



MTA Yerbilimleri ve Madencilik Dergisi

<https://www.mta.gov.tr/mtayerbilimleri/>



Kırıkkale-Çankırı-Çorum kayatuzu yatakları jeolojisi ve doğalgaz depolama imkanları

Abdullah Mete ÖZGÜNER^{a*}

^aMaden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, 06530, Ankara, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Kayatuzu Jeolojisi, Gaz Depolayan Kaverna, Solüsyon Madenciliği, Çevre Kirliliği, Orta Anadolu

ÖZ

Kırıkkale-Çankırı-Çorum Neojen evaporit havzasında gerçekleştirilen sondajlı jeolojik etütler ve jeofiziksel sismik, DES etütleri; Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu anhidrit seviyesi altında yaklaşık toplam 1150-600 m arası kalınlığa sahip yer altı kayatuzu yatağının varlığını saptamıştır. Çok sığ denizel evaporitik ortamlarda çökelen bu kalın, yatay tabakalı tuz yataklarının izostatik grabenlerde yer aldığı, havza ve horst kenarlarında incelendiği görülmüştür. Kayatuzlu litolojik istiflerin detay korelasyonu, gaz depolayan kaverna lokasyonlarını tespit çalışmalarında gerekli olup kaverna risklerini minimuma indirir. Sondajda kesilen farklı kayatuzu karot kalınlıkları için teorik kaverna derinlikleri, boyutları ve yeraltı basıncına dayanan gaz depolama hacimleri hesaplanabilir. Deep Şirketinin, Kırıkkale KİAŞ kayatuzu sondaj karotları laboratuvar analizlerinde saptadığı litolojik basınç gradyeni, kullanım faktörü, bulking faktörü değerleri; Çankırı, Çorum kalın kayatuzu yatakları için de yaklaşık kullanılabilir. Sondaj karotlarına dayanan kaverna hacim hesaplaması, proje maliyetlerinin saptanmasına yardımcı olur. Kızılırmak ve kolları suyunun debi ve kimyasal özellikleri, solüsyon madenciliğine uygun olduğunu belirtmiştir. KİAŞ kaverna açılımında çıkacak tuzlu sular, Kırıkkale Petrol Rafinerisinde kullanılabilir veya çevre kirliliğini önlemek için kurak vadilerde beton setli havuzlarda saklanabilir. TANAP ve Mavi Akım doğal gaz boru hatları, kayatuzu sahalarının yakınından geçtiği için doğal gaz depolama masrafları azalacaktır.

Gönderim Tarihi: 09.04.2022

Kabul Tarihi: 20.10.2022

Keywords:

Salt Geology, Gas storing Caverna, Solution mining, Environmental pollution, Central Anatolia

ABSTRACT

Borehole geological studies and geophysical seismic, vertical electrical sounding (VES) surveys carried out in Kırıkkale-Çankırı-Çorum Neogene evaporite basin determined salt deposit with total thickness of approximately 1150-600 m below the anhydrite level in Oligo-Miocene aged Bayındır Formation. It has been observed that the thick, horizontal salt beds deposited in very shallow marine evaporitic environments, are located in isostatic grabens and thinned at the basin and horst margins. The detail correlation of the rocksalt lithological successions is necessary for the determination of gas-storing caverna locations and minimizing the cavern risks. Theoretical cavern depths, dimensions and gas storage volumes based on underground pressure can be calculated for different thicknesses of the salt cores in drillings. The lithological pressure gradient, utilization factor, bulking factor values of the KİAŞ Kırıkkale salt drilling cores determined by Deep Company in the laboratory analysis; can also approximately be used for the thick Çankırı, Çorum salt deposits. Cavern volume calculation based on drill cores helps to determine project costs. Flow rate and chemical properties of Kızılırmak and its tributaries indicate that it is suitable for solution mining. The salty water that will emerge from the KİAŞ cavern opening can be used in Kırıkkale Oil Refinery or stored in concrete set pools in arid valleys to prevent environmental pollution. Natural gas storage costs will be reduced as TANAP and Blue Stream natural gas pipelines pass near the salt deposit fields.

Received Date: 09.04.2022

Accepted Date: 20.10.2022

*Başvurulacak yazar: Abdullah Mete ÖZGÜNER, abdullah_ozguner@hotmail.com

1. Giriş

NaCl tuzu; petrol, demir ve kömürden sonra, dünyada en çok tüketilen dördüncü endüstriyel hammaddedir ve yıllık dünya tuz tüketimi 300 milyon ton civarındadır. NaCl tuzunun kullanım alanları şunlardır; a) petrokimya endüstrisi, b) kloralkali endüstrisi, c) metalurji, d) tekstil ve boya endüstrisi, e) deterjan endüstrisi, e) ilaç sanayi, f) yiyecek tatlandırıcısı, g) buzlanma kontrolü, h) doğal gaz ve petrol depolayan kavernalar için geçirimsiz ve basınçlı yeraltı medyası oluşturması. BOTAS, Türkiye’de ilk olarak Konya Sultanhanı (Tuz Gölü) yer altı kayatuzu domlarında doğalgaz depolamak için Çin YUTAİ şirketine kaverna açtırmıştır. Bilinen Tuz Gölü, Ereğli-Bor ve Adana Neojen havzaları kalın yeraltı kayatuzu yataklarına ek olarak Kırıkkale, Çankırı, Çorum Neojen havzalarında da kalın kayatuzu yataklarının varlığı saptanmıştır (Sönmez vd., 2011; Özgüner ve Ünsal, 2013; Özgüner ve Kızıldağ, 2015; Sönmez ve Aydındağ, 2017). Çankırı havzasındaki Bayındır Formasyonu kalın kayatuzu yatağının tamamı, henüz karotlu sondajlarla kesilememiştir. Kırıkkale-Çankırı-Çorum Neojen evaporit havzalarının graben yapıları içinde ve Bayındır Formasyonu bünyesinde, Bozkır Formasyonu killi-jips örtü kayacının altında yeni ve kalın kayatuzu yataklarının bulunması olasılığı vardır. Sivas Neojen evaporit havzasında da anhidrit örtü seviyelerinin altında, graben yapıları içinde kalın kayatuzu yatakları bulunması ihtimali vardır. Anhidritler içinden tuzlu su çıkışları bunun göstergesidir. Kızılırmak Neojen havzasında sondajlarla bulunmuş ve bulunacak yeni kalın kayatuzu yatakları bünyesinde açılacak kavernaların yakınından geçen TANAP ve Mavi Akım Doğalgaz boru hatlarından gaz depolamak daha kolay ve hesaplı olacaktır.

Yer altı kayatuzu yataklarında milyonlarca metreküp doğal gaz depolamak, yeryüzünde çelik depolarda depolamaktan hem çok daha emniyetli, hem çok daha iktisatlı ve hem de çevre kirliliğini önleme açısından çok daha etkindir. Yeryüzündeki milyonlarca metreküp gazın hacmi; 500-1000 m kaya derinliğinin yeraltı basıncı altında yaklaşık 1/70 oranında azalmaktadır. Bu nedenle depolanacak doğal gazın hacmi, derinliğe göre, kaverna hacminin 50-70 katı olacaktır. Kayatuzu yatakları içine sondajlardan

verilen tatlı su vasıtasıyla kayatuzu çözelti ve kaverna boşluğu açılmakta ve doğal gaz veya petrol ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere bu kavernada depolanmaktadır. Yer altı kayatuzu yataklarına uygun koşullarda açılan kavernalarda depolanan petrol ve doğalgazın çok uzun süreler dışarı sızmadığı, hacim kaybına uğramadığı ve istenildiğinde %70 oranında geri alındığı ve başka bir madde depolanacaksa ilk önce içeriye su basılıp geri kalan %30 gaz veya petrol alındıktan sonra bu maddenin depolanabildiği bilinir. Dünyada binlerce bu tip gaz depolama tesisi vardır (Berest ve Brouard, 2004).

Warren (2006)’a göre; kaverna açılımlarında başarısızlıkların ve felaketlerin çoğu, kayatuzu solüsyon madenciliği sınırlarının kayatuzu yatağının sınırlarıyla çakıştığı zaman (yani kayatuzunun incelendiği havza kenarlarında) meydana gelir. Solüsyon kavernalarıyla ve gaz depolamayla ilgili problemler açısından yeraltı kayatuzu kütlelerinin asla yırtılmayıp kendi içinde yamandığını ve gaz sızıntısı yapmadığını bilmek önem kazanır. Bu sistemlerdeki zayıf nokta; sondaj kuyularının muhafaza borusu ve onun çimentolanmasıdır. Böyle olmakla beraber, kuyu başarısızlığıyla ilgili hemen hemen tüm problemler; yeryüzü personelinin ya ihmal veya anlama kabiliyetlerinin azlığıyla ilgili olup daha ziyade insan hatalarından kaynaklanır. Gelişen tüm kazalar, zayıf kontrollü uygulamalardan veya gerektiği gibi uygun olmayan malzemenin kullanılmasından kaynaklanır.

Doğal gaz depo kapasitesinin yeterli olması, ticari ve stratejik avantaj sağlar. Silivri’de tüketilmiş petrol rezervuarları, doğal gaz depolamak için kullanılmakta ve Türkiye arzının %10’u karşılamaktadır. Tüketilmiş petrol-doğal gaz sahasının üretimden depolamaya dönüşümünde mevcut kuyuların, toplama sistemlerinin ve boru hattı bağlantılarının tekrar kullanılabilme avantajı vardır. Ekonomi açısından bu sahalarda depolamada geniş çapta kullanılmasına öncelik verilir. Tuz domlarına veya kayatuzu kütlelerine kaverna açılıp depolamaktan daha ekonomik olduğu için, Trakya’da ve Güneydoğu Anadolu’da tüketilmiş petrol ve doğal gaz sahalarda doğal gaz depolamak için tekrar kullanma koşullarının araştırılması önem kazanır. Türkiye’de enerji kaynakları arasında doğal gaz, %55 oranında kullanılmakta ve hem ısıtma ve hem de elektrik üretim aracı olarak yararlanılmaktadır.

Avrupa'da 142 yeraltı gaz depolama tesisi var. Doğal gaz depolama sistemi, Türkiye'yi doğal gaz ticaret merkezi yapabilir. Özel sektörün de depolama sistemine girmesi gerekir. İletim ve depolama alanlarında işbirliği sağlanmalıdır. Doğal gaz depolama konusu, hem arz güvenliği sağlayacak hem de doğal gaz ithalinde Türkiye'nin elini kuvvetlendirecektir. Doğal gaz borsası olan ülkelerde ciddi bir kar marjini vardır. Dünyada kullanılan doğal gaz depolama imkanlarının %76'sı tüketilmiş petrol ve doğal gaz rezervuarlarından, %14'ü yer altı suyu akiferlerinden, %12'si kayatuzu yataklarından sağlanmaktadır. Avrupa'da en yüksek doğal gaz depolama oranı % 49 ile Ukrayna'ya ait olup 15 milyar m³ lük bir depolama hacmine sahiptir. Türkiye'nin 2023 hedeflerinde toplam 5 milyar m³ doğal gaz depolanma tesislerinin kurulması planlanıyor (Underground Gas Storage UGS konferansı notları, Ankara, 2014).

Dünyada halit (NaCl) kayatuzunun en çok tüketildiği alan kimya sanayidir. Orta Anadolu'da kloralkali tesisi henüz yoktur. Kırıkkale petrol rafinerisinin kuş uçuşu 45 km güney doğusunda ve daha yüksek irtifada bulunan KİAŞ kayatuzu yatağından solüsyon madenciliği ile açılacak doğal gaz depolama kavernaları atık tuzlu suyunun sifon yapıp boru hattı ile rafineriye taşınması imkanı vardır. Atık tuzlu solüsyon suları, Orta Anadolu-Orta Karadeniz petrokimya ve kloralkali endüstrilerinin hammaddesini oluşturabilir. Kırıkkale petrol ve doğal gaz rafinerisi, PVC (Polivinil Klorür) plastik yan ürünleri üretiminde önemli miktarlarda NaCl tuzu tüketmektedir. Esas önem verilmesi gereken şey; çok büyük çeşitli kimyasal tuz rezervlerine sahip olan Orta Anadolu'da hala bu hammaddeleri kullanıp çeşitli kimyasallar üretecek bir petrokimya kompleksinin özel sektör tarafından kurulamaması ve çeşitli kimyasal ürünlerin her yıl dışarıdan artan oranlarda ithal edilmesidir (Özgüner, 2022).

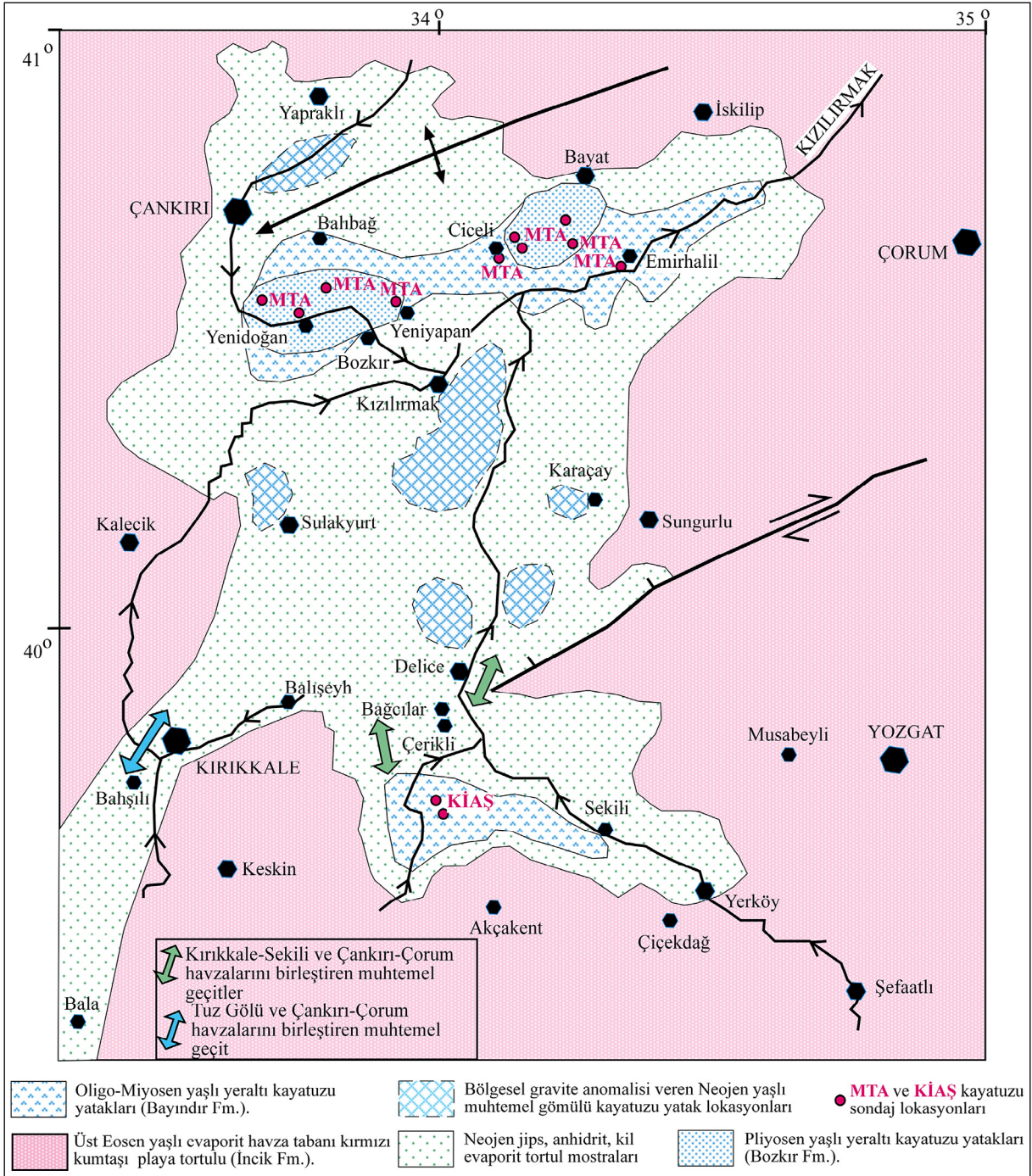
Türkiye'de artan petrokimya ürünleri ithalatını azaltmak, hatta ihracatını yapmak imkanları vardır. Mavi Akım ham petrol boru hattının ulaşacağı Samsun limanında petrol rafinerisi kurulabilir. Kömür İşletmeleri Anonim Şirketi (KİAŞ)- Etimaden kloralkali (2010) raporuna göre; Türkiye'nin tuz üretim

ve ticaretinde asıl önemli kaybı, halit (NaCl) tuzundan elde edilen birincil ve ikincil kimyasal maddelerin yüksek miktar ve değerlere ulaşan ithalatıdır. Kimyasallar olarak ithal edilen NaCl türevlerinin arasında başlıcaları; klorhidrik, sodyum hidroksit, sodyum klorat, sodyum hidrosülfid, sodyum nitrat, sodyum fosfat, sodyum bikarbonat, sodyum perborat, sodyum bikromat, sodyum asetat ve benzerleri ürünler yer almaktadır. Kloralkali endüstrisi, temel olarak tuzlu suyun elektrolizine dayanır. Sıvı klor kostik (%32'lik, %48'lik ve pelet olarak), hidroklorik asit ve sodyum hipoklorit (%12-15'lik) üretilir. Ayrıca klor kullanılarak birçok kimyasal maddenin birçok kimyasal maddenin (PVC, FeCl₃, CaCl₂, poli alüminyum klorür vs.) de üretilmesi mümkündür. Bu durum ülkemizde kimyasal tuzlara dayalı birincil ve ikincil kimyasal maddeleri (petrokimya ürünlerini) üreten petrol rafinerilerinin kapasite olarak yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Türkiye'de 3 adet kloralkali üreticisi olup bunlar Petkim, Akkim ve Koruma Klor'dur. Her üç üretici de Türkiye'nin batısında yer almakta olup; Petkim Aliğa/İzmir'de, Akkim Yalova'da, Koruma Klor ise Körfez/Kocaeli'dedir. Koruma Klor'un Kırıkkale/Hatay'da 10.000 ton/yıl kapasiteli bir tesisi bulunmaktadır (Özgüner, 2022).

