



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



MOLİBDENİN SİTRİK ASİT ÇÖZELTİSİNDE
HİDROJEN PEROKSİT İLE ÇÖZÜNME
KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Samet BİNİCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Samet BİNİCİ tarafından hazırlanan “**MOLİBDENİN SİTRİK ASİT ÇÖZELTİSİNDE HİDROJEN PEROKSİT İLE ÇÖZÜNME KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması 17/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Fatih DURMAZ
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Tevfik AĞAÇAYAK
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Ali ARAS
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Samet BİNİCİ

Tarih:17.12.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOLİBDENİN SİTRİK ASİT ÇÖZELTİSİNDE HİDROJEN PEROKSİT İLE ÇÖZÜNME KİNETİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Samet BİNİCİ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Tefik AĞAÇAYAK

2025, 46 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Tefik AĞAÇAYAK
Doç. Dr. Fatih DURMAZ
Doç. Dr. Ali ARAS**

Bu tez çalışmasında, hidrojen peroksit (H_2O_2) eklenmiş sitrik asit ($C_6H_8O_7$) çözeltisinde metalik molibdenin (Mo) çözündürülmesi ve çözünme kinetiği araştırılmıştır. Deneylerde disk dönüş hızının, $C_6H_8O_7$ konsantrasyonunun, H_2O_2 konsantrasyonunun, disk yüzey alanının ve sıcaklığın çözünme kinetiği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneylerde, 207 ila 942 rad/dak. arasında değişen disk dönüş hızlarının molibdenin çözünmesini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca, Mo çözünmesi 0,2 M ila 1 M arasındaki sitrik asit konsantrasyonlarından olumlu etkilenmiştir. Mo çözünmesinin 0,2 ila 0,4 M arasındaki hidrojen peroksit konsantrasyonlarında önemli ölçüde arttığı gözlemlenirken, 0,4 ila 1 M arasındaki konsantrasyonlarda yavaşladığı görülmüştür. Çözünmenin disk yüzey alanıyla doğru orantılı olarak arttığı söylenebilir.

Sıcaklık arttıkça Mo çözünmesi de artmaktadır. Ancak çözünme hızı 20-40 °C'de azalırken, 40 °C'den sonra hızlı çözünme gözlenmektedir. Molibdenin hidrojen peroksit (H_2O_2) içeren sitrik asit çözeltisindeki çözünme kinetiği Levich denklemi kullanılarak belirlenmiştir. Aktivasyon enerjisi 55,78 kJ/mol olarak hesaplanmış olup, çözünmenin yüzey kimyasal reaksiyon modeline uygun olduğunu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çözünme kinetiği, hidrojen peroksit, molibden, sitrik asit.

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF THE DISSOLUTION KINETICS OF MOLYBDENUM IN CITRIC ACID SOLUTION WITH HYDROGEN PEROXIDE

Samet BİNİCİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Tevfik AĞAÇAYAK

2025, 46 Pages

**Jury
Prof. Dr. Tevfik AĞAÇAYAK
Assoc. Prof. Dr. Fatih DURMAZ
Assoc. Prof. Dr. Ali ARAS**

In this thesis study, the dissolution of metallic molybdenum (Mo) in a citric acid ($C_6H_8O_7$) solution containing hydrogen peroxide (H_2O_2) and its dissolution kinetics were investigated. In the experiments, the effects of disk rotational speed, $C_6H_8O_7$ concentration, H_2O_2 concentration, disk surface area, and temperature on the dissolution kinetics were examined.

The experimental results showed that disk rotation speeds ranging from 207 to 942 rad/min positively affected the dissolution of molybdenum. In addition, Mo dissolution was favorably influenced by citric acid concentrations in the range of 0.2–1.0 M. While a significant increase in Mo dissolution was observed at hydrogen peroxide concentrations between 0.2 and 0.4 M, the dissolution rate was found to decrease at concentrations between 0.4 and 1.0 M. The dissolution rate was observed to increase proportionally with the disk surface area.

The dissolution of Mo increased with increasing temperature. However, the dissolution rate decreased in the temperature range of 20–40 °C, whereas rapid dissolution was observed above 40 °C. The dissolution kinetics of molybdenum in the citric acid solution containing hydrogen peroxide (H_2O_2) were determined using the Levich equation. The activation energy was calculated to be 55.78 kJ/mol, indicating that the dissolution process follows a surface chemical reaction–controlled model.

Keywords: Citric acid, dissolution kinetics, hydrogen peroxide, molybdenum.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, bana maddi ve manevi desteği esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Tefik AĞAÇAYAK'ın vermiş olduğu öneri, yönlendirme ve literatür desteği için şükranlarımı sunarım. Bölümümüz doktora öğrencisi MAHMOUD MOTASIM HASSAN'ın tez aşamasında vermiş olduğu katkıdan dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim için olanak sağlayan Konya Teknik Üniversitesi'ne ve laboratuvar ve diğer destekleri sağlayan Maden Mühendisliği Bölümü'ne, hocalarıma teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında yanımda olan maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

Samet BİNİCİ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Molibden Hakkında Genel Bilgiler.....	3
2.1.1. Molibdenin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	3
2.1.2. Molibdenin kullanım alanları.....	4
2.1.3. Molibden mineralleri	5
2.1.4. Türkiye ve dünya molibden yatakları	6
2.2. Molibdenin Çözünme Kimyası ve Önceki Çalışmalar.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	16
4.1. Numuneye Ait Deney Öncesi ve Sonrası Analiz Sonuçları	16
4.2. Sitrik Asit ve Hidrojen Peroksit Ortamında Gerçekleştirilen Liç Deneyleri	20
4.2.1. Disk dönüş hızının etkisi.....	20
4.2.2. Sitrik asit konsantrasyonunun etkisi	21
4.2.3. Hidrojen peroksit konsantrasyonunun etkisi.....	22
4.2.4. Disk yüzey alanının etkisi.....	23
4.2.5. Sıcaklığın Etkisi	24
4.3. Çözünme Kinetik Analizi.....	25
4.3.1. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Disk dönüş hızının etkisi.....	25
4.3.2. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Sitrik asit konsantrasyonunun etkisi	27
4.3.3. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Hidrojen peroksit konsantrasyonunun etkisi.....	28
4.3.4. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Disk yüzey alanı etkisi	29
4.3.5. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Sıcaklığın etkisi.....	29
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mo-H ₂ O ₂ sisteminin 25°C'deki Pourbaix diyagramı.....	10
Şekil 3.1. Molibdenin çözündürülmesi için tasarlanmış deney düzeneği.....	14
Şekil 4.1. Mo diskinin X-ışını kırınımı (XRD) analizi.....	16
Şekil 4.2. Mo diskinin C ₆ H ₈ O ₇ /H ₂ O ₂ çözeltisinde çözündürülmesinden sonra X-ışını kırınımı (XRD) analizi.....	17
Şekil 4.3. Çözünmeden önce saf Mo disk yüzeyinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ile taramalı elektron mikroskobu analizi.....	18
Şekil 4.4. Hidrojen peroksit ve sitrik asit ile çözündürüldükten sonra saf Mo disk yüzeyinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ile taramalı elektron mikroskobu analizi.....	19
Şekil 4.5. Disk dönüş hızının Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 4.6. Sitrik asit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.....	21
Şekil 4.7. Hidrojen peroksit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.....	23
Şekil 4.8. Disk yüzey alanının Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.....	24
Şekil 4.9. Sıcaklığın Mo çözünmesi üzerindeki etkisi	25
Şekil 4.10. Disk dönüş hızına bağlı olarak reaksiyon derecesinin belirlenmesi.....	26
Şekil 4.11. Çözünme hızlarının disk dönme hızlarının karekökü ($W^{1/2}$) ile ilişkisi..	27
Şekil 4.12. Sitrik asit konsantrasyonunun Mo çözünme hızına etkisi için $\ln[C_6H_8O_7]-\ln[k]$ grafiği	27
Şekil 4.13. Hidrojen peroksit konsantrasyonunun Mo çözünme hızına etkisi için $\ln[H_2O_2]-\ln[k]$ grafiği.....	28
Şekil 4.14. Disk yüzey alanına bağlı olarak reaksiyon derecesinin belirlenmesi için $\ln[A]-\ln[k]$ grafiği.....	29
Şekil. 4.15. Farklı sıcaklık değerlerindeki Mo çözünmesi için $\ln[1000/T]-\ln[k]$ Arrhenius grafiği.....	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Mobibdenin özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Bazı molibden mineralleri	6
Çizelge 2.3. Dünyada molibden rezervleri	7
Çizelge 2.4. Dünya molibden madeni üretim miktarları	8
Çizelge 2.5. Farklı reaktifler kullanılarak molibden çözünme kinetiği üzerine yapılan önceki çalışmalar	13



1. GİRİŞ

Molibden, önemli bir cevher olarak çıkarılmakta ve aynı zamanda bakır ve tungsten madenciliği faaliyetlerinin bir yan ürünü olarak da geri kazanılmaktadır. Molibdenit (MoS_2), vulfenit (PbMoO_4), povellit (CaMoO_4) ve ferrimolibdit ($\text{Fe}^{+3}2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) gibi doğal olarak oluşan çeşitli molibden formları bulunmaktadır. Ancak, yalnızca molibdenit (MoS_2), pazarlanabilir molibden ürünlerinin endüstriyel üretimi için uygundur.

Molibden, dökme demir, çelik ve süper alaşımlarda sertleşebilirliği, mukavemeti, tokluğu, aşınma ve korozyon direncini artırmak için alaşım maddesi olarak ve petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan refrakter bir metalik elementtir. Molibden, alaşımların dayanım ve performans özelliklerini iyileştirebilmesi sayesinde; yüksek gerilme, geniş sıcaklık aralıkları ve aşındırıcı ortamlar gibi zorlu koşullara dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulan modern endüstride önemli bir yere sahiptir. Ayrıca refrakter bir metal olan molibden, katalizörler, yağlayıcılar, briketler ve pigmentler gibi pek çok kimyasal ve endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Molibden, enerji sektöründe de hayati bir role sahip olup, otomobillerin toplam ağırlığın azaltılması, yakıt verimliliğinin artırılması ve güvenliğin iyileştirilmesi amacıyla otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca molibden, etkin bir ajan element olarak sıvı yakıtlardaki kükürt içeriğinin azaltılmasında kritik bir işlev üstlenmektedir.

Molibden, yüzeyindeki koruyucu oksit tabakası sayesinde çeşitli asit ve alkali reaktiflerin neden olduğu korozyona karşı güçlü bir direnç gösterir. Asitler, Mo'yu okside ederek Mo_2O_5 ve MoO_3 gibi yüksek değerlikli molibden oksitler veya hidroksitler oluşturur. Hidrometalurji alanında, basınçlı oksidatif liç, hipoklorit liç, HCl veya HNO_3 kullanan asidik liç ve biyolojik liç gibi çeşitli yöntemler kullanılarak molibdenin çözündürülmesi araştırılmıştır.

Son yıllarda, sitrik asit, asetik asit ve oksalik asit v.b. zayıf organik asitler, çevre dostu olmaları nedeniyle araştırmacılar arasında mineral asitlere alternatif liç reaktifleri olarak önemli ilgi görmektedir. Ancak, sitrik ve tartarik asitler gibi çevre dostu organik asitler kullanılarak molibdenin çözündürülmesi üzerine araştırmaların sınırlı olduğu bilinmektedir.

Hidrojen peroksit, metal çözünmesini arttırmak için oksidatif bir ajan olarak cevherlerden, konsantrelerden veya ikincil kaynaklardan güçlü bir asitle metallerin liç süreçlerinde kullanılmıştır. Bu çalışmada, mineral asitlere alternatif olabilecek ve ekonomik ve çevre dostu bir reaktif olan sitrik asidin, hidrojen peroksit varlığında molibden metalini çözündürmedeki etkinliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Levich denklemi kullanılarak çözünme kinetiğinin belirlenmesi ayrıca bu çalışmanın konusudur. Levich'in dönen bir diske kütle transferi için matematiksel modeli, diskin dönme hızının uygunluğunu doğrulamak için laminar akış durumu dikkate alınarak geliştirilmiştir. 1963 yılında Levich ve Tobias, dönen diskin çözünme hızını belirlemek için bir denklem tanımlamışlardır. Laminar akış koşulları altında, metalin çözünme hızı bu denklem uygulanarak belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında, saf metalik molibdenin (Mo) sitrik asit ($C_6H_8O_7$)/hidrojen peroksit (H_2O_2) çözeltisindeki çözünme kinetiği açıklanmaktadır. Deneylerde disk dönüş hızının, $C_6H_8O_7$ konsantrasyonunun, H_2O_2 konsantrasyonunun, disk yüzey alanının ve sıcaklığın Mo çözünmesi ve çözünme kinetiği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Molibden Hakkında Genel Bilgiler

Molibden, “Mo” sembolü ile gösterilen ve 42 atom numarasına sahip, gümüş beyazı rengiyle ön plana çıkan bir geçiş metalidir. Yüksek ergime noktası ve aynı zamanda yüksek kaynama noktası gibi özelliklerinden dolayı dayanımı yüksek metaller arasında yer almaktadır. Molibden (Mo), sertlik, mukavemet ve korozyon direnci gibi mekanik özellikleri geliştirmek için esas olarak çelik, dökme demir ve süper alaşımlarda alaşım maddesi olarak kullanılan refrakter metalik bir elementtir. Ayrıca yakıtın yanmasından kaynaklanan kükürt dioksit emisyonlarını en aza indirmek için petrol ve petrol rafinasyonunda da kullanılır (Asghari ve ark., 2013; Lasheen ve ark., 2015). Molibdenin ana ticari kaynağı molibdenittir (MoS_2) ve ayrıca wulfenit (PbMoO_4) ve powellit (CaMoO_4) gibi çeşitli minerallerde de bulunur (Xie ve ark., 2019). Son zamanlarda, petroldeki kükürtü gidermede kullanılan katalizörler gibi ikincil kaynaklar molibden geri kazanımı için iyi bir değer göstermiştir. Genellikle daha önceden kullanılmış atık katalizörler Mo, Co, Ni, V ve Al gibi değerli metaller içerir (Marafi ve ark., 2007; Rezki ve ark., 2021). Uluslararası Molibden Birliği (IMO), 2019 yılında 259.100 tonla çelik endüstrisinde en büyük molibden kullanımının olduğunu bildirmektedir.

