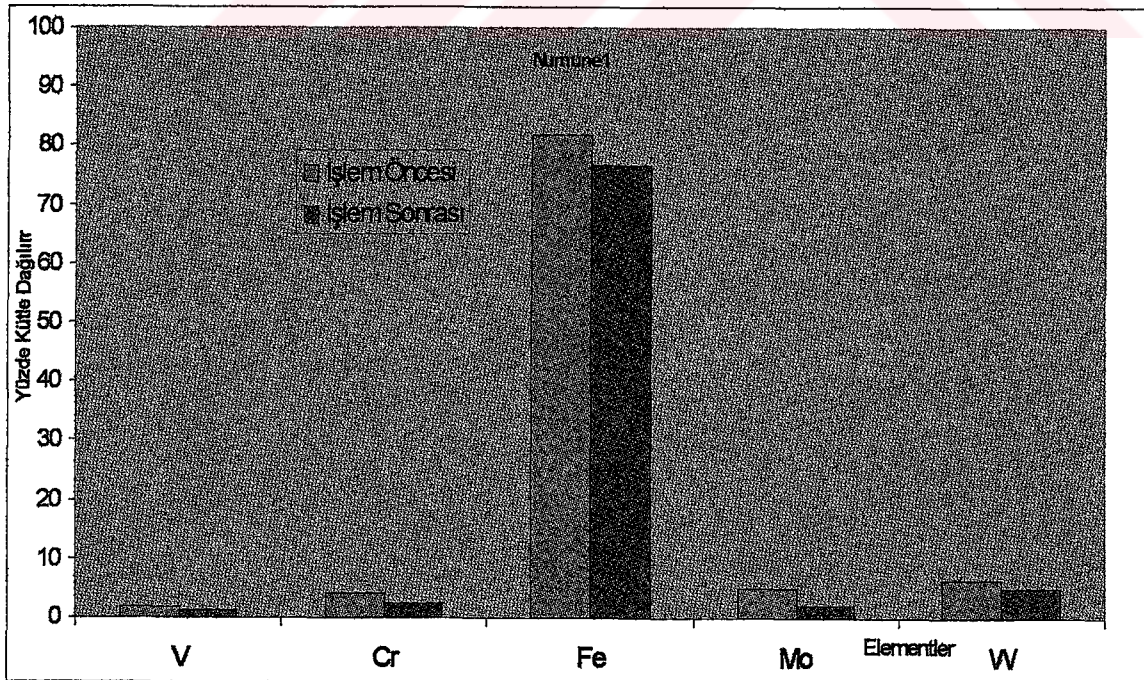
Çizelge 6.9 Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	3.374
Cr	5.48
Fe	72.09
Mo	6.076
W	12.981

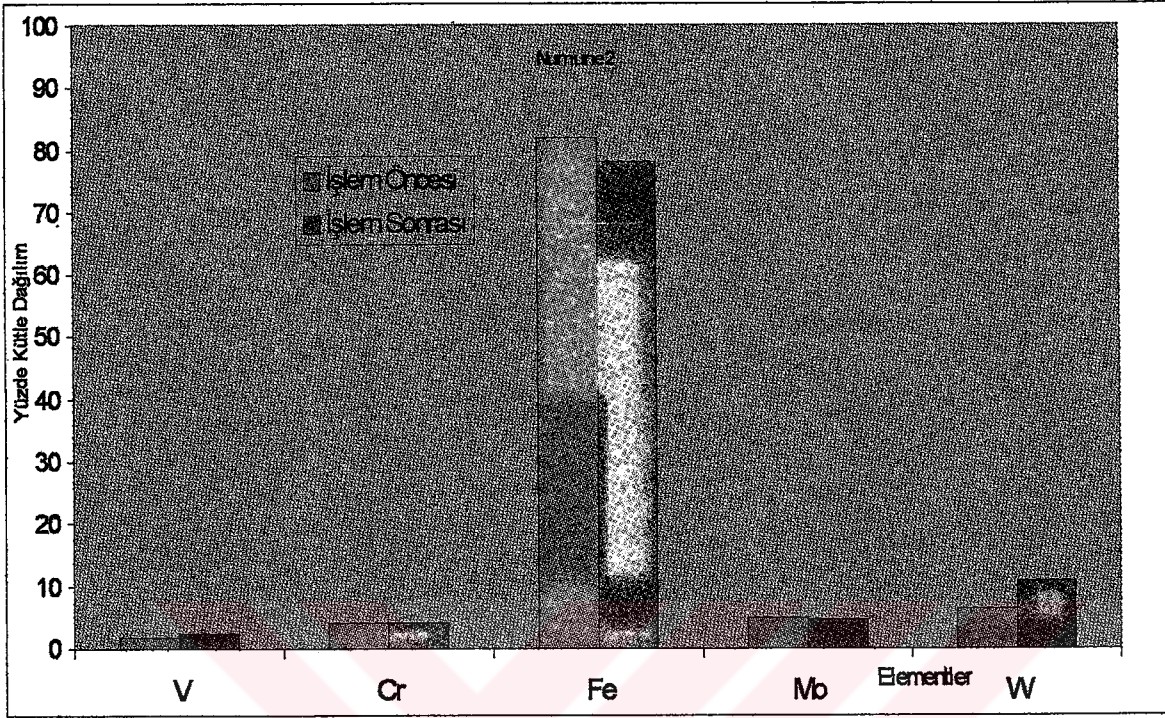
Çizelge 6.10 işlenmemiş numuneye ait orjinal yüzdesel element kütle dağılımı

