

Yumuşak Çeliğin Korozyon Davranışı

Başak DOĞRU MERT*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 21.04.2017

Kabul tarihi: 31.05.2017

Öz

Bu çalışmada yumuşak çeliğin (YÇ) asidik ortamındaki korozyon davranışına 3-Amino metil piridin'in (3AMP) inhibitör etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal teknikler (elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve polarizasyon ölçümleri) ve kuantum kimyasal hesaplamalar uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; 3AMP'nin inhibisyon etkinliği artan 3AMP derişimi ile artış göstermiştir. 50 mM 3AMP içeren 0,5 M HCl çözeltisinde inhibisyon etkinliği %97 olarak tespit edilmiştir. Polarizasyon ölçümleri 3AMP'nin hem katodik hem de anodik reaksiyonların hızını azalttığını göstermektedir. Yüksek inhibisyon etkinliği, teorik olarak belirlenen yüksek HOMO enerjisi (-6,937 eV), dipol moment (2,473 D) ve düşük LUMO enerjisi (-1,05 eV) ile ilişkilendirilmiştir. Belirlenen Mulliken yüklere göre; N atomları üzerindeki negatif yük sebebiyle 3AMP'nin yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonunun amin ve/veya N ucundan gerçekleşebileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, Yumuşak çelik, 3-Amino metil piridin

The Corrosion Behavior of Mild Steel

Abstract

In this study, the inhibition effect of 3-aminomethyl pyridine (3AMP) on mild steel corrosion behavior in acidic medium is investigated. The electrochemical techniques (electrochemical impedance spectroscopy and polarization measurements) and quantum chemical calculations were obtained. The results showed that; inhibition efficiencies increase with increasing concentration of 3AMP. The inhibition efficiency is 97% in 50 mM 3AMP containing 0.5 M HCl solution. It is found that 3AMP retards both anodic and cathodic reactions according to polarization measurements. The high inhibition efficiency of 3AMP is attributed to the high value of EHOMO (-6.937 eV), dipole moment μ (2.473 D) and low value of ELUMO (-1.049 eV). According to calculated Mulliken charges; the adsorption of 3AMP may be occurred on amine and/N terminal of molecule.

Keywords: Corrosion, Mild steel, 3-aminomethyl pyridine

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Başak DOĞRU MERT, bdogru@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Endüstri ve mimaride en çok kullanılan metal alaşımı çeliklerdir. Gerek fiziksel ve kimyasal özellikleri, gerekse maliyeti bakımından çokça tercih edilmektedir. Fakat bu malzemelerin kullanımını kısıtlayan ve karşılaşılan en büyük sorun ise korozyondur. Korozyon kısaca, metalik malzemelerin çevreleri ile etkileşerek doğadaki kararlı hallerine dönmesidir. Korozyonu önleme yöntemlerinden bir tanesi ve özellikle asidik çözeltiler ile temizleme işlemlerinde en çok tercih edileni de inhibitör uygulamalarıdır [1, 3]. Korozif ortama ilave edilen çeşitli inhibitör maddeler vasıtasıyla metal ve ortam arasındaki ilişki kesilir. Bu maddeler metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan elektriksel alan etkisi ile metal yüzeyine fiziksel ve/veya kimyasal olarak adsorplanırlar. İnhibitör maddelerin etkinliği, kimyasal yapıları ile ilişkilidir ve OH-, -CHO, -COOH, -CN-, -SN, CO, -NH₃, SO₃ gibi gruplar, ya da çift bağ, üçlü bağ, ortaklanmamış elektronlar ihtiva eden organik maddelerin, metal ile kolayca etkileşeceği bilinmektedir [4-6]. Bu çalışmada, inhibitör madde olarak 3-Amino metil piridin'in (3AMP) yumuşak çeliğin (YÇ) korozyon davranışına etkisi araştırılmıştır. YÇ'nin 3AMP içermeyen ve içeren 0,5 M HCl çözeltilerindeki açık devre potansiyellerinin zamanla değişimi takip edilmiştir. Ayrıca farklı daldırma sürelerinde elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve polarizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 3AMP'nin YÇ yüzeyindeki adsorpsiyonu deneysel ve kuantum teorik yöntemlerle incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde piridin ve türevi bileşikler korozyona karşı inhibitör olarak sıkça kullanılmaktadır [1-8]. Bu bileşiklerin en büyük avantajı ise yapılarındaki konjuge çift bağlar ve düzlemsel yapıdaki hetero siklik halkada bulunan N atomudur. Bu sayede metal yüzeyine adsorpsiyon daha kolay gerçekleşebilir. Ji ve arkadaşları [1], 4-(((4-(bis(pyridin-2-ylmetil) amino) fenil) imino) metil)-N,N-dietilanilin (BPMA) sentezleyerek 1 M HCl'de yumuşak çeliğin korozyon davranışını kütle kaybı, impedans ve polarizasyon işlemleri ile

incelemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre 303 K'de, 16 saat sonunda, inhibitör ilave edilmeyen ortamda korozyon hızı yaklaşık olarak 14,84 mm/y iken en yüksek inhibitör derişimi olan 1 M'lık BPMA çözeltisinde bu değer 1,21 mm/y olarak belirlenmiştir. Bu veriler ile belirlenen inhibisyon etkinliği ise %91,9'dur. Aynı koşullarda impedans ölçümleri ile belirlenen etkinlik %88,2'dir. Sonuç olarak BPMA'nın asidik ortamda yumuşak çeliğin korozyona karşı korunabilmesi için inhibitör olarak kullanımı önerilmiştir [1].

Ansari ve arkadaşları [2] piridin türevi olan 2-amino-6-(2,4-dihidroksi fenil)-(etoksi fenil) nikotinonitril (ADP) ve 2-amino-4-(4-metoksi fenil)-6-fenil nikotinonitril (AMP) in %15 HCl çözeltisinde çeliğin korozyon davranışına etkilerini araştırmıştır. 200 mg/L inhibitör içeren çözeltilerde inhibisyon etkinlikleri yaklaşık olarak %92 (ADP) ve %88 (AMP) olarak tespit edilmiştir. Her iki molekülün de adsorpsiyonu Langmuir izotermine uygun olarak gerçekleşmiştir. Araştırmacılar bu iki molekülün de asidik ortamda inhibitör olarak kullanımının uygun olduğunu belirtmektedir [2]. İnhibisyon etkinliği artan ADP ve AMP derişim değerleri ile artış göstermektedir.

Bouklah ve arkadaşları [8] 3,5-dimetil-1H-pirazol (P1), 3,5-dimetil-1H-piridin (P2) ve 2-(3-metil-1H-pirazol-5-yl) piridin (P3) moleküllerinin inhibisyon özelliklerini 1 M HCl'de araştırmıştır. Bu üç farklı kimyasal yapıdaki inhibitörler kıyaslandığında P3'ün 10⁻³ M'lık çözeltisinde en yüksek inhibisyon etkinliği (%90) sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum piridin ve pirazol'ün sinerjistik etkisi ile açıklanmıştır. P3'ün ΔG_{ads} enerjisi oldukça yüksektir (-42 kJ/mol) ve bu molekülün yüzeye kuvvetlice adsorplandığını göstermektedir [8].

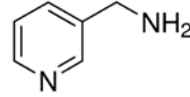
Bu çalışmada inhibitör etkinliği araştırılan 3AMP ise yapı bakımından literatürde çalışılan [1-8] piridin türevlerinden daha küçük molekül kütlesine sahip bir kimyasal maddedir (M=108,14 g/mol). Bu durumda aynı derişim değerlerinde, diğerlerine kıyasla [1-8] daha az madde tüketimi sağlanabilir. Ayrıca 3AMP yapısında bulunan amin grubu sayesinde yumuşak çelik yüzeyine daha kuvvetli

adsorplanabilir. Çünkü N gibi ortaklanmamış elektron çifti içeren sübstituentler içeren yapılarda elektron yoğunluğu yüksek bölgeler sayesinde metal yüzeyine tutunma olasılığı artmaktadır [9-16]. 3AMP molekülü hem heterosiklik halkadaki N bölgesi hem de amin ucundaki N bölgesi sayesinde adsorpsiyonu destekleyebilir.

3. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalarda kullanılan yumuşak çeliğin (YÇ) kimyasal bileşimi; (%); 0,17 C, 0,59 Si, 1,60 Mn, 0,04 P'dir. Çalışma elektrotlarının hazırlanması için silindirik şeklindeki yumuşak çelik çubuktan 5'er cm boyutunda parçalar kesilmiştir. Kesilen parçaların alt yüzeylerinden bir tanesine delik açılarak bu deliğe bakır tel yerleştirilmiştir. Parçaların delik olmayan ucu açıkta kalacak şekilde polyester ile kaplanmıştır, elektrotların yüzeyi mekanik parlatıcıda uygun zımpara kağıtlarıyla (100-1200 grid) parlatıldıktan sonra 1:1 etil alkol: aseton karışımı ile temizlenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler üç elektrot tekniğinden yararlanılarak, CHI 604 D model elektrokimyasal analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sistemde YÇ çalışma elektrotu, platin (Pt) karşı elektrot ve gümüş-gümüş klorür elektrot (Ag/AgCl, 3M KCl) referans elektrot olarak kullanılmıştır. YÇ elektrotların zamanla değişen açık devre potansiyelleri (E_{ocp}), farklı derişimlerde (0;1;5;10 ve 50 mM) 3-Amino metil piridin (3AMP) içeren 0,5 M HCl çözeltilerine tespit edilmiştir. YÇ elektrotlara farklı daldırma sürelerinde sabit E_{ocp} değerlerinde 10^5 - 10^3 Hz frekans aralığında, 5 mV genlik uygulanarak ve elektrolit karıştırılmadan elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri elde edilmiştir. Ayrıca elektrotların polarizasyon eğrileri $E_{ocp} \pm 250$ mV potansiyel aralığında 1 mV tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir. Kuantum teorik hesaplamalar GaussView 4.1 ve Gaussian 03W programları ile gerçekleştirilmiştir. DFT yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. Belirlenen değişkenler; Mulliken atomik yükler, E_{HOMO} (en yüksek enerjili dolu moleküler orbital enerjisi), E_{LUMO} (en düşük enerjili boş moleküler orbital enerjisi), ΔE ($E_{LUMO} - E_{HOMO}$), μ (dipol moment) vb.'dir.

3-Amino metil piridin'in (3AMP) yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

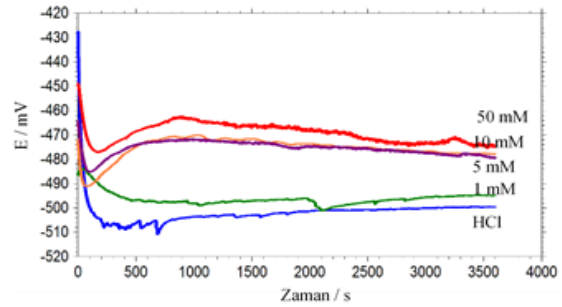


Şekil 1. 3-Amino metil piridin (3AMP)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Açık Devre Potansiyelinin Değişimi

YÇ elektrotların 3AMP içermeyen ve içeren çözeltilerde, zamanla değişen E_{ocp} değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi YÇ elektrotun açık devre potansiyelinin 3AMP içeren çözeltilerde artan inhibitör derişimi ile birlikte daha soy değerlerde olduğu, bekleme süresi boyunca yaklaşık 3000-3600 s'den itibaren ise yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlenmektedir.