2.1.1. Molibdenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Molibdenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmektedir. Çizelge 2.1’den görüldüğü üzere, ergime sıcaklığının ve kaynama sıcaklığının yüksek olduğu aynı zamanda ısı ve elektriksel iletkenliğinin Pb, Ni, Ti vb. elementlerden yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek ergime ve kaynama noktası, yüksek ısı dayanımı, yüksek ısı iletkenliği ve saf metaller arasında en düşük termal genleşme gibi üstün özelliklere sahiptir.

Çizelge 2.1. Molibdenin özellikleri

Özellikleri	Değerleri
Sembol, Atom numarası	Mo, 42
Element özelliği	Geçiş metali
Grup, periyot, blok	VI, 5, d
Atom ağırlığı	95,94 g/mol
Yoğunluk	10,28 g/cm ³
Ergime noktası	2623 °C
Kaynama noktası	4693 °C
Buharlaşma enerjisi	598 kJ/mol
Elektron dağılımı	[Kr] ⁴ d ⁵ 5s ¹
Yükseltgenme seviyeleri	2, 3, 4, 5, 6
İyonlaşma enerjisi	684,2 kJ/mol
Elektriksel iletkenlik	0,187 10 ⁶ /cm Ω
Termal iletkenlik	1,38 W/cmK
Termal genleşme katsayısı	6,5 x 10 ⁻⁶ cm/cm°C
Brinell sertliği	1500 MN m ⁻²
Mohs sertliği	5,5
Vickers sertliği	1530 MN m ⁻²
Kristal yapısı	Kübik hacim merkezli

2.1.2. Molibdenin kullanım alanları

Molibden (Mo), çelik, dökme demir ve süper alaşımlarda sertleşebilirliği, mukavemeti, tokluğu ve aşınma ve korozyon direncini artırmak için esas olarak alaşım maddesi olarak kullanılan refrakter bir metalik elementtir.

Genellikle metalurjik özelliklere ulaşmak için, molibden, esas olarak molibden oksit veya ferromolibden formunda, krom, manganez, niyobyum, nikel, tungsten veya diğer alaşım metalleriyle birlikte kullanılmaktadır.

Molibden içeren alaşımların ticari uygulamalarına örnek olarak enerji üretimindeki gaz ve buhar türbinleri, füzeler ve uçaklar verilebilir. Metalik molibden, silisli malzemenin metallere yapışmasını artırır ve bu nedenle molibden, metal-seramik kompozitlerde faydalıdır (Barceloux ve Barceloux, 1999).

Molibdenin çeşitli alaşım özelliklerini geliştirmedeki çok yönlülüğü, yüksek stres, genişletilmiş sıcaklık aralıkları ve yüksek aşındırıcı ortamlarda kullanılabilir malzemelere giderek daha fazla ihtiyaç duyan çağdaş endüstriyel teknolojide önemli bir rol oynamasını sağlamıştır. Dahası molibden, katalizörler, yağlayıcılar ve pigmentler de

dahil olmak üzere çok sayıda kimyasal uygulamada refrakter bir metal olarak önemli bir kullanım alanı bulmaktadır (USGS, 2025).

Çinko molibdat (ZnMoO_4) ayrıca boya için stabilize edici ve korozyon önleyici özellikler sağlar. Molibden asetilasetonat ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{MoO}_6$), etilenin polimerizasyonu ve poliüretan köpük üretimi için bir katalizördür. Molibden disülfür (MoS_2), grafit benzer tabakalı bir yapıya sahiptir ve molibden sülfürlerin kullanım alanları arasında kuru yağlayıcılar ve kimyasal katalizörler bulunur (Barceloux ve Barceloux, 1999).

Özellikle, kimya endüstrisinde geniş kullanım alanı bulan molibden boya sektöründe kumaş boyamada, bunun yanı sıra alkol ve formaldehit elde edilmesinde de katalizörler özelliğinden dolayı kullanılır. Ayrıca, sürtünmeyi azalttığından dolayı motor yağı ve gres gibi ürünlerin içerisine eklenmektedir. Mıknatıs alaşımları, döküm karpitleri su ve gaz geçirmeyi önleyici malzemelerin imalinde de önemli kullanım alanları bulunmaktadır (DPT, 2001).

2.1.3. Molibden mineralleri

Molibden minerallerinin oluşumunun jeolojik tarihi, ayrıntılı olarak ele alınamayacak kadar uzun ve karmaşık bir konudur. Molibdenit (MoS_2), vulfenit (PbMoO_4), povellit (CaMoO_4) ve ferrimolibdit ($\text{Fe}^{+3}2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) gibi doğal olarak oluşan çeşitli molibden formları bulunmaktadır

Molibdenin başlıca ticari kaynağı molibdenittir (MoS_2). Molibden ayrıca parlak turuncu-kırmızıdan sarı-turuncuya kadar değişen renklerdeki vulfenit (PbMoO_4) ve şeffaf adamantin mavisi, yeşilimsi kahverengi, sarıdan griye kadar değişen renklerdeki povellit (CaMoO_4) gibi çeşitli minerallerde de bulunur. Belli başlı molibden mineralleri ve bazı özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı molibden mineralleri.

Mineral adı	Formülü	%Mo
Tugarinovit	MoO ₂	74,99
Molibdit	MoO ₃	66,65
Jordisit	MoS ₂	59,94
Molibdenit	MoS ₂	59,94
Kamiokit	Fe ₂ Mo ₃ O ₈	54,56
Lindgrenit	Cu ₃ (MoO ₄) ₂ (OH) ₂	35,24
Sidvillit	MoO ₃ •2(H ₂ O)	53,31
Monipit	MoNiP	51,69
Povellit	CaMoO ₄	47,97
Bamfordit	Fe ⁺⁺⁺ Mo ₂ O ₆ (OH) ₃ •(H ₂ O)	46,49
Ferrimolibdit	Fe ⁺⁺⁺ 2(MoO ₄) ₃ •8(H ₂ O)	40,11
Vülfenit	PbMoO ₄	26,13

2.1.4. Türkiye ve Dünya molibden yatakları

Molibden, düşük tenörlü büyük porfiri molibden yataklarında ana metal sülfür olarak ve düşük tenörlü porfiri bakır yataklarında ilişkili metal sülfür olarak bulunur (USGS, 2025).

Porfiri yatakları dünyadaki bakır ve molibden kaynaklarının ana kaynağı haline gelmiş ve büyük rezervleri ve geniş dağılımları nedeniyle arama çalışmalarının ana hedefi olmuştur. Küresel olarak, ekonomik açıdan önemli porfiri molibden yatakları çoğunlukla Kuzey Amerika'daki Batı Kordilera, Kanada'daki Britanya Kolombiyası, Güneydoğu Alaska ve Batı Amerika Birleşik Devletleri gibi Alp kıvrım kuşağında dağılmıştır. Dünyanın en büyük üç porfiri molibden yatağı olan Climax, Urad-Henderson ve Mt. Emmons, Colorado molibden kuşağında bulunmaktadır. İkinci olarak, Pasifik Çevresi metalojenik kuşağı ve Orta Asya Orojenik Kuşağı yer almaktadır (Cooke ve ark., 2005; Goldfarb ve ark., 2001; Sillitoe, 1972; Sillitoe, 1997; Kerrich ve ark., 2000; Mitchell, 1973).

Çin'de porfiri molibden yatakları çoğunlukla Doğu Qinling, Küçük Khingan Dağları-Zhangguangcai Dağları ve Yanliao molibden kuşaklarında dağılmıştır. Çin'deki

molibden yatakları, çoğunlukla geç Indosinian'dan Yanshanian'a kadar olan magmatizmanın ürünleridir ve bu oluşum diğer ülkelerdeki genç Kretase-Oligosen molibden yataklarından farklıdır (He ve ark., 2022; Li ve ark., 2021; Hou ve ark., 2019).

Dünya molibden rezervi 15 milyon ton olarak bilinmektedir. Rezerv bakımından 9,9 milyon ton ile Çin en yüksek değere sahipken, ilk beş sırada Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Peru, Şili ve Rusya yer almaktadır. Dünyada bazı ülkelerin molibden rezervleri Çizelge 2.3'de verilmiştir (USGS, 2025).

Çizelge 2.3. Dünyada molibden rezervleri (USGS, 2025).

Ülkeler	Rezervleri (tonx10 ³)
Amerika Birleşik Devletleri	3.500
Arjantin	100
Ermenistan	150
Avustralya	690
Kanada	64
Şili	1.400
Çin	9.900
İran	43
Kazakistan	7
Kore, Kuzey Kore	-
Kore Cumhuriyeti	8
Meksika	130
Moğolistan	10
Peru	1.900
Rusya	1.100
Özbekistan	21
Dünya toplamı (yuvarlatılmış)	15.000

Ülkemizde ise molibden porfiri-bakır yatakları oluşumu içerisinde. Bu oluşumlar içerisinde bakır birinci element olarak yer alırken molibden ikinci element olarak bulunmaktadır. Kırklareli-İkiztepeler-Şükrüpaşa ve Dereköy mevkilerinde, Elazığ-Keban-Nazlıziyaret, Trabzon-Maçka-Güzelyayla ve Erzurum-İspir-Ulutaş mevkilerinde porfiri yataklanmaları görülmektedir. Elazığ-Keban Karamağara'da hidrotermal damar tipi molibden-fluorit yatağı vardır. Ayrıca, Kırklareli-Şükrüpaşa'da kontak metamorfik oluşumlarında olduğu bilinmektedir. Elazığ-Baskil ve Yozgat-Merkez-Basnayayla mevkilerinde de Mo içeren oluşumlar tespit edilmiştir (DPT, 2001).

Dünyada molibden üretiminin büyük bir kısmı, bakır üretimi esnasında yan ürün olarak gerçekleştirilmektedir. Molibdenin ikincil kaynaklardan üretimi ise, petrol rafinasyonu sırasında ortaya çıkan katalizörlerden, demir hurdasından ve süper alaşım hurdasından yapıldığı bilinmektedir. Dünya molibden madeni üretim miktarları 2023 ve 2024 verilerine göre Çizelge 2.4'de gösterilmiştir (USGS, 2025).

Çizelge 2.4. Dünya molibden madeni üretim miktarları (USGS, 2025).

Ülkeler	Maden Üretimi (ton)	
	2023	2024
Amerika Birleşik Devletleri	34.000	33.000
Arjantin	-	-
Ermenistan	7.600	8.000
Avustralya	660	1.000
Kanada	1.150	1.200
Şili	44.100	38.000
Çin	96.000	110.000
İran	2.500	3.000
Kazakistan	3.730	3.900
Kore, Kuzey Kore	400	700
Kore Cumhuriyeti	339	300
Meksika	17.500	17.000
Moğolistan	3.160	3.100
Peru	33.500	41.000
Rusya	1.700	1.700
Özbekistan	1.700	1.700
Dünya toplamı (yuvarlatılmış)	248.000	260.000

Çizelge 2.4’de verilen değerlere göre, 2023 yılında 96.000 ton ve 2024 yılında ise 110.000 ton ile Çin en fazla molibden üretimi yapan ülke olmuş ve dünya üretiminin yaklaşık %40’ını karşılamaktadır. Yine bir önceki yıla göre üretimini yaklaşık %13 artırdığı görülmektedir. İlk beş sırada Çin, Şili, Peru, Amerika Birleşik Devletleri ve Meksika yer almaktadır. Ayrıca, Peru 2023 yılında 33.500 ton ve 2024 yılında ise 41.000 ton üretim gerçekleştirerek bir önceki yıla göre üretimini yaklaşık %18 artırmıştır. İlk beş içindeki Amerika Birleşik Devletleri, Şili ve Meksika ise 2023 yılına nazaran 2024 yılında üretimlerinin az da olsa azaldığı görülmektedir. Ülkemizde ise molibden üretimi yoktur. Genel olarak 2023 yılına nazaran 2024 yılında dünyadaki üretimin yaklaşık %5 arttığı ifade edilebilir.

2.2. Molibdenin Çözünme Kimyası ve Önceki Çalışmalar

Metallerin elektrokimyasal çözünmesi, metallerin redoks potansiyeli, asit konsantrasyonu ve sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenir (Feiner ve McEvoy, 1994). Elektrokimyasal çözünmede Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de görüldüğü gibi hidrojen iyonları katodik kısım, metal ise anodik kısım olarak kabul edilir (Free, 2022).



