

Jeoloji ve Yer Bilimlerinde Genel Konular 1

EDITOR
BERNA YAVUZ PEHLIVANLI

BİDGE Yayınları

Jeoloji ve Yer Bilimlerinde Genel Konular 1

Editör: Doç. Dr. Berna Yavuz Pehlivanlı

ISBN: 978-625-6645-65-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2023

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	3
Bazalt Fiber ve Liflerinin Özellikleri, Üretimi ve Kompozit Malzeme Olarak Kullanılabilirlikleri	5
Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN.....	5
Zemin Şevlerinin Duraylılığının Limit Denge Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi: Bentonit Ocağı Örneği (Ünye/Ordu).....	18
Selçuk ALEMDAĞ	18
Faruk AYLAR.....	18
Jeokimyasal Verilerin Değerlendirilmesinde Petrograph Programının Kullanılması	50
Hüseyin SENDİR	50

Maden Aramalarında Kullanılan Jeolojik Yöntemlerin İncelenmesi	72
Hüseyin SENDİR	72
KCl ve Lignosülfonat Çamurlarına Eklenen Gıda Atıklarının Kayıp Önleyici Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması	87
İnci TÜRK TOĞRUL	87
Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç (Hpht) Rezervuarlarının Karakteristikleri – Kuzey Kuveyt Hpht Jura Rezervuarlarına Genel Bir Bakış	123
Samar ALYOUNES	123
Derya KOCA	123
Nadir Toprak Element (NTE) Oksidler, Alaşımlar, Bileşenlerin Özellikleri ve Uygulamaları	151
Berna YAVUZ PEHLİVANLI	151

BÖLÜM I

Bazalt Fiber ve Liflerinin Özellikleri, Üretimi ve Kompozit Malzeme Olarak Kullanılabilirlikleri

Gökhan BÜYÜKKAHRAMAN¹

Giriş

Günümüzde giderek artan maliyetler nedeniyle başta inşaat olmak üzere pek çok sektörde hem uygun fiyatlı hem de dayanıklılığı artıran, aynı zamanda da çevreye zararı olmayan doğal malzemelere olan gereksinim daha da önem kazanmıştır. Bu noktada, yerkabuğunda yaygın şekilde bulunabilen, çıkarılması kolay ve tamamen doğal olarak oluşan volkanik bir kayaç türü olan bazaltdan üretilen bazalt fiber ve lifleri, gerek zemin iyileştirmelerinde gerekse de dayanımın artırılmasının istendiği diğer alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Henüz yeni sayılabilecek olmaları nedeniyle bu malzemelerin farklı amaçlara göre nasıl kullanılmaları gerektiği, hangi oranlarda eklenecekleri ve kalitelerini etkileyen faktörler gibi konuların iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu malzemelerin

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi

değişik sektörlerdeki performans özelliklerinin tespitine yönelik çalışmaların sayısının zamanla artması çok faydalı olacaktır.

Bazalt fiberleri ve bazalt lifleri günümüzde yeni yeni kullanılmaya başlanan, her ikisi de doğal olarak oluşan ve aynı kaynaktan elde edilen malzemelerdir. Bazalt lifleri daha kısa ve daha inceyken, bazalt fiberleri daha uzun ve daha kalındır. Bu nedenle bazalt fiberleri daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağladığından özellikle inşaat sektöründe daha yaygın olarak kullanılırlar. Bazalt lifleri ise şimdilik daha çok termal yalıtım gibi uygulamalarda kullanılır.

Bu iki malzeme son zamanlarda gerek düşük maliyetleri, gerekse de kolay ulaşılabilirlikleri nedeniyle geleneksel zemin güçlendirme yöntemlerine önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bu çalışmada; önce bazalt kayacı tanıtılıp, sonrasında bazalt fiber ve liflerinin üretim aşamaları, sahip oldukları özellikler, kullanım alanları ve bu malzemelerin test edildiği örnek zemin iyileştirme uygulamaları hakkında bilgiler sunulmaktadır. Bu iki malzemenin nasıl elde edildiği bahsine geçmeden önce hammaddeleri olan bazalttan bahsetmek gereklidir.

Bazalt

Bazaltlar yeryuvarının yaklaşık üçte birini oluşturan, yaygın olarak mostra veren ve elde edilmesi zahmetsiz bir kayaç çeşididir. Kimyasal ve mineralojik bileşimleri açısından gabro kayacının volkanik kardeşleridir. Açık renkli (felsik) mineral olarak başlıca plajiyoklaz içeren, koyu renkli (mafik) mineral miktarı genellikle % 40-70 arasında olan kayaçlardır (Erkan, 2006).

Koyu gri-siyah arasında değişen renklere sahiptirler. Volkancamı içeriği fazla olan bazaltlar kristalli dokulu bazaltlara nazaran daha siyah veya koyu kahverengi bir renge sahiptirler (Şekil 1). Diğer bazaltlar ise daha açık renkler sergilerler. Kloritleşme ve epidotlaşmaya bağlı olarak yeşilimsi renkler de baskın hale gelebilir (Erkan, 2006). Bazaltların renkleri demir içerikleri ile de değişkenlik gösterebilmektedir.

Bazaltların ana bileşenini labrador bileşimindeki plajiyoklazlar oluşturur. Ancak bazı bazalt türlerinde bitovnit ve anortit gibi daha bazik karakterli plajiyoklazların da bulunduğu görülebilmektedir. Mafik minerallerden ana bileşen olarak piroksen ve/veya olivin mineralleri içermektedirler. Hatta bazen olivin miktarının yükselmesi ile beraber kayaç ismi olivin-bazalt olarak adlandırılır. Bazaltlarda ikincil (sekonder) minerallere de rastlanılır. Olivinin serpantin, talk, iddingsit, limonit ve çeşitli karbonat minerallerine; piroksenlerin ise kalsit, epidot ve klorite dönüştüğü bazaltlar mevcuttur (Erkan, 2006). Bu durum, bazaltın malzeme dayanımı özelliğini etkilemesi bakımından önem arz etmektedir. Bu nedenle her ne kadar yer kabuğunda bol bulunan bir kayaç olsa da ayrışmaya ve bozunmaya uğramamış daha masif bazaltlara ulaşmak çok da kolay değildir.

Bazaltların bulunuş ortamları bakımından, kilometrelerce yayılıma sahip lav akıntıları şeklinde, bazen yüzlerce km²'lik alanları kaplayacak şekilde (bazalt platoları) bulunabilirler. Bu tür lav akıntılarının kalınlığı, üzerinde aktıkları topografyaya, üst üste gelen akıntılarının sayısına bağlı olarak metre veya kilometre mertebesinde olabilir. Bazaltlar ayrıca yarı-volkanik koşullar altında meydana gelmiş dayk, sil veya baca dolguları şeklinde damar kayacı olarak da karşımıza çıkabilirler (Erkan, 2006).



Şekil 1. Volkancamı içeriği bakımından zengin bir bazaltın görünümü.

Bazalt fiber

Bazalt fiberin üretimine yönelik ilk girişimler 1923 yılında ABD’de Paul Dhe tarafından gerçekleştirilmiştir. 2. Dünya Savaşı’ndan sonra ABD, Avrupa ve Sovyetler Birliği’ndeki araştırmacılar tarafından özellikle askeri ve havacılık uygulamaları amacıyla daha da geliştirilmiştir. 1995 yılında sınıflandırmanın kaldırılmasından beri, bazalt lifleri daha geniş bir sivil uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır.

Bazalttan devamlı olarak lif ve fiber üretimi ise ancak 1980’lerin sonlarına doğru, bazaltın üretimi esnasındaki aşamalı kristalleşme ve kararsız erime gibi problemlerin çözüme kavuşturulmasıyla mümkün olabilmiştir (Küçükosmanoğlu, 2019). İlk bazalt fiber üretim tesisleri ise o zamanki Sovyetler Birliği’ne bağlı olarak Gürcistan ve Ukrayna’da kurulmuştur (Parnas & ark., 2007).

Bazalt fiberlerin üretimi

Yukarıda da değinildiği gibi bazalt, yeryuvarında yaygın olarak bulunması ve kolay çıkarılabilmesi sebebiyle ucuz bir hammaddedir. Ancak üretilecek bazalt fiberin istenilen amaca uygun olabilmesi için kullanılan bazaltın kalitesi büyük önem arz etmektedir. Bazaltın kalitesini etkileyen yanardağ lavlarının oluşumu, kimyasal bileşimi, soğuma sürecinde atmosferle olan etkileşimi, ne kadar sürede soğuduğu ve buna bağlı olarak ne oranda volkancamı içerdiği gibi unsurlar; kaliteli bir bazalt fiberi üretebilmek için oldukça önemlidir (Parnas & ark., 2007). Bazalt fiberlerin üretim süreci genellikle şu adımlardan oluşur:

1. Bazalt kayaçları öğütülür ve erimiş haldeki bazalt lavını oluşturmak için yüksek sıcaklıklarda eritilir.
2. Eritilmiş bazalt lavı, yüksek hızlı bir hava akımı ile küçük iplikler halinde çekilir. Bu işlem, çekme işlemi olarak adlandırılır.

3. Çekilen iplikler, daha sonra özel bir işlemle kaplanır ve istenilen kalınlıkta kesilir. Kesilen iplikler daha sonra farklı şekillerde kullanılmak üzere bobinlere sarılır.

4. Bazalt fiber, farklı çaplarda ve uzunluklarda üretilebilir. Bu nedenle, üretim sürecinde çeşitli işlemler yapılır ve farklı özelliklere sahip fiberler üretilir.

5. Son olarak; üretilen bazalt fiberler, farklı sektörlerde kullanılmak üzere müşterilere satılır (Şekil 1.2).

Bazalt fiberin üretim süreci oldukça uzun ve teknik bir işlemdir. Ancak, sonuçta çok dayanıklı ve güçlü bir malzeme elde edilir (Swink, 2002).



Şekil 1.2. 24 mm boyunda kırpılmış bazalt fiberin görüntüsü.

Bazalt fiberlerin özellikleri

İşlenerek elde edilen bazalt fiber, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç gibi birçok özelliğiyle dikkat çeker. Bazalt fiberin özellikleri arasında şunlar sayılabilir:

- Yüksek mukavemet: Bazalt fiber, çelikten daha yüksek bir mukavemete sahiptir. Bu özelliği sayesinde, inşaat, havacılık, otomotiv ve gemi yapımı gibi birçok endüstride kullanılır.

- Düşük yoğunluk: Bazalt fiber, düşük yoğunluğu sayesinde hafiftir ve taşınması kolaydır. Bu özelliği nedeniyle, uçak, helikopter, roket ve uzay araçları gibi hafif ama dayanıklı yapıların gerektiği alanlarda kullanılır.

- Yüksek sıcaklık dayanımı: Bazalt fiber, yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Bu nedenle, yüksek sıcaklıkların söz konusu olduğu endüstrilerde kullanılır.

- Kimyasal direnç: Bazalt fiber, kimyasallara karşı dirençlidir. Bu özelliği sayesinde, çeşitli kimyasalların kullanıldığı endüstrilerde kullanılır.

- İyi yalıtım özelliği: Bazalt fiber, iyi bir yalıtım malzemesidir. Bu nedenle, birçok endüstride yalıtım amaçlı kullanılır.

- Uzun ömürlü: Bazalt fiber, uzun ömürlü bir malzemedir ve çürümez. Bu özelliği nedeniyle de, birçok endüstride dayanıklı ve uzun ömürlü yapıların yapımında kullanılır.

Bazalt fiberlerin kullanım alanları

Bazalt fiberin kullanım alanları oldukça geniştir. Bazı örnekler şunlardır:

- İnşaat: Bazalt fiber, beton ve diğer yapı malzemeleri için katkı maddesi olarak kullanılır. Bu sayede, yapıların mukavemeti artar ve dayanıklılığı artırır. Ayrıca, yangın dayanımı ve izolasyon özellikleri nedeniyle, yangın güvenliği açısından da önemlidir.

- Havacılık: Bazalt fiber, hafif ve dayanıklı bir malzeme olduğu için, hava araçlarının yapımında sıklıkla kullanılır. Uçak, helikopter, roket ve uzay araçları gibi hafif ve güçlü yapıların yapımında kullanılır.

- Otomotiv: Bazalt fiber, otomotiv endüstrisinde de yaygın olarak kullanılır. Araçların gövde, kaporta ve diğere parçalarında kullanılır. Bu sayede, araçların mukavemeti artar ve yakıt tüketimi azalır.

- Gemi yapımı: Bazalt fiber, gemi yapımında da kullanılır. Dayanıklı ve hafif bir malzeme olduğu için, gemilerin yapımında kullanılan diğere malzemelerin yerini alabilir.

- Rüzgar türbinleri: Bazalt fiber, rüzgar türbinlerinin yapımında da kullanılır. Bu sayede, türbinlerin daha hafif ve dayanıklı olmasını sağlar.

- Spor ekipmanları: Bazalt fiber, spor ekipmanları yapımında da kullanılır. Özellikle, kayak, snowboard, bisiklet ve tenis raketleri gibi spor malzemelerinin yapımında kullanılır.

- Elektrik endüstrisi: Bazalt fiber, elektrik yalıtım malzemesi olarak da kullanılır. Yüksek voltajlı elektrik hatları ve diğere elektrikli cihazlar için yalıtım malzemesi olarak kullanılır.

Bazalt lifi

Bazalt lifi, cam lifine benzer bir üretim yöntemiyle tek kademeli bir prosesle tek komponent hammadde kullanılarak elde edilir (Şekil 1.3). Bazalt lifi, cam lifine göre daha yüksek kimyasal saflığa, ısı dayanıklılığına, mukavemete ve aşınma direncine sahiptir. Bazalt lifi, asbest veya karbon liflerinin yerini alabilecek özelliklere sahiptir (Bazalt Lifleri, 2023). Bazalt lifi ve bazalt fiber arasındaki fark, bazalt lifinin tek başına bir malzeme iken bazalt fiberin birden fazla bazalt lifinin birleştirilmesiyle oluşan bir yapı olmasıdır. Bazalt lifi ve bazalt fiber arasındaki ilişkiyi şöyle gösterebiliriz:

birleştirme
Bazalt Lif \Longrightarrow Bazalt Fiber



Şekil 1.3. Bazalt lifinin sarılmış haldeki görüntüsü (Regmiks, 2023).

Bazalt liflerinin retimi

Bazalt lifleri üretimi için uygun olan grup SiO_2 içeriği % 46'nın üzerinde olan asidik bazaltlardır (Bazalt Lifleri, 2023). Bazalt lifi üretimi için kullanılan bazalt kayaçları, 1500 $^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılarak eritilir ve bağlayıcı bileşenler eklenir. Eriyik haldeki bazalt, yüksek basınçlı bir nozuldan geçirilerek ince liflere dönüştürülür. Bazalt lifleri genellikle 2 ila 10 mm arasında bir uzunluğa ve 8 mm'yi geçmeyen bir çapa sahiptirler (Techinfus, 2023).

Bazalt liflerinin zellikleri

Bazalt liflerinin başlıca özellikleri şunlardır:

- Kimyasal saflıkları cam liflerinden daha yüksektir. Konsantre mineral asitlerden ve alkalilerden çok az etkilenirler.

- Isıl dayanıklılıkları çok iyidir. Bazalt lifleri 650 °C'ye kadar ısıya maruz kaldığında bile stabil kalabilir.

- Isı, ses ve elektrik yalıtım özellikleri oldukça iyidir.

- Mukavemetleri son derece yüksektir. Bazalt lifleri, çekme mukavemeti 3000-4840 Mpa arasında değişen yüksek performanslı liflerdir.

- Sertlikleri yüksektir. Mohs sertlik cetveline göre 5-9 arasında bir sertliğe sahiptirler. Bu da bazalt liflerine yüksek aşınma direnci kazandırır.

- Yoğunlukları 2,8-2,9 g/cm³ arasındadır.

Bazalt lifleri, teknik tekstillerde, kompozit malzemelerde, yol kaplama ve inşaat malzemelerinde kullanılabilir. Böylece asbest veya pahalı karbon liflerinin yerini alabilecek özelliklere sahiptir.

Bazalt liflerinin kullanım alanları

Bazalt lifleri, sertlik, mukavemet, ısı ve kimyasal dayanıklılık gibi özelliklerinden dolayı çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bazı kullanım alanları şunlardır:

- Teknik tekstiller: Bazalt lifleri, yangın söndürme battaniyeleri, ısı yalıtımı, filtreleme, güçlendirme ve kompozit malzemeler gibi teknik tekstil ürünlerinin üretiminde kullanılabilir.

- Kompozit malzemeler: Bazalt lifleri, plastik, reçine, metal veya beton gibi diğer malzemelerle birleştirilerek kompozit malzemeler oluşturabilir. Bu malzemeler, otomotiv, havacılık, denizcilik, inşaat ve spor ekipmanları gibi sektörlerde yüksek performanslı ürünler olarak kullanılabilir.

- Yol kaplama ve inşaat malzemeleri: Bazalt lifleri, asfalt veya beton karışımlarına katılarak yol kaplama ve inşaat malzemelerinin dayanıklılığını ve ömrünü artırabilir. Bazalt lifleri, deprem bölgelerinde binaların güçlendirilmesinde de kullanılabilir.

- Otomotiv sektöründe ise, araçların gövde ve parçalarının güçlendirilmesinde kullanılır.

- Ayrıca, bazalt lifleri, çevre dostu bir alternatif olarak, plastik malzemelerin yerine de kullanılabilir.

Bazalt fiber aracılığıyla zemin iyileştirmesi uygulamaları

Ndepete & Sert (2017), Adapazarı'nda siltli zemine ait örnekler üzerinde konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyleri uygulayıp; akabinde aynı deneyleri siltli zemine bazalt fiber karıştırıp sıkıştırarak (6, 12 ve 24 mm uzunluklarındaki bazalt fiberleri; % 1, % 1,5 ve % 2 oranında ekleyerek) elde ettikleri silindirik numuneler üzerinde yinelemişlerdir. Çalışma sonucunda; 24 mm boyundaki bazalt fiberin siltli zemine % 1,5 oranında karıştırıldığı doygun olmayan örneklerde özgün örneğe nazaran yaklaşık % 160'a varan bir iyileşme gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Doygun örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneylerdeyse en yüksek iyileşme değeri, yine aynı boyda ve aynı oranda bazalt fiberin zemine eklendiği örneklerde meydana gelmiş ve yaklaşık % 88 olarak hesaplanmıştır (Küçükosmanoğlu, 2019).

Kenan & Özocak (2018) de benzer şekilde, Adapazarı şehir merkezinden aldıkları doygun haldeki siltli zeminin kayma direncine bazalt fiber katkısının (24 mm uzunluğunda) tesirini, kesme kutusu (shear box) deneyi aracılığıyla gözlemlemişlerdir. Çalışma sonuçları, bazalt fiber oranı ile örneklerin kohezyon değerlerinin birbirleriyle doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra bazalt fiber miktarının artması ile kayma direnci açısının, başta artış daha sonra azalış trendine girdiği gözlemlenmiştir. Bu sayede, bazalt fiber katkısının, inceledikleri zeminin kayma direnci karakteristiklerinde iyileştirici bir faktör olduğunu tespit etmişlerdir. Bütün örnekler hesaba katıldığında, siltli zeminde bazalt fiber katkısının en uygun oranının % 1,5 olduğunu beyan etmişlerdir. Çalışma sonucunda tamamen doğal malzeme olan bazalt fiberin, zemin iyileştirmelerinde ucuz ve etkili bir seçenek olarak kullanılabileceğini önermişlerdir (Küçükosmanoğlu, 2019).

Bir örnek bazalt lif uygulaması da, İskoçya'daki Kincardine Köprüsü'nün inşaatı sırasında yapılmıştır. Köprü, yüksek dayanıklılığı ve çevre dostu yapısı sayesinde, bazalt lifleri kullanılarak inşa edilmiştir. Bu sayede, köprü daha dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirilmiştir (Küçükosmanoğlu, 2019).

Sonuçlar ve Öneriler

Yukarıda anlatılanlardan da anlaşıldığı üzere, bazalt liflerinin ve fiberlerinin, çevre dostu ve yüksek performanslı malzemeler olarak, gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir. Özellikle, inşaat ve otomotiv sektörlerinde, bazalt liflerinin kullanımı artacaktır. Ayrıca, bazalt lifleri, diğer birçok sektörde de kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, bazalt lifi teknolojisinin gelecekte daha fazla önem kazanacağına şüphe yoktur. Mühendislik jeolojisi uygulamalarından bilindiği gibi su emme kapasiteleri fazla olan killi zeminlerde, taşıyacakları üst yapının niteliklerine ve hâlihazırdaki su içeriklerine bağlı olarak yapılarda şişme ve oturmalarından kaynaklı sorunların oluşması muhtemeldir. İşte bu gibi durumlarda bazalt fiber ve liflerinin belli oranlarda zemine eklenmesiyle şişme miktarının düşürüldüğü ve dayanımının kayda değer bir oranda arttığını ortaya koyan çalışmalar literatürde mevcuttur. Ayrıca çalışmalar göstermiştir ki; optimum değerlere uyulmaksızın yapılan bazalt fiber katkıları beklenen iyileştirme etkisini yaratamamışlardır. Bunun sebebinin, bazalt fiberin örnek içinde oluşturduğu boşluklar olduğu düşünülmekte olup; bu düşünce literatürde cam elyaf katkısıyla yapılan bir başka çalışma ile de örtüşmektedir. Bazalt fiber olması gerekenden fazla katıldığı durumlarda zeminde kümelenmelerin ve topaklanmaların meydana geldiği ve eşit bir dağılımın sağlanmasının mümkün olamayacağını rapor eden çalışmalar mevcuttur (Küçükosmanoğlu, 2019). Görüldüğü gibi bazalt fiberler, bazalt lifler ve bunlarla karıştırılarak oluşturulan diğer kompozit malzemelerin hangi oranlarda kullanılmalı gerektiği konusu da bundan sonra yapılacak çalışmalarda ele alınması gereken önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak, pek çok teknik stnle sahip olan bazalt fiber ve liflerinin yapay katkı malzemelerine kıyasla daha ucuz, tamamen katkısız doğal maddelerden ibaret olmaları ve aynı zamanda evre dostu olmaları; bu malzemeleri zemin iyileştirmesi başta olmak üzere pek çok sektörde oldukça aranan alternatif bir malzeme yapmaktadır.

KAYNAKÇA

Erkan, Y. (2006). *Magmatik Petrografi*. JMO Yayınları, Ankara.

Kenan, A. (2018). *Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direnci parametlerine etkisi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

Küçükosmanoğlu, M. (2019). *Bazalt fiberin zemin iyileştirilmesinde kullanımı*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.

Ndepete, C.P. & Sert, S. (2017). Bazalt fiber katkısının silt zeminin drenajsız kayma direncine etkisi. 7. *Ulusal Geosentetikler Konferansı*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 79-88.

Parnas, R., Shaw, M. & Liu, Q. (2007). Basalt fiber reinforced polymer composites. *Report Prepared for The New England Transportation Consortium*. NETCR63, Project No: 03-7.

Regmiks, (2023). *Bazalt Fiteli*. (07.09.2023 tarihinde <https://regmiks.com/urunler/bazalt-fitili/> adresinden ulaşılmıştır).

Swink, M. (2002). Continuous filament basalt: a unique fiber capable of leadership in high temperature applications. *Techtextil North America Symposium*. Atlanta, GA, USA, 1-16.

Techinfus, (2023). *Bazalt kumaş: açıklama, özellikler, üretim teknolojisi, uygulama*. (12.09.2023 tarihinde <https://builder.techinfus.com/tr/uteplenie/vata-bstv.html?ssp=1&setlang=tr-Tr&safesearch=moderate> adresinden ulaşılmıştır).

Tekniktekstilller, (2023). *Bazalt Lifleri*. (07.09.2023 tarihinde <http://www.tekniktekstilller.com/articles/bazalt-lifleri/> adresinden ulaşılmıştır).

BÖLÜM II

Zemin Şevlerinin Duraylılığının Limit Denge Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi: Bentonit Ocağı Örneği (Ünye/Ordu)

Selçuk ALEMDAĞ¹
Faruk AYLAR²

1. Giriş

Bentonit, volkanik tüflerin ayrışmasıyla oluşmuş çok küçük kristallere sahip kil minerallerinden (başlıca montmorillonit) oluşan çok fazla su alıp şişen, iyonlaşma kapasitesi yüksek, sondaj çamuru, katalist, boya, plastik, dolgu, vb. alanlarda kullanılan toprağımsı bir madene verilen ticari isimdir (Kılınç vd., 2022). Bentonit ilk kez ABD'nin Wyoming eyaletinde keşfedilmiş olup, bu eyalete ilk yerleşenler, bentonit yatakları satırlarının ıslanması sonucunda

¹ Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane.

² Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi Coğrafya Bölümü, Samsun.

oluşan “sabun oyuklarında” kile benzeyen bu maddeyi “mineral sabunu” olarak adlandırmışlardır. Ticari olarak ilk üretim ise 1988 yılında Rock Creek sahasından William Taylor tarafından yapılmıştır (Davis, 1940; Yücel ve Gül, 2018). İlk zamanlar “*taylorit*” olarak isimlendirilen bu madde daha sonra bu ismin potasyum alüminyum sülfatın minerolojik ismi olarak İngiltere’de kullanılması nedeniyle, ilk üretim sahasının sahibi Ford Benton’a ithafen “*bentonit*” olarak isimlendirilmiştir (Davis, 1940; Yücel ve Gül, 2018). Alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik tüflerin ayrışmasından oluşan ve egemen olarak montmorillonit içeren killere, ticari anlamda ise gelişmiş sıvı emici ve kolloidal özelliği olan her kile **bentonit** denilmektedir (Akbulut, 1996).

Ekonomik olarak kullanılacak bentonit yatakları daha çok Kretase ve Tersiyer yaşlı olup, genellikle denizel ortamda oluşan kayaçlarla (glaokonitik kumtaşı, kireçtaşı, şeyl, kalkerli fosilli kumtaşı, marn, vb.) birlikte görülürler. Genellikle sert silifiye bir zonun üzerinde bulunmaktadır (Davis, 1940; Yücel ve Gül, 2018). Bentonit yataklarında bulunan ana kil minerali smektit grubu mineralleri olup, illit ve kaolinit minerallerine de birçok yatakta rastlanmaktadır. Ayrıca bunlardan farklı olarak feldspat, hornblend, kristabolit mineralleri ve volkanik kül kalıntıları da bulunmaktadır (Davis, 1940; Yücel ve Gül, 2018). Ekonomik olarak işletilen bentonit yataklarının büyük kısmı volkanik tüflerin alterasyona uğraması sonucu oluştuğu ifade edilirken bir kısmının ise volkanik kayaçların hidrotermal ve deuterik alterasyonu yoluyla oluştuğu kabul edilmektedir (MTA, 1989; Yücel ve Gül, 2018). Ca, Na ve Ca-Na montmorillonitlerden oluşmasına göre bentonitin jeolojik özellikleri ve kullanım alanları değişmektedir. Yüksek şişme kapasitesine sahip Na içerikli bentonit su ile temasta kendi hacminin 8-10 katı şişerken, Ca içerikli bentonitlerde şişme oranı 2-3 kat kadar olmaktadır. Na ve Na-Ca içerikli bentonitler sondaj, demir tozu peletlemesi gibi işlerde kullanılırken, daha az şişme kapasitesine sahip olan Ca içerikli bentonitler ağartma gibi işlerde kullanılmakta ve yaygın olarak “*ağartma toprağı (fuller earths)*” olarak da bilinmektedir. Bu tür killer Na_2CO_3 ile birleştirilerek, Na/Ca

iyonlarının yer değiştirmesi sağlanarak şişme kapasitesi arttırılabilmektedir (MTA, 1989; Yücel ve Gül, 2018).

Bentonit çok farklı alanlarda kullanılan önemli bir madendir. Başlıca kullanım alanları şunlardır. Kollaidal özelliği ve yüksek plastisitesi nedeniyle dökümde kalıp malzemesi olarak kullanılan kumları bağlayıcı özelliği vardır. Sondaj çamurunun ağdalı bir duruma gelmesini, kırıntıların yukarı taşınmasını ve su kaçaklarının önlenmesini sağlayan bir özelliğe sahiptir (URL-1). Yağların rengini açmada kullanılan Ca-Bentonitlerin asit aktivasyonu ile yüzey alanları ve kristal içindeki boşluklar genişletilir, Fe, Ti, Ca, Na ve K, kil minerallerinin kristal kafes yapısından ayrılması sağlanır. Boşluklarında H + - bağlar oluşturularak, ağartma toprağına dönüştürülür. Bitkisel yağların (zeytinyağı, ayçiçeği, mısır, susam, soya, palmiye, kanola, pamuk yağları gibi) rafinasyonunda filtre malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca bağlayıcı ve plastik özelliğe sahip bentonit demir tozlarının paletlenmesinde kullanılır. Bunun yanında inşaat mühendisliğinde temel ve baraj yapılarında su ve sıvı sızdırmazlığını elde etmede; şarap ve meyve sularının berraklaştırılmasında, hayvan yemi yapımında; ilaç, kağıt, lastik sanayilerinde katkı malzeme olarak; çimento ve seramik sanayinde katkı malzemesi olarak; petrol rafinasyonunda; atık suların temizlenmesinde; boya sanayi ve yangın söndürücülerde; gübre yapımı ve toprak ıslahında kullanılmaktadır (URL-1).

Farklı alanlarda kullanılan bentonit madeni hem dünyada hem de Türkiye’de önemli rezervlere sahiptir. Dünyanın önemli bentonit rezervine sahip alanları arasında Wyoming/ABD, Ponza ve Sardunya/İtalya, Milos/Yunanistan, Bavyera/Almanya ve Almeria/İspanya bulunmaktadır (Yücel ve Gül, 2018). Türkiye’de jeolojik yapısı nedeniyle bu madene sahip önemli ülkeler arasındadır. Nitekim Reşadiye/Tokat, Kalecik/Ankara, Kurşunlu, Eldivan, Ilgaz ve Çerkeş/Çankırı, Sungurlu/Çorum, Kepsut/Balıkesir, Enez/Edirne, Ünye ve Fatsa/Ordu ile Giresun, Trabzon ve Konya’nın farklı sahalarında değişik özelliklere/kullanım alanlarına sahip büyük bentonit yatakları bulunmaktadır (MTA, 1989; Yücel ve Gül, 2018). Görüleceği üzere

bu yatakların büyük çoğunluğu Türkiye'nin kuzeyinde yer almaktadır. Bu yatakların yer aldığı Pontidler, Anadolu'nun tektonik birimlerinden birisi olup, kuzeyde Karadeniz kıyı dağları ile Marmara Bölgesi, Ege Kıyıları ve Karaburun Yarımadasına kadar uzanan Kuzey Bata Anadolu Bölgesini kapsamaktadır (Ketin, 1966; Karakaya vd., 2007). Pontidlerde yaygın olarak gözlenen Üst Kretase-Eosen volkanikleri, Tokel'e (1972, 1973 ve 1977) göre kuzeye doğru dalan (Lütesiyen) bir yitim zonundan türemiş adayayı ürünüdürler. Bu yapı kalkan karakterli, silisçe doymuş, sodik ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$) ve Al_2O_3 'ce zengindirler. Bölgede cevherleşme masif ve ağimsı damarlar şeklinde oluşmuş olup, polimetalik özellikte ve piritçe zengindir. Bunun yanında Novoviç'e (1979) göre hidrotermal-epijenetik kökenlidir ve volkanizmanın yanında tektonizma da etkin rol oynamıştır. Çalışma sahasının da içerisinde yer aldığı Doğu Karadeniz Bölümü'nde, çeşitli rezervlerde masif ve ağimsı damarlar şeklinde sülfür yatakları oluşmuş olup, bunların bir kısmı işletilmiş, bir kısmı ise halen işletilmeye devam etmektedir (Çağatay, 1977; 1993; Karakaya vd., 2007). Doğu Pontidler'de Üst Kretase volkanizmasının özellikle Üst Kretase-Paleosen yaşlı grantoyidlerle olan temaslarındaki cevherleşmenin ve alterasyonun oluşumunda granitoyidlerden türeyen metal katyonlarınca zengin hidrotermal çözeltilerin rol aldığı belirtilmektedir (Ayan, 1991; Ayan ve Dora, 1993). Bölgede farklı rezerv büyüklüğüne sahip en az 40 masif sülfür yatağının olduğu bilinmektedir. Bu yatakların minerolojik, kimyasal ve yayılım tipi ile türleri yönünden Japon Kuroko tipi yataklara birçok yönden benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır (Çağatay, 1993).

Türkiye'de maden yataklarının üretim yöntemlerinden biri olan açık ocak yöntemi, yüzeye yakın cevher veya hammadde üretimi için yaygın kullanılmaktadır. Bu yöntem üretim kolaylığı sağlarken, düzgün tasarlanmamış şev geometrileri ciddi hayati ve işletme problemlerine yol açmaktadır. Açık ocak şev tasarımları yapılırken zemin veya kaya kütlelerinin yerinde veya laboratuvar deneyleri ile belirlenen mühendislik özellikleri dikkate alınarak ve farklı analiz yöntemleri kullanılarak en uygun ocak tasarımı

yapılmaktadır. Açık ocak işletmelerinde şev tasarımları yapılırken en önemli iki parametre dikkate alınmakta olup, bunlar işletme ekonomisi ve oluşturulan şevlerin güvenliğidir. Bu parametrelerden ekonomik işletme modeline göre tasarım yapıldığında, bazen jeolojik yapı veya olumsuz zemin koşulları sebebiyle istenilen ekonomik tasarım modeli uygulanamamaktadır. Bu bağlamda hem ekonomik işletme modeli hem de güvenli işletme metodolojisi için oluşturulan açık ocak şev tasarımı farklı yenilme metotları kullanılarak en uygun tasarı geometrisi oluşturulmalıdır. Özellikle şev tasarımı mühendislik açısından uygun olmayan açık ocak işletmelerinde gerek yapım aşamasında gerekse işletme durumunda olası duraysızlık sonucu oluşturulmuş palyelerde yenilmeler görülmektedir. Bunun sonucunda telafisi olmayacak can ve mal kayıpları oluşmaktadır. Bu sebeple açık ocak şev tasarımlarının duraylılığı hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Ordu ili, Ünye ilçesi, Nadirli Mahallesi civarında açık ocak işletmesi şeklinde üretim yapılan bentonit sahasında oluşturulan şevlerin duraysızlığı sonucu en uygun şev tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Şimdiye kadar birçok araştırmacı tarafından (Bishop, 1955; Bishop ve Morgenstern, 1960; Morgenstern ve Price, 1965; Janbu, 1973; Strang ve Fix, 1973; Sarma, 1973; Hughes, 1987; Duncan, 1996; Yu vd., 1998; Kim vd., 1999; Griffiths ve Lane, 1999; Abramson vd., 2001; Kim vd., 2002; Duncan ve Wright, 2005; Hammah vd., 2006; Li, 2007; Gürocak vd., 2008; Alemdağ vd. 2013, 2014, 2015a, 2015b; Alemdağ, 2015; Kaya vd., 2015; Alemdağ vd., 2016; Kaya vd., 2016) açık ocak işletmelerinde, karayolları şev tasarımında ve büyük mühendislik yapılarının tasarımında limit denge analizleri ve sayısal analizler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Saha çalışmaları sırasında maden ocağının bugünkü kapladığı alan, koordinat ve yükseklik ölçümleri GPS cihazı ile yapılmış ardından Google Earth Programından kontrolü sağlanmıştır. Şev duyarlılığının ortaya konulması amacı ile

belirlenen yamaçlardan karot örnekleri alınmış ve bunlar laboratuvarında analiz edilmiştir. Maden ocağının görüntülenmesinde fotoğraf makinası kullanılmıştır. Çalışma sahası için çizilecek bütün haritalara altlık oluşturacak Sayısal Yükseklik Modelinin (SYM) elde edilmesinde Harita Genel Müdürlüğü'nden elde edilen 1/25.000 ölçekli F38c1, F38c2, F38c3, F38c4, F38d1, F38d2, F38d3, F38d4 sayısal haritalar kullanılmıştır. Yine Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nden sağlanan 1/100.000 ölçekli Samsun F38 paftası yardımı ile sahanın litolojik özellikleri sayısallaştırılmıştır.

Bu çalışmada açık ocak işletmesi şev tasarımında duraylı olabilecek en uygun modelin belirlenmesinde; Basitleştirilmiş Bishop, Basitleştirilmiş Janbu, Düzeltilmiş Janbu ve Spencer yöntemleri kullanılmıştır. Bishop yönteminde genellikle homojen zeminlerde meydana gelen dairesel kaymalar için limit denge kabulüyle, dilimlere etkiyen yanal kuvvetlerin yatay, dilimler arası kesme kuvvetlerinin sıfır olduğu ayrıca normal kuvvet ve ağırlığın dilim tabanının ortasına etki ettiği varsayılır (Demir vd., 2006). Daha önceki ekliyle genel kayma yüzeyleri için geliştirilen bu metot, sonradan dairesel yüzey varsayımının hesaplarda önemli hatalar meydana getirmediği, pratik olduğu anlaşılınca sadece dairesel kayma yüzeylerine uygulanır olmuştur. Bishop, X dilim kesme kuvvetlerinin dikkate alınması durumunda çözümün daha karmaşık olacağını savunmuştur (Bishop, 1955). Ayrıca bu kuvvetlerin ihmal edilmesi hesaplarda %1'den daha az bir hata meydana getirmektedir. Bu yüzden dilimler arasındaki kuvvetlerin bileşkesinin yatay olduğu kabul edilerek Bishop metodu geliştirilmiştir. Janbu tarafından geliştirilen yöntemin de en önemli özelliği, her tipteki kayma yüzeyine uygulanabilir olmasıdır. Bu yöntemde, kuvvet dengesi kullanılarak stabilite analizi yapılmış ve Bishop yönteminin genel hatları izlenerek güvenlik sayısı elde edilmiştir. Spencer yöntemi ise dilimler arası kuvvetlerin paralel ve aynı eğime sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır. Dilimler arası kuvvetlerin eğimi denge denklemlerinin çözümü ile elde edilir. Spencer yönteminde yapılan bir diğer varsayım ise normal kuvvetin her dilimin tabanında etki ettiği'dir. Dilim sayısının artırılması yapılan bu varsayımın dilimler

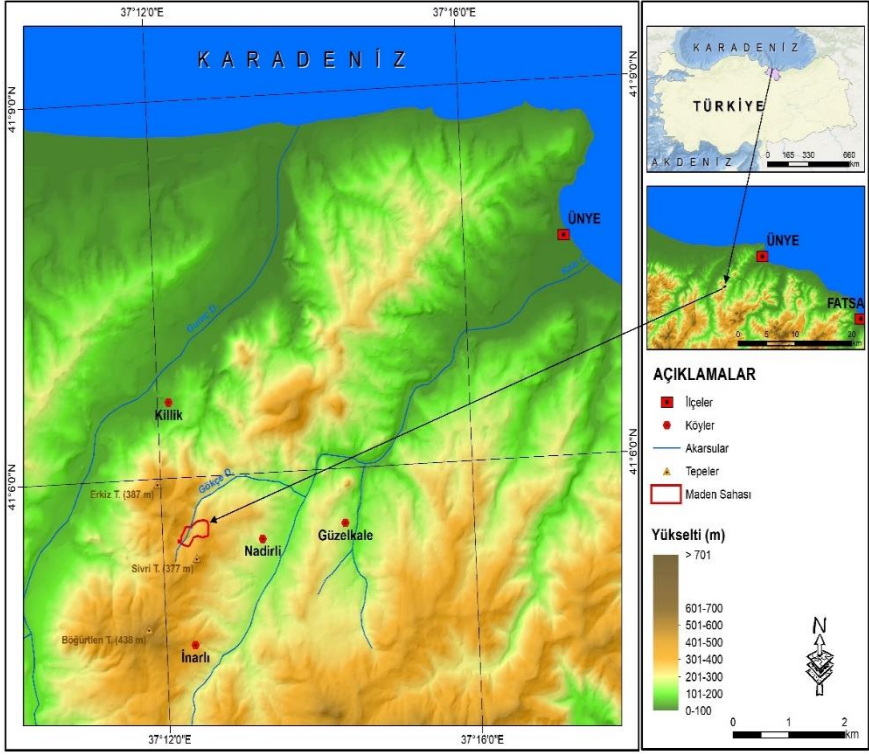
üzerindeki etkisini ihmal edilebilir düzeye getirmektedir (Kaya ve Şişman, 2021).

3. Bulgular

3.1. Çalışma Sahasının Konumu ve Doğal Ortam Özellikleri

Maden Ocağı Karadeniz Bölgesi'nin Doğu Karadeniz Bölümü'nde ve Ordu ili Ünye ilçesi Nadirli mahallesi sınırları içerisinde kalmaktadır (Şekil 1). Ünye ilçesine kuş uçuşu yaklaşık 7 km mesafede bulunan maden ocağı açık işletme şeklinde işletilmekte olup, kapladığı yüzey alanı yaklaşık 14,5 hektardır. Maden ocağı 41° 05' 28,32" - 41° 05' 39,83" Kuzey enlemleri ile 37° 12' 13,63" - 37° 12' 38,31" Doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Maden ocağının da bulunduğu Ünye yöresinde yükselti genel olarak kıyıda iç kesimlere doğru gidildikçe artmaktadır (Şekil 1). Sahanın en alçak alanlarını Ünye ilçe merkezinin de üzerinde yer aldığı kıyı kesimi oluşturmaktadır. Kıyıdaki alçak alanlar nispeten dardır ve akarsu vadilerini takip ederek iç kesimlere sokulmaktadır. Kıyıda itibaren güneye gidildikçe arazinin yükseldiği ve İnarlı köyü civarında 500 m ulaştığı görülmektedir.

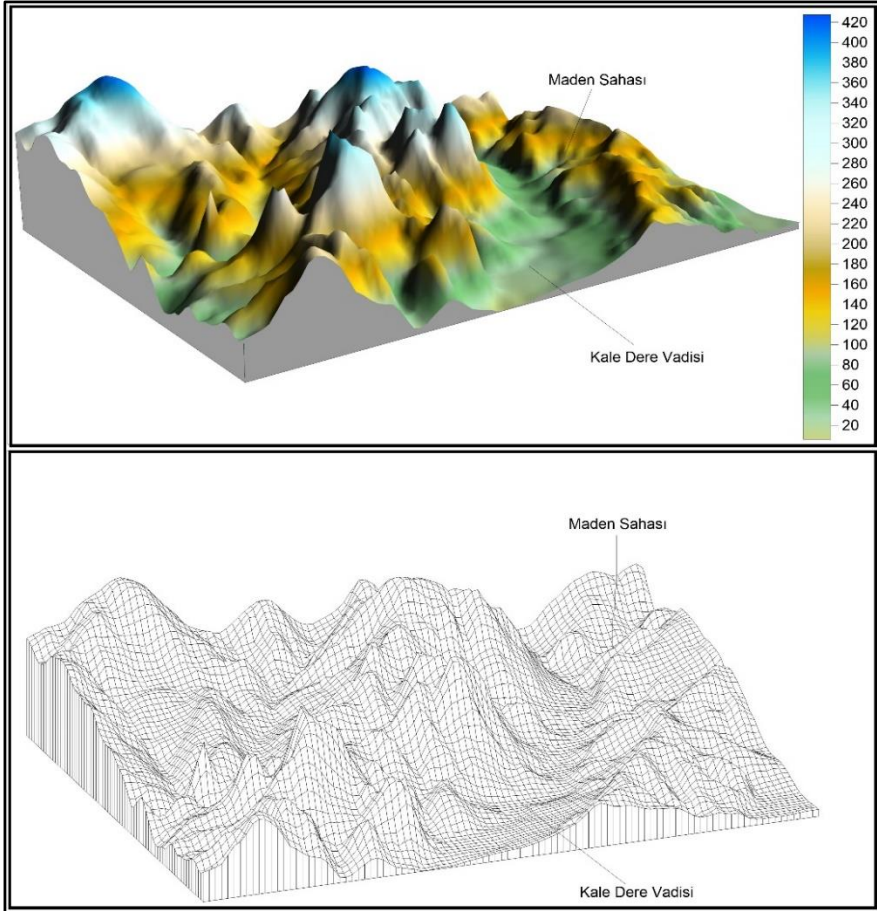
Sahadaki eğim değerleri incelendiğinde, düzenli bir dağılım izlenmemektedir. Kıyıda bulunan düzlük alanlarda ve akarsu vadilerinin denize yakın kısımlarında eğim değerleri düşüktür. Kıyıda iç kesimlere doğru gidildikçe eğim değerleri kısa mesafede artmaktadır. Özellikle yamaç arazilerde eğimin daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir. Derin vadilerin bulunduğu alanlarda örneğin Kale Deresi, Gökçe Dere ve Gülaç Deresinin orta ve yukarı çığırlarında yamaçlarındaki eğim değerleri yer yer 40 dereceyi aşmaktadır. Bu alanların dışında akarsular tarafından parçalanmış olan sahanın hemen tamamında eğim değerlerinin kısa mesafelerde değişiklik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1. İnceleme alanına ait lokasyon haritası.

