YERALTI VE YÜZEY SİSTEMLERİNDE JEOLOJİK VE GEOTEKNİK İNCELEMELER

EDİTÖR
MUZAFFER ÖZBURAN













BİDGE Yayınları

Yeraltı ve Yüzey Sistemlerinde Jeolojik Ve Geoteknik İncelemeler

Editör: Doç. Dr. Muzaffer ÖZBURAN

ISBN: 978-625-5057-37-2

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
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

ÖNSÖZ

Doğal sistemlerin anlaşılması, mühendislik yapılarının güvenli biçimde tasarlanması ve yer altı kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, günümüz yer bilimlerinin en temel odak noktalarını oluşturmaktadır. Yer kabuğunun dinamik yapısı; karmaşık geoteknik gerilme alanları, su–kayaç etkileşimleriyle şekillenen hidrojeokimyasal süreçler ve yüksek teknoloji çağının omurgasını oluşturan stratejik hammadde birikimleri ile iç içe geçmiş disiplinlerarası bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır.

Bu kitap; kaya mekaniğinden hidrojeokimya ve çevre jeolojisine, geoteknik tehlike analizlerinden kritik hammadde potansiyeline kadar yer bilimlerinin farklı ve birbirini tamamlayan alanlarındaki nitelikli çalışmaları tek bir çatı altında bir araya getirmek amacıyla hazırlanmıştır.

Kitap kapsamındaki çalışmalar üç temel eksende şekillenmektedir:

Geoteknik ve Kaya Mekaniği: Bu kapsamda yeraltı gerilme durumları, 3 boyutlu deformasyonlar ve obruk oluşum mekanizmaları ele alınmaktadır. Konya–Karapınar bölgesi ve Obruk platosu örneği üzerinden "Cubical Rock Unit (CRU)" yaklaşımıyla yer altı ve yüzey yapılarının dinamik gerilme alanlarıyla etkileşimi derinlemesine incelenmiştir.

Hidrojeokimya ve Su–Kayaç Etkileşimi ile ilişkili olarak doğal sulardaki majör iyon bileşimleri, iyon dengesi hesaplamaları ve su–kayaç etkileşimlerinin hidrojeokimyasal evrimi ele alınmaktadır. Su analizlerinin analitik güvenilirliği ve su tiplerinin sınıflandırılmasında kritik rol oynayan Piper ve Schoeller diyagramı uygulamaları detaylandırılmıştır.

Stratejik Doğal Kaynaklar ve Kritik Mineraller kapsamında ise modern teknolojinin, yeşil enerji dönüşümünün ve savunma sanayisinin temeli kabul edilen Nadir Toprak Elementlerinin (NTE) jeolojik kökenleri, mineralojik dağılımları, küresel tedarik zinciri dinamikleri ile Türkiye'nin (özellikle Eskişehir-Beylikova ve Malatya-Kuluncak sahaları) stratejik potansiyeli değerlendirilmiştir.

Bu eserin; jeoloji, maden, inşaat, çevre ve geoteknik mühendisliği alanlarında çalışan akademisyenlere, araştırmacılara ve saha uygulayıcılarına değerli bir başvuru kaynağı olmasını temenni ederim. Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm bölüm yazarlarına titiz çalışmalarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Doç. Dr. MUZAFFER ÖZBURAN

KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI 1

HÜSEYİN SENDİR

DOĞAL SULARDAKİ TEMEL İYONLAR VE HİDROJEOKİMYASAL ÖNEMİ 17

DİDEM YASİN, DURU CESUR, ÖZLEM TOYGAR SAĞIN

CUBICAL ROCK UNIT CONSIDERATION FOR OBRUK PLATEAU SINKHOLES 33

MEHMET KEMAL GÖKAY

BÖLÜM 1

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ ve KULLANIM ALANLARI

HÜSEYİN SENDİR[1]

Giriş

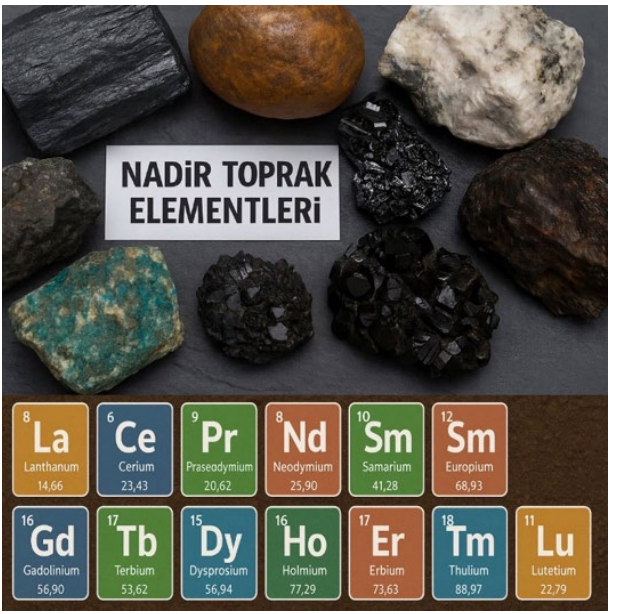
Nadir toprak elementleri (NTE), modern teknolojinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilen ve ekonomik, teknolojik ve jeopolitik açıdan stratejik öneme sahip kritik hammaddelerdir. Periyodik tabloda lantanit serisindeki on beş element ile skandiyum ve itriyumdan oluşan toplam on yedi elementi kapsayan bu grup, elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri, yüksek performanslı mıknatıslar, savunma sistemleri, uzay teknolojileri, elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji teknolojileri gibi çok sayıda ileri teknoloji uygulamasında kullanılmaktadır. Son yıllarda enerji dönüşümünün hızlanması, dijitalleşmenin artması ve savunma teknolojilerindeki gelişmeler, NTE'lere olan talebi önemli ölçüde artırmıştır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020).

NTE'ler yerkabuğunda göreceli olarak yaygın bulunmalarına rağmen ekonomik olarak işletilebilir konsantrasyonlarda nadiren bir araya geldikleri için "nadir" olarak tanımlanmaktadır. Karbonatitler, alkalen magmatik kayaçlar, iyon adsorpsiyon tipi killer, plaser yatakları, lateritik oluşumlar ve fosforitler başlıca NTE kaynaklarını

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7252-7117

oluşturmaktadır. Dünya genelinde Çin hem rezerv büyüklüğü hem de madencilik, zenginleştirme ve ayrıştırma teknolojilerindeki üstünlüğü sayesinde küresel NTE sektöründe baskın konumdadır. Bununla birlikte ABD, Avrupa Birliği, Avustralya ve Kanada gibi ülkeler tedarik zincirlerini çeşitlendirmek amacıyla yeni yatırımlar gerçekleştirmektedir (Kanazawa ve Kamitani, 2006) (Şekil 1).

Şekil 1 Nadir Toprak Elementleri



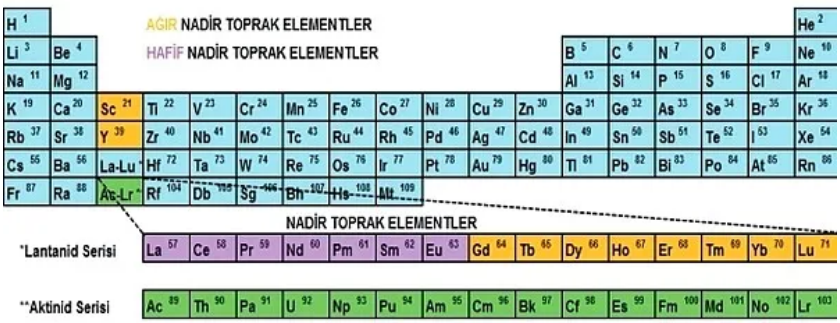
Kaynak: (https://serhansuzer.com/tr/nadir-toprak-elementleri/)

Türkiye, özellikle Eskişehir-Beylikova (Kızılcaören) ve Malatya-Kuluncak sahaları başta olmak üzere önemli NTE potansiyeline sahiptir. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, Türkiye'nin yalnızca cevher üreticisi değil aynı zamanda ayrıştırma teknolojileri ve ileri teknoloji malzeme üretimi alanlarında da önemli bir aktör olabileceğini göstermektedir (Öztürk vd., 2019; Demir vd., 2026; Çimen ve Dönmez, 2026).

Jeolojik ve Mineralojik Özellikler

Nadir toprak elementleri (NTE), IUPAC standartlarına uygun olarak, periyodik tablonun lantanit serisinde yer alan atom numarası 57 (Lantan) ile 71 (Lutesyum) arasındaki elementlerin yanı sıra, benzer kimyasal davranışlar sergileyen skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) dahil olmak üzere toplam 17 elementten oluşan stratejik bir grubu kapsamaktadır. Literatürde bu elementler için kullanılan "nadir" sıfatı, yerkabuğundaki mutlak bolluk derecelerini yansıtmamaktadır. Nitekim seryum (Ce) elementinin yerkabuğundaki ortalama konsantrasyonu bakırdan daha yüksek düzeyde seyrederken; tulyum (Tm) ve lutesyum (Lu) gibi elementlerin bulunma oranları altın ile benzer mertebededir. Kavramsal karmaşaya yol açan bu isimlendirmenin temel gerekçesi, söz konusu elementlerin madencilik faaliyetleri açısından ekonomik olarak işletilebilir, yüksek tenörlü cevher konsantrasyonları ve yatakları oluşturma sıklığının son derece düşük olmasıdır (Kanazawa ve Kamitani, 2006) (Şekil 2).

Şekil 2 Nadir Toprak Elementleri



Kaynak: (https://serhansuzer.com/tr/nadir-toprak-elementleri/)

NTE'lerin karakteristik özellikleri, benzer dış elektron dizilimlerine ve buna bağlı olarak birbirine oldukça yakın kimyasal reaktivite ve davranış kalıplarına sahip olmalarıdır. Bu yüksek kimyasal

benzerlik, fraksiyonlaşma süreçlerinde elementlerin doğada ekseriyetle aynı mineral fazları içerisinde ko-jenetik (birlikte) olarak zenginleşmesine sebebiyet vermektedir. Ancak bu durum, metalürjik zenginleştirme ve endüstriyel üretim aşamalarında en kritik teknolojik darboğazı meydana getirmektedir. Elementlerin kimyasal ve fiziksel parametrelerinin birbirine yakınlığı, seçici ayrıştırma (selektif solvent ekstraksiyonu veya iyon değişimi vb.) operasyonlarını zorlaştırmakta, proses verimliliğini düşürmekte ve dolayısıyla nihai üretim maliyetlerini kayda değer oranda artırmaktadır (Tunç, 2025).

NTE grubu, atom numaraları, iyonik yarıçapları ve jeokimyasal davranış kalıpları dikkate alınarak literatürde iki ana alt grupta sınıflandırılmaktadır:

Hafif Nadir Toprak Elementleri (LREE): Lantan (La), Seryum (Ce), Praseodimyum (Pr), Neodimyum (Nd), Prometyum (Pm), Samaryum (Sm) ve Europiyum (Eu).

Ağır Nadir Toprak Elementleri (HREE): Gadolinyum (Gd), Terbiyum (Tb), Disprosyum (Dy), Holmiyum (Ho), Erbiyum (Er), Tulyum (Tm), İterbiyum (Yb), Lütesyum (Lu) ve İtriyum (Y).

Skandiyum (Sc), özgün elektronik konfigürasyonu ve iyonik karakteristikleri sebebiyle pek çok jeokimyasal sınıflandırma şemasında bu iki grubun dışında, bağımsız olarak tanımlanmaktadır (Öztürk ve diğ., 2019).

Piyasa dinamikleri ve endüstriyel talep projeksiyonları açısından ağır NTE'ler (HREE), hafif nadir toprak elementlerine kıyasla çok daha yüksek ekonomik ve stratejik değere sahiptir. Bu ekonomik asimetrinin temel nedenleri, HREE içeren jeolojik rezervlerin global ölçekte sınırlı dağılım göstermesi ve modern teknolojinin omurgasını oluşturan yüksek performanslı kalıcı mıknatıs (NdFeB alaşımları vb.) üretiminde disprosyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi

elementlerin ikame edilemez termal kararlılık fonksiyonlarıdır. Çin Halk Cumhuriyeti'nin güney kuşağında yer alan regolit tipi iyon adsorpsiyon killeri, küresel HREE arz güvenliğinin en birincil ve kritik kaynağını teşkil etmektedir (Öztürk ve diğ., 2019).

Doğal sistemlerde ağırlıklı olarak +3 oksidasyon basamağında kararlı olan bu elementler, büyük iyon yarıçapları ve nispeten düşük yük yoğunlukları ile karakterize edilmektedir. Uyumsuz ve litofil element karakteristikleri neticesinde, magmatik diferansiyasyon süreçlerinde ergiyikte kalma eğilimindedirler. Oksijen ve flor anyonlarına karşı gösterdikleri yüksek kimyasal afinite nedeniyle, özellikle karbonat, fosfat, silikat ve florür mineral fazlarının kristal kafes yapılarına dahil olurlar. Ekonomik ölçekte NTE mineralizasyonlarının gelişimi, ana hatlarıyla şu metalojenik ve jeolojik mekanizmaların kontrolünde gerçekleşmektedir (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 2020):

Magmatik Süreçler: Aşırı alkalen magmatik sistemler ile karbonatit intrüzyonları, fraksiyonlu kristallenme yoluyla NTE zenginleşmesinin en yüksek evrelere ulaştığı birincil petrojenetik sistemlerdir.

Hidrotermal Süreçler: Uyumsuz elementlerce zengin, uçucu faz bakımından yoğun sıcak hidrotermal akışkanların tektonik hatlar (fay ve kırık sistemleri) boyunca taşınması ve uygun fiziko-kimyasal bariyerlerde cevherleşmesi esasına dayanır.

Ayrışma (Süperjen) Süreçleri: Tropikal ve subtropikal iklim koşullarında gelişen şiddetli kimyasal hava koşullandırması (lateritleşme) neticesinde, ana kayacın çözünmesi ve serbest kalan iyonların kil mineralleri üzerine fiziksel olarak tutunmasıyla oluşan iyon adsorpsiyon yataklarıdır.

Sedimanter Süreçler: Yoğunlukları ve kimyasal dirençleri yüksek olan monazit, ksenotim ve zirkon gibi ağır minerallerin

hidrodinamik etkenlerle akarsu veya kıyı şeritlerinde mekanik olarak konsantre olması sonucu gelişen sekonder (ikincil) plaser yataklarıdır Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 2020).

Ekonomik açıdan önemli NTE'lerin oluşturduğu mineraller; Bastnazit [(Ce,La)(CO_3)F], Monazit [(Ce,La,Nd,Th)PO_4], Ksenotim (YPO_4)'dir. Kritik elementler ise; Neodimyum (Nd), Praseodimyum (Pr), Disprosyum (Dy), Terbiyum (Tb), Samaryum (Sm) ve İtriyum (Y) mineralleridir. Bu elementlerin oluşturduğu mineraller, mıknatıs imalinden, seramik ve optik sistemlere kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

NTE'lerin jeolojik ortamları oldukça çeşitlidir. Belli başlı yataklar; karbonatitlerle ilişkili olanlar, alkalen magmatik kayaçlarla ilişkili olanlar, iyon adsorpsiyon tipi kil yatakları ve plaser yataklar, lateritik yataklar, fosforitlerle ilişkili yataklar ve IOCG (Demir Oksit-Bakır-Altın) yataklarıdır (Çimen ve Dönmez, 2026).

Türkiye'deki Başlıca Jeolojik NTE Ortamları

Türkiye'de bugüne kadar tanımlanan başlıca NTE oluşumları şunlardır:

Karbonatit ve Alkalen Sistemler: Eskişehir-Kızılcaören (Beylikova), Malatya-Kuluncak

Boksit ve Şeyl İlişkili Sistemler: Bolkardağı

Florit İlişkili Sistemler: Keban, Divriği.