Hidrojen peroksit (H_2O_2), en güçlü oksitleyici ajanlardan biri olarak kabul edilir. Hidrojen peroksit asidiktir ve Denklem 2.3'te verildiği gibi suda çözündüğünde zayıf asit gibi davranabilir (Petrucci ve ark., 2017).



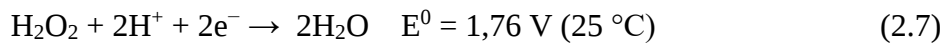
Hidrojen peroksit, metal çözündürülmesini arttırmak için oksidatif bir ajan olarak cevherlerden, konsantrelerden veya ikincil kaynaklardan güçlü bir asitle metalleri kazanmak için kullanılmıştır (Aydoğan ve ark., 2024; Aydoğan ark., 2007a). Özellikle hidrojen peroksit, sülfat minerallerindeki zayıf asitlerle birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydoğan ark., 2007b; Wu ve ark., 2021). Ayrıca siyanür çözeltilerinde altın liçi için bir oksidan olarak değerlendirilmektedir (Motasim ve ark., 2023). Hidrojen peroksit, yüksek basınçta çözünmüş oksijenin indirgenmesiyle oluşur. Örneğin, Denklem 2.4'de gösterildiği gibi CIL pilot tesisinde oksijen hava enjeksiyonu yoluyla altının siyanürlenmesinde ölçülebilir konsantrasyonda üretilir (Damjanovic ve ark., 1967).



Alkali bir çözeltide hidrojen peroksit, Denklem 2.5'te gösterildiği gibi indirgeyici bir reaksiyonda iki elektron kazanarak 1,007 V'luk bir redoks potansiyeline sahiptir. Ancak, pH veya hidroksil iyonları arttıkça peroksit daha az kararlı hale gelir. Bu nedenle Denklem 2.6'daki gibi su ve oksijen gazına ayrışır (Nicol, 2020a).



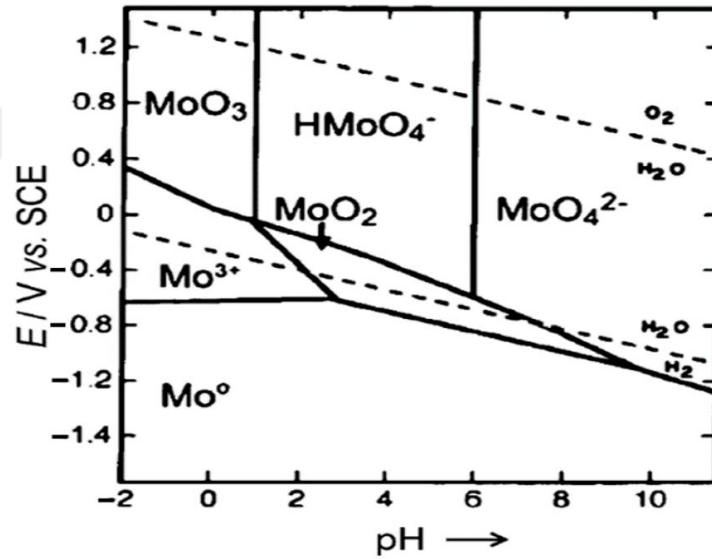
Asidik bir çözeltideki hidrojen peroksit, Denklem 2.7'de gösterildiği gibi 25 °C'de 1,76 V redoks potansiyeliyle daha stabildir (Nicol, 2020b). Peroksit asit görevi gördüğü için ilave asitler kullanılmadan metal çözündürülmesi için kullanılmış ancak ticari tesislerde uygulanmamaktadır (Agacayak ve ark., 2014).



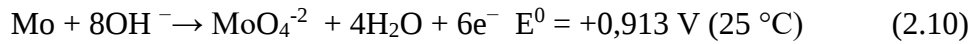
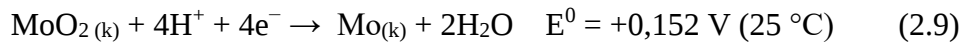
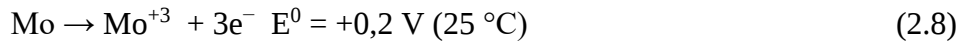
Şekil 2.1'de sudaki molibdenin Pourbaix diyagramında görüldüğü gibi, amfoterik yapıda bir metaldir. Bu da onun asidik ve bazik bir çözelti içinde çözünebileceği

anlamına gelir (Saji ve Lee, 2012). Hidrometalurjide, basınçlı oksidatif liç, hipoklorit liç, HCl veya HNO₃ kullanılarak asidik liç ve biyolojik liç gibi çeşitli yöntemler kullanılarak molibden çözündürülmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Cao ark., 2009; Kholmogorov ve Kononova, 2005; Silverman ve Lundgren, 1959). Ancak sitrik asit ve tartarik asit gibi organik asitler yoluyla yeşil bir süreç kullanılarak molibdenin çözündürülmesi konusunda sınırlı araştırma yapılmıştır (Nhan ve Seung, 2019).

Şekil 2.1'de belirtildiği gibi, metalik molibden, 25 °C'de düşük oksidasyon potansiyellerinde farklı pH değerlerinde Denklem 2.8-2.10'da verildiği gibi suda oksitlenebilir. Buda molibdenin zayıf asitlerden çok fazla bir şekilde etkilendiği anlamına gelir. Pourbaix (1966), tarafından elde edilen aşağıdaki grafiğe bakıldığında molibden oksit (MoO₃) pasivasyonunun, pH 0-1,8'de 0,15 voltluk yüksek oksidasyon potansiyelinde oluştuğu görülmektedir.



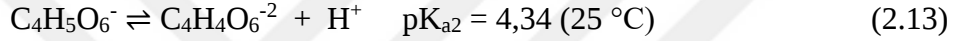
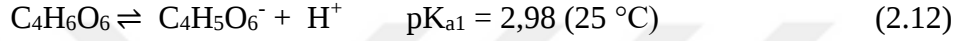
Şekil 2.1. Mo-H₂O₂ sisteminin 25°C'deki Pourbaix diyagramı.



Çözelti pH'sının 3.25 ila 3,55 arasında olması halinde ise hidrojen peroksitin molibdenin çözünme reaksiyonunda zayıf asit gibi davrandığı ifade edilebilir (Denklem 2.11).



Motasim ve ark. (2025a) tarafından molibden metalinin tartarik asit ile hidrojen peroksit ortamında çözünmesi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, bir molekülde iki karboksil içeren zayıf bir asit olan tartarik asit ayrışmasını Denklem 2.12 ve 2.13'deki gibi vermişlerdir.



Hidrojen peroksitli ortamda tartarik asidin metalik molibdenle reaksiyonunda asidik ortamda oksidatif bir ajan olarak hareket ettiği ve molibden tartarat olduğu ifade edilmiştir (Denlem 2.14)



Mirvaliev ve Inoue (2001), molibdenitin NaOH, NH₃ ve Na₂CO₃ çözeltilerinde oksidatif liçini araştırmışlardır. Bakır varlığında sodyum karbonatın NaOH ve NH₃'e kıyasla daha düşük verim ile elde edildiğini belirtmektedir. Peroksit çözeltisi ile sülfürik asit, atık hidrosülfürizasyon katalizöründen %97 molibden ekstraksiyon verimi elde edilmiştir (Barik ve ark., 2012). Peroksit ayrıca Mo-uranyum cevherinden Mo'yu çözündürmek için sülfürik asitle birlikte oksidatif bir madde olarak kullanılmış ve %98,5'lik bir ekstraksiyon verimi elde edilmiştir (Lasheen ve ark., 2013). Ayrıca, yüksek molibdenli sentetik şelitten Mo liçinde hidrojen peroksitli hidroklorik asit çözeltisi kullanılmış ve sonuçta %99,4'lük Mo çözündürülmesi ile iyi bir verimlilik gözlemlenmiştir. Hidrojen peroksit, kullanılmış dizel egzoz katalizöründen (V₂O₅-MoO₃/TiO₂) molibdenin ekstraksiyon verimliliğini %68,68'den %96,45'e çıkarmak için amonyak çözeltisi ile alkalın bir çözeltide oksidatif reaktif olarak kullanılmıştır (Zhao ve ark., 2015). Molibdenitten molibden ekstraksiyonunda sodyum klorür (NaCl) kullanılmış ve çözünme hızı üzerinde güçlü bir etki ortaya çıkmıştır (Cao ve ark., 2010).

Abbas ve Binder (2011) tarafından yürütülen çalışmada, metalik molibdenin 1,0 M amonyum nitrat (NH_4NO_3) elektroliti içerisinde elektrokimyasal çözünme davranışı incelenmiş; söz konusu elektrolitin, yaklaşık %79 Mo çözünme verimliliği sağlayarak elektrokimyasal çözündürme açısından uygun bir ortam sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, cevher/konsantre veya ikincil kaynakların çıkarılması için yeşil bir süreç olarak Mo'nun hidrojen peroksit çözeltisinde çözünmesini incelemek için dönen disk yöntemi araştırılmıştır (Cicconi ve ark., 2023; Rotsch ve ark., 2016). Molibdenin yeşil prosesinde atık katalizörlerden içinde sitrik ve tartarik asitler kullanılmıştır. Bu asitlerin kullanılmasıyla %71,2 ve %87,36 Mo ekstraksiyon verimliliği elde edildiği ifade edilmiştir (Rezki ve ark., 2021; Russo ve ark., 2023). Mo çözünmesinin davranışını araştırmak için çeşitli reaktifler kullanılan çalışmalar Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

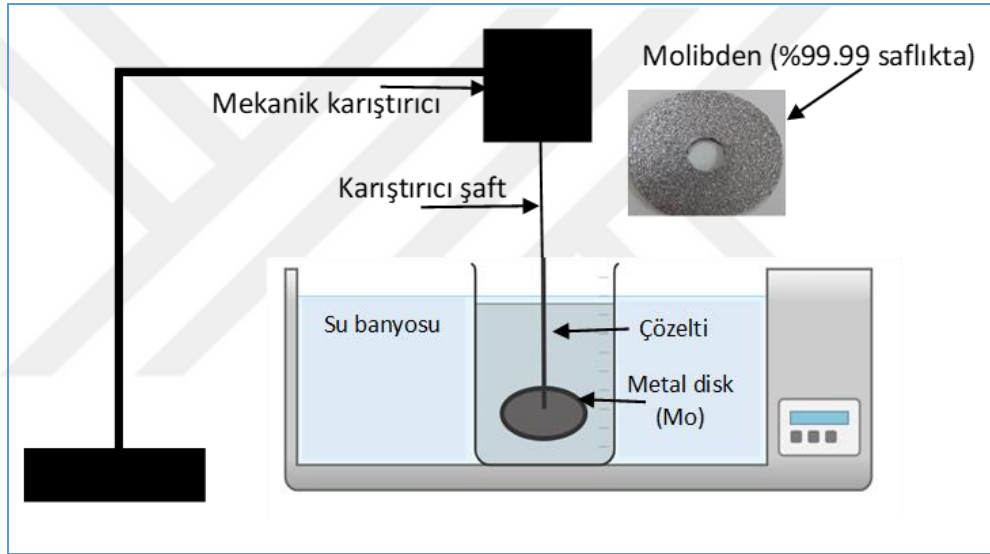
Bu çalışma, sürdürülebilir bir süreç kullanarak Mo'nun çözünme kinetiğine odaklanmaktadır. Mo'nun $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7/\text{H}_2\text{O}_2$ çözeltisinde çözünme kinetiği araştırılmış ve aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. H_2O_2 'nin yanı sıra sitrik asit konsantrasyonu, sıcaklık, dönme hızı ve disk yüzey alanının Mo'nun çözünme hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yarı deneysel modelle kimyasal reaksiyon derecesi Levich denklemi kullanılarak tespit edilmiştir.

Çizelge 2.5. Farklı reaktifler kullanılarak molibden çözünme kinetiği üzerine yapılan önceki çalışmalar (Motasim ve ark., 2025a).