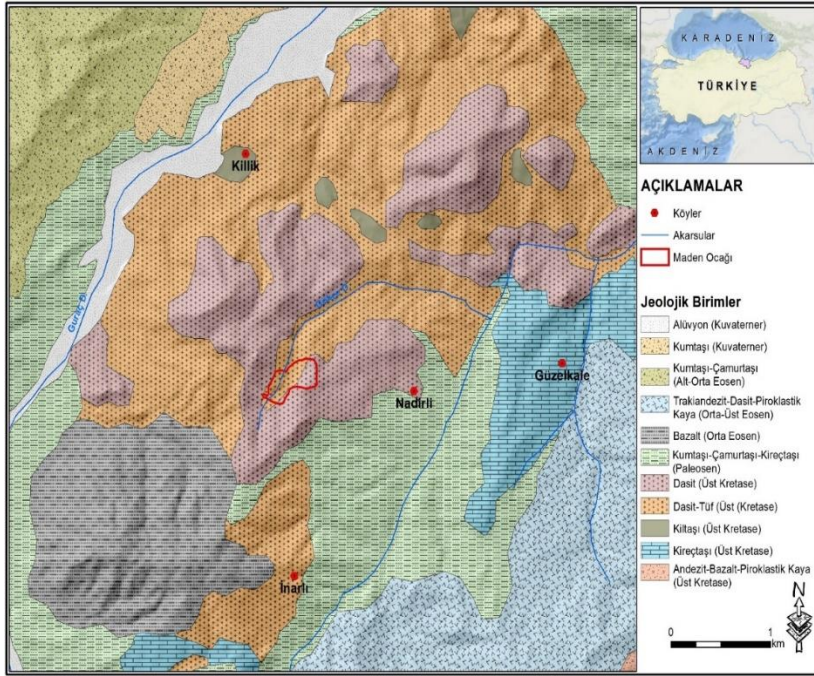
Çalışma sahasında düz araziler oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte sahada sırtlar, vadiler, yamaçlar, tepelik alanlar ve karstik platolar dikkat çekmektedir. Yörede egemen olan nemli iklim yıl boyunca akışa sahip olan akarsuların araziye derin bir şekilde yarmasına sebep olmuştur. Bundan dolayı sahada en geniş yayılış alanına sahip jeomorfolojik birimler birçoğu kuzeydoğu – güneybatı yönünde uzanan vadiler ve bu vadilerin arasında bulunan sırtlardır (Şatır, 2022). Çalışma sahasında bulunan akarsular genellikle “V” tipi çentik vadiler içerisinden akmaktadır. Bununla birlikte Kale Deresi gibi nispeten büyük akarsuların kıyıya yakın kesimlerinde taşımış olduğu alüvyonları biriktirmesiyle alüvyon tabanlı vadiler de oluşmuştur. Ünye ilçe merkezinin yaklaşık 5 km güneybatısında ortalama 650 m yükseltiye sahip bir tepelik alan bulunmaktadır. Bu

tepelik alan Ünye ilçe merkezinden denize dökülen Kale Deresinin ve diğer küçük çaplı derelerin kaynağını aldığı noktaya karşılık gelmektedir (Şekil 2). Sahada bulunan bir diğer tepelik alan ise araştırma sahasının güneybatı sınırında yer almaktadır ve ortalama 450 m yüksekliğe sahiptir. Genel olarak engebeli olan sahanın orta kesimlerinde ve güney sınırında hafif eğimli karstik platolar bulunmaktadır (Şatır, 2022).



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin genel morfolojik özelliklerini gösteren blok diyagram.

İnceleme alanında Nadirli Mahallesi ve civarında yayılım gösteren birimler Üst Kretase yaşlı Mesudiye Formasyonu olarak tanımlanmış olup, birim dasit ve dasitik tüflerden oluşmaktadır (Şekil 3). Bazalt, andezit, piroklastik kayaç, kumtaşı, kireçtaşı, çamurtaşı, siltaşı ve tuf ara seviyelerinden oluşan birim Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından adlandırmıştır. Mesudiye formasyonu gri, yeşil, kırmızı, sarı, kahve renkli, ince-orta-kalın katmanlı ve yer yer masif görünümlü volkanojenik kırıntılarla piroklastik kayaç ve lav içermektedir (Altun, 2011). Birimin kalınlığı ise 500-1400 metre arasındadır. Mesudiye formasyonunun yayılış alanı Ünye ve Fatsa ilçelerinin güneyini kapsamaktadır (Altun, 2011).



Şekil 3. İnceleme alanı ve çevresine ait jeoloji haritası.

Tüflerin üst zonlarında 8m-10m derinliğinde killi birim yüzeylenmektedir. Tüfler genellikle koyu gri, yeşil ve kahverengi, ince-orta tabakalı bazen tabakasız veya kalın tabakalıdır. Pürüzlü, tane boyları ufak çakıl ve az miktarda kireçtaşı çakılıdır.

3.2. İnceleme Alanında ve Laboratuvarında Yapılan Çalışmalar

İnceleme alanında açık ocak şevlerinde zemin özellikleri incelenerek zemin sınıfını belirlemek için örnek alımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). İnceleme alanında açık ocak işletmesindeki kil palyelerde Vane (kanatlı kesici) deneyleri yapılmış ve laboratuvarında zeminin dayanım parametrelerini belirlemek için çelik tüpler ile örselenmemiş örnek alınmıştır (Şekil 5). Yine, açık ocak alanında zeminin derinlikle değişimini incelemek için açılan sondaj kuyuları incelenmiş (Şekil 6) ve zemin-kaya sınırları her bir kesit hattı için belirlenmiştir.



Şekil 4. Açık ocak alanında örselenmiş ve örselenmemiş örnek alımı.

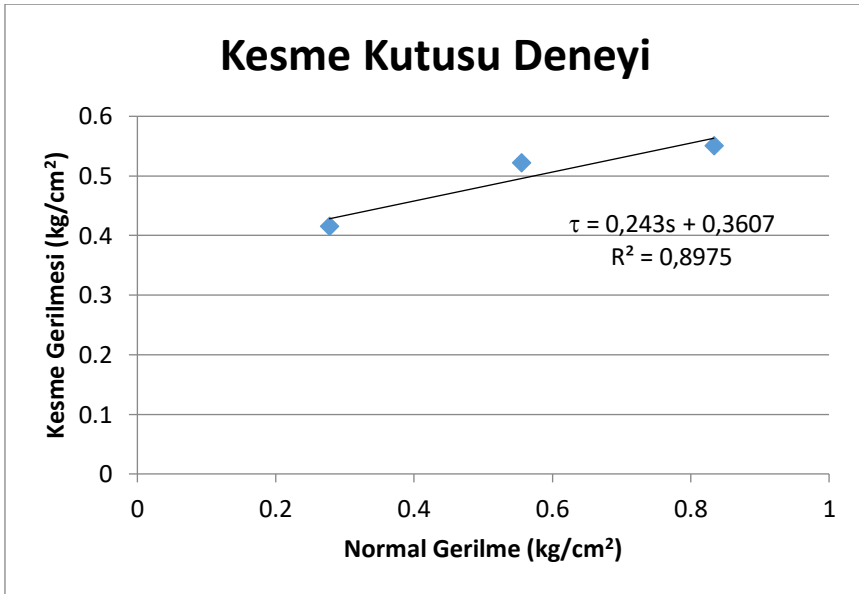


Şekil 5. Açık ocak alanında saha incelemeleri, örselenmemiş örnek alımı ve Vane deneyi.



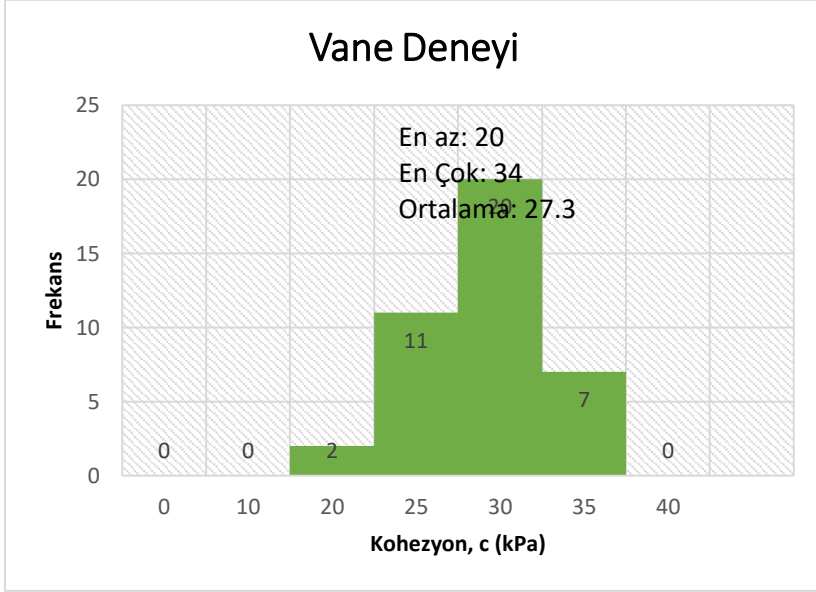
Şekil 6. İnceleme alanındaki sondaj kuyusuna ait örnek karot sandığı.

Açık ocak alanında killi seviyelerin jeoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere 2 örneklem noktasından çelik tüpler ile örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya ve Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda deneyler yapılarak zeminin jeoteknik özellikleri tespit edilmiştir. Alınan zemin örneklerinin kayma dayanımı parametrelerini (c ve ϕ) belirlemek amacıyla yapılan kesme kutusu deneyleri ise ASTM (1990) standardına göre yapılmıştır. Kesme kutusu deneyleri, zeminin doymun olduğu varsayılarak en kötü koşullara göre yapılmıştır. Bu nedenle deneyler konsolidasyonlu-drenajsız (CU; Consolidated-Undrained) olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerden normal gerilme (σ)-kayma gerilmesi (τ) grafikleri çizilerek (Şekil 7) zeminin doruk kohezyon (c) ve doruk içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri belirlenmiştir. Buna göre kohezyon $c=35$ kPa, içsel sürtünme açısı $\phi= 14^\circ$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Kil zemine ait kesme gerilmesi-normal gerilme grafiği

Ayrıca açık ocak çevre palyelerinde yapılan 40 adet Vane deneyi istatistiksel olarak değerlendirilmiş olup, Vane deneyinden elde edilen kohezyon değeri ortalama **27 kPa** olarak belirlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Kil zemine ait Vane deneyinden elde edilen kohezyon değerlerinin histogramal dağılımı

Dasitik tüflerden oluşan kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla açık ocak alanında yapılmış olan sondaj çalışmalarının karot örneklerine ait fotoğrafların incelenmesi ve sahada yapılan süreksizlik incelemeleri dikkate alınarak Marinos ve Hoek (2001) tarafından önerilen abak yardımıyla kaya kütlesi için Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) Şekil 9'deki abaktan belirlenmiştir. Buna göre RocLab bilgisayar programında GSI değeri 25 olarak belirlenmiştir.







Ocak alanından alınan kaya örnekleri ISRM (2007) standartları dikkate alınarak Gümüşhane Üniversitesi Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarında birim hacim ağırlık ve Nokta yükü dayanım

testleri yapılmıştır (Tablo 1). Belirlenen Nokta Yüğü dayanım indeksi değęerlerinden aşağıda verilen ampirik eşitlik yardımıyla tek eksenli sıkışma dayanımı değęerleri belirlenmiştir (Tablo 1).

$$\sigma_c = 12.5 * I_{s(50)} \text{ (Chau \& Wong, 1996)}$$

Tablo 1. Ocak alanından alınan tüf örneklerinde yapılan jeomekanik deney sonuçları

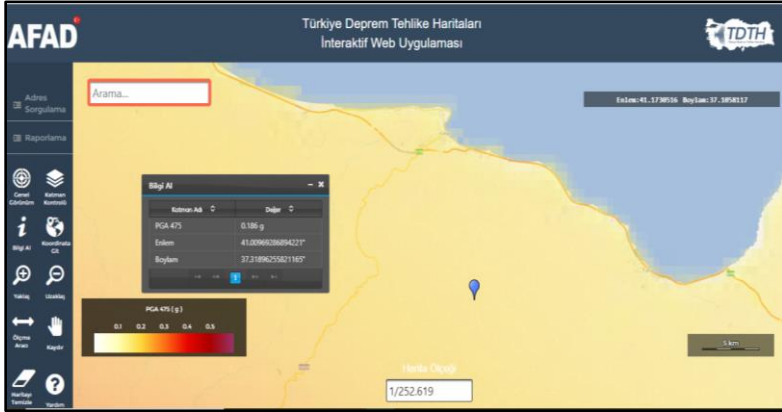
Örnek No	Kaya Tanımı	Doğal Birim Hacim Ağırlık (γ_n , kN/m ³)	Nokta Yüğü Dayanımı ($I_{s(50)}$, MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ_c , MPa)
1	Tüf	17.80	0.7	8.75
2	Tüf	16.60	0.65	8.13
3	Tüf	17.12	0.57	7.12
Ortalama		17.20	0.64	8.0

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type:	General	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection:	25	DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60	50	40
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	60	50	40	30
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	50	40	30	20
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40	30	20	10
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A	25	20	10

Şekil 9. Tüflerde GSI değerinin belirlenmesinde kullanılan abak (Marinos ve Hoek, 2001).

Tüf kaya kütlelerine ait özellikler RocLab bilgisayar programında Hoek-Brown (Hoek vd., 2002) yenilme kriteri ile belirlenmiştir. Programda kullanılan GSI değeri 25, kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{ci} = 8$ MPa, mi (kaya malzeme sabiti) parametresi tüf için 8 kullanılmıştır. Yapılacak kazı türü mekanik kazı olduğu için örselenme faktörü $D=0.7$ seçilmiştir. Bu değerler dikkate alınarak tüf için kaya kütle sabitleri mb, s ve a değerleri hesaplanmıştır. Buna göre mb:0.1298, s: 0.000019 ve

a:0.531 dır. Açık ocak alanındaki mevcut şevlerin modellenmesi ve tasarım şevi için kullanılacak etkin yer ivmesi AFAD (2018) tarafından önerilen deprem tehlike haritasına göre (Şekil 10) $a_y \cong 0.18g$ olarak belirlenmiş ve dinamik yük olarak kullanılmıştır.



Şekil 10. Türkiye deprem tehlike haritasına göre inceleme alanının durumu (AFAD, 2018).

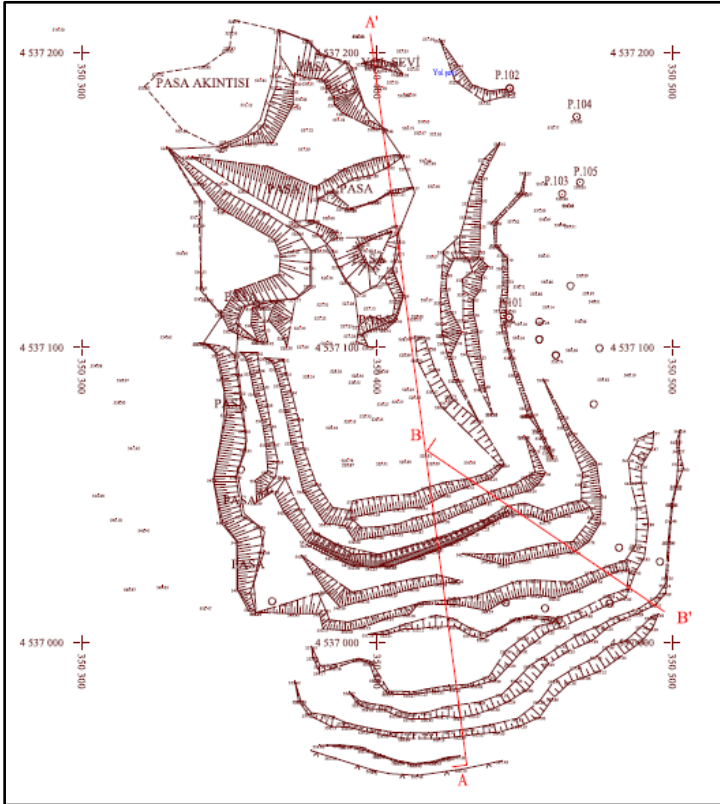
4. Açık Ocak Şevlerindeki Duraylılığının Limit Denge Analizleri ile İncelenmesi

Bu çalışmada açık ocak alanında belirlenen iki kesit hattı (A-A' ve B-B') için limit denge analiz yöntemlerinden Basitleştirilmiş Bishop, Basitleştirilmiş Janbu, Düzeltilmiş Janbu ve Spencer yöntemleri kullanılarak, her bir kesit hattının doğal durumda ve sismik yük etkisi altındaki davranışı için değerlendirmeler yapılmış ve her bir durum için güvenlik sayıları belirlenmiştir. Analizler Slide v8.0 (Rocscience, 2018) bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yatay yer ivmesi değeri Türkiye deprem tehlike haritasından belirlenmiş olup, $a_y \cong 0.18g$ alınmıştır. Analizlerde kullanılan parametreler inceleme alanından alınan zemin ve kaya örneklerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve kaya kütle özellikleri kullanılarak belirlenmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Burada 1. Materyal tuf kaya kütlelerini, 3. Materyal ise kil zemini göstermektedir.

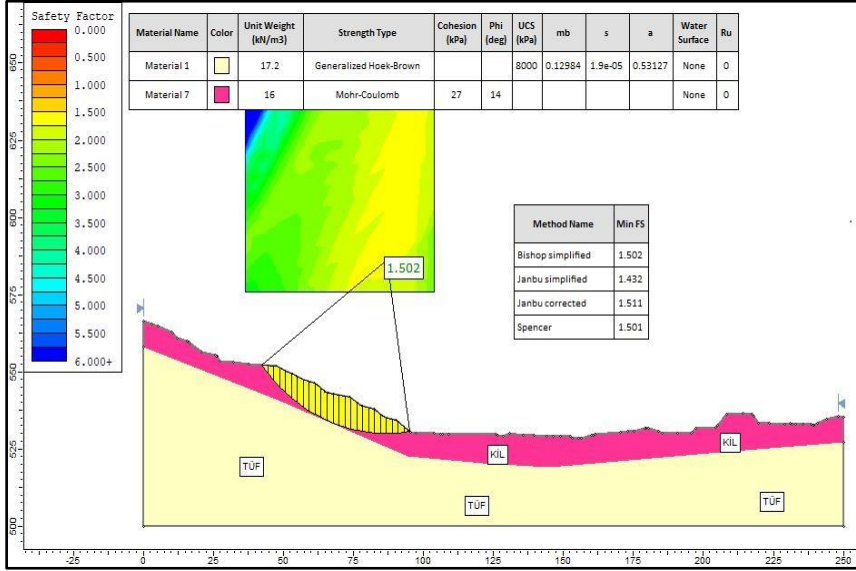
Tablo 2. Limit Denge (LE) analizlerinde kullanılan parametreler

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	UCS (kPa)	mb	s	a	Water Surface	Ru
Material 1	Yellow	17.2	Generalized Hoek-Brown			8000	0.12984	1.9e-05	0.53127	None	0
Material 3	Orange	16	Mohr-Coulomb	27	14					None	0

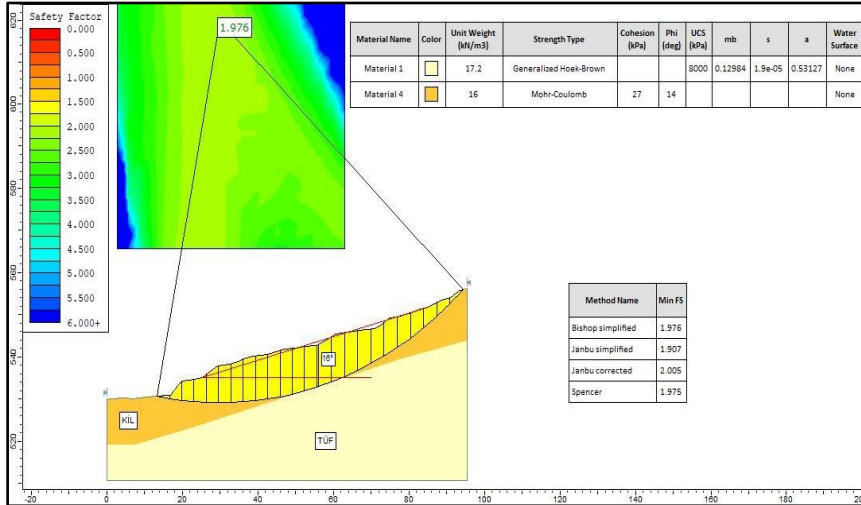
Açık ocak işletmesinde belirlenen kesit hatları Şekil 11’de verilmiş olup, öncelikle A-A’ ve B-B’ kesitleri için duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 12-13). Daha sonra bu kesit hatları dinamik yük (sismik yük) etkisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Şekil 14-15).



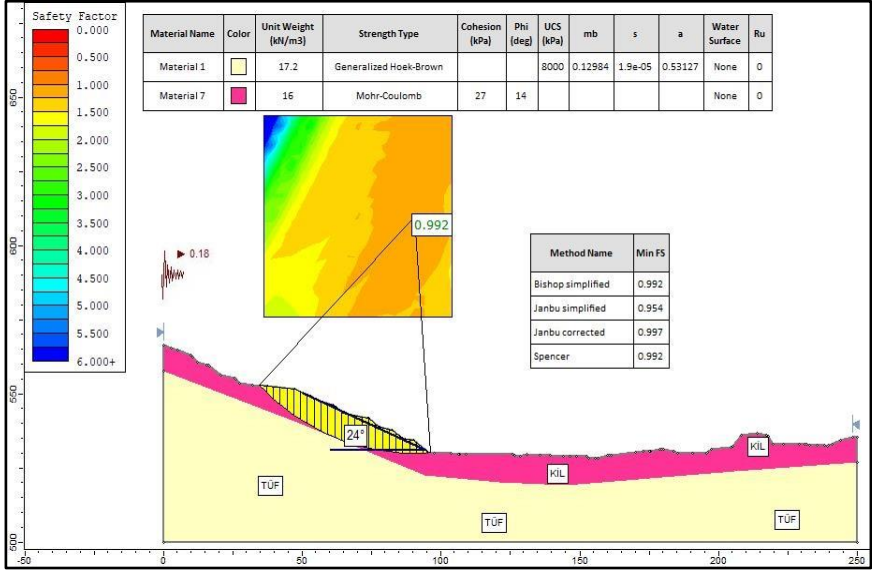
Şekil 11. Açık ocak işletme haritasında duraylılık analizi için belirlenen kesit hatlarının konumları



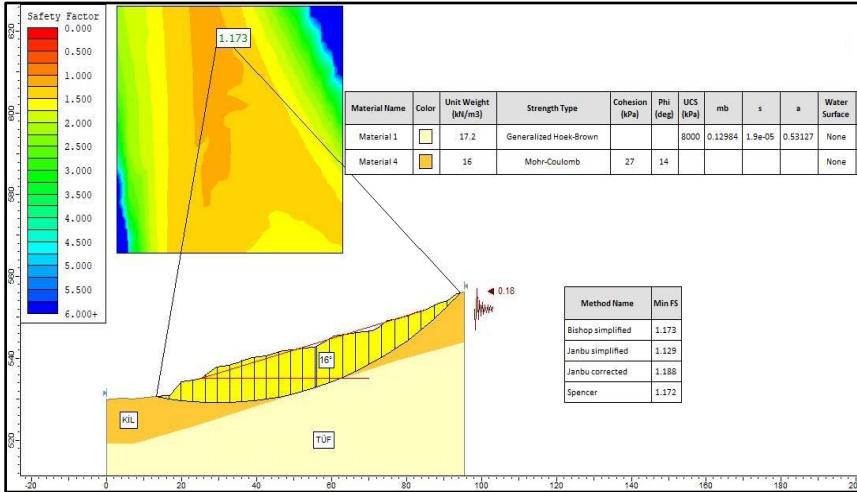
Şekil 12. A-A' kesit hattı duraylılığının limit denge analizleri ile değerlendirilmesi



Şekil 13. B-B' kesit hattı duraylılığının limit denge analizleri ile değerlendirilmesi



Şekil 14. A-A' kesit hattı duraylılığının sismik yük etkisinde limit denge analizleri ile değerlendirilmesi



Şekil 15. B-B' kesit hattı duraylılığının sismik yük etkisinde limit denge analizleri ile değerlendirilmesi

4.1. Duraylılık Analizlerinin Değerlendirilmesi

Açık ocak alanında belirlenen kesitlerde yapılan limit denge analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Basitleştirilmiş Bishop, Basitleştirilmiş Janbu, Düzeltilmiş Janbu ve Spencer yöntemlerine göre çözülmüş kesitler için güvenlik sayıları belirlenmiştir (Tablo 3). Buna göre Tablo 3'te verilen analiz sonuçları incelendiğinde; işletme durumu dikkate alındığında yapılan analizlerde A-A' ve B-B' kesitleri için Güvenlik Sayısı değerlerinin limit denge koşulu olan $G_s=1$ değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Buna göre her bir kesit hattı için yapılmış olan limit denge analizleri için incelenen açık ocak işletmesinde herhangi bir duraysızlık mevcut işletme koşullarında beklenmemektedir. Ancak aynı kesit hatları olası bir deprem anında oluşacak etkin yer ivmesi dikkate alınarak analiz edildiğinde B-B' kesit hattı duraylı çıkarken, A-A' kesit hattının farklı limit denge analiz metodlarında (Basitleştirilmiş Bishop $G_s:0.99$; Basitleştirilmiş Janbu $G_s: 0.95$; Düzeltilmiş Janbu $G_s: 1$; Spencer $G_s: 0.99$) duraysız olduğu belirlenmiştir. Bu durum sahada yapılan incelemelerde açık ocak işletmesindeki bazı palyelerde gözlenen kaymalarla da doğrulanmıştır (Şekil 16).

Tablo 3. Limit denge analiz yöntemleri ile belirlenen G_s değerleri

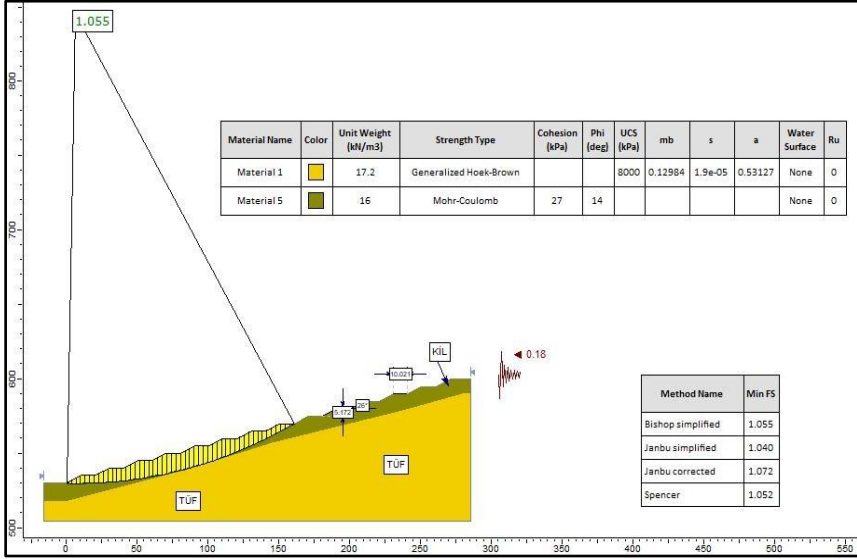
İnceleme Alanı	Limit Denge Analizi	Açık Ocak İşletmesine Ait Güvenlik Sayıları (G_s)		Durum
	Metod	İşletme Durumu	Sismik Yük Etkisinde	
A-A' KESİTİ	Basitleştirilmiş Bishop	1.50	0.99	Duraysız
	Basitleştirilmiş Janbu	1.43	0.95	Duraysız
	Düzeltilmiş Janbu	1.51	1.00	Limit Denge
	Spencer	1.50	0.99	Duraysız
B-B' KESİTİ	Basitleştirilmiş Bishop	1.98	1.17	Duraylı
	Basitleştirilmiş Janbu	1.91	1.13	Duraylı
	Düzeltilmiş Janbu	2.00	1.19	Duraylı
	Spencer	1.98	1.17	Duraylı



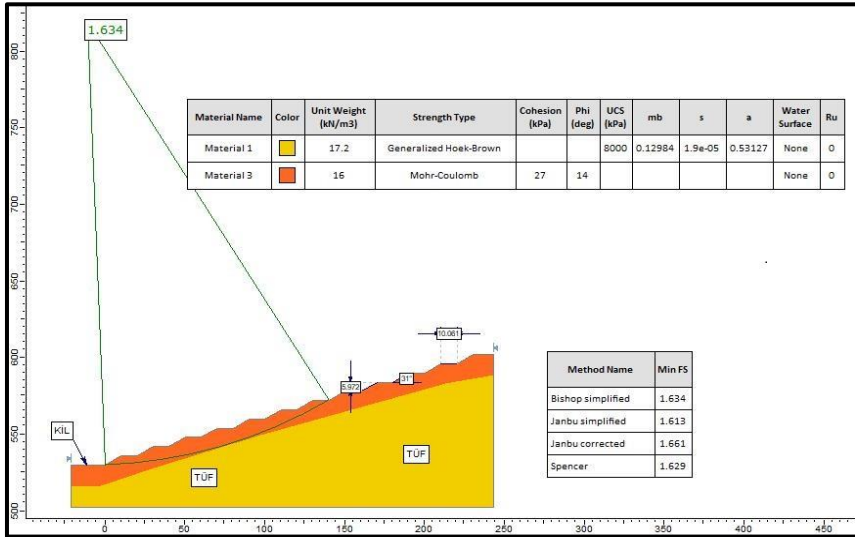
Şekil 16. Açık ocak alanındaki bazı palyelerde meydana gelen duraysızlıkların görünümü

4.2. Şevlerde Oluşan Duraysızlıkları Önlemek İçin Yeni Tasarı Modellerinin Geliştirilmesi

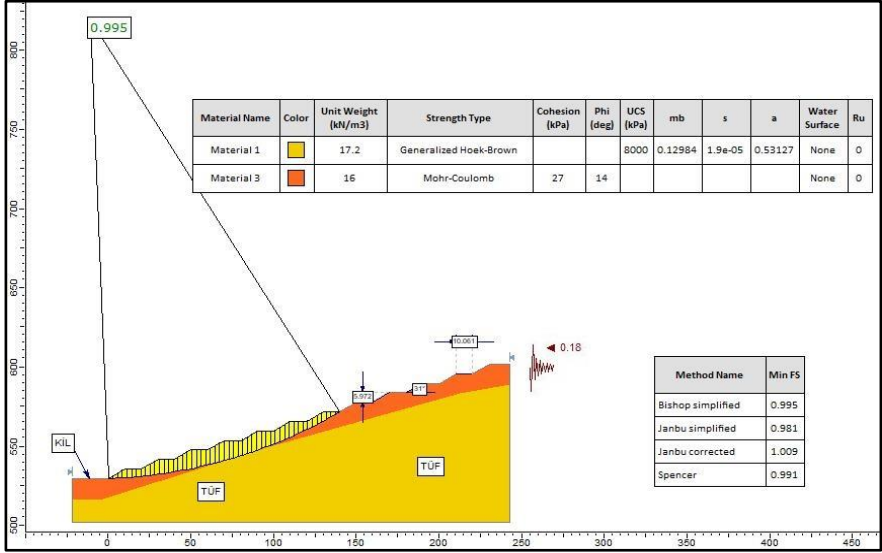
Çalışma alanındaki açık ocak işletmesinde şevlerin duraylılığı farklı analiz metotları ile değerlendirilmiş ve A-A' kesit hattı güzergahı sismik yük etkisinde duraysız çıkmıştır. İnceleme alanında duraysızlığa sebep olan genel şev açısının ise 24° olduğu belirlenmiştir. İnceleme alanında ölçülen maksimum topoğrafik kotlar dikkate alınarak (yaklaşık 600m) ve inceleme sahasının zemin özelliklerine göre en uygun şev geometrisi Limit Denge Analizleri ile (Basitleştirilmiş Bishop, Basitleştirilmiş Janbu, Düzeltilmiş Janbu ve Spencer) işletme durumu ve sismik yük etkisi altındaki durumları değerlendirilmiştir (Şekil 17, 18, 19, 20). Buna göre farklı yükseklik ve palye açılarında birçok analiz yapılarak iki farklı şev geometrisi için değerlendirme yapılmış ve duraylı olabilecek en



Şekil 18. Tasarı kesiti Model 1 için işletme durumunda (Sismik yük etkisinde) limit denge analizleri



Şekil 19. Tasarı kesiti Model 2 için işletme durumunda limit denge analizleri



Şekil 20. Tasarı kesiti Model 2 için işletme durumunda (Sismik yük etkisinde) limit denge analizleri

Tablo 4. Tasarı şevleri için Limit denge analiz yöntemleri ile belirlenen Gs değerleri ve geometrileri

TASARIM MODELİ	ŞEV GEOMETRİSİ	Limit Açık Ocak			Durum
		Metod	İşletme	Sismik	
Model 1	Şev Yüksekliği:	B.	1.86	1.06	Duraylı
	Palye Yüksekliği:	B.	1.84	1.04	Duraylı
	Palye Genişliği:	D.	1.89	1.07	Duraylı
	Palye Açısı: 26°	Spencer	1.86	1.05	Duraylı
Model 2	Şev Yüksekliği:	B.	1.63	0.99	Duraysız
	Palye Yüksekliği:	B.	1.61	0.98	Duraysız
	Palye Genişliği:	D.	1.66	1.00	Limit Denge
	Palye Açısı: 31°	Spencer	1.63	0.99	Duraysız

5. Sonuçlar

Bu alışmada; Ordu ili, Ünye İlçesi, Nadirli Mahallesi civarındaki, bentonit açık ocak işletmesi şevlerinin duraylılığı ve yeni şev tasarımının işletme durumu ve sismik yük etkisindeki duraylılığı dört farklı limit denge analiz metodu ile değerlendirilmiştir. Buna göre, açık ocak işletmesinde belirlenen 2 farklı kesit hattı 4 farklı limit denge analiz metodu ile işletme durumu ve sismik yük etkisinde duraylılık analizleri değerlendirildiğinde, Basitleştirilmiş Bishop, Basitleştirilmiş Janbu, Düzeltilmiş Janbu ve Spencer yöntemlerine göre güvenlik sayıları belirlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, B-B' kesit hattı için yapılan analizler duraylı çıkarken (16° genel şev açısı), A-A' kesit hattının (24° genel şev açısı) farklı limit denge analiz metodlarında (Basitleştirilmiş Bishop Gs:0.99; Basitleştirilmiş Janbu Gs: 0.95; Düzeltilmiş Janbu Gs: 1; Spencer Gs: 0.99) duraysız olduğu belirlenmiştir. Bu duraysızlığı ortadan kaldırmak için, Tablo 4'te verilen **Model 1** için önerilen tasarı geometrisi uygulanması durumunda, $G_s > 1$ olduğu için bu tasarı modelinde yapılacak açık ocak işletmesinde herhangi bir duraysızlık beklenmemektedir.

Kaynaklar

Abramson LW, Lee TS, Sharma S, Boyce GM (2001) Slope stability and stabilization methods, 2nd edn. Wiley, New York, p 736.

Akbulut, A. (1996). *Bentonit*. Ankara: MTA.

Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., Bulut F., 2013. Yamaç molozlarının duraylılık analizlerinde limit denge yönteminin kullanılması: Kalebaşı Mahallesi (Gümüşhane) örneği. Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi, 30 (2) 49-62.

Alemdağ, S., Akgün, A., Kaya, A., Gökçeoğlu, C., 2014. A large and rapid planar failure: causes, mechanism and consequences (Mordut, Gumushane, Turkey), Arabian Journal of Geosciences, 7 (3), 1205-1221.

Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., Bulut, F. 2015a. Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi District (NE Turkey). Journal of African Earth Sciences, 106, 134–146.

Alemdağ, S., 2015. Assessment of Bearing Capacity and Permeability of Foundation Rocks at the Gumustas Waste Dam Site, (NE Turkey) Using Empirical and Numerical Analysis. Arabian Journal of Geosciences, 8, 1099–1110.

Alemdağ, S., Gürocak, Z., Özkirişçi Oktay, C., 2015b. Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) Karayolundaki Kaya Şevlerinin Kinematik ve Limit Denge Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. Artvin Çoruh Üniversitesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 1, (1-2), 1-10.

Alemdağ, S., Bostancı, H.T., Gürocak, Z., Gökçeoğlu, C. 2016. Yamaç Duraysızlığı Haritalarının Oluşturulmasında Coğrafi Bilgi Sistemleri Ve Bulanık Anlamlandırma Sistemlerinin Kullanımı. Ulusal Heyelan Sempozyumu 27-29 Nisan Ankara, Bildiriler Kitabı, 279-297.

Altun, İ. E., (2011). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Rapor No:151, Ankara.

ASTM, 1990. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Condition, Annual Book of ASTM Standards, ASTM D3080, Philadelphia, A.B.D.

Ayan, Z., 1991, Şebinkarahisar (Giresun) kuzeybatısındaki Pb-Zn-Cu cevherleşmesinin mineralojik jeokimyasal incelenmesi ve kökensel yorumu. Doktora Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 186s., İzmir.

Ayan, Z. ve Dora, Ö., 1993, Şebinkarahisar (Giresun) kuzeybatısında yer alan granitoid sokulumu ve yöredeki Pb-Zn cevherleşmesi ile olan ilgisi. TJK Bült., 8, 160-168.

Bishop AW (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5:7–17.

Bishop AW, Morgenstern N (1960) Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique* 10(4):129–150.

Chau KT & Wong RHC. 1996. Uniaxial compressive strength and point load strength. *Int J Rock Mech Min Sci* v: 33, 183–8 [Technical note].

Çağatay, M.N., 1977, Development of geochemical exploration techniques for massive sulphide ore deposits, eastern Black Sea region, Turkey; Unpub. Ph. D. Thesis, Univ. London, 364 p.

Çağatay, M.N., 1993, Hydrothermal alteration associated with volcanogenic massive sulfide deposits: Examples from Turkey. *Econ. Geol.* 88, 606-621.

Davis, W. (1940). *Bentonit Özellikleri, İşletilmesi Hazırlanması ve Kullanılması*. Washington: MTA Derleme-2392.

Demir, G., AYTEKİN, M., ÇAKIR, T., İKİZLER, S. B. (2006) Rize-Pazar'da Bir Stabilize Analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 7-8 Eylül, 2006, Trabzon.*

Duncan J (1996) State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 122(7):578–584.

Duncan JM, Wright SG (2005) Soil strength and slope stability. Wiley, New York, p 297

Griffiths DV, Lane PA (1999) Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique* 49(3):387–403.

Gurocak, Z., Alemdag, S., Zaman, M., 2008. Rock Slope Stability and Excavatability Assessment of Rocks at the Kapıkaya Dam Site, Eastern Turkey, *Engineering Geology*, 96, 1-2, 17-27.

Hughes R (1987) The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Hammah RE, Yacoub TE, Curran JH (2006) Investigating the performance of the shear strength reduction (SSR) method on the analysis of reinforced slopes. In: Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver.

Karakaya, N., Karakaya, M., Faure, K. (2007) Doğu Karadeniz Bölgesi Kil Mineralleşmelerinin Oluşumu ve Kökeni. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1-2), 1-13.

Kaya A, Akgün A, Karaman K, Bulut F (2015) Understanding the mechanism of a slope failure on nearby a highway tunnel route by different slope stability analysis methods: a case from NE Turkey. *Bull Eng Geol Environ*. doi:10.1007/s10064-015-0770-5

Kaya, A., Alemdag, S., Dag, S., and Gurocak, Z., 2016. Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (1), 89-99.

Kaya, Y., Şişman, A. E. (2021) Karayolu Şevlerinin Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri Kullanılarak Stabilitate

Analizi. 5. *Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu, 9-11 Temmuz 2021, Zonguldak.*

Ketin, İ., 1966, Anadolu'nun tektonik birlikleri: MTA Bülteni, 66, 20-34.

Kılınç, T., Cebeci, Y., Çelik, M. S. (2022) Soda ve MgO ile Aktive Edilmiş Kalecik Bentonit Örneğinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(4)*, 1115-1120.

Kim J, Salgado R, Yu H (1999) Limit analysis of soil slopes subjected to pore-water pressures. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 125(1):49–58.

Kim J, Salgado R, Lee J (2002) Stability analysis of complex soil slopes using limit analysis. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 128(7):546–557.

Li X (2007) Finite element analysis of slope stability using a nonlinear failure criterion. *Comput Geotech* 34:127–136.

Marinos. P, and Hoek, E. 2001. – Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Accepted for publication in the Bulletin of the International Association of Engineering Geologists.

Morgenstern R, Price V (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15(1):79–93.

MTA. (1989). *Bentonit Mevcut Durum, Zuhurlar ve Yataklar Potansiyel Bölgeler*. Ankara: MTA.

Novoviç, T., 1979, Contribution to the knowledge of main types of mineralizations in copper, zinc and lead deposits in Black Sea region, Turkey. *Geocome-I*, 16-29.

Rocscience, 2018. Slide v8.0, 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.

Strang G, Fix J (1973) An analysis of the finite element method. Prentice-Hall, Englewood Cliffs

Sarma S.K. (1973) Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique* 23(3):423–433.

Şatır, E. (2022) Ünye-Fatsa Arasının (Ordu) Karst Jeomorfolojisi (Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.

Terlemez, İ. Ve Yılmaz, A. (1980). Ünye – Ordu – Koyulhisar – Reşadiye arasında kalan yörenin stratigrafisi. Türkiye jeoloji kurumu bülteni, 23/2, Ankara.

Tokel, S., 1972, Stratigraphical and volcanic history of Gümüşhane region, NE Turkey: Ph. D. Thesis, Colage Univ., London.

Tokel, S., 1973, Doğu Pontidlerin Mesozoyik ve Tersiyer'deki gelişmesi ve bu gelişmenin Kuzey Anadolu Zonu ile muhtemel ilişkileri: Cumhuriyetin 50. Yılı Yer Bilimleri Kongresi, Tebligler, 1-5.

Tokel, S., 1977, Doğu Karadeniz Bölgesinde Eosen yaşlı kalkalkalin andezitler ve jeotektonizma. *TJK Bült.*, 20: 49-54.

Yu H, Salgado R, Sloan W, Kim J (1998) Limit analysis versus equilibrium for slope stability. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE* 124(1):1–11.

Yücel, M. B., Gül, Ö. (2018) Dünyada ve Türkiye'de Bentonit. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.*

URL-1, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2023, Kasım 11). Bentonit. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/bentonit>

BÖLÜM III

Jeokimyasal Verilerin Değerlendirilmesinde Petrograph Programının Kullanılması

Hüseyin SENDİR¹

Giriş

Ekonomik olarak değer taşıyan her türlü kayaç, mineral topluluğu ve element zenginleşmelerine "maden yatağı" denilmektedir. Bu anlamı ile maden yatağı tanımına metalik maden yatakları, endüstriyel hammaddeler, yakıtlar ve hatta su kaynakları dahil edilmektedir. Fakat petrol, doğalgaz, bitümlü şeyl, kömür gibi yakıtlarla su kaynakları gerek oluşum gerekse kullanım alanları bakımından ayrı gruplar oluşturduğundan, maden yatağı terimi esas olarak metalik madenleri ve endüstriyel hammaddeleri kapsamaktadır. Bunlardan endüstriyel hammaddeler; metal olmayan hammaddeler ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır ve ocaktan

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Orcid:0000-0001-7252-7117

çıkarıldığı gibi veya çok az bir ön işleme tabi tutularak kullanılan (kum, kil, mermer vb.) malzemeleri kapsamaktadır. Metalik madenler ise metalik bağ kurabilen ve metal olarak tanımlanan elementlerce oluşturulan yatakları kapsamaktadır (Temur, 2001). Madencilik sektöründe metaller genellikle beş gruba ayrılarak ele alınırlar. Bunlar; altın, gümüş ve platin grubu elementleri temsil eden değerli metaller; bakır, kurşun, çinko, kalay ve alüminyum temsil eden demir dışı metaller; demir, mangan, nikel, krom, molibden, wolfram, vanadyum ve kobaltı temsil eden demir ve demir alaşımlı metaller; antimuan, arsenik, berilyum, bizmut, kadmiyum, magnezyum, civa, selenyum, tantal, titan ve zirkonu temsil eden tali metaller ile uranyum, toryum ve radyum grubunun oluşturduğu radyoaktif (parçalanabilir) metallerdir (Kırkoğlu, 1992: Temur'dan, 2001).

Maden yatakları çalışmalarında jeokimyasal verilerin değerlendirilip yorumlanması çok önemlidir ve yoğun olarak kullanılmaktadır. Jeokimyasal veriler sayesinde tektonik, petrografik yorumlar yapılabilmektedir. Bunların yapılabilmesi amacıyla son yıllarda geliştirilmiş programlar hem kullanımlarının kolaylığı hem de oldukça başarılı sonuçlar vermeleri açısından yaygınlaşmaktadır. Söz konusu bu programlardan biri de **Petrograph Programı**'dır. Program içerisinde magmatik ve ultramafik kayalarla ilgili bölümler bulunmaktadır.

Bilindiği üzere magmatik kayalar mantodan türeyen ve yer kabuğundan yukarı doğru çıkan magmanın basınç ve sıcaklığının azalması sonucu katılaşmasıyla oluşurlar. Katılaşma eğer derinlerde ve yavaş soğuma sonucu gelişmiş ise Plütonik Kayalar meydana gelir. Soğuma, magmanın yeryüzüne çıkması sonucu, hızlı bir şekilde gelişmişse Volkanik Kayalar oluşur (Boztuğ, 2001).

Magmatik kayaların bileşiminde başlıca yedi mineral grubu önem kazanmaktadır. Bunlar: feldspatlar, kuvars veya feldspatoidler, amfibol ve piroksenler, mika, olivin ve tali minerallerdir. Bu bileşenlerden kuvars, feldspatlar (plajiyoklaz ve alkali feldspatlar) ve mafik mineralleri oluşturan ana elementler Si,

Al, Ti, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K elementleridir. Bunlar majör oksit olarak adlandırılırlar ve SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O olarak ifade edilirler (Boztuğ, 2001).

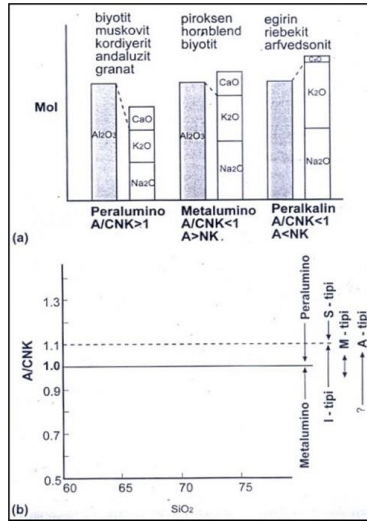
Kayaç oluşturan mineraller, ana ve tali (aksesuar) mineraller olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Ana mineraller kayacı karakterize eder ve kayacın tanımlanmasında, mineralojik olarak sınıflandırılmasında esas teşkil ederler. Örneğin kuvars, ortoklaz, plajiyoklaz, biyotit granitin ana minerallerini teşkil eder. Tali mineraller ise çok az miktarlarda ve yaygın olarak bulunurlar ve kayaçların isimlendirilmesinde önemli bir rol oynamazlar. Örneğin apatit, zirkon ve değişik opak mineraller genellikle kayaçlarda çok az miktarlarda bulunur (Boztuğ, 2001).