Şekil 2. YÇ elektrotların 3AMP içermeyen ve farklı derişimlerde 3AMP içeren 0,5 M HCl çözeltilerindeki açık devre potansiyellerinin zamanla değişimi

4.2. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi

YÇ'in 3AMP içermeyen ve farklı derişimlerde 3AMP içeren 0,5 M HCl'de 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen elektrokimyasal impedans spektrumları Şekil 3'de sunulmaktadır. Şekil 3'de görüldüğü gibi yüksek frekans bölgesinde başlayarak, orta frekans bölgesinde devam eden ve düşük frekans bölgesinde kapanan yarı eliptik eğriler tespit edilmiştir. Özellikle 3AMP içermeyen ortamda elde edilen eğri oldukça düşük faz açısına sahip ve basık eliptik bir eğridir.

Nyquist eğrilerinden 0;1;5;10 ve 50 mM 3-Amino metil piridin (3AMP) içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde belirlenen direnç değerleri sırasıyla, 39; 643; 674; 1078 ve 1308 ohm'dur (Şekil 2). Bu direnç değerleri polarizasyon direnci olup (R_p) yük transfer direnci (R_{ct}), yüzeydeki kaplama veya film direnci (R_f) ve iyon difüzyonuna karşı gösterilen dirençleri kapsamaktadır [9]. Eğriler Şekil 3'de verilen eşdeğer devreye uygun olarak modellenmiştir ve belirlenen eşdeğer devre elemanları Çizelge 1'de sunulmaktadır. R_s çözelti direncini, CPE ise sabit faz elementini temsil etmektedir. Eğrilerin basık eliptik şekli sebebiyle modelleme CPE'ye uygun olarak yapılmıştır ve eşitlikler (1)-(3) yardımıyla çift tabaka kapasitansına (C_{dl}) dönüştürülmüştür. $\eta\%$ değeri inhibisyon etkinliği olup eşitlik (4) yardımıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 1. İmpedans parametreleri

C_{inh}/mM	R_s/Ω	R_p/Ω	$C_{dl}/\mu Fcm^{-2}$	$\eta\%$
0	4,9	39	151,1	-
1	4,4	643	67,4	93,9
5	4,7	674	65,8	94,2
10	5,3	1078	63,2	96,4
50	4,9	1308	44,6	97,0

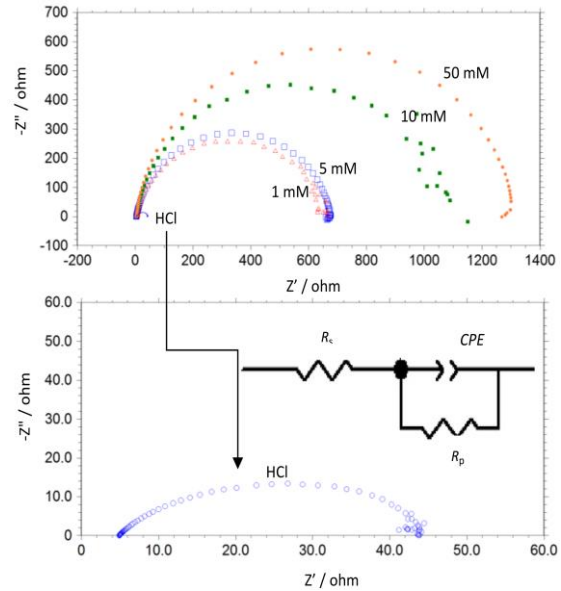
$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (1)$$

$$\omega = \left(\frac{1}{R_{ct}Y_0} \right)^{1/n} \quad (2)$$

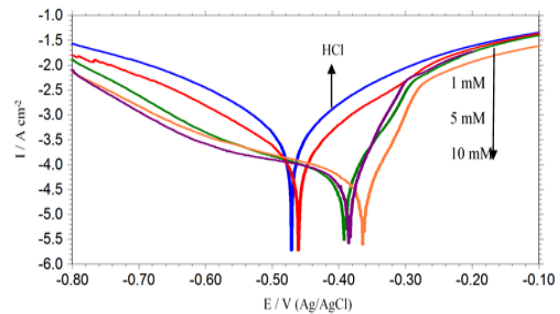
$$C_{dl} = \frac{Y_0\omega^{n-1}}{\sin(\frac{n\pi}{2})} \quad (3)$$