Metal veya Mineral	Kullanılan reaktifler	Çözeltiye ilave edilen katkı reaktifleri	Disk yüzey alanı veya tane boyutu	Katı sıvı oranı/ Sıvı katı oranı	Sıcaklık (°C)	Karıştırma hızı	Zaman (dk)	Kinetik model	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)
Molibdenit	H ₂ SO ₄ (%2-12)	H ₂ O ₂ (%3-15)	-	5-25 g/mL	20-50	400-600 dev/dak	30-240	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	46,5
Kalsiyum molibdat	HCl (1-3 M)	H ₃ PO ₄ (0.1-0.5 M)	106-180 µm	1 g/L	40-70	40-70 dev/dak	80	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	70,87
Molibdenit	HNO ₃ (25-40 g/L)	O ₂ (965.27-1241.06 kPa)	80% < 40 µm	100-200 g/L	130-170	500-700 dev/dak	60	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	68,8
MoO ₃	NH ₃ (2-3 M)	NH ₄ NO ₃ (0.5-2 mol/L)	0.63-0.081mm	1/100-8/100 g/mL	20-60	200-600 dev/dak	120	Avrami modeli	22,6
(HDS) katalizörü	H ₂ SO ₄ (0.5-2.0 M)	-	-	2.5/500 g/mL	25-85	200-300 dev/dak	180	Avrami modeli	22,02
Molibdenit	H ₂ SO ₄ (0-80 g/L)	NaClO ₃ (0-375 g/L)	80% < 40 µm	4-50 S/K	40-90	200-1000 dev/dak	30-360	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	104,57
Molibdenit	H ₂ O ₂ (0.1-5.0 M)	H ₂ SO ₄ (0.1-3 mol/L)	64 µm	143-2000 dcm ³ /Kg	5-40	0-400 dev/dak	84	Geçirgen bir tabakadan difüzyon	75,2
MoO ₃	KOH (0.025-0.0005 M)	-	5 µm	1 g/L	6-80	0-800 dev/dak	100	Geçirgen bir tabakadan difüzyon	47,81
Mo-U cevheri	H ₂ SO ₄ (1.0-2.5 M)	H ₂ O ₂ (0.1-0.5 mol/L)	74 µm	1/8-1/16 g/L	25-85	600 dev/dak	120	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	40,4
(HDS) katalizörü	H ₂ C ₂ O ₄ (0.5 mol/L)	H ₂ O ₂ (3.0 mol/L)	50-71 µm	0.5/200 g/mL	30-70	600 dev/dak	120	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	31
Ni-Mo cevheri	H ₂ SO ₄ (0-1.5 mol/L)	Na ₂ S ₂ O ₈ (0-1mol/L)	120-150 µm	10 /500 g/mL	65.1-95.1	150-600 dev/dak	600	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	41,0
(HDS) katalizörü	C ₆ H ₈ O ₇ , pH (1.5-2.5)	-	200 mesh	20% K/S	60-90	400 dev/dak	120	Ürün tabakasından difüzyon modeli	31,1
Saf Mo disk	H ₂ O ₂ (0.25-1.5 M)	-	23.55 cm ²	-	30-60	214-1884 rad/dak	35	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	49,60
Saf Mo disk	H ₂ O ₂ (0.25-1.5 M)	C ₄ H ₆ O ₆ (0.1-0.65 M)	23.55-14.50 cm ²	-	30-60	214-1884 rad/dak	35	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	43,10
Saf Mo disk	H ₂ O ₂ (0.25-1.5)	NaOH (0.005-0.4 M)	23.55-14.50 cm ²	-	30-60	214-1884 rad/dak	35	Yüzey kimyasal reaksiyon modeli	41,60

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneylerde, 10 cm × 10 cm × 1,5 mm ebadındaki %99,99 saflıktaki molibden levhalarından farklı yüzey alanlarında diskler (23,12, 18, 15 ve 12 cm²) kullanılmıştır. Disk haline getirilmiş metalik Mo'ı çözmek için analitik saflıkta hidrojen peroksit (H₂O₂) ile sitrik asit (C₆H₈O₇) kullanılarak hazırlanan çözelti ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler yapılırken çözündürme sistemi olarak sıcak su banyosu ve mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi sıcak su banyosunun içerisine yerleştirilmiş bir beher içerisinde mekanik karıştırıcı ucuna disk halinde bağlanmış Mo metalinin çözündürülmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Molibdenin çözündürülmesi için tasarlanmış deney düzeneği.

Bu çalışmada, Denklem 3.1'de görüldüğü gibi molibdenin çözünme kinetiği dönen disk yöntemi kullanılarak Levich denklemi aracılığıyla tanımlanmıştır (Levich ve Tobias, 1963).

$$\frac{1}{A} \frac{dx}{dn} = J = 0.62 D^{2/3} \nu^{-1/6} \omega^{1/2} C \quad (3.1)$$

burada dx/dn reaksiyon hızıdır (mol/s), A dönen bir diskin yüzey alanıdır, J bir reaktan türünün birim alanı başına molar akıdır, D reaktan iyonunun difüzyon katsayısıdır, ν çözeltinin kinematik viskozitesi, ω diskin dönme hızı ve C ise çözeltinin konsantrasyonudur.

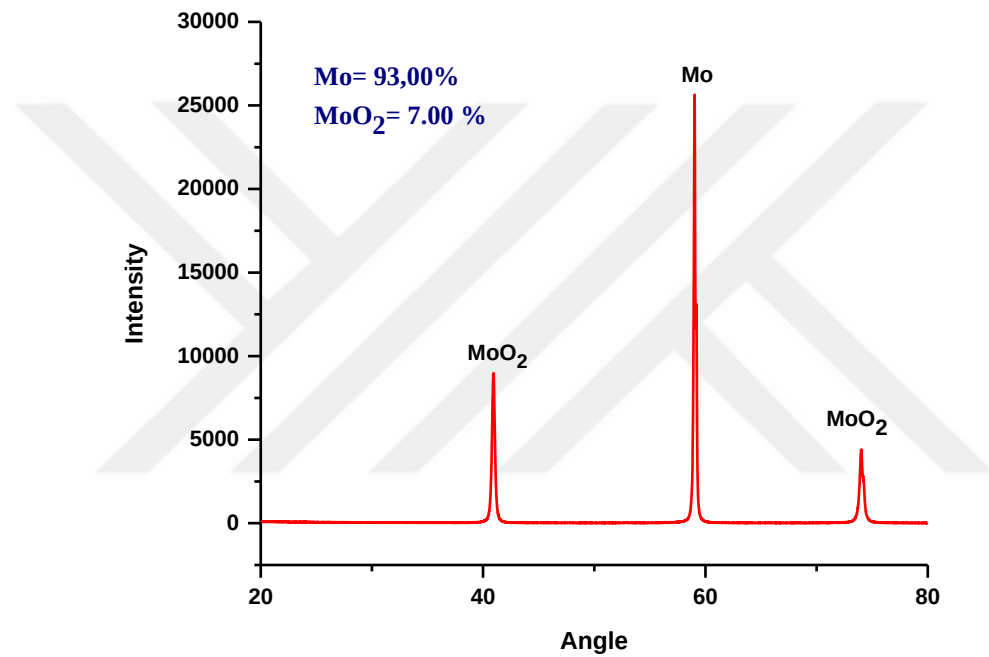
Bu çalışmada, Levich denklemini kullanarak alternatif bir liç ajanı olarak hidrojen peroksit çözeltisi ile sitrik asit ortamında molibden çözünme kinetiği araştırılmıştır. Sitrik asit konsantrasyonu, yanı sıra hidrojen peroksit konsantrasyonu, dönme hızı, çözelti sıcaklığı ve disk yüzey alanının çözünmeye etkisi incelenecektir. Çözünme kinetik modelleri belirlenerek, aktivasyon enerjisi hesaplanacaktır.

Dönen disk çözelti içerisine yerleştirildikten sonra belli sürelerde döndürülerek, çözünme sırasında düzenli aralıklarla numune alınarak analiz edilmiştir. Test sırasında kaybedilen ağırlık belirlenerek elde edilen sonuçlardan çözünme ile ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır. Gerektiği hallerde sonuçların kanıtlanabilmesi için reaksiyon sonucunda oluşan değişiklikleri belirlemek için XRD, SEM vb. analizler yapıp değerlendirilmeye alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

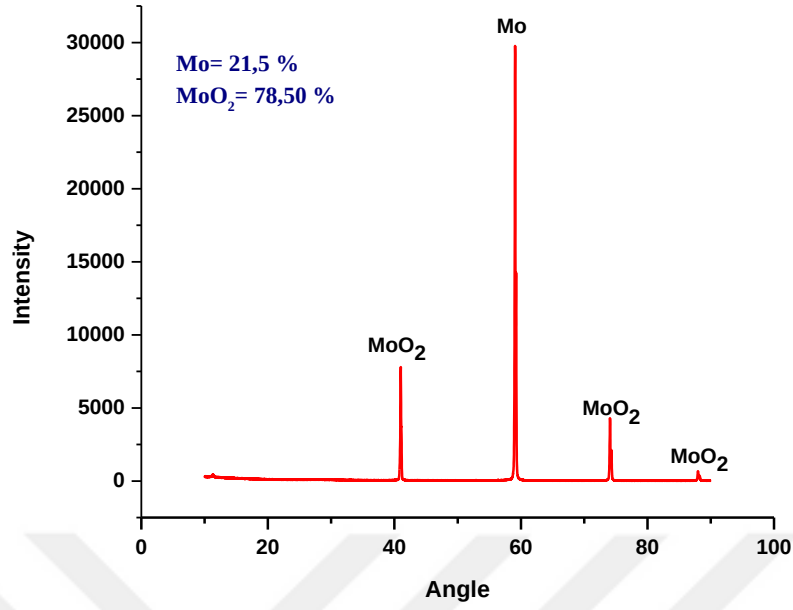
4.1. Numuneye Ait Deney Öncesi ve Sonrası Analiz Sonuçları

Saf metalik Mo diskinin (%99,99) ve bu diskin çözündürülmesi sonrasındaki XRD karakterizasyonu, Bruker marka D8 Advance model X-ışını kırınımı cihazı ile belirlenmiştir. Şekil 4.1’de Mo diskinin X-ışını kırınımı (XRD) analizi ve Şekil 4.2’de ise Mo diskinin $C_6H_8O_7/H_2O_2$ çözeltisinde çözündürülmesinden sonra X-ışını kırınımı (XRD) analiz sonuçları verilmiştir.



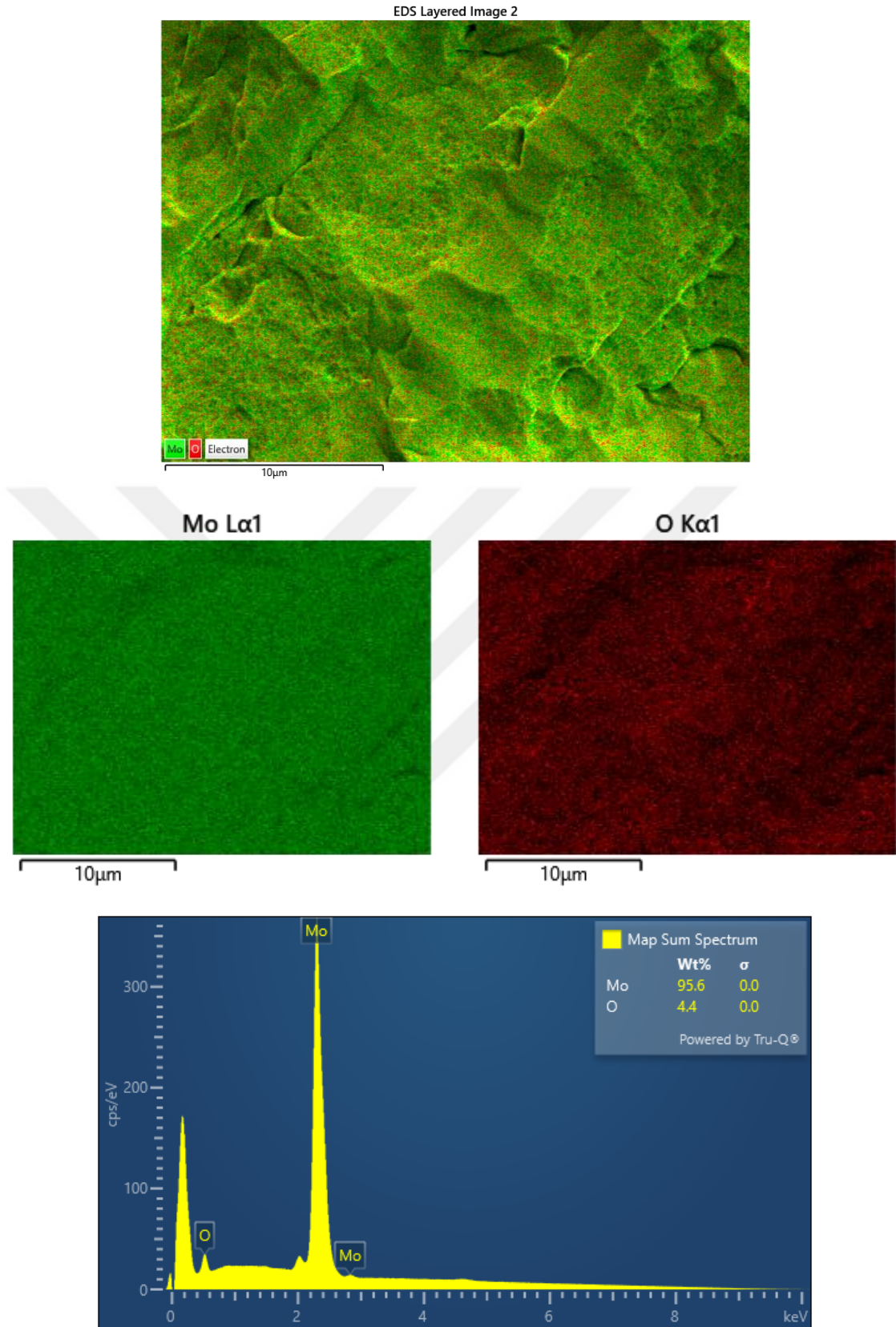
Şekil 4.1. Mo diskinin X-ışını kırınımı (XRD) analizi.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den görüldüğü gibi, MoO_2 içeriğinin çözünme sonrasında arttığı ve %7’den %78,5 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç, disk yüzeyindeki siyah tabakanın temel bileşiminin MoO_2 olduğunu ortaya koymaktadır. Bu pasifleştirme tabakası, reaksiyon çözünme potansiyelindeki artış nedeniyle oluşur. Bu tabakanın varlığı, hidrojen iyonları ile Mo disk arasındaki etkileşim yüzeyini azaltarak çözünme sürecini engelleyebilir.