2. Kırıkkale-Çankırı-Çorum Neojen Yaşlı Kayatuzu Yataklarının Jeolojisi

2.1. Stratigrafi

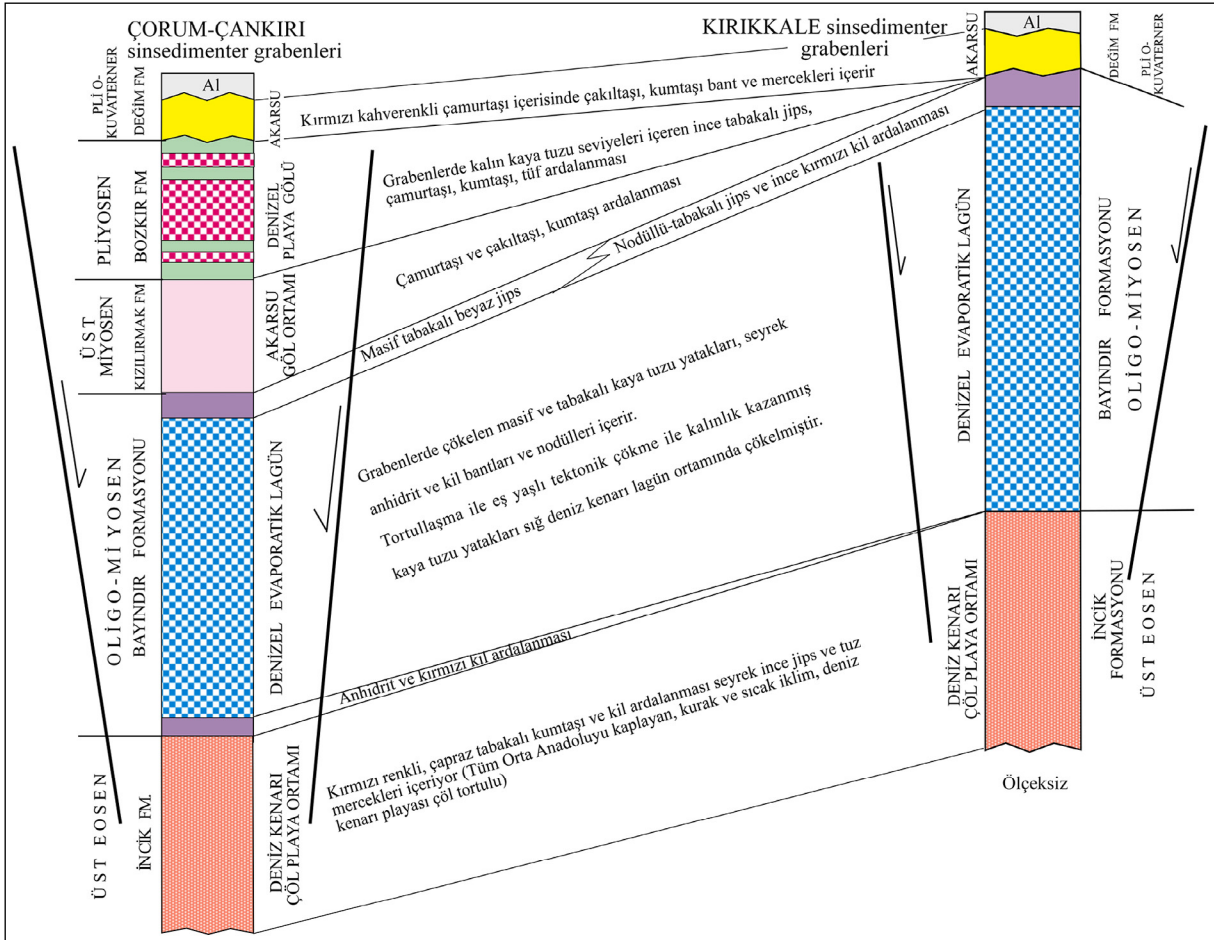
Üst Eosen zamanında Orta Anadolu'nun tektonik yükselimi sonucu deniz çekilmeye başlamıştır. Üst Eosen-Alt Oligosen uyumsuzluğu, Orta Anadolu Eosen sığ denizel havzasının yükselerek yerini kurak ve sıcak iklimde kırmızı kil ve kumtaşlarından (İncik Formasyonu) oluşan playa düzlüklerine ve denizel lagünlere terk etmiştir. Oligo-Miyosen zamanında, Doğu ve Güney Anadolu'dan gelen sürekli deniz transgresyonu (Lüttig ve Steffens, 1976; Özgüner, 2004), irtibatlı olduğu sığ playa izostatik graben gölleri ve körfezlerinde, sıcak ve kurak iklim koşullarında kalın kayatuzu yatakları ve evaporit çökellerine kaynak oluşturmuştur (Şekil 1-2). Kırıkkale-Sekili evaporit havzasında KİAŞ'ın yaptığı karotlu iki sondajın her birinde Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır



Şekil 1- KİAŞ - MTA karotlu sondajlarında kesilen yeraltı halit kayatuzu yataklarını içeren Çankırı, Çorum, Kırıkkale Oligo-Miyosen evaporit havzalarının muhtemel paleocoğrafya haritası.

Formasyonu bünyesinde yaklaşık toplam 1000 m kalın kayatuzu yatağı kesmiştir (Özgüner ve Kızıldağ, 2015). Çorum'un batısında MTA'nın gerçekleştirdiği karotlu iki sondaj Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu'nda toplam 600 m'den kalın ve karotlu diğer üç sondajın her biri Pliyosen yaşlı Bozkır

Formasyonu'nda toplam 760 m, 206 m, 175 m kalın kayatuzu yatakları kesmiştir. Çankırı güneyinde MTA'nın gerçekleştirdiği karotlu dört sondajın her biri Pliyosen yaşlı Bozkır Formasyonu'nda toplam 362 m, 304 m, 252 m, 50 m kalın kayatuzu kesmiştir (Sönmez vd., 2011; Sönmez ve Aydınadağ, 2017), (Şekil 1-3).



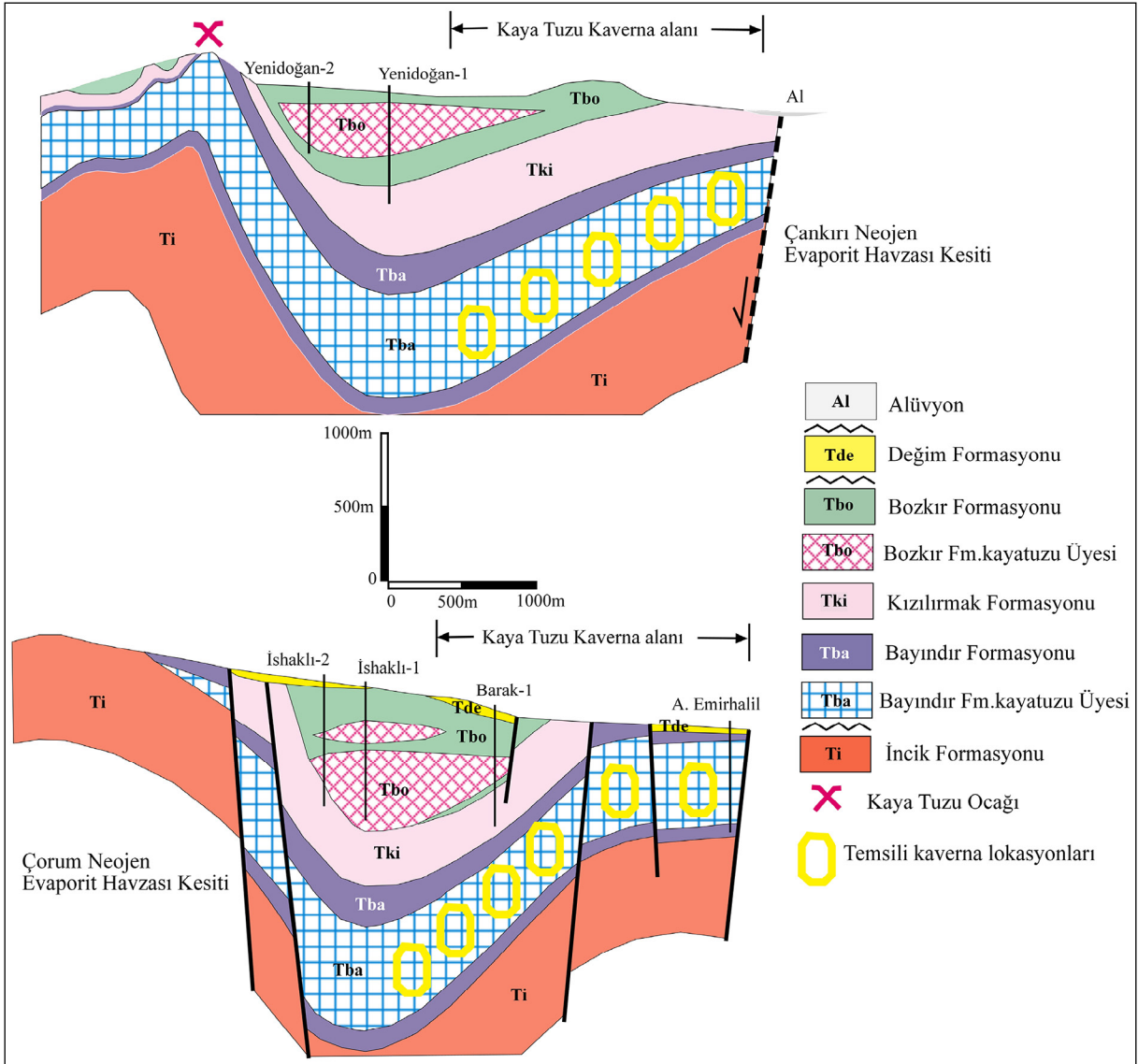
Şekil 2- Oligo-Miyosen zamanında, Bayındır Formasyonu kayatuzu yatakları, denizle irtibatlı, sıcak iklim koşullarında izostatik grabenlerde çökelmiştir. Üst Miyosen-Pliyosen zamanında Kızılırmak ve Bozkır formasyonları graben ve horst yapılarını aşmalı olarak örterek çamurtaşı, çakıltaşı ve killi jipsleri tortullaştırmıştır. Kırıkkale yöresi Üst Miyosen'de tektonik olarak yükseldiği için Kızılırmak ve Bozkır formasyonları çökelmemiş veya aşınmıştır.

Çankırı antiklinali güney kanadında mostra veren Çankırı tuz mağarası ve Potuk kayatuzu mostraları da Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu'na ait olup güneye doğru Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Kızılırmak ve Bozkır formasyonlarının altına dalmakta ve monoklinal kıvrım içinde yer almaktadır (Sönmez ve Aydınadağ, 2017). Çankırı güneyindeki kayatuzu formasyonları bu senklinal içinde aşınmadan korunmuş ve kalınlık kazanmıştır. Kırıkkale-Tatlıcağ ve Yozgat-Sekili arası Neojen evaporit havzasında ise Üst Miyosen-Pliyosen paleocoğrafyası daha yüksek irtifada olduğu için Kızılırmak ve Bozkır formasyonları çökelmemiş veya aşınmıştır (Şekil 1-2). Çankırı Çorum evaporit havzası Pliyosen yaşlı Bozkır Formasyonu ve altında yer alan çok kalın Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu kayatuzu

yataklarının, senklinal ve graben eksenlerinde en kalın çökelindiği görülür (Şekil 3).

Kırıkkale-Sekili evaporit havzası kuzey kuzey kenarında, Üst Eosen kırmızı taban kumtaşlarını aşmalı olarak örten Pliyosen killi jips örtü mostrası sınırları boyunca yer yer tuzlu su kusmaları (Şekil 4) görülür. Taban kırmızı kumtaşları ile killi jips örtü kayacı arasındaki yer altı kayatuzu kalınlığının havza kenarlarında incelendiği ve bol anhidrit nodülleri içerdiği ve havza ortalarına doğru ise çok kalınlaştığı görülür (Şekil 5).

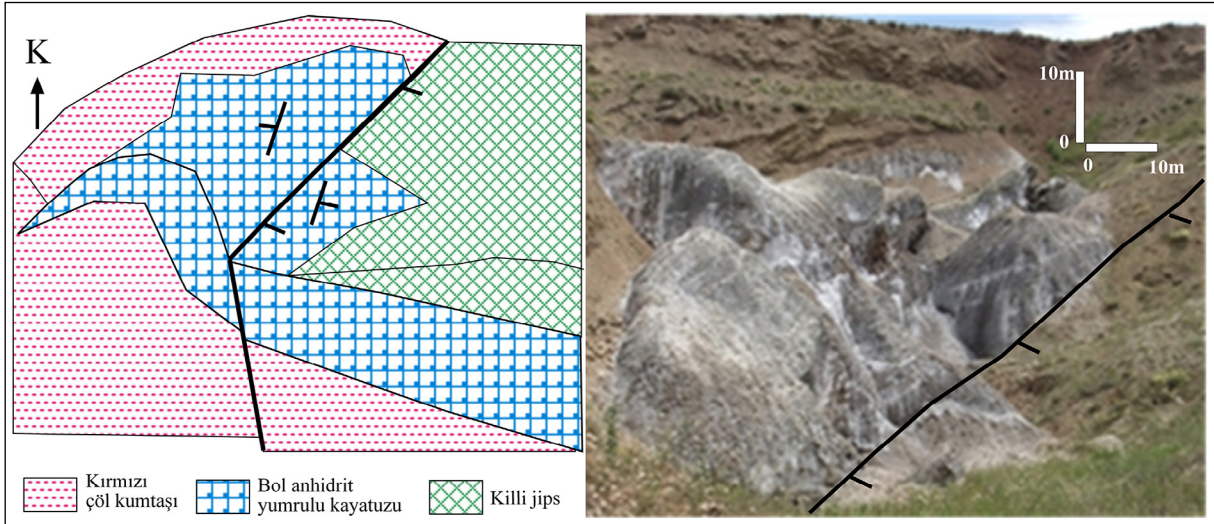
Kayatuzunun sondajlarda kesilmediği veya ince olduğu lokasyonlar ise; horst yapıları, graben ve tortul havza kenarlarıdır. Çöl playa düzlükleri sıg ortamlarında izostatik olarak çökelmiş çok kalın



Şekil 3- Çankırı Çorum evaporit havzalarının KB-GD yönlü jeolojik kesitleri ve muhtemel kayatuzu kaverna lokasyonları. Senklinal ve graben havzaları kuzey kanatları tektonizma etkisiyle dik eğimler kazanmış olup kayatuzu bünyesinde creeping olayı gelişebileceği için kaverna açılımına uygun olmayıp güney kanatları uygundur.



Şekil 4- Taban kırmızı kumtaşı (İncik Formasyonu) ve onu aşmalı olarak örten Pliyosen killi jips kayacı kontağı boyunca yer yer tuzlu su kusmaları görülür. Bu iki birim arasında yer alan kayatuzu yatağının örtülü varlığına işaret eder.



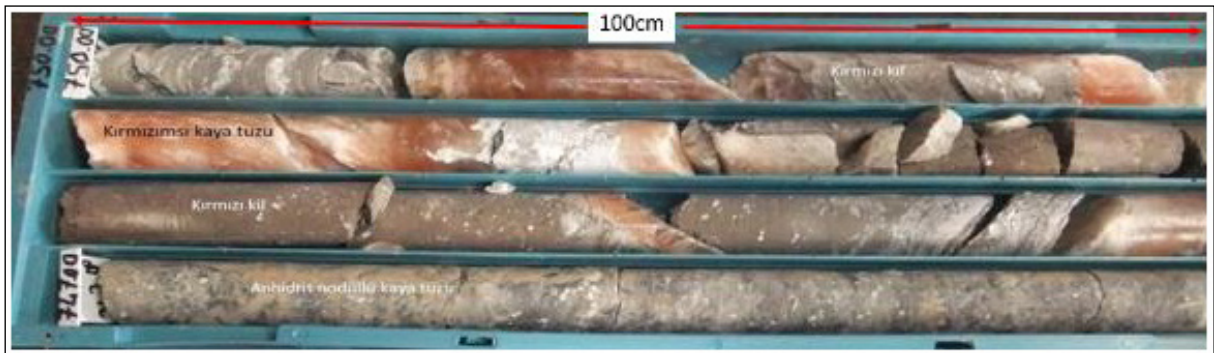
Şekil 5- Kırıkkale Tatlıcak köyü güneyindeki evaporit havza kenarında yer alan bol anhidrit yumru fasiyesli kayatuzu (Bayındır Formasyonu) ve altındaki kırmızı çöl kumu (İncik Formasyonu) ile üstündeki killi jips örtü kayacı ilişkisi.

denizel kayatuzu yatakları halit ağırlıklı olup anhidrit ve kil araldanmaları içerirler. Denizle irtibatı olmayan karasal göllerde ise kalın halit yataklarının çökmesi olasılığı yoktur. Batı Anadolu karasal göllerinde görülen, boraks, trona, tenardit, globerit, zeolit yataklanmaları; civar eş yaşlı volkanizma ürünü kül, sıvı ve gazların evaporitik göl sularına karışması ve buharlaşma sonucu bu tuzların çökmesiyle oluşur ve kalın kayatuzu içermezler.