Koyu renkli minerallerin kayaçtaki miktarları ve kayacın genel rengine göre kayaçlar; lökrat (açık renkli), mezokrat ve melanokrat (koyu renkli) kayaçlar şeklinde isimlendirilirler. Bu nedenle, granitoidlerin ana element jeokimyası verileri, mineralojik bileşimleriyle birlikte değerlendirilerek başlıca magmanın kökeninin değerlendirilmesinde kullanılmakla birlikte silis içeriğine göre değişiminin incelendiği Harker Diyagramları yardımıyla magmatik farklılaşma yöneliminin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Kayacı oluşturan diğer bileşenler ise eser elementlerdir. Bunlar da minör oksitler olarak ifade edilirler ve MnO , TiO_2 , P_2O_5 gibi oksitlerdir. Jeokimyasal çalışmalarda magmalar başlıca S-I-M-A tipi magmalar, alkalin ve subalkalin (yarı alkalin) magmalar, peralümino, metalümino ve peralkalin karakterli magmalar olarak tanımlanabilmektedir. Boztuğ (1986, 1989) tarafından oldukça ayrıntılı olarak verilen bu tanımların ayrıntıları kabaca şu şekildedir:

S-I-M-A Tipi Granitoidler

İlk kez Avustralyalı yer bilimciler Chappel ve White (1974: S- ve I-tipleri); White (1979; M-tipi) ve Loiselle ve Wones (1979; A-tipi) tarafından tanımlanan bu sınıflama hakkında daha ayrıntılı bilgi White ve Chappel (1977), Collins ve diğ. (1982), Pitcher (1982), Clemens ve diğ. (1986), Chappel ve Stephens (1988), White

ve Chappel (1988), Craeser ve diğ. (1991), Clarke (1992), Pitcher (1993), Chappel (1996) da bulunabilir. Temel prensip olarak ana element jeokimyası verilerinden molar $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ oranı ile mafik mineral topluluğuna dayandırılan bu sınıflama Şekil 1'de verilmiştir. S- tipi granitoidlerin mafik mineral toplulukları peralümino karakterli biyotit, muskovit, kordiyerit, andaluzit ve granat; I-tipindekilerin metalümino karakterli piroksen, hornblend ve biyotit; M-tipinde olanların piroksen ve hornblend ve A-tipinde olanların ise tamamen peralkalin karakterli egirin, ribkit ve arfvedsonit türü minerallerden oluştuğu ileri sürülmektedir (Boztuğ, 2001).

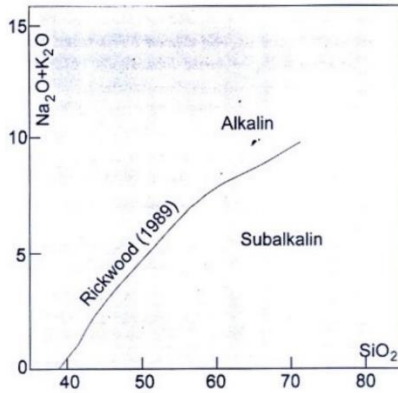


Şekil 1. Granitoidlerin kayaç oluşturu ana minerallerinin bünyelerinde bulunan çeşitli ana element içeriklerinden elde edilen petrokimyasal parametrelere göre yapılan mineralojik-kimyasal sınıflandırılması (Clarke, 1992).

Alkali ve Subalkali Granitoidler

Tüm kayaç ana element verilerinden toplam alkalilerin ($Na_2O + K_2O$) silis içeriğine (SiO_2) göre değişimine dayanan diyagramda MacDonal ve Katsura (1964), Kuno (1966), MacDonal (1968) ve

Irvine ve Baragar (1971) tarafından tanımlanan ayırım çizgisi yardımıyla birbirlerinden ayrılan alkali ve subalkali magmaların ayırımı; son yıllarda, Rickwood (1989) tarafından önerilen ve Irvine ve Baragar (1971) in verilerinin bilgisayar yardımıyla değerlendirilmesine dayanan ayırım çizgisine göre gerçekleştirilmektedir (Şekil 2) (Boztuğ, 2001). Bunlardan subalkalin bölgeye düşenler ise, magmanın gösterdiği kristalleşme trendine/tarihçesine göre, AFM üçgen diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971) yardımıyla başlıca kalkalkali ve toleyitik olmak üzere iki alt bölüme ayrılmaktadır. Bilindiği gibi, kalkalkalin kristalleşme trendinde, Fe elementinin büyük bir kısmı, kristalleşmenin henüz başlangıcında Fe-Ti oksitleri oluşturarak magmadan ayrılırken; toleyitik kristalleşme trendinde ise bu durum gerçekleşmemekte ancak Fe elementi daha çok kristalleşmenin başlangıcında oluşan silikatlı minerallerin bünyesine girerek magmadan ayrılmaktadır (Boztuğ, 2001).



Şekil 2. Toplam alkalilerin silise göre değişim diyagramında (TAS) Irvine ve Baragar (1971) tarafından tanımlanan alkalin-subalkalin ayırım çizgisinin, Rickwood (1989) tarafından önerilen şeklinin görünümü. TAS diyagramındaki bu ayırım çizgisinin elde edilmesinde kullanılan referans noktalar şöyledir (birinci değerler SiO_2 ve ikinci değerler ise $Na_2O + K_2O$ içeriğini gösterir): (39.0-0.0), (43.28-2.0), (45.47-3.0), (48.18-4.0), (51.02-5.0), (53.72-6.0), (56.58- 7.0), (60.47-8.0), (66.83-9.0), (77.15-10.0).

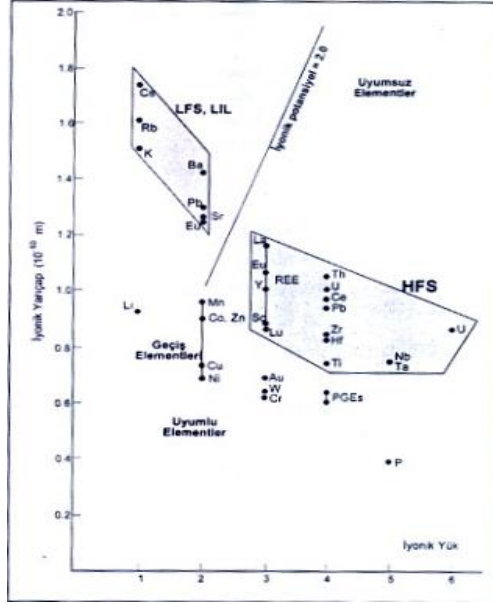
Peralümino, Metalümino ve Peralkalin Granitoidler

Bu tanımlama Şekil 1’de görüldüğü gibi tamamen mafik mineral kimyasına dayalı bir sınıflamadır. Örneğin peralümino olarak tanımlanan biyotit, muskovit, kordiyerit, andaluzit ve granat gibi minerallerde Al_2O_3 molar içeriği, $Na_2O + K_2O + CaO$ molar toplamından büyüktür. Metalümino olarak tanımlanan piroksen, hornblend ve bazı biyotitlerde ise Al_2O_3 molar içeriği, $Na_2O + K_2O$ molar toplamından büyük ancak, $Na_2O + K_2O + CaO$ molar toplamından ise küçüktür. Diğer taraftan, peralkalin olarak tanımlanan egirin, ribekit ve arfvedsonit minerallerinde ise sadece $Na_2O + K_2O$ molar içeriği dahi Al_2O_3 molar içeriğinden büyüktür (Şekil 1). Böylece, bünyesinde bu tür mafik mineralleri bulduran granitoidler de doğal olarak bu isimlerle tanımlanmaktadır (Boztuğ, 2001).

Granitoidlerin Eser Element Karakteristikleri

Tıpkı ana element jeokimyası verilerinde olduğu gibi, herhangi bir kayacın eser element ve hatta nadir toprak elementleri (REE) içerikleri de yine bu kayaçların mineralojik birleşimlerinin bir yansıması olarak ortaya çıkacaktır. Ancak, ana elementler, kayaç oluşturuca bileşenlerden kuvars, feldspat ve mafik mineraller gibi ana bileşenlerin bünyesinde yer alırken; eser elementler ise çoğunlukla aksesuar mineral olarak bulunan apatit, titanit, zirkon, monazit, allanit, rutil, vb. minerallerin bünyesinde yer almaktadır (Mason ve Moore, 1982; Wilson, 1989; Lipin ve McKay, 1989). Diğer taraftan, eser element olarak tanımlanmakla birlikte daha çok feldspat ile biyotit ve hornblend gibi mafik minerallerin bünyesinde yer alan bazı elementlerde (örneğin Rb, Ba ve Sr) bilinmektedir. Bu nedenle, granitoidlerin eser element jeokimyası karakteristikleri de yine mineralojik bileşimleri ile ilişkili olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir. Granitoidlerin eser element içerikleri başlıca Rb, Sr ve Ba gibi büyük iyon yarıçaplı litofil elementleri (Large Ion Lithophile Element; LILE), Nb, Zr, Y, Th, Hf, Ta ve REE gibi kalıcılığı yüksek elementleri (High-Field Strength Elements; HFSE)

ve Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu ve Zn gibi geçiş metallerini (Transition Metals, TM) kapsamındadır (Şekil 3) (Boztuğ, 2001).



Şekil 3. Granitoidlerin eser element jeokimyası verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan uyumsuz, büyük iyon çaplı litofil elementler (LILE) veya kalıcılığı düşük elementler (LFSE), kalıcılığı yüksek elementler (HFSE), geçiş metalleri (TM) gibi tanımlamaların kaynağını oluşturan iyonik yarıçap-elektriksel yük diyagramındaki konumları (Rollinson, 1993).

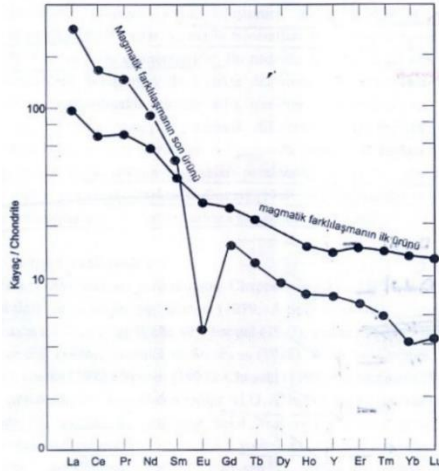
Diğer taraftan, bunlardan nadir toprak elementlerinin (REE), jenetik önemleri nedeniyle ayrı bir başlık halinde incelenmesi yararlı görülmektedir. Granitoidlerin yukarıda belirtilen LIL, HFS ve TM element içerikleri genel olarak çeşitli referans bileşimlerine göre normalize edilerek örümcek diyagramları yardımıyla incelenmektedir. Örneğin bu referanslar başlıca, kondritler, okyanus ortası sırtı graniti (ORG), okyanus ortası sırtı bazaltı (MORB), ilksel primitif manto (PRIM), kıtasal kabuk veya manto gibi değişik kaynaklar olabilmektedir (Rollinson, 1993).

Nadir Toprak Elementleri (REE)

Kendi arasında hafif nadir toprak elementleri (LREE) ve ağır nadir toprak elementleri (HREE) olarak da ayrılabilir bu elementlerden özellikle LREE karakterinde olanlar, tıpkı HFS elementleri gibi, granitik kayalarda ana minerallerden ziyade aksesuar minerallerin bünyelerinde bulunmalarından dolayı ve bu minerallerinde bu elementler bakımından ancak belirli bir doygunluğa eriştikten sonra meydana gelmeleri nedeniyle, eş yaşlı magmatik ayrımlanma ürünlerinden son ürünlerde daha bol, ilk ürünlerde ise daha az miktarlarda bulunurlar (Boztuğ, 2001).

Ancak, HREE karakterinde olanlar ise tıpkı Y elementinde olduğu gibi, granat ve amfibol minerallerinin bünyelerine ve diğer taraftan Eu elementi de başlıca Ca ve Sr elementleri ile birlik oluşturacak şekilde plajiyoklazların bünyesine girebilmektedir. Bu nedenle, eş kökenli ve magmatik ayrımlanma yoluyla meydana gelmiş granitik kayalardan ilk önce oluşanlar, bağıl olarak LREE bakımından fakir ancak (özellikle amfibol ve piroksen gibi mafik mineral fraksiyonlanmasından dolayı) HREE bakımından zengin; buna karşılık sonra oluşanlar ise bunun tam tersi bir bileşim sergileyecektir. Aynı şekilde, ilk oluşan kayalarda Eu içeriği daha fazla, sonra oluşanlarda ise daha az olacaktır (Boztuğ, 2001).

Sonuç olarak, eş magmatik kökenli ve magmatik ayrımlanma yoluyla meydana gelen granitik bileşimli kayaların kondrite göre normalleştirilmiş dağılım desenlerine bakıldığında, ilk evrelerde oluşan kayaların LREE içerikleri bağıl olarak daha az, HREE içerikleri ile Eu içerikleri ise bağıl olarak daha fazla olduğundan, LREE'lerden HREE'lere doğru daha az belirgin bir fraksiyonlanma göze çarpacaktır (Şekil 4) (Boztuğ, 2001).



Şekil 4. Herhangi bir granitik magmanın farklılaşması sonucu ortaya çıkan eş magmatik kökenli iki kayaç biriminin REE içerikleri kayaç/chondrite örümcek diyagramındaki dağılımlarının şematik görünümü.


Diğer taraftan, son evrelerde oluşan kayaçlarda ise bağıl olarak LREE daha fazla ve HREE ile Eu içerikleri ise bağıl olarak daha az olduğundan, bunların kondrite göre normalleştirilmiş dağılım desenlerinde ise LREE'den HREE'lere doğru daha kuvvetli bir fraksiyonlanma ve daha belirgin bir negatif Eu anomalişi göze çarpacaktır (Şekil 4). Diğer taraftan, HREE fakirliğinin, ilksel magmanın oluşumu sırasında bu tür elementleri bünyesinde bol miktarda bulunduran minerallerin (örneğin granat) kısmi ergimeye uğrayan kaynak kayaçta hiç bulunmamasından veya bulunupta kısmi ergimeye uğramamasından (daha çok kalıntı katı fazda zenginleşmesinden dolayı) da kaynaklanabildiği göz önüne alınmalıdır (Boztuğ, 2001).

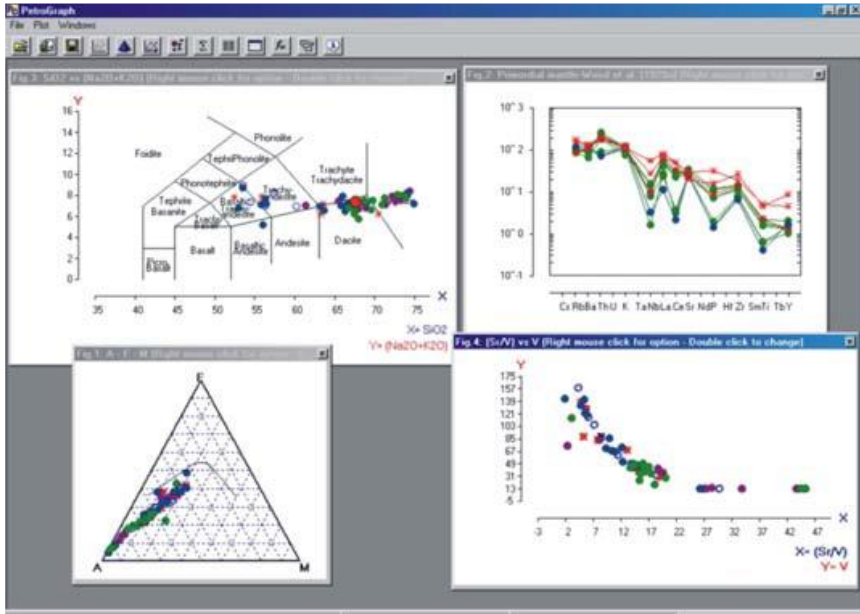
Yöntem

Araziden belirli metodolojik faktörlere göre toplanan örneklerin analizleri yapıldıktan sonra program içerisinde değerlendirilmektedir.


Petrograph Programı ve Verilerin Girişi

Petrografik verilerin görsel olarak ayrıntılı bir biçimde kullanıcıya sunmak için geliştirilmiş bir programdır ve özellikle jeokimyasal verileri modellemekte kullanılmaktadır. Kaynak kodu MS Visual Basic 6.0 ile yazılmış ve Windows 98/2000/XP/7 platformları altında çalışmaktadır. Petrografik verilerin genellikle petrolojik veri işlemede olduğu gibi diğer bir yazılıma gerek kalmadan tek bir programda büyük jeokimyasal veri setlerini yönetmek için fırsat olarak tanınmaktadır. Sonuçlar ve grafikler farklı formatlarda kaydedilebilir ya da başka değişiklikler için en yaygın grafik programları içinde kopyalanabilir ve yapıştırılabilir.

Petrograph yazılımı ana menüsü yazılımı bilgisayara yükledikten sonra çalıştırıldığında ve veriler girildiğinde karşımıza açılan pancere yazılımının görüntüsüdür (Şekil 5). Bir .peg dosyasını açmak için, "Dosya" menüsünden "Aç" seçilir ya da kontrol çubuğu  düğmesi tıklanır.





Şekil 5. Petrograph ana menüsü.


Bir .xls dosyasını açmak için seçeneklerden “Import Data” seçeneği tıklanır. “Dosya” menüsünden veya kontrol çubuğundaki  düğmesine tıklanır. Bir Excel çalışma sayfasını içe aktarmadan önce, verileri doğru düzenlenmiş olduğundan emin olunmalıdır.

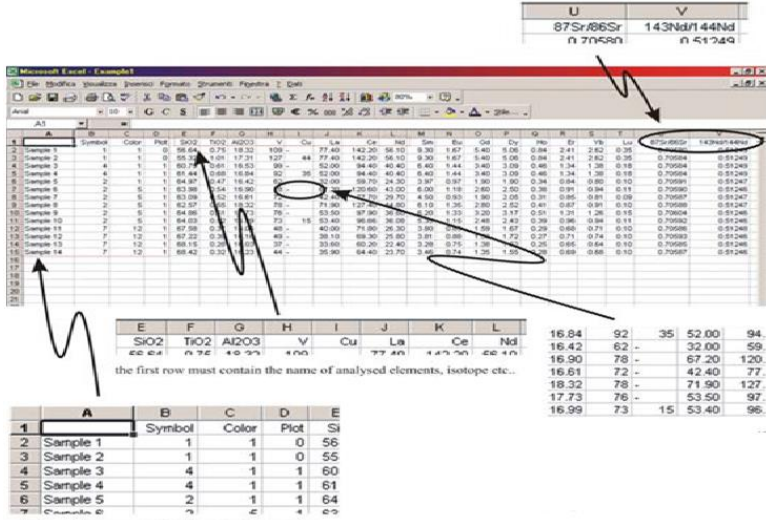
İlk sütun örnek adı içermelidir. 0 ile 20 arasında bir sayı, ikinci ve üçüncü sütunda yerleştirilmelidir. Bu rakamlar sırasıyla sembol ve örnek çizmek için kullanılan renge karşılık gelmektedir.

Dördüncü sütun numarası sıfır (0) veya bir (1) içermelidir; analizlerde bu rakam 0 olduğunda, bu diyagramlarda örnek görüntülenememektedir. İlk satır analiz unsurları, izotop vb., adını içermelidir. Bazı veriler mevcut değilse, sembol "-" kullanılmalıdır (Şekil 6).

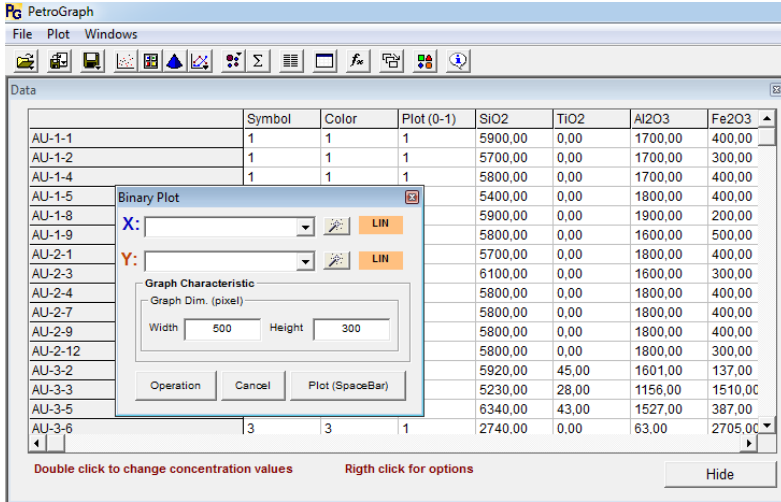
“Igpwin” arsa ve jeokimyasal verileri yönetmek için yaygın olarak kullanılan bir programdır. Bu program .ROC uzantısını kullanarak veri dosyalarını kaydeder. Bir .ROC dosyasını almak için “Dosya” menüsünden “Import” ve ardından “Igpwin (.ROC)” dosyası ya da kontrol çubuğundaki  düğmesine tıklanır.

Save seçeneği, verileri kaydetmek için kullanılmaktadır. Petrografik analizlerin .peg uzantısını kullanarak dosyaları kaydeder. Bir dosyayı kaydetmek için "Dosya" menüsünden "save" seçilir ya da kontrol çubuğundaki  düğmesi tıklanır.

Petrografik diyagramlar ikili, üçgen ve spider diyagramları şeklinde olabilmektedir. Açılan ekranda “New Binary Plot” seçeneği ya da  sembolü tıklanarak X ve Y koordinatlı bir grafik çizilebilir (Şekil 7).



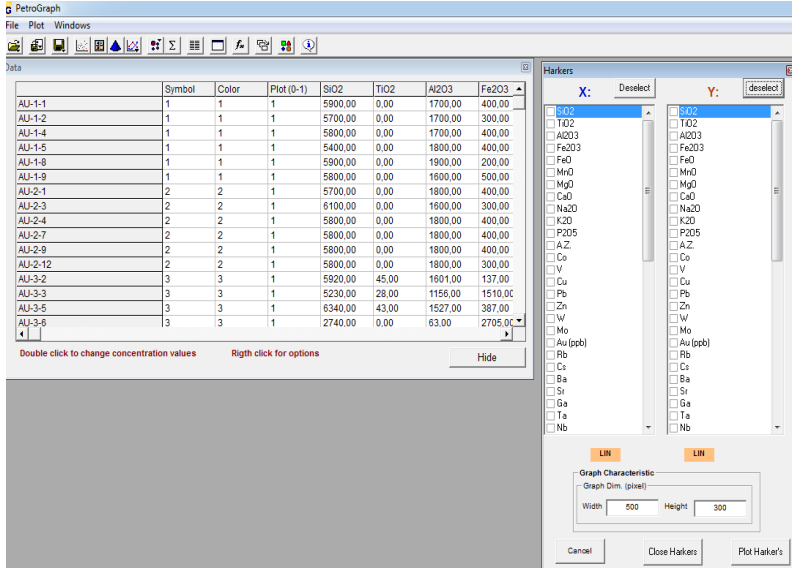
Şekil 6. Yazılıma verilerin girilmesi ve görüntülenmesi.



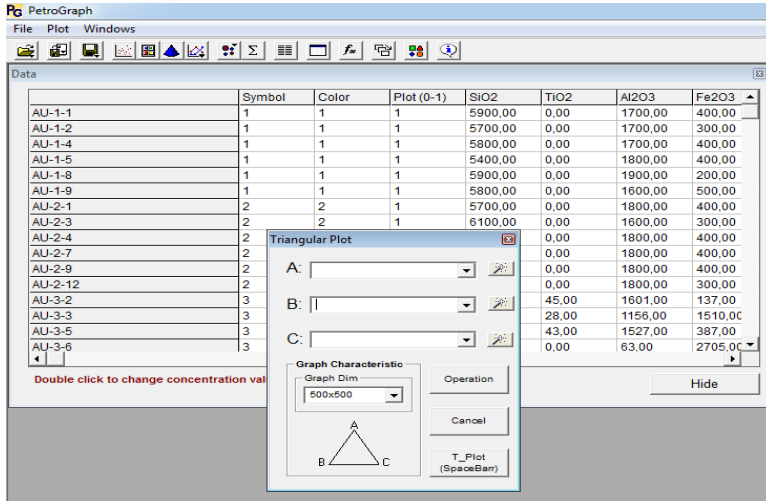
Şekil 7. "Binary Plot" Menüsi.

Harkers seçeneği X ve Y eksenlerine istenilen elementlerin diyagramlarını çizmeye yaramaktadır (Şekil 8).

“Triangular Plot” üçgen diyagram çizmek için kullanılmaktadır. A, B ve C köşelerine istenilen elementler girilerek grafik çizilmektedir (Şekil 9).

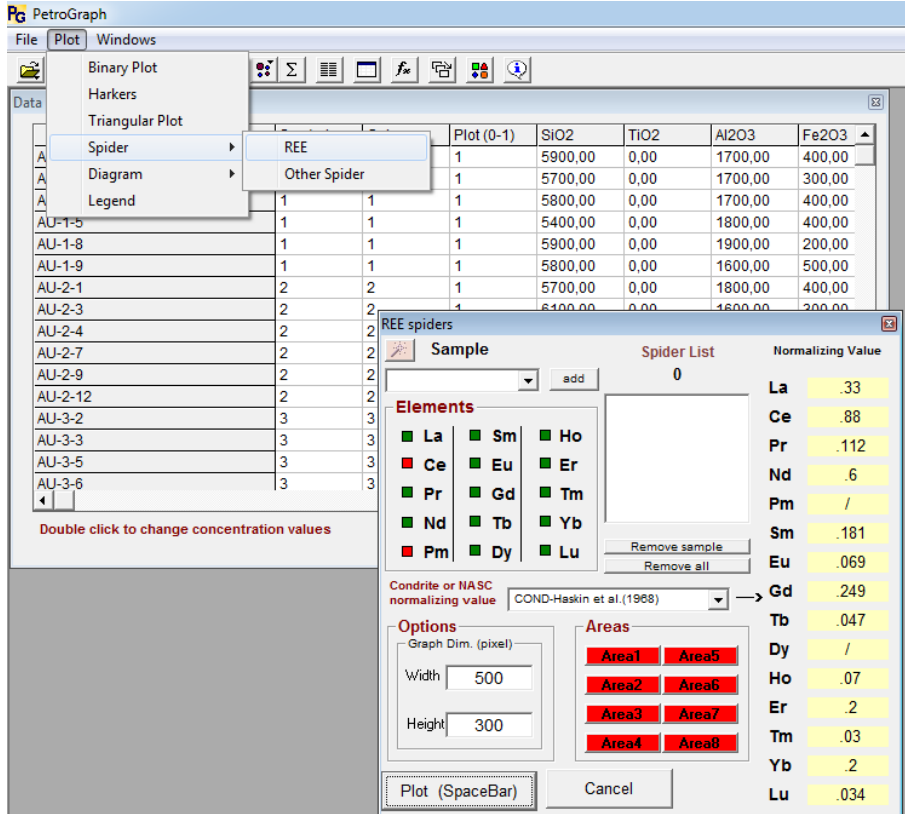


Şekil 8. “Harker” Menüü.

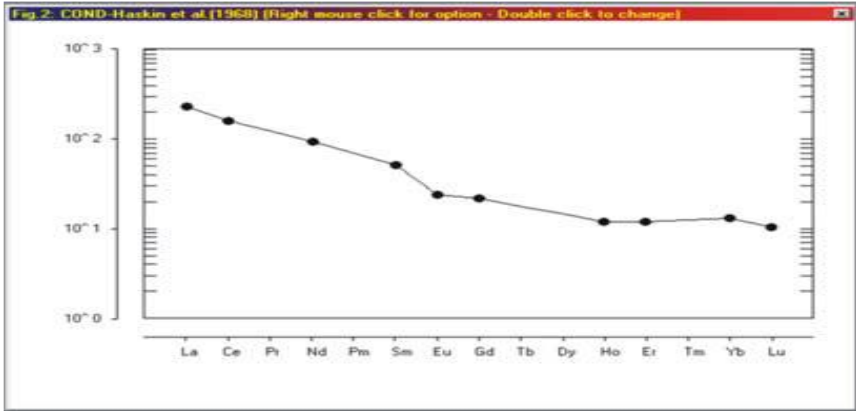


Şekil 9. “Triangular Plot” menüsü.

“REE Spiders” menüsü kullanılarak Nadir Torak Elementlerinin grafikleri çizilebilir (Şekil 10) (Şekil 11). Bu seçeneği kullanarak seçilen eş zamanlı 50 numune maksimum sayıda çizmek mümkündür. Değerler normalize edilebilmekte, standartlaştırılabilmektedir. Diyagramı oluşturmak için, "Plot (boşluk)" butonuna tıklanır.

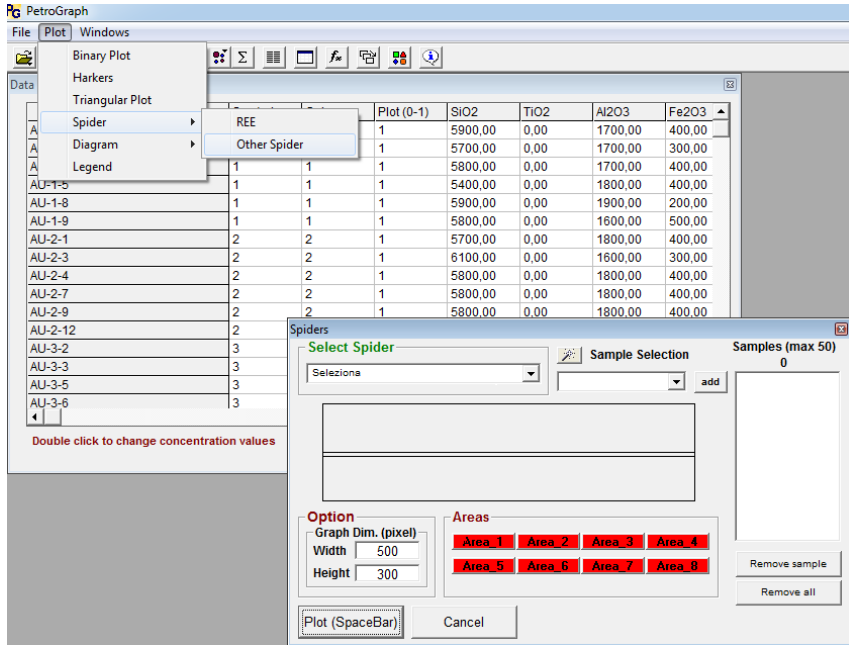


Şekil 10. “Spider” Menüsünden “REE” bölümüne geçiş.



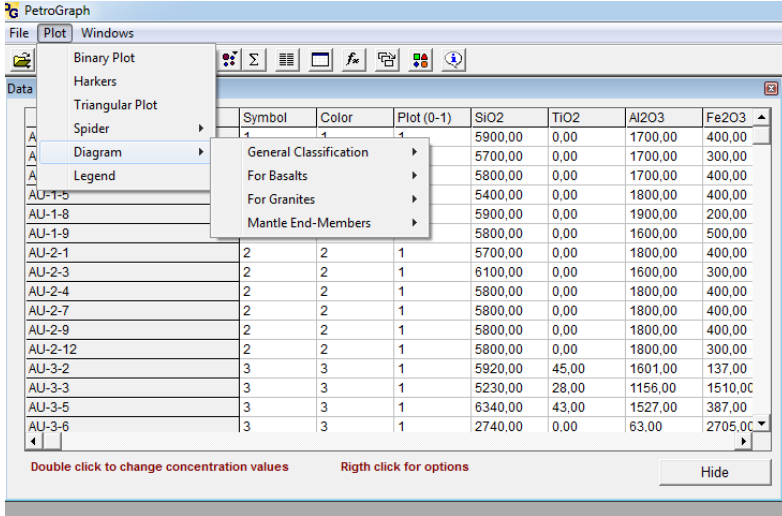
Şekil 11. “REE” Grafiği.

“Plot” menüsünden “Spider” seçeneği içinde olan “Other Spider” menüsü ile İksel Manto, Kondrit, MORB ve kabuk için çeşitli normalize diyagramlar çizilebilmektedir (Şekil 12).



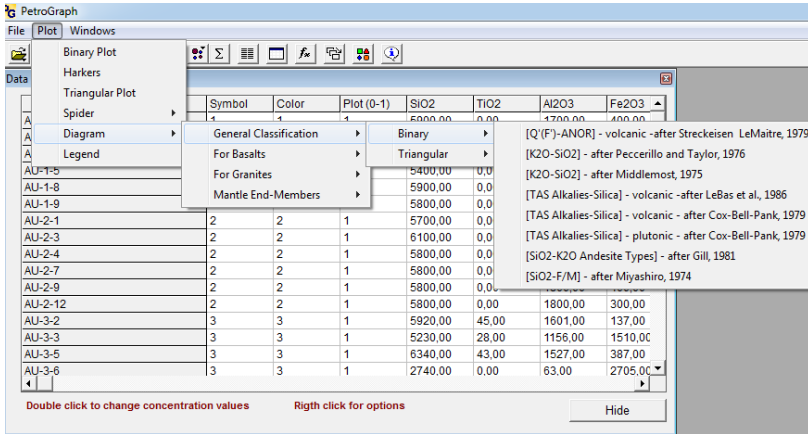
Şekil 12. “Spider” Menüsünden “Other Spider” bölümüne geçiş.

“Plot” menüsü içerisinde olan “Diagram” seçeneği farklı seçenekler sunmaktadır (Şekil 13).

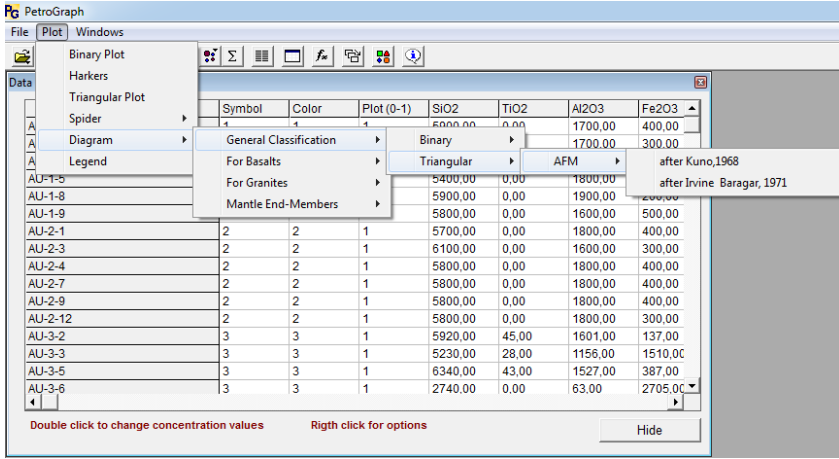


Şekil 13. “Diagram” Menüsü.

“General Classification”, Binary ve Triangular (İkili ve Üçlü) grafikler olmak üzere 2 farklı seçenek sunmaktadır (Şekil 14) (Şekil 15).



Şekil 14. “Diagram” Menüsünden “General Classification”’a geçiş.

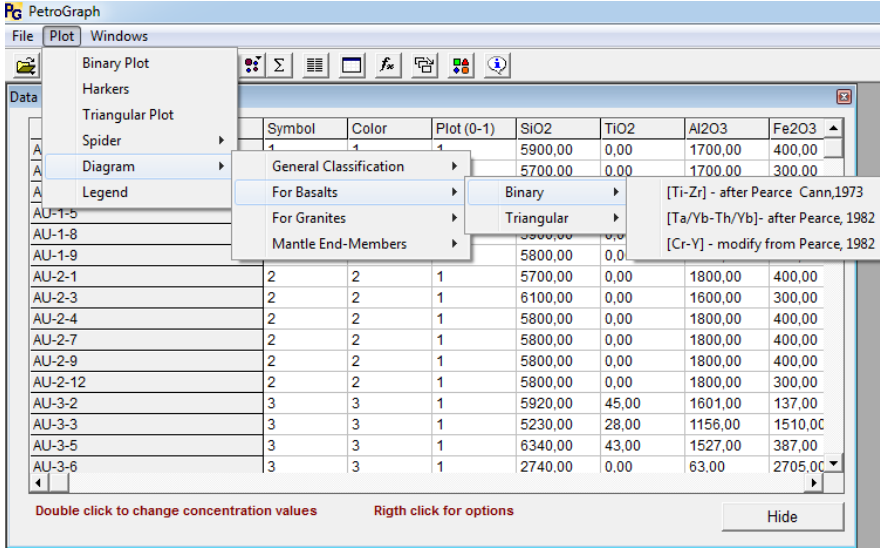


Şekil 15. Diagram Menüünden General Classification'a geçiş.

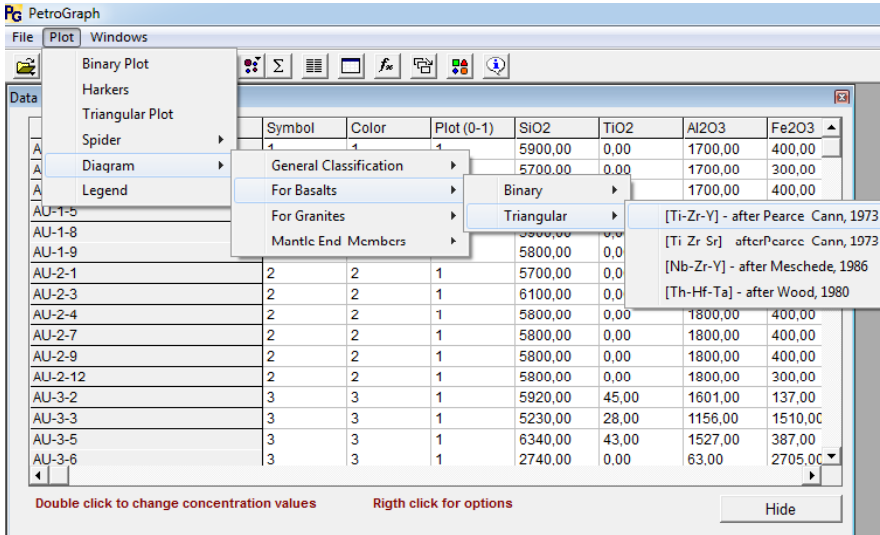
“For Basalts”, Bazaltlar için kullanılan diyagramlardır. Binary ve Triangular (İkili ve Üçlü) grafikler olmak üzere 2 farklı seçenek sunmaktadır (Şekil 16) (Şekil 17).

“For Granites”, Granitler için kullanılan diyagramlardır. Binary ve Triangular (İkili ve Üçlü) grafikler olmak üzere 2 farklı seçenek sunmaktadır (Şekil 18).

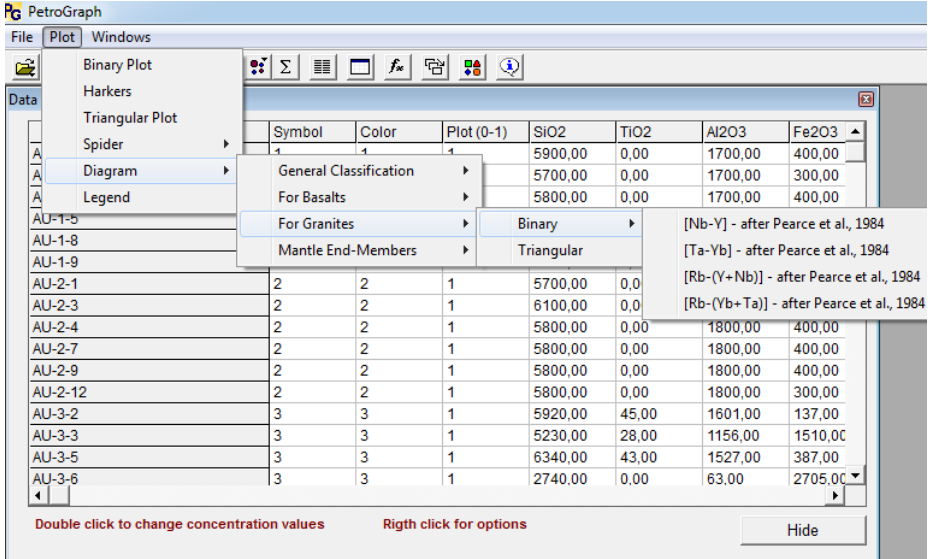
“Diagram” menüsünden “Mantle End-Members” menüsüne de geçilebilmektedir (Şekil 19).



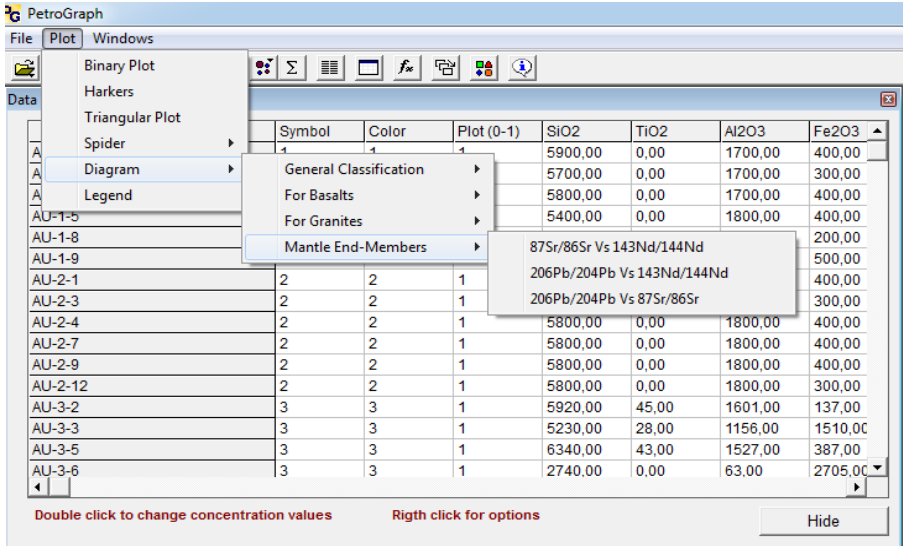
Şekil 16. “Diagram” Menüünden “For Basalts”’a geçiş.



Şekil 17. “Diagram” Menüünden “For Basalts”’a geçiş.



Şekil 18. "Diagram" Menüünden "For Granites"'e geçiş.



Şekil 19. "Diagram" Menüünden "Mantle End-Members"'e geçiş.

“Legend” menüsü, istenilen renk ve simgede elementleri gösterecek şekilde Lejant çizimde olarak sağlayan bir menüdür (Şekil 20).

Programın uygulaması ile ilgili bir örnek “Harker” diyagramında SiO_2 - Fe_2O_3 Grafiği çizimi için verilmiştir (Şekil 21).

PetroGraph

File Plot Windows

Data

	Symbol	Color	Plot (0-1)	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3
AU-1-1	1	1	1	5900,00	0,00	1700,00	400,00
AU-1-2	1	1	1	5700,00	0,00	1700,00	300,00
AU-1-4	1	1	1	5800,00	0,00	1700,00	400,00
AU-1-5	1	1	1	5400,00	0,00	1800,00	400,00
AU-1-8	1	1	1	5900,00	0,00	1900,00	200,00
AU-1-9	1	1	1	5800,00	0,00	1600,00	500,00
AU-2-1	2	2	2	5700,00	0,00	1800,00	400,00
AU-2-3	2	2	2	6100,00	0,00	1500,00	300,00
AU-2-4	2	2	2	5800,00	0,00	1800,00	400,00
AU-2-7	2	2	2	5800,00	0,00	1800,00	400,00
AU-2-9	2	2	2	5800,00	0,00	1800,00	400,00
AU-2-12	2	2	2	5800,00	0,00	1800,00	300,00
AU-3-2	3	3	3	5920,00	45,00	1601,00	137,00
AU-3-3	3	3	3	5230,00	28,00	1156,00	1510,00
AU-3-5	3	3	3	6340,00	43,00	1527,00	387,00
AU-3-6	3	3	3	2740,00	0,00	63,00	2705,00

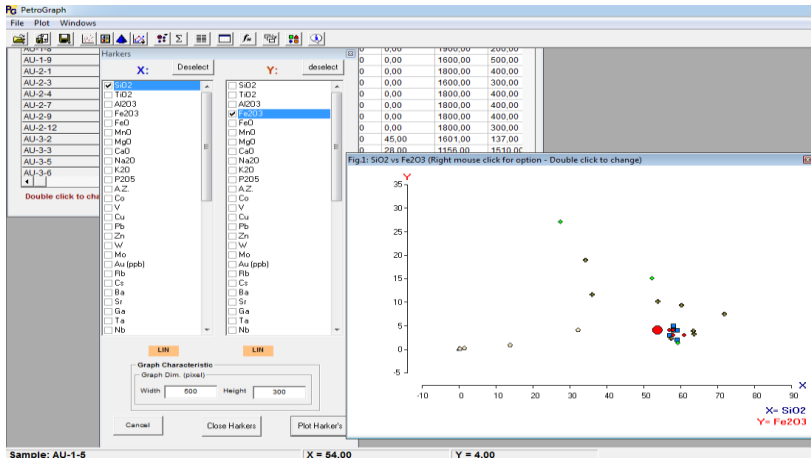
LEGEND

- 1-1
- 2-2
- 3-3
- 5-4
- 6-5
- 7-6

Save Copy Refresh Close Hide

Double click to change concentration values

Şekil 20. “Legend” Menüsü.



Şekil 21. “Harker” Diagramında çizilen bir örnek.

Kaynakça

Boynnton, W.V. (1984). Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (ed.), *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, 63-114.

Boztuğ, D. (1986). Granitoidler. Erler, A., (Ed.), Jeokimya Ortamlar, *Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Eğitim Dizisi, Ertem Matbaacılık, Ankara*, s. 93-176.