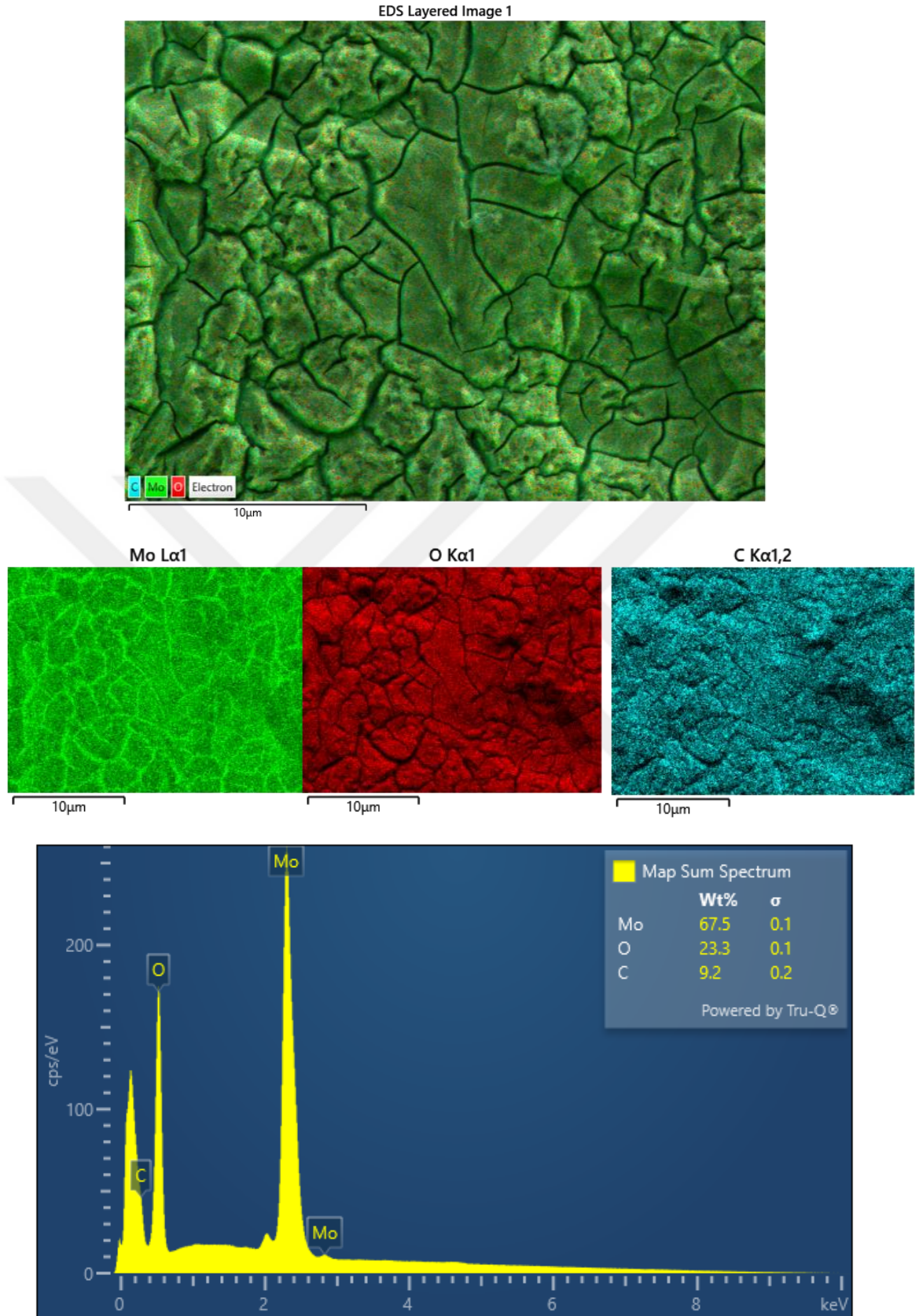


Şekil 4.2. Mo diskinin $C_6H_8O_7/H_2O_2$ çözeltisinde çözülmesinden sonra X-ışını kırınımı (XRD) analizi.

SEM-EDX analizleri çözünmeden önce (Şekil 4.3) ve çözünmeden sonra (Şekil 4.4) olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Analizler Zeiss marka GeminiSEM 500 model SEM-EDX analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi Mo ve O elementlerinin varlığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.4’de gösterildiği gibi SEM-EDX sonuçlarına göre pasifleştirme tabakasının element bileşiminin Mo, O ve C olduğu nicel olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Çözünmeden önce saf Mo disk yüzeyinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ile taramalı elektron mikroskobu analizi.

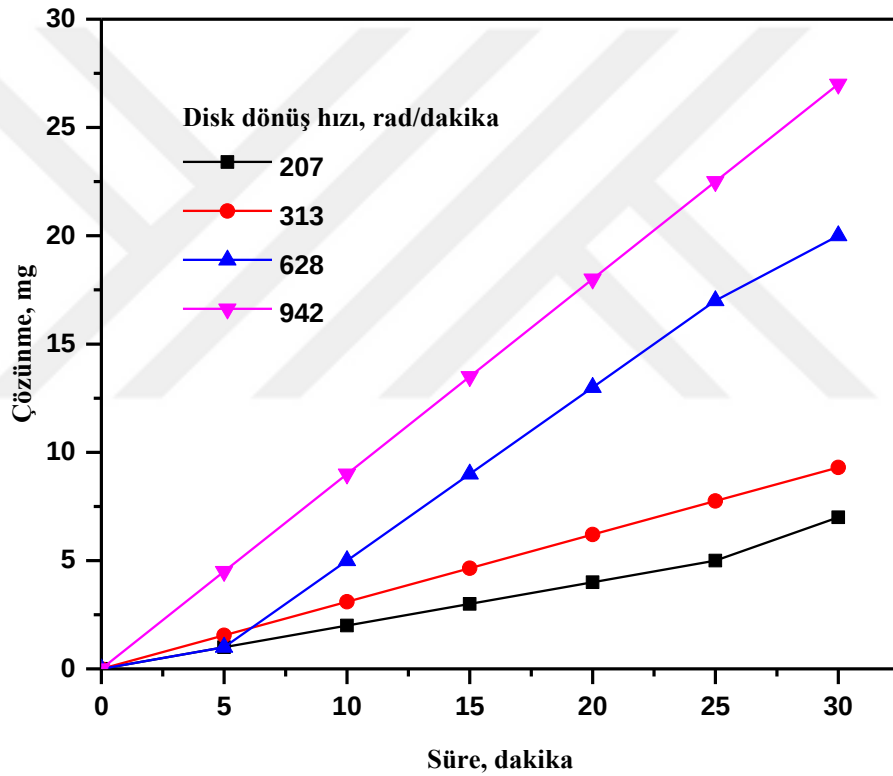


Şekil 4.4. Hidrojen peroksit ve sitrik asit ile çözündürüldükten sonra saf Mo disk yüzeyinin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ile taramalı elektron mikroskobu analizi.

4.2. Sitrik Asit ve Hidrojen Peroksit Ortamında Gerçekleştirilen Liç Deneyleri

4.2.1. Disk dönüş hızının etkisi

Disk dönüş hızının Mo çözünmesine etkisini incelemek için, 30°C sıcaklıkta, 0,2 M sitrik asit konsantrasyonunda, 0,2 M hidrojen peroksit konsantrasyonunda ve 23,12 cm² disk yüzey alanında deneyler gerçekleştirilmiştir. Liç süresi 30 dakika olup her 5 dakikalık sürelerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre disk dönüş hızının (rad/dakika) Mo çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



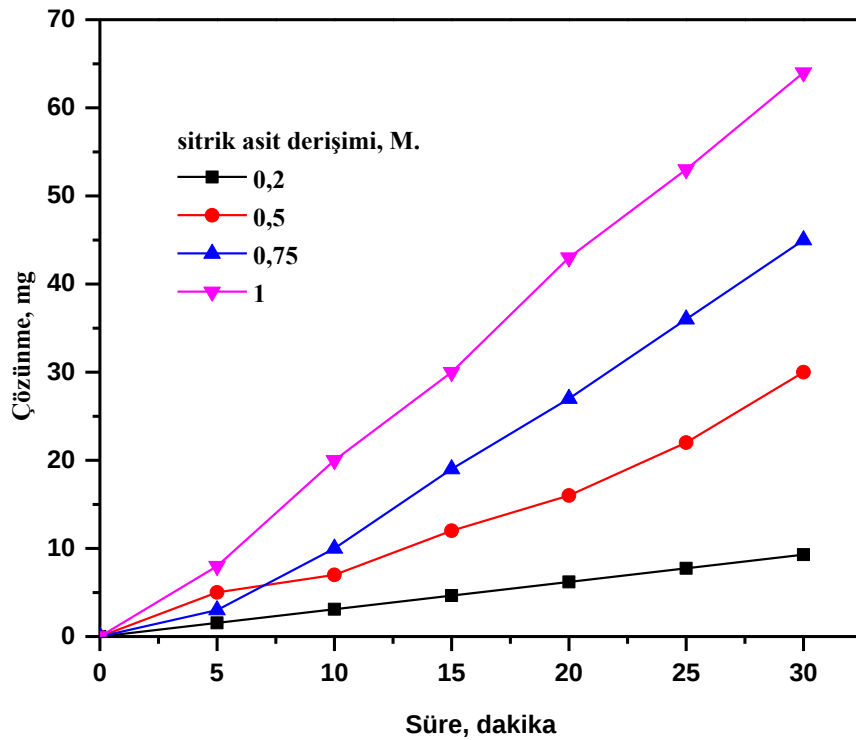
Şekil 4.5. Disk dönüş hızının Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, asidik çözeltilerde, 207 ila 942 rad/dakika arasında değişen dönüş hızlarında yapılan deneylerde molibdenin çözünmesini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Ancak grafiğe bakıldığında dönme hızının azda olsa etkili olduğu söylenebilir. Aracena ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada da benzer sonuca ulaşıldığı bilinmektedir. Disk dönme hızının kütle transferinde temel asidik

çözümlerdeki çözünme hızında az etkili olduğunu belirtmektedir. $H_2O_2-H_2SO_4$ kullanılarak molibdenitin çözünme kinetiği üzerine yapılan çalışmalarda da benzer bulgular bildirilmiştir. Başka bir çalışmada, Motasim ve ark., (2025a) molibden diski üzerinde asidik ve bazik ortamda hidrojen peroksit ile Mo çözündürülmesinde disk dönme hızının etkisini incelemişlerdir. Benzer sonuçlar elde edilmiş olup, tartarik asit ortamında disk dönme hızı arttıkça Mo çözünmesinin az da olsa arttığı ifade edilmiştir. NaOH ortamında ise tam tersi olduğu ifade edilmektedir.

4.2.2. Sitrik asit konsantrasyonunun etkisi

Sitrik asit derişiminin Mo çözünmesine etkisi için liç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, $30^\circ C$ sıcaklıkta, 0,2 M hidrojen peroksit konsantrasyonunda, 313 rad/dakika disk dönüş hızında $23,12 \text{ cm}^2$ yüzey alanına sahip metalik molibden diski kullanılarak yapılmıştır. Aynı şekilde, 30 dakika boyunca çözündürme işlemi devam ettirilerek 5 dakikalık sürelerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre sitrik asit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



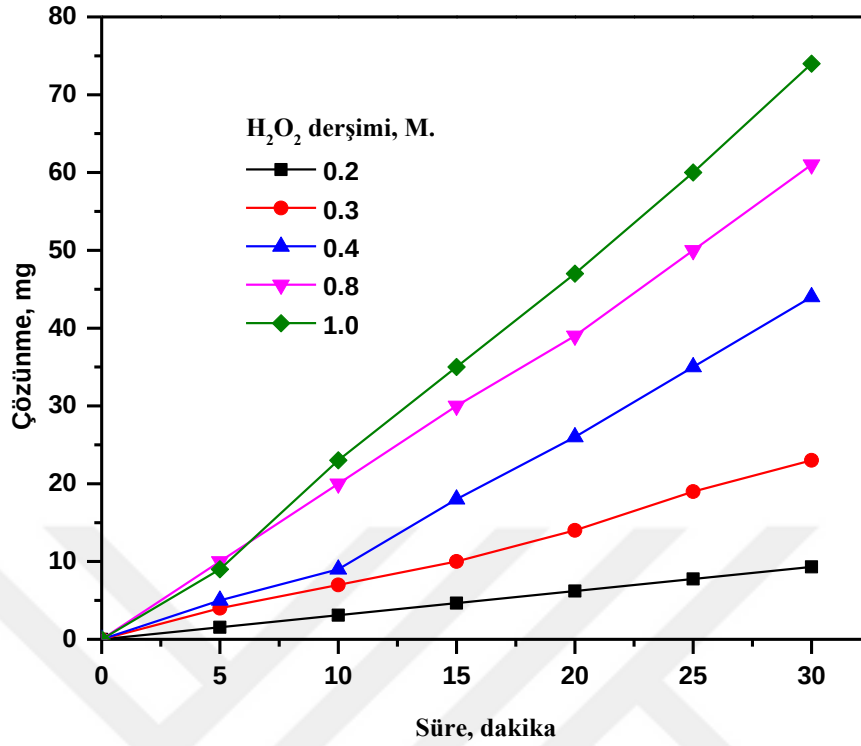
Şekil 4.6. Sitrik asit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.