$$\eta\% = \left(\frac{R_p - R_p'}{R_p} \right) \times 100 \quad (4)$$

Eşitliklerde (1)-(4), Y_0 ve n , frekanstan bağımsız parametreler olup, $-1 \leq n \leq 1$ dir. ω impedansın imajinal bölümünün açısal frekansıdır. R_p and R_p' sırasıyla inhibitörsüz ve inhibitörlü ortamdaki direnç değerleridir. 3AMP derişimi ile direnç değerleri artmış ve C_{dl} değerleri azalmıştır. En yüksek inhibisyon etkinliği 50 mM 3AMP içeren ortamda %97 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. YÇ elektrotların 3AMP içermeyen ve farklı derişimlerde 3AMP içeren 0,5 M HCl çözeltilisinde 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen Nyquist eğrileri ve eşdeğer devre modeli



Şekil 4. YÇ elektrotların 3AMP içermeyen ve farklı derişimlerde 3AMP içeren 0,5 M HCl çözeltilisinde 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen polarizasyon eğrileri

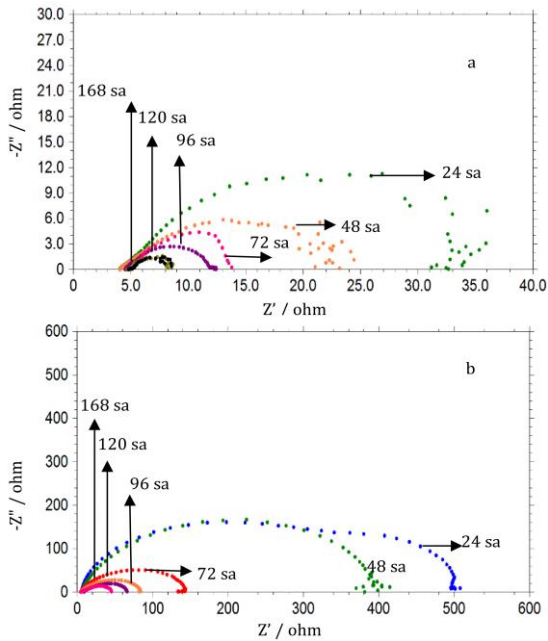
4.3. Polarizasyon Eğrileri

YÇ'in 3AMP içermeyen ve içeren 0,5 M HCl'de 1 saat bekleme süresi sonunda elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 4'de görülmektedir. YÇ'nin polarizasyonu sırasında 3AMP içeren ortamlarda sistemden geçen akım yoğunluğu değerlerinin içermeyen ortama kıyasla çok daha

düşük olduğu görülmektedir. 5 mM ve üzerindeki derişimler için güvenilir Tafel bölgesi tespit edilemediğinden dolayı korozyon akımı ve potansiyeli kesin olarak hesaplanamamaktadır. Fakat artan 3AMP derişimine bağlı olarak korozyon potansiyeli değerlerinin daha soy değerlere kaydığı açıkça görülmektedir.

4.4. Zamanla Değişen İnhibitör Etkinliği

Elektrokimyasal ölçümler sırasında sistemin denge potansiyeline ulaşması için gereken süre 1 saat olarak tespit edildiğ i için (Şekil 2), gerek elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri (Şekil 3), gerekse polarizasyon eğrileri (Şekil 4) bu koşullarda elde edilmiştir. Fakat endüstriyel uygulamalar dikkate alındığında inhibitör seçimi yapılırken uzun uygulama sürelerindeki performans oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple 1-168 saat daldırma sürelerinde 3AMP içermeyen ve içeren ortamlardaki etkinlik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 5'de görülmektedir.