Boztuğ, D. (1989). Granitoidler, *MTA Eğitim Serisi*, 30,c138 s., Ankara.

Boztuğ, D. (2001). Granitoidlerin Ana-Eser Element ve REE Jeokimyası Karakteristikleri, *Magmatik Petrojenez Lisansüstü Yaz Okulu, Akçakoca, Düzce. Editörler: Durmuş Boztuğ&Nazmi Otlu*.

Batchelor, B. and Bowden, P. (1985). Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters, *Chemical Geology*, 48,43-55.

Chappel, B.W. and White, (1974). A.J.R., Two Contrasting Granite Types, *Pacific Geology*, 8, 173-174.

Chappell, B.J. and Stephens, W.E. (1988). Origin of infracrustal (I-type) granite magmas, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, v.79, p.71-86.

Clemens, J.D., Holloway, J.R., and White, A.J.R. (1986). Origin of an A-type granite: *Experimental Constraints. Am Mineral.*, 71, 317-324.

Collins, C. H., Lyne, P. M., Grange, J. M. (1989). *Microbiological Methods*, Butterworths & Co. Ltd., London, 410.

Debon, F., and Le Fort, P. (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations, *Transactions Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 73, 135-149.

Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Can. J. Earth. Sci.*, 8, 523-543.

Kuno, H. (1960). High-alumina basalts, *Journal of Petrology* 1, 589-637.

Loiselle, M.C. ve Wones, D.R. (1979). Characteristics of anorogenic granites: *Abstr. Geol. Soc. Am. Ann. Meeting 1979*, 539.

Maniar, P.D. and Picolli, P.M. (1989). Tectonic discrimination of granitoids, *Geo. Soc. of Am. Bull.*, 101, 635-643.

Mc Donald, G.A. and Katsura, T. (1964). Chemical composition of Hawaiian lavas, *Jour, of Petrology* 5, 82-133.

Rickwood, P. C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements, *Lithos*, 22, 247-263.

Rollinson, H. R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, *John Wiley and Sons, New York*, 352 p.

Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis, *Unwin Hyman, London*, 456 p. 58

Wood, D.A. (1979). Variably-veined sub-oceanic upper mantle: Genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence, *Geology*, 7, 499-503.

BÖLÜM IV

Maden Aramalarında Kullanılan Jeolojik Yöntemlerin İncelenmesi

Hüseyin SENDİR¹

Giriş

Ülkelerin kalkınmışlık göstergelerinden birisi de madencilik faaliyetleridir. Günlük hayatta kullandığımız teknolojik ürünlerin tamamında, çıkarılıp işlenen madenleri görmek mümkündür. Bu nedenle maden aramaları son derece önem arzeden bir konudur. Bu bağlamda aramacılıkta kullanılan yöntemler şöyle belli bir mantık çerçevesinde incelenmiştir.

Genel Jeolojik Amaçlı Çalışmalar

Maden araştırmalarında bölgenin genel jeolojisini incelemek en başta yapılması gereken bir durumdur. Bu bağlamda kullanılan topografik haritalar, jeoloji, jeokimya, jeofizik, sondaj veya kuyu

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Orcid:0000-0001-7252-7117

çalışmalarının planlanması ve uygulanması için hayati öneme sahiptir. Günümüzde, topografik haritaların oluşturulması için hava fotoğrafları, uydu görüntüleri ve yerden alınan ölçümler kullanılmaktadır. Türkiye'nin genelinde 1/25.000 ölçekli topografik harita mevcut olup, bu haritalar Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilebilmektedir. Ayrıca, birçok bölgenin 1/5.000 ölçekli hazır topografik haritaları ve daha büyük ölçekli haritaların yapılabilmesi için arazi üzerinde ölçümler yapılması gerektiği bilgisi de vurgulanmaktadır. Genellikle büyük ölçekli haritalama veya yarma, sondaj ve yüzey örnekleme noktalarının konumlarını belirlemek amacıyla bir veya daha fazla referans hattı oluşturulur. Bu referans hatları, çalışmanın detayına bağlı olarak belirlenen aralıklarda (genellikle 50-300 metre) ölçüm istasyonlarıyla birbirine bağlanır. Bu istasyonlar, jeoloji, jeofizik, toprak jeokimyası ve sondaj ekipleri tarafından verileri kaydetmek ve kontrol etmek için kullanılır (Kocatürk & ark., 2014).

Topografik çalışmalarda, çalışma alanının ve yönteminin temelini, genellikle jeolojik haritalama, jeofizik ölçümler veya jeokimyasal örnekleme çalışmalarının gereksinimleri belirler. Örneğin, topografik haritalamanın ölçeği, jeolojik haritalamanın ölçeğiyle uyumlu olmalıdır. Bu doğrultuda, topografik ölçüm sıklığı, belirlenen bu ölçeğe göre ayarlanır. Jeolojik haritalama ihtiyacını karşılamak için uygun sıklıkta poligon noktaları belirlenir. Bu nedenle, topografik harita yapımının planlanmasında, çalışma alanının sınırlarının, ölçeğin ve poligon noktalarının sıklığının belirlenmesi genellikle yeterli olacaktır (Kocatürk & ark., 2014).

Jeoloji incelemeleri, belirli amaçlara yönelik olarak seçilen detaylara odaklanır ve yapılan jeoloji haritaları, sahadaki jeolojik yapıyı bu belirlenen yönleriyle yansıtarak oluşturulur. Aynı arazi üzerinde farklı amaçlarla yapılmış jeoloji haritaları arasında çeşitlilik gözlemlenebilir. Bu durum, jeoloji haritalarının sahanın genel bir fotoğrafını çizmek yerine belirli bir amaca hizmet eden yönleriyle çizildiği anlamına gelir. Ancak, bu ifadeye dayanarak jeolojik haritalamanın öznel bir yöntem olduğu sonucuna varılmamalıdır. Çünkü aynı saha üzerindeki jeoloji haritası, haritayı

oluşturan kişinin bakış açısına değil, haritanın belirli bir amacı yerine getirmesine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, hidrotermal bir yatağın araştırılmasında alterasyon mineralojisi, sıvı kapanım ve yapısal jeoloji verileri önemliyen, plaser bir yatağını keşfetmek için sedimantolojik, paleocoğrafik ve paleontolojik veriler anlamlı olabilir. Bu nedenle, amaca uygun bir jeoloji haritası oluşturmak için proje tasarımcısının, jeoloji incelemeleriyle neyi amaçladığını, hangi verilerin önemli olduğunu ve hangi ayrıntıları içeren bir harita yapmayı planladığını açıklaması önemlidir (Kocatürk & ark., 2014).

Jeoloji incelemelerinde, gözlem verilerini haritalamak, sahadaki jeolojik yapının kapsamlı bir görünümünü elde etmek amacını taşır. Gözlemlenen veriler, yakınlık, devamlılık ve benzerlik ilkelerine göre birleştirilerek anlamlı bütünler oluşturulur. Bu sayede jeoloji haritaları, sahadaki yapıyı belirli bir düzen içinde algılamamıza yardımcı olur. Bu nedenle, inceleme alanının, sahadaki ilgi çekici jeolojik yapıyı bütünsel bir perspektifle anlamamıza olanak tanıyacak şekilde belirlenmesi büyük önem taşır. Üç boyutlu jeoloji yapısının görselleştirilmesi, hangi detayda ve ne kadar hassasiyetle haritalanırsa, derinlemesine ayrıntıları algılama yeteneği de buna paralel olarak artar (Kocatürk & ark., 2014).

Haritalanacak ayrıntılar ve gerekli hassasiyet, jeoloji haritalamasının ölçeğini belirler. Bölgesel yapıyı anlamak için 1/25.000 veya daha küçük ölçekli haritalar genellikle yeterlidir. Daha ayrıntılı jeolojik incelemeler için ise 1/25.000 ile 1/5.000 arasında değişen ölçekler kullanılır. Bu ölçekte, sahadaki kaya birimlerini detaylı bir şekilde göstermek, kıvrımlar, faylar gibi yapıların önemli geometrik özelliklerini ve alterasyon zonlarını içeren küçük yapıları ayrıntılı bir şekilde haritalamak için özel amaçlı detaylı haritalar, 1/2.000 ile 1/500 arasında değişen ölçeklere ihtiyaç duyar. Haritalama ölçeğini etkileyen diğer bir faktör de haritalama duyarlılığıdır, ki bu da ölçme aralığı ve ölçme hassasiyetine bağlıdır (Kocatürk & ark., 2014).

Mineralojik ve Petrografik İncelemeler

Standart boyuttaki lameller kullanılarak, numunenin yerleştirileceği yüzeyler öncelikle cam tablaya dökülmüş yağlayıcı ve silisyum karbür toz karışımıyla aşındırılarak düzeltilir ve iyi bir yapışma sağlamak amacıyla pürüzlendirilir. Araziden alınan kaya örnekleri, ince kesit yapımı için hazırlık aşamasında kesici çarklar yardımıyla kibrit kutusu boyutlarına getirilir (Şekil 1).



Şekil 1. Örneklerin kesilerek küçültülmesi (Kocatürk & ark., 2014).

Döner disk kullanılarak düzgün yüzeyler elde edilir. Lama ile yapıştırılan örnekler, ince kesit aleti kullanılarak 0,1 ila 0,03 mm kalınlığında kesilebilir. Lama ile birleştirilen kesitler, ince kesit aletinde kullanılacak uygun yapışma kıvamına getirilebilmesi için örneğe sıkıştırıcı uygulanarak maksimum yapışma sağlanır (Şekil 2).



Şekil 2. Örneklerin çok ince kesilerek hazırlanması (Kocatürk & ark., 2014).

İnce kesit aletinde kesilen örnekler, cam üzerinde değişik büyüklüklerdeki aşındırma tozları ile ideal bir kesit kalınlığına ulaşana kadar aşındırılarak kesit yapımı tamamlanır (Şekil 3).

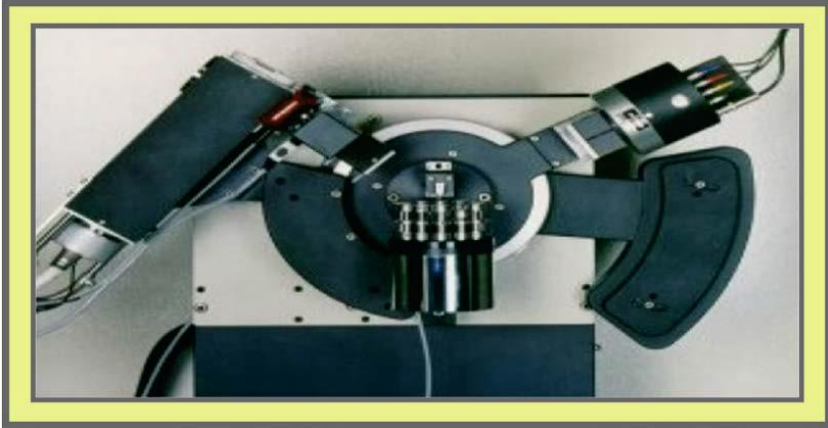


Şekil 3. Örneklerin cam üzerinde hazırlanması (Kocatürk & ark., 2014).

Çeneli kırıcıda ufalanan cevher gruplarının ürünleri, belirli boyut fraksiyonlarına ayrılmak üzere eleme işlemine tabi tutulur: -600+500, -500+400, -400+300, -300+212, -212+150, 150+106, -106+75, -75+53 ve -53+38 Nm. Bu fraksiyonların temsili örnekleri, soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak kalıplara alınır ve otomatik aşındırma ve parlatma makinesi ile parlak kesitler haline getirilir. Kalıpların yüzeylerinde tanelerin en dengeli konumda yer alabilmesi için, düşük viskoziteli ve sertleşme süresi uzun olan epofix reçine ve sertleştirici kullanılır. Kalıplama sürecinde, karışım sırasında meydana gelen hava kabarcıkları, tanelerin aşındırma ve parlatma aşamalarında kalıp yüzeyinden kopmasına neden olabilir. Bu kabarcıkların giderilmesi için, Epofix reçine+sertleştirici karışımı vakum cihazında tutulur (Kocatürk & ark., 2014).

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her kristalin kendi benzersiz atom dizilimine bağlı olarak X-ışınlarını belirli bir düzende kırmasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri, adeta bir parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz yöntemi, numuneyi tahrip etmeyerek çalışır ve çok küçük miktarlardaki numunelerin bile analizini yapabileceği özelliğine sahiptir. Max Van Laue tarafından ilk kez kristal yapı ve içerisindeki atom dizilimlerini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Temel olarak, örneğe X-ışını gönderilerek kırılma ve dağılım verileri toplanır. Kristal yapısına göre ışını farklı açılarda ve şiddetlerde kırınım örnekleri, son derece hassas bir şekilde analiz edilebilir. Şemada, ışını üreten sol üst başlık ile dedektör (sağ üst) birbirine V şeklinde bir açıyla bağlanmıştır ve bu açı, orta bölmedeki örnek yüklemesi için ayarlanabilir. Fourier Transform devriminden sonra, XRD makineleri önemli ölçüde profesyonelleşmiştir. İlk zamanlarda her açıyı ayrı ayrı analiz eden ve toplu bir değer sunan makineler, şu anda geniş açılı çok kısa bir sürede ve uygun bir çıktı ile sağlayabilir hale gelmiştir. XRD'yi son derece kullanışlı yapan faktör, kristal yapılarında parmak izi hassasiyetinde veri toplayabilme yeteneği ve güvenilir olma özelliğidir (Şekil 4) (Kocatürk & ark., 2014). Örneklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alındıktan sonra analiz koşulları belirlenir. Bu işlem

genellikle kayaç ve mineral numunelerinin çelik havanda kırılmasını ve ardından agat havanda öğütülerek toz haline getirilmesini içerir. Elde edilen toz numuneler, analiz için plastik kaplarda muhafaza edilir. Analiz öncesinde örnekler, cam lamlara konularak XRD cihazının örnek tutucularına yerleştirilir ve bu şekilde analize hazır hale getirilir.



Şekil 4. XRD çalışmalarında kullanılan cihazın görünümü Özmen & Timoçin, 2012).

Jeokimyasal İncelemeler

Jeokimyasal arama çalışmalarında, örnekleme deseni ve örnek yoğunluğu, hedefin özellikleri, jeolojik yapı, topografi, drenaj sistemleri, sahanın elverişliliği, büyüklüğü ve personel durumu gibi bir dizi faktöre bağlı olarak belirlenir.

Dere çökeline dayalı bir örnekleme yöntemi, özellikle tava konsantreleri toplamak amacıyla kullanılır. Bu yöntemde, elekte elenen malzemeler tava denilen bir kap içine yerleştirilir ve su eklenir. Ardından, tava çalkalanarak içindeki malzemenin hacmi yarıya indirilene kadar işlem devam eder. Hafif malzemeler su yüzeyine çıkarılarak uzaklaştırılırken, dip kısmında biriken ağır mineraller zenginleştirilir. Bu ağır mineral konsantreleri, daha sonra laboratuvarında çeşitli işlemlerden geçirilerek analiz edilir. Sahada

elde edilen ağır mineral örnekleri, mevcut ağır mineral türleri hakkında bilgi sağlar. En uygun örnekleme deseni, deneyim ve yönlendirici incelemelerin ışığında belirlenmelidir. Ancak, çalışma koşulları, personel bulunurluğu gibi sınırlamalar, bütçe ve zaman kaygıları nedeniyle örnekleme deseninde bazı değişikliklere neden olabilir (Kocatürk & ark., 2014).

Örnekleme genellikle toprak profili içinde belirli seviyelerle sınırlıdır. Topraklar genellikle belirli katmanlar halinde, yani horizons olarak adlandırılan tabakalar şeklinde oluşur. En altta bulunan horizon genellikle büyük ölçüde ayrılmış kayalardan oluşur ve C horizonu olarak adlandırılır. En üstteki horizon A horizonu denir ve bileşimi değişkendir. Bitki örtüsüyle kaplı alanlarda A horizonu genellikle organik malzemeden oluşur ve siyah renklidir. B horizonu, A ve C horizonları arasında yer alır ve genellikle karışık bir zondur. Yeraltı suyunun yükselip alçalması, toprak ve dere çökeli anomalilerinin oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, maden yataklarını daha uzak mesafeden algılayabilmek amacıyla toprak örnekleri genellikle B horizonundan alınır. Kutup bölgelerinde B horizonu gelişmemiş veya az gelişmiş olduğu için, bu bölgelerde genellikle C horizonundan örnekler alınır (Kocatürk & ark., 2014).

Toprak örnekleme genellikle belirli aralıklarla düzenlenmiş bir ızgara ya da çizgiler boyunca yapılır. Daha yakın aralıklı örnekleme, gömülü cevher yatağı üzerindeki toprak anomalilerini daha hassas bir şekilde tespit etmeyi ve yerini daha kesin belirlemeyi sağlar. Grid örnekleme, gömülü cevherleşmenin seyrini daha iyi yansıtabilecek dişli anomaliler sağlayabilir, bu nedenle çizgi örnekleme yöntemine göre daha avantajlıdır. Çünkü çizgi örnekleme boyunca bulunan bir anomali genellikle herhangi bir yönelim göstermez ve genellikle bir grid örneklemeyle doğrulanması gerekir (Kocatürk & ark., 2014).

Genellikle örnek hazırlama ve analiz süreçleri, analistin sorumluluğu olarak kabul edilir. Bu nedenle, çoğu zaman analist, jeokimyasal arama hedefleri konusunda yeterince bilgi sahibi olmadığı için standart yöntemlerin, örneğin '80 mesh elekten

geçirilmiş örneklerin sıcak asit çözeltisiyle çözündürülmesi ve AAS veya ICP ile analiz' gibi yaygın olarak kullanıldığı uygulamalara sıklıkla başvurur. Ancak bu işlemler, elde edilecek sonuçları ve bu sonuçların arama hedefleriyle uygunluğunu büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, görev analist tarafından gerçekleştirilse bile, en uygun örnek hazırlama ve analiz yöntemlerini seçme sorumluluğu proje tasarımcısına aittir. Proje tasarımcısı, ilgili kimya mühendisleriyle yakın bir işbirliği içinde çalışmalı ve uygun seçimlerin yapılmasını sağlamalıdır, belki de bu süreçte onlardan destek alarak örnek hazırlama sürecine dair bilgi sağlamalıdır (Kocatürk & ark., 2014).

Kimyasal Analiz İncelemeleri

Doğada 271 adet bilinen duraylı izotop bulunsa da sadece birkaç tanesi jeolojik amaçlar için kullanılabilir. Hidrojen, oksijen, karbon ve kükürt gibi düşük atom numaralı elementler, birden fazla duraylı izotop içerir ve bu izotoplar genellikle kayalarda yaygın olarak bulunur.

İzotoplar genellikle kütle spektrometresi kullanılarak ölçülür. Örneğin, öğütülen örnek tozu, elektron bombardımanına tabi tutularak moleküller iyonize edilir. Ardından, yüksek voltaj uygulanarak iyonlara hız kazandırılır ve fak iyon ışınına dönüştürülür. Manyetik bir alanda hareket eden bu iyonlar, kütleleriyle orantılı olarak sapar. Ağır iyonlar az, hafif iyonlar daha fazla sapma gösterdiğinden, bu iyonlar bir kolektörde ayrıştırılır ve kaydedici cihazda izotop bolluğuyla orantılı pikler oluşturulur. Örneğin, O₂ izotopik bileşimi, CO₂ örneklerinin analiziyle belirlenir ve bu işlem malzemenin türüne bağlı olarak gerçekleştirilir. H₂ izotopik bileşimi ise 750°C'de metalik uranyumla tepkimeye girmiş su örneklerinden elde edilen H₂ gazının analiziyle ölçülür. Kükürtlü bileşenlerin S izotop ölçümleri için Ag₂S ve BaSO₄ aracılığıyla SO₂'ye dönüştürülmesiyle bir dizi tepkime gerçekleştirilir. C ölçümleri ise karbonatların 25°C'de derişik fosforik asitle tepkimesi sonucu açığa çıkan CO₂ üzerinden yapılır (Kocatürk & ark., 2014).

Sıvı Kapanım İncelemeleri

Mineraller içindeki küçük miktar ve boyuttaki sıvı, buhar veya bu fazların karışımı olarak kapanmış olan sıvı kapanımları, safsızlık olarak ortaya çıkar. Sıvı kapanım çalışmaları, minerallerin ilk kristalleşme sıcaklıklarını ve bu mineralleri oluşturan çözeltilerin tuzluluk değerlerini belirleme amacını taşır. Bu analizlerden elde edilen bilgiler, maden yataklarının oluşumuyla ilgili modelleme çalışmalarında büyük öneme sahiptir.

Analog kamera ile kuvars, florit, barit, sölestin gibi ışık geçiren minerallerde ve IR kamera ile pirit, molibdenit, enargit, kalkozin, stibnit, sinobar, sfalerit ve volframit gibi ışık geçirmeyen minerallerde uygun kristal boyutunda ve yeterince sıvı kapanım içeren 15-20 adet iki yüzü parlatılmış kesit hazırlanır. Bu kesitlerde gözlemlenebilen 50-100 arası kapanım incelenir. Bazen bu sayı 1000'e kadar çıkabilir (Kocatürk & ark., 2014).

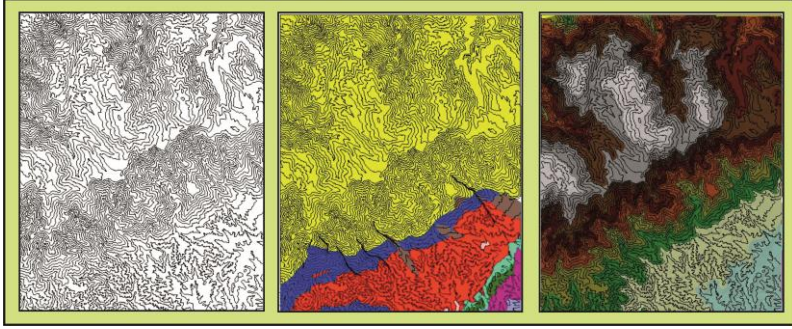
Kapanımların genel özellikleri, büyüklük, dağılım, morfolojik görünüm ve doldurma oranı gibi unsurlar açısından ilk olarak incelenir. Daha sonra, kapanımların termometrik özellikleri değerlendirilmek üzere dondurulup ısıtılarak -193°C ile $+600^{\circ}\text{C}$ arasında değişen sıcaklık aralığında termometrik incelemeye tabi tutulur. Sıvı kapanımlardaki ölçümler, programlanabilir ısıtma-soğutma sistemi ile bağlantılı, alttan aydınlatmalı özel mikroskoplar kullanılarak gerçekleştirilen ısıtma ve soğutma aşamalarını içeren iki evrede incelenir (Şekil 5).



Şekil 5. Sıvı kapanım düzeneği (Kocatürk & ark., 2014).

Bölge Jeoloji Haritalarının Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) Yardımıyla Hazırlanması

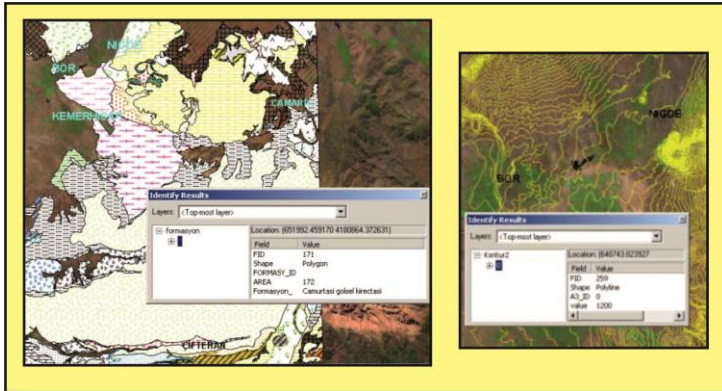
Maden sahasına ait her türlü harita özel digitizerlerden (sayısallaştırıcı cihaz = tarayıcı) geçirildikten sonra kullanılan yazılımlara uygun formatlara dönüştürülür. Daha sonra kullanılan CBS yazılımına haritadaki bazı koordinat değerleri girilerek verilen bir komutla haritalar, belirlediğimiz projeksiyon sistemini baz alarak dünya koordinat sistemine oturtulur. Böylece harita üzerinde istenilen her noktanın tam koordinat değerine anında ulaşılabilir. Eğer sayısallaştırılmış haritalar Harita Genel Komutanlığı'ndan (HGK) satın alınamıyorsa rektifiye edilen haritalardaki eşyüksekti eğrilerinin herbiri bilgisayar üzerinde tek tek çizilip yükseklik değerleri girilir. Böylece paftalar sayısal ortama aktarılmış olur. 10 m aralıklı devam eden kontur çizgileri olan 1/25 000'lik bir paftayı bir kişi yaklaşık 7 günde sayısal ortama aktarır. Sayısallaştırılmış bir paftada kontur değerleri arasına interpolasyonla yükseklik değeri atanmış olur. Böylece harita üzerinde her noktanın yükseklik değerine ulaşılabilir (Şekil 6) (Aydal, 2012).



Şekil 6. Hatay bölgesinde sayısallaştırılan 1:25.000 ölçekli P36-a4 paftası ve aynı bölgedeki jeolojik birimlerin sayısallaştırılarak gösterilmesi ve aynı bölgede oluşturulan sayısal yükseklik modeli (SYM-DEM) (Aydal, 2012).

Maden Sahasına Ait Haritaların Hazırlanması

C.B.S. ile bir maden sahasına ait; eğim haritası, bakı haritası, drenaj ağı, arazi kullanım haritası, bitki örtüsü haritası, yol ağı haritası vb. haritalar oluşturulur. Kâğıt ortamda mevcut olan haritalar sayısal ortama aktarılarak, coğrafi veri tabanı oluşturulur (Şekil 7) (Taşdelen, 2005).



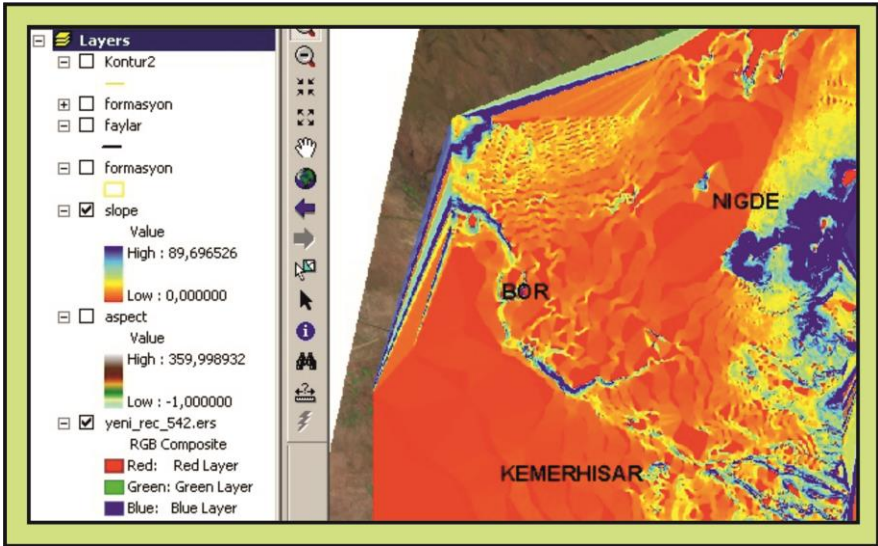
Şekil 6. Niğde-Bor-Çiftelhan arası bölgenin 1:100.000 ölçekli jeolojik haritasının uydu verisi üzerindeki konumu ve Niğde-Bor çevresinin topoğrafik konturlarının sorgulanması (Taşdelen, 2005).

Eğim Haritalarının Hazırlanması

Bir maden sahasına ait eğim bilgilerinin haritalanması ve veritabanının oluşturulması C.B.S. ile oldukça kolaydır. Eğim haritasında her eğim değeri farklı renkle temsil edildiğinden görsel olarak kolaylıkla eğim değerleri görülebilir (Şekil 7) (Aydal, 2012).

Bakı Haritalarının Hazırlanması

Bir maden sahasındaki çevre yüzeylerinin baktığı yönler farklı renklerle temsil edilerek araziye ait bakı haritası oluşturulur (Şekil 8) (Aydal, 2012).



Şekil 7. Niğde-Bor-Kemerhisar arası bölgenin eğim haritasının GIS ortamında gösterilmesi (Aydal, 2012).

Kaynakça

Ayda, D., 2012. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin ve Uzaktan Algılama Tekniklerinin Madencilik Faaliyetlerinde Kullanılması, 1-13s.

Ayda, D., 2012. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi Tekniklerinin Jeoloji, Madencilik, Çevre Araştırmalarında ve İnşaat Sektöründe Kullanılma Örnekleri. 1-53 s.

Kocatürk, H., Sendir, H., Toygar Sağın, Ö., Göz, E., Sarıöz, K., 2014. Index Approach For Ore Exploration and Prospection, <https://www.researchgate.net/publication/263427172>.

Özmen, S. & Timoçin H., 2012. X-ışınları Kırınım Cihazı (XRD) ve Kırınım Yasası.1-7s.

Taşdelen İ. 2005. Jeolojik ve Topografik Verilerin ARC GIS ile Yorumlanması. 1-47s.

BÖLÜM V

KCl ve Lignosülfonat Çamurlarına Eklenen Gıda Atıklarının Kayıp Önleyici Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

İnci TÜRK TOĞRUL¹

Giriş

Sondaj, genellikle yeraltı kaynaklarını keşfetmek, maden çıkarmak, su temini sağlamak veya çeşitli inşaat projeleri için delik açmak amacıyla yapılan bir kazma işlemidir. Sondaj, genellikle özel ekipman ve teknik bilgi gerektiren bir mühendislik uygulamasıdır ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır. Temel kullanılan yöntem döner sondajdır ve bu işlem sırasında sondaj akışkanları ya da genel adı ile sondaj çamuru kullanılır ve sondaj esnasında birçok hayati işleve sahiptir. (Skalle, 2011).

¹ Prof. Dr., Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Bölümü. incitgrl@gmail.com ; ORCID No: 0000-0001-7549-2968

Sirkülasyondaki sondaj sıvısının kaybolması sondaj işleminin sırasında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri olarak önemli bir teknik ve ekonomik zorluk oluşturur. Teknik olarak, sıvı kaybı sondaj ve keşif maliyetlerinin artmasına, proje takviminde gecikmelere ve artan güvenlik ve çevresel risklere yol açmaktadır. Öte yandan, ekonomik kayıp, şirketin kârını ve gelirlerini etkiler, çünkü üretkenliğin durması, kayıp sıvıları değiştirmek ve finansal kayıpları telafi etmek için ek maliyetlere neden olur. Sondaj akışkanının kaybı konusundaki araştırmalar bu sorunun olası nedenlerini incelemeyi ve meydana gelmesi durumunda önlemeyi ve etkisini azaltmak için etkili çözümler geliştirmeyi içermektedir. Bu çözümler, sondaj sıvısı sirkülasyon kontrolü için yeni teknikler geliştirmeyi, sondaj alanındaki eğitimi ve eğitimi iyileştirmeyi veya etkili bir sondaj izleme sistemi geliştirmeyi de içerebilmektedir. (Okon, Udoh & Bassey, 2014).

Sondaj sirkülasyonu kaybının nedenleri arasında, yüksek geçirgenliğe sahip rezervuar kayalarından sondaj sıvısının sızması, sondaj kırılması, kuyuya yeraltı suyunun sızması ve kaya tabakalarındaki şekilli çatlaklardan sıvı tükenmesi sayılabilir. Başarılı ve kesin bir sondaj operasyonunun özünde sondaj çamurunun oynadığı sayısız rol bulunmaktadır. Bu rollerden biri delinmekte olan kuyunun duvarlarını sağlamlaştırmaktır. Sondaj çamurunda istenen en önemli özellikler düşük süzüntü (filtrat) kaybı, düşük geçirgenlik ve ince çamur keki oluşturmasıdır. (Awele, 2014). Çamurun konsolidasyon özelliğinin arkasındaki temel mekanizma şudur: Çamurun katı bileşenleri geride kalırken çamur filtratı formasyona süzülür ve esasen sondaj deliğinin duvarlarına sıva görevi gören çamur kekini oluşturur (Liu & Santamarina, 2018). Kayıp mekanizması her filtre oluşumu için farklıdır. Bir yandan, sondaj sıvısı basıncı boşluk basıncını aştığı anda, doğal çatlaklar, kavernöz (mağaralı), vüğüler ve yüksek geçirgenlik oluşumuna yönelik sondaj sıvısı kayıpları tetiklenir. Öte yandan, sondaj sıvısı basıncı kırılma basıncını aştığında, indüklenen kırılmalarındaki kayıplar başlar (Howard & Scott, 1951).

Sondaj akışkanının kaybını kaçak başlamadan önlemek veya kaçak başladıktan sonra azaltmak ve kontrol altına alabilmek için kayıp önleyici malzemeler kullanılır. Farklı özelliklerde ve farklı geometrilere sahip olabilen bu malzemeler ile sondaj çamuru daha fonksiyonel hale getirilmeye çalışılır. Hâlihazırda üzerine yoğun araştırmalar yapılan bu alanda tarımsal atıkların kullanımı da son 40 yıldır incelenen bir konudur. Bu amaçla bu çalışmada çeşitli tarımsal atıkların farklı sondaj çamurlarına kayıp önleyici malzeme olarak ilave edilmesi sonucunda çamur performansındaki değişim incelenmiştir.

Sondaj çamuru

Sondaj çamuru, sondaj operasyonları sırasında kullanılan özel bir sıvı karışımıdır. Bu çamurlar, çeşitli amaçlar için formüle edilir ve sondaj kuyusunun stabilitesini sağlamak, sondaj deliğini soğutmak, materyali taşımak ve çeşitli sondaj zorluklarıyla başa çıkmak gibi işlevlere hizmet eder. Sondaj çamuru tipleri, kullanım amaçlarına, yerel formasyon özelliklerine ve sondaj hedefine bağlı olarak değişebilir. Sondaj akışkanları karmaşık kimyasal ve reolojik özelliklere sahip, çok farklı kompozisyonlarda kolloid sistemlerdir.

Sondaj operasyonu ve sondaj sıvısı tekniklerinin performansı, operasyonla ilgili herkes için kritiktir. Sondaj sıvısının temel amacı, kuyunun patlamasını önlemek ve sondaj sıvısı operasyonunun istenen ölçüde devam edebilmesi için deliği iyi durumda tutmaktır. Bir kuyu inşa sürecinin en önemli parçası sondaj ve tamamlama sıvılarıdır ve sondaj sıvısının nihai performansı, aktivitenin başarısını veya başarısızlığını belirleyebilir. Sondaj sıvısının seçimi ve uygulaması, sondaj müteahhidi, operatör ve sıvı tedarikçisi arasında ortaklaşa yapılmalıdır (Cheraghian, 2021). Sondaj çamurunun başlıca görevleri şu şekilde özetlenebilir (Türkiye Petrolleri, 2007):

1. Delme Çamuru: Sondaj akışkanlarının en temel görevlerinden biri, kuyu içindeki materyali delme işlemi sırasında çıkarmak

- ve kuyu duvarlarını desteklemektir. Bu, delme kafasının altındaki materyalin yüzeye taşınmasına yardımcı olur.
2. Soğutma ve Yağlama: Delme işlemi sırasında materyalin sürtünmesi ve ısınması nedeniyle, sondaj akışkanları, delme kafası ve materyal arasındaki sürtünmeyi azaltarak soğutma ve yağlama sağlar. Bu, ekipmanın aşınmasını azaltır ve delme hızını artırır.
 3. Basınç Kontrolü: Sondaj akışkanları, kuyu içindeki basınçları kontrol etmek için kullanılır. Bu, kuyu içindeki petrol veya doğal gazın kontrolsüz bir şekilde yüzeye çıkmasını önlemek için önemlidir.
 4. Kuyu duvarını Destekleme: Sondaj akışkanları, kuyu duvarlarını destekleyerek çökmesini önler. Ayrıca, kuyu içindeki boşluğu stabil tutarak sondaj ekipmanının düzgün çalışmasına yardımcı olur.
 5. Kirlilik Kontrolü: Sondaj akışkanları, kuyu içindeki materyaldan kaynaklanan kirlilikleri kontrol etmek ve taşımak için kullanılır. Bu, sondaj kafası altındaki materyalin yüzeye taşınmasını kolaylaştırır.
 6. Çözelti Taşıma: Sondaj işlemi sırasında çeşitli kimyasal çözeltiler, özel ekipman ve malzemelerin kuyuya taşınması ve uygulanması için sondaj akışkanları kullanılır.
 7. Kuyu dibini Temizleme: Sondaj akışkanları, kuyu dibinde biriken materyali temizleyerek delme işlemini daha etkili hale getirir. Bu, kuyu içindeki materyalin doğru bir şekilde çıkarılmasına yardımcı olur.

Sondaj akışkanlarının bu görevleri, kuyu sondajı işleminin başarıyla tamamlanabilmesi için önemlidir. Bu akışkanlar, hem kuyu içindeki çeşitli zorluklarla başa çıkmak hem de doğal kaynakların etkili bir şekilde çıkarılmasını sağlamak için özel olarak formüle edilmiştir.

Sondaj amuru tipleri

Sondaj akışkanları, sondaj operasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için kuyu formasyonunun özelliklerine ve sondajın amacına bağlı olarak özenle seçilir ve formüle edilir. Bazı yaygın sondaj çamuru türleri aşağıda verilmiştir:

1. Su Bazlı amurlar: Su bazlı çamurlar genellikle temel olarak su, kil, polimer ve çeşitli kimyasallar içerir. Bu amurlar, genellikle su kaynaklarını korumak amacıyla kullanılır ve materyali taşımak, kuyu duvarlarını desteklemek için kullanılır
2. Kil Bazlı amurlar: Kil bazlı çamurlar genellikle bentonit veya kil mineralleri içerir. Bu amurlar, materyali taşıyan, çatlakları kapatma ve kuyu duvarlarını destekleme özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır
3. Polimer Bazlı amurlar: Polimer bazlı çamurlar, su bazlı çamurlara polimer eklenerek oluşturulur. Bu amurlar, genellikle daha iyi stabilite ve viskozite özellikleri sunar.
4. Yağ Bazlı amurlar: Yağ bazlı çamurlar genellikle petrol bazlı sıvılar içerir ve genellikle petrol ve gaz sondaj operasyonlarında kullanılır. Bu tür çamurlar, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve çeşitli zorlu sondaj koşulları için uygundur.
5. Hücresel amurlar: Hücresel amurlar genellikle gaz veya hava karıştırılarak oluşturulur. Bu amurlar, özellikle zorlu formasyonlarda kayıp sirkülasyonu önlemek ve sondaj deliği çapını kontrol altında tutmak için kullanılır
6. Yüksek Yoğunluklu amurlar: Yüksek yoğunluklu çamurlar, genellikle materyali daha iyi taşıyan ve kuyu duvarlarını daha etkili bir şekilde destekleyen amurlardır. Bu tür çamurlar, derin deniz sondajları ve yüksek basınçlı sondajlar gibi özel uygulamalarda kullanılır.

7. Kurutulmuş Çamurlar: Kurutulmuş çamurlar genellikle toz formunda sunulur ve sahada su eklenerek çamur haline getirilir. Taşınabilirlik ve depolama avantajları nedeniyle tercih edilebilir

Çamurunun özellikleri

Sondaj çamurunun hidrostatik basıncının korunması, sondaj kırıntılarının taşınması ve askıya alınması gibi işlevleri yerine getirebilmesi için akışkan özelliklerinin gerekli uluslararası standartlar dahilinde olması gerekir. Önemli çamur özellikleri; çamur ağırlığı, reolojik özellikleri ve filtrasyon özellikleridir.

Çamur Ağırlığı: Sondaj çamurunun en önemli özelliklerinden biri yoğunluğudur. Yoğunluk üç ayrı şekilde ifade edilebilir (lb/gal, lb/ft³, g/cm³ ve psi/1000 ft). Sondaj teknolojisinde genellikle çamur yoğunluğu için çamur ağırlığı deyiimi kullanılmaktadır.

Reolojik Özellikler: Bu özelliklerden bir diğeri ise çamur reolojisidir. Reoloji esas olarak sıvıların akışının ve deformasyonunun incelenmesidir (Orodu & ark, 2018). Çamurların reolojik özellikleri arasında jel mukavemeti, plastik viskozite, akma noktası ve görünür viskozite bulunur. Kuyu içi koşullar altında çamurun reolojik özelliklerinin izlenmesi ile başarılı bir kuyu sondajı operasyonu gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda, bu özellikler uygun şekilde takip edildiğinde ve orijinal değerler muhafaza edildiğinde, sondajda en çok karşılaşılan sorunlar olan sirkülasyon kaybı, boru sıkışması, delik temizliği ve kuyu kontrolü gibi kuyu deliği sorunlarının görülme sıklığının en aza indirilebilir.

Viskozite, maddenin deforme edici bir kuvvete karşı direncinin bir ölçüsünü temsil eder. Bu nedenle sondaj çamurunun viskozitesinin yeterince ölçülmesi ve kontrol edilmesi gerekir. Genel olarak sondaj çamurunun viskozitesi, çamur katılarını askıda tutmaya yeterli olmalıdır. Bu nedenle, bir sondaj kesiminin sondaj çamuru içinde tutulması, sondaj çamurunun viskozitesine bağlıdır. Viskozite kayma hızından oldukça etkilenir. Yüksek

viskoziteli sondaj çamurlarında kesme hızının arttırılması, katıların sondaj çamuru üzerinde tutulmasını iyileştirir ve yüksek kesmeli katı temizleme araçlarının (örneğin şeyl çalkalayıcı) performansını azaltır (Boyou & ark, 2019). Bununla birlikte, yüksek viskoziteli sondaj çamurlarında kesme hızının azaltılması, düşük kesmeli katı giderme araçlarının (örneğin, santrifüjler) performansını azaltır çünkü viskozite, katı çökelme hızı ve ayırma verimliliği ile ters orantılıdır (Rafati & ark, 2018). Sondaj sıvısının viskozitesi, nanomalzemeler kullanılarak kuyu içi koşullar için uygun şekilde değiştirilebilir (Smith & ark, 2018). Plastik viskozite ve görünür viskozite olmak üzere iki tür viskozite vardır.

Plastik viskozite, esasen bir sıvının akmaya karşı direnci olarak tanımlanır. Katıların boyutunun, şeklinin, dağılımının ve miktarının ve sıvı fazın viskozitesinin bir göstergesi olarak kullanılır (Idress & Hasan, 2020). Plastik viskoziteyi arttırmak için akışkandaki katıların boyutunu küçültmek gerekir. Yüksek plastik viskoziteye sahip bir sıvı istenmez ve kuyu deliğindeki sıvıyı pompalamak için artan pompa basınçları nedeniyle artan eşdeğer sirkülasyon yoğunluğuna neden olabilir (Nicora & ark, 2001). Yüksek plastik viskoziteli bir akışkanın bir diğer olumsuz etkisi de penetrasyon hızının azalmasıdır. Düşük plastik viskozite ve yüksek akma noktası, yüksek akma noktası/Plastik viskozite oranıyla sonuçlanır ve bu da kırıntıların kesiklerin taşınmasını iyileştirir (Okrajni & Azar, 1986). Sıvıyı pompalamak için gereken enerji, artan viskozite ile artar. Pompalama gücü ve basınç düşüşü, viskoziteye bağlı iki önemli parametredir (Shahsavani, Afrand & Kalbasi, 2018).

Görünür viskozite, sondaj sıvısının ana reolojik özelliklerinden biridir. Sondaj işlemleri sırasında görünür viskozitenin izlenmesi, çeşitli sondaj problemlerini önlemek ve kuyu temizleme verimliliğini artırmak için çok önemlidir.

Jel kuvveti, düşük oranda ölçülen sondaj çamurunun kayma gerilimidir. Çamur temizlendikten sonra genellikle bir viskozimetre ile gerçekleştirilen kesme bir süre [10 sn, 10 dk ve 30 dk standart

API prosedürü] (Schlumberger, 2020). Jel kuvveti, sondaj sıvısının sirkülasyon halindeyken sondaj artıklarını askıya alma yeteneğini gösterir.

Jel mukavemeti, çamur belirli bir süre boyunca statik kaldıktan sonra genellikle bir viskozimetre ile gerçekleştirilen düşük kesme hızında ölçülen sondaj çamurunun kayma gerilimidir [standart API prosedüründe 10 saniye, 10 dakika ve 30 dakika] (Schlumberger, 2020). *Bu okumalar lbs /100 ft² birimleriyle ifade edilir.* Jel kuvveti, sondaj sıvısının dolaşımdayken sondaj kesimlerini askıya alma yeteneğini gösterir.

Jel kuvvetinden yoksun bir çamur, bir günlük delme işlemine neden olacak ve sıvı sirkülasyonu durdurulduğunda deliğin aşağısında katı maddelerin birikmesine ve/veya kesiklerin çökmesine yol açacaktır (Tranchless Technology, 2013). Her ikisi de önemli kuyu içi sorunlara neden olabilir. Çamur ister hareketsiz olsun ister dolaşımda olsun ve kesimler askıya alınmış olsun, matkap ucunun temizlenmemiş kesimleri gereksiz yere yeniden taşlamak yerine yeni oluşumları kesmesine olanak sağlayarak temiz bir kuyu deliği geliştirir. Bu da penetrasyon oranının artmasına neden oluyor. Çamurun temel bir özelliği olmasına rağmen, çok düşük jel kuvvetine sahip çamur ile çok yüksek jel kuvvetine sahip çamurun kullanılması arasında hassas bir dengenin kurulması gerekir. Düşük jel mukavemeti kuyu aşağısında kesiklerin birikmesine, yüksek jel mukavemeti ise basınç kayıplarına, oluşum kırılmasına ve katı madde kontrolü problemine yol açar.