Element	%Wt
V	1.8
Cr	4.1
Fe	81.8
Mo	5
W	6.4

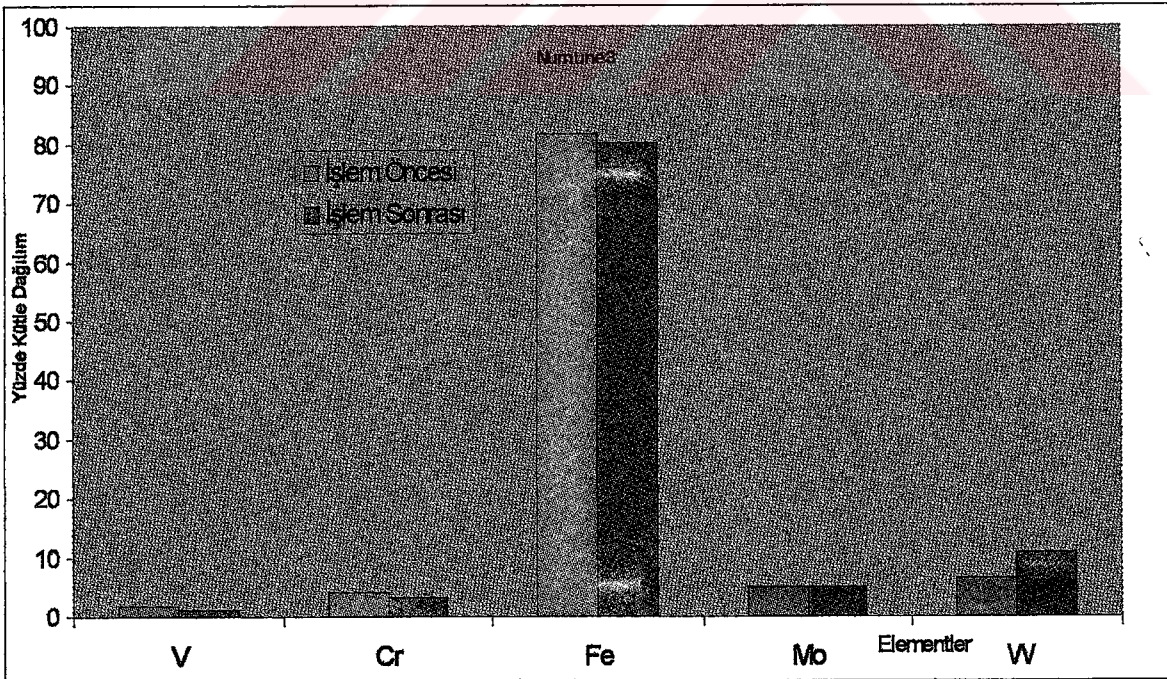
Aşağıdaki grafiklerde, numunelere ait yüzey analizlerinin işlem öncesi ve işlem sonrası durumları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir



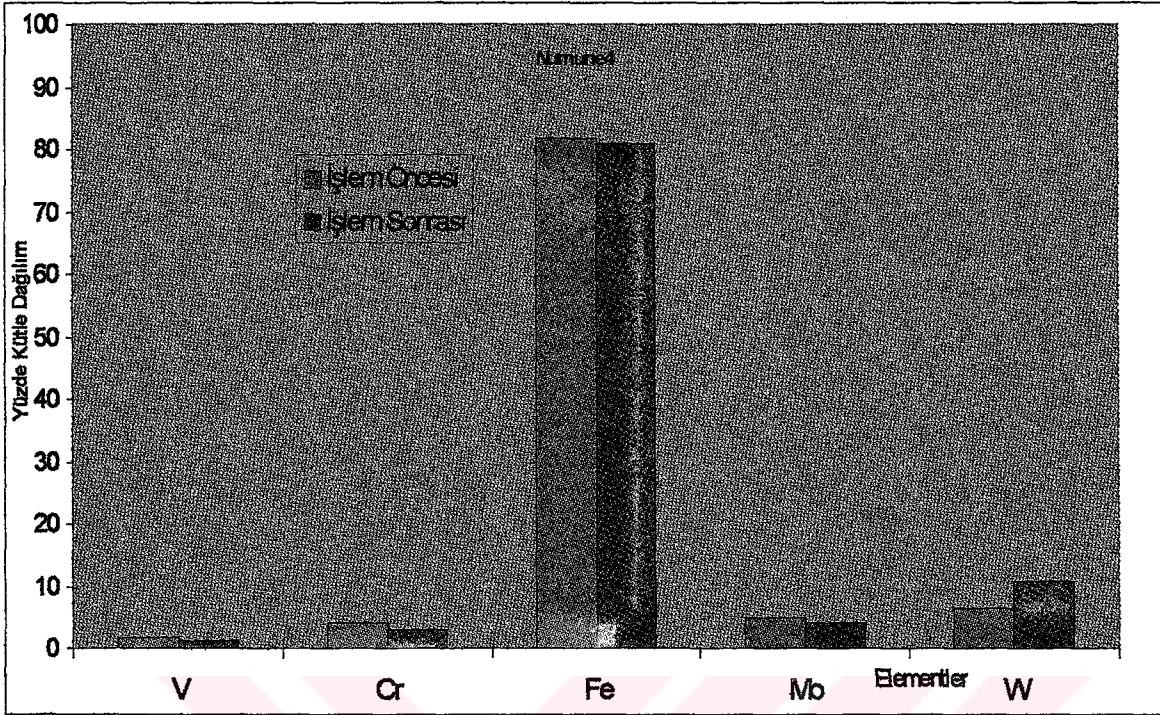
Şekil 6.7 NaCl (15A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu



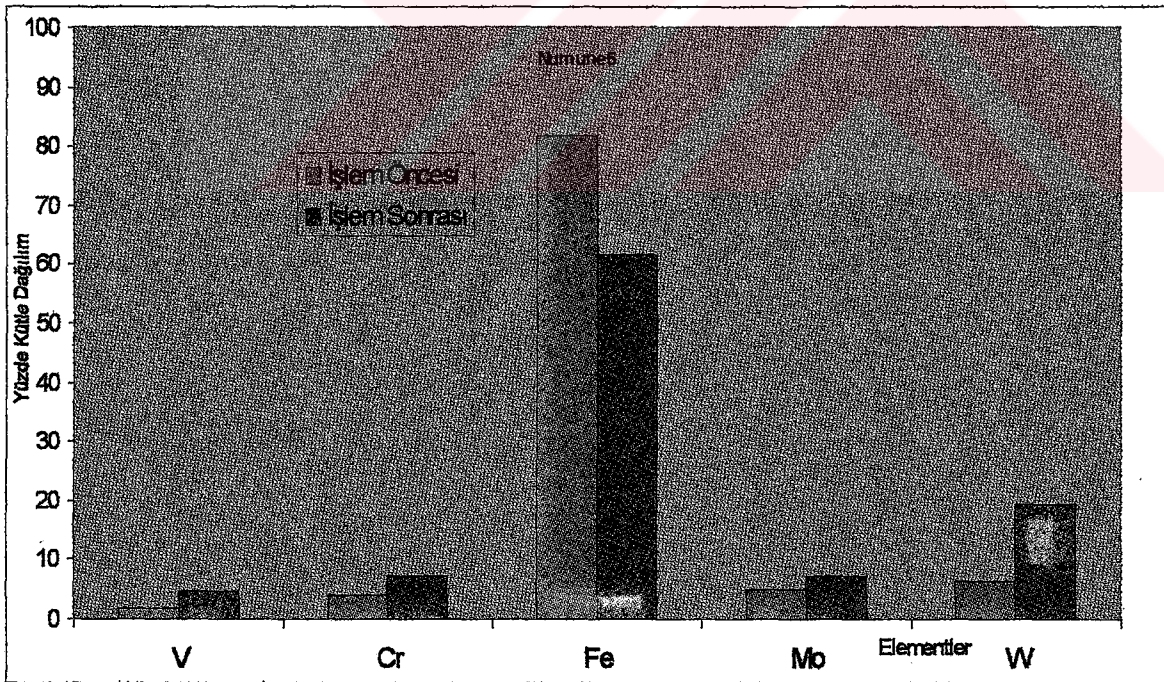
Şekil 6.8 NaCl (20A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu



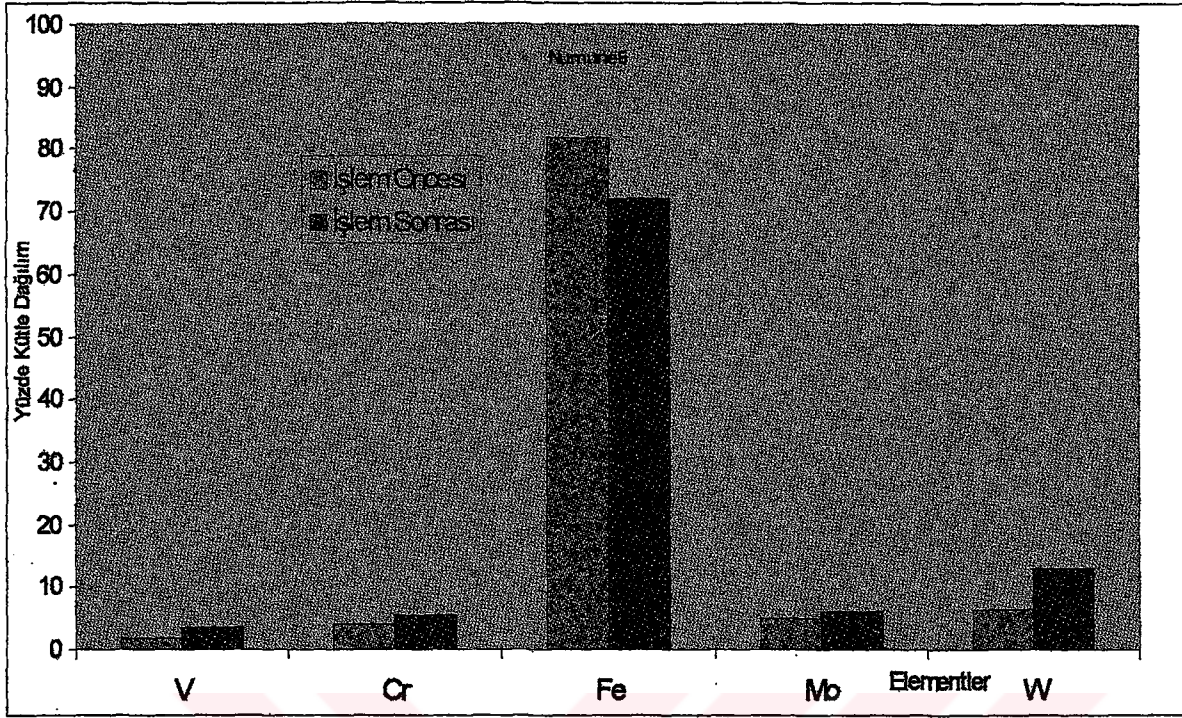
Şekil 6.9 NaNO₃ (20A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu



Şekil6. NaNO₃ (15A) ile yapılan ölçüme ait yüzey durumu



Şekil 6.11 Asetikasit (5A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu



Şekil 6.12 Asetikasit (10A) ile yapılan ölçüme ait karşılaştırmalı yüzey durumu

7 DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR

Analizlerden anlaşıldığına göre, NaNO_3 en az Fe çözünmesinin meydana geldiği elektrolittir, NaNO_3 'ı bu bakımdan NaCl takip etmektedir. Her iki elektrolitte diğer elementlerin de azaldığı göze çarpmaktadır. Akım değerinin artmasıyla NaNO_3 kullanılarak yapılan işlemede Fe çözünme oranının arttığı görülmüştür. NaNO_3 aynı zamanda en temiz yüzey durumunun elde edildiği elektrolittir. Tungsten, bütün analizlerde olması gereken %6.4 ten yüksek çıkmıştır. Cr, V, Mo gibi çeliğin, sertlik, işlenebilirlik dayanım gibi özelliklerini etkileyen elementler, asetik asid elektroliti haricinde bütün numunelerde azalma eğilimi göstermiştir. NaCl kullanılarak yapılan ölçümlerin bazılarında W az gözükmemektedir, ancak aynı elektrolit kullanılarak yapılan diğer ölçümlerle ortalaması alındığında yine, başlangıç değerinden fazla olduğu anlaşılmıştır. NaCl yüzeylerin pürüzlülüğünü de artırmaktadır.

Asetik asid en çok demir çözünmesinin meydana geldiği eriyiktir. Aynı zamanda diğer elementlerin yüzdeleri de belirgin bir şekilde öncekilerden farklıdır. Mo, Cr, V, W yüzdelerinin artması, malzemenin sertleşmesini sağlar. Asetik asid NaNO_3 ten sonra en temiz yüzey halininin elde edildiği elektrolittir.

Metal kopartma oranlarıyla ilgili olarak Eşitlik 4.1.3 ve 4.1.6 dan yararlanarak Çizelge 6.1,

6.2 ve 6.3 teki metal koparma oranları, teorik olarak, demir bazlı metaller için belirlenmiş

$2.208 \text{ mm}^3/\text{Adk}$ sınırını aşmamaktadır. Yoğunluk, valans ve atom numarasına bağlı olan bu değer her malzeme için farklıdır. Kontrollü olarak yapılan denemelerde metal koparma oranlarının daha fazla olduğu dikkat çekmiştir. Kontrolün sağladığı bir avantaj da yüzey temizliğinin daha iyi olmasıdır. En yüksek metal koparma oranı büyükten küçüğe doğru sırasıyla, NaCl , NaNO_3 ve asetik asiddir. Asetik asidin düşük iletkenliğinden dolayı yüksek akımlarda çalışmayı zorlaştırdığı görülmüştür. Bu yüzden, asetik asidle yapılan ölçümler daima 5 –10 A'lık düşük akım değerlerinde alınmıştır. Yüksek akımlar, kıvılcım oluşumunu ve neticesinde de kısa devreyi de beraberinde getirmiştir. Bütün bunların yanında, elektrodun şeklinin numuneye yansması bakımından en iyi sonucu asetik asid vermiştir. Elektrod hazırlanırken meydana gelen işleme izlerinin, numunede de belirgin olması bunu sebebidir. Nitekim Şekil 6.6 bunu doğrular niteliktedir. Görüntüde yer alan dairesel izler, takım olarak kullanılan elektrodun torna edildikten sonra üzerinde kalan izleridir. Çok pürüzsüz bir elektrod kullanılırsa, numune üzerinde kusursuz bir yüzey durumunun elde edileceği açıktır.

KAYNAKLAR

Bhattacharyya, B.Sorkhel, SK, (1999) "Investigation for controlled electrochemical machining through response surface methodology-based approach" Journal of Materials Processing Technology, FEB15, VL 86, IS 1-3

Kozak, J., vd. Budzynski, AF., Domanowski, P.(1998) "Computer simulation electrochemical shaping (ECM-CNC) using a universal tool electrode" Journal of Materials Processing Technology, APR 3, 1998, VL 76, IS 1-3

Kozak, J. (1998) "Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining processes" Journal of Materials Processing Technology, APR 3, VL 76, IS 1-3

Khairy, AB. (1996), "A knowledge-based system for electrochemical machining procedure", Journal of Materials Processing Technology, MAR 1, VL 58, IS 1

In-Hyu Choi, Jeong-Du Kim., (1997) "A study of the charecteristics of the electrochemical deburring of a governor shaft cross hole" Journal of Materials Processing Technology, Jan 10, VI 75, IS 1

Hardisty, H., Mileham, AR., Shirvani, H., (1997) "Theoretical and computational investigation of the electrochemical machining process for characteristic cases of a stepped moving tool eroding a plane surface" Journal of Materials Processing Technology, NOV 10, VI 34, IS 3

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.11.1977	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1988-1995	Özel Bilgi Lisesi
Lisans	1995-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak. Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik. Anabilim Dalı, Fizik Programı

Çalıştığı kurum

1995-Devam ediyor Teknik Vakum Ambalaj ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti