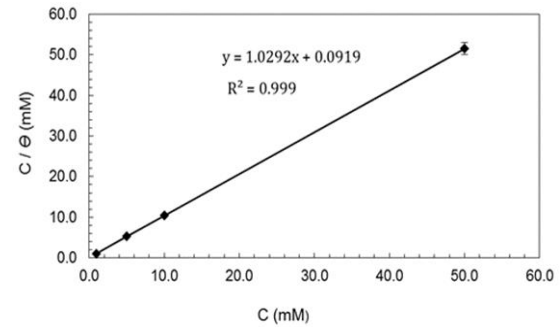
Şekil 5. YÇ elektrotların 3AMP içermeyen (a) ve 50 mM 3AMP içeren (b) 0,5 M HCl çözeltilerinde farklı daldırma sürelerinde elde edilen Nyquist eğrileri

Şekil 5'de görüldüğü gibi artan bekleme süresi ile 3AMP içermeyen ve içeren ortamlarda direnç değerleri azalmıştır. Bu durum korozyon ortamları uzun süre temas eden metalin çözünmesinden ve metal çözelti ara yüzeyine iç Helmholtz tabakaya kadar spesifik adsorplanabilen Cl⁻ iyonlarının aşındırıcı etkisinden kaynaklanabilir [9]. 3AMP içeren ortamda YÇ'nin direnç değerlerinin (R_p'), içermeyen ortama (R_p) kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Eşitlik 4 yardımıyla belirlenen inhibisyon etkinliğinin zamanla değışimi Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1-168 saat daldırma süreleri sonunda elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümlerinden belirlenen inhibisyon etkinlikleri

t / sa	R _p /Ω	R _p '/Ω	η%
24	33,2	503,5	93,4
48	24,6	401	93,9
72	14,2	144	90,1
96	12,4	80,8	84,7
120	8,6	63,5	86,5
168	8,2	42,8	80,8

Çizelge 2'de görüldüğü gibi 3AMP YÇ'nin 0,5 M HCl çözeltilerinde korozyon davranışına uzun daldırma süreleri boyunca (168 sa) inhibisyon etkisi göstermektedir. 3AMP'nin YÇ yüzeyine adsorpsiyonunun incelenmesi amacıyla adsorpsiyon izotermelerinden yararlanılmış ve en uygun olanın Langmuir adsorpsiyon izotermi olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. YÇ'nin farklı derişimlerde 3AMP içeren 0,5 M HCl çözeltilerinde elde edilen Langmuir adsorpsiyon izotermi

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (5)$$

Eşitlik 5'de C_{inh} inhibitör derişimini, θ yüzey kaplanma kesrini, K_{ads} ise adsorpsiyon denge sabitini temsil etmektedir [10-13]. Şekil 6'da, Eşitlik 5 yardımıyla belirlenen K_{ads} değeri $10,88 \times 10^3 \text{ M}^{-1}$ dir. Bu değerin büyüklüğü 3AMP'nin YÇ yüzeyine oldukça güçlü adsorplandığını göstermektedir. Eşitlik 6 yardımıyla belirlenen ΔG_{ads}^0 değeri ise yaklaşık 33 kJ mol^{-1} olarak hesaplanmıştır ve bu değer adsorpsiyonun fiziksel olarak gerçekleştiğini göstermektedir [14-16].

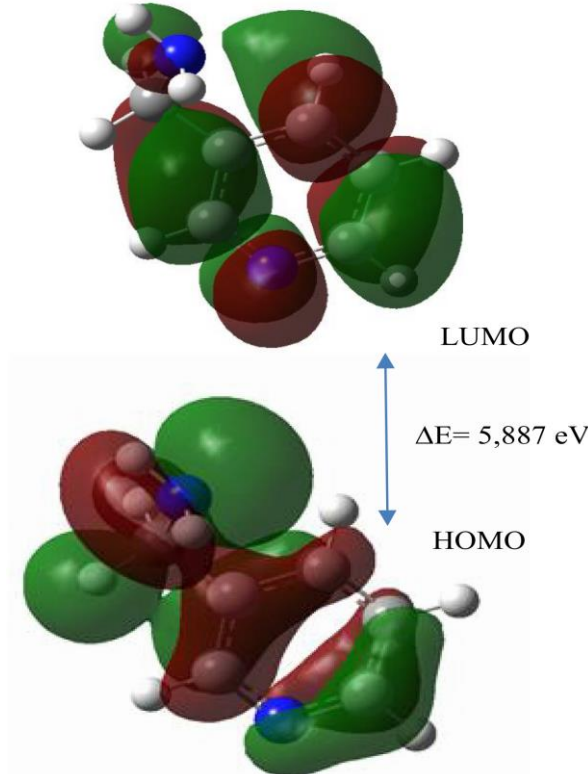
$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (6)$$