Çankırı Yenidoğan ve Balıbağ MTA sondajlarında Pliyosen yaşlı Bozkır Formasyonu'nu kayatuzu birimi içinde kesilen 2,5 m kalın globeritli çamur zonu (Sönmez ve Aydınadağ, 2017), denizle beslenen tuz gölü içine eş yaşlı Ankara (Galatya) volkanik indifasının doğuya ulaşan ürünüdür. Galatya volkanizmasından doğuya doğru uzaklaştıkça örneğin MTA Çorum

havzası sondaj karotlarında globeritli çamur seviyesi kaybolmaktadır. Nitekim MTA Niğde Bor Çukurkuyu ve Konya Karapınar, Yeniköy sondajlarında kesilen Neojen yaşlı kalın denizel kayatuzu yatak istifleri bünyesindeki globerit, tenardit ve blödit ara seviyeleri de (Murat, 2011) eş yaşlı karasal Melendiz volkanizması ürünüdür.

Kayatuzu sondaj karotları kırmızımsı kil ara tabakalarında görülen çatlak boşluklarının kırmızımsı, iri taneli veya iplikimsi tuz kristalleriyle doldurulmuş olması, diyajenez sonrası katı deformasyon belirtileri olup primer silvinit (KCl) tuzu çökeli değildir (Şekil 6). Kırmızı killer oksijenli sıg çökel ortamına işaret eder bu nedenle kayatuzu içindeki kırmızımsı kil ara tabakaları, kayatuzu çökel ortamının çok sıg olduğunu belirten bir veridir.



Şekil 6- Killi karotlarda görülen kayatuzu çatlak dolguları, diyajenez sonu deformasyonlardır (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).

KİAŞ sondaj alanında killi jips örtü kayaç kalınlıkları 25-150 m arasında olup altındaki 800 m'den kalın yatay tabakalı kayatuzu yastığı bünyesinde toplam %25 oranında kil ve anhidrit ara tabakaları içermektedir. Kayatuzu bünyesinde sondaj ve jeofizik sismik ölçümlerin saptadığı 83 m kalın anhidrit ara seviyesi vardır. Açılabilir kavernaların solüsyon madenciliğinde sorun çıkarmaması ve basınç ile daha büyük gaz depolama hacmine ulaşılabilmesi için düşey kaverna lokasyonları anhidrit ara seviyesinin altında olmalıdır (Şekil 7). Kayatuzu kalınlığı GB yönünde havza ortasına doğru kalınlaşmakta ve KD havza kenarına doğru incelmektedir (Özgüner ve Kızıldağ, 2015). Bölgede Neojen evaporit havzası içinde (Şekil 1) genç volkanizma kaynağı bulunmaması nedeniyle, kayatuzu içinde açılacak kavernalar yeraltı volkanik gazlarından etkilenmeyecektir.

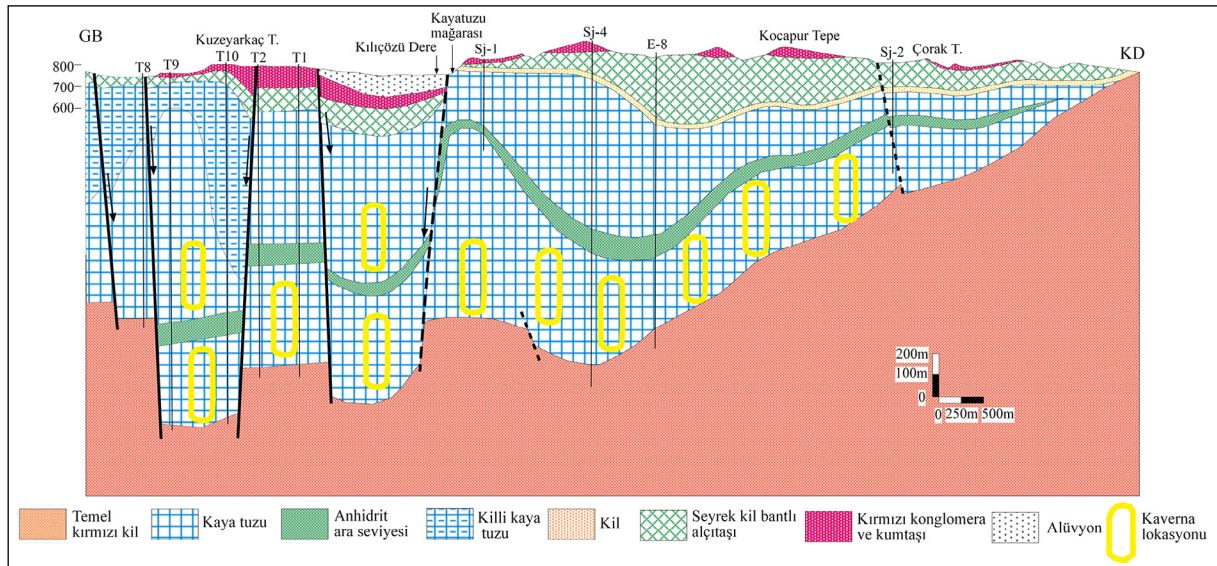
Deniz suyunda bulunan NaCl %3,5 içerik oranı ile doygunluk sınırından uzak olmakla birlikte, sıcak ve kurak iklimlerde sığ denizel çökel ortamlarında buharlaşma ile % 26,5 konsantrasyon oranına ulaşır ve halit tuzu olarak her mevsimde çöker. Deniz suyu ile beslenen buharlaşma ortamı ne kadar sığ olursa halit tuzunun çökelim hızı da o kadar artar. Bu tip ortam, ancak izostatik graben çöküşü ile çok kalın kayatuzu çökelimini içine alır ve kabul edebilir (Şekil 8 - 9).

KİAŞ Sj-4 sondajında 1325 m derinlikte kayatuzu istifi tabanında kesilen temel kırmızısı gri renkli kil karotlarında a) sığ su ortamı dalgalanmalarının kopardığı kırmızı renkli kil parçacıkları, b) ardalı beyaz anhidrit nodül yapıları, c) ripil işaretleri ve d) çamurtaşı içinde anhidrit ağırlık sarkması yapıları, beraber çökeldikleri kayatuzunun da sığ bir ortamlarda çökeldiğini belirtir (Şekil 10).

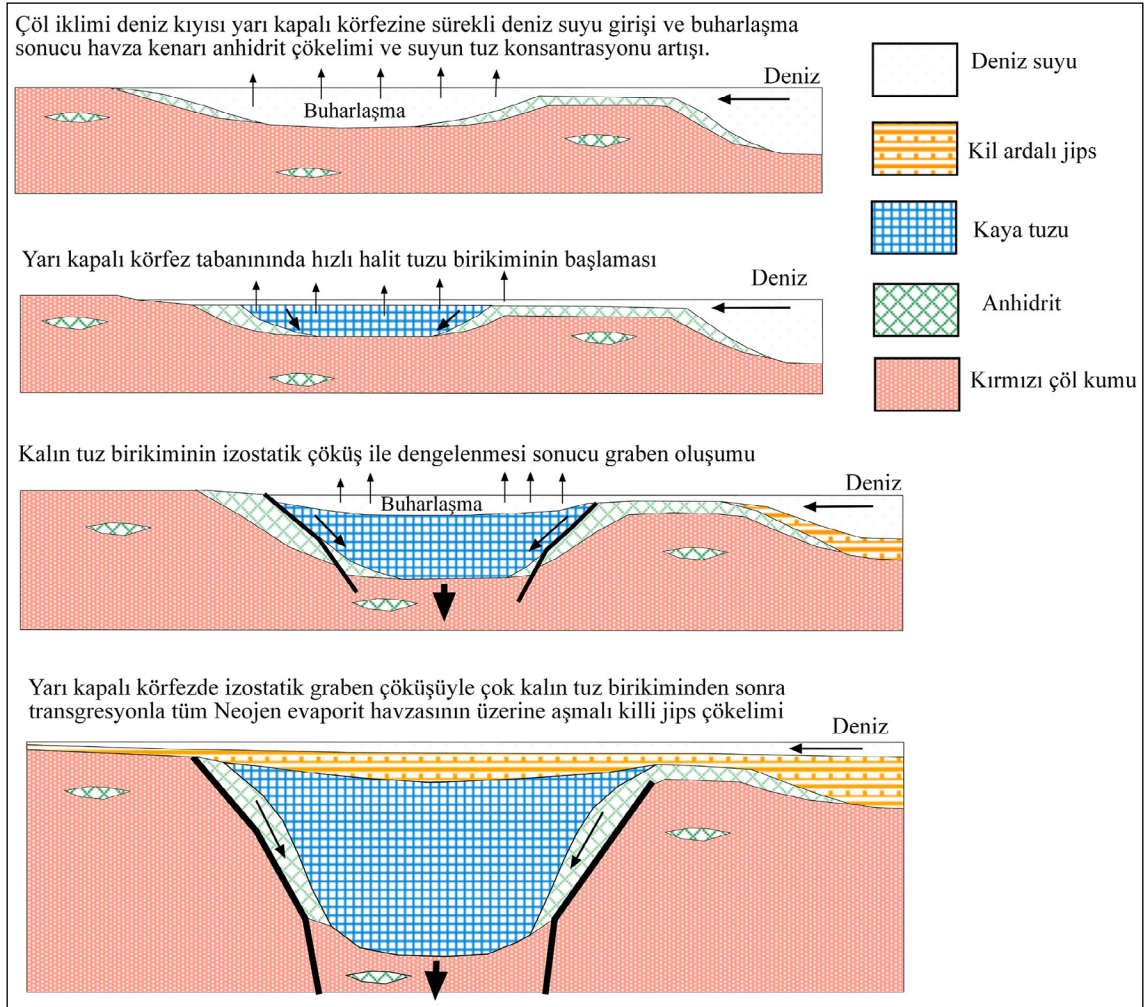
Kayatuzu sondaj karotu içinde a) beyaz anhidrit ve gri kayatuzu tektonik breşleri fay zonuna işaret eder (Şekil 11a). Birkaç metre düşey karot aralıkları bünyesinde görülen kiltası-anhidrit veya anhidrit-kayatuzu lamina araldanmaları tabaka eğim değişimleri ve bunların üst ve alt bölümlerinde yaklaşık yatay tabakalanmaya geçişleri, diyajenez öncesi tortul akmalarını (Şekil 11b), karotlarda görülen karmaşık yapılar tortullaşma anında erken diyajenik çökel deformasyonlarını temsil eder (Şekil 11 c1-c3).

2.2. Tektonizma

Çalışmanın hedefi kayatuzu olduğu için, kayatuzunun tektonizmaya karşı diğer litolojilerden farklı tepkiler gösterdiğinin belirtilmesi yararlı olacaktır. Kayatuzu basınç altında plastik özellik gösterir, fakat hacmi küçülmez ve özgül ağırlığı değişmez. Yeraltında derinlik arttıkça tüm kaya



Şekil 7- Jeolojik kesit, KİAŞ ruhsat sahasından geçer ve düşey ölçek, yatay ölçeğe göre 2,5 misli abartılıdır. KD bölümünde 4 adet sondaj logundan ve GB bölümünde 5 adet DES logundan yararlanılmıştır. 83m kalın anhidrit ara seviyesi altındaki sarı renkli silindirler muhtemel kaverna lokasyonlarını temsil eder (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).

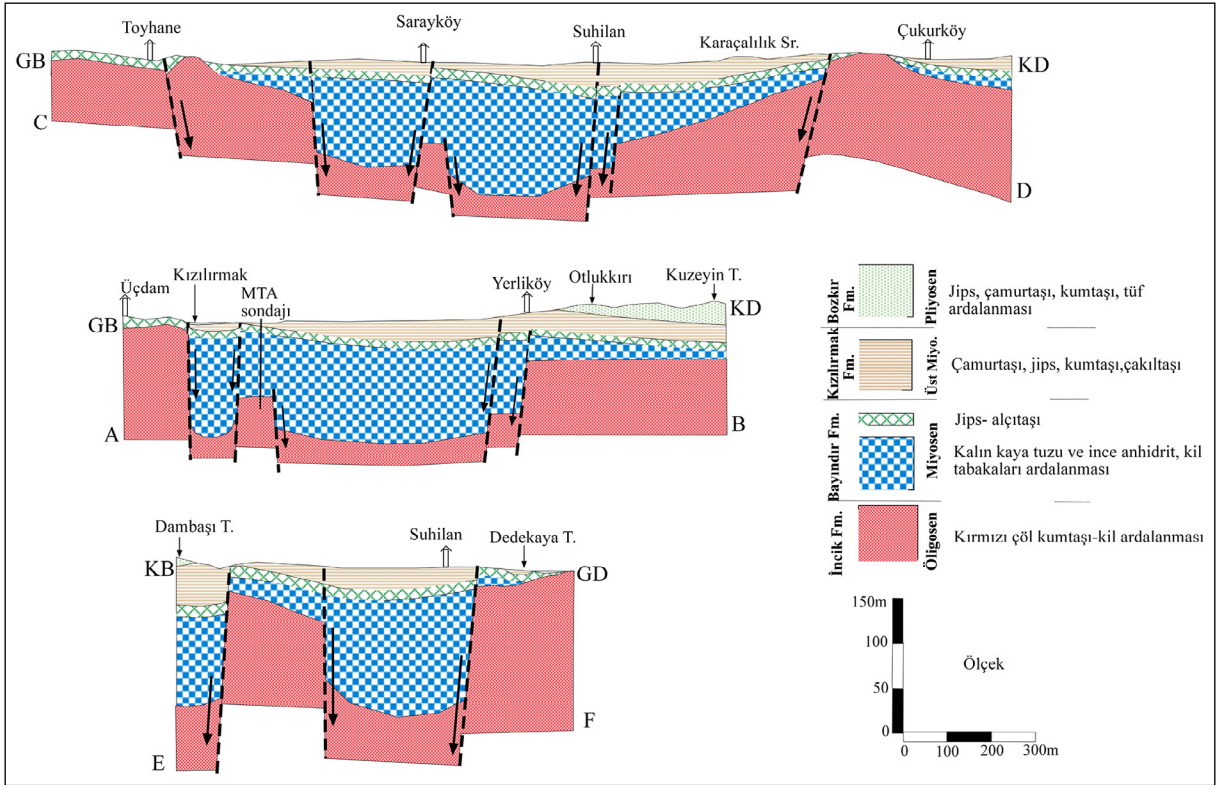


Şekil 8- Orta Anadolu Neojen yaşlı çok kalın yeraltı kayatuzu yatakları oluşum mekanizmasını açıklayan ölçeşiz kesitler (Frank vd., 2007 yararlanıldı).

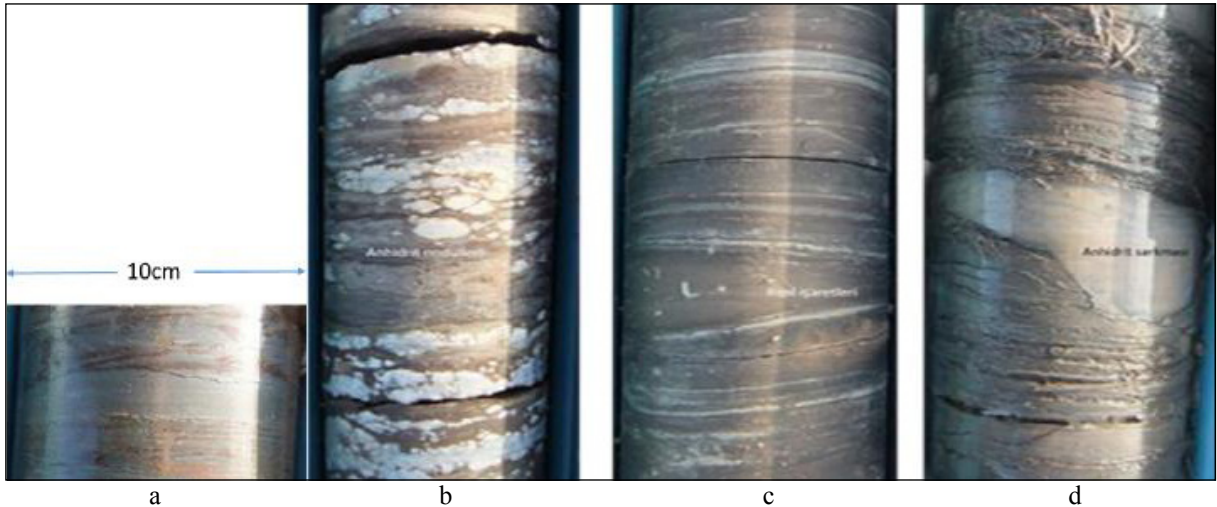
birimlerinin özgül ağırlıkları arttığı halde kayatuzunun özgül ağırlığı değişmez. Özgül ağırlığı yan kayaçlardan daha küçük olduğu için yeraltı gravite basıncı altında zayıf tektonik kırık zonlara ve boşluklara zamanla akma ve yukarı çıkma eğilimi gösterir. Hiçbir kalın ve gömülü kayatuzu yatağı, orijinal tortul şeklini uzun süre koruyamaz. Genelde çoğu tortuldan daha hızlı çökelen kalın kayatuzu birikimine mekan sağlamak için izostatik graben faylanması ihtiyacı vardır. Grabenlerde çok kalın kayatuzu çökeldikçe graben veya tortul havzası kenarlarında kayatuzu incedir veya çökmez. Çankırı-Çorum-Kırıkkale Neojen evaporit havzasının killi-jips örtü kayacı, graben veya havza kenarını aşmalı olarak örter (Şekil 7 - 9). Kayatuzu çökeldikten sonra, gravite ve tektonik kuvvetlere karşı plastik özellik gösterdiği için bölgesel ve lokal

tektonizmadan en çok etkilenen kaya birimidir. Bu nedenlerle tüm Neojen öncesi veya daha yaşlı kayatuzu yataklarının yer altı şeklini saptamada zorluklarla karşılaşılır.

Çok kalın Kırıkkale-Sekili Neojen evaporit havzası kayatuzu yatakları yatay eğime sahip olduğu ve şiddetli tektonik (halo-kinetik) deformasyon etkileri göstermediği için tuz yastığı olduğu ve diyapir yapıları göstermediği anlaşılmaktadır. Kırıkkale KİAŞ ruhsat sahasında yapılan karotlu iki sondajda kayatuzu tabaka eğimlerinin genellikle yatay veya yataya yakın olduğu, seyrek ara tabakalarda görülen daha büyük eğimlerin tektonizmadan kaynaklanmayıp çökelimle eş yaşlı tortul akmaları ve diyajenik deformasyon sonucu geliştiği gözlenir (Şekil 11 b-c).



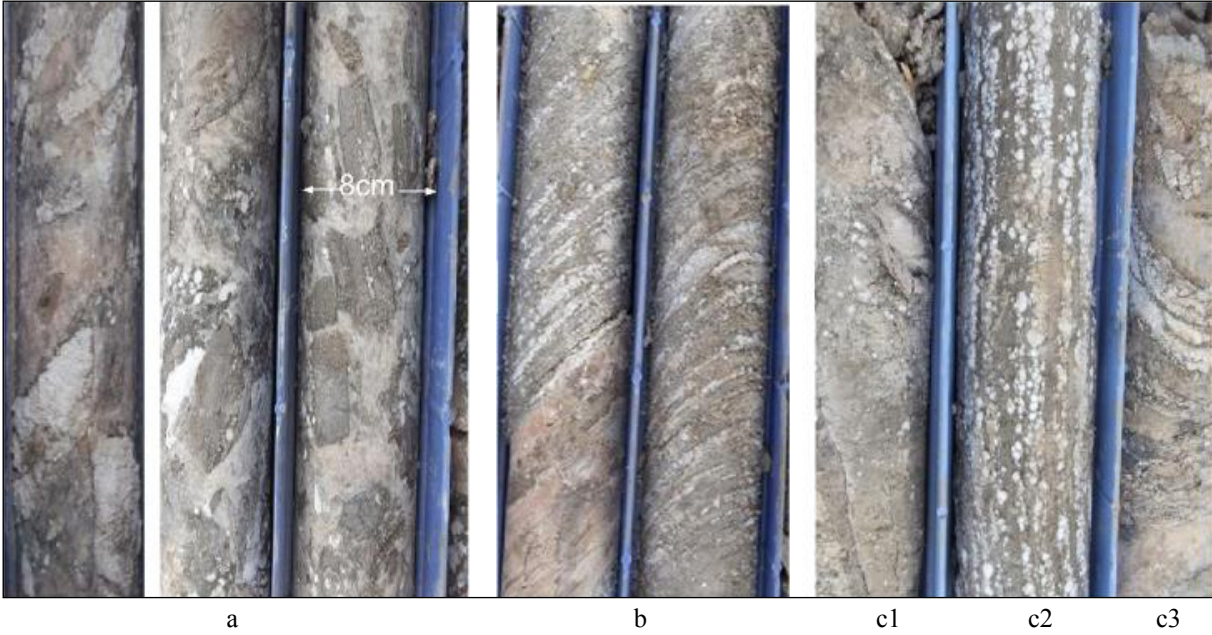
Şekil 9- Çorum Bayat güneyi G32-c4 paftası Aşağı Emirhalil köyü kuzey doğusundaki kayatuzu ruhsat sahasından geçen jeolojik kesitler. Jeofizik DES ölçümlerinden (Şekil 15 - 16) yararlanıldı (Özgüner ve Büyükaydın, 2017).



Şekil 10- a) Gri çamurtaşı sondaj karotu içinde kırmızı kil parçacıkları, dalga etkili sığ ortamı, b) beyaz anhidrit nodüllü laminalar, sığ tuzlu su sabka ortamını, c) ripil işaretleri, sığ ortamı, d) kil çamuru içinde anhidrit sarkması, sığ diyajenetik deformasyonu belirtir (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).

Yer altı kayatuzu kütleli içinde 1km'den küçük mostra uzunluğuna sahip bir fay, zamanla kendi kendini yamar ve kaverna açılımı esnasında gaz kaçığına neden olmaz. Kayatuzu sondaj karotu içinde farklı kayatuzu tektonik breşlerinin bulunması fay zonuna işaret eder.

Breşik fay zonunun hemen altındaki veya üstündeki karotlarda 45 °C'den büyük tabaka eğimlerinin gözlenmesi fay hareketinin varlığını destekler (Şekil 11a) (Dr. Max Wippich, 2013 ile sözlü görüşme).



Şekil 11- a) Kayatuzu sondaj karotu içinde beyaz anhidrit ve gri kayatuzu tektonik breşleri, fay zonuna işaret eder. Fay zonunu belirten karot fotoğrafları, KİAŞ'ın farklı yerlerde yaptığı 300-400 m derinlikli diğer sığ sondaj karotlarından alınmıştır. b) Kayatuzu ve bünyesindeki ince anhidrit nodüllerinin 45° eğimi ve iki kalın yatay tabaka arasında yer alması, eğimlerin çökelimle eş yaşlı tortul akmaları sonucu geliştiğini gösterir. c2 sondaj karotu, tektonik basınç altında bir boşluk boyunca kayatuzu ile beraber anhidrit nodüllerinin dikey olarak yukarı doğru aktığını ve c1-c3 sondaj karotları ise, erken diyajenik deformasyon yapılarını belirtir (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).

KİAŞ kayatuzu ruhsat sahasında fayların çoğu sığ ve küçük faylar olup killi jips örtü kayacı altındaki tuz yatağını etkileyenler azdır. Kayatuzunda açılacak kavernalar için en tehlikeli bölümler yeraltı kayatuzunu kesen genç, aktif, yanal atımlı, uzunlukları birkaç kilometreden daha büyük fay zonlarıdır. Kaverna lokasyonlarının bu tip fay zonlarından en az 500 m uzakta seçilmesinde yarar vardır. Kırıkkale yer altı kayatuzu yatağının, hem Tatlıcak, hem Eskikişla, hem Çiçekli, hem Boğazevci, hem Sekili ve hem de Tepecik köyleri civarında sokulum yapıp lokal mostralar vermesi (Şekil 12-13), bölgesel gravite anomali haritasında negatif anomalinin yaklaşık Kırıkkale-Sekili evaporit havzası üzerine rastlaması ve havzanın eksenindeki köy suyunun acılığından ötürü Acıköy adında bir köyün bulunması; bu lokal gömülü kayatuzu mostralalarının yeraltında birbiriyle irtibatlı olduğu veya taban horst yapıları dışında (Şekil 14) tek bir büyük kayatuzu kütlesi oluşturabileceği fikrini destekler. Yeraltı kayatuzu lokal yüzey sokulumlarının, yanal ve düşey atımlı faylanmalar sonucu gelişmiş olabileceğine işaret eder (Yamada vd., 2005).. Bu sığ kayatuzu sokulumları,

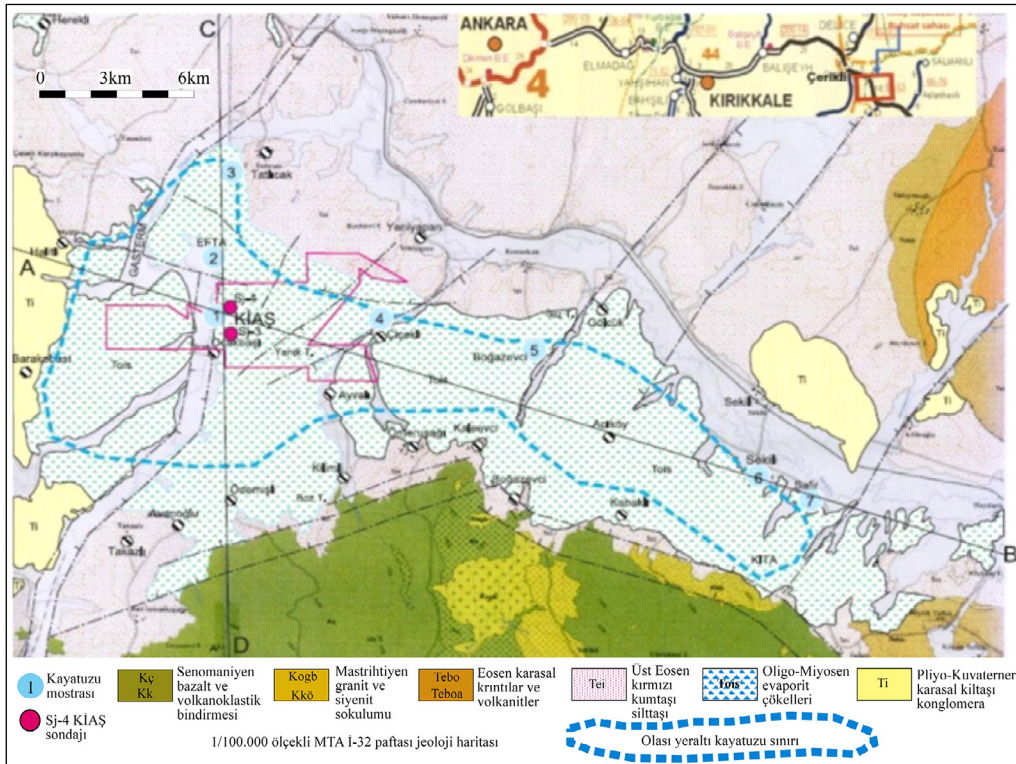
Kırıkkale-Sekili evaporit havzasının kuzey kenarı boyunca gelişmiştir (Şekil 12 ve 13).

Kırıkkale-Sekili evaporasyon havzasının kuzey kenar killi jips örtü kayacı mostralaları, 800 m kotlarında yer aldığı halde güney kenar mostralalarının 1200 m kotlarına kadar çıktığı görülmektedir. Halbuki bu örtü kayacın hem kuzey ve hem de güney bölümü ilk çökeldiğinde yatay durumunda ve aynı kotta idi. Evaporit havzasının güney kenarında açığa çıkan temelin sonradan merdiven faylanmalarla yaklaşık 400m yükseldiği anlaşılmaktadır (Şekil 13 ve 14).

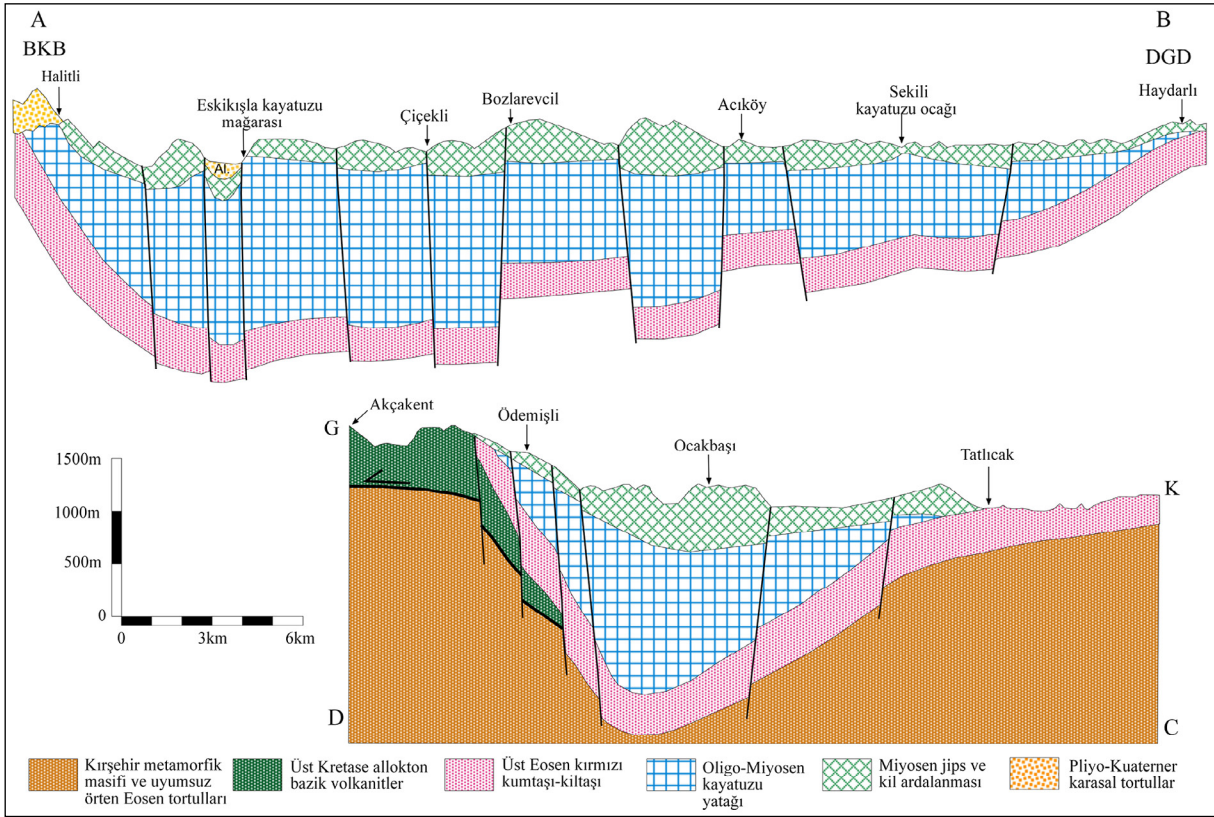
Çankırı Çorum Neojen evaporit tortulları, Çankırı antiklinalinin güney kanadında monoklinal bir kıvrım oluşturur. Monoklinal senklinalin kuzey kanadı dik eğimli olup kayatuzu seviyeleri tektonizmadan daha çok etkilendiği için bu kanatta kaverna açılması tehlikelidir. Güney kanadı düşük eğime sahip olduğu için sondaj karot örneklerinin kaya mekaniği ve creeping testleri olumlu geldiği takdirde kaverna açılması mümkündür. Monoklinalin güney kanadında Bayındır Formasyonu kayatuzu yatağı daha düşük eğimli, kalın olduğu ve daha derinde yer aldığı için



Şekil 12- Kırıkkale-Tatlıcak ve Yozgat-Sekili arası Neojen evaporit havzası yeraltı kayatuzu mostraları, fay zonlarında açığa çıkmış olup lokasyonları Şekil 13'deki haritada mavi noktalarla gösterilmiştir (Özgüner vd., 2019).



Şekil 13- Kırıkkale Tatlıcak – Yozgat Sekili arası jeolojik harita. Neojen evaporit havzasında KİAŞ'ın yaptığı her iki sondajın her biri toplam yaklaşık 1000 m kalın yeraltı kayatuzu yatağı kesmiştir. Mavi noktalar, Şekil 12'deki kayatuzu mostralarıdır. AB ve CD güzergahları Şekil 14'deki jeolojik kesitlerdir. Sağ üst köşede, kırmızı dikdörtgen ruhsat sahası olup karayolu ulaşımını gösterir (Dönmez vd., 2005. MTA 1/100.000 ölçekli İ-32 jeoloji haritası).



Şekil 14- Kırıkkale-Sekili Neojen evaporit havzası olası jeolojik kesitleri. (Kesit güzergahları Şekil 13'te gösterildi).

hem kaverna hacmi ve hem de kaverna gaz basıncının daha büyük olacağı beklenir. Monoklinalın güney kanadında yapılacak derin karotlu sondajların daha kalın kayatuzu keseceği beklenmekte ve açılacak kavernaların çok daha büyük hacimde gaz depolama imkanına sahip olabileceği tahmin edilmektedir (Şekil 3).

Kızıldeniz'de olduğu gibi, gelişmiş rift basenleri ince ve zayıf yer kabuğu oluşturduğu ve izostatik çöktürelere daha uygun olduğu için kalın evaporitlerin birikim yeri olabilir. Daha ince yer kabuklu Orta Anadolu Tuz Gölü tortul havzası, kalın yer kabuklu batıda Menderes Masifi ve doğuda Kırşehir Masifi arasında bulunur. Tuz Gölü grabeni, izostatik çöktürel kalın evaporit çökelimine ev sahipliği yapmıştır. Kalın evaporit kütleleri, ana fayların düşen blok tarafında yer alır. Özellikle Orta Anadolu Tuz Gölü grabeni batı tarafında olduğu gibi, paralel fayların tekrar aktifleşmesi; lokal izostatik çöktürelere, kayatuzu kalınlaşmasını ve tuz domu oluşumlarını tetiklemiştir.

Orta Anadolu Neojen kayatuzu yataklarının sığ ortam tortullaşma modeli, Akdenizin Mesiniyen krizi derin deniz tabanı evaporit oluşumlarına benzemez. Akdeniz Mesiniyen kayatuzu çökellerinde, okyanus bağlantısının tekrarlanan açılıp kapanmasıyla pelajik marn ve sığ kayatuzu seviyeleri ardanma yapar, derin deniz basen tabanına kadar buharlaşır, denize boşalan büyük nehirler gençleşip paleo-kanyon oluşturur ve daha sonra delta ve alüvyonla örtülür.

Çankırı Çorum ve Kırıkkale-Sekili bölgelerinde, Bayındır Formasyonu kayatuzu yatağının kalınlığını değerlendirmek için yapılabilecek karotlu kayatuzu sondajları, kırmızı çöl kumlarından oluşan taban İncik Formasyonuna kadar inmelidir. Aksi halde sondaj askıda kalmıştır. Kayatuzunda kaverna açılması düşünülüyorsa sondaj bitimi tujler çekilir çekilmez, kuyu çeperleri çökmeden tüm elektrik logları alınır. Elektrik logları ile, kayatuzu bünyesindeki yabancı litoloji oranının bilgisayar programlarında sağlıklı ölçülmesi sağlanır. Çankırı yakın güneyinde monoklinal kıvrımı kuzey kanadı tabaka eğimlerinin

dik olduğu veya kayatuzu yatağında creeping olayının beklediği yerlerde açılan kavernaların zamanla basınç altında büzülme tehlikesi vardır (Şekil 3). Kayatuzu kristallerinin basınç altında kendi bünyesinde sinsi kayma (creeping) olayının varlığının çek edilmesi için kayatuzu karotlarının laboratuarda kaya mekaniği ve creeping testleri yapılır. Sondaj karotlarının suda çözülme testleri ve diğer tüm fiziksel, kimyasal laboratuvar testlerin ardından kayatuzunda kaverna açılması değerlendirmeleri yapılabilir.

3. Jeofizik Etütler

3.1. Derin Elektrik Sondaj (DES) Etütleri

3.1.1. Net Jeoteknik Şirketinin Kırıkkale KİAŞ Ruhsat sahasında 2013 yılında yaptığı Jeofizik DES Çalışmaları

Yeraltı kayatuzu etütlerinde sondaj yapılmadan önce sahada jeofizik DES profillerinin ölçülmesi kayatuzu yatağının tavan-taban derinliklerini, toplam kalınlıklarını ve fay atımlarını tespit etmek için çok yararlıdır. Net Jeoteknik Şirketinin, KİAŞ ruhsat sahasında yaptığı jeoelektrik çalışmalarında SK-11 jeoelektrik ölçüm noktasında kayatuzu kütlesi tavan derinliği 163 m ve taban derinliği 1325 m ölçülmüştür. Hemen yakınında daha sonra gerçekleşen Sj-4 sondajında kayatuzu kütlesi tavanı 146 m ve tabanı 1323 m derinlikte kesilmiştir (Net Jeoteknik raporu, 2013). Bu sonuç, jeoelektrik yeraltı kayatuzu derinlik ve kalınlık ölçümlerinin, diğer jeofizik metotlardan daha sağlıklı olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Orta Anadolu Neojen evaporit havzasında çok kalın kayatuzu çökeltme ihtimalinin bulunduğu grabenlerde, yarım elektrot aralığı AB/2 değerinin 3.000 m alınmasında yarar vardır. Yetersiz elektrot aralığı ve yetersiz ölçüm derinliğinden ötürü ölçümler, kayatuzu kütesinin taban derinliğine ulaşamayabilir (Net jeoteknik raporu, 2013).

Sivas evaporit havzası dahil Orta Anadolu Neojen evaporit havzalarında, jips veya anhidrit mostraları içinde tuzlu su çıkışlarının bulunduğu lokasyonlarda bir sedimentolog eşliğinde jeofizik DES ölçümlerinin gerçekleştirilmesiyle yeni yeraltı kayatuzu yataklarının varlığı saptanabilir.

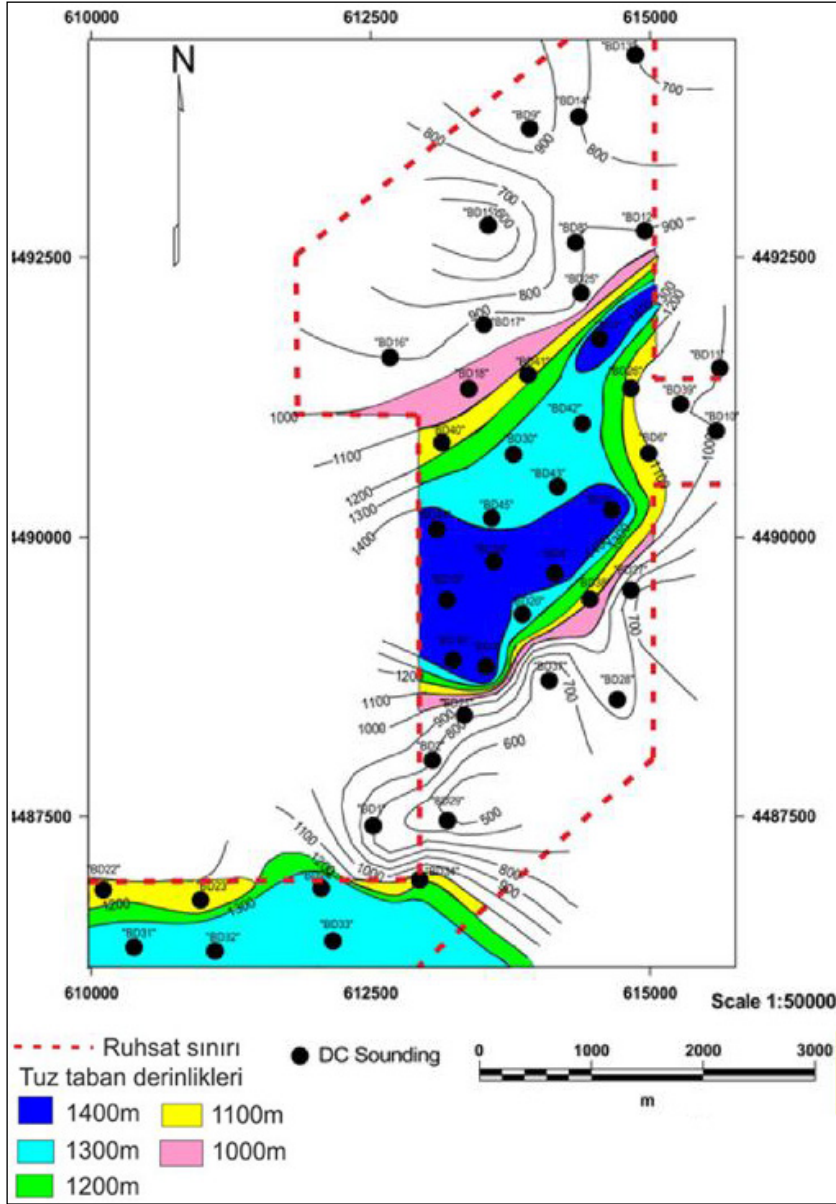
3.1.2. Çorum Bayat Emirhalil Ruhsat Sahasında 2017 Yılında Gerçekleştirilen SNS Jeofizik Şirketi DES Etüdü Çalışmaları

Ruhsat sahasının komşu kenarında MTA Emirhalil-1 karotlu sondajı, toplam 600 m kalın kayatuzu kesmiş olup ruhsat sahasının önemine işaret eder. Jeofizik etütlerle kayatuzu tabanı DES derinlik haritası ve DES yeraltı kayatuzu kalınlık haritaları çizilmiştir. Maksimum tuz kalınlıklarıyla maksimum tuz tabanı derinlikleri örtüşür (Şekil 15 ve 16). Grabenin varlığı ve kayatuzunun graben içinde çok kalınlaştığı görülmektedir. Ruhsat sahasının güneyinde maksimum tuz kalınlıklarıyla maksimum tuz tabanı derinlikleri tam örtüşmez. Burası Kızıllımağın kenarında yer aldığı için yeraltı suyunun kayatuzu yatağına nüfuz etmesiyle jeofizik ölçümlerin farklılaşmasından kaynaklanabilir (Özen vd., 2017).

3.2. KİAŞ Yeraltı Kalın Kayatuzu Yatakları İçin 2014 Yılında Gerçekleştirilen Sismik Çalışmaların Sonuçları

Kırıkkale Eskikişla köyü KİAŞ ruhsat sahasındaki sismik etüt, karotlu iki sondaj tamamlandıktan sonra yapılmıştır. Stöwer, (2015) göre, sismik kesitlerin ruhsat sınırı kenarındaki yorumları zayıftır. Buna neden olarak, yeraltında kayatuzu ve anhidrit-kil aralanmasında görülen yüksek sismik hızların, genelde sismik data kalitesini düşürdüğünü belirtmiştir. Sismik çalışmalarda yeraltı kayatuzunun kalınlaştığı ve incelendiği yönler jeolojik verilere ters düşmektedir. Sismik ölçüm sonuçlarının genel izlenimi iyi olmakla beraber, kanatlardaki bazı reflektörlerin yapısı uygun bir şekilde belirtilmemiştir. Ruhsat sahasında gerçekleştirilen sismik proseslerde ara hızlar ve derinlik dönüştürmeleri yapay olarak hesaplanmıştır. Wireline bilgilerine dayanan VSP (jeofizik yöntemlerle yanal süreksizlikleri inceleyen özel sunucu), check-shot veya sentetik sismogramlar kullanılmamıştır. Proses ve yorumlamada jeolojik bilgilerden yararlanılmamıştır. Fayların ve kayatuzu kalınlıklarının tespiti, çok büyük öneme sahiptir. Sismik ham data proses ve yorumunun jeologlar eşliğinde yeni baştan yapılması, mümkün olan en iyi sonuçları verecektir.

Sonuç olarak, yeraltı kayatuzu yataklarının DES jeofizik etütlerinden çok daha pahalı olan sismik



Şekil 15- Çorum Bayat Emirhalil G32-c4 paftası ruhsat sahasının kayatuzu tabanı DES derinlik haritası (Özen vd., 2017) (Bkz. Şekil 9).

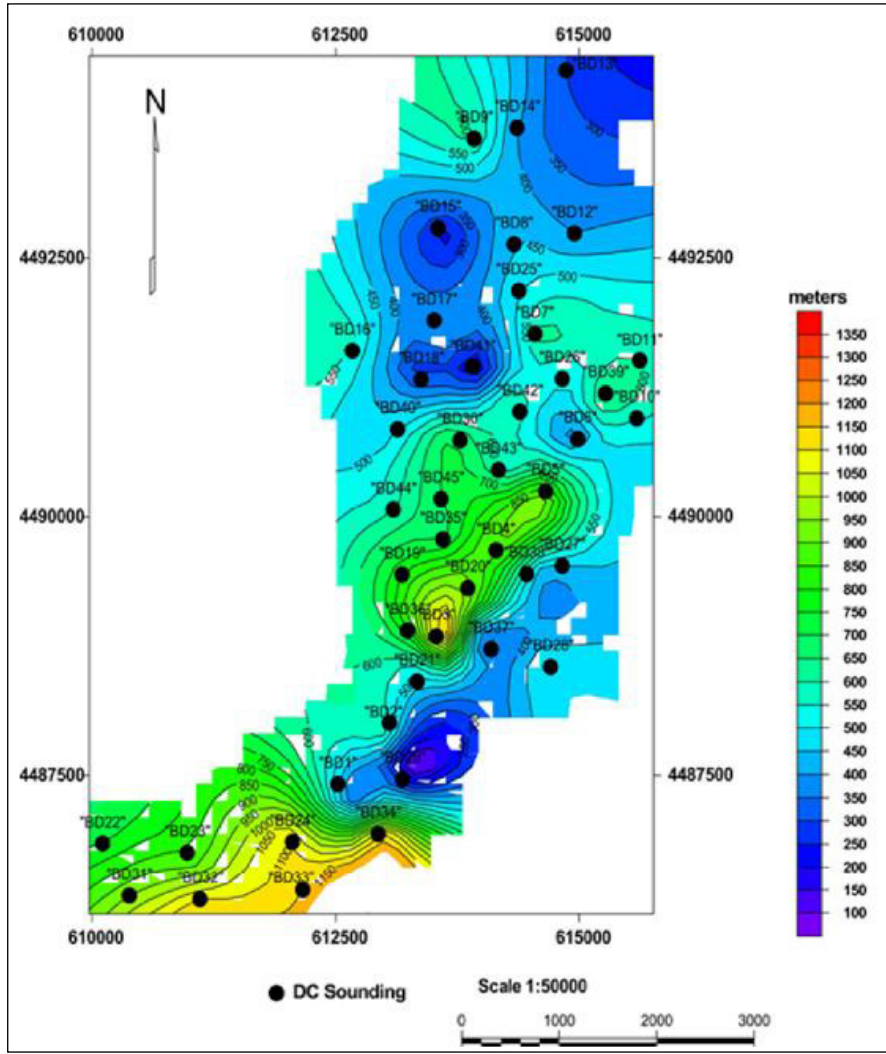
araştırmalar yerine, daha hesaplı ve daha sağlıklı DES elektrik ölçümlerinin kullanılması tercih edilebilir.

4. Kayatuzu Kavarnası Lokasyonu, Derinliği, Gaz Depolama Basıncı ve Hacminin Tespiti

4.1. Yeraltı Kayatuzu Yatağında Kavarna Açılmadan Önce Yapılacak İşlemler

1. Ruhsat sahası içinde kavarna merkezleri arasındaki minimum mesafe 300 m - 400 m alınır. Kavarna lokasyonları, aktif ve büyük atımlı fayların

düşen blok tarafından en az 500 m uzakta seçilmelidir. Kayatuzu yatağı içine açılacak kavarnaların derinliği, kavarna basıncını ve gaz depolama hacmini belirler. Kayatuzu bünyesindeki anhidrit, kil seviyeleri ve kalınlıkları çözelti madenciliğini olumsuz etkiler. Bu nedenlerle jeolojik etütlerin, jeofizik DES ve sismik ölçümlerin öngördüğü sondaj yerlerinde sondaj yapıldıktan sonra, sondaj loglarının sağlıklı korelasyonu, kavarna lokasyonlarının sağlıklı tayini için gereklidir. Kayatuzu litolojik istiflerinin detay korelasyonu (Şekil 7), kavarna lokasyonlarını



Şekil 16- Çorum Bayat Emirhalil G32-c4 paftası ruhsat sahasının DES yeraltı kayatuzu kalınlık haritası (Özen vd., 2017) (Bkz. Şekil 9).

tespit çalışmalarında gerekli olup kaverna risklerini minimuma indirir (Albes ve Wippich, 2014).

2. Kayatuzu istifinde çözünmeyen litoloji oranının tespiti için karotlu sondaj bitiminin hemen ardından, bekletilmeden tüm elektrik logların alınması gerekir. Aksi takdirde sondaj duvarları yer yer çökeceği için daha sonra ölçülecek elektrik logları yeterli olmayacaktır. Sondaj tijlerinin içinden elektrik loglarının alınması sağlıklı sonuçlar vermez. Elektrik logları alınmadığı takdirde, litolojik logdaki çözünmeyen (kil+jips) oranının hesaplaması zor ve yetersiz olabilmektedir.

3. Buradaki çözünmeyen madde oranı; detay litolojik sondaj logunun, bilgisayar programında

density, gama, nötron loglarıyla karşılaştırılması sonucu tespit edilen orandır. Bu oran % 30'u geçerse o lokasyonda çözelti madenciliğiyle kaverna açılması çok zorlaşacağı için uygun değildir.

4. Laboratuvar çalışmalarında karot örneklerinin suda çözünmesi esnasında, suda çözülmenin teknik fizibilitesini engelleyecek bir kaya cinsinin varlığı da araştırılır. Ayrıca 5m'den daha kalın jips ve kil ara seviyelerinin, saptanacak kaverna düşey aralığı içinde bulunmaması tercih edilir. Sık rastlanan ikincil kayatuzu ile dolmuş çatlak ve eklemler suda çözünme anında bu tabakaların dağılmasını kolaylaştırır. 5 m'den daha kalın da olsa çatlakları ikincil kayatuzu ile dolmuş anhidrit ve kil ara tabakalarının suda çözünmesi esnasında dağıldığı görülmüştür.

5. Özgül ağırlık, gözeneklilik, geçirgenlik, suda çözünabilirlik gibi kayatuzunun fiziksel ve kimyasal özellikleri de kaverna lokasyonu seçiminde rol oynar. Yüksek gözeneklilik ve geçirgenliğe sahip kaya tuzlarında, kaçak yapmadan gaz depolamak mümkün olamaz.

6. Şiddetli tektonik deformasyon görmüş bölümlerde kayatuzunun kübik kristal yapısı, dikdörtgenler prizmasına dönüşür. Creeping değerleri, yeraltında açılacak kavernanın zamanla yeraltı basıncı altında küçülüp küçülmeyeceğini saptamak için kaya mekaniği laboratuvarında ölçülür.

7. Etüt bölgesi civarında yer alan nehir ve kolları suyunun kaverna solüsyon madenciliği için debi ve kimyasal özellik bakımından uygun olup veya olmadığı araştırılır. Solüsyon madenciliği için tatlı suyu kil ve süspansiyon maddelerinden arındıran depolama, dinlendirme, pompalama istasyonu nehir kenarında kurulur ve bu su borularla sondaj sahasına gönderilir.

8. Solüsyon madenciliğiyle kaverna açılımı esnasında dışarı atılan çok büyük miktarlardaki tuza doymuş suyun çevre kirliliğine yol açmaması için yakınında deniz varsa oraya boşaltılır. Yoksa, tarımda kullanılmayan civar çorak vadilerde beton baraj setleri yapılarak hazırlanan havuzlarda başka kullanım amaçları için saklanır.

9. Solüsyon madenciliğinde çıkan tuza doymuş çözelti suyu, askı maddelerinden ve diğer istenmeyen kimyasal maddelerden arandıktan sonra PVC plastik türevleri üretimi için civar petrol rafinerilerinde ve kloralkalin tesislerinde kullanılabilir. Büyük miktarlardaki tuza doymuş çözelti suyunun sifon yapılarak borularla söz konusu endüstriyel üretim merkezlerine taşınması daha ekonomik ve hızlı olup nakliyat masrafı minimuma inmiş olur.