Mo çözünmesi, 0,2 M ile 1 M arasında değişen sitrik asit konsantrasyonundan olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. Hidrojen peroksitli ortamda sitrik asit konsantrasyonunun Mo çözünmesi üzerinde çok iyi bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Şekil 4.6). Motasim ve ark., (2024a) hidrojen peroksitli ortamda sitrik asit konsantrasyonunun saf bakır diskinin çözünmesi üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Motasim ve ark., (2025a) organik asitlerden biri olan tartarik asit ile hidrojen peroksit ortamında saf molibden diskinin çözündürülmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Sonuç olarak, tartarik asidin 0,1 ila 0,35 M konsantrasyon aralığında çözünme hızı üzerinde azda olsa pozitif yönde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, 0,35 ila 0,65 M aralığında çözünme hızının hızla azaldığı bildirilmiştir. Bu durum, hidrojen peroksitin azalmasına ve oksidasyon potansiyelinin artmasına bağlanmıştır.

4.2.3. Hidrojen peroksit konsantrasyonunun etkisi

30°C sıcaklıkta, 0,2 M sitrik asit konsantrasyonunda, 313 rad/dakika disk dönüş hızında, 23,12 cm² yüzey alanına sahip metalik molibden diski kullanılarak farklı derişimlerde hazırlanmış hidrojen peroksit ortamında (0,2-1 M) 30 dakikalık deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre hidrojen peroksit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Şekil 4.7 incelendiğinde, molibdenin çözünme hızı, 0,2 ila 0,4 M arasındaki hidrojen peroksit konsantrasyonlarında önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Ancak, 0,4 ila 1 M arasındaki konsantrasyonlarda çözünme hızının yavaşladığı görülmektedir.

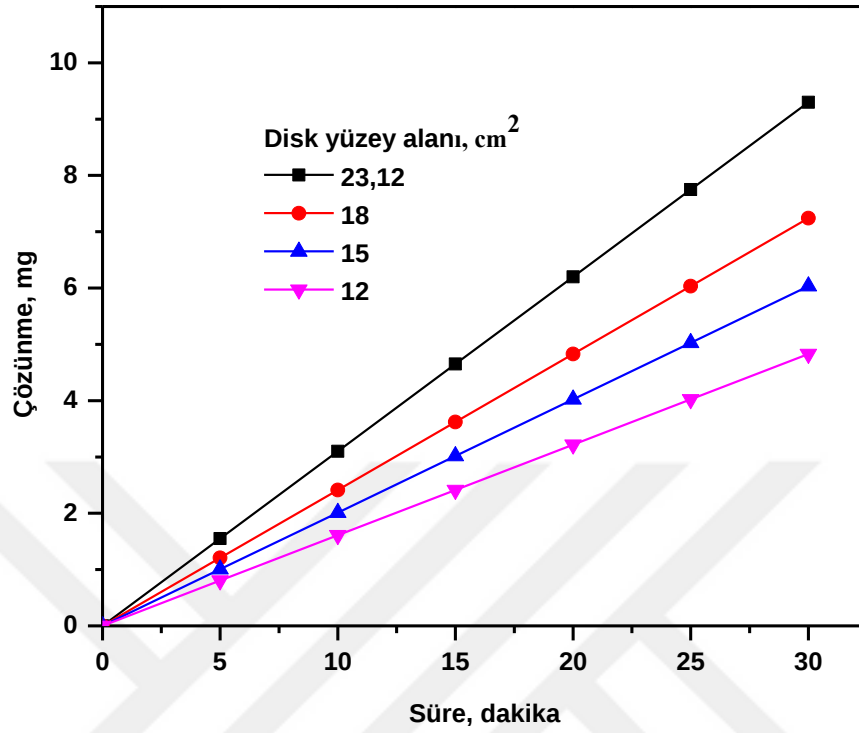


Şekil 4.7. Hidrojen peroksit derişiminin Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.

4.2.4. Disk yüzey alanının etkisi

30°C sıcaklıkta, 0,2 M sitrik asit konsantrasyonunda, 0,2 M hidrojen peroksit konsantrasyonunda, 313 rad/dakika disk dönüş hızında farklı yüzey alanına sahip metalik molibden diskleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Liç süresi 30 dakika olup her 5 dakikalık sürelerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dönen disk yüzey alanının çözünme hızı üzerindeki etkisi, 23,12, 18, 15 ve 12 cm² yüzey alanları için incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre dönen disk yüzey alanının Mo çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

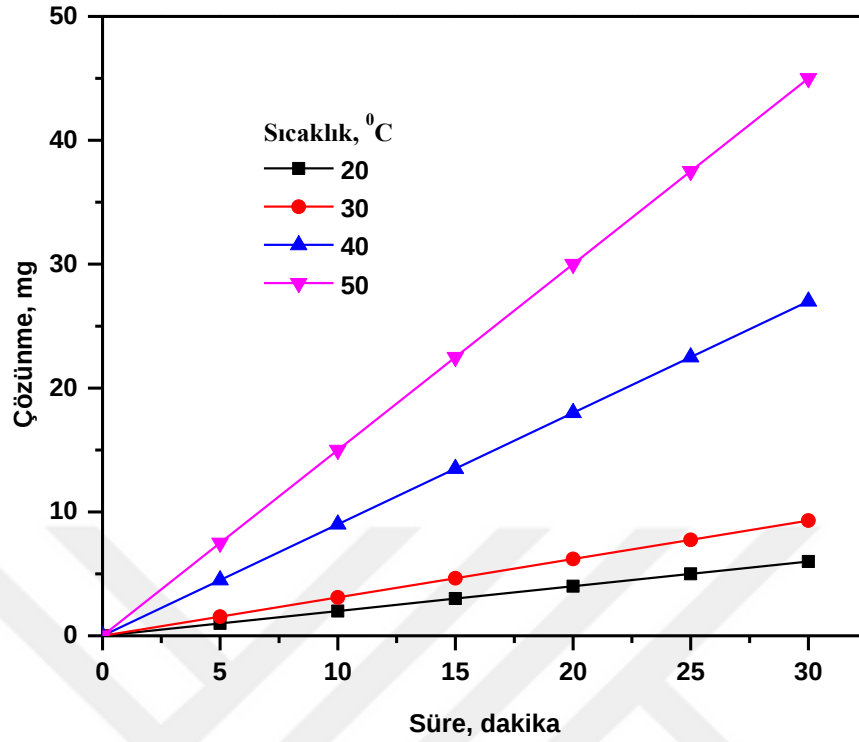
Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, molibden çözünme miktarı ve çözünme hızının disk yüzey alanındaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Literatürde farklı reaktiflerle ve farklı saf metal disklerle gerçekleştirilmiş çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların sonucuna bakıldığında metalin çözünme miktarı ve çözünme hızının disk yüzey alanındaki artışla birlikte arttığı ifade edilmektedir (Motasim ve ark., 2025a; Motasim ve ark., 2025b; Motasim ve ark., 2024a; Motasim ve ark., 2024b; Aydoğan ve ark., 2025).



Şekil 4.8. Disk yüzey alanının Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.

4.2.5. Sıcaklığın etkisi

Mo çözünmesine sıcaklığın etkisini incelemek için 20-50 °C arasında değişen sıcaklıklarda liç deneyleri yapılmıştır. Deneyler 0,2 M sitrik asit konsantrasyonunda, 0,2 M hidrojen peroksit konsantrasyonunda, 313 rad/dakika disk dönüş hızında ve 23,12 cm² disk yüzey alanına sahip diskler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Liç süresi 30 dakika olup her 5 dakikalık sürelerde ölçümler alınmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre sıcaklığın Mo çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Sıcaklığın Mo çözünmesi üzerindeki etkisi.

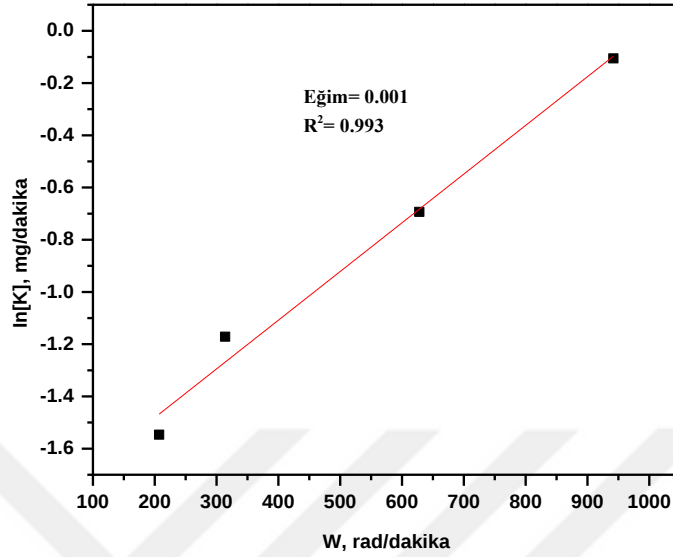
Şekil 4.9 incelendiğinde, sıcaklık arttıkça Mo çözünmesinin de arttığı görülmektedir. 20-40 °C arasında yapılan deneylerde Mo çözünme hızı azalırken, 40 °C'den sonra hızlı çözünme gözlenmektedir. Ayrıca, sıcaklık artışı, metallerin oksidasyonunu hızlandırdığı için molibdenin çözünme hızında artışa yol açtığı ifade edilebilir. Yapılan benzer çalışmalarda bahsedildiği üzere, genellikle 50 yada 60°C'yi aşan sıcaklıklardaki çözeltilerde, çözülmüş metal miktarının sabit kaldığı ve bu durumun, hidrojen peroksitin termal ayrışmaya karşı artan duyarlılığına bağlı olduğu bildirilmektedir (Antonić et al., 1997; Agacayak et al., 2014; Abdelraheem ve Agacayak, 2023; Motasim et al., 2024a; Aydoğan et al., 2025).

4.3. Çözünme Kinetik Analizi

4.3.1. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Disk dönüş hızının etkisi

Disk dönüş hızının molibden diskin çözünmesine etkisi Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.5'de elde edilen değerlerin doğruların eğimleri (k) alınarak, disk dönüş hızına

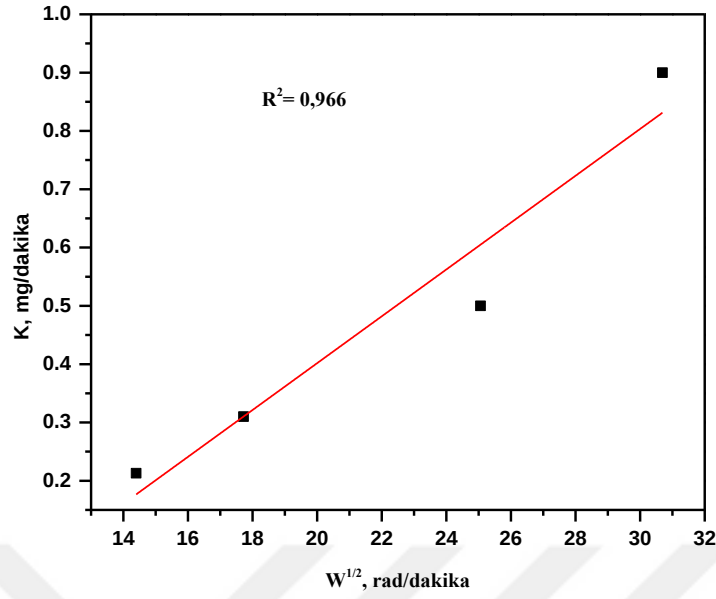
göre reaksiyon derecesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Disk dönüş hızına bağlı olarak reaksiyon derecesinin belirlenmesi.

Dönme hızının, çözünmüş molibdenin dönen diskten geçmesiyle çözünme hızını artırdığı ifade edilebilir (Şekil 4.5). Ancak, Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, kimyasal reaksiyon derecesi diğer parametrelere kıyasla yoğun bir etki göstermemektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, kimyasal reaksiyon derecesi 0,001 olarak belirlenmiştir. Buda dönen disk hızının çözünme üzerinde oldukça etkisiz olduğu anlamına gelmektedir.