Kopma noktası, başlangıç akışına karşı dirençtir ve sıvı hareketini başlatmak için gereken stresi ifade eder. Uygulanan gerilim akma geriliminin altındaysa, gerilim ortadan kaldırıldığında akışkanda gerinim iyileşmesi görülecektir. Bu direnç, parçacıkların yüzeyinde veya yakınında bulunan elektrik yüklerinden kaynaklanmaktadır. Daha yüksek akma noktası, daha büyük sürtünme basıncı kayıplarına ve eşdeğer sirkülasyon yoğunluğunda bir artışa yol açar.

Filtrasyon, sondaj sıvısının, çamur katılarının kuyu duvarlarında birikmesiyle formasyondaki sıvı kaybını sınırlama yeteneğini ifade eder. Sondaj işlemleri sırasında sondaj sıvısı, delik içinde formasyona göre daha büyük olan hidrostatik basıncın bir sonucu olarak sondaj deliğinden formasyona doğru hareket etme eğilimindedir. Sondaj sıvısı (su) akışı meydana geldikçe, sondaj sıvısı katıları sondaj deliğinin duvarlarında birikir ve böylece ek sıvı kaybını önemli ölçüde azaltır. Katı madde birikintisine filtre keki adı verilir. İdeal filtre keki, formasyona minimum düzeyde müdahale edecek şekilde incedir. Belirli bir çamur için filtre kekinin kalınlığı genellikle formasyonun geçirgenliğinin bir fonksiyonudur. Örneğin sondaj deliğinin kil aralığındaki filtre keki, kum aralığındaki filtre kekinden daha ince olacaktır.

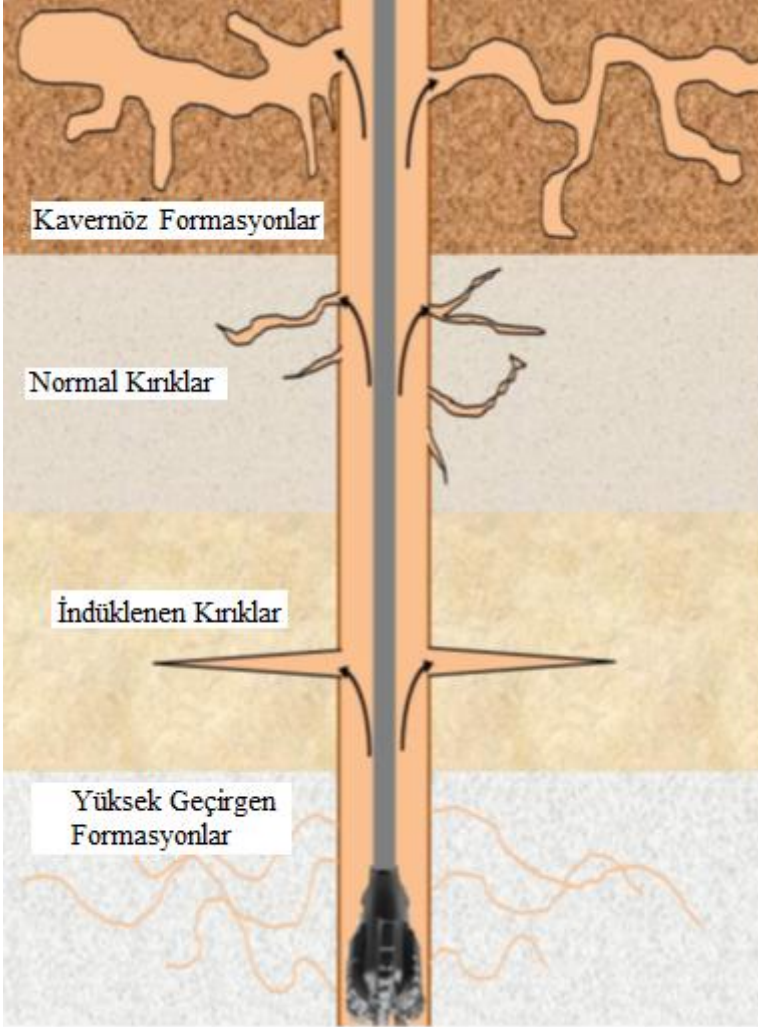
Kalın bir filtre kekinin bir takım dezavantajları vardır; bunlar arasında kekin dolaşan sondaj sıvısı tarafından aşınabilmesi, sondaj borusunun yapışmasına neden olabilmesi veya aletin çıkarılması sırasında hidrostatik basıncın azalmasına ve sondaj deliği duvarlarının kısmen çökmesine neden olabilir. Sondaj ekipmanının, kalın bir filtre keki ile kaplı sondaj deliğine yeniden girişi, formasyonun hidrokırılma potansiyelinin artmasına eşlik eden bir basınç artışına neden olabilir. Polimer çamurları düşük katı maddeli çamurlardır ve bu şekilde filtre keki oluşturmazlar. Bununla birlikte polimerler suya karşı yüksek afiniteye sahip oldukları ve sondaj deliği duvarındaki gözenekleri tıkayan şişmiş jeller oluşturdukları için sıvı kaybını azaltma eğilimindedirler.

Sirkülasyon kaybına neden olan oluşum türleri

Sirkülasyon kaybına neden olan veya sirkülasyon kaybına yatkın olan formasyon türleri veya yeraltı koşulları Şekil 1'de şematik olarak görülen dört kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Doğal veya İçsel Kırıklar
2. İndüklenen veya Oluşturulan Kırıklar
3. Kavernoöz Oluşumlar (yarıklar ve kanallar)

4. Pekışmemiş veya Yüksek Geçirgen Formasyonlar (gevşek çakıllar)dır.



Şekil 1: Sirkülasyon Kaybının gerçekleşebileceği formasyonlar (Alsaba & ark, 2014).

Kuyuların karotlanması ile indüklenen kırılmaların yatay, dikey veya deliğe çeşitli açılarda olabileceğini görülmüştür.

İndüklenmiş veya oluşturulmuş kırıklar öncelikle doğal kırıklardan ayrılır.

Çamurun indüklenen kırılmalar nedeniyle kaybedilmesi için formasyonların kırılması, bölünmesi veya parçalanmasını sağlayacak büyüklükte bir basıncın uygulanması gerekir. Oysa çamurun doğal çatlaklardan kaybolması için, formasyon içindeki sıvının basıncını aşacak basınç yeterlidir. Kavernoöz formasyonlar (yarıklar ve kanallar) da çatlaklardan farklıdır. Çamur basıncı oyukların oluşum basıncını aştığında oyuklara doğru çamur kaybı meydana gelir.

Yüksek Geçirgenliğe sahip gevşek çakıl yapıda, taneler arası boşluklar çamurun geçeceği kadar büyük olması nedeniyle kayıp gerçekleşir. Doğal çatlaklar ve yarıklarda olduğu gibi, kayıp olabilmesi için çamur basıncının formasyon basıncından yüksek olması gerekir.

Sirkülasyon kaybının gerçekleştiği formasyon tipinin belirlenmesi kaybın önlenmesi veya azaltılmasında uygulanacak stratejinin belirlenmesi bakımından önemli bir faktördür. Formasyon tipinin belirlenmesine yardımcı olacak ve karşılaşılan sirkülasyon kaybı tipinin göstergesi olan, kayıp sırasında ve hemen öncesinde yapılan saha gözlemleri ve bazı ayırt edici özellikler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Sirkülasyon kaybının gözleendiği yeraltı koşulları (Howard ve Scott, 1951)

Doğal Kırıklar	Her türlü kayada oluşabilir. Kayıp, çukurlardaki çamurun kademeli olarak alçalmasıyla anlaşılır. Delmeye devam edilirse ve daha fazla kırık ortaya çıkarsa geri dönüşümsüz kayıplar yaşanır.
İndüklenen veya Oluşturulan Kırıklar	Her türlü kayada meydana gelebilir, ancak şeyl gibi karakteristik olarak zayıf düzlemlere sahip formasyonlarda da olması beklenir. Kayıp genellikle ani olur. Çamur ağırlığının 10,5 lb/gal'i aşması indüklenen kırıkların oluşmasına zemin hazırlar. Basıncıdaki herhangi bir ani yükselişin ardından kayıp gelebilir. Sirkülasyon kaybı meydana geldiğinde ve bitişik kuyularda kayıp yaşanmamışsa, indüklenen kırıklardan şüphe edilmelidir.
Kavernöz Formasyonlar	Normalde kireçtaşıyla sınırlıdır. Ani ve tam sirkülasyon kaybı görülebilir. Sondaj ucu, kayıptan hemen önce birkaç inçten birkaç feet'e kadar düşebilir. Kayıptan önce kab bir delme yapılabilir.
Yüksek Geçirgen Formasyonlar	Çukurlardaki çamur seviyesinin kademeli olarak düştüğü gözlenir. Sondaja devam edilmesi durumunda kayıp gerçekleşir

Muhtemelen kontrol edilmesi veya önlenmesi en zor dolaşım kaybı türü, kavernöz oluşumlarda meydana gelen kayıplardır; ancak, bu tür dolaşım kaybın tüm üretim alanlarında yaygın olmadığı için indüklenen kırıklardan kaynaklanan dolaşım kaybının kontrol edilmesi daha önemli hale gelmiştir.

Kırıklara bağlı sirkülasyon kayıplarının önlenmesi

Yüksek basınç ve basınç dalgalanmalarını ortadan kaldırmaya yönelik tedbirler, çoğu zaman çatlakların oluşmasını ve çamur kaybını önlemekte başarısız olmaktadır. Formasyonları parçalayabilecek basınç ile formasyon basıncını kontrol etmek için gereken basınç arasındaki fark genellikle çok azdır ve bu nedenle sirkülasyon kaybı kaçınılmazdır. Bu koşul altında kırılmayı önlemenin olası yollarının incelenmesi, çatlakların meydana geldiği

veya karşılaşıldığı anda çamurda uygun bir malzemenin bulunmasının, çatlakları derhal tıkamaya hizmet etmesi ve böylece sıvıların çatlaklara girmesini ve genişlemesini önlemesi gerektiğini göstermektedir.

Bu durum altında kırılmayı önlemenin olası yollarının incelenmesi gerekmektedir. Anlık çatlakların oluştuğu veya çatlaklarla karşılaşıldığı anda çamurda uygun bir malzemenin bulunması, çatlakların anında tıkanmasına yardımcı olacak böylece sıvıların çatlaklara girmesini ve genişlemesini önlemiş olacaktır.

Böyle bir önleyici tedbir ile çamur akışı çatlakların genişlemesini önlediği gibi kapatılmasını da sağlayacaktır. Kırıkların tıkanması için çamura ilave edilecek en etkili kayıp dolaşım malzemesinin ve maksimum etkili konsantrasyonunun önerilmesi ise bu teorinin pratik uygulamaları arasında yer almaktadır.

Sirkülasyon kaybını önleyici malzemeler, görünüşlerine, uygulamalarına, kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılır. Bu malzemelerin sınıflandırması, sirkülasyon kaybını önlemek/iyileştirmek için karar verme süreçlerinde önemli bir faktördür. Geleneksel kayıp önleyici malzemeler görünüşlerine göre lifli, pul pul ve granüler veya bu üçünün karışımı olarak sınıflandırılmaktadırlar. Fiziksel özellikler, bu parçacıkların görünümünü ve boyutunu içerirken, kimyasal özellikler, malzemenin asitlerdeki çözünürlüğünü, şişebilirliğini ve karışımı aktive etmek için diğer kimyasallarla reaktiviteyi içerir. Kayıp önleyici malzemeler 7 kategoride yeniden sınıflandırılır (Alsaba & ark, 2014). Bunlar; granüler, pul pul, lifli, karışım, asitte çözünen, yüksek sıvı kayıplı malzemelerin sıkışmaları, şişebilen/hidratlanabilen malzemeler ve nanopartiküllerdir.

Sondaj sıvılarında atık malzemelerin kullanımı

Petrol ve gaz çıkarımı, kendini tekrarlayan uzun bir döngüdür ve gerçekleştirilmesi gereken birçok adım vardır ve her adım, kimyasal katkı maddelerinin kullanımını gerektirir. Örneğin

sondaj sıvısında kuyu stabilitesini artırmak ve sondaj sırasında istenmeyen sonuçları önlemek için kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Her kimyasal katkı maddesinin kendine özgü özellikleri vardır ve bu nedenle istenen uygulamaya bağlı olarak bu hedefe ulaşmak için özel bir kimyasal katkı maddesi gerekebilir. Çimento katkı maddeleri, kuyu tamamlama sıvıları, hidrolik kırma sıvıları ve gelişmiş petrol geri kazanımı için de özel kimyasal katkı maddeleri kullanılır. Kimyasal malzemelerin kirletici unsurları nedeniyle çevre sağlığına olumsuz etkileri, maliyetlerinin yüksek olması, güvenlik sorunları olması bu malzemelerin yerine daha temiz çevreye zararı olmayan, ucuz ve güvenilir malzemeler araştırılmaya başlanmıştır.

Atık malzemeler, çevreyi ve halkın güvenliğini etkileyebilecek birçok istenmeyen etkiye neden olabileceğinden modern toplumda giderek yaygınlaşan bir sorundur. Bu sorunları azaltmak için, bu sorunların üstesinden gelebilecek ikame bir çözüm geliştirmek çok önemlidir. Bu atık maddeler, olumsuz atıkların atılmasından ziyade, farklı hedeflere yönelik olarak yararlanılarak petrol endüstrisinde değerlendirilebilir.

Petrol ve gaz sektöründe atık malzemelerin kullanılmasıyla maliyet azalmasının yanı sıra çevresel riskler de en aza indirilebilmektedir. Ancak atık malzemelerin tamamı petrol ve gaz endüstrisinde uygulanamaz; bu nedenle hangi atık malzemelerin değerlendirilebileceği konusunda kapsamlı araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için, çeşitli atık malzemeleri araştırmak ve bunların petrol endüstrisinde kullanılıp kullanılmayacağını anlamak önemlidir. Birçok yazar ve araştırmacı, petrol endüstrisinde uygulanacak sondaj sıvısı katkı maddeleri olarak atık malzemelerin kullanımını araştırarak katkıda bulunmuştur.

Örneğin yenmeyen gıda atıkları, sondaj sıvısının özelliklerini değiştirmek gibi başka kullanımlar için kullanılabilir.

İşcan & Kök (2007) tarafından yapılan çalışmada ceviz kabuklarının kullanılmasıyla ile çamurun reolojik ve filtrasyon

özellikleri incelenmiş 6 mm'lik toz haline getirilmiş ceviz kabuğunun su kaybını azaltmada etkili olduğu bulunmuştur.

Pirinç kabuğu kullanarak çamurun filtrasyon özelliklerini incelendiği çalışmada ve pirinç kabuğunun, su kaybını polimer ve karboksimetil selüloz ile karşılaştırılabilecek düzeyde azalttığı görülmüştür. (Okon, Udoh & Bassey, 2014).

Dağde & Nmegbu (2014) tarafından yapılan çalışmada sondaj çamuruna eklenen yüksek konsantrasyonlarda yer fıstığı kabuğunun, su kaybını önlemede polimerler ile rekabet edebilecek düzeyde olduğu görülmüştür.

Hurma çekirdeği tozu, kil içermeyen su ve tuzlu su bazlı çamurlarda filtre kaybı kontrol katkı maddesi olarak kullanılabilceği görülmüştür (Amanullah & ark., 2016)

Şeker kamışı küspesi külünün, sıvı kaybını azalttı ve ince ve tutarlı kekler ürettiği; ancak artan sıcaklıkla birlikte kek kalınlığı ve su kaybının arttığı görülmüştür (Saengdee & Terakulsatit, 2017)

Pirinç kabuğu ve muz kabuklarını kayıp önleyici olarak kullanıldığı çalışmada önemli miktarlarda, pirinç kabuğu ve muz kabuklarının bir karışımının, sondaj çamurlarında reoloji ve filtrasyon kontrol katkı maddesi olarak kullanılabilceği görülmüştür (Seteyeobot, Uma & Enaworu, 2017).

Sondaj çamuruna kayıp önleyici malzeme olarak Hindistan cevizi kabuğu ve mısır koçanı ilave ederek su kaybı inceledikleri çalışmada mısır koçanının su kaybını hindistancevizi kabuğundan daha iyi önlediği, her ikisinin birleştirildiğinde ise sıvı kaybı kontrol maddesi olarak performansları tek başına kullanılmaya göre daha fazla olduğun sonucuna varmışlardır (Onuh & ark., 2017).

Al-Hameedi & ark. (2019a), sondaj sıvısının filtrelenmesini ve reolojisini geliştirmek için mandalina kabuğu tozunu kullanmışlardır ve mandalina kabuğu tozunun filtrasyonu azalttığını ve reolojik özellikleri iyileştirdiğini bulunmuştur. Patates kabuğu tozu, araştırılan gıda atıklarının bir başka örneğidir ve etkili bir

sondaj sıvısı katkı maddesi olduğunu görüldü. Çamura ilave edildiğinde plastik viskoziteyi arttırdı, akma noktasını ve jel mukavemetini en aza indirdi ve filtrasyonu azalttı, ancak çamur ağırlığı üzerinde hiçbir etki göstermedi. (Al-Hameedi & ark, 2020).

Diğer biyolojik olarak parçalanabilen atık olan palmiye ağacı yaprağı tozu üzerine yapılan çalışmalar, çamurun alkalinitesini ve filtrasyonunu azalttığını gösterdi Al-Hameedi & ark. (2019b). Çamura ilave edilen palmiye ağacı yaprağı tozu esas olarak çamurun akma noktasını ve jel mukavemetini önemli ölçüde azalttığı için akışkan inceltici bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği görüldü. Diğer yazarlar atık katkı maddelerinin petrol endüstrisinde farklı kullanımlar yoluyla değerlendirilmesine ilişkin çalışmalara değinmişlerdir. Petrol endüstrisinde kullanılması mümkün olan bir diğer atık katkı maddesi ise çimdir. Çim atığı ve tozu, sondaj çamuruna eklenerek filtreleme özelliklerini ve çamur reolojik özelliklerini analiz etmek için çevre dostu bir malzeme olarak kullanılabilir (Al-Hameedi & ark. 2019c; Hossain & Wajheuddin 2016).

Ağaçlardan üretilen atıkların sondaj sıvılarında kaçağı iyileştirmek ve önlemek için kullanılabilirliği bildirilmiştir (Ramasamy & Amanullah, 2018). Bu atık malzemeleri sondaj sıvılarının üretim ve kuyu tamamlama gibi diğer uygulamaları için de kullanılabilir. Biyolojik olarak parçalanabilen malzemenin yatay bir kuyunun kırılmasında kullanılarak deliklerini tıkayabildiği görülmüştür (Carpenter, 2015). Babey & ark. (2015), biyolojik olarak parçalanabilen katkı maddelerinin tamamlama sıvılarında kullanıldığı iki kuyu ile ilgili bir vaka çalışması başlatmışlardır. Bu nedenle, atık malzemelerin mevcudiyeti oldukça fazladır ve bu atıklar, petrol endüstrisindeki birçok uygulamada değerlendirilebilir.

Özetle atık malzemeler petrol endüstrisinde kullanılma potansiyeline sahiptir ve gelecek için iyi bir alternatif de olabilir. Örnek olarak, sondaj sıvısının ortalama maliyeti, somut bir maliyet olarak kabul edilen sondaj operasyonunun toplam maliyetinin yaklaşık onda biri kadardır. Atık malzemelerin sondaj

sıvısı katkı maddesi olarak kullanılmasıyla sondaj sıvısının maliyeti en aza indirilebilir. Atık malzemelerin öneminin ve bunların petrol ve gaz endüstrisinde gelecekteki uygulamalar için nasıl değerlendirilebileceğinin daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırma ve araştırma yapılmalıdır.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada fındikkabuğu, siyah ayçekirdek kabuğu, tapyoka nişastası, selüloz lifi ve ceviz kabuğu gibi gıda atıklarının sondaj çamurunda kayıp önleyici malzeme olarak kullanılabilirliği araştırıldı. Sondaj çamuru olarak su bazlı bir çamur olan KCl ve lignosülfonat çamuru kullanıldı. Çamurlar TPİC (Turkish Petroleum International Company)'den temin edildi. Fındikkabuğu, siyah ay çekirdeği kabuğu ve ceviz kabuğu local kuruyemiş satan bir marketten kuruyemiş olarak temin edildi. Kabukları bilyalı değirmende öğütüldü sonra faklı delik çaplarına sahip eleklerden oluşan elek sisteminden geçirilerek farklı tanecik büyüklükleri elde edildi. Tapyoka Nişastası ve Selüloz lifi online satış yapan ticari bir marketten temin edildi. Deneysel çalışmada kullanılan su bazlı çamurların bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deneyselerde Kullanılan Su Bazlı Çamurların Bileşimi

KCl çamuru		Lignosülfonat çamuru	
Soda külü	0.5 ppb	Soda külü	0.5 ppb
NaOH	0.5 ppb	NaOH	0.3 ppb
KCl	33 ppb	CFL	0.1 ppb
Sitrik asit	0.2 ppb	CMC-LV	3 ppb
NaCl	8 ppb	Bentonit	15 ppb
pac-lv	3 ppb		
Nişasta	5 ppb		
XCD	0.5 ppb		
CaCO ₃	10 ppb		

Çalışma aşağıdaki deneysel plânda yürütüldü:

i. KCl çamuruna 0,125 mm ve 0,250 mm çaplarına sahip fındık kabuğu'nun her 100 mL başına sırasıyla 1g, 2g, 3g eklenmesi

ile hem tanecik büyüklüğünün hem de madde miktarının etkisi çalışıldı.

ii. Lignosülfonat çamuruna fındıkkabuğu, siyah çekirdek kabuğu, taypoka nişastası ve ceviz kabuğu 2g/100mL, Selüloz lifi ise 0,5g/100mLmiktarda eklenmesi ile farklı malzeme etkisi çalışıldı.

iii. Aynı miktar malzeme için iki çamur mukayese edildi.

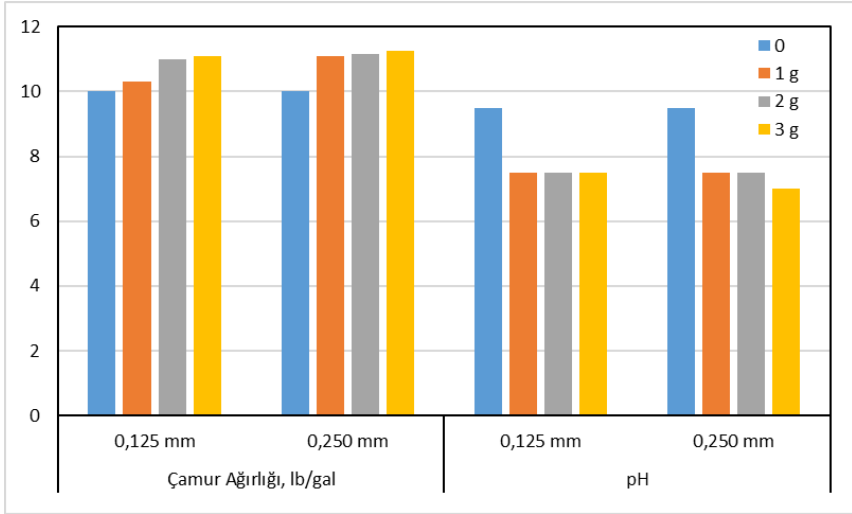
Deneyler Batman Üniversitesi Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Çamurun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla çamur ağırlığı, pH, filtrasyon özellikleri (sıvı kaybı, filtre keki) ve reolojik özellikleri (görünür viskozite, plastik viskozite, kopma noktası, jel mukavemeti) ölçümleri yapıldı. Tüm cihazların kalibrasyonu TPİC 'den gelen saha ekibi tarafından kontrol edildi.

Çamur yoğunluğu, çamur terazisi ile, pH değeri pH kâğıtları kullanılarak görünür viskozite, plastik viskozite, kopma noktası ve jel mukavemeti gibi reolojik özellikleri 6 hızlı döner viskometre cihazı (Fann model 35 SA) kullanılarak ve son olarak filtrasyon özellikleri düşük basınç düşük sıcaklık filtrepresi kullanılarak belirlendi.

Araştırma Bulguları ve Tartışma

KCl Çamuru ile Elde Edilen Deney Bulguları

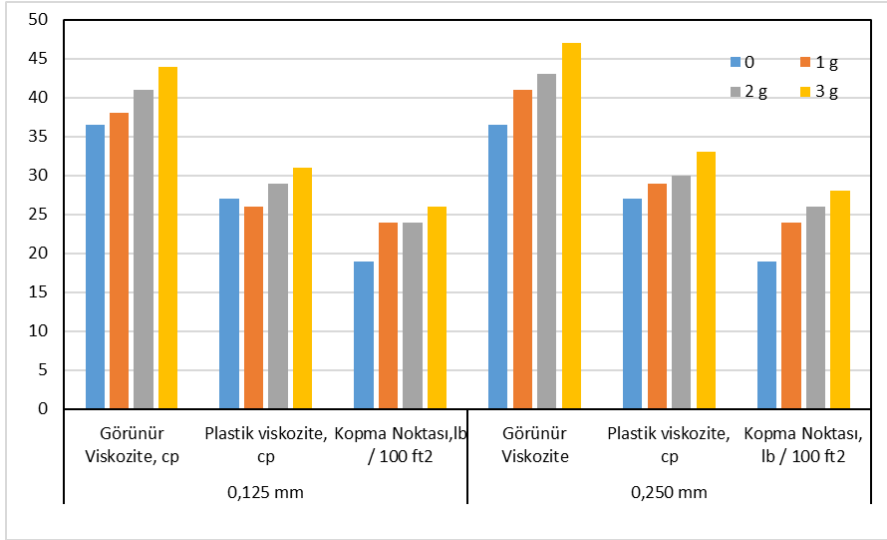
KCl çamuruna 0,125 mm ve 0,250 mm çaplı fındıkkabukları farklı miktarlarda (1 g/100 mL, 2 g /100 mL ve 3 g/100 mL) eklendikten sonra çamur ağırlığı ve pH' ı ölçüldü. Sonuçlar Şekil 2'de verildi.



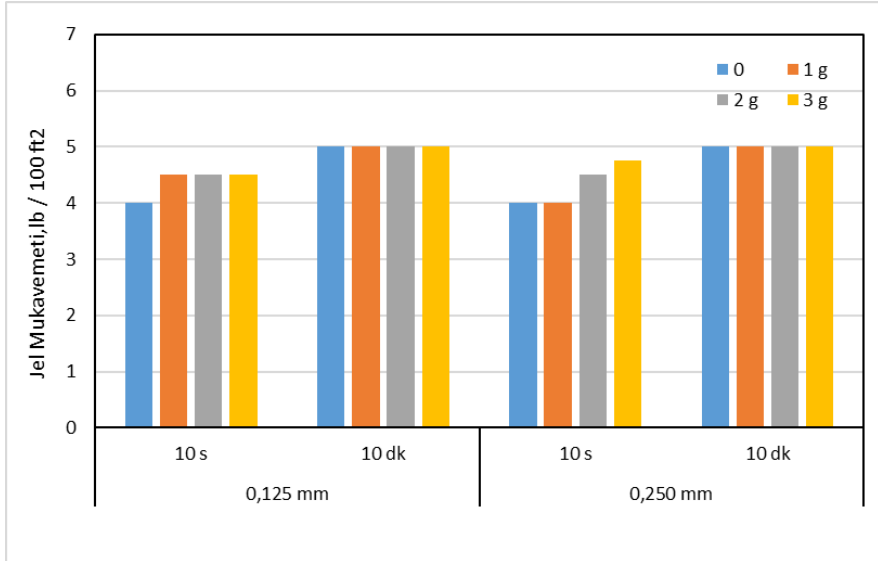
Şekil 2. KCl Çamuruna Eklenen Fındık Kabuğu Miktarı ve Tanecik Büyüklüğünün Çamur Ağırlığı ve pH Değerlerine Etkisi

Şekil 2'den görüldüğü üzere her tanecik büyüklüğünde eklenen madde miktarına artmasıyla çamur ağırlığı artmaktadır. Bu artış küçük tanecikli yapıda nisbeten doğrusal olurken büyük tanecik çaplıda fındıkkaşu eklenmesi ile artmış ama bu artış madde miktarına önemli ölçüde bağılı kalmamıştır. KCl çamuruna fındıkkaşu ilave etmek pH' ı önemli ölçüde azaltmıştır ancak bu azalmanın madde miktarından bağımsız olduğu söylenebilir.

KCl çamuruna eklenen fındıkkaşunun çamurun reolojik özelliklerine etkisini görebilmek amacıyla hesaplanan görünür viskozite, plastic viskozite ve kopma noktaları Şekil 3'de, jel mukavemetleri Şekil 4'de grafiğe geçirildi.



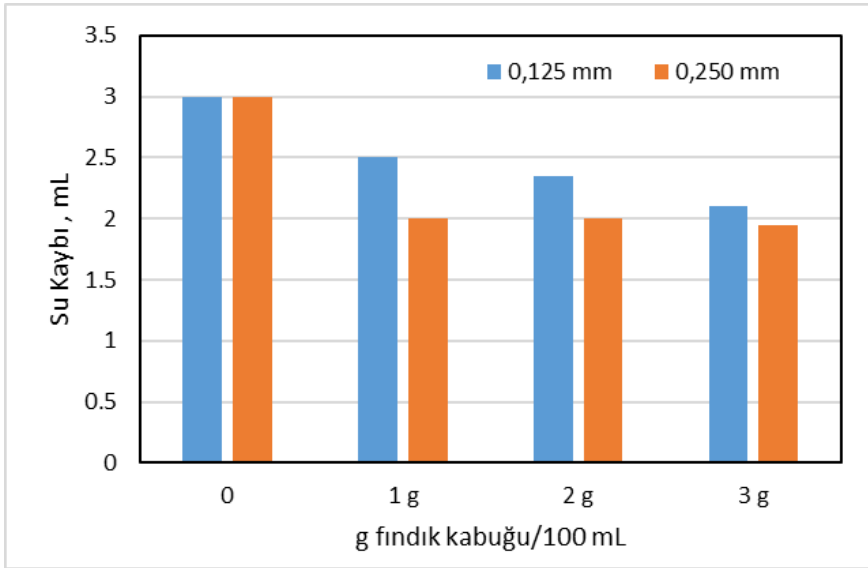
Şekil 3. KCl Çamuruna Eklenen Fındık Kabuğu Miktarı ve Tanecik Büyüklüğünün Görünür Viskozite, Plastik Viskozite ve Kopma Noktasına Etkisi



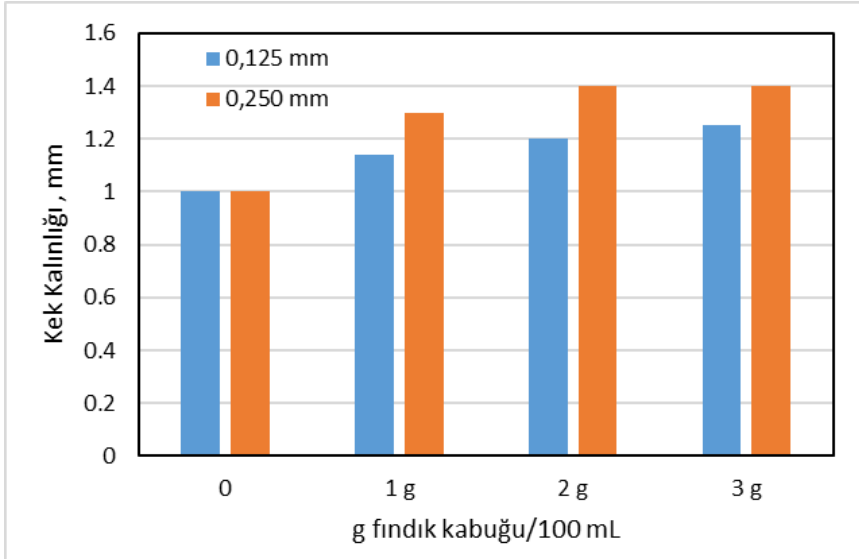
Şekil 4. KCl Çamuruna Eklenen Fındık Kabuğu Miktarı ve Tanecik Büyüklüğünün Jel Mukavemetine Etkisi

Şekil 3'den görüldüğü üzere madde miktarının artması ile viskoziteler ve kopma noktaları belirgin şekilde artarken tanecik büyüklüğündeki artış ile viskozitelerde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 4'de verilen Jel mukavemetleri incelendiğinde 10s jelinde çok az bir artış görülürken 10 dakika jelinde hiçbir değişim görülmemiştir.

KCl çamuruna eklenen fındikkabuğunun çamurun filtrasyon yeteneğine nasıl etki ettiğini görebilmek amacıyla Şekil 5' de su kaybı Şekil 6' da kek kalınlığı verilmiştir. Şekil 5'de görüldüğü üzere eklenen fındikkabuğu miktarı arttıkça su kaybı azalmaktadır. 0,125 mm çaplı taneciklerde su kaybındaki azalma sürekli devam ederken 0,250 mm çapındaki taneciklerde fındikkabuğu ilavesi su kaybını azaltmıştır ancak bu azalma madde miktarından bağımsızdır.



Şekil 5. KCl Çamuruna Eklenen Fındık Kabuğu Miktarı ve Tanecik Büyüklüğünün Su Kaybına Etkisi

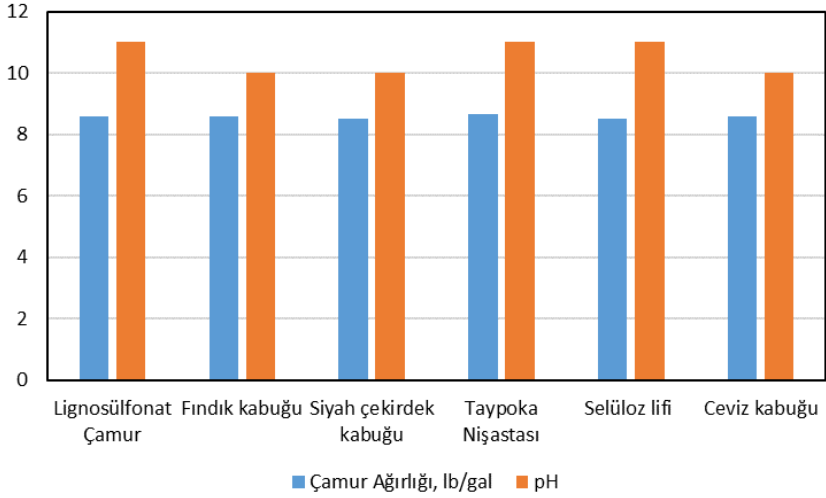


Şekil 6. Eklenen Fındık Kabuğu Miktarı ve Tanecik Büyüklüğünün KCl Çamurunun Kek Kalınlığına Etkisi

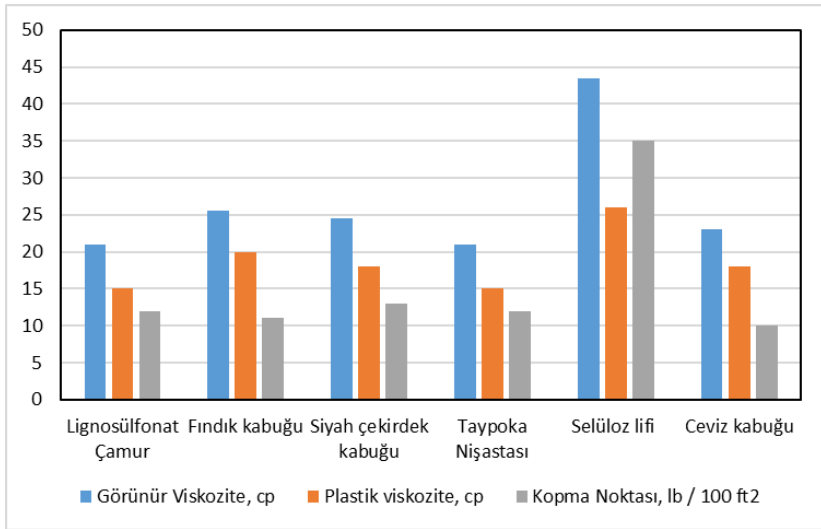
Şekil 6'dan görüldüğü üzere KCl çamuruna fındık kabuğu ilavesi oluşan filtre kekinin de kalınlığını da bir miktar artırmıştır. 0,250 mm çaplı taneciklerde elde edilen keklerin kalınlıkları 0,125 mm çaplı taneciklere göre biraz daha fazla olsa da bu değerler çamur sirkülasyonu açısından sorun oluşturmayacak seviyededir.

Lignosülfonat Çamuru ile Elde Edilen Deney Bulguları

Lignosülfonat çamuruna farklı malzemeler ilave edilerek kayıp önleyici malzeme olarak kullanımını incelemek amacıyla fındık kabuğu, ceviz kabuğu, siyah çekirdek kabuğu, tapyoka nişastası ve selüloz lifi ilave edildikten sonra çamurun fiziksel özellikleri incelendi. Çamur ağırlığı ve pH değerleri Şekil 7'de, viskoziteler ve kopma noktası Şekil 8'de jel mukavemetleri ise Şekil 9'da verilmiştir.



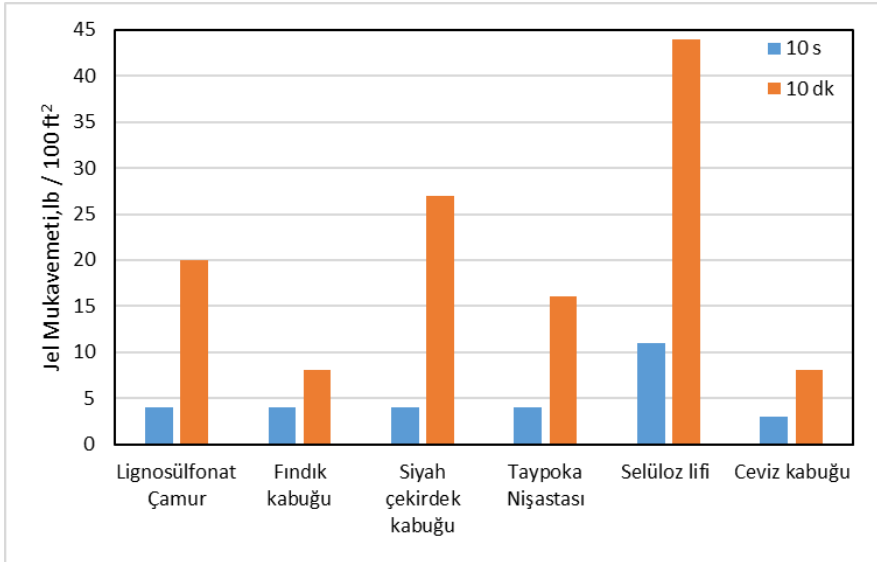
Şekil 7. Lignosulfonat Çamuruna Farklı Malzeme İlavésinin Çamur Ağırlığı ve pH'ına Etkisi



Şekil 8. Lignosulfonat Çamuruna Farklı Malzeme İlavésinin Viskozitelere ve Kopma Noktasına Etkisi

Şekil 7’den görüldüğü üzere söz konusu malzemelerin ilave edilmesi lignosülfonat çamurunun ağırlığında hissedilir bir değişime neden olmamıştır. Fındıkkabuğu, siyah çekirdek kabuğu ve ceviz kabuğu çamur pH’ını azaltırken tapyoka nişastası ve selüloz lifi ilavesinde pH’da değişim gözlenmemiştir.

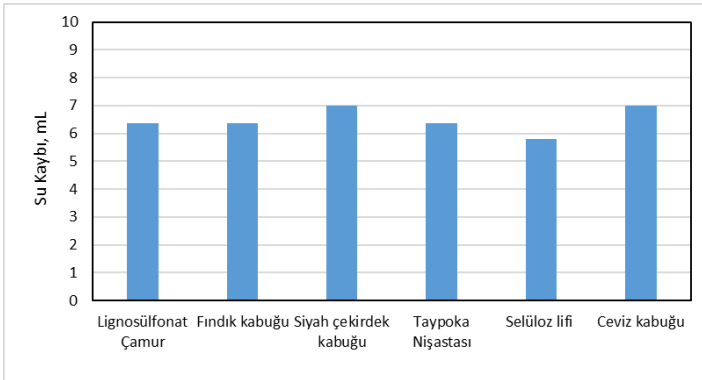
Şekil 8’de verilen sonuçlar irdelendiğinde tapyoka nişastası dışında tüm malzemelerin görünür viskoziteyi artırdığı en çok artıran malzemenin ise yüksek şişme özelliğine sahip selüloz lifi olduğu görülmektedir. Plastik viskozite değerlerine bakıldığında tapyoka nişastasında aynı kaldığı diğer tüm malzemelerde yükselme eğiliminde olduğu ve plastik viskoziteyi en çok yükselten malzemenin selüloz lifi olduğu görülmektedir. Kopma noktası için selüloz dışındaki diğer malzemelerin dikkate değer bir fark oluşturmadığı ancak selüloz lifi ilavesi ile % 67’ lik bir artışa neden olduğu görülmektedir.



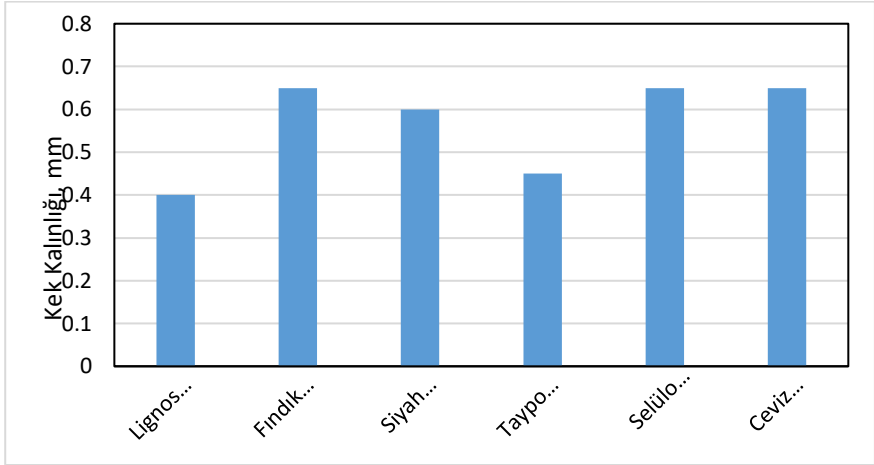
Şekil 9. Lignosülfonat Çamuruna Farklı Malzeme İlavesinin Jel Mukavemetine Etkisi

Şekil 9’da verilen jel mukavemetleri incelendiğinde 10 saniye jelinde selüloz lifi dışındaki malzemelerin değişim oluşturmadığı, 10 dakika değerlerinde ise fındıkkabuğu, tapyoka nişastası ve ceviz kabuğunun jel mukavemetini düşürürken siyah çekirdek kabuğu ve selüloz lifinin artırdığı görülmektedir. Jel mukavemetini en çok azaltan malzemelerin fındıkkabuğu ve ceviz kabuğu, en çok artıran malzemenin ise selüloz lifi olduğu söylenebilir.

Lignosülfonat çamuruna farklı malzeme ilave edilmesiyle çamurun filtrasyon özellikleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 10’da su kaybı Şekil 11’de filtre keki kalınlığı olarak verilmiştir. Kayıp önleyici malzeme de birincil amaç su kaybını azaltmasıdır. Şekil 10 incelendiğinde sadece selüloz lifinin su kaybını azalttığı onun da çok dikkat çekici düzeyde olmadığı söylenebilir. Viskoziteleri önemli ölçüde artıran selüloz lifinin su geçişini önlememesi de önemli bir bulgu olarak görülmektedir. Burada çamurun lignosülfonat çamur olmasından da kaynaklanmakta olabileceği, KCl veya diğer su bazlı çamurlarda farklı davranış sergileyebileceği düşünülmektedir. Fındıkkabuğu ve tapyoka nişastası ilavesinin değişim oluşturmadığı siyah çekirdek kabuğu ve ceviz kabuğu ilavesinde ise bir miktar artış olduğu görülse de birbirine çok yakın sonuçlar olduğu için değişimin önemli olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Lignosülfonat Çamuruna Farklı Malzeme İlavesinin Su Kaybına Etkisi



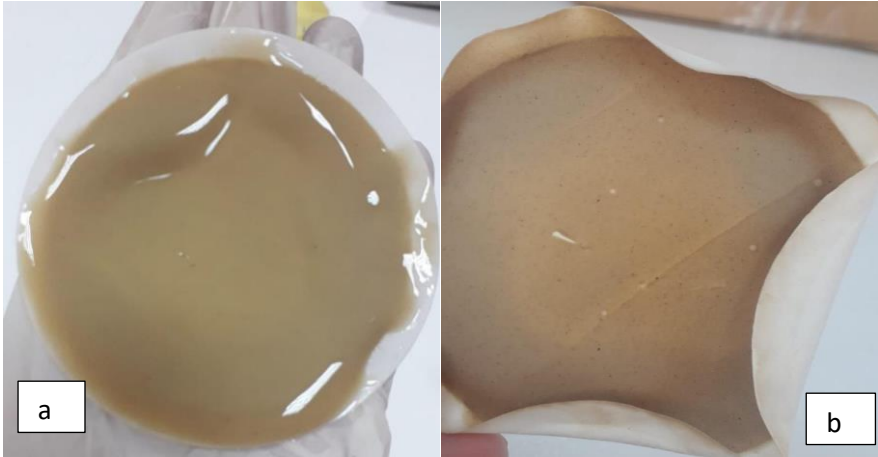
Şekil 11. Lignosülfonat Çamuruna Farklı Malzeme İlavesinin Kek Kalınlığına Etkisi

Şekil 11’deki kek kalınlıkları incelendiğinde en az tapyoka nişastası olmak üzere tüm malzemelerin ilavesi ile daha kalın filtre kekleri elde edilmiştir. Ancak lignosülfonat çamuru ile çok ince kekler elde edildiği için söz konusu malzemelerin ilavesi ile kek kalınlığındaki bu artış önemli sayılmamaktadır ve sirkülasyonda kesinlikle sorun oluşturacak seviyede değildir.