4.2. Sondaj Loglarında Düşey Kaverna Yerlerinin Tayin Yöntemleri

1. Gaz depolamada, yeraltı kayatuzu kavernası gaz basıncı ne kadar büyük olursa, yeryüzündeki bir atmosfer basınçlı gazın çok daha büyük hacimde kaverna içinde sıkıştırılıp depolanması mümkün olabilmektedir. Yeraltı kaverna derinlikleri arttıkça

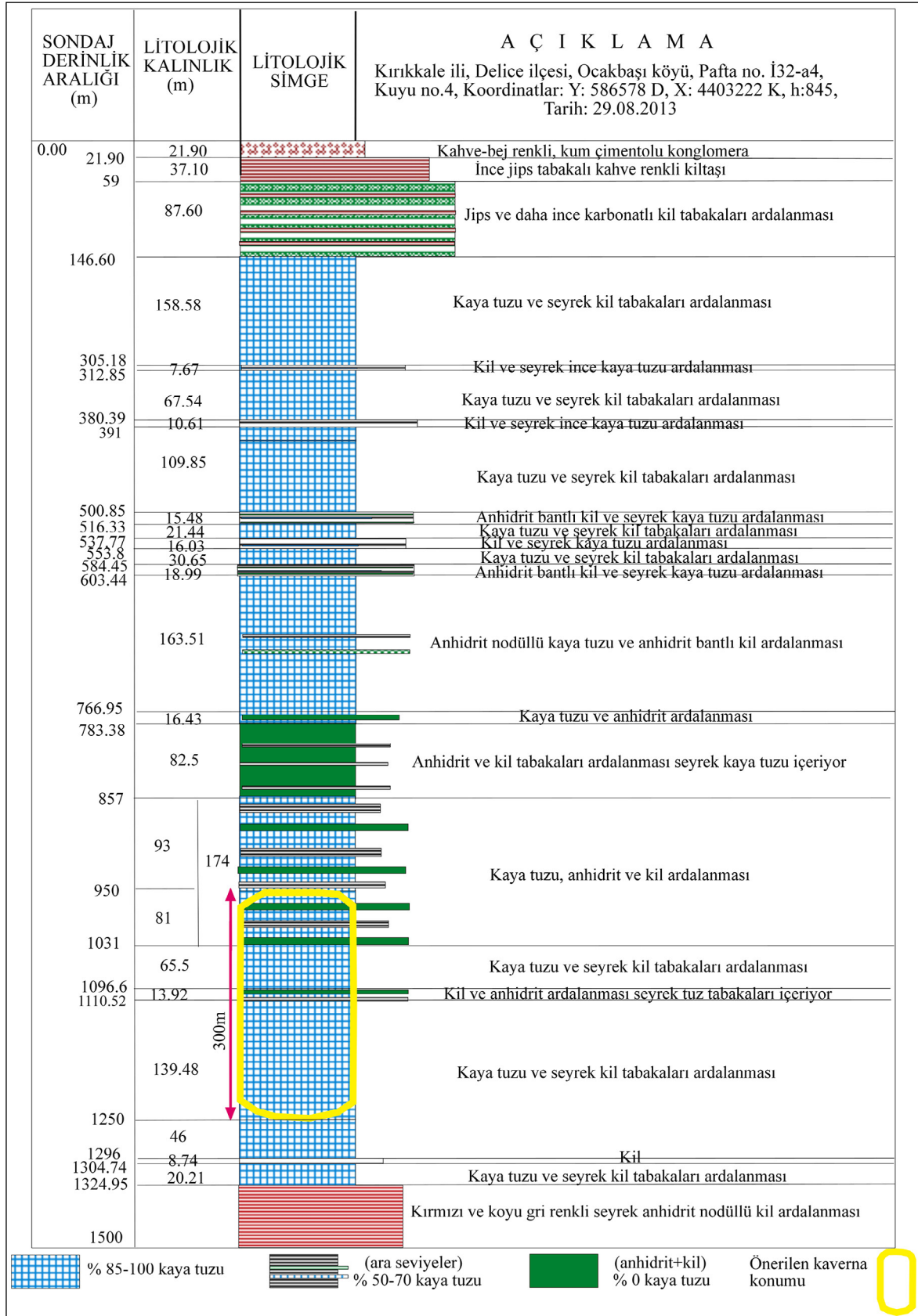
kaverna içi basınç da artar. Sürdürülebilir ve ekonomik doğal gaz hacmini depolamak amacıyla kayatuzu sondaj loglarında optimum kaverna derinlikleri 500 m - 2000 m arasında seçilir. En uygun düşey kaverna derinliği 1000 - 1500 m'dir. 2000 m derinliğin altında gaz sıvı hale geçiş yaptığı için depolanamaz.

2. Kaverna solüsyon madenciliğinde yeraltı kayatuzunun suda çözülme problemleriyle karşılaşılması için sondajda kesilen kayatuzu logu bünyesinde çatlakları kayatuzuyla doldurulmuş maksimum 5 m kalınlıkta olan ferdi kil-anhidrit tabakalarının en az bulunduğu bölüm seçilir. Daha kalın kil ve anhidrit tabakaları solüsyon madenciliğinde problem çıkarabilir. Kaverna açmak için sondaj logunda ince kil-anhidrit ara tabakaları içeren kayatuzu düşey bölümü tercih edilir (Şekil 17).

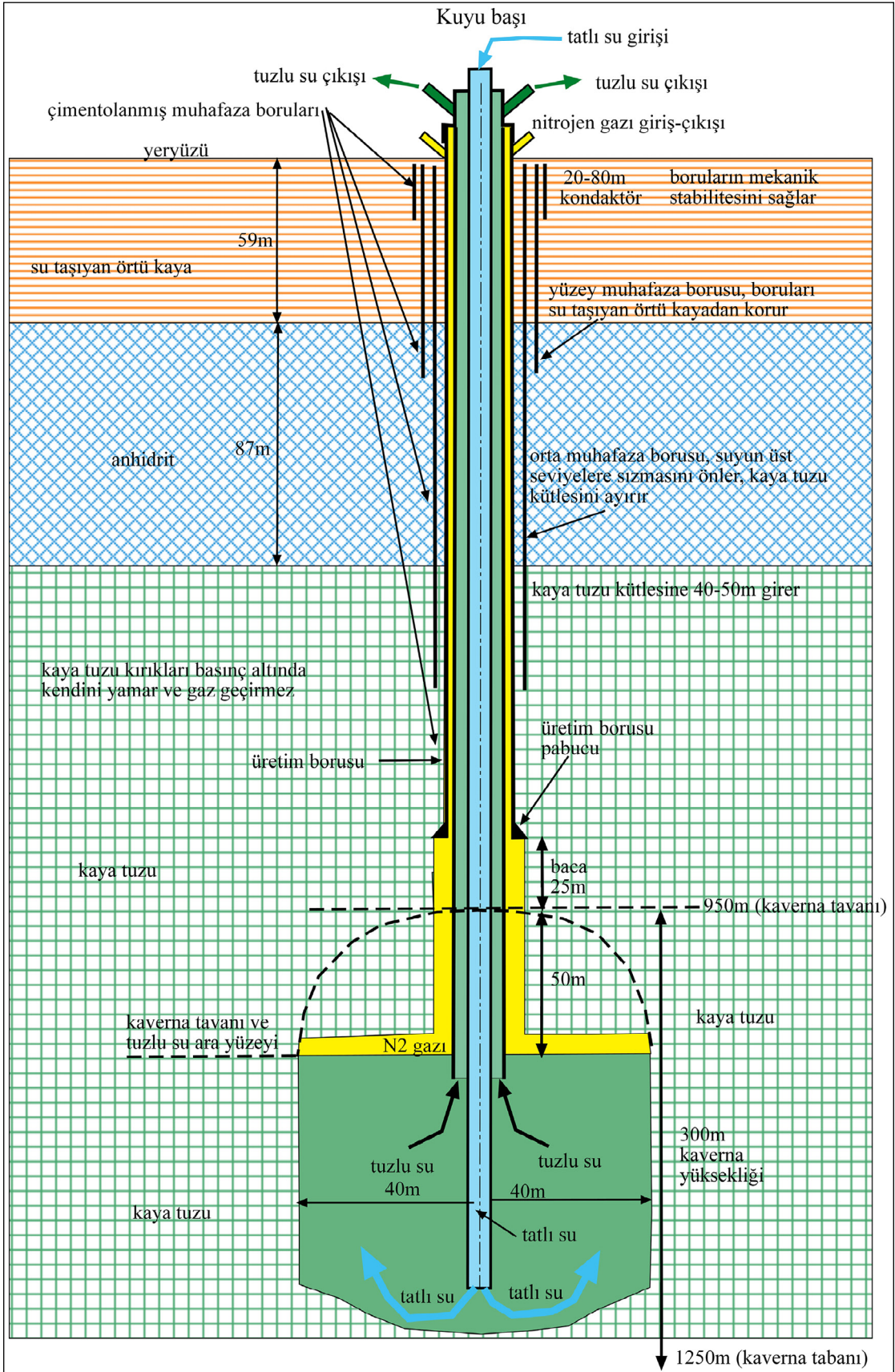
3. Şekil 17'deki sondaj karotlarına dayanan log'da, kayatuzu kaverna tavanı yaklaşık 950 m ve kaverna tabanı yaklaşık 1250 m derinlikte olmak üzere 300 m'lik bir kaverna düşey aralığının mümkün olduğu düşünülmüştür. Kaverna tavanı yarı küre şeklinde olup 50 m kalınlığında bir kayatuzu tavan kalınlığının içinde yer alır, artı 25 m yükseklikte boru indirilmemiş kaverna bacasının varlığı (Şekil 18) söz konusudur. Maksimum kaverna içi basıncı ve dolayısıyla maksimum gaz depolama hacmini elde etmek için kaverna düşey lokasyonu, sondaj logunun kayatuzu bölümü içinde mümkün olabilecek en derin yerinde seçilir. Maksimum gaz depolama basıncı için kaverna tabanı ile temel kırmızı kumtaşları arasında en az 50 m kalın bir kayatuzu bölümü bırakılır. Bu bölüm 75 m kalın seçilmiş ve kaverna içi maksimum gaz basıncı sonucu kayatuzu kütlesi tabanından gaz kaçağı tehlikesi önlenmiştir (Şekil 17). En uygun kaverna şekli 50-80 m çapında ve kayatuzu özelliklerinin solüsyon madenciliğine uygun birkaç yüz metre yüksekliğinde düşey silindirik şeklidir (Albes ve Wippich, 2014).

4.3. Sondaj Loglarında Yeri Saptanan Kavernaların Gaz Depolama Hacim ve Basınç Hesaplamaları

Kaverna boyutlarının planlanması ve yaklaşık kaverna hacminin hesaplanması, proje maliyetlerinin bilinmesi açısından önemlidir. Kavernanın ebatları, şekli ve kabul edilebilir kaverna iç basıncı, sondaj



Şekil 17- KİAŞ'ın Kırıkkale Eskikişla karotlu Sj-4 sondaj logunda doğal gaz depo kavernasının düşey konum seçimi (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).



Şekil 18- Kayatuzu kavernası solüsyon madenciliğinin sondaj boru yapıları (ölçeksizdir) (Kuntsman vd., 2007).

karotlarının jeomekanik laboratuvar analizlerine göre tespit edilip planlanır. Açılacak kavernanın çapına, derinliğine ve kayatuzunun tipine bağlı olarak gelişen kaverna basınç dayanımı tespit edilir. Sondajlarda kesilen farklı kayatuzu karot kalınlıkları ve derinlikleri için teorik kaverna hacimleri ve yeraltı basıncına dayanan gaz depolama hacimleri hesaplanabilir. Bu hesaplamayı gerçekleştirebilmek için şu ek varsayımlar ve başlangıç kriterleri uygulanır (Albes ve Lars, 2014).

1. Kil ve silt tortul kayacı gibi ince taneli litolojinin sıkışma ve kompaktlaşmasından kaynaklanan önemli hacim azalması, KİAŞ kayatuzu karotlarının Alman laboratuvarındaki suda çözünme analizi esnasında hacim genişlemesine yol açtığı görülmüştür. Suda çözünmeyen maddelerin ortalama suda genişleme değeri (bulking faktör) 2,2 ölçülmüş olup bu değer, çözünmeyen madde oranından bağımsızdır. Yabancı madde miktarı %10 bile olsa laboratuvarında ölçülen (hacim genişleme) değeri değişmez. Genelde kayalarda ortalama bulking faktör değeri 1,5 olduğu için ölçülen 2,2 değeri yüksektir.

2. Kullanım faktörü (solüsyon madenciliğiyle gerçekleştirilebilecek suda çözünürlüğün hacimsel oranı), kayatuzu sondaj karotlarının laboratuvarda kaya mekaniği ve solüsyon analizleriyle hesaplanır. KİAŞ kayatuzu karotlarının Deep Şirketi laboratuvar analizlerine göre kullanım faktörü 0,57 değerindedir. Komşu Kızılırmak Neojen evaporit havzaları yeraltı kayatuzları için dahi kullanım faktörü (suda çözünürlüğün hacimsel oranı) değerleri ortalaması 0,57 ve ortalama suda genişleme değeri 2,2 kabul edilebilir.

3. Kayatuzu seviyelerindeki kil ve anhidrit gibi yabancı madde oranı; detay sondaj litolojik

logu ve elektrik logların laboratuvarında bilgisayar programına yüklenmesiyle hassas olarak tayin edilebilir. Sondaj sonrası elektrik logların alınması mümkün olmadıysa bu oran, litolojik logların detay incelenmesiyle saptanır. KİAŞ sondaj karotlarında ve dolayısıyla Kızılırmak evaporitlerinde ortalama %25 olarak tahmin edilmiştir. Suda çözünme esnasında kil ve anhidrit genişlemesi değeri 2,2 (bulking faktör) hesaba katıldığında, erimeyen atık çözeltinin kaverna tabanında çökmesiyle kaverna boşluğunda oluşturacağı kaverna hacim kaybının $(2,2 \times \%25) = \%55$ olacağı hesaplanmıştır. Böylece kavernanın geri kalan kullanılabilir hacmi % 45'tir (Çizelge 1).

4. Deep Şirketi verilerine göre açılacak kaverna, 80 m çapında silindirik şekilde olup tavanı 50 m yarı çaplı yarı küresel kabul edilmiştir (Şekil 18).

5. Kavernanın yer altı derinliği ve dolayısıyla örtü kayaç kolonu basıncı, kaverna içinde müsaade edilebilen maksimum doğal gaz depolama basıncını tayin eder. Kaverna kuyu başı vanasının kaçak yapmaması için hesaplanan bu maksimum basıncın %80 değeri ile doğal gaz kavernaya depolanır.

6. Kaverna yüksekliğine göre hesaplanan teorik kaverna hacimleri aşağıda Çizelge 1'de verilmiştir.

7. Karot örneklerinin ölçülen ortalama hacimsel yoğunlukları; kayatuzu bünyesinde erimeyen litolojik içerik miktarlarıyla doğru orantılı olarak artmakta veya eksilmektedir.

4.4. Yeraltı Basıncına Dayanan Kaverna Gaz Depolama Hacimlerinin Hesaplanmasına Bir Örnek

Kaverna tabanının kayatuzu tabanına olan mesafesi 75 m, kaverna tavanı ile tabanı arasındaki

Çizelge 1- Solüsyon madenciliğiyle çözülen kayatuzun toplam ve kullanılabilir kaverna hacim hesaplaması

Kaverna Yüksekliği	Solüsyon madenciliği ile çözülen kayatuzunun toplam hacmi (kaverna hacmi)	Kullanılabilir kaverna hacmi (çözünmemiş madde oranı = % 55 ve geri kalan kullanılabilir hacim oranı = % 45)
h = 250 m	Hacim = $(\pi \cdot r^2 \cdot h \times \text{kullanım faktörü})$ $V = 3,14 \times (40 \text{ m})^2 \times 250 \text{ m} \times 0,57 = 710.000 \text{ m}^3$	(kaverna hacmi x kullanılabilir hacim oranı) $710.000 \text{ m}^3 \times \% 45 = 320.000 \text{ m}^3$
h = 300 m	Hacim = $(\pi \cdot r^2 \cdot h \times \text{kullanım faktörü})$ $V = 3,14 \times (40 \text{ m})^2 \times 300 \text{ m} \times 0,57 = 860.000 \text{ m}^3$	(kaverna hacmi x geri kalan hacim oranı) $860.000 \text{ m}^3 \times \% 45 = 390.000 \text{ m}^3$
h = 350 m	Hacim = $(\pi \cdot r^2 \cdot h \times \text{kullanım faktörü})$ $V = 3,14 \times (40 \text{ m})^2 \times 350 \text{ m} \times 0,57 = 1.010.000 \text{ m}^3$	(kaverna hacmi x geri kalan hacim oranı) $1.010.000 \text{ m}^3 \times \% 45 = 450.000 \text{ m}^3$

toplam yükseklik 300 m'dir. Kaverna içi tuzlu su üst yüzeyi ile üretim borusu pabuçları aralığı mesafe = (50 m+25 m) = 75 m'dir. Kayatuzu kütlesi tabanından kaverna üretim borusu pabuçlarına kadar olan toplam mesafe mesafe 450 m'dir (75+300+50+25) (Şekil 17-18).

Örtü kaya kolon yüksekliği; yeryüzü ile çimentolanmış en alt muhafaza borusunun (üretim borusu) ayağı arasındaki düşey mesafedir. Sondaj logu kaverna örtü kayacı toplam kolon kalınlığı = 1325 m - 450 m = 875 m olup, bunun 146.6 m'si kayatuzu içermez (Şekil 17-18).

Örtü kayaç kayatuzu kolonu bölümü kalınlığı 875 m – 146 m = 729 m'dir (Şekil 17). Kayatuzu örtü kayaç kolonu basıncı 729 m x 0,226 (basınç gradyanı) = 165 bar (Şekil 17 ve Çizelge 2).