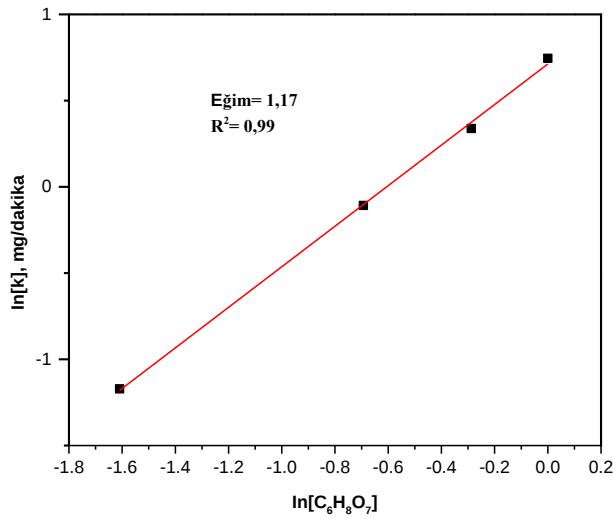
Levich'in dönen bir diske kütle transferi için matematiksel modeli, diskin dönme hızının uygunluğunu doğrulamak için laminar akış durumu dikkate alınarak geliştirilmiştir. Şekil 4.11'de çözünme hızlarının disk dönme hızlarının karekökü ($W^{1/2}$) ile doğrusal ilişkisini göstermektedir. Bu ilişki, Levich denkleminde (Cussler, 2009) gösterildiği gibi dönen diskin yüzeyindeki laminar akışı doğrulamaktadır



Şekil 4.11. Çözünme hızlarının disk dönme hızlarının karekökü ($W^{1/2}$) ile ilişkisi.

4.3.2. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Sitrik asit konsantrasyonunun etkisi

Şekil 4.6’da verilen sitrik asit derişiminin Mo çözünmesine etkisi grafiğinden elde edilen verilerden yararlanılıp; doğruların eğimleri (k) alınarak, sitrik asit derişimine göre kimyasal reaksiyon derecesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



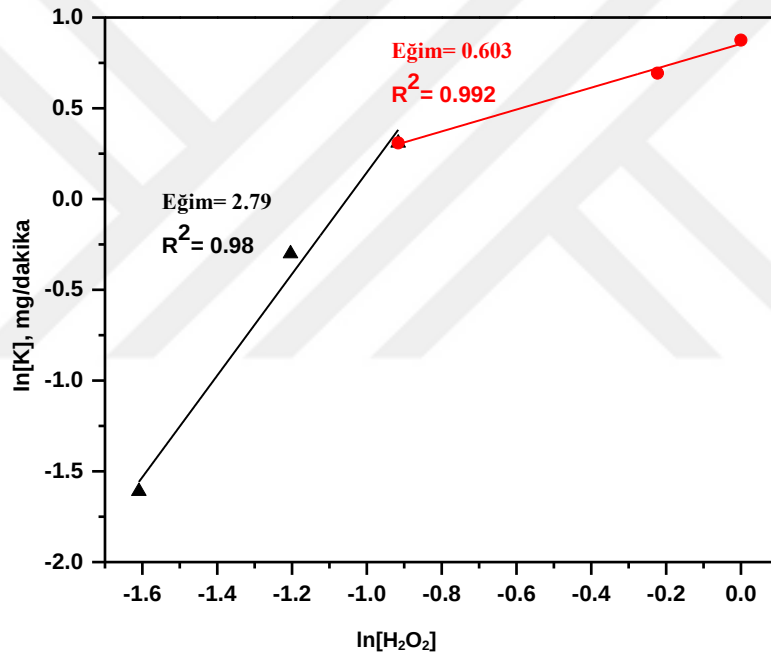
Şekil 4.12. Sitrik asit konsantrasyonunun Mo çözünme hızına etkisi için $\ln[C_6H_8O_7]$ - $\ln[k]$ grafiği.

Sitrik asit konsantrasyonuna göre kimyasal reaksiyon derecesi, $\ln[C_6H_8O_7]-\ln[k]$ arasındaki ilişkinin eğimi olarak belirlenmiştir ve Şekil 4.12'de gösterildiği gibi 1,17 olduğu görülmektedir.

4.3.3. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği:

Hidrojen peroksit konsantrasyonunun etkisi

Şekil 4.7'de verilen hidrojen peroksit derişiminin Mo çözünmesine etkisi grafiğinden elde edilen veriler kullanılıp; doğruların eğimleri (k) alınmış ve kimyasal reaksiyon derecesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

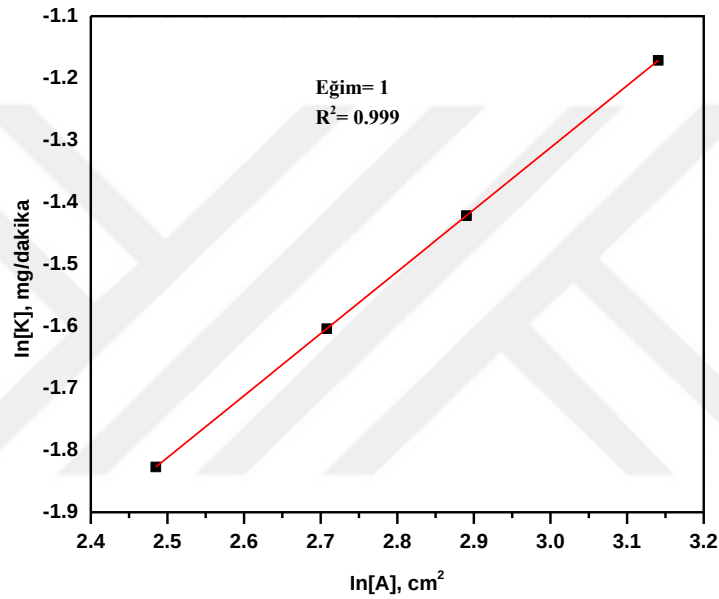


Şekil 4.13. Hidrojen peroksit konsantrasyonunun Mo çözünme hızına etkisi için $\ln[H_2O_2]-\ln[k]$ grafiği.

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi, $\ln[H_2O_2]-\ln[k]$ ilişkisine göre 0,2 ila 0,4 M aralığındaki hidrojen peroksit konsantrasyonları için kimyasal reaksiyon derecesi 2,79 olurken, 0,4 ila 1 M arasındaki konsantrasyonlarda çözünme hızının yavaşladığı ve kimyasal reaksiyon derecesinin ise 0,603 olduğu belirlenmiştir.

4.3.4. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Disk yüzey alanı etkisi

Dönen disk yüzey alanının molibden çözünme hızı üzerindeki etkisi (Şekil 4.8) grafiklerinden görüldüğü gibi çözünme miktarı ve çözünme hızının disk yüzey alanındaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Şekil 4.8'den elde edilen veriler kullanılıp doğruların eğimleri (k) alınmış ve kimyasal reaksiyon derecesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



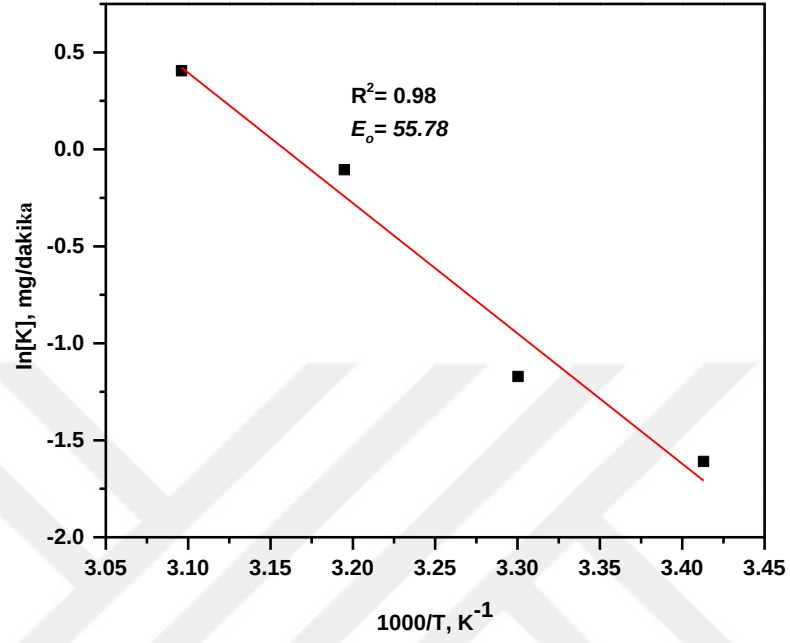
Şekil 4.14. Disk yüzey alanına bağlı olarak reaksiyon derecesinin belirlenmesi için $\ln[A]-\ln[k]$ grafiği.

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi, disk yüzey alanı ile çözünme hızı arasındaki doğrusal ve birinci dereceden ilişki olduğu belirlenmiştir. Kimyasal reaksiyon derecesi 1 olarak bulunmuştur. Dönen disk yüzey alanıyla çözünme hızının doğru orantılı olması Levich denkleminin koşullarını doğrulamaktadır (Levich ve Tobias, 1963; Motasim ve ark., 2024a; Motasim ve ark., 2024b; Motasim ve ark., 2025a).

4.3.5. Sitrik asit ve hidrojen peroksit ortamında incelenen çözünme kinetiği: Sıcaklığın etkisi

Şekil 4.15'de gösterilen Arrhenius grafiği, Şekil 4.9'daki düz çizgilerin eğimlerinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak doğrusallaştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu

çalışmada çözünme kinetiği ile belirlenen aktivasyon enerjisi 55,78 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Genellikle aktivasyon enerjisi 40 kJ/mol değerini aştığında yüzey kimyasal reaksiyon modeliyle uyumlu olduğu bilinmektedir (Levenspiel, 1998).



Şekil. 4.15. Farklı sıcaklık değerlerindeki Mo çözünmesi için $\ln[1000/T]-\ln[k]$ Arrhenius grafiği.

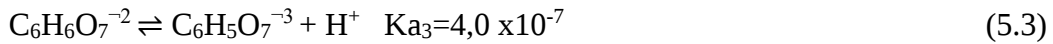
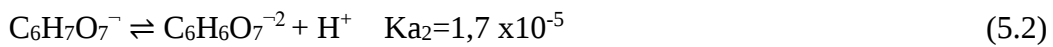
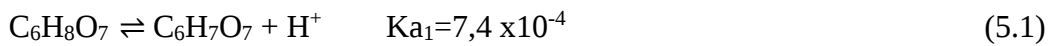
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Refrakter bir metal olan molibdenin, ticari olarak mineral asitler kullanılarak molibdenit mineralinden kazanıldığı bilinmektedir. Son yıllarda zayıf organik asitler, çevre dostu olmaları nedeniyle araştırmacılar arasında mineral asitlere alternatif liç reaktifleri olarak önemli ilgi görmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, sitrik ve tartarik asitler gibi organik asitleri içerenler gibi çevre dostu prosesler kullanılarak molibden çözündürülmesi üzerine araştırmaların sınırlı olduğu bilinmektedir.

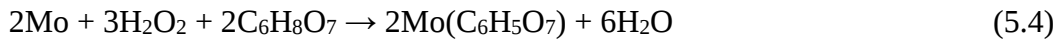
Disk haline getirilmiş metalik molibdeni çözmek için analitik saflıkta hidrojen peroksit (H_2O_2) ile sitrik asit ($C_6H_8O_7$) kullanılarak hazırlanan çözelti ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, disk dönüş hızı, sitrik asit konsantrasyonu, H_2O_2 konsantrasyonu, disk yüzey alanı ve sıcaklığın çözünmeye etkileri incelenmiştir.

Ayrıca deney sonuçlarından elde edilen veriler ve Levich denklemi kullanılarak alternatif bir liç ajanı olarak hidrojen peroksit çözeltisi ve sitrik asit ortamında molibdenin çözünme kinetiği belirlenmiştir. Çözünme kinetik modellerine bağlı olarak çözünme reaksiyon dereceleri belirlenmiş ve aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen temel bulgular ve yorumlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Sitrik asit ($C_6H_8O_7$) zayıf, üç protonlu (triprotik) bir organik asittir. Suda çözündüğünde ardışık üç aşamada iyonlaşır, yani üç H^+ vermektedir. Bu iyonlaşma Denklem 5.1-5.3 arasında verilmiştir.



Çözünme sonucunda, hidrojen peroksitin asidik ortamda metalik molibdenle reaksiyonunda oksidatif ajan olarak hareket ettiği belirlenmiştir. $C_6H_8O_7/H_2O_2$ çözeltisinde molibdenin çözündürülmesi sırasında Denklem (5.4)'teki gibi molibden sitrat oluştuğu gözlemlenmiştir.



Disk dönme hızının çözünmeye etkisi incelendiğinde, çözülmüş molibden dönen diskten geçerek çözünme hızını artırmaktadır. Kimyasal reaksiyon derecesinin (0,001) diğer parametrelere kıyasla az olduğu ifade edilebilir.

0,2 M ile 1 M arasında değişen sitrik asit konsantrasyonlarında yapılan deney sonuçlarına göre, Mo çözünmesinin olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. $\ln[C_6H_8O_7]-\ln[k]$ arasındaki ilişkiye bakılarak sitrik asit konsantrasyonunun kimyasal reaksiyon derecesi 1,17 olarak belirlenmiştir.

0,2 ila 0,4 M arasındaki hidrojen peroksit konsantrasyonlarında Mo çözünmesinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Fakat 0,4 ila 1 M arasındaki konsantrasyonlarda çözünme hızının yavaşladığı görülmektedir. $\ln[H_2O_2]-\ln[k]$ ilişkisine göre 1. aşamada kimyasal reaksiyon derecesi 2,79 olurken, 2. aşamada eğimin azaldığı yani çözünme hızının yavaşladığı ve kimyasal reaksiyon derecesinin ise 0,603 olduğu belirlenmiştir.