Filtrasyon deneylerinde elde edilen keklerin bazılarının fotoğrafları da verilmiştir. Lignosülfonat çamuruna ilave edilen siyah çekirdek kabuğu ile elde edilen kek Şekil 12’ de, selüloz lifi Şekil 13’de, fındıkkabuğu Şekil 14’de görülmektedir. Bu şekillerde filtre keklerinin, deneyin hemen sonrasında ve kuruduktan sonraki görünüşleri yer almaktadır. Şekillerden keklerin kuruduktan sonra geçirimsiz ve iyi bir kalınlığa sahip olduğu görülmektedir. Şekil 15 de ise KCl çamuruna fındıkkabuğu ilavesi sonucunda oluşan kek görülmektedir. Çamurların birbirinden farklı davranış göstermeleri nedeniyle elde edilen kek görüntüleri de farklı olmuştur.



Şekil 12 . Siyah Çekirdek Kabuğu(2 g 0.125 mm) İlaveli Lignosülfonat Çamuru İle Elde Edilen Filtre Keki (a) Deney Sonrası, (b) Kuruduktan Sonra



Şekil 13. Selüloz Lifi (0,5 g 0,125 mm) Eklenmiş Lignosülfonat Çamuru İle Elde Edilen Filtre Keki (a) Deney Sonrası, (b) Kuruduktan Sonra



Şekil 14. Fındıkkabuğu (2 g 0,125 mm) Eklenmiş Lignosülfonat Çamuru İle Elde Edilen Filtre Keki (a) Deney Sonrası, (b) Kuruduktan Sonra



Şekil 15 .Fındıkkabuğu (2 g 0,125 mm) İlave Edilmiş Kcl Çamuru İle Elde Edilen Filtre Keki

Aynı miktar malzeme için iki çamur mukayesesi

İki farklı çamur tipinin kullanıldığı çalışmada elde edilen bulguların birbiri ile mukayeselerini yapmak amacıyla hiçbir malzeme ilave edilmeden ve her ikisinde de ortak çalışılan malzeme olan fındıkkabuğu ilave edildikten sonra çamurun fiziksel özellikleri incelendi ve sonuçlar Tablo 3' de özetlenmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde, lignosülfonat çamurunun KCl çamuruna kıyasla daha düşük çamur ağırlığına sahip olduğu, daha düşük görünür ve plastik viskozite ve kopma noktası gösterdiği, 10 s 10 dakika jelleri arasında ciddi fark olduğu ve yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde filtrasyon özellikleri incelendiğinde lignosülfonat çamurun yüksek su kaybı ve çok düşük kek kalınlığı göstermesi nedeniyle çatlaklı formasyonlara uygun bir çamur tipi olmadığı söylenebilir. Her ikisine de eklenen fındıkkabuğu çamur ağırlığında önemli bir değişim göstermemiştir ancak görünür viskozite, pilastik viskozite ve özellikle KCl çamurda kopma noktasında belirgin artışa neden olmuştur. Fındıkkabuğu ilavesi ile 10 saniye jel mukavemetinde değişim gözlenmezken lignosülfonat çamurda belirgin bir düşüş oluşturmuştur. Filtrasyon özellikleri incelendiğinde ise fındıkkabuğu ilavesi KCL çamurunda su kaybını azaltırken lignosülfonat çamurda kek kalınlığını artırmıştır.

Tablo 3. 2 g/100ml Fındikkabuğu İlavesi İle KCl ve Lignosülfonat Çamurlarının Fizksel Özelliklerindeki Değişim

	KCl	KCL +fındikkabuğu	Lignosülfont	Lignosülfonat +fındikkabuğu
Ağırlık, lb/gal	10	11	8,6	8,6
Görünür Viskozite, cp	36, 5	41	21	25,5
Plastik viskozite, cp	27	29	15	20
Kopma Noktası, lb/100 ft ²	19	24	12	11
Jel mukavemeti 10 s,lb / 100 ft ²	4	4,5	4	4
Jel mukavemeti 10 dk, lb / 100 ft ²	5	5	20	8
Sıvı Kaybı Miktarı (mL)	3	2,35	6,35	6,35
Kek kalınlığı (mm)	1	1,2	0,4	0,65
pH	9,5	7,5	11	10

Sonuçlar ve Öneriler

Madde miktarının artması çamur yoğunluğunu az miktarda artırmış bu artış sadece küçük tanecik çapında daha belirgin gerçekleşmiştir. KCL çamuruna eklenen fındikkabuğu pH'ı önemli ölçüde azaltmıştır ancak değişim madde miktarı ve tanecik büyüklüğünden bağımsız gerçekleşmiştir. Madde miktarının viskoziteler üzerine olumlu etkisi olurken tanecik büyüklüğünün artmasıyla önemli bir etki oluşmadığı söylenebilir. Tanecik büyüklüğü ve madde miktarının çamurun jel mukavemetine etkisinin olmadığı gözlenmiştir. KCl çamurda su kaybı ve filtre keki kalınlığı küçük tanecik çaplı malzemede madde miktarına daha bağımlıyken tanecik büyüklüğünün artışı ile madde miktarının etkisi önemsiz olmuştur.

Lignosülfonat çamurda tüm malzemeler reolojik özelliklerde iyileşme sağlarken Selüloz lifi ve Siyah çekirdeki kabuğu artan jel

olarak isimlendirilen çeşitli riskler taşıyan bir jel tipine benzer davranış sergiledikleri düşünüldüğünden bu malzemeler için madde miktarı tanecik çapı gibi başka parametrelerin de incelenmesi yerinde olacaktır. Eklenen malzemelerin filtrasyon özelliklerini de iyileştirmediğinden ek parametrelere ihtiyaç duyulduğu veya farklı karışımlar oluşturulabileceği düşünülmektedir.

Bir sondaj operasyonunda sondaj çamurunun görünür viskozitesinin min 12-15 cp aralığında plastik viskozitenin ise minimum 6-8 cp aralığında olması, kopma noktasının ise plastik viskozitenin üç katını geçmemesi veya 50 lb/100 ft² değerinden küçük olması kek kalınlığının 1-2 mm civarında veya maksimum 4 mm olması istenir. (API SPEC 13A, 2010). Bu çalışmada elde edilen sonuçların API standartları ile uygunluk gösterdiği görülmektedir.

KAYNAKÇA

Al-Hameedi, A. T. T., Alkinani, H. H., Dunn-Norman, S., Al-Alwani, M. A., Alshammari, A. F., Albazzaz, H. W., ... & Mutar, R. A. (2019a). Insights into the application of new eco-friendly drilling fluid additive to improve the fluid properties in water-based drilling fluid systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183, 106424.

Al-Hameedi, A. T., Alkinani, H. H., Dunn-Norman, S., Alashwak, N. A., Alshammari, A. F., Alkhamis, M. M., & Albazzaz, H. W. (2019b). Missouri University of Science and Technology. *Mutar, RA, Ministry of Communications and Technology*, 23-24.

Al-Hameedi, A. T., Alkinani, H. H., Dunn-Norman, S., Albazzaz, H. W., & Alkhamis, M. M. (2019c). Insights into eco-friendly and conventional drilling additives: applications, cost analysis, health, safety, and environmental considerations. In *SPE Symposium: Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility*. OnePetro.

Al-Hameedi, A. T. T., Alkinani, H. H., Dunn-Norman, S., Al-Alwani, M. A., Al-Bazzaz, W. H., Alshammari, A. F., ... & Mutar, R. A. (2020). Experimental investigation of bio-enhancer drilling fluid additive: Can palm tree leaves be utilized as a supportive eco-friendly additive in water-based drilling fluid system?. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 595-603.

Alsaba, M., Nygaard, R., Hareland, G., & Contreras, O. (2014, April). Review of lost circulation materials and treatments with an updated classification. In *AADE National Technical Conference and Exhibition*, Houston, TX (pp. 1-9).

Amanullah, M., Ramasamy, J., Al-Arfaj, M. K., & Aramco, S. (2016). Application of an indigenous eco-friendly raw material as

fluid loss additive. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139, 191-197.

Awele, N. (2014). Investigation of additives on drilling mud performance with " tønder geothermal drilling" as a case study. *Master. Aalborg University Esbjerg*.

Babey, A., Schmeltz, P., & Fragachan, F. (2015, September). Using eco-friendly biodegradable materials for designing new completions and Re-fracturing acidizing applications in which diversion and zonal isolation enhance efficiency. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (p.

Boyou, N. V., Ismail, I., Sulaiman, W. R. W., Haddad, A. S., Husein, N., Hui, H. T., & Nadaraja, K. (2019). Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176, 220-231.

Carpenter, C. (2015). Use of biodegradable materials during refracturing of a horizontal well. *Journal of Petroleum Technology*, 67(05), 137-139.

Cheraghian, G. (2021). Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art. *Journal of materials research and technology*, 13, 737-753.

Dagde, K. K., & Nmegbu, C. G. J. (2014). Drilling fluid formulation using cellulose generated from groundnut husk. *International Journal of Advancement in Research and Technology*, 3(6), 2278-7763.

Hossain, M. E., & Wajheeuddin, M. (2016). The use of grass as an environmentally friendly additive in water-based drilling fluids. *Petroleum Science*, 13, 292-303.

Howard, G. C., & Scott Jr, P. P. (1951). An analysis and the control of lost circulation. *Journal of Petroleum Technology*, 3(06), 171-182.

Idress, M., & Hasan, M. L. (2020). Investigation of different environmental-friendly waste materials as lost circulation additive in drilling fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 233-242.

Iskan, A. G., & Kok, M. V. (2007). Effects of walnut shells on the rheological properties of water-based drilling fluids. *Energy Sources, Part A*, 29(11), 1061-1068.

Liu, Q., & Santamarina, J. C. (2018). Mudcake growth: Model and implications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162, 251-259.

Nicora, L. F., Pirovano, P., Blomberg, N., & Taugbøl, K. (2001, February). High-density invert-emulsion system with very low solids content to drill ERD and HPHT wells. In *SPE International Conference on Oilfield Chemistry?* (pp. SPE-65000). SPE.

Okon, A. N., Udoh, F. D., & Bassey, P. G. (2014, August). Evaluation of rice husk as fluid loss control additive in water-based drilling mud. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition* (pp. SPE-172379). SPE.

Okrajni, S. S., & Azar, J. J. (1986). The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1(04), 297-308.

Onuh, C.Y., Igwilo, K.C., Anawe, P.A.L., Olakunle, D., Omotoke, O., (2017). Environmentally friendly fluid loss control agent in water-based mud for oil and gas drilling operations. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 12 (8), 1520–1523. Research India Publications.

Orodu, O. D., Orodu, K. B., Afolabi, R. O., & Dafe, E. A. (2018). Rheology of Gum Arabic Polymer and Gum Arabic Coated Nanoparticle for enhanced recovery of Nigerian medium crude oil under varying temperatures. *Data in brief*, 19, 1773-1778.

Rafati, R., Smith, S. R., Haddad, A. S., Novara, R., & Hamidi, H. (2018). Effect of nanoparticles on the modifications of

drilling fluids properties: A review of recent advances. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161, 61-76.

Ramasamy, J., & Amanullah, M. (2018, April). A novel superfine fibrous lost circulation material derived from date tree for seepage loss control. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. OnePetro.

Saengdee, A., & Terakulsatit, B. (2017). Utilization of Sugarcane Bagasse Ash as Filtration Loss Control Agent in Water Based Drilling Muds. *Journal of Engineering and Innovation*, 10(1), 37-48.

Schlumberger, (2020). Gel Strength. Schlumberger oilfield glossary. https://glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/g/gel_strength.aspx. (Accessed 28 September 2020).

Seteyeobot, I., Uma, J. A., & Enaworu, E. (2017, July). Experimental Study of the Possible use of Locally Derived Plantain Peelings and Rice Husk as Additives for Oil Based Mud at High Temperature-High Pressure Conditions. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition* (p. D023S025R001). SPE.

Shahsavani, E., Afrand, M., & Kalbasi, R. (2018). Using experimental data to estimate the heat transfer and pressure drop of non-Newtonian nanofluid flow through a circular tube: applicable for use in heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 129, 1573-1581.

Skalle, P. (2011). *Drilling fluid engineering*. Bookboon.

Smith, S. R., Rafati, R., Haddad, A. S., Cooper, A., & Hamidi, H. (2018). Application of aluminium oxide nanoparticles to enhance rheological and filtration properties of water based muds at HPHT conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 537, 361-371.

Trenchless Technology, (2013) Gel Strengths for Horizontal vs. Vertical Drilling. <https://trenchlesstechnology.com/gel->

strengths-for-horizontal-vs-vertical-drilling/.(Accessed 1 December 2023).

Türkiye Petrolleri [TP] (2007). Sondaj akışkanları teknolojisi (lignosülfonat çamuru). Araştırma Merkezi Daire Başkanlığı Sondaj Teknolojisi Müdürlüğü, Ankara.

BÖLÜM VI

Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç (Hpht) Rezervuarlarının Karakteristikleri – Kuzey Kuveyt Hpht Jura Rezervuarlarına Genel Bir Bakış

**Samar ALYOUNES¹
Derya KOCA²**

Giriş

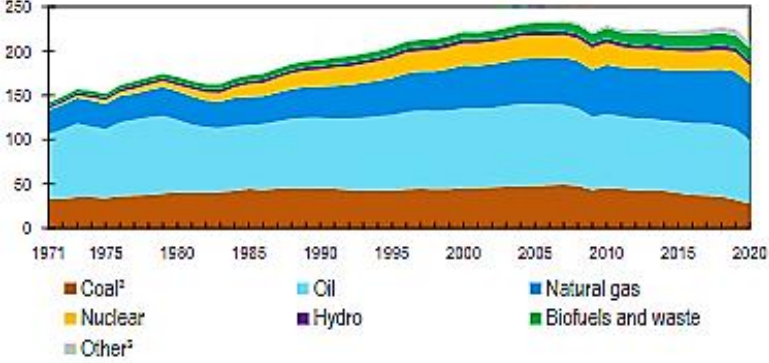
Dünya genelindeki ekonomiler, modernizasyonun planlama ilkelerine göre inşa edildikten sonra büyük ölçüde fosil yakıt bazlı enerjiye bağımlıdır. Ayrıca yenilenemeyen kaynaklara dayalı enerji tüketimi sürekli artmaktadır. 1973 ve 2012 yılları arasında dünyadaki toplam birincil enerji arzı 6'dan 13 Gtoe'ye yükseldi, bu da enerji üretiminin sadece 40 yılda iki katından fazla arttığını gösteriyor (Karjalainen & ark., 2014) (Şekil 1). Enerji üretimi, ulaşım yakıtları ve tüketici ürünleri dahil olmak üzere petrol ve

¹ Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Petrol ve Doğalgaz Müh. ABD

² Dr. Öğr. Üyesi, Batman Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Petrol ve Doğalgaz Müh.

doğalgaz sektörü birçok hizmetlerde kullanmaya devam etmektedir. Gelişmekte olan ekonomilerde nüfus ve tüketici satın alma gücündeki artışa bağlı olarak, petrol ve gazın genel küresel enerji tüketiminin bugünden 2030 yılına kadar %34 olarak artması beklenmektedir (Marhoon, 2020). HPHT rezervuarları genellikle rezervuarın derinliğinde kesintisiz kuyu debi sıcaklığının 300°F'ten daha yüksek olduğunu, gözenekli oluşumu maksimum gözenek basıncı ile kazılıp ve 0,8 psi/ft'lik hidrostatik gradyanı aşan bir rezervuar olarak tanımlanır ve genellikle 10 000 psi'lik bir BOP ihtiyaç duyulur (Marhoon, 2020). Ek rezervlerin araştırılmasıyla HPHT kuyuları ve rezervleri gittikçe petrol ve doğalgaz sektörünün odaklandığı konu olmaya başlamıştır, ayrıca bu aşırı ortamlarda hidrokarbonların birikmesine ve korunmasına yol açan süreçler, özellikle de 150°C'yi aşan sıcaklıklarda ve litostatike yaklaşan basınçlarda önemli gözenekli formasyon ile ilgili olarak, hala yetersiz şekilde sınırlandırılmıştır (di Primio & Neumann, 2008).

Petrol sektöründeki çalışmalar, 2012 yılında yaklaşık 100 000 kuyu sondajının yapıldığını gösterdi ve bunlardan %1,5'unun HPHT kuyular olarak karakterize edilmiştir. Shadravan ve Amani (2012)'nin çalışmalarında belirttikleri gibi, çoğu HPHT sahaları Meksika Körfezi, Kuzey Denizi, Güneydoğu Asya, Afrika, Çin ve Ortadoğu'da bulunmaktadır. Küresel gaz rezervlerinin %40'ı Ortadoğu'ya ait olup eşit olarak dağılmamaktadır. Katar ve İran en büyük gaz üreten ülkelerdir, ancak Suudi Arabistan ve Kuveyt ilişkili olmayan gazın %80'ini petrol kuyulardan üretilmektedir (EIA, World Energy Outlook, 2019).



Şekil 1. Kaynağa göre OECD toplam enerji arzı (1971 - 2020),(IEA, 2021)

Dünya çapındaki HPHT operasyonlarının neredeyse dörtte birinin Amerika kıtasında ve bunun çoğunluğunun da yalnızca Kuzey Amerika'da gerçekleşmesi beklenmektedir (Shadravan & Amani, 2012). HPHT kuyuları yaygınlaşması ile birlikte, bu tip kuyuların yüksek basınç ve yüksek sıcaklık sebebiyle, kuyu kontrol, çamur/çimento bağlı sorunlar ve teknoloji kısıtlamalar gibi bir çok sorunu da beraberinde getirmektedir.

HPHT Kuyuların Özellikleri

En yaygın HPHT tanımı, basıncın 10 000 psi'yi (690 bar) ve sıcaklığın 300°F'yi (149°C) aştığı durumlardır. Bu rezervuarlarda genellikle 10 000 psi'lik bir BOP ihtiyaç duyulmaktadır. HPHT kuyularının 20 000 ft'in üzerindeki sondajlarla birlikte, dar sondaj pencereleri, sirkülasyon kaybı, sıkışmış veya takılmış boru gibi operasyonel zorluklar ve kuyu kontrolü sorunları meydana gelebilmektedir. HPHT ortamlarını, güvenli operasyon aralıkları ve teknoloji açıklıkları belirlemeye yardımcı olmak için yeni sınıflandırmalar geliştirilmiştir.

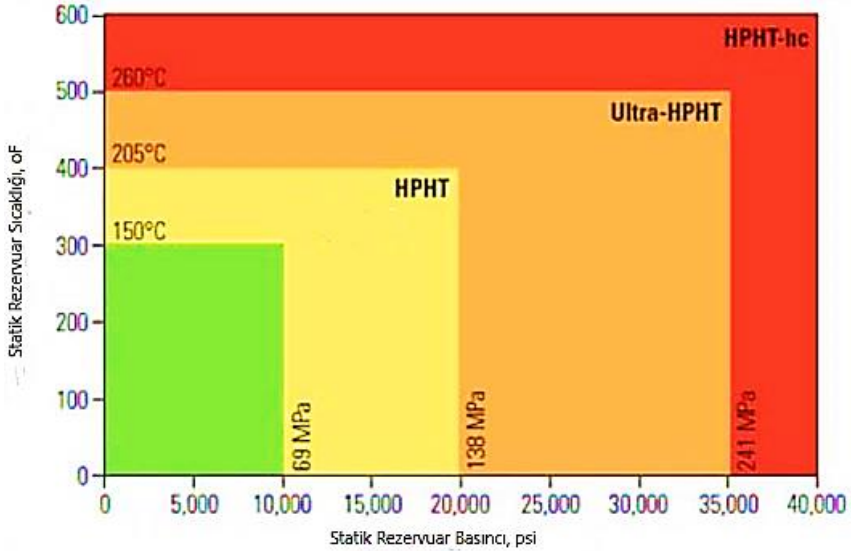
HPHT kuyu rezervuarları üç gruba ayrılmaktadır (Şekil 2). 1. Grup HPHT kuyuları rezervuarların formasyon basıncı 10000 – 20000 psi arasında, sıcaklık ise 300–400°F aralığındadır. Bu tip

rezervuarlar en çok Meksika körfezinde bulunmaktadır (Shadravan & Amani, 2012). Meksika Körfezi bölgesinde kazılan kuyuların ortalama basınç ve sıcaklığı sırasıyla 19 200 psi ve 400⁰F'dır (Ruiz, 2016). 2. Grup ise "Ultra HPHT" olarak adlandırılıp basınç 20000 – 30000 psi, sıcaklık 400 – 500 °F aralığında değişmektedir. Meksika Körfezinin bazı bölgeleri bu gruba dahildir. 3. Grup, "Extreme HPHT" olarak sınıflandırıp basınçlar 30000 – 40000 psi, sıcaklık ise 500 – 600 °F arasındadır, ancak bu grubun bulunduğu sıcaklık ve formasyon basıncının yüksekliğinden dolayı sondajlarda sorunlar olabilmektedir (Shadravan & Amani, 2012, Schlumberger, 2016) (Tablo 1).

Tablo 1 Schlumberger'e göre HPHT kuyuların sınıflandırması (Schlumberger, 2016)

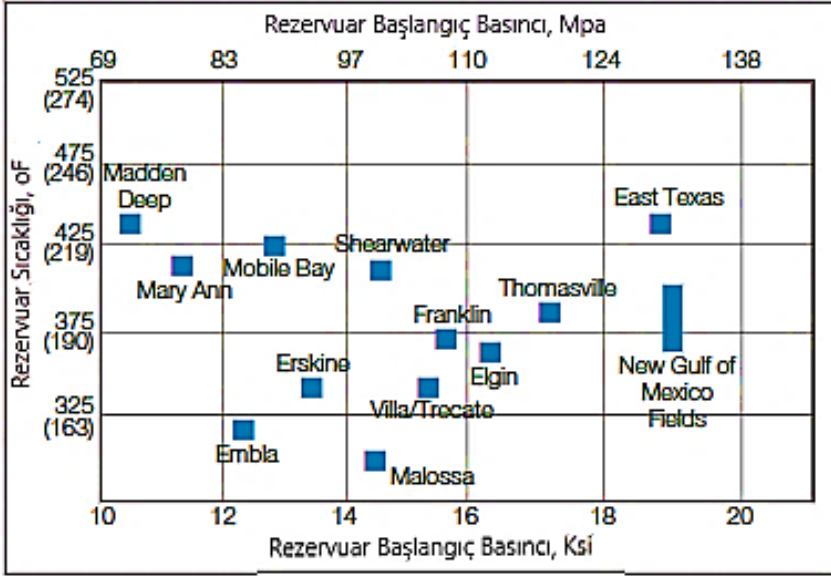
Kategori	Kuyudebi Sıcaklığı, °F	Formasyon Basıncı, Psi
HPHT	300 – 401 °F	10 000 – 20 000 Psi
Ultra HPHT	401 – 500 °F	20 000 – 35 000 Psi
Extreme HPHT	> 500 °F	> 35 000 Psi

HPHT kuyuları, H₂S, CO₂ ve kükürt gibi gazları içermekle beraber genellikle yüksek derinliklerde bulunan rezervuarlara sahip olup maksimum 25 000 ft'e (7620 m) denk gelmektedir (Craig, 2008).



Şekil 2. HPHT kuyularının rezervuar özellikleri, (Saxena & ark., 2019)

1965 yılında Mississippi'de karada açılan ilk HPHT kuyusunun derinliği 19700 – 22250 ft'ye kadardı, rezervuar basıncı ve sıcaklığı ise sırasıyla 17500 - 22000 psi ve 365 °F~385°F arasında değişmektedir. Ancak, Madden Deep sahası 25000 ft derinliği ile dünya çapındaki en derin HPHT sahalarından biri olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3). Doğu Texas ve Meksika Körfezinde, derin rezervuarları ile birlikte en yüksek basınç ve sıcaklık değerlerini sergilenmektedir.



Şekil 3. Dünyada öne çıkan HPHT sahaları (Craig, 2008)

Türkiye’de ise, jeotermal enerji üreten bir ülke olarak olağanüstü termal kapasitelerine sahiptir. 31500 termal potansiyel ile bu enerji kaynakları HT (yüksek sıcaklık) kuyularından üretilmektedir ve çoğunlukla Germencik, Salavatlı, Pamukören ve Kızıldere bölgelerinde bulunmaktadır. İlk çalışmalar Kızıldere sahasında başlamıştır (Tut Haklıdır & Şengün, 2020). Filiz & ark. (2000) çalışmasında, Germencik jeotermal sahalarındaki bulunan derin kuyular için MTA tarafından yapılan araştırmaya göre, kuyu dibi sıcaklıklarını 200 – 232 °C arasında değiştiğini sunmuştur. Haklıdır & Şengün (2020) çalışmalarında jeotermal sahalarından alınan termal su numuneleri irdelendiğinde Kızıldere sahasında 3155 ft’e kadar derin kuyulara rastlanmıştır. Ancak, 274 °C olarak en yüksek sıcaklık değeri, 130 Mw elektrik enerji üretime olan Germencik sahasında gözlenmiştir.

Kuveyt HPHT Sahaları ve Jura Rezervuarlarının İncelenmesi

Jeolojik Konum

Kuveyt Arap levhanın güneydoğu kısmında yer alıp siliklastik ve karbonat rezervuarlardan oluşmaktadır (AlRefaei & ark., 2023) (Şekil 4). Çoğu Jura rezervi Kuzey Kuveyt bölgesinde bulunmaktadır ve Najmah Sargelu (NS), Üst Marrat (UM), Orta Marrat (MM) ve Alt Marrat (LM) olarak dört rezervuardan oluşup altı saha içermektedir. Bu sahalar sırayla: Raudhatain (RA), Kuzeybatı Raudhatain (NWRA), Sabriyah (SA), Umm Niqqa (UM), Dhabi (DA) ve Bahara (BH). Bu sahalar kuzey Kuveyt'in yaklaşık 1,772 km² bir alanını kaplamaktadır ve 2004'te Kuveyt'in ilk serbest gaz kaynağı olarak üretime alınmıştır (Fava & ark., 2015).

HPHT Jura rezervlerinin keşfedilmesiyle birlikte 150 derin yüksek basınçlı kuyulardan toplu olarak 1 milyon varil petrol üretilmektedir. Ancak her kuyudan yaklaşık 7000 – 10000 varil arasında üretim yapılmaktadır. Jura rezervlerinde yapılan projelerle 40 kuyuda sondaj ve 13 workover operasyonların tamamlanması ile 2024 yılına kadar üretilen ilişkili olmayan gaz miktarı 1 Bcf'e yükseltmesi planlanmaktadır (Kuwait Annual Report, 2021/2022).



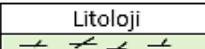

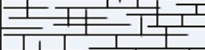
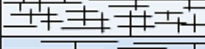
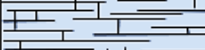


Şekil 4. Çalışma alanı (Google Earth)

Stratigrafi

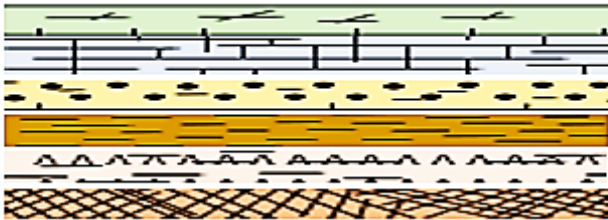
Kuveyt'teki Jura dizisi 2600-4750 ft (792 ile 1.295 m) kalınlığındadır ve KB'ye doğru incelenmektedir. Najmah (NJ), Sargelu (SR), Üst Marrat, Orta Marrat ve Alt Marrat, hidrokarbon içeren rezervuarlar olarak kanıtlanmış beş formasyondur. Najmah/Sargelu formasyonları Marrat formasyonlarından daha sıkıdır. Ancak Orta Marrat formasyonunun dolomitleşmenin iyi rezervuar karakterinden sorumlu olup matris gözenekliliğin arttırmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Al-Salali & ark., 2013). Kuveyt'teki Jura dizisi, altı litolojik birime ayrılmıştır. Erken Jura Marrat Formasyonu, başlıca kireçtaşı ve dolomitlerden oluşurken, Orta Jura Dhurma, Najmah ve Sargelu formasyonları, şeyller ve karbonatlardan meydana gelmektedir. Geç Jura Gotnia ve Hith formasyonları ise çoğunlukla karbonat ve dolomitlerin arasına yerleşmiş tuzlu birimler olarak sınıflanmaktadır (Şekil 5).

Jura dizisindeki ana rezervuarı olan Marrat Formasyonu beş birime bölünmüştür: yukarıdan aşağıya sırasıyla A, B, C, D ve E'dir. Bunlar kil içerikli ve evaporite içeren alt birimlere ayrılmış olup, ince taneli karbonatlarla birleşmektedir. Marrat "C", tüm Jura bölümündeki en önemli birimleri sunmaktadır, kumtaşı ve istiftaşlarla temsil edilen ana rezervuar fasiyesleri içerip bir iç raf ortamında kum bantları ile birleşmiş siltaşları içermektedir. Üst birimi ise çoğunlukla kireçtaşları, siltaşları ve kalkerli şeyllerden oluşmaktadır. (Yousif & Nouma, 1997; Hawie, 2021). Marrat rezervuarının toplam derinliği 2000 ft'tir (610 m) ve Üst Marrat formasyonu şekil 6'de görüldüğü gibi en yüksek kalınlık değerleri sunmaktadır (Hawie, 2021).

Najmah-Sarjelu ve Marrat formasyonlarından oluşan Jura Karbonat rezervuarları, birincil gözeneklilik/dolomitleşme ve doğal çatlaklardan kaynaklanan ve gözeneklilik gelişimi ile birleşen doğal heterojenlik nedeniyle saha gelişimi için birçok zorluk sunar. Özellikle Najmah-Sarjelu rezervuarı, tamamen çatlatma kaynaklı çok düşük gözeneklilik/geçirgenlik özellikleri nedeniyle geliştirme açısından zor şartları meydana getirmektedir (Narhari & ark., 2009).

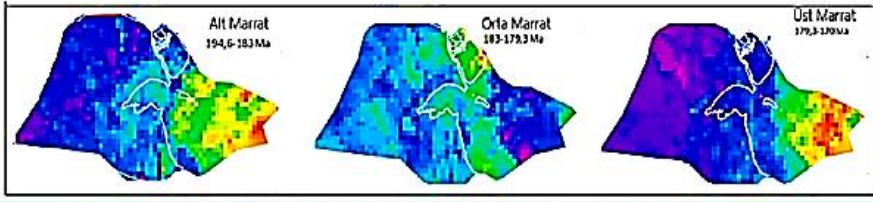
Sistem	Litoloji	Grup	Formasyon		
Kretas		Aruma	Tayarat		
			Qurna		
			Hartha		
			Sadi		
		Wasia	Mishrif		
			Rumaila		
			Ahmadi		
			Wara		
			Mauddud		
			Burgan		
		Thamama	Shu'aiba		
			Zubair		
			Ratawi		
			Minagish		
Jura		Makhul	Makhul		
			Hith		
		Riydh	Gotnia		
			Najmah		
			Sargelu		
		Dhurma	Dhurma		
				Marrat	Marrat
					Marrat

Litoloji Sınıflandırmasını



Dolomit
Kireçtaşı
Kumtaşı
Killi Kum
Anhidrit
Tuz

Şekil 5 Kuveyt Jura stratigrafik kesiti ve litoloji sınıflaması



Şekil 6. Marrat rezervuarı kalınlık harita modellenmesi (Hawie, 2021)

Rezervuar Karakterizasyon

Kuveyt sahalarındaki Jura karbonat rezervuarları derin, düşük geçirgenlikli, HP/HT ve genellikle ekşi uçucu petrol/kondansat ve gaz içermektedir. Bu derin rezervuarların formasyonları genellikle sıkıdır ve doğal olarak çatlamış karbonatlardır (Al-Salali & ark., 2015). Najmah/Sargelu formasyon derinliği 13000 ile 15500 ft arasında değişir, ancak Marrat formasyonu 14100 ile 17000 ft ve Orta Marrat yaklaşık 500 – 700 ft derinliğe sahiptir (Ahmed & ark., 2018). Bu formasyonların basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 10500 psi - 12000 psi ve 255 - 290 °F arasında değiştiği bilinmektedir (Packirisamy & ark., 2010) (Tablo 2).

Tablo 2. Kuveyt jura formasyonun özellikleri (Packirisamy & ark., 2010)

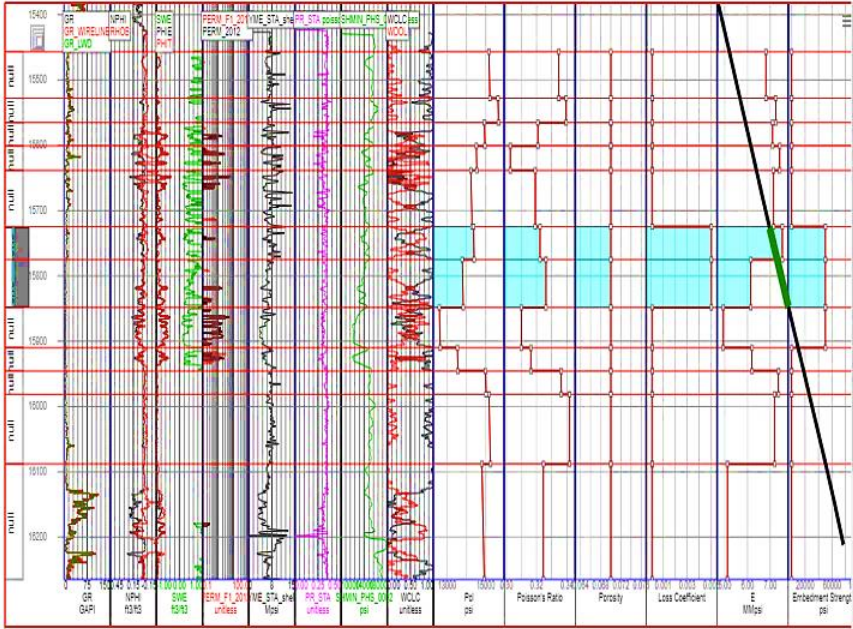
Formasyon	Derinlik, ft	Rezervuar Basıncı, psi	Rezervuar Sıcaklığı, °F	Gözeneklilik	Geçirgenlik, md
Najmah	13000-13900	10500-12000	255-290	2-3%	<0.033
Sargelu	13700-14100	10500-12000	255-290	2-3%	<0.033
Marrat	14100-16500	10500-12000	255-290	2-6%	0.01-50

Rezervuarlardaki akış davranışı, formasyona bağlı olarak değişmektedir. Najmah/Sargelu Formasyonunda, akış esas olarak var olan doğal çatlaklardan kaynaklanmaktadır. Marrat Formasyonu ise, hem kaya matrisinin hem de çatlakların sıvı hareketine katkıda bulunduğu, matris-çatlak akış rejimi bir kombinasyonunu sergilenmektedir. NKJC'nin sahalarında 2009 yılında toplam 32 derin HP/HT kuyusu açılmıştır. Bu kuyular tipik olarak günde yaklaşık 5500 varil petrol (bopd) ve 15 milyon standart fit küp (MMscfd) gaz üretilmiştir (Chakraborty & ark., 2009). 2021 yılından itibaren Kuzey Kuveyt Jura rezervuarlarında JPF-4 ve JPF-5 olarak adlandırılan iki üretim tesis planlanması yapıldı ve 50.000 bpd ve 150 Mscf üretim kapasitesi ile 2024 yılında devreye alınacaktır. 2023 yılında ise Jura rezervuarları maksimum üretim değerlerine ulaştı.

Kuzey Kuveyt Jura rezervuarları, doğal çatlaklı karbonat rezervuarları olarak sınıflandırıldığı için, doğal çatlaklı rezervuarlar (NFR), geleneksel hidrokarbonların önemli bir miktarı oluşturur ve dünyadaki en verimli alanları temsil edilmektedir. Bu rezervuarların büyük bir kısmı dünyadaki kanıtlanmış petrolün %60'ından fazlası ve dünya gaz rezervlerinin %40'ı çatlaklı karbonat rezervuarlarında bulunmaktadır. Bu çatlaklar, düşük geçirgenliğe sahip rezervuarlarda arama hedefleri oluşturarak hidrokarbonları içeren matris ile bir arayüz sağlayarak hidrokarbonlara bir itim mekanizması oluşturur ve belirli bir basınç düşüşü için üretim oranlarını arttırmaktadır (Egya, 2018). Karbonat rezervuarlarda matris ve çatlaklar arasındaki farklı özellikler ve iletim, sıvı akışını etkileyen en önemli faktörlerden biri sayılmaktadır. Karbonat rezervuarlarındaki çatlakların açıklık değişikliği temel olarak stres değişikliklerine bağlıdır. Bir başka ifadeyle, bir rezervuarın ömrü boyunca tükenme veya enjeksiyon operasyonlarından kaynaklanan basınç değişiklikleri yer altındaki streslerin değişmesine yol açıp çatlakların geçirgenliklerini değiştirmesine neden olmaktadır (Al Qahtani, 2017).

Bu rezervuarlar, kuyu logları kullanarak formasyonları ve bulunduğu katmanlar belirlenebilmektedir. Karbonat

rezervuarlarının yoğunluğu temel olarak, karbonat kayaçlarının yoğunluğu, çimentolama varlığı, mineral kompozisyonundaki farklılıklar (örneğin, kalsit, dolomit) ve rezervuardaki gözeneklilik derecesi gibi faktörlerden etkilenip genellikle 2.6 ile 2.9 gr/cm³ arasında değişmektedir, ancak kumtaşı, kireçtaşı ve dolomitler düşük radyasyonlara sahiptir (Şekil 7).



Şekil 7. Un-X kuyusundaki Orta Marrat rezervuarın jeomekanik özellikleri

Kuzey Kuveyt Jura bölümü karbonat rezervuarlardan oluştuğu göz önüne alındığında, heterojenlik, doğal çatlaklar ve porozite ile geçirgenlik arasında önemli varyasyonlar öngörmek mümkündür. Şekil 7, Poisson oranları 0,33 civarında hafiften yükseğe kadar olan bir aralıkta değiştiği görülmektedir, Young modülü değerlerini ise 6,00 – 8,00 arasında ve daha sünek kireçtaşlara işaret etmektedir. Bu değerler, Marrat kireçtaşlarını yumuşaklıktan, gevrekliğe ve rijitliğe kadar farklı ve çeşitli özelliklerini ifade etmektedir. Ancak, evaporitlerin çözünme ve karbonat rezervuarlarında meydana gelen

dolomitleşme gibi diyajenez süreçleri, kayaçların jeomekanik özelliklerini değişmesine yol açmaktadır.

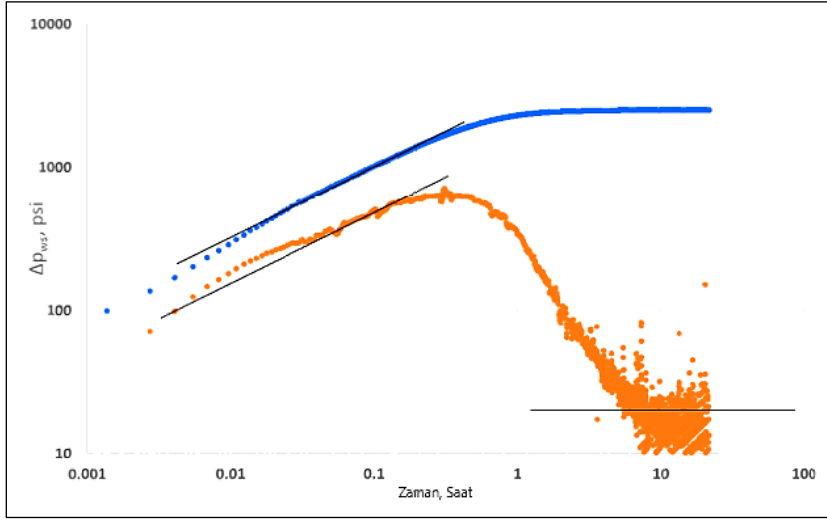
Çift Gözeneklilik Sistemleri ve PTA Analizleri

Doğal çatlaklı rezervuarlarda, akış birincil gözeneklilik sisteminden (çatlak gözenekliliği) geçmektedir ve ikincil gözeneklilik sistemi (matris gözenekliliği) yerindeki rezerv kütlelerini içermektedir. Matristen geçen akış, çatlak sistemine geçmesi için kayacın iletkenliği ve hacmi ile sınırlanmaktadır. Matris kısmı düşük akış kapasitesine ve yüksek depolanma kapasitelerine sahip olup çatlak kısımları daha düşük depolanma kapasitelerine ve yüksek akış kapasitelerine sahiptir. PTA analizleri kullanarak rezervuarın çatlak ve matris arasındaki akış bağlantısı açıklanabilmektedir (Srivastava & ark., 2015; Mohammed & ark., 2021).

PTA analizleri için kullanılan testler:

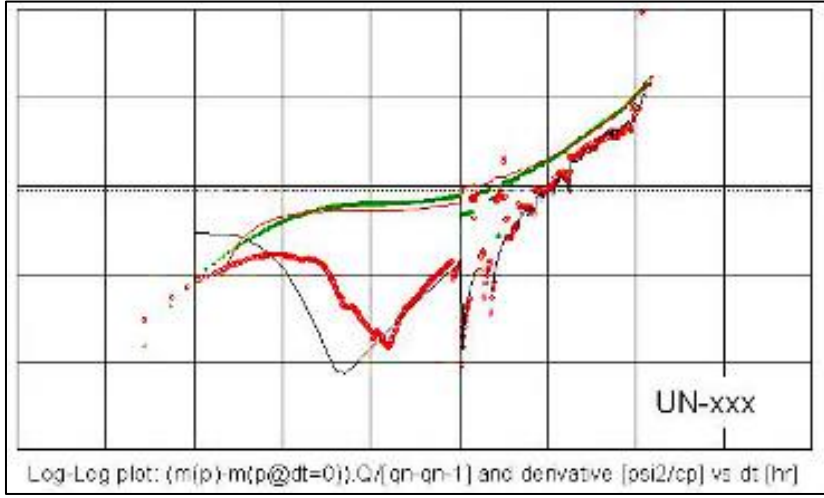
- Basınç yükselim testi
- Basınç azalım testi/Rezervuar limit testi (RLT)
- Basınç fall off testi
- Interference testi/Pulse testi
- İki oranlı akış testi

Kuzey Kuveyt'te olan SA-01 kuyusunda akış rejimlerini belirlemek amacıyla Orat Marrat formasyonundan bir günlük yükselim basınç testi yapılmıştır. Elde edilen grafikten lineer akış rejiminden sonra radyal akış rejimi gözlemlenmiştir. SA-01 kuyusunun PTA sonuçlarına göre, çatlak katkısının matris ile desteklendiği ve çift gözenekli bir akış sisteminin bulunduğunu göstermiştir. Neredeyse radyal akış rejimi başlangıcı 2.7 saatinde görülmektedir (Al-Qahtani, 2017) (Şekil 8).



Şekil 8. Sa-01 kuyusunda yapılan PTA analizleri (Al-Qahtani, 2017)

Çift gözeneklilik sistemleri araştırmalarına ek olarak, Acharya & ark. (2009) çalışmasında Umm Niqqa sahasında Najmah formasyonuna uygulanan PTA analizleri içermektedir. UN-XXX adlı kuyusuna yükselim basınç testi yapılmıştır ve log-log grafiğe çizilmiştir (Şekil 9). UN-XXX için mevcut PTA sonuçları analiz edildiğinde, çatlak katkısını çift gözenekli sistemde baskın olduğu gösterilmiştir ve basınç log-log grafiğinde radyal akış rejimi görülmez olduğunu fark edilmektedir. Şekil 8 ve 9, jura rezervuarlarında akış rejimleri formasyona bağlı olarak nasıl değiştiğini irdelenip Najmah/Sargelu Formasyonunda, akış esas olarak var olan doğal çatlaklardan kaynaklandığını, ancak Marrat Formasyonu, hem kaya matrisinin hem de çatlakların sıvı hareketine katkıda bulunduğu, matris-çatlak akış rejimi bir kombinasyonu sergilendiğini sunmaktadır.



Şekil 9. UN-XXX kuyusu için basınç veri ve zaman log-log plot (Acharya & ark.,2009)

Najmah formasyonu gibi akış rejimi gösteren kuyular asit çatlatma operasyonlarının uygulanmasını neden olmaktadır. Ancak, son zamanlarda Kuveyt Jura rezervuarlarında asit çatlatma operasyonları büyük bir şekilde uygulanma haline gelmiştir.

HPHT Jura Rezervuarlarında Asit Çatlatma Operasyonları

Orta Doğu'da rezervuarların üretim performansını artırmak için asit çatlatma tekniği kullanılan birçok karbonat rezervuarları bulunmaktadır. Al-enezi & ark. (2017) ve Mofti & ark. (2018) çalışmalarında, Kuzey Kuveyt'teki Bahrah sahasındaki Mauddud rezervuarında ilk çoklu aşamalı asit çatlatma işleminin tasarımı, uygulanmasını, üretimini ve kullanılan asit karışımını çatlaklar ile temas ettiğinde nasıl bir tepki vereceğini irdelemişler. Bu asitlenmiş çatlaklar kuyunun üretimini 1300 BOPD'ye kadar yükseltmiştir. Sahada önceden kullanılan standart dikey kuyu tamamlama metoduna göre 400 BOPD'lik olarak büyük bir artış göstermektedir. Çalışmalarında asit karışımının etkilerini ve rezervuar-çatlak arasındaki kontak alanın önemini vurgulanmışlar (Mofti & ark., 2018; Xiao & ark., 2019).

Asit çatlatma üç kategoriye bölünmektedir:

- Asit Yıkanması
- Matris Asitlenme
- Çatlak Asitlenme

Karbonat formasyonlarında matris asitlemesi, formasyon kayaçları aracılığıyla geçirgen kanallar oluşturarak, solucan delikleri denilen iletken kanalların oluşmasını sağlamaktadır. Bunlar kuyu dibine yakın bir bölgeden veya perforasyonlardan uzanmaktadır. Çatlak asitleme işleminde, asit, viskoz bir sıvı (pad) tarafından oluşturulan bir çatlağa enjekte edilir veya çatlağı oluşturmak için doğrudan kullanılır. Enjekte edilen asit, çatlağın aşağısına doğru ilerledikçe, asit çatlak duvarlarına taşınıp çözündürmeli dağlama meydana gelmektedir. Eğer dağlama uniform olmayan bir şekilde gerçekleşirse, çatlak iletkenliği korunarak kapanabilir, çünkü düşük ve yüksek noktalar (pütürler), boşluklar ve destek noktaları sırasıyla kanalın açık kalmasını sağlayacaktır. Asit çatlatma, matris asitleme yanı sıra hidrolik çatlatmaya alternatif bir yöntemdir. Çatlatma uygulamalarının hedefleri ise, kuyu dibinden daha derinlere uzanan, uzun, açık ve iletken bir kanal oluşturmaktır (Kalfayan, 2008).