Plaser Tip Oluşumlar: Çanaklı (Burdur)

Türkiye'deki NTE kaynakları dört temel jeolojik grupta değerlendirmiştir. Özellikle Beylikova ve Kuluncak sahaları ekonomik açıdan en önemli potansiyeli oluşturmaktadır (Öztürk vd., 2019; Çimen ve Dönmez, 2026) (Tablo 1).

Tablo 1 Türkiye'deki Başlıca NTE Oluşumları

Saha	**Jeolojik Tip**	**Baskın NTE**
Beylikova	Karbonatit-alkalen	La, Ce, Nd, Pr
Kuluncak	Karbonatit ilişkili	La, Ce
Bolkardağı	Boksit/iyon adsorpsiyon benzeri	HREE
Keban	Florit ilişkili	LREE
Divriği	Florit ilişkili	LREE

Kaynak: (https: Öztürk vd., 2019, Çimen ve Dönmez, 2026).

Dünyadaki Başlıca Nadir Toprak Elementi Yatakları ve Rezervleri

Nadir toprak elementleri (NTE), günümüzde enerji dönüşümü, dijitalleşme ve savunma teknolojilerinin temel hammaddeleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle NTE rezervlerinin coğrafi dağılımı yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda jeopolitik açıdan da büyük önem taşımaktadır. Küresel NTE rezervleri birkaç ülke ve belirli jeolojik bölgelerde yoğunlaşmış olup, üretim ve işleme kapasitesi rezerv dağılımından daha da yüksek bir yoğunlaşma göstermektedir. Özellikle Çin hem rezervleri hem de madencilik, zenginleştirme ve ayrıştırma teknolojilerindeki üstünlüğü sayesinde küresel NTE sektöründe lider konumdadır Demir vd. (2026), Çimen ve Dönmez (2026).

Dünya genelinde ekonomik öneme sahip NTE yatakları büyük ölçüde karbonatitler, alkalen kompleksler ve iyon adsorpsiyon tipi killer ile ilişkilidir. Bununla birlikte son yıllarda Grönland, Kanada,

Avustralya ve Afrika'da yeni kaynakların geliştirilmesi amacıyla önemli yatırımlar yapılmaktadır.

Küresel rezervlerin önemli bir bölümü Çin, Brezilya, Hindistan, Avustralya, Rusya ve Vietnam gibi ülkelerde bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, Grönland ve Kanada'nın da gelecekte önemli üreticiler arasına girebileceğini göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2 Dünya NTE Rezervlerinin Başlıca Ülkelere Göre Dağılımı

Ülke	**Yaklaşık Rezerv Durumu**	**Önemli Yataklar**
Çin	Çok yüksek	Bayan Obo, Güney Çin Killeri
Brezilya	Çok yüksek	Araxá, Catalão
Vietnam	Yüksek	Dong Pao
Rusya	Yüksek	Lovozero
Hindistan	Yüksek	Kıyısal Monazitler
Avustralya	Yüksek	Mount Weld
ABD	Orta-Yüksek	Mountain Pass
Kanada	Orta	Strange Lake
Grönland	Orta-Yüksek	Kvanefjeld
Türkiye	Gelişen Potansiyel	Beylikova, Kuluncak

Kaynak: (https: Demir vd., 2026, Çimen ve Dönmez, 2026).

NTE rezervlerinin coğrafi dağılımı ile üretim kapasitesi arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin Çin, rezervlerde lider,

ayrıştırma teknolojilerinde baskın bir konumdayken, ABD yüksek teknoloji üretiminde güçlüdür. Avrupa Birliği tedarik güvenliği arayışındadır. Bu durum NTE'leri yalnızca bir maden kaynağı olmaktan çıkararak uluslararası ilişkilerin önemli bir bileşeni haline getirmiştir (Gündoğdu, 2022).

NTE'lerin Kullanım Alanları

Nadir toprak elementlerinin (NTE) ekonomik ve stratejik öneminin temelinde sahip oldukları benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler yatmaktadır. Yüksek manyetik momentleri, optik özellikleri, katalitik davranışları ve yüksek sıcaklıklarda kararlılık göstermeleri nedeniyle NTE'ler günümüzün ileri teknoloji uygulamalarının vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir. Kullanım alanları ve özellikleri şu şekilde gruplanabilir:

Kalıcı Mıknatıs Teknolojileri: NTE kullanımının en önemli alanı kalıcı mıknatıs üretimidir.

Bugün küresel NTE tüketiminin yaklaşık %30–40'ı mıknatıs endüstrisinde gerçekleşmektedir (Aydın, (2020).

NdFeB bileşimli mıknatıslar, günümüzde bilinen en güçlü ticari mıknatıslardır. Neodimyum (Nd), Praseodimyum (Pr), Disprosyum (Dy) ve Terbiyum (Tb) temel bileşenlerdir. Bu mıknatıslar; elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri, robotik sistemler, endüstriyel motorlar gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Sm-Co mıknatısları, yüksek sıcaklıkta çalışabilme özelliklerinden dolayı, uzay teknolojileri, füze sistemleri gibi alanlarda tercih edilmektedir.

Elektrikli Araçlar ve Enerji Dönüşümü: Elektrikli araç teknolojilerinin yaygınlaşması NTE talebindeki en büyük artışın temel nedenlerinden biridir (Tablo 3).

Tablo 3 Bir elektrikli araçta kullanılan başlıca NTE'ler

Element	**Kullanım Alanı**
Nd	Motor mıknatısları
Pr	Motor mıknatısları
Dy	Yüksek sıcaklık kararlılığı
Tb	Performans artırıcı
La	Bataryalar
Ce	Katalizörler

Kaynak: (https: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Bir elektrikli araç motorunda kullanılan NdFeB mıknatısları, içten yanmalı motorlara göre daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre elektrikli araç üretiminin artmasıyla Nd ve Pr talebinin önümüzdeki yıllarda birkaç kat artması beklenmektedir (Aydın, (2020).

Rüzgâr Türbinleri: Doğrudan tahrikli (direct-drive) rüzgâr türbinleri büyük miktarda NdFeB mıknatısı kullanmaktadır.

Özellikle açık deniz (offshore) rüzgâr santrallerinde; Neodimyum, Praseodimyum ve Disprosyum kritik öneme sahiptir. Bir büyük offshore türbininde yüzlerce kilogram NTE kullanılabilmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji yatırımlarının artması NTE talebini doğrudan etkilemektedir (Aydın, (2020).

Elektronik ve Haberleşme Teknolojileri: NTE'ler modern elektronik cihazların neredeyse tamamında kullanılmaktadır. Akıllı

telefonlarda, Nd, Pr, Eu, Tb, Y, La *gibi* çok sayıda NTE bulunmaktadır T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022).

MTA raporlarına göre tek bir cep telefonunda kullanılan NTE miktarı düşük olmasına rağmen milyarlarca cihaz üretildiği için toplam talep oldukça yüksektir.

Fiber Optik Sistemler: Erbiyum (Er) ve itriyum (Y), fiber optik iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle; internet altyapıları, veri merkezleri bu elementlere bağımlıdır T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022).

Yapay Zekâ ve Veri Merkezleri: Son yıllarda yapay zekâ uygulamalarındaki hızlı büyüme NTE talebine yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu merkezlerde, soğutma sistemleri, hassas motorlar gibi sistemlerde NTE kullanılmaktadır. Bu durum NTE'lerin yalnızca enerji dönüşümünün değil aynı zamanda dijital dönüşümün de temel girdilerinden biri olduğunu göstermektedir T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022).

Savunma Sanayi ve Askerî Teknolojiler: NTE'lerin stratejik öneminin en belirgin olduğu alanlardan biri savunma sanayidir. Hassas güdümlü mühimmatlar, radar sistemleri, sonar sistemleri, gece görüş cihazları, lazer sistemleri *ve* uydu sistemlerinde NTE' ler kritik önemdedir. Nd, Sm, Dy, Tb, Gd savunma sistemleri için çok önemlidir (Tablo 4).

Uzay ve Havacılık Teknolojileri: Uzay teknolojileri NTE'lerin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Uydu sistemleri, roket motorları gibi sistemler başlıca kullanım alanlarıdır.

Tıp ve Sağlık Teknolojileri: NTE'lerin kullanım alanları yalnızca enerji ve savunma sektörleriyle sınırlı değildir. Gadolinyum (Gd), Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) sistemlerinde kontrast madde olarak kullanılmaktadır. Lantan (La), Bazı böbrek hastalıklarının tedavisinde kullanılan ilaçlarda yer almaktadır.

İtriyum (Y), kanser tedavisinde kullanılan radyoterapi uygulamalarında kullanılmaktadır (Tablo 4).

Tablo 4 Savunma Sanayinde Kullanılan Başlıca NTE'ler

Element	**Kullanım**
Nd	Radar ve motor sistemleri
Sm	Füze sistemleri
Dy	Yüksek sıcaklık mıknatısları
Tb	Hassas elektronikler
Gd	Sonar ve nükleer uygulamalar

Kaynak: (https: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022).

Katalizörler ve Kimya Endüstrisi: Seryum (Ce) ve lantan (La), petrol rafinerileri ve otomotiv sektöründe kullanılan katalizörlerin temel bileşenleri arasındadır. Egzoz gazı arıtımı, kimyasal üretim süreçleri için NTE' ler önemlidir T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022).

Katalitik özellikleri nedeniyle Ce günümüzde en fazla kullanılan NTE'lerden biridir.

Türkiye'nin Nadir Toprak Element Potansiyeli

Türkiye'de NTE araştırmaları 1970'li yıllarda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından başlatılmıştır. İlk çalışmalar daha çok uranyum, toryum ve florit aramaları kapsamında yürütülmüş, zamanla bu oluşumlarla ilişkili NTE zenginleşmeleri dikkat çekmeye başlamıştır. 1980'li ve 1990'lı yıllarda:

- Kızılcaören (Eskişehir)

- Kuluncak (Malatya)
- Keban (Elâzığ)
- Divriği (Sivas)

gibi sahalarda ayrıntılı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2010 sonrasında ise enerji dönüşümü ve kritik mineraller konusundaki küresel gelişmeler nedeniyle NTE aramaları yeniden hız kazanmıştır. Özellikle Eti Maden ve MTA tarafından yürütülen çalışmalar Beylikova sahasının stratejik önemini ortaya koymuştur (Çimen ve Dönmez, 2026).

Kritik mineraller ve nadir toprak elementleri (NTE) alanında son yıllarda yaşanan gelişmeler, Türkiye'nin sahip olduğu jeolojik potansiyelin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Türkiye, Alp-Himalaya metalojenik kuşağı üzerinde yer alması nedeniyle oldukça karmaşık ve zengin bir jeolojik yapıya sahiptir. Bu jeolojik çeşitlilik, farklı tipte NTE yataklarının oluşmasına olanak sağlamıştır (Çimen ve Dönmez, 2026).

Uzun yıllar boyunca Türkiye'nin NTE potansiyeli sınırlı düzeyde bilinmekteyken, son yıllarda gerçekleştirilen ayrıntılı jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik çalışmalar sonucunda özellikle Eskişehir-Beylikova (Kızılcaören) sahasının dünya ölçeğinde önemli bir kaynak olduğu ortaya konulmuştur. Bunun yanında Malatya-Kuluncak, Bolkardağı, Keban, Divriği ve Burdur-Çanaklı gibi sahalar da farklı jeolojik özelliklere sahip önemli NTE oluşumları olarak değerlendirilmektedir (Öztürk vd., 2019; Çimen ve Dönmez, 2026).

Sonuçlar

Nadir toprak elementleri (NTE), modern teknolojinin sürdürülebilirliğinde ve küresel iklim değişikliğiyle mücadele stratejilerinde merkezi bir rol üstlenen kritik hammaddelerdir.

Elektrikli araçlar ve rüzgâr türbinleri gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin hızla yaygınlaşması, sürdürülebilir doğal kaynak kullanımını hedefleyen küresel enerji dönüşümünün temelini oluşturmakta ve bu elementlere olan talebi her geçen gün ivmelendirmektedir.

Jeolojik ve mineralojik açıdan incelendiğinde, NTE'lerin doğada genellikle ko-jenetik olarak bulunmaları ve birbirlerine çok benzeyen kimyasal karakteristikleri, madencilik operasyonlarında ve özellikle metalürjik ayrıştırma aşamalarında ileri mühendislik yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır. Bu zorlu süreçlerde, doğal kaynakların işletilmesinin yarattığı çevresel etkilerin minimize edilmesi ve tüm madencilik faaliyetlerinin güncel çevre ve maden hukuku mevzuatlarına titizlikle entegre edilmesi, sektörün uzun vadeli gelişimi için bir gerekliliktir.

Küresel ölçekte Çin'in hem rezerv miktarında hem de işleme teknolojilerinde kurduğu tekel, NTE tedarik zincirini yalnızca ekonomik bir mesele olmaktan çıkarıp, stratejik ve jeopolitik bir rekabet alanına dönüştürmüştür. Bu asimetrik güç dağılımı, teknoloji üreten diğer ülkelerin arz güvenliğini sağlamak amacıyla alternatif rezervlere yönelmesini ve tedarik zincirlerini çeşitlendirmesini zorunlu kılmıştır.

Türkiye, üzerinde bulunduğu Alp-Himalaya metalojenik kuşağının sunduğu jeolojik çeşitlilik sayesinde, başta Eskişehir-Beylikova ve Malatya-Kuluncak sahaları olmak üzere dünya ölçeğinde dikkate değer bir NTE potansiyeli barındırmaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin sahip olduğu bu jeolojik zenginliğin katma değere dönüştürülebilmesi için yalnızca cevher çıkarımı düzeyinde kalınmamalıdır. Çevreyle uyumlu, sürdürülebilir politikalar ve sağlam yasal altyapılar ışığında, ayrıştırma ve saflaştırma teknolojilerine yönelik Ar-Ge yatırımları artırılmalıdır. Ülkenin bir hammadde tedarikçisi olmanın ötesine geçerek, savunma sanayi,

havacılık ve yeşil enerji sektörlerine yönelik ileri teknoloji bileşenleri üreten tam entegre bir aktör konumuna yükselmesi, teknolojik bağımsızlık ve ulusal kalkınma açısından hayati önem taşımaktadır.

Kaynakça

Aydın, M. (2020). *Nadir Toprak Elementleri ve Enerji Dönüşümündeki Stratejik Rolleri*. Ankara: Enerji Politikaları Araştırma Merkezi Yayınları.

Çimen, A., & Dönmez, M. (2026). Türkiye'de nadir toprak elementleri potansiyeli ve yeni arama çalışmaları. *Kritik Mineraller ve Stratejik Hammaddeler Kitabı*, 145–178.

Demir, H., Kaya, S., & Yılmaz, A. (2026). Dünya nadir toprak elementleri rezervleri ve küresel tedarik zinciri dinamikleri. *Madencilik ve Stratejik Kaynaklar Dergisi*, 12(1), 25–48.

Gündoğdu, E. (2022). Nadir toprak elementlerinin jeopolitiği ve küresel rekabet. *Uluslararası Enerji ve Strateji Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 89–108.

Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, 408–412, 1339–1343 https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.033

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2020). *Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri Raporu*. Ankara: MTA Yayınları.

Öztürk, H., Altun, Y., & Karakaş, Z. (2019). Türkiye'deki nadir toprak elementleri yatakları ve ekonomik potansiyelleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 159, 1–25.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2020). *Türkiye Sanayi ve Teknoloji Stratejisi 2023*. Ankara: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayınları.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri Değerlendirme Raporu*. Ankara: ETKB Yayınları.

Tunç, A. (2025). Nadir toprak elementlerinin ayrıştırılması ve zenginleştirilmesinde güncel teknolojiler. *Madencilik Teknolojileri Dergisi*, 18(3), 55–74.

https://serhansuzer.com/tr/nadir-toprak-elementleri/.