Kayatuzu içermeyen örtü kaya basıncı 146,6 m x 0,239 (basınç gradyanı) = 35,0 bar (Şekil 17 ve Çizelge 2).

Kaverna içi doğal gaz maksimum depolama basıncı, çimentolanan en alt üretim borusu pabuçlarının derinliğindeki örtü kaya ve kayatuzu kolonu basıncı toplamından daha yüksek olmamalıdır.

Örtü kayacı toplam basıncı = 35,0 bar (kayaç) + 165 bar (tuz) = 200 bar. Kuyu başı gaz vanasında arıza yaşanmaması için, bu basınç değeri % 80 ile çarpılır. Kavernaya doldurulacak doğal gazın emniyetli basıncı = 200 bar x %80 = 160 bar.

Kapalı kaplarda $V_2 \times P_2/T_2 = V_1 \times P_1/T_1$ formülünden (bu formülde yer altı ve yer üstü sıcaklıkları yaklaşık eşit kabul edilmiştir).

Kullanılabilir kaverna hacmi x emniyetli kaverna basıncı = yer yüzünden kavernaya depolanan gaz hacmi x bir atmosfer basınç (1bar)

$390.000 \text{ m}^3 \times 160 \text{ bar} = V_1 \times (1 \text{ bar veya } 1 \text{ atmosfer basınç})$. (390.000 m³ kaverna hacmi Çizelge 1'den alındı).

Yeryüzünden kavernaya depolanacak gaz hacmi $(V_1) = \frac{390.000 \text{ m}^3 \times 160 \text{ bar}}{1 \text{ bar (veya } 1 \text{ atmosfer)}} = 62 \text{ milyon m}^3 \text{ dür}$.

Bu sonuç; Albes ve Lars (2014)'ın, belirttiği 50-80 m çapında, birkaç yüz metre yüksekliğinde, düşey silindirik şeklindeki bir kayatuzu kavernasının, 168 bar gibi bir yer altı basıncı altında işletme hacminin 30-70 milyon metreküp arasında olabilir fikrine uygundur.

Deep şirketinin tespit ettiği kayatuzu ve yan kayaç çeşitlerinin özgül ağırlık değerleri Çizelge 3'de verilmiş olup karot örnekleri üzerinde yapılan testlere, genel literatür bilgilerine ve evaporit çökellerinden elde edilen tecrübeye dayanır. Farklı litofasiyeler için düşük değerler uygulanarak aşırı basınç değeri çıkmaması için temkinli davranılmıştır. Kavernanın üstünde 25 m uzunluğunda muhafaza borusuz bir kaverna bacası bırakılmıştır. En alt çimentolanmış muhafaza borusu ayağının teoretik konumu yer yüzünün 925 m aşağısındadır (Şekil 17 ve 18). Sj-4 kuyusu litolojik birimleri ve teoretik kaverna aralığı bilgileriyle ilgili sondaj logu kesitinin farklı bölümleri için örtü kaya basınç gradyanları Çizelge 2'de hesaplanmıştır. Kayatuzu bünyesinde izotropik bir basıncın varlığını kabul edersek 925 m derinliğin üstündeki toplam kesit için ortalama 0,228 bar/m örtü kayaç basınç gradyanı hesaplanmıştır (Çizelge 2) (Albes ve Lars, 2014).

Çizelge 2- Deep Şirketince KİAŞ Sj-4 kuyusunda farklı litofasiyelere göre hesaplanan basınç gradyanı değerleri

Üretim borusuyla ilgili sondaj logu litolojik birimlerin basınç gradyanları (Albes ve Lars, 2014)	Derinlikten (m bgl)	Derinliğe (m bgl)	Toplam kalınlık	Deep Şirketi hesaplarına göre örtükaya basınç gradyanları değerleri (bar/m)
Teoretik üretim borusu ayağının üstündeki toplam kalınlık	450 m	1325 m	1325- 450 = 875 m	0,228 bar/m
Kayatuzu içermeyen örtü kaya	0 m	146 m	146 m	0,239 bar/m
Toplam kayatuzu kalınlığı	146 m	1325 m	1325-146 = 1179 m	0,225 bar/m
Teoretik üretim borusu ayağının üstündeki kayatuzu kalınlığı	146 m	875 m	875-146 = 729 m	0,226 bar/m

Çizelge 3- Deep Şirketince Sj-4 kuyusunda farklı litofasiyelere uygulanan tahmini özgül ağırlıklar (Anbes ve Lars, 2014).

Litofasiyes	Tahmini özgül ağırlık (kg/m ³)
Kumtaşı	2,00
Konglomera	2,00
Kayatuzu	2,17
Killi kayatuzu	2,19
Killi ve anhidrit nodüllü kayatuzu	2,22
Anhidrit nodüllü kayatuzu	2,25
Karbonatlı jips	2,37
Jipsli kilitaşı	2,39
Karbonatlı kilitaşı	2,44
Marn ve marnlı kilitaşı	2,44
Kayatuzlu ve kilitaşı anhidrit	2,82
Az kayatuzlu anhidrit	2,88
Anhidrit	2,96

Kızılırmak Neojen tortul havzası Kırıkkale-Eskikışla, Çankırı ve Çorum kayatuzu sondajlarında kesilen ve bu yörelerde gelecekte gerçekleştirilecek sondajlarda kesileceğini düşündüğümüz farklı kayatuzu karot kalınlıkları ve derinlikleri (Şekil 1, 3, 7, 9 ve 13) için teorik kaverna düşey lokasyonları, hacimleri ve yer altı basıncına dayanan gaz depolama hacimleri benzer şekilde hesaplanabilir.

Deep Şirketinin, Kırıkkale Neojen havzası kayatuzu örnekleri için laboratuarda tespit ettiği, örtü kaya basınç gradyanı ortalama (0,228 bar/m) değeri (Çizelge 2), kullanım faktörü veya suda çözünürlüğün hacimsel oranı (0,57) değeri ve bulking faktörü veya çözünmeyen maddelerin suda genişlemesi (2,2) değeri, Kızılırmak havzasının diğer Neojen yaşlı kayatuzu yatakları için yaklaşık geçerlidir.

5. Kayatuzunda Kaverna Açmak İçin Solüsyon Madenciliğinin Tatlı Su Araştırması

Kırıkkale, Çankırı ve Çorum yeraltı kalın kayatuzu yatakları, Kızılırmak Nehri ve kollarının civarında bulunmaktadır. Söz konusu kayatuzu yataklarında solüsyon madenciliği ile açılacak kavernalar için kullanılabilecek en yakın tatlı su kaynakları Kızılırmak Nehri ve kollarıdır. Kızılırmak nehri suyu kimyasal analizleri ve debisinin kaverna açmak

için yeterli olduğunu ve solüsyon madenciliğinde kullanılabileceğini gösteren veriler aşağıda belirtilmiştir.

5.1. Solüsyon Madenciliğinde Kullanılacak Tatlı Suyun Kalitesi ve Miktarı

Çorum Bayat Yerliköy Kızılırmak nehir kenarı (Y: 613336, X: 4486327) koordinatlı noktasından kimyasal analiz için 24 Ağustos 2017 günü alınan tatlı su örneğinin kimyasal analizi Çizelge 4'de verilmiştir (Özgüner ve Büyükaydın, 2017).

Devlet Su İşleri (DSİ) laboratuvarı Kızılırmak suyu analizinin değerleri, literatürde belirtilen içme suyu ve tarımsal sulama suyunun kimyasal ve fiziksel özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Kızılırmak suyu, sadece SO₄ iyonu 436,05 mg/L sınır değeri ve toplam çözülmüş katı madde (buharlaştırma kalıntısı) 1537,94 mg/L sınır değeri dışında içme suyu değerine sahiptir. Diğer iyon değerleri zaten içme suyu değerleri içine girdiği için solüsyon madenciliğinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır (Çizelge 4). Bu sudaki toplam çözülmüş katı madde miktarının 1537,94 mg/L veya litrede 1,5 gr olmasından dolayı Kızılırmak Nehrinden alınacak bulanık suyun dinlendirildikten sonra kullanılması gerekir.

Yerel yönetimler, nehir suyunun büyük bir oranda tarımsal sulamada kullanılmasını civar çiftçiler adına tercih eder. Bu nedenle solüsyon madenciliğinde veya sanayide kullanılacak toplam su debisinin Kızılırmak suyu debisinin %10'unu geçmemesi istenir. Gerek teknik ve gerekse maddi imkanlar açısından bir ruhsat sahasında en hızlı şekilde yılda iki kaverna açılabilirliğini düşünürsek; söz konusu iki kavernanın açılması esnasında kullanılacak tatlı su debisini hesaplamak ve Kızılırmak suyu debisi ile karşılaştırmak mümkündür. DSİ, 2005 ve 2015 yılları arasında Kızılırmak İlçesi Hüseyinli Köyü istasyonunda aylık akarsu debi ölçümleri almıştır. Bu on yılın ortalama Kızılırmak debisi 60,274 m³/sn olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5). Çizelgede, Mayıs, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında Kızılırmak su debisinin arttığı ve sonbaharda azaldığı görülür (Özgüner ve Büyükaydın, 2017).

Çizelge 4- Çorum Emirhalil Köyü Kızılırmak nehrinden alınan suyun DSİ Laboratuvarı kimyasal analiz raporu

LABORATUVAR NO.	:	17 – 1185 / 1									
NUMUNENİN ALINDIĞI YER	:	Çorum - Bayat									
NUMUNENİN ALINDIĞI TARİH	:	24 . 08. 2017									
	Deney Sonucu	>LÇ bel	Değer ençok TS 266 (2006)		Deney Sonucu	>LÇ bel	Değer ençok TS 266 (2006)				
			Sınıf 1 Tip 1	Sınıf 2 Tip 2			Sınıf 1 Tip 1	Sınıf 2 Tip 2			
SICAKLIK °C Num. alındığı yerdeki sıcaklık	--	--	--	--	Serbes karbondiyoksit mg/l.	0	--	--	--		
ÖLÇÜM SICAKLIĞI °C	25,4	--	--	--	Çözünmüş oksijen mg/l.	0	--	--	--		
pH (25,4 °C)	(1) 8,21	0,05	6,5-9,5	6,5-9,5	Çöz. oks. doygunluk oranı %	0	--	--	--		
Elektriksel iletkenlik mS/m	(2) 269,0	0,8	65	250	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı BOD ₅ , mg/l.	0	--	--	--		
Toplam çözünmüş katılar mg/l.	(7) 1537,9	--	--	--	Permanganat indeksi mg Oksijen / l.	0	--	--	--		
Sodyum, mg/l	(6) 349,23	--	100	200	Renk PT - Co. Skalası	0	--	1	20		
Potasyum, mg/l	(6) 5,65	--	--	--	Bulanıklık, NTU	0	--	5	5		
Toplam sertlik, (CaCO ₃) mg/l	(7) 434,00	--	--	--	Bor, mg/l.	0	--	1	1		
Kalsiyum, mg/l.	(6) 110,38	--	--	--	Krom + mg/l.	0	--	--	--		
Magnezyum, mg/l.	(6) 38,41	--	--	--	Kimyasal oksijen ihtiyacı mg/l.	0	--	--	--		
F.S.	0	--	--	--	Fenol, mg/l.	0	--	--	--		
Karbonat (fenolftalein alkalinitesi) mg/l.	(4) 4,20	--	--	--	Silis, mg/l.	0	--	--	--		
Bikarbonat (Metiloranj alkalinitesi) mg/l.	(4) 184,22	--	--	--	Çözünmüş Demir, mg/l.	0	--	--	--		
Toplam alkalinite (CaCO ₃) mg/l.	(4) 158,00	--	--	--	Toplam Fosfor, mg/l.	5	0,081	--	--		
Klorür, mg/l.	(5) 482,56	--	30	250	Toplam Fosfat, mg/l.	5	0,244	--	--		
Sülfat, mg/l.	(5) 436,05	--	25	250	Organik Azot, mg/l.	0	--	--	--		
Amonyum, mg/l.	(6) 6,359	--	--	--	Kjeldahl Azotu, mg/l.	0	--	--	--		
Nitrit, mg/l.	(5) <0,060	--	0,10	0,50	Serbest Klor, mg/l.	0	--	--	--		
Nitrat, mg/l.	(5) 7,780	--	25	50	Tuzluluk	0	--	--	--		
Orto Fosfat, mg/l.	0	--	--	--	Sümfaktanlar, mg/l.	0	--	--	--		
Florür, mg/l.	(5) 0,21	--	1,0	1,5	Askıdaki katı madde, mg/l.	3	49,00	--	--		
Siyanür (serbest), mg/l.	0	--	0,050	0,050	Toplam katı madde, mg/l.	0	--	--	--		
Toplam Org. Karbon, mg/l.	0	--	--	--	Ç Çökebilir katı madde, mg/l.	0	--	--	--		
Çözünmüş Org. Karbon, mg/l.	0	--	--	--	Yağ-Gres, mg/l.	0	--	--	--		

Çizelge 5- 2005-2015 yılları arası DSİ Kızılırmak İlçesi Hüseyinli Köyü istasyonu aylık akarsu debi ölçümleri

DSİ ETÜT PLANLAMA VE TAHSİSLER DAİRESİ BAŞKANLIĞI												
RASATLAR ŞUBE MÜDÜRLÜĞÜ												
RASAT TABLOSU												
İSTASYON İSMİ			KIZILIRMAK N. - HÜSEYİNLİ					İŞLT. İDARE		DSİ	RAKIM	548
İSTASYON NO.			D15A164					BÖLGE-HAVZA		ANKARA / Kızılırmak		
YERİ			ANKARA-ÇANKIRI YOLUNUN 110. KMSİNDEKIZILIRMAK İSTİKAMETİNE DÖNÜLÜR. 34KM GİDİLDİĞİNDE KIZILIRMAK İLÇESİ GİRİŞİNDEDİR (PAFTA H31-B3).									
İL VE İLÇESİ			ÇANKIRI Kızılırmak					ENLM-BYLAM		40:25:24 34:3:8		
RASAT TÜRÜ			DEBİ (m ³ /sn)							SU YILI		2005-2017
YIL	EKİ	KAS	ARA	OCA	ŞUB	MAR	NİS	MAY	HAZ	TEM	AĞU	EYL
2005	11,700	8,960	10,500	8,070	21,200	19,400	12,100	28,300	21,900	32,100	44,900	55,400
2006	13,800	14,900	14,400	24,100	66,500	41,200	16,800	42,100	42,100	42,800	33,800	38,600
2007	9,580	58,700	47,800	73,400	58,500	29,300	48,000	31,600	48,200	43,300	---	---
2008	20,500	30,600	29,600	51,800	48,800	21,600	17,800	45,800	30,200	53,900	71,100	25,400
2009	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2010	---	---	---	---	37,600	56,400	98,800	---	---	92,900	94,800	45,100
2011	37,600	58,100	90,300	---	---	---	52,800	83,500	---	---	---	103,000
2012	39,800	64,700	98,200	---	---	---	---	81,800	69,600	---	---	103,000
2013	26,100	50,000	35,200	65,300	61,000	53,700	63,700	57,000	80,900	89,400	89,900	71,100
2014	48,700	42,800	91,800	47,000	43,600	71,600	37,000	53,600	97,600	87,400	70,000	51,500
2015	25,800	18,900	13,500	42,300	26,600	50,800	64,700	51,600	85,300	90,700	94,900	87,900

Bir yılda açılacak 2 kavernadan her birinin hacmi yaklaşık 80 m çapında ve 350 m yüksekliğinde silindirik hacmine eşit olacağını kabul eder ve bir kaverna hacmini $\pi \cdot r^2 \cdot h$ formülünden hesaplayacak olursak: $3,14 \times (40 \text{ m})^2 \times 350 \text{ m} = 1.758.400 \text{ m}^3$ 'dür. kayatuzunun özgül ağırlığını $2,168 \text{ ton/m}^3$ kabul edersek: bir kaverna açmak için eritilecek kayatuzu miktarı $1.758.400 \text{ m}^3 \times 2,168 \text{ ton/m}^3 = 3.812.211,2 \text{ ton}$ 'dur. 1 m^3 tatlı su, ortalama 260 kg kayatuzunu erittiğine göre; bir kavernanın açılması için solüsyon madenciliğinde kullanılacak tatlı su miktarı $= 3.812.211/0,26 = 14.662.350 \text{ m}^3$ ve iki kaverna açmak için gerekli tatlı su miktarı $= 14.662.350 \text{ m}^3 \times 2 = 29.324.700 \text{ m}^3$ 'dür.

$365 \text{ gün (1yıl)} = 31.566.000 \text{ saniye}$ yapar. Bir yılda iki kaverna açılacağına göre suyun kullanım debisi $= 29.324.700 \text{ m}^3 / 31.566.000 \text{ sn.} = 0,929 \text{ m}^3/\text{sn}$ ' dir. Bu da Kızılırmak debisinin yaklaşık; $0,929 \text{ m}^3/\text{sn} / 60,274 \text{ m}^3/\text{sn} = \%1,54$ 'nü oluşturur ve Kızılırmak suyunun tarımda kullanılmasına zarar vermez. Solüsyon madenciliğinde kullanım için Kızılırmak kenarında su

depolama, dinlendirme ve pompalama istasyonunun açılmasına ihtiyaç vardır.

Kızılırmak suyu kimyasal analizlerinin (Çizelge 4) ve debisinin (Çizelge 5) kaverna solüsyon madenciliği için yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Bu değerler; Çankırı, Çorum kalın kayatuzu Neojen havzalarında açılması mümkün olan kavernaların solüsyon madenciliğinde Kızılırmak suyunun kullanılabilir olduğunu belirtir. Böylece sondajlarda kesilen veya kesilecek kayatuzu yataklarında kaverna solüsyon madenciliği projeleri yatırım güvenliği ön değerlendirilmesi için olumludur.