Döner disk yüzey alanının etkisi incelendiğinde, Mo çözünme miktarı ve çözünme hızının disk yüzey alanındaki artışla birlikte arttığı belirlenmiştir. Kimyasal reaksiyon derecesi 1 olarak bulunmuş ve döner disk yüzey alanıyla çözünme hızının doğru orantılı olması Levich denkleminin koşullarını doğrulamaktadır.

Sıcaklık arttıkça Mo çözünme miktarının arttığı görülmektedir. 20-40 °C arasında yapılan deneylerde Mo çözünme hızı azalırken, 40 °C'den sonra hızlı çözünme gözlenmektedir. Bu durum sıcaklık artışı ile metallerin oksidasyonunun hızlandığı anlamına gelmektedir. Genellikle 50 yada 60°C'yi aşan sıcaklıklardaki çözeltilerde, çözülmüş metal miktarının sabit kaldığı durumlar olmaktadır. Bunun, hidrojen peroksitin termal ayrışmaya karşı artan duyarlılığından dolayı ortaya çıktığı söylenebilir. Molibdenin çözünmesi için belirlenen aktivasyon enerjisi 55,78 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bu değerin genellikle 40 kJ/mol değerini aştığında yüzey kimyasal reaksiyon modeliyle uyumlu olduğu bilinmektedir.

Bu çalışma göz önünde bulundurulduğunda molibdenin farklı organik asitlerle ve farklı oksitleyici reaktiflerle çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilebilir. Literatürde eksik olan çalışmaların belirlenmesi ve organik asitler kullanılarak farklı metallerin çözündürülmesi ve kinetiği üzerinde çalışmaların gerçekleştirilmesi mümkün olabilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, Q., Binder, L., 2011. The electrochemical dissolution of molybdenum in non-aqueous media. *Int J Refract Metals Hard Mater* 29, 542–546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.03.010>
- Abdelraheem, M. T. O., Agacayak, T., 2023. Investigation of the effect of some polar organic solvents on the leaching and dissolution kinetics of chalcopyrite in hydrogen peroxide and sulfuric acid solution. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 37(3), 779-788.
- Agacayak, T., Aras, A., Aydogan, S., Erdemoglu, M., 2014. Leaching of chalcopyrite concentrate in hydrogen peroxide solution. *Physicochemical problems of mineral processing* 50, 657–666.
- Antonišević, M.M., Dimitrijević, M., Janković, Z., 1997. Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 46, 71-83.
- Aracena, A., Azocar, A., Ibáñez, J.P., Jerez, O., 2019. Mechanism and leaching kinetics of molybdenite concentrate in a hydrogen peroxide-acid system. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 55, 140–152. <https://doi.org/10.5277/ppmp18139>
- Asghari, I., Mousavi, S.M., Amiri, F., Tavassoli, S., 2013. Bioleaching of spent refinery catalysts: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 19, 1069–1081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.12.005>
- Aydogan, S., Abdelraheem, M. T. O., Ali, B., Boyrazli, M., 2025. Kinetics Study on the Leaching of Metallic Silver with Ammonium Carbonate as an Eco-Friendly Alternative for Cyanide. *JOM*, 77, 5622–5631. <https://doi.org/10.1007/s11837-025-07424-w>
- Aydoğan, S., Aras, A., Uçar, G., Erdemoğlu, M., 2007b. Dissolution kinetics of galena in acetic acid solutions with hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy* 89, 189–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.07.004>
- Aydoğan, S., Erdemoğlu, M., Uçar, G., Aras, A., 2007a. Kinetics of galena dissolution in nitric acid solutions with hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy* 88, 52–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.005>
- Aydoğan, S., Motasim, M., Ali, B., 2024. The novelty of silver extraction by leaching in acetic acid with hydrogen peroxide as an organic alternative lixiviant for cyanide. *Heliyon* 10, e24784. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784>
- Barceloux, D. G., Barceloux, D., 1999. Molybdenum. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37(2), 231-237. <https://doi.org/10.1081/CLT-100102422>
- Barik, S.P., Park, K.H., Parhi, P.K., Park, J.T., 2012. Direct leaching of molybdenum and cobalt from spent hydrosulphurization catalyst with sulphuric acid. *Hydrometallurgy* 111–112, 46–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.001>

- Cao, Z., Zhong, H., Liu, G., Qiu, Y., Wang, S., 2010. Molybdenum extraction from molybdenite concentrate in NaCl electrolyte. *J Taiwan Inst Chem Eng* 41, 338–343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.11.007>
- Cao, Z., Zhong, H., Qiu, Z., Liu, G., Zhang, W., 2009. A novel technology for molybdenum extraction from molybdenite concentrate. *Hydrometallurgy* 99, 2–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.001>
- Cicconi, F., Ubaldini, A., Fiore, A., Rizzo, A., Cataldo, S., Agostini, P., Pietropaolo, A., Salvi, S., Cuzzola, V., Collaboration, S., 2023. Dissolution of Molybdenum in Hydrogen Peroxide: A Thermodynamic, Kinetic and Microscopic Study of a Green Process for 99mTc Production. *Molecules* 28, 2090. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules28052090>
- Cooke, D. R., Hollings, P., Walshe, J. L., 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic geology*, 100(5), 801-818. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>
- Cussler, E. L., 2009. *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Cambridge university press.
- Damjanovic, A., Genshaw, M.A., Bockris, J.O., 1967. Hydrogen peroxide formation in oxygen reduction at gold electrodes: II. Alkaline solution. *J Electroanal Chem Interfacial Electrochem* 15, 173–180. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0728\(67\)85021-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0728(67)85021-6)
- DPT, 2001. *Metal Madenler Alt Komisyonu Diğer Metal Madenler Çalışma Grubu Raporu*, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel Komisyonu, Ankara.
- Feiner, A.S., McEvoy, A.J., 1994. The nernst equation. *J Chem Educ* 71, 493.
- Free, M.L., 2022. Chemical Fundamentals of Hydrometallurgy, in: Free, M.L. (Ed.), *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 23–67. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88087-3_2
- Goldfarb, R. J., Groves, D. I., Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore geology reviews*, 18(1-2), 1-75. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00016-6)
- He, X., Deng, X., Pirajno, F., Zhang, J., Li, C., Chen, S., Sun, H., 2022. The genesis of the granitic rocks associated with the Mo-mineralization at the Hongling deposit, eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology, geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes. *Ore Geology Reviews*, 146, 104947. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104947>
- Hou, X. G., Sun, D. Y., Gou, J., & Yang, D. G. (2019). The origin of variable- $\delta^{18}\text{O}$ zircons in Jurassic and Cretaceous Mo-bearing granitoids in the eastern Xing-Meng Orogenic Belt, Northeast China. *International Geology Review*, 61(2), 129-149. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1411840>

- Kerrich, R., Goldfarb, R., Groves, D., Garwin, S., Jia, Y., 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 43(Suppl 1), 1-68. <https://doi.org/10.1007/BF02911933>
- Kholmogorov, A. G., Kononova, O. N., 2005. Processing Mineral Raw Materials in Siberia: Ores of molybdenum, tungsten, lead and gold. *Hydrometallurgy*, 76(1-2), 37-54. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.08.002>
- Lasheen, T.A., El-Ahmady, M.E., Hassib, H.B., Helal, A.S., 2013. Oxidative leaching kinetics of molybdenum-uranium ore in H_2SO_4 using H_2O_2 as an oxidizing agent. *Front Chem Sci Eng* 7, 95–102. <https://doi.org/10.1007/s11705-013-1317-6>
- Lasheen, T.A., El-Ahmady, M.E., Hassib, H.B., Helal, A.S., 2015. Molybdenum Metallurgy Review: Hydrometallurgical Routes to Recovery of Molybdenum from Ores and Mineral Raw Materials. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 36, 145–173. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.868347>
- Levenspiel, O., 1998. Chemical reaction engineering. John wiley & sons.
- Levich, V.G., Tobias, C.W., 1963. Physicochemical hydrodynamics. *J Electrochem Soc* 110, 251C.
- Li, J., Li, C. Y., Liang, J. L., Song, M. C., Zhang, L. P., Song, Y. X., 2021. Mineralization of the Shangjiazhuang Mo deposit in the Jiaodong peninsula, China: Constraints from S–H–O isotopes and fluid inclusions. *Solid Earth Sciences*, 6(4), 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2021.08.001>
- Marafi, M., Al-Omani, S., Al-Sheeha, H., Al-Barood, A., Stanislaus, A., 2007. Utilization of Metal-Fouled Spent Residue Hydroprocessing Catalysts in the Preparation of an Active Hydrometallization Catalyst. *Ind Eng Chem Res* 46, 1968–1974. <https://doi.org/10.1021/ie061192v>
- Mirvaliev, R., Inoue, K., 2001. Pressure oxidative leaching of molybdenite in alkaline media. *J. Min. Mater. Process. Inst. Jpn* 117, 72–76.
- Mitchell, A. H. G., 1973. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones. *Nature Physical Science*, 245(143), 49–52. <https://doi.org/10.1038/physci245049a0>
- Motasim, M., Agacayak, T., Eker, Y. R., Aydogan, S., Abbaker, A. 2025a. Reaction kinetics of molybdenum dissolution by hydrogen peroxide in acidic and alkaline solutions using tartaric acid and sodium hydroxide: A semi-empirical model with rotating disc method. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(6), 2555-2571. <https://doi.org/10.1002/cjce.25530>
- Motasim, M., Agacayak, T., Fathalrhman, M., Elhadi, E., El-Gak, A., Awdekarim, A., Sadeek Seifelnasr, A.A., 2023. The potential of Sudanese Refractory Gold Ores Characterization and Pre-treatment in Ariab Mines (VMS) in Red Sea (Sudan). *Acta Montanistica Slovaca* 28 (2), 265–276. <https://doi.org/https://doi.org/10.46544/AMS.v28i2.01>

- Motasim, M., Aydoğan, S., Agacayak, T., Eker, Y. R., El-gak, A., Seifelnassr, A. A. 2024b. The influence of sodium fluoride on the dissolution kinetics of metallic titanium in citric acid solution using the rotating disc method. *Hydrometallurgy*, 226, 106297. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106297>
- Motasim, M., Aydoğan, S., Ali, B., Agacayak, T., 2024a. Rotating disc method to study the dissolution kinetics of copper metal in citric acid and hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy* 225, 106281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106281>
- Motasim, M., Boyrazli, M., Aydoğan, S., Agacayak, T., Ali, B. 2025b. The Investigation of Metallic Silver Dissolution Kinetics Using DL-Malic Acid with Hydrogen Peroxide Solution as an Eco-Friendly Leaching System: The Rotating Disc Method. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11663-025-03714-5>
- Nhan, L.M., Seung, L.M., 2019. Leaching of Rare Metals from Spent Petroleum Catalysts by Organic Acid Solution 28, 36–45. <https://doi.org/10.7844/KIRR.2019.28.6.36>
- Nicol, M.J., 2020a. The role and use of hydrogen peroxide as an oxidant in the leaching of minerals. II. alkaline solutions. *Hydrometallurgy* 194, 105365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105365>
- Nicol, M.J., 2020b. The role and use of hydrogen peroxide as an oxidant in the leaching of minerals. 1. acid solutions. *Hydrometallurgy* 193, 105328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105328>
- Petrucchi, R.H., Herring, F.G., Madura, J.D., Bissonnette, C., 2017. General Chemistry: Principles and Modern Applications. Pearson Education.
- Pourbaix, M., 1966. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. NACE.
- Rezki, A.S., Sumardi, S., Astuti, W., Made Bendiyasa, I., Petrus, H.T.B.M., 2021. Molybdenum Extraction from Spent Catalyst Using Citric Acid: Characteristic and Kinetics Study. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 830, 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/830/1/012020>
- Rotsch, D.A., Tkac, P., Vandegrift, G.F., 2016. Optimization of the Dissolution of Mo Disks, in: Mo-99 2015 Topical Meeting on Molybdenum-99 Technology Development, St. Luis, Missouri.
- Russo, R.E., Ventura, M., Fattobene, M., Zamponi, S., Conti, P., Berrettoni, M., Giuli, G., 2023. Hydrometallurgical Molybdenum Recovery from Spent Catalyst Using Tartaric Acid Derived from Agrifood Waste. *ACS Sustain Chem Eng* 11, 15644–15650. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04318>
- Saji, V.S., Lee, C.-W., 2012. Molybdenum, molybdenum oxides, and their electrochemistry. *ChemSusChem* 5 7, 1146–61.

- Sillitoe, R. H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic geology*, 67(2), 184-197. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.2.184>
- Sillitoe, R. H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(3), 373-388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Silverman, M.P., Lundgren, D.G., 1959. Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*: I. An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. *J Bacteriol* 77, 642–647.
- USGS, 2025, Molybdenum, *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2025*, 122-123.
- Wu, J., Ahn, J., Lee, J., 2021. Kinetic and Mechanism Studies Using Shrinking Core Model for Copper Leaching from Chalcopyrite in Methanesulfonic Acid with Hydrogen Peroxide. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 42, 38–45. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1795850>
- Xie, K., Wang, H., Wang, S., 2019. Direct leaching of molybdenum and lead from lean wulfenite raw ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 29, 2638–2645. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65170-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65170-8)
- Zhao, Z., Guo, M., Zhang, M., 2015. Extraction of molybdenum and vanadium from the spent diesel exhaust catalyst by ammonia leaching method. *J Hazard Mater* 286, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.063>