BÖLÜM 2

DOĞAL SULARDAKİ TEMEL İYONLAR VE HİDROJEOKİMYASAL ÖNEMİ

DİDEM YASİN[1], DURU CESUR[2], ÖZLEM TOYGAR SAĞIN[3]

Giriş

Su, doğal sistemlerin işleyişinde ve canlı yaşamının sürdürülebilirliğinde temel öneme sahiptir. Suların fiziksel ve kimyasal özellikleri; yağış, beslenme koşulları, su–kayaç etkileşimi ve çeşitli hidrojeokimyasal süreçlerin etkisi altında şekillenmektedir. Bu nedenle doğal sularda bulunan çözünmüş iyonların belirlenmesi ve değerlendirilmesi, suyun hidrojeokimyasal özelliklerinin anlaşılmasının yanı sıra farklı kullanım amaçlarına uygunluğunun ortaya konulması açısından da önem taşımaktadır.

Doğal suların kimyasal bileşimi; suyun kökeni, beslenme koşulları, temas ettiği jeolojik birimler ve geçirdiği hidrojeokimyasal

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Orcid: 0000-0003-3063-9916
[2] Araş. Gör., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Orcid: 0009-0000-6188-8267
[3] Araş. Gör., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Orcid: 0000-0002-2516-4250

süreçler hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Yağış suları, toprak ve kayaçlarla etkileşimleri sırasında minerallerin çözünmesi, çökelmesi, iyon değişimi, yükseltgenme–indirgenme, karışım ve buharlaşma gibi süreçlere bağlı olarak çeşitli iyonları bünyelerine almaktadır. Bu nedenle majör iyonların türleri, konsantrasyonları ve birbirleri ile ilişkileri; akifer litolojisinin, su–kayaç etkileşiminin ve hidrojeokimyasal evrimin değerlendirilmesinde önemli göstergelerdir. Ayrıca doğal suların kimyasal özelliklerinin belirlenmesi, suların içme, sulama ve diğer kullanım amaçlarına uygunluğunun değerlendirilmesi ile doğal ve antropojenik etkilerin araştırılması açısından da önem taşımaktadır (Freeze & Cherry, 1979; Appelo & Postma, 2005).

Bu bölümde, doğal suların kimyasal bileşiminin temelini oluşturan Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, CO_3^{-2}, Cl^{-} ve SO_4^{-2} iyonları hidrojeokimyasal açıdan ele alınmıştır. Bu iyonların doğal sulardaki başlıca kaynaklarının yanı sıra hidrojeokimyasal çalışmalarda kullanılan derişim birimleri ve birimler arasındaki dönüşümler açıklanmıştır. Ayrıca majör iyon analizlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan iyon dengesi açıklanmış ve su tiplerinin belirlenmesinde kullanılan Piper ve Schoeller diyagramları ele alınmıştır.

Sudaki Temel İyonlar

Doğal suların kimyasal bileşiminin temelini oluşturan Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, CO_3^{-2}, Cl^{-} ve SO_4^{-2} iyonları hidrojeokimyasal açıdan ele alınmıştır.

Kalsiyum (Ca^{+2}), doğal sularda yaygın olarak bulunan başlıca katyonlardan biridir. Yeraltı suyundaki kalsiyumun en önemli kaynağı, kalsit ve dolomit gibi karbonat minerallerinin çözünmesidir. Bununla birlikte jips ve anhidrit gibi sülfat minerallerinin çözünmesi de Ca^{+2} konsantrasyonunu artırabilmektedir. Ayrıca plajiyoklaz, piroksen ve amfibol gibi

minerallerin ayrışması kalsiyumun suya geçmesine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle yüksek Ca^{+2} konsantrasyonları özellikle karbonatlı kayaçların egemen olduğu akiferlerde yaygın olarak gözlenmektedir (Hem, 1985; Drever, 1997; Appelo & Postma, 2005).

Magnezyum (Mg^{+2}) başlıca dolomit ve diğer magnezyum içeren karbonat minerallerinin çözünmesi sonucunda yeraltı suyuna geçmektedir. Bununla birlikte olivin, piroksen, amfibol ve bazı kil mineralleri gibi Mg içeren silikat minerallerinin ayrışması da önemli bir magnezyum kaynağıdır. Dolayısıyla Mg^{+2} konsantrasyonları, karbonatlı kayaçların yanı sıra mafik ve ultramafik kayaçlarla etkileşimde bulunan sularda da artabilmektedir (Hem, 1985; Appelo & Postma, 2005).

Sodyum (Na^{+}) doğal sularda hem silikat hem de evaporit minerallerinden kaynaklanabilmektedir. Albit gibi Na içeren feldispatların kimyasal ayrışması, halit ve mirabilit gibi evaporit minerallerinin çözünmesi sodyumun başlıca doğal kaynakları arasındadır. Ayrıca kil mineralleri üzerinde gerçekleşen katyon değişimi süreçleri yeraltı suyundaki Na^{+} konsantrasyonunu önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Sulama dönüş suları, endüstriyel atıklar ve evsel atık sular da özellikle yerleşim ve tarım alanlarında antropojenik sodyum girdisine neden olabilmektedir (Hem, 1985; Appelo & Postma, 2005).

Potasyum (K^{+}) esas olarak K-feldispat, feldispatoidler, mikalar ve bazı kil minerallerinin ayrışması sonucunda doğal sulara katılmaktadır. Bununla birlikte bazı evaporit mineralleri ve tarımsal gübreler de potasyum kaynağıdır. Potasyum, mineral yüzeyleri ve kil mineralleri tarafından tutulmaya eğilimli olduğundan, benzer jeolojik kaynaklara sahip olmasına rağmen doğal sulardaki konsantrasyonu çoğunlukla sodyumdan daha düşüktür (Hem, 1985; Drever, 1997).

Klorür (Cl^-), hidrojeokimyasal çalışmalarda önemli bir izleyici iyon olarak kullanılmaktadır. Deniz suyu, halit gibi evaporit minerallerinin çözünmesi ve doğal tuzlu sular klorürün başlıca kaynaklarıdır. Bununla birlikte yol tuzlaması, evsel ve endüstriyel atık sular, gübreler ve sulama dönüş suları gibi antropojenik girdiler de Cl^- konsantrasyonunun artmasına neden olabilmektedir (Hem, 1985; Appelo & Postma, 2005).

Sülfat (SO_4^{-2}) doğal sularda başlıca jips ve anhidrit gibi sülfat minerallerinin çözünmesi ve pirit başta olmak üzere sülfitli minerallerin oksidasyonu sonucunda oluşur. Denizel girdiler ve atmosferik çökelim de doğal sulardaki sülfatın kaynakları arasındadır. Tarımsal gübrelerin kullanımı ve çeşitli endüstriyel faaliyetler ise antropojenik sülfat girdilerine neden olabilir. Buna karşılık, indirgen koşullarda gerçekleşen bakteriyel sülfat indirgenmesi, sülfatın indirgenmiş sülfür türlerine dönüşmesine ve sudaki sülfat konsantrasyonunun azalmasına yol açabilir. Bu nedenle, doğal sulardaki sülfat dağılımı, mineral çözünmesi ve redoks süreçlerinin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir (Drever, 1997; Appelo & Postma, 2005).

Bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{-2}) doğal suların alkalinitesini oluşturan başlıca iyonlardır. CO_2'nin suda çözünmesi ile oluşan karbonik asit, özellikle kalsit ve dolomit gibi karbonat minerallerinin çözünmesini kolaylaştırmaktadır. Karbonat türlerinin dağılımı pH tarafından kontrol edilmekte; doğal yeraltı sularının yaygın pH koşullarında HCO_3^- genellikle baskın türü oluştururken, daha yüksek pH değerlerinde CO_3^{-2}'nin önemi artmaktadır (Hem, 1985; Stumm & Morgan, 1996; Appelo & Postma, 2005).

Hidrojeokimyada Kullanılan Derişim Birimleri

Sudaki çözünmüş maddelerin miktarlarının ifade edilmesinde farklı derişim birimleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan birimler mg/l, ppm, ppb, mmol/l ve mek/l dir.

mg/l, bir litre çözeltide bulunan çözünmüş maddenin miligram cinsinden miktarını ifade etmektedir.

ppm kütle esasına göre, çözeltinin bir milyon biriminde bulunan çözünen madde miktarını belirtmektedir.

ppb kütle esasına göre, çözeltinin bir milyar biriminde bulunan çözünen madde miktarını ifade eder.

mmol/l, bir litre çözeltide bulunan maddenin milimol sayısını göstermektedir.

mek/l, bir litre çözeltide bulunan maddenin milieşdeğer miktarıdır.

Derişim Birimleri Arası Dönüşüm

Hidrojeokimyasal çalışmalarda su analiz sonuçları farklı derişim birimleriyle ifade edilebilmektedir. Laboratuvar analizlerinde iyon derişimleri çoğunlukla mg/l veya ppm olarak raporlanırken, hidrojeokimyasal hesaplamalarda mmol/l ve mek/l birimleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle farklı birimler arasında doğru dönüşüm yapılması, özellikle iyonların karşılaştırılması, iyon dengesi hesaplamaları ve hidrojeokimyasal diyagramların hazırlanması açısından önemlidir (Hem, 1985; Appelo & Postma, 2005). Major iyonların mol ağırlıkları ve yük değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Major iyonların mol ağırlıkları ve yük değerleri

İyon	Mol ağırlığı	Değerliği
Ca^{+2}	40.08	2
Mg^{+2}	24.31	2
Na^{+}	22.99	1
K^{+}	39.10	1
HCO_3^{-}	61.02	1
CO_3^{-2}	60.01	2
Cl^{-}	35.45	1
SO_4^{-2}	96.06	2

mg/l'den mmol/l'ye dönüşüm: Bir iyonun kütle derişiminin molar derişime dönüştürülmesinde iyonun mol ağırlığı (formül ağırlığı) kullanılmaktadır.

$$\text{mmol/l} = \frac{\text{mg/l}}{\text{Mol ağırlığı}}$$

Örneğin, bir su örneğinde Ca^{+2} derişiminin120 mg/l olduğu kabul edilirse, Ca'nın mol ağırlığı 40.08 g/mol olduğundan

$$Ca^{+2} = \frac{120}{40.08} = 2.99 \text{ mmol/l}$$

olarak hesaplanır.

mmol/l'den mek/l'ye dönüşüm: Bir iyonun mmol/l cinsinden derişimi biliniyorsa mek/l değeri, iyonun elektriksel yükünün mutlak değeri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{mek/l} = \text{mmol/l} \times | z |$$

Burada z, iyon yükünü göstermektedir (Tablo 1).

Örneğin:

$$2.99\ \text{mmol/l}\ Ca^{+2} \times 2 = 5.98\ \text{mek/l}$$

120 mg/l Ca^{+2} yaklaşık 2.99 mmol/l veya 5.98 mek/l'ye karşılık gelmektedir.

mg/l'den doğrudan mek/l'ye dönüşüm ise aşağıdaki eşitlikle yapılmaktadır.

$$\text{mg/l} = \text{mek/l} \times \textit{eşdeğer ağırlık}$$

$$\text{eşdeğer ağırlığı} = \frac{\text{mol ağırlığı}}{\text{atom yükü}}$$

Burada eşdeğer ağırlık, mol ağırlığının atom yüküne bölünmesi ile elde edilmektedir.

ppm ile mg/l arasındaki dönüşüm: ppm ile mg/l arasındaki dönüşüm çözeltinin yoğunluğuna bağlıdır.

$$\text{mg/l} = \text{ppm} \times \rho$$

Burada ρ, çözeltinin kg/l cinsinden yoğunluğudur. Suyun yoğunluğu 1 olduğundan, düşük tuzluluğa sahip sularda 1ppm 1 mg/l'dir.

Ancak yüksek tuzluluğa sahip sularda, deniz suyunda ve yoğunluğu 1 kg/l'den farklı sularda ppm ile mg/l'nin doğrudan eşit kabul edilmesi doğru değildir. Yoğunluk etkisi dikkate alınmalıdır.

Analiz Sonuçlarının Kontrolü

Major iyon analizlerinden yararlanarak, analizlerin doğruluğunu değerlendirmek amacı ile hata payı (iyon dengesi, elektronötralite) değerleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile

hesaplanmaktadır. Hata payı hesaplamalarında katyonlardan Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+} ve K^{+} ile anyonlardan HCO_3^{-}, CO_3^{-2}, SO_4^{-2} ve Cl^{-} ün mek/l cinsinden değerleri kullanılmaktadır.

$$\text{Hata payı (\%)} = [(\Sigma\text{katyon} - \Sigma\text{anyon}) / (\Sigma\text{katyon} + \Sigma\text{anyon})] \times 100$$

Literatürde yaygın olarak hata payı değerlerinin ≤%5 olması, katyon ve anyon analizleri arasındaki dengenin iyi olduğunu ve analitik sonuçların yüksek güvenilirlik taşıdığını göstermektedir. Hata payı değerlerinin %6–%10 arasında olması sonuçların genel olarak kabul edilebilir doğruluk düzeyinde olduğunu belirtirken, %10 sınırının aşılması analizlerde olası ölçüm hatalarının, belirlenmemiş iyonların veya örnekleme ve analiz süreçlerinden kaynaklanan belirsizliklerin bulunabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle hata payı değeri hidrojeokimyasal çalışmalarda analiz sonuçlarının kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt olarak kabul edilmektedir (Appelo & Postma, 2005).

Majör İyonların Değerlendirilmesinde Kullanılan Başlıca Diyagramlar

Piper Diyagramı

Piper (1944) tarafından geliştirilen diyagram, hidrojeokimyasal su tiplerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan grafiksel yöntemlerden biridir. Diyagram, katyon ve anyon değerlerinin ayrı ayrı gösterildiği iki üçgen ile bir eşkenar dörtgenden oluşmaktadır. Katyon üçgeninde Ca^{+2}, Mg^{+2} ve Na^{+}+K^{+}; anyon üçgeninde ise Cl^{-}, SO_4^{-2} ve HCO_3^{-}+CO_3^{-2}, iyonları yüzde milieşdeğer (% mek/l) olarak gösterilmektedir. Katyon ve anyon üçgenlerinde belirlenen örnek noktalarının eşkenar dörtgen üzerine iz düşürülmesi ile suların genel hidrojeokimyasal karakteri ortaya konulmaktadır (Şekil 1, Piper, 1944).

Örneğin aşağıda analiz sonucu verilen 1 numaralı örnek Piper diyagramında değerlendirilirse, öncelikler her bir anyonun ve katyonun toplam anyonlar ve toplam katyonlar içerisindeki yüzdesi hesaplanır.

Tablo 2. 1 numaralı örneğe ait analiz sonucu.

	Katyonlar (mek/l)				Anyonlar (mek/l)			
1	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	CO_3^{-2}	HCO_{3^-}	Cl^-	SO_4^{-2}
	0,82	0,07	2,2	1,02	0	3,21	0,22	0,68

1 numaralı örnek için ∑katyonlar=0,82+0,07+2,2+1,02= 4.11 mek/l

% Ca= ((2.2x100) /4.11))= % 53,52

% Mg= ((1.02x100) /4.11))= % 24.82

%Na= ((0.82x100) /4.11))= % 19,95

% K= ((0.07x100) /4.11))= % 1,70

%Na+% K =21,65

1 numaralı örnek için ∑anyonlar=3,21+0,22+0,68= 4.11 mek/l

% HCO_3= ((3,21x100) /4.11))= % 78,04

% Cl= (0,22x100) /4.11))= % 5,36

%SO_4= (0,68x100) /4.11))= % 16,58

% HCO_3+% CO_3 =% 78,04

Hesaplanan % değerleri anyon ve katyon üçgenlerine işaretlenir ve işaretlenen değerlerden her bir iyonun %100 olduğu köşenin karşısına paralel olacak şekilde doğru çizilir. Çizilen üç doğru aynı noktada kesişmelidir. Anyonlar ve katyonlar üçgenlerinde doğruların kesişim noktaları diyagramda ortada

bulunan eşkenar dörtgene taşınır. Eşkenar dörtgen içerisinde su örneğini temsil eden noktanın bulunduğu bölge, suyun baskın iyon bileşimini göstermektedir. Tüm su örneklerinin diyagram üzerine işaretlendiğinde, benzer kimyasal bileşime ve hidrojeokimyasal özelliklere sahip suların genellikle aynı veya birbirine yakın bölgelerde kümelendiği görülmektedir. Bu kümelenme, sular arasındaki hidrojeokimyasal benzerliklerin belirlenmesine ve farklı su gruplarının ayırt edilmesine olanak sağlamaktadır.