4.5. Kuantum Teorik Hesaplamalar

3AMP'nin YÇ yüzeyinde adsorpsiyonunun aydınlatılması amacıyla kuantum teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla DFT

yaklaşımıyla, 6-311++G (d,p) baz seti kullanılmıştır. 3AMP için en düşük enerjili boş orbital (LUMO) enerjisi -1,05 eV; en yüksek enerjili dolu orbital (HOMO) enerjisi -6,937 eV olarak hesaplanmıştır. Bu orbitaller Şekil 7'de görülmektedir. Ayrıca 3AMP için belirlenen yüksek dipol moment değeri (2,473 D), bu molekülün YÇ yüzeyine adsorpsiyonunun kolay bir şekilde gerçekleşebileceğini göstermektedir [16].

3AMP moleküllerinin, asidik ortamda pozitif yükü yüklenmiş olan YÇ yüzeyine, negatif uçlardan yaklaşacağı düşünülmektedir. Elde edilen Mulliken yük değerleri incelendiğinde; 3AMP'deki amin grubu üzerinde yer alan N atomunun -0,353 a.u. yükü sebebiyle, adsorpsiyonun molekülün bu grubu vasıtasıyla gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 7. 3AMP'nin LUMO ve HOMO şekilleri

Sonuç olarak; 3AMP'nin 0,5 M HCl içeren çözeltilerde yumuşak çeliğin korozyona karşı korunması amacıyla kullanılabileceği ve etkinliği yüksek bir inhibitör olduğu tespit edilmiştir. 3AMP'nin literatürde yer alan diğer piridin türevleri ile kıyaslanması açısından inhibisyon etkinlikleri Çizelge 3'de verilmiştir. Buna göre 3AMP, literatürdeki birçok piridin türevinden daha etkili bir inhibitördür ve endüstriyel uygulamalarda özellikle asidik temizleme banyolarında kullanımı tavsiye edilmektedir.

Çizelge 3. Piridin türevi bileşiklerin inhibisyon etkinlikleri

Molekül	Etkinlik* / %	Kaynaklar
BPMA	91,9	[1]
ADP	92,0	[2]
AMP	88,0	[2]
TPP	94,3	[3]
P2T	97,5	[4]
2PD	96,7	[4]
PC-1	97,4	[5]
PC-2	95,7	[5]
PC-3	88,0	[5]
P1	94,0	[6]
P2	87,0	[6]
TODPCN	60,5	[7]
TODPCN+ KI	97,5	[7]
P1	32,0	[8]
P2	13,0	[8]
P3	91,0	[8]
3AMP	97	Bu çalışmada