Kuzey Kuveyt'teki bazı karbonat rezervuarları, kuyu dibinde veya cidarında bulunan doğal çatlak sistemine bağlantı eksikliği sergilenmektedir, bu da rezervuar içinde etkili bir iletken oluşturmak için asit çatlatma operasyonlarının uygulanmasını gerektiğini neden olmaktadır. Asit çatlatma, sıkı karbonat rezervuarlarında üretimi artırmak için kullanılan etkili bir stimülasyon teknolojisidir. Operasyon boyunca viskoz akışkanlar kuyuya enjekte edilir, bu da çatlak duvarını dağlamak ve penetrasyon sürecini teşvik etmek amacıyla yapılmaktadır. Çatlatma sırasında kapanma basıncının belirlenmesi, enjekte edilen asidin çatlağı açık tutma etkinliğini belirlemek için önemli bir değişken sayılmaktadır. Tablo 3, Umm Niqqa sahasında bulunan ve üzerine asit çatlatma uyguladığımız UN-X kuyu bilgilerini sunmaktadır. Operasyonun amacı Alt ve Orta

Marrat'ta 200 ft'den daha uzun yarı uzunlukta ve ana rezervuar drenaj alanı içinde etkili bir iletken oluşturmaktır.

Tablo 3. Un-X kuyusunun rezervuar özellikleri

Kuyu	UN-X
Kuyu Tipi	Yönlü kuyu (15 deg)
Liner ölçü	4' 1/2, 18,9 lb/ft, SM2535-125 with 6 frac ports
Formasyon	Orta ve Alt Marrat
Formasyon tipi	Karbonat
Üretilen Hidrokarbon	Gaz
Akışkan tipi	-
Beklenen CO₂ içeriği (%)	3 – 4
Beklenen H₂S içeriği (%)	3 – 4
Rezervuar sıcaklığı	> 250 °F

Asitle Çatlatmada Kullanılan Kimyasal

Genellikle karbonat kayaçları, kumtaşlarına göre daha fazla doğal çatlaklar içermektedir. Asit sürekli olarak çatlak yüzeylerini dağlar, gözenekleri genişletir, solucan delikleri oluşturur ve çatlak yüzeyine dik bir geçiş yolu sağlamaktadır ve buna göre yeni bir filtrasyon alanı oluşmaktadır. Bu solucan delikleri oluşturulduğunda, asidin büyük miktarı filtrasyon kanalı boyunca sızıp iletken alanı kısaltacaktır (Nianyin & ark., 2015). Bu sebeplere dayanarak, sonic loglardan hesaplanan young modülü değerleri ve poison oranları gibi jeomekanik parametrelerine büyük bir önem verilmektedir. Bununla birlikte asitle çatlatma sürecinde, akışkan sızdırma oranları ve pompalama hızları değiştirilerek çatlaklar ile tepkisi saptanır ve farklı asit tasarımları değerlendirmeye alınmaktadır. Asit çatlatmada kullanılan akışkanın viskozitesi ve

sızdırma katsayısı, çatlağın yüksekliği üzerinde önemli bir rol oynayabilir. UN-X kuyusu gibi yüksek basınçlı kuyularında HCL% ile birlikte genel olarak aşağıdaki kimyasalları kullanılmaktadır:

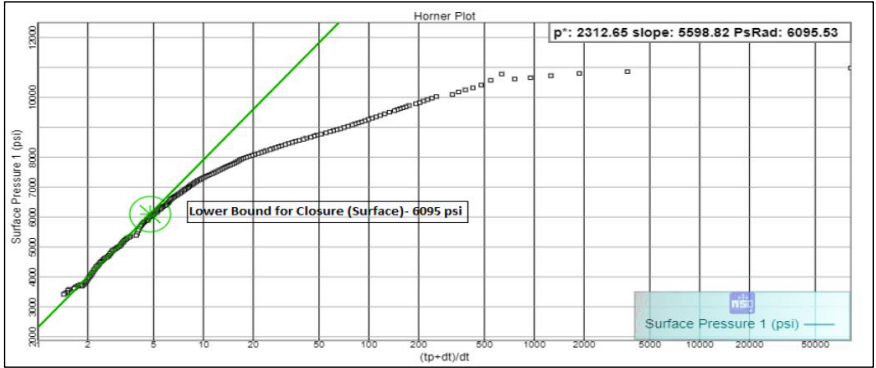
- **VES Ertelenmiş Asit**, 400°F'ye kadar olan karbonat rezervuar asitlenmesi için Viskoelastik Yüzeysel Aktif Madde ve Yüksek Sıcaklık Tablet olarak kullanıp yüksek sıcaklıkta viskoz tamamlama tabletleri sağlamaktadır. Viskozite yüzeyde oluşturulabilir, ancak asitleme sistemleri için viskozite kuyu içinde oluşturulacak ve hidrokarbonlarla temas ettiğinde çözünecektir.
- **Çaprazbağlı Asit Sistemleri**, bu sistemler sıcaklıkla aktive edilen, zirkonyum ve borat çapraz bağli su bazlı sıvıların karışımıdır ve bunlar karboksimetilhidroksipropil guar (CMHPG) içermektedir. Çatlatma akışkanlarının bir parçası olarak, çatlatma sıvılarını kuyuya taşımak için gerekli elastik ve viskoz özellikleri oluşturmak için polimerler, çapraz bağlayıcılar ve diğer kimyasallar çözeltiye eklenmektedir. UN-X kuyusunda, yaygın olarak kullanılan negatif yüklü polisakkarit bazlı karboksimetil hidroksipropil guar (CMHPG) biyopolimeri kullanılmaktadır. CMHPG, guarı hem propilen oksit hem de klorasetik asit ile işlenerek üretilmektedir. Guar, CMHPG'ye derivate edilmesiyle birlikte asit sıvısının safsızlığını azaltmak, pH toleransını artırmak ve sıcaklık stabilitesini iyileştirmesini sağlamaktadır. Bu özellikler, CMHPG'nin çeşitli formasyonlarda çatlatma akışkanları için mükemmel bir polimer olarak çalışma imkanları vermektedir (Almubarak & ark., 2020).
- **Mütüel Çözücü**, Düşük basınçlı rezervuarlarda su veya emülsiyon bloklarını iyileştirmek için Asit Ön-Yıkamada ve Son Yıkamada kullanılıp formasyonun su ıslatma özelliğini artırmaktadır.

- **Çatlak Kapanma Asitlemesi (CFA)**, çatlatma sonrası kuyudibine yakın olan bölgesi iletkenliğini artırmak amacıyla %15 düz asit kullanılmaktadır.

Asitle Çatlatma Plotları ve Çatlak Simülasyonu

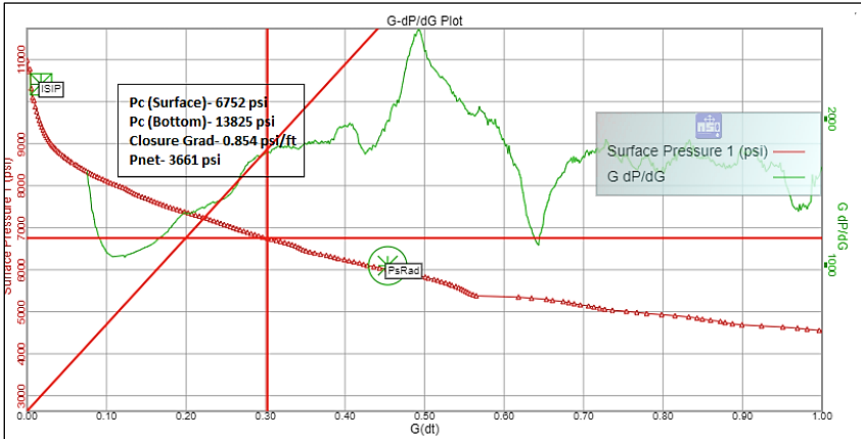
Uyguladığımız asitle çatlatma operasyonunda, asitin formasyon boyunca nasıl ilerlediğini göstermek için Hornor grafiği ve G-Function grafikleri kullanılmaktadır. Bu grafikler lineer akış ve radyal veya pseudo radyal akış rejimlerin belirlenmesinde, asit çatlatma operasyonu sırasında basınç davranışını (kapanma basıncı) gözlemlemekte ve operasyonun etkinliğini değerlendirmekte yardımcı olmaktadır. Bahsedilen plotları üretmek için StimPlan programı kullanıldı, StimPlan, hidrolik çatlatma tasarımı, analizi ve optimizasyonu için tam ve entegre edilmiş bir yazılımdır. Kapsamlı bir araç seti ve endüstrinin en katı geometri modelleri ile StimPlan, operatörlerin dünya çapında rezervuarları veya çatlatma tasarımları ne kadar karmaşık olsa da, kuyu performansını maksimize etmelerine, harcamaları azaltmalarına ve çevresel etkileri azaltmalarına yardımcı olmaktadır.

Hornor grafiğine bakarak (Şekil 10) 6095 psi'de çatlakların lineer akış ile ilerlediğini ve rejimin sonunu pseudo radyal akış rejiminin başlangıcı ile sergilendiğini görülmektedir. Bu akış rejiminin davranışını UN-X kuyusunun çatlak-matrix bağlantısına işaret edip asit üniform bir şekilde dağılmasını göstermektedir. G-Function grafiği bu rejimleri ve gözlenen kapanma basıncını daha belirgin bir şekilde ayırılmaktadır, Genellikle G-fonksiyon türevsel analizi, kuyudibi basıncı - G-fonksiyonu, dpw/dG türevi - G-fonksiyonu ve $Gdpw/dG$ türevi - G-fonksiyonu olan üç eğrinden oluşan kartezyen bir grafik üzerinde yapılmaktadır. G-fonksiyon türevsel analizi, hidrolik çatlak kapanmasını belirlemek için kullanılabilir, ek olarak basınca bağımlı sızma, çatlak yüksekliği, değişken depolama ve çatlak genişleme tepesi gibi birkaç ideal olmayan sızma tiplerini belirlemekte klasik olarak kullanılmıştır (Craig & ark., 2017).



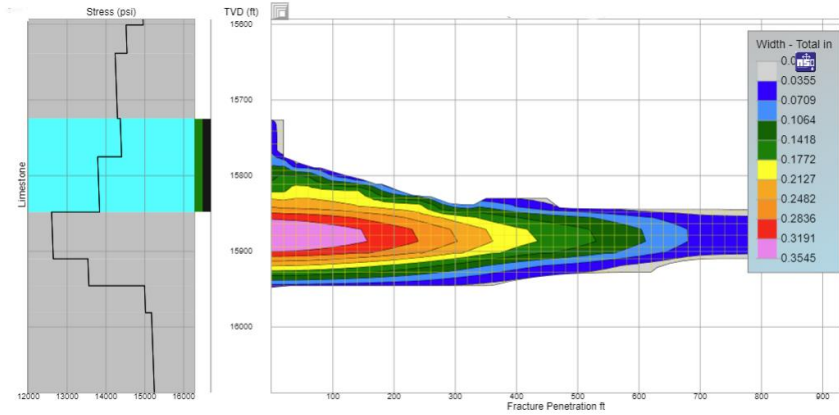
Şekil 6. UN-X kuyusunun asit çatlatmasının Horner grafiği

Şekil 11'i UN-X kuyusundan alınan G-Function grafiği göstermektedir. G-dP/dG analizine göre, yüzey basıncının eğrisindeki değişiklik çatlak kapanma basıncını göstermektedir. Kapanma basıncı, sadece kapanma süresini dikkate alarak G-fonksiyonu grafiğinde 6752 psi olarak belirlendi. Kapanma basıncından sonra izlenen linear akış rejimi, çatlak ilerlediğine işaret etmektedir. Pseudo radyal akış rejimi ise matris-çatlak bölgesinde izlenmektedir ve geç zaman bölgesi, rezervuarın dış sınırlarına ulaştığında meydana gelmektedir (Porcu & ark., 2014).



Şekil 7. UN-X kuyusunun Stimplan programı kullanarak çizilen G-Function grafiği

Elde edilen simülasyon grafiğine göre çatlatma için kullanılan asitin, 470 ft'e kadar bir penetrasyon aralığını göstermektedir (Şekil 12). Katmandaki dolomitlerin varlığı nedeni ile solucan delik oluşumunu azaltmaktadır ve daha küçük bir çatlak genişliğine sebep olmaktadır. Küçük bir çatlak genişliği farklı bir sebebi ise, çatlatma bölgesinde büyük streslerin varlığı ile ilişkilendirebilir. Pembe renk, enjekte edilen asidin, enjeksiyon merkezinden çok uzaklaşmadan ilerlediğini gösterir. Bu durum, Orta Marrat Formasyonu'nun düşük ile orta Young modülü değerlerine bağlı olabilmektedir ve enjekte edilen asit, kuyu dibinden uzaklaştıkça rezervuara nüfuz etmesi için daha yüksek enjeksiyon ve pompalama oranlarına gerekebileceğine işaret etmektedir. Yapılan çatlak simülasyonundan temel amacımız ise, hidrolik çatlatma operasyonlarının davranışını modellemek ve sonuçlarını analiz etmektir. Simülasyon sonuçlarını kullanarak asitin çatlakların boyunca nasıl ilerleyeceğini, rezervuar kayaçlarıyla etkileşimini ve rezervuar performansını nasıl etkileyeceğini öngörmektir.



Şekil 8. UN-X kuyusunda asit penetrasyonunun simülasyonu

Sonuç

Temelde, bu tartışma süreci, küresel ekonomik yapılar, enerji tüketim modelleri ve evrim geçiren petrol ve gaz keşif teknolojilerinden kaynaklanan zorluklar ve olanaklar arasındaki

karmaşık etkileşimi vurgulamaktadır. İlerledikçe, çevresel etkileri ele almak ve enerji güvenliğini sağlamak, kesinlikle sürdürülebilir enerji gelişimi için temel düşünceler olacaktır. Petrol ve gaz endüstrisi, HPHT (yüksek basınçlı yüksek sıcaklık) koşullarının karmaşıklarıyla başa çıkarken, çeşitli sınıflandırmaların ve operasyonel inceliklerin anlaşılması kritik bir nokta sayılmaktadır. Halbuki, Türkiye'nin özellikle Kızıldere gibi bölgelerde gösterdiği jeotermal enerji alanındaki uzmanlığı, ülkenin alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını kullanma taahhüdünü sergilemektedir.

- Kuzey Kuveyt Jura rezervuarları, Raudhatain (RA), Kuzeybatı Raudhatain (NWRA), Sabriyah (SA), Umm Niqqa (UM), Dhahi (DA) ve Bahara (BH) sahalarında keşfedilmesi ile birlikte 150 derin yüksek basınçlı kuyulardan bir milyon varil petrol üretimine yol açmıştır. Bu tip rezervuarların oluşturduğu zor üretim ortamlarına rağmen yeni projeler devam etmektedir ve 2024 yılına kadar 40 kuyu sondajını ve 13 workover operasyonunu gerçekleştirerek ilişkili olmayan gaz üretimini 1 Bcf'e çıkarmayı planlamaktadır.
- Kuveyttteki HPHT jura rezervuarları karbonat rezervuarları olarak sınıflandırmaktadır ve Erken Jura Marrat Formasyonu, Orta Jura Dhruma, Najmah ve Sargelu formasyonları ve Geç Jura Gotnia ve Hith formasyonları olarak altı litolojik birime ayrılmıştır. Ancak Orta Marrat formasyonundaki dolomitleşmenin iyi rezervuar fasiyeslerinden sorumlu olup matris gözenekliliğin arttırmasında önemli bir rol oynadığından dolayı ana rezervuarı oluşturmaktadır.
- Bahsedilen Jura karbonat rezervuarları çift gözeneklilik sistemlerin egemenliliği gösterdiğinden PTA analizlerine uygulanmasını ve çatlak-matrix bağlantısını analiz edildiğine neden olmaktadır. Najmah-Sargelu formasyonların çatlak egemenliliğine sahip bir akış rejimi gösterirken Orta Marrat formasyonu çatlak-matrix bir akış rejimi sergilenmektedir. Ona rağmen bazı bölgelerde Umm Niqqa, Raudhatain ve

Sabriya sahaları gibi sıkı doğası nedeni ile çatlak-matrix bağlantısı yetersiz olup kuyudebindeki drenaj alanında bir iletken oluşturması gerekmektedir ve asit çatlatma gibi stimülasyon operasyonlarına ihtiyaç duyulmasını neden olmaktadır.

- Asit çatlatmada kullanılan akışkanın viskozitesi ve sızdırma katsayısı, çatlağın yüksekliği üzerinde önemli bir rol oynayabilir ve operasyonun başarısını temelden kullanılan asit türlerine bağlı olduğu için farklı asit tasarımları değerlendirmeye alınmaktadır. Ancak, HPHT jura rezervuarlarında en çok tercih edilen kimyasallar: yüksek sıcaklıkta istenilen viskoziteyi sağlamak için VES Ertelemiş Asitler, çatlatma sıvıları kuyuya taşımak için gerekli elastik ve viskoz özellikleri oluşturmak için Çaprazbağlı Asit Sistemleri ve düşük basınçlı rezervuarlarda su veya emülsiyon bloklarını iyileştirip su ıslatma özelliği arttırmak için Mütüel Çözücüler.
- Asit çatlatma operasyonları sırasında, akış rejimleri belirlenmesi, basınç davranışının gözlemlenmesi ve operasyonun etkililiğini değerlendirmek için StimPlan gibi çatlama simülasyonunu tasarım programları kullanılmaktadır. Bu programları, Hornor plot ve G-Function plotlar gibi çizim grafikleri sağlamaktadır ve üzerine pompalanan asidin çatlaklar boyunca nasıl ilerlediğini göstermektedir. Özellikle G-Function grafikleri, kapanma basıncını belirgin bir şekilde ayırt edilmesinden dolayı asit çatlatma sırasında büyük bir önem sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Acharya, M.N., Al-Awadi, A, M., M. Aziz, R. & Al-Eidan, J. A. (2009). Organic richness and productivity index relationship in dual porosity flow-system of gas and condensate kerogen reservoirs of Najmah Formation, North Kuwait, Kuwait. *EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition*, Amsterdam. <https://doi.org/10.2118/121811-MS>

Al-enezi, B., Al-Mufarej, M., Ashqar, A., Navia, A., (2017). First Successful Openhole Lateral Multistage Acid Frac in a Complex Unconventional Carbonat Reservoir North Kuwait. International Petroleum Exhibition & Conference held in Abu Dhabi, UAE, 13 – 16 November 2017. SPE-188170-MS

Ahmed. Z., AL-Muhanna. D., A-Enezi. A., Prakash. R., Salem. A. & Mahmoud. W. (2018). High rate matrix acidizing technique using innovative diverter technologies to restore and improve well performance in North Kuwait Jurassic Gas NKJG. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, January 2018*. <https://doi.org/10.2118/189409-MS>

Almubarak, T., Li, L., Ng, H. J., El-Din, N. H. & Alkhaldi, M. (2020). New insights into hydraulic fracturing fluids used for high temperature wells. *Petroleum*, 7, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.05.002>

Al-Qahtani, M. (2017). Compositional Modeling of Sabriyah Naturally Fractured Gas Condensate Reservoir, Kuwait. Colorado School of Mines, Msc.

AlRefaei. Y., Najem. A., Amer. A. & Al-Qattan. F. (2023). Surface geology of Kuwait: In: Abd el-aal, A.ea.K., Al-Awadhi, J.M., Al-Dousari, A. (eds) *The Geology of Kuwait. Regional Geology Reviews*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16727-0_1

Al-Salali, Y., Al-Bader, H., Duggirala, V., Ayyavoo, M., Subban, P., Al-Ibrahim, A. R. & Rajkhowa, A. (2013). Challenges in testing and completion of highly sour HPHT reservoir in the State of Kuwait, Kuwait. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain*. SPE-164311-MS. <https://doi.org/10.2118/164311-MS>

Al-Salali, Y., Al-Bader, H., Al-Ibrahim, A., Sagar, V., Manimaran, A., Packirisamy, S. & Rajkhowa, A. (2015.) Successful downhole sampling in HPHT extreme sour exploratory wells using DST sampler – case studies. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain*. <https://doi.org/10.2118/172580-MS>

Chakraborty, K. S., Rao, S. N., Al-Awadi, M., Kidambi, K. V., Al-Houli, M., Al-Ateeqi, K., Perrin, C. & Ghorayeb, K. (2009). 3D geological modeling of a tight naturally fractured carbonate reservoir as an input to reservoir simulation – A case study from North Kuwait Jurassic fields. *Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait*. <https://doi.org/10.2118/127599-MS>

Craig, B. (2008). Materials for deep oil and gas well construction, *ASM International*, 166(5),33-35.

Craig, P. D., Barree, D. R., Warpinski, R. N., & Blasingame, A. T. (2017). Fracture closure stress: reexamining field and laboratory experiments of fracture closure using modern interpretation methodologies. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA*. <https://doi.org/10.2118/187038-MS>

di Primio, R., Neumann, V. (2008). HPHT reservoir evolution: A case study from Jade and Judy fields, Central Graben, UK North Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 97(5), 1101–1114. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0206-y>

Egya. O. D. (2018). Characterisation of naturally fractured reservoirs using geological well testing, Heriot-Watt University, Institute of Petroleum Engineering.

EIA (2019). World Energy Outlook

Fava, G., Descubes, E., Daoud, A., Najafi, S. A., Al-Enezi, B., Al-Arouj, M. & Dashti, Q. (2015). Coexistence of Gas-Condensate and Volatile Oil at Pressure Higher than Saturation Pressure. Physical Explanation and Modeling Approaches. Case Study: Sabriyah Field in North Kuwait Jurassic Asset. *SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, Mishref, Kuwait*. <https://doi.org/10.2118/175221-MS>

Filiz. S., Tarcan. G. & Gemici. U. (2000) Geochemistry of the Germencik geothermal fields, Turkey. *Proceedings World Geothermal Congress, Japan*, 1115-1120.

Hawie, N., Al-Wazzan, H., Al-Ali, S. & AL-Sahlan, G. (2021). De-Risking hydrocarbon exploration in lower jurassic carbonate systems of Kuwait through forward stratigraphic models. *Marine and Petroleum Geology*, 123 (2021) 104700. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104700>

Kalfayan, L. (2008). Production Enhancement with Acid Stimulation. 2nd Edition, PennWell Corp., P: (15-19), (137-140), USA, ISBN-13: 978-1-59370-139-0

Karjalainen, J., Käkönen, M., Vehmas, J. & Luukkanen, J. (2014). Energy models and scenarios in the era of climate change in the least developed countries: multi-scale analysis of energy and forest use in Laos and Cambodia (GET-LDC) Writers & Finland Futures Research Centre, University of Turku, Finland, ISBN 978-952-249-275-3.

KOC, Kuwait Annual Report 2021/2022, (2021/2022) Achieve Sustainable Crude Oil Production Capacity & Achieve Sustainable Non-Associated Gas Production.

Marhoon, T. M. M. (2020). High pressure high temperature (HPHT) well technologies while drilling. Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Petroleum and Mining Engineering (Ingegneria Del Petrolio E Mineraria).

Mofti, M., Al-Othman, M., Alboueshi, A., Davis, J., Eid, W., Allam, A., Al Hamad, A., Saddedin, S., Buhamad, A., Ashkanani, M., Aloun, S., Al-Haddad, M. & Al-Mehanna, H. (2018). First fully successful application of multistage acid fracturing operation to stimulate a carbonate formation, resulting in the implementation in other wells in the Mature Bahrah Field, North Kuwait. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UA*. <https://doi.org/10.2118/189353-MS>

Mohammed, I., O. Olayiwola, T., Alkathim, M., A. Awotunde, A. & F. Alafnan, S. (2021). A review of pressure transient analysis in reservoirs with natural fractures, vugs and/or caves. *Petroleum Science*, 18,154–172. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00505-2>

Narhari, R. S., Al-Kandari, A. L., Kidambi, V. K., Al-Ashwak, S., Al-Qadeeri, B. & Pattnaik, C. (2009). Understanding fractures through seismic data: North Kuwait case study. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 547-551.

Nianyin, L., Jinxin, D., Pingli, L., Zhifeng, L. & Liqiang, Z. (2015). Experimental Study On Influencing Factors Of Acid-Fracturing Effect For Carbonate Reservoirs. *Petroleum*, 1 (2), 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.06.001>.

Packirisamy, S., Al-Bader, H., Singh, J. R., & Al-Bader, H. E. (2010). Optimized practices followed in testing & completion of deep jurassic exploratory wells of KOC. *SPE Deep Gas Conference and Exhibition, Bahrain*. <https://doi.org/10.2118/130902-MS>

Porcu, M. M., Retnanto, A., Economides, J. M. & Economides, E. C. (2014). Comprehensive Fracture Calibration Test Design, USA. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA*. <https://doi.org/10.2118/168634-MS>

Ruiz, M. L. (2016). Design and drilling of a ultra HPHT exploratory well on the Gulf of Mexico, Fort Worth, Texas. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA*. <https://doi.org/10.2118/178809-MS>

Saxena, A., Chaudhary, S., Adarsh, D., Anshul, K., Nihalani, D. & Tewari, P. (2019). Challenges in HPHT well: A case study. *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Mumbai, India*. <https://doi.org/10.2118/194633-MS>

Schlumberger (2016). The Defining Series: HPHT Wells. *Oilfield Review*.

Shadravan, A. & Amani, M. (2012). HPHT 101-What petroleum engineers and geoscientists should know about high pressure high temperature wells environment. *Energy Science and Technology*, 4(2), 36–60. <https://doi.org/10.2118/163376-MS>

Srivastava, P. J., Kumar, A., Mitra, P., Jena, B. & Bhardwaj, B. (2015). Pressure transient analysis a tool for reservoir assessment- a case study from the field of Assam Asset. 11th Biennial International Conference & Exposition.

Tut Hakkıdır. F. S. & Şengün. R. (2020). Hydrogeochemical similarities and differences between high temperature geothermal systems with similar geologic settings in the Büyük Menderes and Gediz Grabens of Turkey. *Geothermics*, 83, 101717. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101717>

Xiao, Y., Wang, H., Guo, J., Lu, L., Cheng, Y., Chen, M., Fan, F. & Xue, H. (2019). Acid fracturing was selected to stimulate the potential production in low permeability reservoirs in Ahdeb Oilfield, Iraq. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain*. <https://doi.org/10.2118/194900-MS>

Yousif, G. S. & Nouman, G. (1997). Jurassic Geology of Kuwait. *GeoArabia*, 2 (1), 91–110. <https://doi.org/10.2113/geoarabia020191>

BÖLÜM VII

Nadir Toprak Element (NTE) Oksidler, Alaşım lar, Bileşenlerin Özellikleri ve Uygulamaları

Berna YAVUZ PEHLİVANLI⁹

GİRİŞ

Nadir toprak elementlerinin kimyası ve metalürjisinin kronolojik bir açıklaması yapılacak olursa üç dönemde gelişim gösterir. Bu dönemlerin ayrımının başlıca temelini, nadir toprak metall erinin ve malzemelerinin mevcudiyeti ve saflığı ile bunlara ilişkin bilimsel ve mühendislik bilgilerinin gelişimi oluşturur. Nadir toprak elementler (NTE) için 1950 öncesi dönem “Karanlık Çağ” olarak adlandırılabilir. Sonraki yirmi yıl “Aydınlanma Çağı” ve 1970’lerin ortalarından itibaren “Altın Çağ” olarak kabul edilmektedir. Bu altın çağın ilk otuz yılında, nadir toprak elementleri alanında bir dizi dikkate değer ilerleme ve keşif yapılmıştır. Bunlar, küresel malzeme biliminde yadsınamaz bir önemdedir. NTE’lerinin geleceği bilim de, teknoloji de veya ticari kullanımda çok önemli ve yüksek beklentiler doğurmuştur. Nadir toprak elementleri, biri hariç tümü doğal olarak oluşan (14 lantanit ve 2 ilişkili element) 17 metalik elementten oluşan bir topluluktur. Dünya çapında yaygın olan maden yataklarında, tüm NTE’ler birlikte bulunurlar. Çin,

⁹ Assoc. Prof. Dr., Yozgat Bozok University, Eng.Arch. Faculty. Geological Engineering. Dept. 66200 YOZGAT

ABD ve Avustralya'da özellikle büyük rezervler bulunmaktadır. "Nadir toprak elementleri"ndeki "nadir" kelimesi, az bulunmalarından ziyade, onları tek tek saf elementler olarak ayırmanın ve elde etmenin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Ayrılmış yüksek saflıkta nadir toprak elementlerinin üretimine yönelik teknolojilerde büyük gelişmeler hali hazırda devam etmektedir. Son derece verimli ayırma teknolojileri, nadir toprak elementlerinin artık yaygın olan geniş bir yelpazede kullanılmasına neden olmaktadır.

Nadir toprak elementleri, periyodik tablodaki diğer elementler arasında eşsiz bir yere sahiptir. Kimyasal ve fiziksel özellikleri karşılaştırıldığında birbirlerine çok benzer olmalarına rağmen, her biri çok farklı ve dikkate değer manyetik özellikleri ile ayırd edilmektedir. Bunun nedeni, manyetik özellikleri belirleyen, ancak diğer kimyasal ve fiziksel davranışlar üzerinde çok az etkiye sahip olan 4f elektronlarıdır. Aslında isiminde ifade edildiği gibi nadir olmasalar da, bazıları gerçekten de yer kabuğundaki en yaygın ağır elementleri arasındadır. Birlikte sıkı bir bağla bağlı olan bu elementlerin ayrılması oldukça zor olmasına rağmen onların karmaşık manyetik özellikleri birbirinden ayrılmalrı için çok önemlidir.

Artık yavaş yavaş modern yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelen çeşitli uygulamalar ile dünyada pekçok araştırma merkezinde nadir toprak kimyasalları, metalleri ve alaşımları hakkında bilimsel ve teknolojik araştırma ve geliştirme faaliyetleri yapılmaktadır. Bu nedenle araştırmacıların NTE üzerine yaptığı detaylı çalışmalar sayesinde, yerel ve uluslararası pazarlar için NTE ürünlerinin ticari ölçekli üretimi gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Ülkelerin gelecekteki endüstriyel gelişimi ve küresel ekonomik bağımsızlıkları enerji alanında bağımsızlıklarıyla ilişkilidir. Enerji piyasalarında petrol, gaz ve elektrik arzı makul fiyatlarla mevcut, gaz fiyatlarının oldukça istikrarlı olduğu ancak OPEC olarak bilinen petrol üreticisi ülkeler arasındaki anlaşmazlıklar nedeniyle petrol fiyatlarının öngörülemez olduğu da bir gerçektir. Rüzgar türbini tarafından üretilen enerji kesinlikle rüzgar hızına ve yönüne bağlıdır. Bu nedenle, sürekli bir elektrik enerjisi temini mümkün olmayabilir. Elektrik enerjisinin büyük bir kısmının buhar santrallerinden ve nükleer santrallerden elde edildiğini belirtmek gerekir. Buhar santrallerinde üretilen elektrik, nükleer santrallere göre daha ucuzdur. Maksimum elektrik, nadir toprak elementleri kullanılarak nükleer santraller tarafından üretilir doğal veya

zenginleştirilmiş uranyum gibi ancak kurulum ve Kw başına elektrik maliyeti oldukça yüksektir. Uranyumdan elde edilen enerji santrallerinde NTE malzemeleri kullanan bir nükleer reaktörün kritik bileşenleri, reaktörlerin soğutma işlemi ve reflektörlerin kullanım maliyeti ve sürdürülebilirlik için oldukça önemlidir.

1. NADİR TOPRAK ELEMENT (NTE) OKSİDLER, ALAŞIMLAR VE BİLEŞENLER

Nadir toprak elementler (NTE) oksit, alaşım ve bileşikler şeklinde ticari, endüstriyel ve askeri uygulamalarda potansiyel kullanımları olabilir. Bu nedenle bu formların özelliklerinin iyi şekilde bilinmesi gerekmektedir.

1.1. Nadir Toprak Materyallerinin Madenciliği ve İşlenmesi

Yapılan pek çok araştırmada oksit formdaki nadir toprak elementlerinin (NTE) yüzde 100'i çoğunlukla yeryuvarı tabakaları içinde ham formda bulunur ve tane boyutuna, fiziksel ve kimyasal önceliklerine, büyümeye ve kritik özelliklere dayalı olarak işlenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda ayrıca, nadir toprak oksitlerin işlenmesinin, zaman alıcı ve ek maliyetlere neden olabilecek birkaç karmaşık adımı içerebileceğini göstermektedir. Ayrıca çalışmalar, bir ağır nadir toprak elementinin (ANTE), lantan (La), seryum (Ce), praseodimyum (Pr) veya neodyum (Nd) gibi hafif nadir toprak elementlerden (HNTE) oksit libresi başına tedarik maliyetinin çok daha yüksek olduğunu göstermektedir.

1.2. Nadir Toprak Oksit Madenciliği ve İşlenmesi

NTE'lerin kullanılabilmesi, kesinlikle oksitlerin ve alaşımların mevcudiyetine bağlıdır. Spesifik NTE'leri ve oksitlerini elde etmek için, bazı ülkelerdeki belirli coğrafi konumlarda zenginleşen nadir toprak mineral yataklarını çıkarmak için kapsamlı değerlendirilmesi gerekmektedir. Madencilik şirketleri, ev sahibi ülkelere gerekli izinleri alarak, madencilik ve işleme faaliyetlerini üstlenmelidir. Nadir toprak malzemelerini çıkarmak için gereken madencilik ve işleme çabaları ;

1. Nadir toprak cevherleri madenciliği, belirli yerlerdeki bilinen maden yataklarından elde edilebilir.

2. NTE'ler ve oksitlerinin elde edilmesinde minimum maliyet ve çabayla bulmak için kapsamlı metalurjik ve madencilik araştırmaları gerekir.

3. Nadir toprak cevherlerinin ayrı ayrı nadir toprak oksitlerine ayrılması çok zor ve maliyetlidir.

4. Nadir toprak alaşımlarının bileşiklere dönüştürülmesi, belirli ticari ve savunma amaçlı samaryum-kobalt mıknatısları, özellikle savunma ile ilgili uygulamalar kaliteden ödün vermeden minimum maliyetle yapılmalıdır.

5. Yüksek güçlü neodimiyum-demir-bor mıknatısları gibi nadir toprak alaşımlarının kullanılması, ticari ve endüstriyel uygulamalar için oldukça önemlidir. Bu tür mıknatıslar, hibrit elektrikli ve elektrikli araçların en kritik bileşenleri olan motorlarda ve jeneratörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

6. Ayrıca, nadir toprak bazlı mıknatıs teknolojisi kullanılarak motorların ve jeneratörlerin ağırlığında ve boyutunda önemli bir küçülme söz konusudur.

Bu tür mıknatıslar, yüksek titreşim ve sıcaklık ortamlarında yüksek güvenilirlik sunar. Laboratuvar testlerinde bu mıknatısların manyetik özelliklerini 200°C kadar yükselttiklerinde korunduğu görülmüştür.

Nadir toprak oksitler, mekanik ve termal ortamlarda tutarlı çalışma ve yüksek güvenilirlik sağlayabildiği için, ticaret, endüstri ve savunma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. NTE'ler, füzeler, jet motorları, tanklar ve diğer askeri araçlar için en uygun yüksek performanslı çelik ve diğer alaşımlı bileşiklerde kullanılır. Belirli endüstriyel uygulamalar için NTE'lerin tanımlandığı 1930'lara kadar olan dönem sanayi devrimi dönemini, 1930'dan 1955'e kadar olan dönem ise kapsamlı bilimsel araştırmaların yapıldığı, nadir toprak malzemelerinin ve oksitlerin özelliklerinin belirlendiği dönemi temsil eder. NTE'ler, alaşımlar, bileşikler ve oksitler ile yapılan özel uygulamalarda güvenlik en önemli parametredir.

1.3 Nadir Toprak Oksitler

NTE'lerin, oksitleri, alaşımları ve bileşiklerini kullanırken çok dikkatli olunmalıdır. Ticari, endüstriyel, bilimsel ve askeri uygulamalarda kullanılan ve bilinen en popüler nadir toprak oksitler;

Tülyum oksit (Tm_2O_3), Seryum oksit (Ce_2O_3), Titterbiyum oksit (Yb_2O_3), Seryum oksit (Ce_2O_3), Disprosyum oksit (Dy_2O_3), Yuropiyum oksit (Eu_2O_3), Gadolinum oksit (Gd_2O_3), Holmiyum oksit (Ho_2O_3)'dir.

NTE'ler ve oksitleri üzerine yapılan çeşitli araştırmalarda ekstra dikkat edilmesi gerektiği, aksi takdirde ciddi sağlık sorunlarının ortaya çıkabileceğini göstermektedir. NTE'ler, oksitleriyle kıyaslandığında çok daha fazla radyasyon tehlikesi vardır. Tıp alanında, hastalıkların teşhisi ve tedavisi için çeşitli nadir toprak izotopları kullandığından, tıp teknisyenleri bu izotopları büyük bir dikkat ve önlemlerle kullanmalıdır. Nadir toprak izotoplarının yarı ömürlerinin radyasyon tehlikesi seviyesini belirlediğinden Tablo 1'de belirli izotopların yarı ömürleri özetlenmiştir.

Tablo 1. Tıp Alanında Kullanılan Bazı NTE İzotopların Yarı Ömürleri (Jha, 2019).

İZOTOP	VARI ÖMÜR
Ce^{144}	292 gün
Pr^{144}	18 dak.
La^{140}	40 saat
Eu^{156}	15.6 gün
To^{232}	1.4×10^{10} yıl
Pu^{239}	2.42×10^4 yıl
U^{233}	1.62×10^5 yıl

1.4 1950-2000 Yılları Arasında Nadir Toprak Oksitlerinin Dünyaki Durumu

Nadir toprak uzmanları ve bilim adamları, nadir toprak oksitlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin sistematik olarak keşfedilmesi, olası ticari ve endüstriyel uygulamaların belirlenmesi ve bunların tıbbi araştırma faaliyetlerinde kullanılması için yoğun bir şekilde çalışma yapmaya başlamıştır. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri, İngiltere, Almanya, Fransa ve diğer Avrupa ülkelerinde tıbbi araştırma programları başlatmış, nadir toprak oksitlerine olan yüksek talep

nedeniyle de bu oksitlerin küresel üretimi 1960 ile 2000 arasındaki dönemde ciddi bir şekilde ele alınmıştır.

1.5 Çeşitli Nadir Toprak Oksitlerinin Uygulamaları

Nadir toprak oksit uygulamaları üzerine yapılan kapsamlı araştırma çalışmaları, bu oksitlerin ticari, endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Yerkabuğundaki disprosyum (Dy) oksit ve yedi izotopunun bolluğu nedeniyle bilim adamları ve mühendisler, mikrodalga, yüksek performanslı optik kaplama ve ince film teknolojisi için çeşitli uygulamalarda kullanmıştır.

Disprosyum oksitler; cep telefonlarında, akıllı telefonlarda ve bilgisayar tabletlerinde uygulanmaktadır. Cihazların mekanik bütünlüğünü geliştirmek için neodiyum-demir-bor kalıcı mıknatıslar, disprosyum-demir-garnet optik kristaller ve bir dizi elektro-optik cihazın geliştirilmesinde de Dy oksit kullanılmaktadır.

Ayrıca bilim adamları, yüksek elektron ışını karakterizasyonunun klinik terapi, tümör hedefleme ve diğer klinik uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyeti nedeniyle bu oksit, yüksek yoğunluklu kompakt diskler gibi veri depolama uygulamaları için en uygun olan Dy bazlı bileşiklerde yaygın olarak kullanılır. Dy orta derecede toksiktir ve bu nedenle hava, deniz veya karayolu ile taşınması sırasında çok dikkatli olunması gerekir.

2. NTE'lerin Özel Karakteristikleri

Tüm nadir toprak elementlerinin yakın kimyasal özellikleri elementlerin ve bileşiklerinin arasındaki dikkate değer benzerliği elektronik konfigürasyonların bir sonucu olduğu, deneysel olarak ortaya çıkmıştır.

2.1 Elektronik Konfigürasyon

Nadir toprak elementlerinin elektronik konfigürasyonları Tablo 2'de listelenmiştir. Sc, Y ve La, birbirini izleyen üç geçiş elementi serisini başlatan elementlerdir. Değerlik elektron konfigürasyonları $ns^2(n-1)d1$ sırasıyla $n=4, 5$ ve 6 ile, f elektronları yoktur. Lantanı takip eden 14 element, yani Ce'dan Lu'a kadar olan elementler lantanitlerdir ve $6s^2$ ile temsil edilen değerlik elektron konfigürasyonlarına sahiptirler.

Ce'dan Lu'a kadar olan elementler "iç elementler" olarak bilinen seriyi oluşturur. Nadir toprak elementlerinin iyonlaşma potansiyelleri nispeten düşüktür. Elementler bu nedenle oldukça elektro-pozitifler ve esasen iyonik olan bileşikler oluştururlar. Doğada tüm nadir toprak elementler M^{3+} formda oluştururken, bazıları M^{+2} ve M^{+4} durumlarında da ortaya çıkar. Bu haller her zaman M^{+3} halinden daha az kararlıdır. Nadir toprak elementlerinin $+2$ ve $+4$ durumlarının oluşumu metalurji, elektronik yapıları ve iyonlaşma potansiyelleri ile ilgilidir.

Nadir topraklardan Sc, Y ve La sadece M iyonlarını oluştururlar çünkü bu inert gaz konfigürasyonu ile sonuçlanır. Lu ve Gd sadece M^{3+} iyonlarını oluşturur çünkü daha kararlı $4f^{14}$ ve $4f^7$ konfigürasyonları vardır. En çok kararlı M^{2+} ve M^{4+} iyonları, bu nadir toprak elementleri tarafından oluşturulur ve böylece f^0 , f^7 veya f^{14} konfigürasyonuna ulaşır. Böylece, Ce^{4+} ve Tb^{4+} f^0 ve f^7 sırasıyla konfigürasyonlar ve Eu^{2+} ve Yb^{2+} ise sırasıyla f^7 ve f^{14} konfigürasyonundadır. Başka bir deyişle, özel f_n kararlılığı 0 , f^7 ve f^{14} konfigürasyonlarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Nadir toprak elementlerinde $+3$ dışındaki oksidasyon durumlarının varlığı, diğer termodinamik ve kinetik faktörler oksidasyon durumlarının kararlılığını belirler.

2.2 Lantanit Daralması

"Lantanit daralması" terimi, lantanitlerdeki önemli ve istikrarlı azalmayı ifade etmek için kullanılır. Lantanit serisi La'dan Lu'a geçerken atom numarasındaki artışla birlikte atomların ve iyonların boyutu da artar. Böylece, Tablo 2 ve Şekil 1 'de verildiği gibi, La, en büyük ve Lu, en küçük yarıçapa sahiptir. Daralmanın nedeni bir elektronun aynı alt kabuktaki başka bir elektron tarafından kusurlu bir şekilde perdelenmesi olarak ifade edilir.

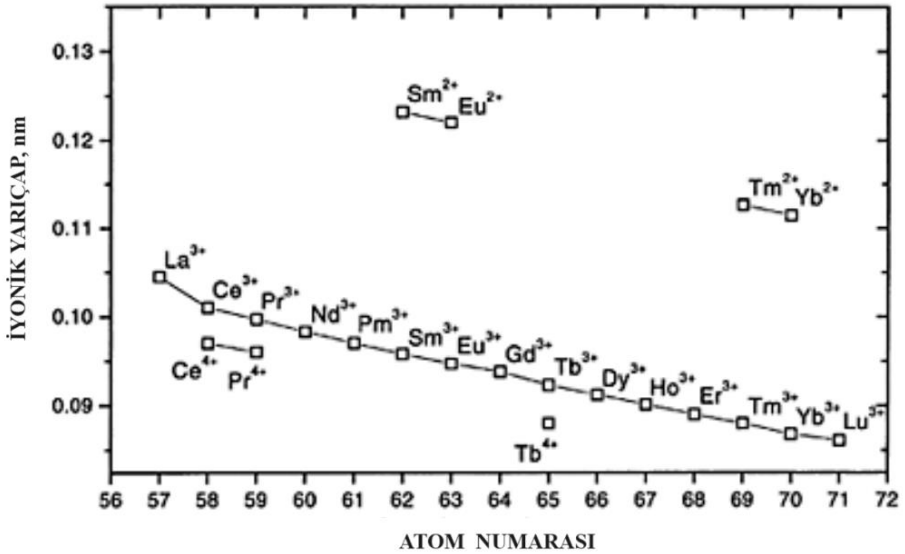
Lantanit daralması nadir toprak elementlerinin kimyasından kaynaklanmaktadır. Lantanitlerin kimyası ağırlıklı olarak iyoniktir ve öncelikle M^{3+} iyonunun boyutu tarafından belirlenir. Lantan atomu ve tripozitif iyonu, karşılık gelen Y türlerinden çok daha büyük boyutta olmasına rağmen, lantanit büzülmesinin büyüklüğü o kadar fazladır ki, lantanit türlerinin yarıçapları genel Ho-Er bölgesindeki Y türlerinin yarıçaplarına düşer.

(i) "Y" bileşikler, nadir toprak elementlerinin ayrılması için neredeyse tüm parçalanma prosedürlerinde her zaman daha ağır lantanit elementleriyle birlikte yoğunlaşır,

(ii) “Y” daha ağır lantanitlerden ayırmada önemli zorluklar yaşanır ve

(iii) “Y” çözünürlük, kristal yapı ve genel kimyasal özellikler bakımından daha ağır lantanit metalleriyle genel benzerlikler gösterir.