Piper diyagramına göre merkezi eşkenar dörtgen altı farklı bölgeye ayrılmıştır:

1. $Ca–HCO_3$ tipi sular: Kalsiyum ve bikarbonat iyonlarının baskın olduğu, genellikle karbonatlı kayaçların çözünmesiyle ilişkili sulardır.

2. Na–Cl tipi sular: Sodyum ve klorür iyonlarının baskın olduğu sulardır. Evaporit çözünmesi, tuzlu sularla karışım ve diğer hidrojeokimyasal süreçlerle ilişkili olabilir.

3. Karışık $Ca–Na–HCO_3$ tipi sular: Kalsiyum ve sodyum iyonlarının birlikte önem kazandığı, bikarbonatın baskın olduğu sulardır. Su–kayaç etkileşimi ve iyon değişimi süreçlerinden etkilenebilir.

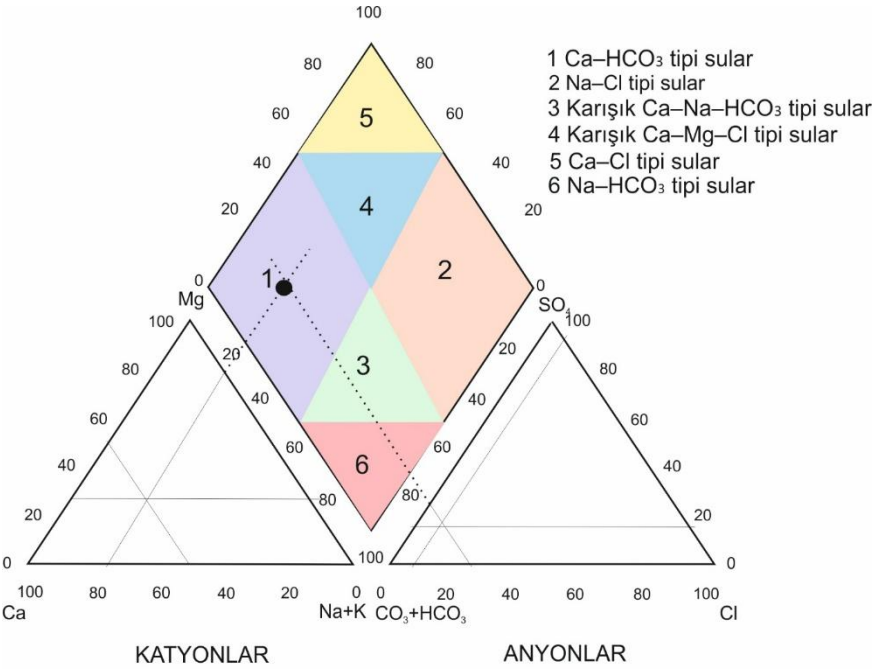
4. Karışık Ca–Mg–Cl tipi sular: Kalsiyum ve magnezyum iyonlarının önemli olduğu, klorürce zenginleşmiş sulardır. Farklı su kütlelerinin karışımı veya mineral çözünmesiyle ilişkili olabilir.

5. Ca–Cl tipi sular: Kalsiyum ve klorür iyonlarının baskın olduğu sulardır. İyon değişimi, tuzlu su karışımı ve çeşitli su–kayaç etkileşimleri sonucunda oluşabilir.

6. $Na–HCO_3$ tipi sular: Sodyum ve bikarbonat iyonlarının baskın olduğu sulardır. Özellikle katyon değişimi ve silikat minerallerinin ayrışmasıyla ilişkili olabilir.

Bu bilgiler ışığında 1 numaralı su örneği Piper diyagramında 1. bölgede yani $CaHCO_3$ 'lı sular grubunda yer almaktadır.

Şekil 1. Piper diyagramı (Piper, 1944).



Schoeller Diyagramı

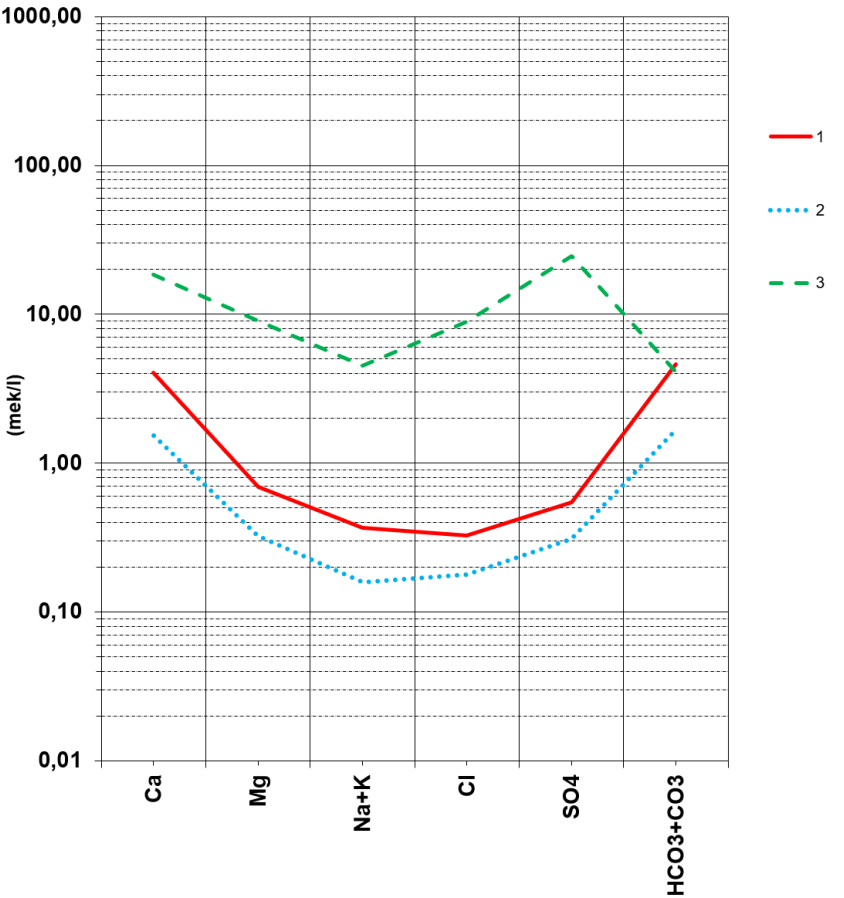
Schoeller diyagramı, majör iyonların mek/l cinsinden konsantrasyonlarının yarı logaritmik bir grafik üzerinde gösterildiği bir diyagramdır. Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}+K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{-2} ve HCO_3^{-}+ CO_3^{-} iyonları yatay eksende yer alır. Düşey eksen logaritmik ölçeklidir. Her iyonun mek/l değeri, kendine ait logaritmik eksende işaretlenerek, elde edilen noktalar çizgilerle birleştirilir ve su örneğine özgü iyonik dağılım profili oluşturulur (Schoeller, 1962, Şahinci, 1991). Schoeller diyagramı yardımı ile farklı su örneklerinin iyon konsantrasyonları doğrudan karşılaştırılabilmektedir. Benzer desene sahip eğriler, suların benzer hidrojeokimyasal özelliklere sahip olabileceğini göstermektedir.

Paralel eğilim gösteren sulardan diyagramın daha üst bölümünde yer alan örnek, daha yüksek toplam iyon konsantrasyonuna, alt bölümünde yer alan örnek ise daha düşük mineralizasyona sahiptir. Alt bölümde yer alan örneklerin beslenme alanına yakın sular olabileceği yorumu yapılabilir ancak bu değerlendirme izotop ve hidrojeolojik veriler ile desteklenmelidir. Schoeller diyagramında SO_4^{-2} konsantrasyonunun diğer majör iyonlara kıyasla belirgin biçimde düşük olması, uygun hidrojeokimyasal koşullar altında sülfat indirgenmesi olasılığına işaret etmektedir. İndirgen ortam koşullarında sülfatın mikrobiyal veya jeokimyasal süreçlerle indirgenmesi sonucunda çözünmüş SO_4^{-2} miktarı azalabilmektedir. Toplam tuz miktarı yüksek olduğu halde klorür ile sodyum değerleri belirgin şekilde farklı ise, bu durumda baz değişiminden söz edilebilmektedir (Şahinci,1991). Örneğin Tablo 3'te verilen analiz sonuçları Schoeller yarılogaritmik diyagramında değerlendirildiğinde, (Şekil 2) 3 numaralı örnek, iyon içeriği açısından 1 ve 2 numaralı örneklerden daha zengindir. Ayrıca 3 numaralı örneğin, 1 ve 2 numaralı örneklere ait eğrilere paralellik göstermemesinden dolayı farklı bir kimyasal kompozisyona sahip olduğu anlaşılmaktadır. 1 ve 2 numaralı örneklerde eğriler birbirine paralel olduğundan iyonların dağılımı benzerdir. Bu da 1 ve 2 numaralı örneklerin aynı türde litolojik birimlerden geldiğini göstermektedir. 1 ve 2 numaralı örneklerin toplam iyon içerikleri karşılaştırıldığında, 1 numaralı örneğin toplam iyon içeriğinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 3. 1, 2 ve 3 numaralı örneklere ait analiz sonuçları

Örnek No	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{-2}	CO_3^{-2}	HCO_3^{-}
	(mek/l)							
1	4,070	0,695	0,25	0,119	0,328	0,548	4,623	0,00
2	1,525	0,325	0,10	0,059	0,178	0,311	1,668	0,00
3	18,557	9,014	4,20	0,309	8,921	24,69	4,108	0,00

Şekil 2. Schoeller diyagramı



Schoeller diyagramı, suyun dolaşımda bulunduğu akifer ortamının litolojik özellikleri hakkında çıkarım yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Yeraltı suyunun kimyasal bileşimi; beslenme alanından itibaren temas ettiği kayaçların mineralojik yapısı, su–kayaç etkileşiminin süresi ve gerçekleşen çözünme–çökelme süreçleri tarafından önemli ölçüde kontrol edilmektedir. Bu nedenle

suda baskın olarak bulunan iyonların ve iyonlar arasındaki ilişkilerin incelenmesi, yeraltı suyunun etkileşimde bulunduğu kayaç ve minerallerin belirlenmesinde önemli bilgiler sağlayabilmektedir.

Örneğin, Ca^{+2} ve HCO_3^- iyonlarının baskın olduğu yeraltı suları, çoğunlukla kalsit içeren karbonatlı kayaçlarla, özellikle kireçtaşlarıyla gerçekleşen çözünme süreçlerinin etkisini yansıtmaktadır. Buna karşılık, Ca^{+2} ile Mg^{+2} iyonlarının da belirgin miktarlarda bulunması, dolomit gibi magnezyum içeren karbonat minerallerinin su kimyası üzerindeki etkisine işaret edebilir. Benzer şekilde, Ca^{+2} ve SO_4^{-2} bakımından zengin sular jips veya anhidrit çözünmesiyle, Na^+ ve Cl^- bakımından zengin sular ise halit çözünmesi ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, suyun kimyasal bileşiminin yalnızca akifer litolojisine bağlı olmadığı; iyon değişimi, karışım, buharlaşma ve antropojenik etkiler gibi diğer hidrojeokimyasal süreçlerden de etkilenebileceği dikkate alınmalıdır.

Sonuçlar

Hidrojeokimyasal değerlendirmelerin güvenilirliği, kimyasal analiz sonuçlarının doğru birimlerle ifade edilmesi ve analiz kalitesinin kontrol edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle mg/l, mmol/l ve mek/l gibi derişim birimleri arasındaki dönüşümlerin doğru yapılması ve majör katyonlar ile anyonlar arasındaki iyon dengesinin kontrol edilmesi önem taşımaktadır. İyon dengesi sonucunda belirlenen hata payı, analiz sonuçlarının güvenilirliğinin ve sonraki hidrojeokimyasal değerlendirmelerde kullanılabilirliğinin ortaya konulmasında önemli bir ölçüttür. Majör iyon verilerinin grafiksel yöntemlerle değerlendirilmesi ise suların hidrojeokimyasal özelliklerinin daha kolay yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Piper diyagramı suların baskın iyon bileşimlerinin ve hidrojeokimyasal su tiplerinin belirlenmesini, benzer özellik gösteren suların gruplandırılmasını ve olası karışım eğilimlerinin

değerlendirilmesini sağlarken; Schoeller diyagramı farklı su örneklerinin iyon dağılımlarının ve mineralizasyon düzeylerinin karşılaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu diyagramların hidrojeolojik, jeolojik ve gerektiğinde izotopik verilerle birlikte değerlendirilmesi, doğal sularda etkili olan süreçlerin daha güvenilir biçimde yorumlanmasını mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, doğal sulardaki majör iyonların belirlenmesi, yalnızca suyun kimyasal bileşiminin tanımlanması ve hidrojeokimyasal su tiplerinin sınıflandırılması açısından değil; suyun kökeninin, su–kayaç etkileşiminin, hidrojeokimyasal evriminin ve farklı kullanım amaçlarına uygunluğunun değerlendirilmesi açısından da temel öneme sahiptir. Majör iyon analizlerinin uygun derişim birimleri, iyon dengesi kontrolleri, iyonlar arası ilişkiler ve hidrojeokimyasal diyagramlar aracılığıyla değerlendirilmesi ve elde edilen bulguların jeolojik verilerle desteklenmesi önem taşımaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım, doğal suların kimyasal bileşimini kontrol eden süreçlerin daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına ve hidrojeokimyasal değerlendirmelerin bilimsel güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Kaynakça

Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). A.A. Balkema Publishers, https://doi.org/10.1201/9781439833544

Drever, J. I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments* (3rd ed.). Prentice Hall.

Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Hem, J. D. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. https://doi.org/10.3133/wsp2254

Piper, AM (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans Am Geophys Union 25*(6):914–928. https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914

Schoeller, H (1962). Les eaux souterraines. Massio et Cie, Paris.

Stumm, W. & Morgan, J. J. (1996*). Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley.

Şahinci, A. (1991). *Doğal Suların Jeokimyası*, Reform Matbaası.

BÖLÜM 3

CUBICAL ROCK UNIT CONSIDERATION FOR OBRUK PLATEAU SINKHOLES

Mehmet Kemal GOKAY [1]

Introduction

Understanding strength behaviours of rock masses as parts of Earth's crust include numerous parameters to be considered. Researches in rock mechanics in different applications have supplied their results for underground space stabilities under 3-Dimensional, 3D, stress-states as well. Actually all the research studies in rock engineering to understand behaviours of rock materials & rock masses can be accepted as inductive works to define behaviours of rock masses at the crust. Since the concept including this field is wide enough which will take long-time to deduct, (impossible to reach full coverage), this methodology sometimes is not practical besides its many advantages in scientific and engineering circumstances. Deduction and inductive concept understanding in engineering systems had also been then evaluated for the rock engineering subjects by Hudson (1992) through his *"interaction*

[1] Prof. Dr., Konya Technical University, Mining Engineering Department, Konya/Turkey, Orcid: 0000-0003-3792-9414, mkgokay@gmail.com

matrix" perception. Similarly, sinkhole development and collapse cases under analysis for different purposes can be considered likewise through the deduction evaluation system. Essentially, engineers can consider a hypothetical representative cubic volume of the earth's crust, for example, in the Konya-Karapinar region, (Turkey), including the Obruk plateau.