*Çizelge 3'deki etkinlik değerleri her bir araştırmada belirtilen inhibitör maddelerin en yüksek derişimleri için elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Ji, Y., Xu B., Gong, W., Zhang, Z., Jin, X., Ning W., Meng Y., Yang W., Chen Y., 2016. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers: Corrosion Inhibition of a New Schiff Base Derivative With Two Pyridine Rings on Q235 Mild Steel in 1.0 M HCl, 66, p. 301–312.
- Ansari, K., Quraishi, M.A., Singh, A., 2015. Measurement: Pyridine Derivatives As Corrosion Inhibitors for N80 Steel in 15% HCl: Electrochemical, Surface and Quantum Chemical Studies, 76, p. 136–147.
- Singh, P., Quraishia, M.A., Gupta, S.I., Dandi, A., 2016. Journal of Taibah University for Science: Investigation of The Corrosion Inhibition Effect of 3-Methyl-6-Oxo-4-(Thiophen-2-Yl)-4,5,6,7-Tetrahydro-2H-Pyrazolo[3,4-B]Pyridine-5-Carbonitrile (TPP) On Mild Steel in Hydrochloric Acid, 10, p. 139–147.
- Kosari, A., Moayed, M.H., Davoodi, A., Parvizi, R., Momeni, M, Eshghi, H, Moradi, H., 2014. Corrosion Science: Electrochemical and Quantum Chemical Assessment of Two Organic Compounds From Pyridine Derivatives as Corrosion Inhibitors For Mild Steel in HCl Solution Under Stagnant Condition And Hydrodynamic Flow. 78, p. 138-150.
- Ansari, K., Quraishi, M.A., Singh, A., 2015. Journal of Industrial and Engineering Chemistry: Corrosion Inhibition of Mild Steel in Hydrochloric Acid By Some Pyridine Derivatives: An Experimental And Quantum Chemical Study, 25, p. 89–98.
- Tebbj, K., Ouddac, H., Hammouti, B., Benkaddour M., Kodadi M., Ramdani A., 2005. Colloids and Surfaces A: Inhibition Effect of Two Organic Compounds Pyridine–Pyrazole Type In Acidic Corrosion of Steel, 259, p. 143–149.
- Mourya, P., Sing, P., Rastog, R., Singh, M., 2016. Applied Surface Science: Inhibition of Mild Steel Corrosion By 1,4,6-Trimethyl-2-Oxo-1,2-Dihydropyridine-3-Carbonitrile And Synergistic Effect of Halide Ion in 0.5 M H₂SO₄, 380, p. 141–150.
- Bouklah, M., Attayibat, A., Hammouti, B., Ramdani, A., Radi S., Benkaddour M., 2005. Applied Surface Science: Pyridine–Pyrazole Compound as Inhibitor for Steel in 1 M HCl, 240, p. 341–348.
- Bockris, J.O., Reddy, A.K.N., Gamboa A.M., 2000. Modern electrochemistry Fundamentals of electrodicts. 2nd ed., New York, USA.
- Scendo, M., Trela, J., 2013. Journal of Electrochemical Science: Adenine as an

- Effective Corrosion Inhibitor for Stainless Steel in Chloride Solution, p. 9201–9221.
11. Deng, S., Li, X., Xie, X., 2014. Corrosion Science: Hydroxymethyl Urea And 1,3-Bis (Hydroxymethyl) Urea as Corrosion Inhibitors for Steel in HCl Solution, 80 p. 276–289.
 12. Khamis, A., Saleh, M.M., Awad, M.I., El-Anadouti, B.E., 2013. Corrosion Science Enhancing The Inhibition Action of Cationic Surfactant with Sodium Halides For Mild Steel in 0.5 M H₂SO₄, 74, p. 83–91.
 13. Li, X., Deng, S., Fu, H., Xie, X., 2014. Corrosion Science Synergistic Inhibition Effects of Bamboo Leaf Extract/Major Components and Iodide Ion on The Corrosion of Steel in H₃PO₄ solution, 78, p. 29–42.
 14. Yadav, M., Sinha, R.R, Kumar, S., Bahadur, I., Ebenso E.E., 2015. Journal of Molecular Liquids: Synthesis And Application of New Acetohydrazide Derivatives as a Corrosion Inhibition of Mild Steel in Acidic Medium: Insight From Electrochemical And Theoretical Studies, 208, p. 322–332.
 15. Zhanga, D., Tanga, Y., Qia, S., Donga, D., Cang, H., Lu, G., 2016. Corrosion Science: The Inhibition Performance of Long-Chain Alkyl-Substituted Benzimidazole Derivatives For Corrosion of Mild Steel in HCl, 102, p. 517-522.
 16. Yüce, A., Telli, E., Doğru Mert, B., Kardaş, G., Yazıcı, B., 2016. Journal of Molecular Liquids: Experimental and Quantum Chemical Studies on Corrosion Inhibition Effect of 5,5 Diphenyl 2-Thiohydantoin on Mild Steel in HCl Solution, 218, p. 384-392.