5.2. Çözelti Madenciliğiyle Kavernadan Çıkan Atık Tuzlu Suyun Çevreyi Kirletmeden Yönetimi

Deep Şirketinin hesapladığı yaklaşık her bir orta boy 400.000 m^3 kaverna hacminin basınç altında 62 milyon m^3 doğal gaz depoladığı düşünülecek olursa; örneğin hedeflenen toplam $600 \text{ milyon metreküp}$ doğal gazın bir ruhsat sahasında depolanabilmesi için yaklaşık toplam 10 kavernanın açılmasına ihtiyaç

vardır. 10 kaverna açılışında çıkacak atık tuzlu su miktarı $14.662.350 \text{ m}^3 \times 10 = 146,6$ milyon m^3 'tür. Atık tuzlu suyun süzülüp arıtıldıktan sonra sifon yapılıp Kırıkkale rafinerisine boru hattıyla verilmesi yanında diğer kullanım alanları olan ve kurulması düşünülen klor-alkali ve petrokimya tesisleri, Karabük demir çelik sanayi ve civar boya, deterjan ve tekstil sanayilerine boru hatlarıyla çok düşük fiyatla verilebilir. Artan fazla tuzlu su, çevre kirliliğini önlemek amacıyla, boru hattıyla sifon yapılıp Samsun körfezinde denize dökülebilir veya civar çorak vadilere beton setli toprak havuzlar yapılıp saklanabilir.

6. Sonuçlar ve Değerlendirme

1. Kırıkkale-Sekili evaporit sahasında KİAŞ'ın yaptığı karotlu iki sondajın her biri Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu'nda yaklaşık 1000 m kalın kayatuzu yatağı kesmiştir (Şekil 7 - 17) (Özgüner ve Kızıldağ, 2015).

2. Çorum'un batısında MTA'nın gerçekleştirdiği karotlu iki sondajdan biri Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu'nda 600 m kalın kayatuzu kesmiş ve diğeri ise askıda kaldığı için 600 m'den daha kalın kayatuzu varlığını belirtmiştir. Pliyosen yaşlı Bozkır Formasyonu'nda karotlu üç sondaj ile 760 m, 206 m, 175 m kalın kayatuzu yatakları kesilmiştir (Sönmez ve Aydınoğ, 2017), (Şekil 1 ve 3).

3. Çankırı güneyinde MTA'nın gerçekleştirdiği karotlu dört sondaj Pliyosen yaşlı Bozkır Formasyonu'nda 362 m, 304 m, 252 m, 50 m kalın kayatuzu kesmiştir (Sönmez ve Aydınoğ, 2017), (Şekil 1 - 3).

4. Çankırı antiklinali güney kanadında mostra veren Çankırı tuz mağarası ve Potuk kayatuzu mostraları da Oligo-Miyosen yaşlı Bayındır Formasyonu'na ait olup güneye doğru Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Kızılırmak ve Bozkır formasyonlarının altına dalmakta ve monoklinal kıvrım içinde yer almaktadır (Sönmez ve Aydınoğ, 2017). Çankırı güneyindeki kayatuzu formasyonları bu senklinal içinde aşınmadan korunmuştur. Çok kalın Bayındır Formasyonu kayatuzu yatağı tabanına veya temel İncek Formasyonu kırmızı kumtaşlarına kadar inen bir sondaj henüz gerçekleşmemiştir (Şekil 3).

5. Kırıkkale-Sekili evaporit havzasında Üst Miyosen-Pliyosen zamanında tektonik yükselmeden ötürü paleocoğrafya daha yüksek irtifada olduğu için Kızılırmak ve Bozkır formasyonları çökelmemiş veya aşınmıştır (Şekil 2).

6. Kırıkkale-Çankırı-Çorum ve Sivas Neojen evaporit havzaları içinde tortullaşma ile eş yaşlı graben yapıları içinde karotlu sondajların gerçekleştirilmesiyle yeni ve çok kalın kayatuzu yatakları varlığı ortaya konulabilir (Şekil 1 - 3 - 7 - 8 - 9 - 13 - 17). Gips ve anhidrit mostraları içinden tuzlu su çıkış lokasyonları DES ölçümleri için hedef seçilebilir.

7. Kırıkkale, Çankırı ve Çorum evaporit havzaları Neojen yaşlı olup kayatuzu tabakaları, fay kontakları hariç genellikle yatay eğimlidir ve tuz domu veya diyapir yapılarına rastlanmaz. Bu nedenle kalın kayatuzu yatağında kaverna açma problemi azalır.

8. Yeraltı kayatuzu yataklarının jeofizik etütlerinde çok pahalı olan sismik araştırmalar yerine daha sağlıklı sonuçlar veren ve daha hesaplı olan elektrik DES ölçümlerinin kullanılmasının yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

9. Yeraltı kayatuzu litolojik istiflerinin detay korelasyonu, doğal gaz depolayan kaverna lokasyonlarını tespit çalışmalarında gerekli olup kaverna risklerini minimuma indirir. Tuz kütlesi jeofizik ve jeolojik kesitlerinde görülen yanal değişimler ve kayatuzu kütlesi bünyesindeki kil ve anhidrit seviyelerinin korelasyonu önemlidir. Yer altı verileri toplandıkça; aktif ve büyük atımlı fay lokasyonları, düşen blok tarafları, istif kalınlıklarındaki değişimler, yanal lito-fasiyes değişimleri ve sondaj karotlarının teknolojik özellikleri, kaverna lokasyonlarının üç boyutlu tayini için göz önüne alınır.

10. Başarısızlıkların ve felaketlerin çoğu, kayatuzu solüsyonu madenciliği sınırlarının kayatuzu yatağının sınırlarıyla çakıştığı zaman meydana gelir. kayatuzu solüsyon kavernalarında gaz depolamayla ilgili problemler açısından kayatuzu kütlelerinin ufak faylarla asla yırtılmayıp kendi içinde yamandığını ve gaz sızıntısı yapmadığını bilmek önem kazanır (Warren, 2006).

11. Deep Şirketi ekibi, Kırıkkale Eskikişla köyü kayatuzu sondaj karotları bünyesindeki kil ve anhidrit içeriğinin solüsyon madenciliğiyle kaverna açılmasına bir engel teşkil etmediğini laboratuvar analizleri ve hesaplamalarıyla saptamıştır. kayatuzundaki yabancı madde miktarı yaklaşık % 25'dir.

12. 2000 m derinliğin altında doğal gazın sıvılaşma tehlikesi vardır. Basınçlı kaverna gazının optimum depolama derinliği 500 m ile 2000 m arasında değişmektedir. Kaverna derinlik aralığı; kayatuzu yatağının o lokasyondaki derinliğine, kalınlığına, litolojik özelliğine, kil-anhidrit ara tabakalanma yapısına göre tespit edilir. Kaverna boşluğunda, derinliğe bağlı artan yer altı basıncına göre daha büyük miktarda doğal gaz depolanabilmektedir.

13. Açılacak ortalama 80 m çaplı silindirik şekilli kaverna merkezleri arası minimum mesafe 300 m - 400 m'dir. Kavernalar arası koruyucu kayatuzu sütunlarının, daha dar olması doğal gaz kaçaklarına neden olabilir.

14. Kaverna düşey aralığı, kayatuzunun içerdiği anhidrit, kil aratabaka kalınlıklarının minimum olduğu sondaj logu bölümünde seçilir. Maksimum basınçlı gaz depolama hacmini elde etmek ve gaz kaçağını önlemek için kaverna tabanının kayatuzu yatağı tabanından en az 50 m yukarıda olmasına dikkat edilir (Şekil 17).

15. Azerbeycan'dan gelen ve Batı Anadolu istikametine giden TANAP doğal gaz boru hattı, Kırıkkale-Sekili kayatuzu havzasının yakınından geçtiği için gaz depolama imkanları kolay ve az masraflıdır. Samsun limanından gelen, Rus Mavi Akım doğal gaz ve beklenen petrol boru hattı, Çankırı-Çorum kayatuzu ve Kırıkkale kayatuzu havzaları yakınından geçer ve doğal gaz, petrol depolama imkanları daha kolay ve az masraflıdır.

16. Kızılırmak Neojen evaporit havzası civarında genç volkanizmaya rastlanmadığı için açılacak kavernalar yer altı volkanik (CO₂, H₂S ve SO₂) gaz çıkışlarından etkilenmeyecektir.

17. Doğalgaz depolama kavernalarının solüsyon madenciliğiyle açılımı sürecinde çıkacak atık tuzlu su

solüsyonların kullanım alanları; klor-alkalen tesisleri, petrol rafinerileri olup beton bariyerli çorak arazi vadisi yapay baraj havuzlarında saklanabilir veya beklenen Samsun petrol rafinerisine veya en yakın olan Karadeniz'e boru hattıyla boşaltılabilir. Böylece çevre kirliliği önlenmiş olur (Özgüner, 2022).

18. Yılda ortalama iki kaverna açabilmek için 29 milyon m³ veya yaklaşık 0.929 m³/sn debili tatlı suya ihtiyaç vardır ve bu, Kızılırmak Nehri ortalama debisinin % 1,54'nü karşılar (Çizelge 5). Böylece doğal gaz depolama çalışmaları, yöre tarımsal sulamasını olumsuz etkilemez. Kızılırmak suyunun kimyası, solüsyon madenciliğine uygundur (Çizelge 4).

19. Kırıkkale Eskikişla köyü EFTA, KİAŞ ve Sekili, Safir kayatuzu işletmelerinde görüldüğü gibi yeraltı galerileri ile kayatuzu madenciliği yapılmak isteniyorsa; ekonomik açıdan yatağın mostra vermesi veya sığ olması ve ulaşım imkanlarının kolay olması; kayatuzu yatağının çok kalın olmasından daha önemlidir.

20. Yeni çıkan yasalar; doğal gaz satan ve naklini yapan uluslararası şirketlerin sattığı doğal gazın % 20'ni Türkiye'de depolama zorunluluğu getirmiş olup açılan kavernalar kiraya verilebilmektedir. Kaverna açan şirketler, sistem doğal gaz boru hattına bağlandıktan sonra gaz depolama kirası gelirlerini elde etmek yetkisine sahip olmaktadır.

21. Deep Şirketinin, Kırıkkale Neojen havzası kayatuzu örnekleri için laboratuvarında tespit ettiği, örtü kaya ortalama basınç gradyan (0,228) değeri (Çizelge 2), kullanım faktörü veya suda çözünürlüğün hacimsel oranı (0,57) değeri ve bulking faktörü veya çözünmeyen maddelerin suda genişlemesi (2,2) değeri; Kızılırmak Neojen evaporit havzalarında bulunan diğer kayatuzu yatakları için yaklaşık geçerlidir. Bu değerlerin, Çankırı, Çorum kalın kayatuzu havzalarında açılması mümkün olan kavernaların doğal gaz depolama hacimleri ön değerlendirme hesaplarında kullanılabilir olacağı düşüncesindeyiz. Böylece yatırım güvenliği ön değerlendirilmesi de gerçekleşmiş olur. Daha sonra, detay laboratuvar analizleri elbette gerçekleştirilecektir.

Katkı Belirtme

Makaledeki çoğu veriler, 2013-2015 yılları içinde danışman olarak çalıştığım KİAŞ şirketinde gerçekleştirdiğim etütlere dayanır ve bu etütlerin finansmanını KİAŞ şirketi sağlamıştır. KİAŞ ve ETİ MADEN ortaklığı ile NaCl kayatuzundan kloralkali türevlerinin üretim araştırmaları söz konusu olmuştur. KİAŞ şirketi yetkililerine ve işbirliği yaptığım çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

MTA Genel Müdürlüğü son 11 yılda Çankırı ve Çorum'da yaptığı karotlu sondajlarda çok kalın kayatuzu yatakları rezervleri saptamıştır. Ülkemizin Petrokimya ve Kloralkali Endüstrisine hammadde oluşturan bu keşifler, makalemin de konusu olduğu için MTA Genel Müdürlüğü ve ilgili teknik elemanlarına teşekkürü görev sayarım.

Ayrıca Çorum Bayat güneyi Aşağı Emirhalil köyü doğusundaki yeraltı kayatuzu etütlerinin finansmanını sağlayan ruhsat sahibi sayın Emre Büyükaydın'a ve ruhsat sahasının DES jeoelektrik etüdünü gerçekleştiren SNS jeofizik ekibine şükranlarımı sunarım.

Değınilen Belgeler

- Albes, D., Lars, D. 2014. Report on Leaching Tests and Insolubles Logs Calculation of KİAŞ Exploration Wells (Kırıkkale Delice Salt Deposit, Anatolia). Deep Underground Engineering – Eyhauser Allee 2a-26160 Bad Zwischenahn –Germany (yayımlanmamış).
- Albes, D., Wippich, M. 2014. Evaluation of Exploration Data from the KİAŞ Salt Mining Concession in the Kırıkkale Delice Region, Central Anatolia. Deep Underground Engineering – Eyhauser Allee 2a-26160 Bad Zwischenahn – Germany (yayımlanmamış).
- Berest, P., Brouard, B. 2004. Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. LMS Ecole Polytechnic France and Brouard Consulting, France.
- Dönmez, M., Akçay, A. E., Bilgin, Z. R., Esentürk, K., Kara, H., Yergök, A. F. 2005. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No.47, Kırşehir-İ 32 paftası.
- Frank, J. G., Poppe, L. de B., Van, D. B. 2007. A shallow-basin model for saline-giants based on isostasy-driven subsidence. University of Utrecht, Faculty of Earth Sciences.

- KİAŞ-ETİ MADEN ortak kimyasal değerlendirme projesi raporu, 2010. Kırıkkale Delice Tuz Madeni Değerlendirme Projesi (kaverna - klor alkali - PVC üretimi). Kömür İşletmeleri – Eti Maden İşletmeleri (yayımlanmamış).
- Kuntsman, A., Poborska-Mlynarska, K., Urbanczyk, K. 2007. Solution Mining in Salt Deposits (outline of recent development trends). AGH University of Science and Technology Press, Krakow Radackia Uczelnianych Wydawnictw Naukowo Dydaktycznych AGH al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland.
- Lüttig, G., Steffens, P. 1976. Explanatory notes for the paleogeographic Atlas of Turkey from the Oligocene to Pleistocene. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rhostoffe, 648. Hannover.
- Murat, A. 2011. Orta Anadolu Tersiyer Havzaları Endüstriyel Tuz Aramaları Projesi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Etüt Dairesi Başkanlığı. (yayımlanmamış).
- NET Jeoteknik, 2013. Kömür İşletmeleri A Ş adına kayıtlı 3242127 numaralı ruhsat sahasının Jeofizik Raporu (yayımlanmamış).
- Özen, B., Bilgin, R., Güngör, A., Kocakaya, S., Ozen, S., Tufan, T. 2017. Çorum Bayat Sarayköy Tuz Aramaları Jeofizik Etüt Raporu. SNS Jeotermal Şirketi Ankara (yayımlanmamış).
- Özgüner, A. M. 2004. Tuz Gölü (Türkiye) ve Ölü Deniz (Ürdün) tuz yatakları jeolojilerinin ve ekonomik imkanlarının karşılaştırılması. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları Evaporitler ve Tuzlar Semineri 81, 150-189.
- Özgüner, A. M., Ünsal, A. 2013. Türkiye Tuz Yatakları ve Doğal Gaz Depolama Açısından Değerlendirilmesi. AMD AKFEL Madencilik ve Doğal Gaz Depolama A Ş (yayımlanmamış).
- Özgüner, A. M., Kızıldağ, İ. 2015. Kırıkkale-Sekili Evaporit Havzasındaki Kaya Tuzu Yatağının Jeolojik Etüdü ve Doğalgaz Depolama İmkanlarının Araştırılması. Kömür İşletmeleri AŞ (KİAŞ) Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Özgüner, A. M., Büyükaydın, E. 2017. Çorum Bayat Yerliköy Kayatuzu Ruhsat Sahası Doğal Gaz Depolama İmkanlarının Jeolojik Değerlendirmesi ve Solüsyon Suyundan Kloralkali Türevleri Üretim Önerisi (yayımlanmamış).
- Özgüner, A. M., Murat, A., Kabaoğlu, M. 2019. Kırıkkale Delice Halitli Köyü yöresi yeraltı kayatuzu yatağı ruhsat sahasının ön etüt raporu. Gasterm Madencilik AŞ. Ankara (yayımlanmamış).

- Özgüner, A. M. 2022. Orta Anadolu-Orta Karadeniz Kimya Kümelenmesinin Önemi. Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 14 (2), 368-384.
- Sönmez, İ., Erdoğan, N., Kırbaş, H. 2011. Çorum Bayat, Yukarı Emirhalil AR: 200805561 no.lu ruhsat sahasının buluculuğa esas maden jeolojisi raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Derleme Rapor no: 11977, Ankara (yayımlanmamış).
- Sönmez, İ., Aydındağ, A. K. 2017. Çankırı Çorum Havzasında Halit (NaCl), Globerit ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) ve Blodit ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) Oluşumları. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 23, 13-26.
- Stöwer, M. 2015. Alman UGS Doğalgaz Depolama Danışmanlık Şirketinin, KİAŞ Şirketine Önerileri (yayımlanmamış).
- Underground Gas Storage (UGS) Konferans notları, 30.Ekim.2014, Ankara (yayımlanmamış).
- Warren, J. K. 2006. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Wippich M., 2013 ile sözlü görüşme.
- Yamada, Y., Okamura, H., Tusuneyama, F. 2005. Analog Models of Faults Associated with Salt Doming and Wrenching: Application to Offshore United Arab Emirates. AAPG Memoir 85, 95-106.