This hypothetical volume can also be called a "*cubical rock unit*", CRU, (Gokay, 2025). This style of thinking is fundamentally based on the *"black box*" approach, which has been defined and applied in various studies (Cauer, 1941; Ashby, 1956; Bunge, 1963; Haskel-Ittah, 2023). Machine learning / optimisation, mathematics / geometry, physics / engineering, economics / operations, software / simulation fields of studies have their explanations for a system called as a block box, which have been analysed it's unclear, (uncertain), internal functions through the relations among its input & output signals, (data). This is not like the representative elementary volume, (REV), described in the theory of composite materials, or statistical (stochastic) volume element, (SVE), in finite element analysis. The cubical rock unit, CRU, consideration handled in this study covers the evaluations of rock mass behaviours; i) by describing basic volumetric characteristics of rock mass itself which is defined for a hypothetical cubical rock volume, *[rock formation progress and differentiations, physical properties mainly in rock mechanics context, rock material/mass behaviour differentiations, included planes (discontinuities; fissures, joints, fractures etc.) and volumes (voids, pores, caves, etc.), chemical reactions cause alterations in the rock mass, etc.]*, ii) by defining the influences of the external energy sources (mainly in the form of 3D stresses).

Due to the numerous uncertain characteristics and undefined rock behaviours (3D stress-strain relations) yet, hypothetical CRU has been assumed to have only the provided "internal facts and external influences" for its behaviours, means that other factors are not concerning in the defined analysis to avoid complexities of real-

world conditions. Dimensions of the assumed CRU can be big enough to cover the deepest sinkholes and their bottom layers of rocks for the Konya-Karapinar region. According to the planned analyses, different sizes of hypothetical CRU and their numbers can be selected at different locations and depths of the Earth's crust for further evaluation (Fig. 1). These volumes include basically Earth's matter in solid, liquid and gas forms, and they are dynamically interactive through the geological time scale under their internal interactions, (chemical, physical, radioactivity, etc. inter-relations), and the external influences, (3D stresses-strains, heat sources, lights, sounds, effects of magnetism, electrons, gravitational forces from Earth and other extraterrestrial sources, earthquake waves, etc.). Evaluation of the selected volumes of CRU content differentiations at Konya-Karapinar region due to the external mass (solid, liquids and gasses) addition and internal mass (solid, liquid, and gasses) lost in geological time-scale lead to understand current morphology

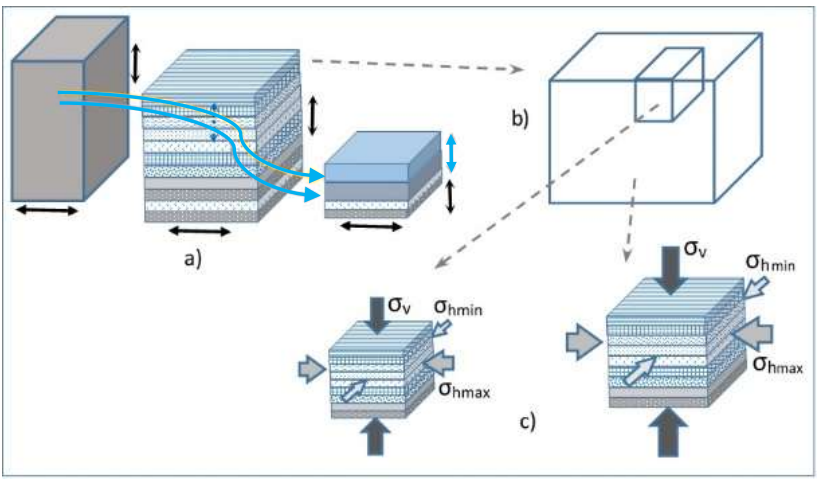


Figure 1. Hypothetical "cubical rock unit, CRU" that might be considered in different locations (high elevated Taurus region to low level Tuzgolu salt lake through the Konya & Karapinar basins and the Obruk plateau) in different sizes.

conditions and origin of the rock masses at the region. Thus, main considerations under the analyses in this study here was then selected to include for the sinkhole occurrence areas at Konya-Karapinar region, (especially at the Obruk plateau). This region has mainly Konya basin, Karapinar basin and Obruk plateau, and its tectonic evaluation is interconnected to the displacement rates of Anatolia and its location at Central Anatolia. Magmatic, metamorphic and sedimentary rock mass formations in this region, (especially the formation of horizontally layered lacustrine sedimentary rock masses), have directly been influenced by climatic & tectonic conditions through geological times, and they shape the recent morphological conditions in the region. In this lacustrine region, as expected, the groundwater flow directions will be from high to low levels. Figure 1a presents an example of this flow and the 3D positional, (vertical height and horizontal positional changes due to tectonic movement, sedimentation, subsidence, etc.), differentiations for the Konya-Karapinar region. Stratigraphic graphics (logs), presented by Törk, et al. (2009 & 2013) and Ulu (2009a & 2009b), reported the rock mass formations (with names & geological eras-periods) located in the region. The existing data on solids (all rock masses), liquids (groundwater and saline waters with varying chemical compositions), and gases (CO_2 and other inorganic & organic gases) in the region, combined with specific factors such as; rock layers at different locations, groundwater levels, natural gases circulating in rock masses (especially dissolved ones in groundwater), and climatic-socio economic environmental changes over time, have created a general knowledge base to initiate statistical assessments for predicting types of natural disasters, (i.e. sinkhole formation, floods, etc.), and their risk factors. Thus, sinkhole locations, tectonic basic features of Central Anatolia and directions of in-situ 3D stresses were evaluated in this study together for possible indications which could be referred to sinkhole collapses in addition to the available earlier statistical studies.

Displacements at Konya-Karapinar region

Tectonic features of the Konya-Karapinar region could be acquired through uplift and downward displacement features of Anatolia in geological time. Bartol & Govers, (2014) wrote that the elevation of the Central Anatolian Plateau has been increasing since approximately 8 Ma (since the Tortonian stage in the late Miocene epoch); this increase is greater than 1 km. According to the authors, no significant shortening of the Earth's crust occurred during this uplift. The authors also state that widespread volcanic activity began before this uplift process (~14-9 Ma). Elevation differences presented by these authors show the cross-section curves in a graph which is extended from the Mediterranean sea bottom point near East of Cyprus to the Black sea bottom point at North of Inobolu (Kastamonu, Turkey). The curves here representing; *"model predicted present-day elevation*" for Bartol & Govers's "*the thin crust model*" and "*the thick crust model*", (determined through "*a coupled thermal-flexural model of the lithosphere"*), together with "*observed present-day elevation*". The cross-section curve presented specially for the observed present-day elevations has 3 elevated regions namely; Taurides, Central Anatolia and Pontides. When the uplift elevations of these 3 regions are considered, the complexity of the induced 3D stress-states and consequences of them as tectonic fault zones, earthquakes, etc. might only be presumed logically in limited levels. It is also normal to expect displacements in lateral directions while progressing this uplift movement.

Moreover, Andersen, et al. (2024), wrote that, according to measurements made using GNSS/INSAR methods, the Konya basin in Central Anatolia is undergoing rapid subsidence within a rising orogenic plateau, *(GNSS: Global Navigation Satellite System, InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar)*. These authors also showed "*the active formation of the Konya basin may be accounted for by the descent of a mantle lithospheric drip causing local circular-*

shaped surface subsidence". The main mantle characteristics of uplift and downward displacements and resulting tectonic processes actually guides the influences on the main in-situ 3D stress conditions at Konya-Karapinar region besides the other vertical and horizontal stress effects originated on the basis of other continental-plate and tectonic features influencing Anatolia.

Kutoglu, et al. (2026), presented displacements determined through satellite based remote measuring systems (GNSS & InSAR) revealing the horizontal displacements in Anatolia and they defined the Central Anatolian Transition Zone. Similarly, ascending & descending (vertical movement) velocities determined for Anatolia were presented by Weiss, et al. (2020) as well. These authors provided GNSS velocity vectors acquired for Anatolia, presented by England, et al. (2016) and Nocquet (2012). Then Weiss, et al. (2020) provided vertical subsidence rate distributions for Konya closed basin, (Bayari, et al. 2009a). Weiss, et al. (2020) pointed some areas which had subsidence rates ≥50 mm/year through Sentinel-1, INSAR and GNSS data, *(Sentinel-1: The first of the Copernicus Programme satellite constellations for Earth observation operated by the European Space Agency, ESA)*. These displacement features are combined influences of all natural forces in the Konya-Karapinar region. Actually, there is no place on/in Earth's crust where there is no displacement, static. Thus, in-situ 3D vertical & horizontal stress distributions at Konya-Karapinar region located at the Central Anatolia, have produced "*integrated relative motion*" which was presented by Nocquet, (2012).

Tectonic documentation of these activities have been studied by different researchers to explain their relations and earthquake activities for Anatolia. Earth's ground surface displacements determined through the GNSS indicates continuous dynamic positioning of the continental plates movements. It seems to be slow in motion but when the time is considered in geological time scale, displacements have been added to reach several kilometers, km. For

instance; 24 mm/yr displacement level, (Nocquet, 2012), measured from the North Anatolian Fault, (NAF) can produce total displacements, (if the rate of deformation at NAF is assumed stable & continuous in geological times), as follows: 24 m in 1000 yr; 240 m in 10 Ka *(from the beginning of the Holocene Epoch)*; 4.8 km in 200 Ka; 62.40 km in 2.6 Ma *(from the beginning of the Quaternary Period)*. It is also natural to think that this displacement rate most probably alternates in geological times along the fault zone. In fact, according to the study by Sengor et al. (2005), the origin of the North Anatolian Fault, (NAF), is reported to be approximately 13-11 Ma ago in Eastern Anatolia and it has propagated Westward. The authors also stated that the NAF reached the Sea of Marmara as early as 200 Ka ago. While some of the deformation differences measured from the surface of the Earth's crust are due to local rock mechanics conditions like; local faults, fracture zones, slope failures, subsidence, etc. Actually, the main displacements are generally related to gravity, mantle and tectonics effects. These displacements show that the Earth's crust is under influences of varying 3D stresses from the surface to the depths of the crust due to; Earth's gravity, gravitational forces from different galactic masses, continental-drift related forces (mantle source characteristics), centrifugal forces caused by the Earth's rotation, etc. That means, rock masses at different locations and depths of the Earth's crust could have moved with different displacement rates. Moreover, considering the positions of the rock masses which have been in continuous change at the Earth's crust, have further been influenced by new rock mass formations (magmatic, metamorphic, sedimentary) in geological eras. Thus, the forces affecting the rock masses at the Earth's crust change over time together with these rocks' strength values. Because the rock masses strength have tendency to differentiate in time due to stable and/or variable 3D stress-states influences, and alterations occurred in their structural features. Thus, interpreting the in-situ 3D stresses and the strengths of the rocks at any given Earth's crust

location (for example, the Konya-Karapinar region) is a much more complex engineering process than it appears. Through the literature; when an engineer is considering the dynamic processes for the Konya closed basin; the effects causing the deformation rates were indicated by researchers, (supplying displacement rates in different horizontal & vertical directions), along or across through the main fault zones in Anatolia. In addition, the rotational movement of Anatolia as it moves westward will help us better understand the situation of the Konya-Karapinar region, which is located in the central inner part of this rotational movement.

When this explanation is combined with; the uplift information which was processes of the Earth's crust at the beginning of the Neogene period, followed by the subduction processes of the Earth's crust starting from the Miocene epoch (in the Neogene period); the increase and decrease in paleolake depth in Central Anatolia (Konya-Karaman region); lacustrine conditions and the sedimentations of rock layers including the products of volcanic activities; the current complexity of the rock masses at Konya, Karaman and Karapinar regions might be visualised. Considering a cross-sectional graph from the Taurus Mountains to Tuzgolu salt lake along the Konya closed basin, (oriented in S-N direction), the Konya-Karapinar region (Central Anatolia) can be generally considered as shown in Fig. 1a with its groundwater flowing direction. It shows (in illustrative form) that the elevations & horizontal positions of the entire region change over time according to mentioned uplift movement, and the Central Anatolia (including Konya-Karapinar region) related local mantle source subsidence effects. Additionally, the lacustrine closed lake climate conditions of the Konya closed basin have changed over geological time and that, depending on these differentiations, the boundaries and thicknesses of sedimentary rock formations deposited in the basin can logically differ in different locations of this paleolake. In fact, rock fracturing, faulting, rock weakness zones, dissolution of certain rock types in water,

precipitation of dissolved solid materials (rocks) in water to form new form & type of rock masses, cavities, voids that arise during these formations, accumulation and compaction of sediments, etc. have affected the Konya-Karapinar region with local differentiations. It is undeniable that the properties (chemical, physical, rock mechanics behaviour) of the solidified rock masses formed during this process differ; this is a natural consequence. In addition, it is also an expected physico-chemical consequence that the effects of surface water and groundwater, gases formed within the rocks due to chemical interactions, and gases developing and seeping into the rocks due to volcanic interactions affect the rock masses and groundwater properties. Therefore, the rock mass layers at Konya-Karapinar region which include Konya basin, Karapinar basin and Obruk Plateau mainly have their dynamic rock forming and tectonic movement influences which definitely direct their rock mechanics related behaviours of these rock masses (in their sinkhole development) in the region.

Sinkholes at Konya-Karapinar region

Sinkholes known through recorded history of the Konya-Karapinar region and the new ones developed in the last 2-3 decades force the engineers to define the available data and evaluate the main reasons for their occurrence rate increase. Information related to paleolake of Konya closed basin's and current Konya-Karapinar region's rock masses comprises field reports and analysis supplied through; a) geological studies (karstic characterisation of the region specially the Obruk plateau; behaviours of soluble rock masses including limestone layers; interacting groundwater holding different chemical contents with changing dissolved gasses related to magmatism, volcanism and organic basis), b) statistical analysis to supply sinkhole susceptibility and their risk of occurrences through the data sets include; (sinkhole numbers, karst processes, hydrogeology, groundwater discharge rate increase due to irrigation

related wells, sinkhole dimensions, local faults' locations, etc.). Then, rock mechanics related in-situ 3D stress-state measurements and obtaining the rock masses' strength values in the sinkhole areas eventually became important for the Konya-Karapinar region as well.

Subsidence occurred due to the overburden rock mass failures of underground cavities could be in two types. Gradually slow caving of the overburden rocks is one type and the overburden rock masses caving properties direct the downward sagging. The angle of concave volume is even dependent on the overburden rock types. The second type of the sinkhole happens by collapsing the overburden rock layers into the open spaces of cavities one by one after they have lost their resistance to the applied induced 3D stresses. The caving related ground surface disturbances (associated hazards) could only be estimated through rock engineering based 3D induced stress analyses.

Combined effects of these stresses surrounding the sinkholes and strength characteristics of the rock mass layers have been used to define the sagging/collapsing actions occurring at particular sinkholes. In this consideration several studies, (i.e. Van Den Eeckhaut, et al. 2007; Edmonds, 2008; Gokay 2010 & 2011; Hanna, et al. 2011; Parise, 2012; Zimbardo, et al. 2018; etc.), supplied information about the underground space collapses and subsidence effects through underground spaces and mining galleries which have direct similarities with the roof collapse of chimney-type sinkholes. Influences of in-situ 3D stresses on chimney-type sinkhole development, (a hypothetical sinkhole case), like the sinkhole development circumstances in layered sedimentary rock masses of Konya-Karapinar region, for instance, were evaluated with numerical analysis through proposed considerations, (Gokay & Mesutoglu, 2025). In addition, the study performed by Karadeniz, (2019) at Kazan (Ankara, Turkey) included "*Formation Micro Imager, (FMI), logs*", and "*Leak-off tests*" results to define test

location related in-situ horizontal stress values (σ_{hmax}, σ_{hmin}) and directions. The test results (near the Konya-Karapinar region) detected for Kazan are significant because it demonstrates a specific measurement result of σ_{hmax} & σ_{hmin} which are accessible through a web-based literature search. Furthermore, the fact that studies determining field stress levels are found far from the Obruk Plateau, that similar tests should now be considered for the Konya-Karapinar region. The absence of these test results for the Obruk Plateau, prevents numerical studies which could be conducted according to measured in-situ 3D stresses.