Lantanit daralması, daha ağır nadir toprakların atomik ve iyonik boyutları Y’a düşürmek için yeterli ancak Sc’a düşürmek için yeterli değildir. Sc’un atomik ve üç değerlikli iyonik yarıçapları çok küçüktür. Bu nedenle, Sc nadir toprak mineralleri içinde bulunmaz ve kimyası diğer nadir toprak minerallerinden önemli ölçüde farklılık sergiler.



Şekil 1. Lantanit Daralması (Gupta, and Krishnamurthy, 2005)

Tablo 2 Nadir toprak elementlerinin elektronik konfigürasyonunun özellikleri (Gupta, and Krishnamurthy, 2005).

Özellikler	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Se	Y
Atom	5d ⁶ s ²	4f ¹⁵ d ¹ 6s ²	4f ³ 6 s ²	4f ⁴ 6 s ²	4f ⁵ 6 s ²	4f ⁶ 6 s ²	4f ⁷ 6 s ²	5f ⁷ 5d 6s ²	4f ⁹ 6 s ²	4f ¹⁰ 6s ²	4f ¹¹ 6s ²	4f ¹² 6s ²	4f ¹³ 6s ²	4f ¹⁴ 6s ²	4f ¹⁴ 5d 6s ²	[Ar]3d 4s ²	-
M+2	5d	4f ²	4f ³	4f ⁴	-	4f ⁶	4f ⁷	4f ⁷ 5d	4f ⁹	4f ¹⁰	4f ¹¹	4f ¹²	4f ¹³	4f ¹⁴	-	-	-
M+3	[Xe]	4f	4f ²	4f ³	4f ⁴	4f ⁵	4f ⁶	4f ⁷	4f ⁸	4f ⁹	4f ¹⁰	4f ¹¹	4f ¹²	4f ¹³	4f ¹⁴	-	-
M+4	-	[Xe]	4f	4f ²	-	-	-	-	4f ⁷	4f ⁸	-	-	-	-	-	-	-
Yarıçap, M+3	1.061	1.034	1.013	0.995	0.979	0.964	0.95	0.938	0.923	0.908	0.894	0.881	0.869	0.858	0.848	0.68	0.88

2.3 Baziklik

Nadir toprak elementlerinin önemli özelliklerinden biri, iyonik büyüklükleridir ve lantanit daralması ile ilişkili olarak baziklik kavramından da bahsedilebilir. Baziklik, katyonların sulu ortamda ne ölçüde hidrolize olduğunu belirler (Moeller 1961). Yalnızca boyut ilişkileri göz önüne alındığında, nadir toprak iyonları azalan baziklik sırası; $La^{3+}>Ce^{3+}>Pr^{3+}>Nd^{3+}>Pm^{3+}>Sm^{3+}>Eu^{3+}>Gd^{3+}>Tb^{3+}>Dy^{3+}>Ho^{3+}>Y^{3+}>Er^{3+}>Tm^{3+}>Yb^{3+}>Lu^{3+}>Sc^{3+}$ şeklindedir.

Ce (IV), tüm dipozitif türlerden daha az baziktir, tripozitif türlerden daha baziktir (Moeller ve Kremers 1945).

Baziklik, nadir toprak elementlerinin birbirinden ayrılması için fraksiyonlama prosedürlerinin çoğunun temelini oluşturur (Moeller 1961). Klasik ayırma prosedürleri, baziklikteki farklılıklardan yararlanarak gerçekleşir. Burada fraksiyonel kristalizasyon ve fraksiyonel çökeltme yöntemleri kullanılır. Daha sonra iyon değişimi ve çözücü ekstraksiyonu teknikleri, yine nihai olarak baziklik farklılıklarından yararlanılarak gerçekleşir. Ayırmalarda oksidasyon ve redüksiyon da baziklik özelliği çok önemlidir.

3. REAKTİVİTE

3.1 Hava/Oksijen

Oda sıcaklığında, tüm nadir toprak metalleri, havadan aynı şekilde etkilenmez. Bazıları çok çabuk paslanırken bazıları yıllarca parlak kalır. Katı bir “Eu” bloğu, özellikle hava nemli olduğunda, oda sıcaklığında hemen kararır. Bu durumda bırakılırsa birkaç gün veya hafta içinde EuO 'e dönüşecektir. Benzer koşullar altında devasa “La” blokları birkaç gün içinde yüzey korozyonuna uğrayacak ve birkaç ay içinde kalın bir oksit kabuğu oluşturacaktır. Nd'lar da La ile aynı şekilde davranır. Fakat ANTE'lerin çoğu uzun süre parlak kalacaktır.

Sıcaklık ve nemdeki artış nadir toprak metallerinin oksidasyonunu hızlandırır (Gschneidner ve Daane 1988). Bağıl nem %1'den %75'e çıkarıldığında lantanın oksitlenme hızı on kattan fazla artar. Lantanın oksidasyonu %1 nemde, yani 35°C'de 0,8 mg/cm² gün, 95°C'de 5,1 mg/cm² gün'e yükselir, daha da yükselerek 400°C'de 32 mg/cm² gün'e ve 130 mg'a yükselir. 600°C'de /cm² gün (Love ve Kleber 1960) %75 bağıl nemdeki değer 95°C'de 210 mg/cm² gün'dür. İkinci koşullar altında Pr günde 55 mg/cm² oranında, Nd günde 20 mg/cm² oranında ve "Sm" günde 1 mg/cm² oranında oksitlenir. Üç değerlikli lantanitler; Gd, Lu, Sc ve Y'a kadar olan değerler 0 ila 0,35 mg/cm² gün arasındadır. HNTE'lerinin (La-Nd) oksidasyonu ile oluşan oksit ürünleri, altıgen A formundaki NT₂O₃ fazıdır. Sm'dan Gd'a kadar monoklinik β form NT₂O₃'ü oluşturur ve geri kalan nadir topraklar kübik C form NT₂O₃ fazını oluşturur. A formundaki oksitler, bir oksihidroksit oluşturmak üzere havadaki su buharı ile kolayca reaksiyona girer ve bu, oksidasyona uğrayan taze metal yüzeyini açığa çıkarır. C-tipi yapı oksitleri, daha fazla oksidasyonu önleyen sıkı, tutarlı bir stokiyometrik gri siyah kaplama oluşturur. Metalin flor, kalsiyum, magnezyum, karbon, demir gibi bir veya daha fazla safsızlık ve çinko, galyum, germanyum ve bunların türdeşleri gibi birçok p grubu elementi içermesi durumunda oksidasyon hızı önemli ölçüde artar. Saf metaller ilk başta oksijen ve nem tarafından yavaş yavaş saldırıya uğrar. Ancak oksidasyon başladığında oksit görünüşe göre reaksiyonu katalize eder ve oksidasyon hızlanır.

3.2 Refrakterler

Nadir toprak metallerinin oksijene karşı reaktivitesi, oksit oluşumunun büyük negatif serbest enerjisinden kaynaklanmaktadır. Nadir toprak oksit oluşumunun serbest enerjisi, periyodik tablodaki tüm elementler arasında en negatif olanlardan biridir. Başka bir deyişle nadir toprak oksitler, periyodik tablodaki tüm elementlerin oksitleri arasında en kararlı olanlardır. Oda sıcaklığında yalnızca kalsiyum nadir toprak oksitlerden daha kararlıdır. Sonuç olarak, nadir toprak metalleri, Zr, Al ve Mg gibi bu tür refrakter astarlara dahil olur (Kremers 1961). Nadir toprak metalleri oksijenle katı

çözeltiler oluşturur. Bu çözeltiler daha fazla stabiliteye sahiptir (Alcock 1976).

3.3 Azot

Nadir toprak metalleri nitrojene güçlü bir ilgi gösterir. Nadir toprakların mononitrürleri stabilite açısından titanyum veya zirkonyum gibi metaller ile karşılaştırılabilir (Pankratz ve diğerleri 1984). Yüksek erime noktalarına ve çok düşük ayrışma basınçlarına sahiptirler. Metaller ayrıca nitrojenle katı çözeltiler oluşturur. Örneğin “Ce”, 750°C'de ağırlıkça %0,3'e kadar nitrojeni çözer. Bu çözeltiler üzerindeki denge nitrojen basınçları daha da düşük olacaktır. Bu nedenle nadir toprak elementleri çevreden nitrojeni çok iyi alır. Ancak nadir toprak metalleri ile nitrojen arasındaki reaksiyon yavaştır. Kayda değer herhangi bir reaksiyonu gözlemlemek için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır. Ayrıca yüzeyde bir nitrür tabakasının oluşması nitridasyonu büyük ölçüde geciktirir.

3.4 Hidrojen

Nadir toprak metalleri hidrojenle reaksiyona girer ve 400 ila 600°C sıcaklıklarda kolayca hidritler oluşturur. Hidrasyonun devam etmesine izin verilirse, metal NTH_2 'ye kadar ve ötesinde hidrasyona tabi tutulduğunda katı malzeme parçaları oluşur. Hidrojen içeriği NTH_2 'nin altında olduğunda malzeme bir metal gibi davranır ve belirli hidrojen konsantrasyonlarında elektriği saf metalden bile daha iyi iletir. Y metaline birim hacim başına sıvı hidrojen veya suya göre daha fazla hidrojen yüklemek mümkündür. YH_2 'nin ayrışma basıncı oldukça yüksek sıcaklıklarda bile düşüktür ve yalnızca 1260°C'de 1 atm olur (Spedding ve diğerleri 1968). Yttriyum hidrürün aksine, bazı nadir toprak metal hidrürleri nispeten düşük sıcaklıklarda ayrışır ve hidrojeni açığa çıkaran gazdan arınır. Hidritin kırılabilirliği ve ufulanma eğilimi, gazdan arındırma yoluyla hidrojenin kolayca uzaklaştırılması olasılığı ile birleştiğinde, hidrürleme-ufalama-dehidritlemeyi nadir toprak metal tozu yapmak için bir yöntem haline getirmiştir (Gschneidner ve Daane 1988).

3.5 Karbon

Tüm nadir toprak elementlerinin NTC_2 dikarbürlerini oluşturduğu ve çoğunun (La-Sm, Gd-Ho, Y) seskikarbürleri, NT_2C_3 'ü oluşturduğu bilinmektedir. Monokarbürler (örneğin ScC, LaC) ve alt karbürler (örneğin NT_3C_4 , Sm, Gd-Lu) da bilinmektedir (Goldschmidt 1967). Nadir toprak karbürleri yüksek erime noktasına sahiptir ve oksijen ve nitrojen ile yoğun katı çözeltiler oluşturur. Nadir toprak metalllerinde karbonun katı çözünürlüğü de dikkate değerdir (Massalski ve ark. 1990). Örneğin, “Y” $1520^\circ C$ 'de ağırlıkça %1,3'e kadar C çözünür ve “La” $775^\circ C$ 'de ağırlıkça % 0,3'e kadar C alır.

3.6 Silikon

Silikon da karbon gibi nadir toprak silisitler ve katı çözeltiler oluşturur. Nadir toprak silisitler genellikle $NTSi_2$ formülü ile temsil edilir (Goldschmidt 1967).

3.7 Kükürt, Selenyum, Fosfor

Nadir toprak elementleri kükürt, selenyum ve fosfor ile ekzotermik reaksiyona girer. Nadir toprak metal karışımının bu elementlerle ısıtılması üzerine reaksiyon başlar ve önlem alınmazsa potaya, fırına, vakum muhafazalarına vs. ciddi şekilde zarar verebilir. Öte yandan, düşük sıcaklıklarda bazı nadir toprak elementler, özellikle ağır nadir topraklar, kükürt ile neredeyse hiç reaksiyona girmez.

3.8 Refrakter Metaller

Refrakter metaller arasında niyobiyum, molibden, tantal ve tungsten, sıvı nadir toprak metalllerinin saldırısına karşı dayanıklıdır. Yukarıda sıralanan metaller, yüksek sıcaklıklarda sıvı nadir toprak metallilerindeki çözünürlükleri azalan şekilde sıralanmıştır; tungsten en az çözünür olanıdır (Dennison ve diğerleri 1966, 1966a). Tantal yerine tungsten kullanıldığında, tungstenin sıvı nadir toprak metallilerindeki çözünürlüğü tantalın çözünürlüğünün yaklaşık üçte biri kadardır. Bununla birlikte, tungsten kırılmandır ve tantala kıyasla

zayıf mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle tantal, nadir topraklarda çözünür olmasına rağmen sıvı nadir topraklar için daha kullanışlı bir pota malzemesidir. Tantalın çözünürlüğü sıcaklığın bir fonksiyonudur (Gschneidner ve Daane (1988).

3.9 Asitler ve Bazlar

Tüm nadir toprak metalleri seyreltik mineral asitlerde kolayca çözünür ve hidrojen açığa çıkar. Belirli bir aralıkta çözünme hızı asit konsantrasyonu ile orantılıdır (Gschneidner ve Daane 1988). Konsantre sülfürik asidin metale saldırısı biraz daha azdır (Kremers 1953). Nadir toprak metalleri hidroklorik asit saldırısına karşı dayanıklıdır çünkü NTF_3 metali oluşturur. Eşit miktarda konsantre nitrik asit ve % 48 hidroklorik asitten oluşan bir karışım, nadir toprak elementlerinin çoğuna yalnızca yüzeysel olarak etkiler ve nadir toprak metallerini temizlemek/paklamak için kullanılabilir. Bu asit karışımı, tantalı nadir topraklardan ayırmak için kullanılabilir. Çünkü yalnızca tantal çözülürken nadir topraklar az çok bozulmadan kalır (Gschneidner ve Daane 1988). Nadir toprak metalleri yaygın organik asitlerle reaksiyona girer, ancak aynı konsantrasyondaki mineral asitlere göre daha yavaş hızlardadır. Nadir toprak metalleri, sodyum hidroksit gibi güçlü bazlarla yavaş yavaş reaksiyona girer. Amonyum hidroksit gibi zayıf bir bazla reaksiyona girmez.

3.10 Su

Nadir toprakların su ile reaksiyonu metale bağlı olarak değişir. Genellikle hafif nadir toprak metalleri suyla, oda sıcaklığında yavaşça ve daha yüksek sıcaklıkta kuvvetli bir şekilde reaksiyona girer. Ağır nadir toprak elementleri çok yavaş reaksiyona girer. Bununla birlikte, soğuk suyla bile Eu , $\text{Eu}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ oluşturarak hidrojeni serbest bırakarak reaksiyona girer (Spedding ve diğerleri, 1968).

4. SULU SİSTEMLER

Tablo 2'de listelenen standart oksidasyon potansiyeli verileri, nadir toprak elementlerinin her birinin, sulu asidik çözeltide güçlü bir indirgeyici madde olduğunu ve kolaylıkla tripositif iyonu

oluşturduğunu gösterir. Boş, yarı dolu ve tamamen dolu 4f kabukların özel stabilitesi, 4f 0 Ce (IV), 4f1 Pr (IV) kıyasla trippozitif duruma çok daha az kolaylıkla indirgenmesiyle oluşmaktadır (Moeller 1967). Benzer nedenlerden dolayı, 4f7 Eu (II) ve 4f14 Y (II), Sm (II) daha zayıf indirgeyici maddelerdir.

4.1 Üç Değerlikli Durum

Nadir toprak elementleri karakteristik olarak üç değerlidir. Sulu çözeltide, üçlü pozitif nadir toprak katyonları güçlü bir iyonik karaktere sahiptir ve çok çeşitli anyonlarla tuzlar oluşturur. Bu tür tuzların çözünürlükleri büyük ölçüde değişir. Nadir toprak hidroksitleri, amonyak veya seyreltik alkalilerin eklenmesiyle sulu çözeltilerden jelatinimsi çökeltiler olarak elde edilir. Nadir toprak hidroksitleri belirli bileşiklerdir ve yalnızca sulu oksitler değildir. La(OH)₃ nadir toprak hidroksitlerin en temelidir ve baziklik seri boyunca azalır.

OH⁻, CO₃⁻² ve C₂O₄⁻² gibi termal olarak kararsız anyonlar içeren nadir toprak tuzları ısıtıldığında önce bazik ve sonra oksitlere dönüşür. Hidratlanmış tuzlar, anyonun doğasına bakılmaksızın, yüksek sıcaklıklarda hidrolize uğrar. O₂⁻, F⁻, Cl⁻ ve Br⁻ gibi termal olarak kararlı anyonlar içeren nadir toprakların susuz bileşikleri, nispeten yüksek sıcaklıklarda ayrışmadan erir. Bu katılar aynı zamanda oldukça iyoniktir.

Nadir toprakların klorürleri, bromürleri, nitratları, bromatları ve perklorat tuzlarının tümü suda çözünür. Sulu çözeltileri buharlaştırıldığında hidratlı kristalin tuzlar halinde çökerler. Örneğin nadir toprak klorürler heksahidratlar halinde kristalleşir. Hafif nadir topraklar (La'dan Nd'ye) heptahidratlar oluşturabilir. Isıtma sırasında hidratlı klorürler HCl'yi H₂O'dan daha kolay ayrılır. Bromürler ve iyodürler klorürlere oldukça benzer. İyodürlerin yanı sıra iyodatlar ve asetatlar da suda biraz daha az çözünür. Sülfatlar az çözünür ve sıcaklık arttıkça çözünürlükleri azalır. Nadir toprak oksitleri, sülfidler, florürler, karbonatlar, oksalatlar ve fosfatlar suda çözünmez. Halojenürler arasında yalnızca florürler çözünmez. 3M

nitrik asitte bile NT^{3+} çözeltilerine hidröflorik asit veya florür iyonlarının eklenmesi, NTF_3 'ün çökmesine neden olur.

4.2 Kompleksler

Karmaşık türlerin oluşumu, trippozitif nadir toprak iyonlarının önemli bir özelliğidir. Bununla birlikte, iyonlardan herhangi bir hibrid f-orbitalinin kovalent bağlanmada yer alması olası değildir ve NT^{3+} iyonlarının büyük boyutu yalnızca belirli türdeki komplekslerin oluşmasını mümkün kılar (Moeller 1961).

Bu nedenle;

(i) nadir toprak komplekslerinin sayısı sınırlıdır,

(ii) yalnızca kendi küçük boyutları, büyük yükleri ve şelatlama yetenekleri nedeniyle NT katyonlarını çekebilen türler kompleksler üretecektir,

(iii) bu tür stabilite ayrışma açısından kompleksler, üçlü pozitif geçiş metali iyonlarınınkinden daha az olacaktır ve

(iv) tüm karmaşık türlerdeki bağlanma, ağırlıklı olarak iyonik olacaktır.

Koordinasyon sayısı genellikle 7, 8, 9 veya 10'dur ve yalnızca izole durumlarda 6'dır. Doğrudan 4f elektronlarına bağlı olan özellikler kompleksleşmeden etkilenmez. Trippozitif nadir toprak iyonlarının oluşturduğu kompleksler arasında sitrik asit, etilen diamin tetraasetik asit (EDTA) ve hidroksi etilen diamin triasetik asit (HEDTA) içeren kompleksler bulunur. Bu kompleksler suda çözünür. Bununla birlikte, türlerin çözelti içindeki stabilite büyük önem taşımaktadır. Çünkü komplekslerin stabiliteindeki farklılıklar, nadir toprak elementlerinin birbirinden ayrılmasını sağlamak için iyon değiştirme teknikleriyle birlikte kullanılır (Powell 1979, Powell 1961). Kompleks oluşumu pH'a bağlıdır ve şelatların stabilitesi nadir toprak iyonunun iyonik yarıçapıyla ilişkilidir. Kompleks türlerin stabilitesi La^{3+} 'dan Eu^{3+} veya Gd^{3+} 'ya her zaman artar ancak Gd 'dan daha ağır katyonlar için stabilite artmaya devam edebilir, neredeyse sabit kalabilir (Moeller 1967).

4.3 Dört Değerlikli Durum

Ce (IV), katı bileşiklerin yanı sıra sulu çözeltilerde de stabil olan tek tetrapozitif nadir toprak türüdür (Moeller 1961). Ce (III) ve (IV) değerlik durumları genellikle sırasıyla seröz ve serik olarak adlandırılır. Serik oksit, CeO_2 , sulu serik oksit, $CeO_2 \cdot nH_2O$ ve serik florür, CeF_4 , Ce(IV)'ün tek ikili katı bileşikleridir. Serik oksit, seryum metali, $Ce(OH)_3$ veya oksalat, nitrat veya karbonat gibi çeşitli Ce(III) oksosaltlarından herhangi birinin hava veya oksijen içerisinde ısıtılmasıyla elde edilir. Saf olduğunda beyaz olan CeO_2 oldukça inerttir ve güçlü asitler veya alkalilerden bile etkilenmez. Fakat indirgeyici ajanların varlığında asitlerle çözülerek Ce(III) oluşturulabilir.

Sulu $CeO_2 \cdot nH_2O$, bazlarla işleminden geçirilerek Ce(IV) çözeltilerinden sarı jelatinimsi bir çökelti halinde elde edilebilir. Serik florür, CeF_4 , susuz $CeCl_3$ veya CeF_3 'ün flor ile oda sıcaklığında reaksiyona sokulmasıyla hazırlanır. Serik florür soğuk suya karşı etkisizdir ve 200–300°C'de hidrojen ile CeF_3 'e indirgenir. Ce(IV), Ce(III) çözeltilerinin nitrik asit içerisinde ozon, peroksodisülfat veya bizmutat gibi güçlü oksitleyici maddelerle işlenmesiyle çözelti halinde elde edilir. Alkali koşullar altında seryumun +4 durumuna oksidasyonu $OC1^-$, H_2O_2 ve O_2 tarafından kolaylıkla etkilenir. Çözeltilerde Ce(IV) elektrolitik oksidasyonla da elde edilebilir. Ce(IV), $4NHNO_3$ 'te çözünmeyen fosfatlar ve $6NHNO_3$ 'te çözünmeyen iyodatların yanı sıra çözünmeyen oksalat oluşturur. Ce (IV)'ü üç değerlikli nadir toprak elementlerinden ayırmak için fosfat veya iyodat şeklinde çökeltme kullanılabilir. Ce (IV), tributil fosfat gibi organik çözücülere NT(III) iyonlarından daha kolay ekstrakte edilir. Ce (IV) oksitleyici bir madde olarak kullanılabilir. Serik oksit, hidroklorik asit gibi asitlerde indirgenerek çözünür. Asidik ortamda Ce (IV) indirgenmesi Fe^{2+} , Sn^{2+} , I^- ve H_2O_2 gibi birçok indirgeyici tarafından gerçekleştirilir. Nitrik asit veya sülfürik asit gibi oksitleyici asitlerde indirgenmeden çözünür. Ce (IV)'ün çift amonyum nitriti, turuncu kırmızı çözünür $Ce(NO_3)_4 \cdot 2NH_4NO_3$, konsantre bir nitrik asit çözeltilerinden kolayca kristalleşir. Hem mükemmel bir Ce(IV) kaynağı hem de yararlı bir analitik oksitleyici

ajandır. Pr(IV) güçlü bir oksitleyici ajandır ve suyun kendisini oksitler. Bu nedenle sulu çözeltide mevcut değildir. Pr(III) tuzu veya oksit havada ısıtıldığında Pr_6O_{11} oluşur. Oksitte hem Pr(III) hem de Pr(IV) bulunur.

Tb(IV)'ün kimyası Pr(IV)'ün kimyasına benzer. Tb_4O_7 oksit, Tb(III) oksosaltlarının havada ateşlenmesiyle elde edilir. Tb_4O_7 hem Tb(III) hem de Tb(IV)'ü içerir. TbO_2 , Tb_2O_3 'ün $450^\circ C$ 'de atomik oksijenle oksidasyonu sonucu elde edilir. Renksiz bileşik TbF_4 , TbF_3 'ün $300-400^\circ C$ 'de gaz halindeki flor ile işlenmesiyle elde edilir.

4.4 İki Değerlikli Durum

Sm, Eu ve Yb'nin iki değerlikli durumu hem çözeltide hem de katı bileşiklerde söz konusudur. Bu türler;

(i) susuz halojenürlerin veya kalkojenitlerin metaller veya hidrojen ile termal indirgenmesiyle elde edilir (Moeller 1967). Örneğin, Eu (II) katı oksidi, kalkojenitleri, halojenürleri, karbonatı veya fosfatı, karşılık gelen Eu(III) bileşiğinin indirgenmesiyle veya $EuCl_2$ 'den metatez yoluyla,

(ii) sulu çözeltide veya halojenür eriyiklerinde elektrolitik indirgeme yoluyla elde edilebilir. Örneğin Eu(II) ve Yb(II),

(iii) çözeltide kimyasal indirgeme ile elde edilir: sulu çözeltide Zn kullanan Eu(II), etanolde Mg kullanan Sm(II),

(iv) susuz triiyodürlerin termal ayrışması, ve

(v) serbest metallerin kontrollü oksidasyonu olur.

İki değerlikli nadir toprak katyonları asidik sulu çözeltilerde güçlü indirgeyici ajanlardır ve indirgeme yetenekleri $Sm^{2+} \gg Yb^{2+} \gg Eu^{2+}$ sırasıyla azalır. Hem Sm^{2+} hem de Yb^{2+} , hidronyum iyonu ve ayrıca hava yoluyla anında trippozitif türlere oksidasyona uğrar. Ancak Eu^{2+} 'nın oksidasyonu daha yavaştır ve Eu^{2+} içeren çözeltiler kolaylıkla işlenebilir. Asidik çözeltide, üç iyonun tümü elementel oksijen tarafından hızla oksitlenir. NT^{2+} iyonları Grup II iyonlarına, özellikle de Ba^{2+} 'ya benzer. Bu nedenle hidroksitler çözünür ve sülfatlar çözünmez. Eu^{3+} çinko ile çift

pozitif duruma indirgeme ve ardından geri kalan üçlü pozitif nadir toprakların karbonatsız amonyak ile hidroksitler halinde çökeltilmesi yoluyla diğer nadir topraklardan kolaylıkla ayrılabilir. İki değerlikli iyonların suda çözünmeyen bileşikleri, sülfatları, karbonatları veya florürleri oksidasyona karşı nispeten daha dirençlidir. Bu iyonların Ba^{2+} veya Sr^{2+} ile karşılaştırıldığında karmaşık bileşikler oluşturma eğilimi çok azdır.

5 UYGULAMALAR

Nadir toprak elementlerinin modern teknolojiye giderek artan çeşitli uygulamaları vardır. Birçok endüstriye önemli malzemeler sağlarlar (Molycorp Inc., 1993). Nadir toprak elementlerinin ilk uygulaması ve nadir toprak endüstrisinin başlangıcı 1891 yılına dayanmaktadır. İlk olarak 1866'da lantan katkılı zirkonyumdan oluşan bir gaz örtüsünün keşfedildi. Bu başlangıçlardan itibaren ve uzun yıllar boyunca nadir toprakların endüstriyel uygulamaları metalurji, mıknatıslar, seramik, elektronik, kimyasal, optik, tıbbi ve nükleer teknolojilerde kullanılmaya başlamıştır (Gschneidner 1981; Greinacher 1981; Bagchi 1988).

Nadir toprak elementleri, yüksek saflıkta bireysel nadir toprak kimyasalları için hammadde olarak ve petrol ve çevre koruma katalizörleri, misch metal ve parlatma tozlarının yapımında kullanılır.

Lantan bakımından zengin nadir toprak bileşikleri, özellikle ağır ham petrolden düşük oktanlı yakıt üretiminde FCC katalizörlerinde bileşen olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Lantan bakımından zengin nadir toprak metalleri, hidrojen depolama pillerinde önemli bir role sahiptir. Lantan, alüminat ($La_{0.4}Ce_{0.45}Tb_{0.15}PO_4$) bazı yeşil fosforlarda kullanılır. Lantanit zirkonatlar katalitik ve iletkenlik özellikleri için kullanılır ve lantanla stabilize edilmiş zirkonya yararlı elektronik ve mekanik özelliklere sahiptir. Lantan, Yitriyum-lantan-florür (YLF) bileşimine dayanan lazer kristallerinde kullanılır.

Seryumun ticari uygulamaları çoktur. Cam ve cam parlatmayı, fosforları, seramikleri, katalizörleri ve metalurjide kullanılır. Ce katkılı camların ultraviyole ışığı engeleme özelliği vardır. Ayrıca tıbbi cam eşyalar ve hava araçlarının pencerelerinin imalatında kullanılmaktadır. Polimerlerin güneş ışığında kararmasını önlemek ve televizyon camındaki renk solmasını bastırmak için de kullanılır. Seryum ayrıca seramiklerde ve zirkonya bazlı ürünlerde faz stabilizatörü olarak kullanılır.

560 nm'de optimum yansıması nedeniyle praseodimyum katkılı zirkonya, parlak sarı bir pigment olarak seramik kullanımında oldukça değerlidir. Florür liflerinde doping maddesi olarak kullanılması da dahil olmak üzere, telekomünikasyon sistemlerinde kullanılır.

Birincil uygulamalar arasında lazerler, cam renklendirme ve renklendirme, dielektrikler ve en önemlisi neodimyum-demir-bor ($Nd_2Fe_{14}B$) kalıcı mıknatıslar yer alır. Otomotiv endüstrisinde marş motorları, fren sistemleri, koltuk ayarlayıcıları ve birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır. En büyük uygulaması bilgisayar disk sürücülerinde kullanılan ses bobinli motorlardır. Neodimyum, insan gözünün maksimum hassasiyet seviyesine çok yakın olan, 580 nm'de ortalananmış güçlü bir emme bandına sahiptir ve bu da onu kaynak gözlükleri için koruyucu lenslerde kullanışlı kılar. Cama verdiği çekici mor renk nedeniyle cam üretiminde oldukça değerlidir. Neodimyum, dielektrik kaplamalar olarak kullanılan birçok baryum titanat formülasyonunda ve elektronik ekipmanlar için gerekli olan çok katmanlı kapasitörlerde kullanılır. Yitrium-alüminyum-granat (YAG) katı hal lazerleri, optimum emme ve yayma dalga boylarına sahip olduğundan neodimyum kullanır. Nd bazlı YAG lazerler çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Samaryum öncelikle samaryum-kobalt (Sm_2Co_{17}) kalıcı mıknatısların üretiminde kullanılır. Ayrıca lazer uygulamalarında ve dielektrik özelliklerinden dolayı da kullanılır. Samaryum-kobalt mıknatıslar, 1970'lerin başında daha pahalı olan platin-kobalt

mıknatısların yerini aldı. Artık daha ucuz olan neodimyum-demir-bor mıknatısının gölgesinde kalsalar da, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme yetenekleri nedeniyle hâlâ değerlidir. Uygulamalar elektronik saatleri, havacılık ekipmanları, mikrodalga teknolojisinde kullanılmaktadır. Zayıf spektral absorpsiyon bandı nedeniyle samaryum, başıboş emisyonları emerek verimliliği artırmak amacıyla Nd:YAG katı hal lazerlerinin filtre camında lazer çubuğunu çevrelemek için kullanılır. Samaryum, mikrodalga frekanslarında kaplamalar ve kapasitörler için uygundur.

Europium, ultraviyole radyasyonun emilmesiyle uyarılması, atom içinde görünür radyasyon emisyonu yaratan spesifik enerji seviyesi geçişlerine neden olabilir. Enerji tasarruflu floresan aydınlatmada Eu yalnızca kırmızıyı değil aynı zamanda mavi ışık üretir. Eu özellikle renkli TV, bilgisayar ekranları ve floresan lambalarında kullanılır. Ayrıca tıbbi, cerrahi ve biyokimyasal uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Gadolinyum hem yüksek manyetik momenti hem de fosfor ve sintilasyonlu materyallerde kullanılır. EDTA katkı maddeleri ile karıştırıldığında manyetik rezonans görüntüleme yapılan hastalarda enjekte edilebilir kontrast madde olarak kullanılır. Yüksek manyetik momenti ile gadolinyum gevşeme sürelerini azaltabilir ve böylece sinyal yoğunluğunu artırabilir. Düşük enerji seviyeleri olmayan, özellikle kararlı yarı dolu 4f elektron kabuğu, inert bir fosfor konakçısı olarak uygulamalar yaratır. Bu nedenle gadolinyum, x-ışınlarında ve bilgisayarlı tomografilerde kullanılmaktadır.

Terbiyum öncelikle fosforlarda, floresan lambalarda ve Yitriyum alüminyum-garnet (Tb:YAG) çeşidi projeksiyon televizyonlarında kullanılır. Terbiyum, x-ışını uyarımına etkili bir şekilde yanıt verir ve bu nedenle bir x-ışını fosforu olarak kullanılır. Terbiyum alaşımları aynı zamanda TbFeCo gibi manyeto-optik kayıt filmlerinde de kullanılır.

Disprosyum en yaygın olarak neodimyum-demir-bor yüksek mukavemetli kalıcı mıknatıslarda kullanılır. Nadir toprak elementleri arasında en yüksek manyetik momentlerden birine

sahiptir. Ayrıca BaTiO₂ formülasyonlarına dayalı özel seramik bileşimlerde de kullanılır.

Holmiyum, doğal olarak oluşan elementler arasında en yüksek manyetik momente (10,6μB) sahiptir. Bu nedenle kutup parçası veya manyetik akı yoğunlaştırıcı olarak yüksek mukavemetli mıknatısların içine yerleştirilir. Bilinen en yüksek manyetik alanları oluşturmak için kullanılır. Bu manyetik özellik aynı zamanda mikrodalga ekipmanı için Yitriyum-demir-granat (YIG) lazerlerinde de kullanılır. İnsan gözü için güvenli 2,08 mikronluk Holmiyum lazerler, hem Yitriyum-alüminyum-granat (YAG) hem de Yitriyum-lantan-florür (YLF) katı hal lazerlerinde çeşitli tıbbi ve dişçilik uygulamalarında kullanılmasına neden olur.

Erbiyumun cam renklendirmede, fiber optikte amplifikatör olarak, tıbbi ve dişçilik amaçlı lazerlerde kullanılır. Erbiyum iyonu, erbiyum tuzlarını pembeye boyayan çok dar bir emme bandına sahiptir. Bu nedenle gözlük ve dekoratif cam eşyalarda kullanılır. Demir iyonları gibi renk bozucu yabancı maddeleri nötralize edebilir ve nötr gri bir ton üretebilir. Bu amaçla çeşitli cam ürünlerde kullanılmaktadır. Özellikle fiber optik veri aktarımı için bir amplifikatör olarak kullanışlıdır. Er:YAG bazlı lazerler, dokuda termal birikmeyi önlediği için cerrahi uygulamalar için idealdir.

Thulium ürünleri esas olarak kristal ve lazer yapımında kullanılır. Thuliumun tıp alanında önemli kullanım alanı olan elementlerdendir. Nispeten yüksek maliyetine rağmen taşınabilir x-ışını kaynaklarında kullanılmaktadır. Tıbbi ve dişçilik teşhislerinde, mekanik ve elektronik bileşenlerde kusurların tespitinde kullanılan araçlarda kullanılır. Thulium, mikrodalga teknolojilerinde kullanılan yitriyum demir alaşımlarına benzer şekilde manyetik ve seramik malzemeler içinde kullanılır.

Ytterbiyum çok sayıda fiber amplifikatör ve fiber optik teknolojisinde, çeşitli lazer uygulamalarında kullanılmaktadır. Kızılötesinde 985 n'de tek bir baskın soğurma bandına sahiptir. Ytterbiyum metali çok yüksek gerilimlere maruz kaldığında elektrik direncini artırır. Bu özellik, depremlerden ve nükleer patlamalardan

kaynaklanan zemin deformasyonlarını izlemek için stres ölçerlerde kullanılmasına imkan sağlar.

Lutesyum nadir toprak serisinin son üyesidir. Çoğu nadir toprak elementinin aksine manyetik momenti yoktur. Aynı zamanda nadir topraklar arasında en küçük metalik yarıçapa sahiptir. Lantanitler arasında belki de doğal olarak en az bulunanıdır. Bilinen en yoğun beyaz malzeme olan lutesyum tantalatı (LuTaO₄) ürettiği için x-ışını fosforları için ideal bir konakçıdır. Manyetik momentinin olmaması nedeniyle indiyum-galyum-granat (IGG) kristalleri gibi belirli substrat garnet kristallerinin kafes parametrelerinin eşleştirilmesinde bir katkı maddesi olarak kullanılır.

Yitriyum, herhangi bir elementin oksijenine karşı en yüksek termodinamik çekiciliği olan elementtir. Bu özellik birçok uygulamasının temelini oluşturur. Yitriyumun bazı uygulamaları arasında seramiklerde erimiş reaktif metaller için pota olarak, floresan aydınlatma fosforlarında, bilgisayar ekranlarında ve otomotiv yakıt tüketimi sensörlerinde kullanımını sağlar. Yttria ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit, havacılık bileşenlerinin yüzeylerini yüksek sıcaklıklarda korumak için termal plazma spreyleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır. Yitriyum-demir garnet (YIG) çeşidinin kristalleri, mikrodalga ve iletişim ekipmanlar için gereklidir. Y₂O₂S televizyonlardaki kırmızı rengi oluşturur. Yitriyum alüminyum-granat (YAG) çeşidinin kristalleri, bir dizi lazer uygulamasında neodiyum ile birlikte kullanılır. Yttria ayrıca metalik alaşımların gücünü de artırabilir.

Skandiyum ürünleri esas olarak seramiklerde, lazerlerde, fosforlarda ve bazı yüksek performanslı alaşımlarda kullanılır.

Toplam nadir toprak tüketimi çok yaygındır. 2001 yılında ABD'de (Hedrick 2002) son kullanıma göre;

Cam parlatma ve katalizörler=%34, Petrol rafine edici katalizörler=%16, Otomotiv katalitik konvertörleri=%15, Metalurjik katkı maddeleri ve alaşımlar=%14, Aydınlatma, televizyon/bilgisayar monitörleri, radarlar ve röntgen için nadir

topraklar, yoğunlaştırıcı film=%9, Kalıcı mıkmatıslar=%8 ve Diğer kullanımlar=%4 paya sahiptir.

Nadir toprak elementleri doğada bol miktarda bulunsa da hiçbir zaman ucuz değillerdir. Ancak mevcut nadir toprak element ihtiyaçları nedeniyle daha ucuz elde edilmesi için çözüm arayışları hala devam etmektedir. Nadir toprakların elde edilmesi iki şekilde gerçekleşmektedir. Biri yeni süreçlerin kullanımı ile diğeri ise yeniden üretim teknikleri ile dir (Greinacher 1981, Falconnet 1988). Bunlar Tablo 3' te listelenmiştir. Metalurjik ve manyetik özelliklerin söz konusu olduğu yerlerde nadir topraklar elementler kullanılır. Optik, kimyasal ve belirli özel manyetik özelliklere dayalı uygulamalarda oldukça yaygındır. Bu nedenle nadir toprakların belirli cilalama uygulamalarında, katalizörlerde, fosforlarda, mıkmatıslarda, optik cam bileşenlerinde, camın renklendirilmesinde ve renginin açılmasında, pigmentlerde ve x-ışını yoğunlaştırıcılarında kullanılması uzun ömürlü olacaktır.

Nadir toprak elementlere gelecekte, kirlilik katalizörleri, kalıcı mıkmatıslar ve şarj edilebilir piller gibi uygulamalarda, otomobiller, elektronik ekipmanlar, bilgisayarlar ve taşınabilir ekipmanlara olan talep artışıyla çokdaha fazla ihtiyaç duyulacaktır. Şarj edilebilir NiMH piller, fiber optikler ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) kontrast maddeleri, pozitron emisyon tomografisi (PET), sintilasyon dedektörleri, tıbbi izotoplar ve dişçilik ve cerrahi lazerler dahil olmak üzere tıbbi uygulamalarda nadir toprak elementlerinin gelecekteki talebinin artacağı tahmin edilmektedir (Hedrick 2001).

Tablo 3. Nadir topraklara alternatifler uygulamalar.

Uygulama	Nadir Toprak Malzeme	Alternatifi
Metalurji Sfero demir Çelik	Misch metal Misch metal, NT silisit	Magnezyum Kalsiyum
Nükleer enerji Kontrol çubuğu	Eu	Hafniyum
Hidrojen deposu	Lantan nikel alaşımı	Demir titanyum alaşımı
Cam	Parlatma CeO	Düz cam (Pilkington) işlemi
Seramik	Sırlı seramik karolar Ce	Kalay, zirkonyum
Kataliz	Karışık NT	Yüksek oktanlı benzin

6 SONUÇLAR

Nadir topraklar nelerdir? Bunların hepsi nasıl keşfedildi ve keşifleri neden alışılmadık derecede uzun bir bilimsel çaba süreci sonucunda gerçekleşti? Özellikleri nelerdir? Ne tür etkileşimlere giriyorlar? Bilimsel merakın dışında, araştırmacıları nadir toprak elementleri adı verilen gizemi çevreleyen gizemi çözmeye çalışmaya iten şey neydi?

Bu soruların cevapları bilim dünyasında hala araştırılmakta ve cevap aranmaktadır. Nadir toprak elementlerini kendi benzersiz özellikleri açısından incelemenin büyük bilimsel değeri olmasına rağmen, nadir toprak elementlerinin geniş bir teknolojik yelpazede son derece yararlı materyallerdir.

Nadir toprak elementlerinin fiziği ve kimyası iyi anlaşılmadan bu mümkün değildir. Nadir toprak elementlerinin fiziğini ve kimyasını incelemek için nadir toprak elementlerinin saf formda olması gerekir. Dünyanın her yerindeki birçok araştırma grubu nadir toprak elementlerini araştırmakta ve bunların bilimsel davranışlarını ve uygulama olanaklarını değerlendirmektedir. Verilen fiziksel özellikler her zaman indirgeme ve rafinasyon adımlarındaki uygulama potansiyelleriyle ilgilidir. Listelenen uygulamaların pekçoğu aynı zamanda zahmetli olmaklabirlikte

dikkate değer miktarda nadir toprak malzemesi elde etme ihtiyacı
gün geçtikçe artmaktadır.

KAYNAKÇA

Alcock, C.B. (1976) *Pyrometallurgy*, pp. 239–239, Academic Press, New York.

Bagchi, D.C. (1988) The use of rare earths in cinema arc carbons. In Gupta, C.K. and Krishnan, T.S. (eds.), *Rare Earths—Applications and Technology*, pp. 265–268, Trans Tech Publications, Switzerland.

Dennison, D.H., Tschetter, M.J., and Gschneidner, Jr., K.A. (1966) The solubility of tantalum in eight liquid rare earth metals, *J. Less Common Metals*, 10:108–115. Dennison, D.H., Tschetter, M.J., and Gschneidner, Jr., K.A. (1966a) The solubility of Ta and W in liquid rare earth metals, *J. Less Common Metals*, 11:423–435.

Falconnet, P.G. (1988) Rare earths production and marketing opportunities. In Gupta, C.K. and Krishnan, T.S. (eds.), *Rare Earths—Applications and Technology*, pp. 1–12, Trans Tech Publications, Switzerland.

Goldschmidt, H.J. (1967) *Interstitial Alloys*, Plenum, New York.

Gschneidner, Jr., K.A. (1981) *Industrial Applications of Rare Earth Elements*, ACS Symp. Ser. 164, American Chemical Society, Washington, D.C.

Gschneidner, Jr., K.A. and Daane, A.H. (1988) Physical metallurgy. In Gschneidner, Jr., K.A. and Eyring, L. (eds.), *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, Vol. 11, pp. 409–484, North Holland, Amsterdam.

Gupta, C.K. and Krishnamurthy, N. (2005) *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press, Boca Raton.

Hedrick, J.B. (2001) Rare earths. *U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2001*, Vol. 1, 61.1–61.17, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.

Hedrick, J.B. (2002) Rare earths. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2002, Vol. 1, 61.1– 61.16, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.

[Jha, A. R.](#) 2019. Deployment of Rare Earth Materials in Microwave Devices, RF, Transmitters, and Laser Systems. Auerbach Publications, New York, 216 p.

Kremers, H.E. (1953) Rare earth metals. In Kirk, R.E. and Othmer, D.F. (eds.), *Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 11, pp. 503–521, Interscience, New York.

Kremers, H.E. (1961) Rare earth metals. In Hampel, C.A. (ed.), *Rare Metals Handbook*, 2nd edn., pp. 393–417, Reinhold, New York.

Love, B. and Kleber, E.V. (1960) Rare earths: sixteen new metals are ready to use, *Mater. Des. Eng.*, 52(5): 134–137

Massalski, T., Okamoto, H., and Subramanyam, R. (eds.) (1990) *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., Vols. 1 and 2, American Society for Metals, Materials Park, OH

Moeller, T. (1961) Chemistry of rare earths. In Spedding, F.H. and Daane, A.H. (eds.), *The Rare Earths*, Chapter 2, John Wiley, New York.

Moeller, T. (1967) Lanthanide elements. In Hampel, C.A. (ed.), *Encyclopedia of Chemical Elements*, pp. 338–349, Reinhold, New York.

Moeller, T. and Kremers, H.E. (1945) The basicity characteristics of scandium, yttrium and the rare earth elements, *Chem. Rev.*, 37:97–159.

Molycorp, Inc. (1993) *A Lanthanide Lanthology*, Molycorp, Inc., Mountain Pass, CA, U.S.

Pankratz, L.B., Stuve, J.M., and Gokcen, N.A. (1984) *Thermodynamic Data for Mineral Technology*, Bureau of Mines bulletin 677, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.

Powell, J.E. (1961) Separation of rare earths by ion exchange. In Spedding, F.H. and Daane, A.H. (eds.), *The Rare Earths*, Chap. 6, John Wiley, New York.

Powell, J.E. (1979) Separation chemistry. In Gschneidner, Jr., K.A. and Eyring, L. (eds.), *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, Vol. 3, pp. 81–110, North Holland, Amsterdam

Spedding, F.H., Beaudry, B.J., Croat, J.J., and Palmer, P.E. (1968) The properties, preparation and handling of pure rare earth metals. In *Materials Technology—An Interamerican Approach*, p. 151, Am. Soc. Mech. Eng., New York.