The rock masses additionally show their dissolution abilities through the available groundwater circulation regions that are most purposely targeted to explain cavity & cave networks, etc. To understand the causes and development processes of micro-macro cavities in underground rock masses at the Konya-Karapinar region, the concept of CRU has been considered in order to comprehend the karst rock layers and their surroundings, (through stratigraphic records, logs), and the groundwater circulation (through charging/discharging features), (Fig. 1). Since the Konya closed basin is one of the plain agricultural regions in Turkey, its groundwater levels in different parts of it recorded and the available data were supplied groundwater circulation towards the Tuzgolu salt lake by different researchers (like; Senturk, 1969; Gocmez, et al. 2000; Bozyigit & Tapur, 2009; Bayari, at al. 2009b; Yavuz, 2010) and DSI (State Hydraulic Works, Turkey) reports.

Spatial analyses of these data provided in different evaluations by several researchers, (Ozdemir, 2015 & 2016; Sari, et al. 2021; Dursun, 2022; Akinci, 2023, Orhan, et al. 2023; Gokkaya, et al. 2026; etc.) were presented if there are any statistical variations which could widen the considerations in the risk analysis of sinkholes for Konya-Karapinar region. The next step in sinkhole development analysis for the Konya-Karapinar region should include coverage of the information for the regional in-situ 3D stress-state conditions

which have also been started to be handled through the studies conducted by different researchers. Then, numerical analyses used these data for their main inputs to provide induced 3D stress-strain states that can be performed through available rock strength behaviour approaches in rock mechanics content. These results are expected to open new research fields for Konya-Karapinar region include; i) supplying different outputs through the performed 3D stress-strain analyses, ii) in-situ measurement projects to validate these outputs for the selected sinkhole locations in the region. The last phases of the sinkhole related considerations include generally, how to remediate the formed sinkhole volume to secure its volumetric masses and surface areas for further requirements of local socio-economic conditions in different manners.

In-situ stress-state influences on underground spaces

Different studies & projects have included in-situ 3D stress-state measurements at different depth levels, (Fig. 2), to capture information, *[about: tectonic features of the rock masses; main fault zone displacements; petroleum industry related deep drillhole based oil reservoir conditions; large scale engineering structure (like; dams, bridges, skyscrapers, underground storage caverns, etc.) stability conditions, etc.], and* relate them in engineering decision works. There is, disappointingly, no such activity documents for the Konya-Karapinar region which could openly be accessed. However, 3D stress direction analyses performed by researchers for the main faults in the Central Anatolia, (mainly at the Konya-Karapinar region) can be used to understand the stress conditions around those faults and nearby rock masses. Actually, the importance of the in-situ 3D stress-state has already been mentioned for rock mechanics based stability analyses for underground spaces including cavities, caves and sinkholes. Additionally, in order to comprehend underground circulations of liquids & gasses, in-situ 3D stress-states should also be estimated to combine their collective influences on the available

natural underground spaces, (i.e. cavities, voids, caves, passageways, etc.) and man-made spaces, (mine openings, galleries, tunnels, etc.). Lin, (2019), for instance, stated that for underground conditions in-situ 3D stress-state plays a crucial role in planning, design, ground support, well drilling, and well stability control. Related subjects in rock mechanics and recommended test methods have been supplied through "International Society of Rock Mechanics, ISRM, suggested test methods", (Hudson, et al. 2003; Sjöberg, et al. 2003; Haimson, et al. 2003; Christiansson & Hudson, 2003; Stephansson & Zang, 2014). Like the authors, Amadei & Stephansson, (1997), and Lin, (2019), pointed out 3D stress-states are also under consideration in underground mining projects. Lin also noted the wide range of important impacts of in-situ 3D stress-state determination on mining and petroleum engineering includes; i) Mining engineering activities: *(Stability analysis and failure prevention of underground opening, Design of opening shape and geometry, Determination of excavation methods sequence and orientation, Design of mine layouts, Prediction and prevention of rock burst, Selection of support system)*; ii) Petroleum engineering activities: *(Forecasting and control of wellbore stability, Well planning, Improvement of well drilling safety, Selection of casing, Management of reservoir production)*.

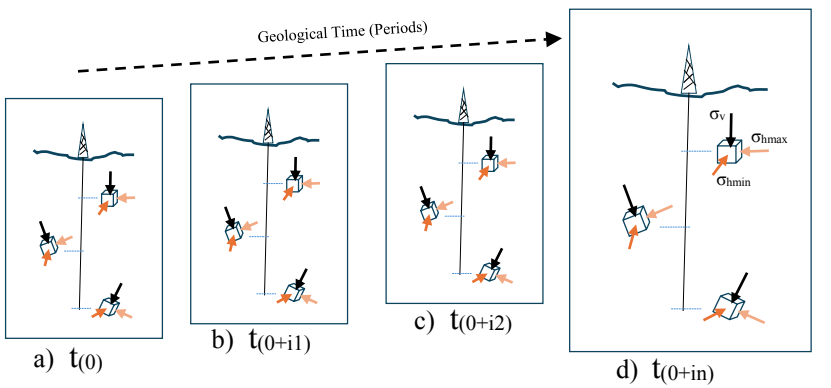


Figure 2. In-situ 3D stresses at underground rock masses could logically be differentiating in depth and time.

When the 3D stress-state around the existing faults near the Obruk plateau are considered, then the study starts with the understanding general movements / deformations of the Central Anatolia, due to the influences of tectonic activities on a larger scale affecting Anatolia, Mediterranean Sea, Africa, Middle East etc., (McClusky, et al. 2000; Heidbach, et al. 2010; Nocquet, 2012; Weiss, et al. 2020; Elliott, et al. 2026). The next step is estimation of the local results of these continental-drifts and mantle uplift & subsidence based 3D stress transitions results which are; volcanic activities, Central Anatolia upwarding & descending types of tectonic behaviours, faultings, (normal, reverse, trust, and strike-slip etc.), through the geological eras. Since there is no in-situ 3D stress-state measurement reported in open-access literatures for the Obruk plateau, researchers and engineers have prefered to follow the methodologies to estimate 3D stress directions through the fault planes unless there were studies to measure them in ISRM procedures.

In their study Eren, et al. (2025) wrote about Central Anatolia's Neogene-Quaternary horst-graben structures. They defined; first basin filled with Miocene-Pliocene sediments shaped mainly by WNW-ESE trending horst-graben structures (which is younger); and the second basin filled with Pliocene-Quaternary sediments shaped with NE-SW trending graben-horst structure, (which is older than the first structure mentioned). The other faults observed at the surface rock outcrops are the normal faults. Due to the multi directional characteristics of the faults the authors mentioned "*multidirectional crustal extension*" at the area, their kinematic data based evaluation also supplied that in-situ 3D stress components around faults are; $\sigma_1=\sigma_v$ (almost vertical), and σ_2, σ_3 are the horizontal stresses, (σ_{hmax}, σ_{hmin}). As already defined by different researchers, the types of faults and their main 3D stress related relations causing them to form were supplied on CRU.

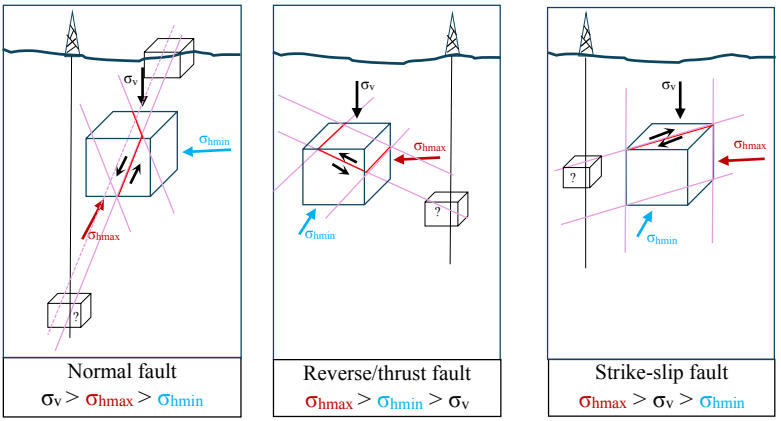


Figure 3. Sketched illustration of rock mass fault types, differentiating with the amounts of vertical, (σ_v) and horizontal (σ_{hmax} and σ_{hmin}) stresses.

This information was then used for the information handovers visualized in Fig. 3. The normal faults and strike-slip faults around the Obruk plateau and their kinematic evaluation were supplied by Eren, et al. (2025). Their results included the regional 3D stress directions around the faults. Information was provided also about the displacement values, (vertical & horizontal), for Central Anatolia detected through the satellite based remote sensing methodologies, *(GPS, GNSS, InSAR, and Sentinel-1).* These values indicated Westward displacements and changes differentiating the direction of this movement (turning from NW to SW) along Central Anatolia, (Heidbach, et al. 2010; Elliott, et al. 2026). At this point the directions & quantities determined to describe in-situ 3D stresses and extensions at the major fault systems around the Obruk plateau are required to be mentioned. Eren, et al. (2025) provided some of these information through their field results including strike-rose diagrams of the fracture measurements. Selected results of their kinematic analyses can then briefly be abridged through the following format; *[Name of the faults, Fault trending, (Fault extension), Dip/dip direction of σ_1, Dip/dip direction of σ_2 (=σ_{hmax}),*

Dip/dip direction of σ_3 (=σ_{hmin})] for the faults. For instance, at the North of the Obruk plateau there is Sekizli fault and the related data are then; *[Sekizli fault, NW-SE trending, (NE-SW; NW-SE extensions), σ_1 : 77/265, σ_2: 11/123, σ_3 : 08/031]*. Similar results for Seyithaci fault at the East of the Obruk plateau were; *[Seyithaci fault, NNE trending, (WNW-ESE extensions), σ_1 : 85/286, σ_2: 00/193, σ_3 : 05/102];* These are the examples among the given 12 faults' data by the authors. They also presented their kinematic analyses' results for the "*all faults in genera*l" with the following information; *[All the faults in general, younger faults NE-SW trending, older faults WNW-ESE trending, (firstly NNE-SSW then NW-SE extensions), σ_1 : vertical, σ_2 : 04/126, σ_3 : 00/126]*.

When vertically deepening natural underground spaces are considered for their stability evaluation, shapes of underground spaces in cylindrical or similar geometries have been taken into analyses. These volumetric shapes could be similar to vertical (almost vertical) rise or rinse (shaft) in mines. The volumes associated with these underground mine spaces can also be developed as deformed cylindrical shaped excavations (like chimney-type cave geometries). Additionally, caving of immediate weak & fractured overburden rock zones have possibly caused further cylindrical weakrock zones in original overburden rock masses, *[if the base layer related underground spaces, (cavities, mine stope etc.) is removed away due to mining excavations or water dissolution activities]*, (i.e. Sahu & Lokhande, 2015). Chimney-type sinkhole development can also be considered in similar underground space categories. When the cylindrical underground natural spaces can react to the ground surface by collapsing their top cap layers, they look like cylindrical large diameter holes (sinkholes) in the ground. Stability of these spaces; chimney-type sinkholes, mine shafts, drill holes in the petroleum industry, should then be evaluated in the similar manners applied to the underground spaces in mining & petroleum engineering through rock mechanics approaches. In

general, drill hole, well, stabilities for deep oil extraction, the breakout begins and fracture initiation and propagation directions play an important role for the stabilities of wells. In-situ 3D stress environments may cause similar rock breakages around the chimney-type sinkholes. For the cases at the Obruk plateau, considered depth from the ground surface are around 60-150 m, (deepest sinkhole depth was reported as 134 m, while the values given for long-axis of the observed sinkholes were ranging in 1 to 588 m at Konya-Karapinar region, Eren, et al. 2024). Sinkhole development in Central Anatolia seems to have a long history through the geological periods. It is clear that the sinkholes observed around the Obruk plateau, their local 3D stress conditions, their geometric 3D dimensions, the thickness and depth of the rock layers containing the sinkholes, the rock mechanics properties of these rock layers, etc., should then be researched by considering them all together. In fact, 3D-volumetric shapes & dimensions of caves or sinkholes have become a subject of interest for research in recent years. These parameters can also be obtained using remote sensing based surveying systems (i.e. Fabbri, et al. 2017). However, accessing the cavities of sinkholes that are still forming and do not yet have an entrance, or the voids of underground cave systems that have not yet been discovered, makes the use of some surveying techniques impossible. However, the use of geophysical remote sensing measurement methods, *(seismic, Earth-resistivity, magnetic susceptibility, microgravity, etc.)*, to determine the 3D extensions (boundaries) of inaccessible underground cavities and the evaluation of measurement results according to different engineering objectives have constituted the subject of some research, (Cardarelli, et al. 2006; Panek, et al. 2010; Putiska, et al. 2012; Kaufmann, 2014; Gokay & Dogan, 2017; KH, 2021; Yesilmaden, et al. 2021; Liu, et al. 2023; Funk, et al. 2024; Sancar, et al. 2025).

Geometries of sinkholes and their elongations & alignments

Underground openings and their stability and collapse conditions have long been studied for mining and civil engineering projects through research in rock mechanics. Underground mining methods based on caving mining methods, (i.e. sublevel caving method and block caving method), actually lead to the same results as sinkholes on the ground surface. Rock fracturing and roof collapse in mine galleries and similar underground spaces can also cause serious subsidence effects on the ground surface (depending on the depth of these underground cavities). Subsidence is an important area of research in mining and tunnelling operations due to its effects on natural habitats and environments. Because subsidence can have serious consequences for societies, it has become a specialized research topic for different rock formations. Subsidence has been among the dangerous and difficult-to-solve issues for mining engineers for years, as it causes the collapse of houses, roads, apartments, and infrastructures in areas above mines. The aim in researching this issue is to find ways to reduce its effects through the parameters affecting subsidence and, if possible, to minimize the damage caused.

For instance; in coal mining operations, conducted under horizontally layered rock masses, the destructive effect of the mine on the surface is possibly reduced (in certain limits) by adjusting the direction and speed of excavation in the excavation of the coal production panels. Interestingly, Bell (1986) presented gallery collapse images relating to an abandoned shallow coal mine; these images were revealed during open-pit mining operations carried out in later years to extract the remaining coal in the abandoned mine. Those collapsed gallery images are also illustrating caving progresses of the chimney-type failure zones of roof layers. Considering that this collapse effect, occurring at a very shallow depth, develops gradually at greater depths, the resulting chimney-

type sinkhole collapses can be better understood. The image of the collapsed underground coal mine spaces given by Bell (1986) clearly presents that collapsing of the abandoned mine openings, galleries, could have formed cylindrical chimney-type caving forms and continued to move upward in different caving variations according to the overburden rock mass properties. There are numerous examples supplying field measurements & evaluation, numerical analyses [in 2 Dimensional, (2D), and 3D models], for the stable and unstable underground spaces including mine galleries, road & train tunnels, metro tunnels and underground metro stations. Underground space failures have different reasoning for their instability cases and they are analysed and evaluated in different circumstances. For instance, one of the studies of them is performed by Bandis through UDEC, *(the software for Distinct-Element Modelling of Jointed and Blocky Materials in 2D, Itasca, 2026a)*, and 3DEC, *(Distinct-Element Modelling of Jointed and Blocky Materials in 3D, Itasca, 2026b)*, "*including inappropriate*–design–in–the–circumstances", (Barton, 2016). This example given by Barton presents the surface destruction of roof collapse at a certain part of the shallow transportation tunnel. When the tunnels cause problems by supplying large surface disturbance along its route under urban areas, the casualties may possibly be expected as well. Thus, working on the stability of underground areas and conducting retrospective analysis, backanalysis, of collapsed structures are crucial steps for responsible engineers and municipal offices in urban areas to develop preventative measures in case such events occur. Underground mine space roof collapses might sometimes have progressed uncontrollable cases like happened at the collapse of potash mine openings at 3rd Berezniki potash mine, (Verkhnekamsky potash deposit, Ural, Russia), in 1986. This mine accident included, flooding of the karstic caves over the mine, dissolutions of country rocks, explosion of the compressed gas & groundwater mixtures, formation of surface hole (sinkhole) caused due to collapse of

mainly; some potash mine openings and karstik rock mass cavities. This mine accident resulting in a sinkhole on the ground surface here was a combination of occurrences of processions, (Andrejchuk, 2002).

Circular, elliptical, or any other types of contact cross-section shapes of sinkholes actually have their evidence related to their volumetric shapes, elongations and alignments, (i.e. aerial photo of sinkholes at the Obruk plateau; Gunay, et al. 2011). When the disturbed 3D geometric features of sinkholes are under consideration, their overall cylindrical (or inverted truncated cone) shapes and irregularities at their inner peripheries have rock engineering hints for further analyses. Induced 3D stress-states around sinkholes, (sinkhole peripheries), resulted in fracture initiation and propagation, creating damage zones around them. Therefore, recording the geometric dimensions of sinkholes in predetermined time-periods has possibly provided the directions of these 3D stresses as well. At this point, importances of the recorded long-axis and short-axis values of sinkholes at different times in the Konya-Karapinar region become obvious. These axes can be recorded at any 3D peripheral positions of the sinkholes. But without proper instruments, (like the surveying systems using drones), records have supplied only for the ground surface contact dimensions (as the length of axes and their depths), (Bayari, et al. 2009b; Dogan & Yılmaz, 2011; Eren, et al. 2024; Parlar, 2025; Gokkaya, et al. 2026; etc.). Sinkhole records attained to the date have their time-base information if the records include; geometric features of the sinkholes, (depths, long & short axis length, etc.), groundwater level, chemical analysis results for the collected groundwater samples from the sinkholes, etc.).

In particular, with regard to sinkholes, data providing their long-axis lengths and the orientation of these axes are important because they are used by researchers to assess the in-situ 3D stress directions around the sinkholes. In addition, when the alignment of

the deformed ground surface zones is examined from the perspective of rock engineering principles, it has been presented that alignment of the sinkholes (or weakness zones) yield important results regarding the in-situ 3D stress directions. At this point the studies performed to determine alignment of surface morphological features are also required to be mentioned here (i.e. Buyuksarac, 2007; McCoy, et al. 2008). For instance, the study performed by Upchurch & Littlefield, (1988), summarised the sinkhole developments at Hillsborough County in Florida, US. They wrote that their study area included 179 sinkholes formed between 1964-1985. They noted these sinkhole locations, (mostly reported in urban or suburban areas), "*coincide with the lineament-controlled areas of ancient karst"*. Similarly, sinkholes at Breckenridge, Grayson, and Hardin Counties, (Kentucky, US), had been studied by Florea, (2005), through GIS-based data to predict coincidence between sinkholes and geological structure. The author reported that there is correlation between alignments of the sinkholes and portions of the Rough River Fault Zone. Another statement supplied in the same paper related to the sinkhole locations is interesting as well. Florea noted that some sinkholes are aligned with previously identified faults, but some faults do not have sinkholes on them. According to the author the alignments of sinkholes 'suggest currently unknown faults or fracture traces".

Likewise Huang, (2007), performed GIS, (Geographic information system), assisted study for Island of Barbados, presented that; i) sinkhole long-axis, ii) cluster elongation direction, iii) sinkhole alignment, iv) karst lineament. The author wrote *"all have a tendency to a Northeast alignment*" which coincided and supported the idea that "*underlying coral rock fracture and conduits have a Northeast orientation*". In other work, Brinkmann, et al. (2008), studied the sinkholes in Tampa Bay area in Florida, US, and stated that they performed morphometric analysis by using the data included sinkhole related; shape, circularity index, perimeter, area,

length, width, and orientation of long axes. In their paper they evaluated orientation of sinkholes' long axes through their azimuth angles. They divided the collected sinkhole orientation values into two groups which have Group1: 1º-89º and Group 2: 90º-180º of orientations. According to these "*bimodal distribution*", bimodal peaks for each group were determined approximately as 30° and 140°. They pointed out that these two peak orientation values indicated "*distinct joint control in the orientation of the long-axis of the sinkholes*".

In this content, Closson & Karaki, (2009) also pointed out that "the Jordan Dead Sea transform fault zones is NNE trending at a continental level. The direction N24E of the sinkholes lineament is compatible with one of the main structural directions in the Southern Dead Sea area". Another study performed by Ozturk, et al. (2018), presented structural controls on distribution of dolins detected on Mount Anamas, at Taurus mountains region, (Turkey). They determined doline related data (elevation and geometric values) through topographic maps. They supplied the rose-diagrams obtained from the azimuth values of these dolines' elongations. They wrote that the main elongation direction for them was NW-SE. The authors stated that "the alignment of doline long-axis orientations under the influence of lateral strike-slip and normal faults is clear". Correspondingly, Lipar, et al. (2019), studied on the Stockyard Gully Cave System, at 250 km North of Perth, Australia. They wrote that "the possible causes of linearity in the Stockyard Gully Cave System to be mainly fissure control" and "mostly oriented NNW-SSE".

At this point, a study performed by Menezes, et al. (2020) should be referred to fracture patterns around sinkholes in carbonate platforms influencing petrophysical properties of collapse structures at the studied sinkhole area of Potiguar basin (Brazil). The authors mentioned the influences of existing discontinuities, (originated on the basis of regional tectonic activities), on the locations (alignments) of the sinkholes in some areas. Menezes, et al. (2020)

focused on collapsed sinkholes structures in carbonate rocks and their relation to the *"preexisting and syn-collapse fractures"*. They also pointed out the importance of the sinkhole effects in carbonate rock masses by referring to the word of Mazzullo, (2004); "*more than 50 % of all oil and gas production in the World comes from carbonate rocks"*.

The study performed by Coskuner, et al. (2021), included the results reported through automatic lineation maps of the Konya-Karapinar region. This map-based evaluation was performed according to the existing lineaments, faults and sinkholes. They noted that "*the lineations*" were in "*wide variety in orientation*", but they were detected most dominantly in the orientations of; NNW-SSE and WNW-ESE. They pointed out that *"most of the obtained lineations are parallel to the faults, but some of them are perpendicular to them*". In more recently, Coskuner & Eren, (2025) provided the lineaments especially at the Belkuyu sinkhole area (South of Konya city, Turkey). They extracted lineaments automatically through the hillshade images. The information provided by them presented a "*regional scale density map*" including automatically detected *"lineaments and a rose-diagram"* to present their orientations. The authors concluded that; the noticed *"lineaments predominantly trend in a NE–SW direction"*, and the observed long-axis orientation of the Belkuyu sinkhole similarly in NE-SW direction "*indicate that there is a connection between the long-axis of the sinkhole and the regional scale lineations".* Similar work was supplied by Parlar, et al. (2021) for the area around Meyil, Yirce, Akkuyu sinkholes at the Obruk plateau. This study included appraisals related to the directions of the sinkholes' long axes. They wrote that "*most of the sinkholes are concentrated in NE-SW direction parallel to the general trend of the Sekizli fault zone*".

Strain conditions surrounding sinkholes

When assessing the risks of sinkhole formation in engineering projects, engineers responsible for these projects are asked to determine the probability of sinkhole formation that could affect the planned projects, in other words, the risk of sudden or gradual collapse on the project site. The assessments and decisions made in this regard will have a significant impact not only on the stability of underground/surface structures, constructions, but also on the lives of many people in these structures. The main theme of this study is to emphasize that in-situ 3D stress distributions acting on rock masses are among the important parameters that should also be examined for similar decision-making environments. Assessments obtained from recorded data on previous sinkhole formations and disasters are used to determine the development conditions of sinkholes. Statistical relationships between relevant parameters will provide insight into the importance of these parameters in sinkhole formation. Because of the large size of the rock masses to be studied and the high number of uncertain factors, collecting all the possible parameters which can be determined regarding sinkholes is the first step in sinkhole studies. At this stage, the geometric parameters obtained from sinkhole sites; *[distances between sinkholes; their grouped locations on the ground surface; generalized directions in the selected series of sinkhole formation (determined according to the grouped location of sinkholes); the arrangement of these groups, rock mass layers where possible cavities and voids are expected to form underground; the depths and extent of these layers; the expansion, growth, and directions of small cavities and voids formed underground; groundwater flow directions, etc.]* are generally the common parameters examined. In addition, the observed types of collapse in sinkholes (sagging and/or collapse), the presence/absence of groundwater in sinkholes, and the chemical and gaseous content of this groundwater are analyzed to understand sinkhole formation conditions in a particular region in the world like the Konya-Karapinar region. In addition to these

parametric studies, the thicknesses and rock mechanics properties of the rock mass layers surrounding the sinkholes should also be sampled in order to make rock mechanics assessments related to sinkholes. Subsidence (slow sagging) and/or gradual fracture collapse occurring at the roofs and sidewalls of underground cavities create an upward subsidence movement. Therefore, knowing the in-situ 3D stress properties acting on the rock mass layers in the Obruk plateau, (Konya-Karapinar region), which are expected to change over time, and learning the rock mechanics strength properties of these rock masses through laboratory and field testing procedures, will assist engineers in their decision-making processes regarding the actions to be taken to prevent further sinkhole formation in the Konya-Karapinar region. General continental horizontal and vertical displacement rates observed at Central Anatolia have been the subject of recent research using satellite-based measurement data. The displacement directions observed by researchers, are occurring in Westward, and the shift of these displacement directions from Northwest to Southwest across Anatolia (from East to West Anatolia), affect the rock masses in Anatolia and, naturally, the engineering structures and natural features within and on them. Central Anatolia, located at the center of this rotation, also possesses unique structural geological differences due to the uplift and subsequent local downward movement of the entire Earth's crust. For these reasons, Konya closed basin has become a lacustrine sedimentary accumulation area during certain geological periods. The horizontal rock mass layers observed in the stratigraphic records of the Konya-Karapinar region include sandstone, siltstone, conglomerate, mudstone, organic layers, limestone, etc. The successive changes in these layers also reflect climatic changes throughout the geological periods of the region. Weakness zones, voids, caves, cave networks, and sinkholes formed in the rock masses here, especially in karstic rock mass environments, are generally shaped by groundwater flow directions and interactions. In

fact, it is assumed that porosity, changes in in-situ 3D stress ratios, and changes in groundwater levels over time, etc., will cause the gradual expansion of underground voids in the rock mass layers of the Konya-Karapinar region containing fractured rock masses and/or micro-scale voids. Thus, small cavities within the rock masses will form large underground voids with volume sizes varying according to the structural properties of the rock masses. In such environments, it is possible for vertical cylindrical underground cavities resembling chimney-type sinkholes to form, and it should be noted that these sinkholes tend to expand over time.

In the field of rock mechanics research, there are studies that describe the influences of induced stress-strain distributions over the laboratory-scale CRU samples tested under uniaxial and biaxial loading conditions. An important step in these laboratory experiments is the use of image processing methods that capture and measure micro-scale displacements occurring at samples during the tests. Primarily, after the introduction of Digital Image Correlation, DIC, techniques (Sutton, et al. 1983 & 1986), strain recognition for tested solid materials including rock material has been improved. Studies conducted in the last 10 years, including the studies of displacements surrounding the circular voids by using the DIC method provide insights into displacements and crack directions caused by induced stress around these voids. One of the studies in this context was conducted by He, et al. (2023). These researchers simulated rock masses containing circular voids by drilling circular holes in the center of square prism-shaped test samples taken from granite and sandstone. The testing of these specimens under uniaxial loading conditions and the state of displacements occurring around circular holes were evaluated in detail through DIC images. Another research group, (Ji, et al. 2024), tested how rectangular prism-shaped test specimens prepared from rock-like cement mortar, (concrete), material behaved under biaxial loading conditions by drilling circular holes in their midpoints.

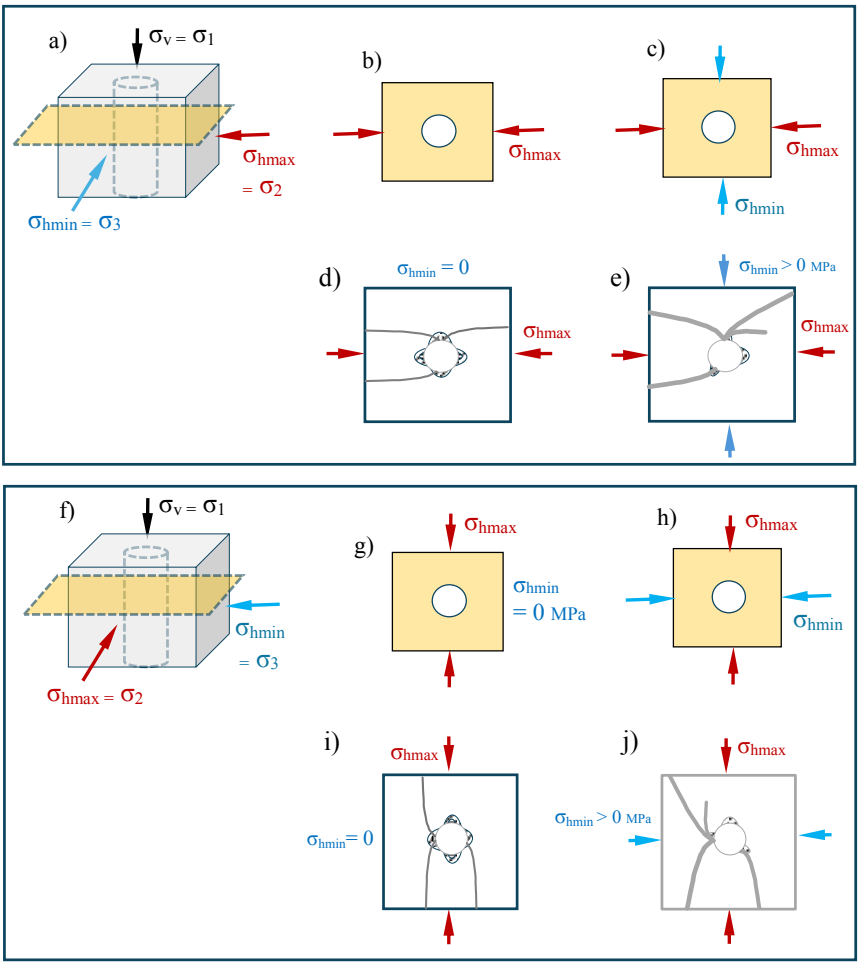


Figure 4. a&f) Stress around CRU including vertical hole like hypothetical sinkhole in 3D loading condition ($\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$), b,c,g, & h) 2D stress loading conditions (uniaxial / biaxial) for a circular hole, d&i) Possible strain distribution example at a square plate which have circular hole under uniaxial compressive loading, and e&j) biaxial compressive loading conditions.

The differences created by biaxial loading conditions were evaluated by examining the displacements developed around the circular holes. The studies presented by both research groups can

also be considered as providing a general understanding of the orientation of fractures formed around circular cavities under uniaxial and biaxial loading conditions. Therefore, the 3D sinkhole formation conditions given in Figure 4 and the biaxial loading conditions affecting horizontal sections taken from different depths of the sinkholes led to the evaluation of approaches related to fractures formed around these sinkhole cavities. Considering the in-situ 3D stress direction determination studies for the faults observed at the Obruk plateau mentioned in previous sections, the in-situ 3D stress directions around the developing chimney-type buried sinkholes on this plateau may exhibit similar characteristics to the stress conditions created by the 2D stress (biaxial) conditions applied to this buried openings' horizontal sections like in Fig. 4.

The fracture directions shown in these diagrams are hypothetical, taking into account general results in the relevant literature. In reality, the time required for fracture initiation and propagation due to in-situ 3D stresses applied to rock masses around underground cavities (mine galleries, mine shafts, sinkhole formations, etc.) generally depends on the applied field stress values, the stress values induced around the underground cavities, and the strength values of the rock masses in these locations. In-situ 3D stress-state (amounts, loading rates, loading directions, etc.) in geological eras over a particular Earth area like the Konya-Karapinar region have possibly been differentiated. Sinkholes, faults, folds, etc. that occurred in different geological periods have their natural records of rock structural features within the neighbouring rock masses as well. Thus, only after conducting tests that provide the current 3D stress-states (quantities and directions) at different locations (and depths) of the Konya-Karapinar region, engineers might be ready to focus on the risk of sinkhole and any other further fault formations in the area through appropriate 3D stress-strain based rock failure models. Such a study procedure based on rock mass behaviour can provide more realistic approaches in further

studies. However, due to the uncertainties concerning the rock mass properties which influence all the laboratory and in-situ tests, and uncertainties in the strength behaviour of the rock materials and rock masses, it is not yet to fulfill the actual stress-strength behaviour of the natural substances like rocks. Therefore, engineers have to supply their logical decisions through their considerations and experiences provided in rock mechanics research contents. In this concern, considering a CRU including vertical underground space, (Fig. 4a & 4f), which have their 3D external loading conditions could possibly be analysed for the induced rock fracturing conditions. Cross-sectional 2D test samples might then be considered to be prepared with a centered circular hole (Fig, 4b, 4c, 4g, and 4h; representing the underground space under the analysis) and they can be supposed to be tested under uniaxial and biaxial compressive loading conditions. Laboratory tests involving the observation of micro-scale fractures *[on the surface of test specimens (DIC analysis) and inside test specimens (Acoustic Emission analysis), etc.]* can be supplemented with additional applications of specialized numerical analyses that address different computational methodologies and rock fracture criteria. In this context, two recent examples of research in the field of rock mechanics are the studies presented by He, et al. (2023) and Ji, et al. (2024).

Strain concentration positions in the tested samples have their hints about the directions of the expected fracturing, (fracture propagation), in uniaxially or biaxially loaded (compression) test samples. Fracture initiation at the periphery of circular holes in the samples and then their propagation direction according to external loading conditions might have their clues, (Fig. 4d, 4e, 4i, and 4j), for the developing buried sinkholes, sinkholes already occurred, mine shafts, etc. Like the case in uniaxial compressive tests, induced rock fractures' elongations are expecting then in the directions of uniaxial loading. Similar facts are also meaningful to consider for biaxial compressive loading conditions, (applied directions of σ_{hmax}

are particularly important). In this case, value differences between σ_{hmax} and σ_{hmin} play an important role. It is expected that rock fracture elongation direction around the tested circular hole might produce angular directions according to applied σ_{hmax} and σ_{hmin} values. After informed about rock displacement conditions around circular underground openings, (like; metro tunnels, mine shafts, natural caves, and chimney-type sinkholes), through related researches, (including rock fracture mechanics, rock toughness properties, fracture initiation and propagation conditions, etc.),

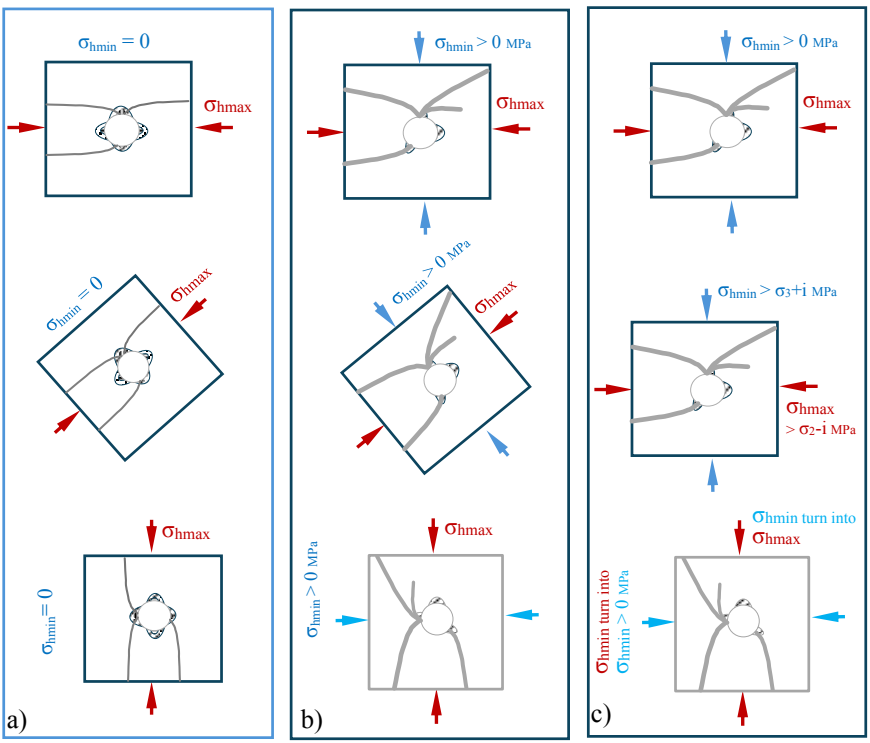


Figure 5. a) In uniaxial tests, induced rock fractures' elongations are expected in the directions of uniaxial loading. b) Similar facts are also meaningful to consider for biaxial compressive loading conditions (σ_{hmax} applied directions are particularly important). c) Biaxial loading conditions can also be differentiated as only their stress values change in the opposite manner instead of gradual changes of their directions.

engineers might provide more meaningful, decisive, conclusions for the risk of sinkholes. As Fig. 5 illustrates changing the directions, (or values, amounts), of uniaxial and biaxial compressive stresses applied to vertical mine openings & sinkholes are expected to cause differentiations in fracture patterns around them. Tectonic activities at certain positions of Earth's crust possibly cause different in-situ 3D stresses in different directions. Changes in how tectonic forces affect specific regions of the Earth's crust are expected to show a slow but continuous natural progression through events such as earthquakes, continental drifts and volcanic activities, etc. Changes in the direction of in-situ 3D stresses lead to specific consequences for mine shaft & sinkhole types underground openings, as shown in Fig. 5a & 5b. The fracture conditions under biaxial stress conditions shown in Fig. 5a & 5b could also have occurred under the loading condition shown differently in Fig. 5c. In this case, the applied σ_{hmax} and σ_{hmin} directions stay the same while their values might gradually be changed due to external influences. This value differentiation progression may have time-dependent characteristics. The mutual change of 2D loading values (amounts) can lead to a displacement of σ_{hmax} and σ_{hmin} (i.e., the direction of σ_{hmax} becomes the direction of σ_{hmin} and vice versa). This may be a consequence arising from the value difference between horizontal stresses, which is not the same as the case where the biaxial loading conditions gradually differ by angular shift (i.e. Fig. 5a & 5b). As shown in Fig. 5, by considering changes in the directions of biaxial stress conditions and/or changes in the magnitude of biaxial stress values in these directions (in the case of reversed changes in values), engineers can analyze the consequences of these interactions by visualizing them more comprehensively.

However, considering geological time periods and chimney-type sinkhole formation stages, the combined situations of these stages with differentiation in the σ_{hmax} and σ_{hmin} directions include cases that need to be addressed separately. Hypothetical

considerations regarding 3 different time periods that can be selected from the general sinkhole formation stages can also be shown as presented in Fig. 6. In this figure possible examples of induced

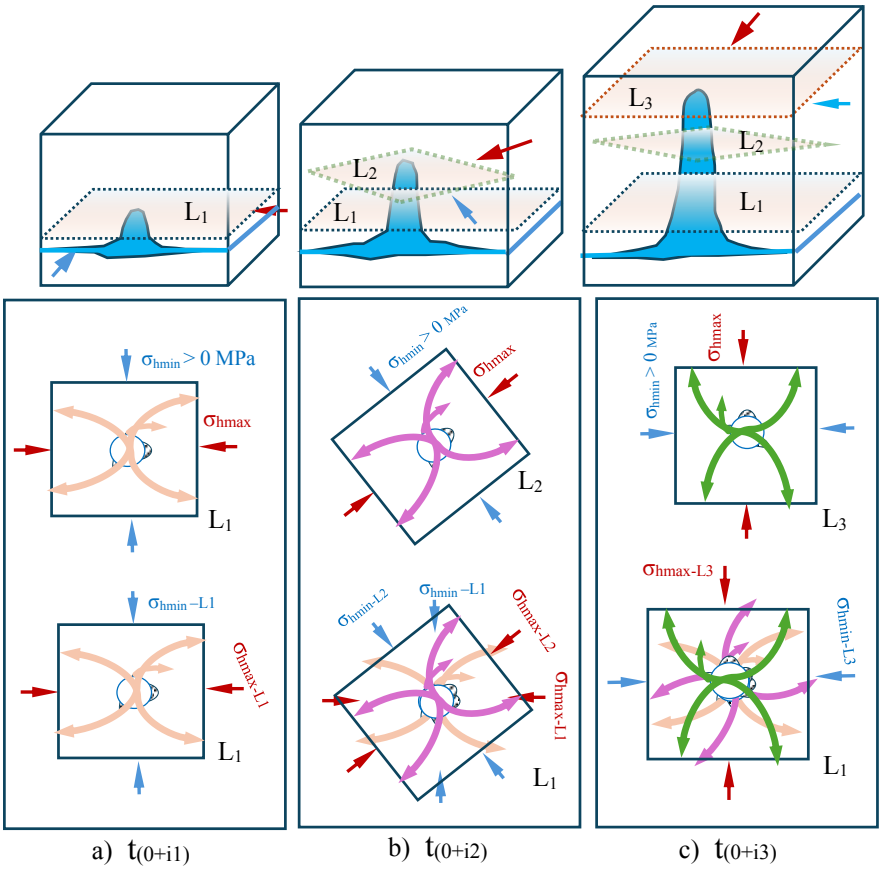


Figure 6. Possible examples of fracture traces surrounding a developing chimney-type sinkhole through geological periods. a)Vertical volume of the developing sinkhole had been loaded and fractured under the given biaxial stress direction in $t_{(0+i1)}$ time period, b) Upward extension of the developing sinkhole had been loaded in different stress direction in $t_{(0+i2)}$ time period, c) Upward further extension of the developing sinkhole had been loaded in different stress direction in $t_{(0+i3)}$ time period.

fracture traces surrounding a developing sinkhole through geological periods are illustrated according to the considerations on the basis of 2D stress-strain conditions. Here, in Fig. 6a presents the vertical void (dome type) volume of a developing sinkhole, along with possible fracture propagation directions under biaxial compressive stress directions for the time interval called t(0+i1). In the second of these conceptually considered sinkhole formation stages, it is assumed that the upward extension of this buried & developing conceptual sinkhole continues in the time interval called t(0+i2) due to the gradual collapse of the sinkhole roof layers into the sinkhole. According to this hypothetical example, biaxial compression loading directions are considered along the entire length of the developing sinkhole in the relevant time interval (Fig. 6b). This means that the second phase of the buried & developing sinkhole will require consideration of two different parts of the sinkhole due to different biaxial loading influences. The part of the sinkhole that progresses towards the ground surface in the second phase (L2) will only have fracture extensions resulting from the biaxial loading condition related to the time interval t(0+i2), while the earlier, deeper part of the same sinkhole (L1 phase) will carry both fractures from the earlier t(0+i1) phase and fracture traces from the t(0+i2) phase together. As shown in Fig. 6c, it would not be wrong to expect that, within the time interval t(0+i3), which includes the third stage of this hypothetical example, the three different parts of the sample sinkhole length progressing further towards the surface will contain the traces of biaxial stress direction differences that occurred during the development of the sinkhole in combination.

The three stages of the buried and developing sinkhole illustration discussed here are represented progressively to visualize the effects of biaxial stress-state variations; however, the 2D loading variations that occur here may have developed gradually over geological time periods. In this case, it can be predicted that the fracture formations around the developing sinkholes, whose fracture

extension directions change according to the loading directions, will become even more intertwined. This may imply that the fractures around the sinkhole become more complex (natural).

The complexities in the structure of collapse sinkholes, in terms of fracture formation and separations, are actually natural conditions that occur in all geological eras of the Earth's crust. The condition of induced stresses related rock fracture extensions (fracture traces) around sinkholes; for example, the long and short axis lengths that appear in the horizontal sections of elliptical sinkholes, (these values could possibly be differentiate according to different geological time periods depending on the sinkhole depth examined), (biaxial loading conditions might have been different in those time periods), are subjects worth researching. Therefore, while new technological developments, new analysis methods, new approaches, new mathematical modeling methods, new additional data opportunities, etc., provide engineers with new possibilities regarding the formation and development of sinkholes, the necessity of examining in-situ 3D stress-states in these studies is also an undeniable factor.

Conclusions

In the Konya-Karapinar region, including the Obruk plateau, an increase in sinkhole formations has been observed over the last 20 years. Increased groundwater use for irrigation is cited as one of the main reasons for this. Research on sinkholes in this region examines the geological infrastructure and geometric variables of all observable (historical and daily) sinkholes to reveal their different and/or common formation characteristics. Risk assessments related to sinkhole formation are also being investigated to predict the location of new sinkholes in the region. While the long and short axis directions and lengths of some elliptical sinkholes in the Konya-Karapinar region have been evaluated in some publications, their variations over time could not be considered due to insufficient data

on their historical continuity. In recent years, satellite imagery and geometric data of sinkholes have been used to correlate individual or group characteristics of sinkholes. Research on sinkholes in the Konya-Karapinar region and related literature will be further enhanced by combining information and data obtained from stratigraphic logging studies to determine the subsurface location (depth and thickness) of rock mass layers containing karst or other types of voids. The value of in-situ 3D stress-states which will be obtained from field tests conducted near the sinkholes in the Konya-Karapinar region will be truly significant. The absence of such experimental data in open-access online literature sites currently prevents the subject from being examined by different researchers using in their different research approaches. Furthermore, in light of the available data and relevant information, responsible engineers need to create a decision-making environment where they can make informed decisions regarding sinkholes. However, any decisions made on this subject will be the responsibility of the engineers and managers making those decisions. This situation highlights the need for more detailed studies and research involving the collection of more data on sinkholes in the Konya-Karapinar region, and emphasizes that these studies should include in-situ 3D stress measurements and analyses.

References

Akinci, B. (2023) Feature: In Turkiye's Konya, sinkholes spread as groundwater overuse takes its toll, *Web page,* www.Xinhuanet.com, Retrieved in March 2026.

Amadei, B. & Stephansson, O. (1997) *Rock stress and its measurement,* Chapman and Hall, UK, p490.

Andersen, A.J., Gogus, O.H., Pysklywec, R.N., Uluocak, E.S. & Santimano, T. (2024) Multistage lithospheric drips control active basin formation within an uplifting orogenic plateau, *Nat. Communi.*15, 1, 7899.

Andrejchuk, V. (2002) Collapse above the worlds's largest potash mine (Ural, Russia), *International Journal of Speleology,* (Implication of

speleological studies for karst subsidence hazard assessment; Eds. Klimchouk, A. & Lowe, D.), 31, 1/4, pp137-158.

Ashby, W.R. (1956) *The black box*, An introduction to cybernetics, Chapman & Hall, London, pp86-117.

Bartol, J., & Govers, R. (2014) A single cause for uplift of the Central and Eastern Anatolian plateau?, *Tectonophysics*, *637*, pp116-136.

Barton, N. (2016) Cavern and tunnel collapses due to adverse structural geology. *15th Colombian Geotechnical Congress & ISRM 2cd Int. Specialized Conf. on Soft Rocks*, Oct.5-7th 2016, Cartagena, Colombia.

Bayari, C.S., Ozyurt, N.N. & Kilani, S. (2009a) Radiocarbon age distribution of groundwater in the Konya Closed Basin, central Anatolia, Turkey, *Hydrogeology Journal*, 17, 2, pp347-365.

Bayari, C.S., Pekkan, E. & Ozyurt, N.N. (2009b) Obruks, as giant collapse dolines caused by hypogenic karstification in central Anatolia, Turkey: Analysis of likely formation processes, *Hydrogeology Journal*, 17, 2, pp327-345.

Bell, F.G. (1986) Location of abandoned workings in coal seams, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Int. de Géologie de l'Ingénieur,* 33, 1, pp123-132.

Bozyigit, R. & Tapur, T. (2009) The affect of groundwaters for formation of obruk in Konya plain and around, *Selcuk University Journal of Social Sciences Institute*, Konya, Turkey, (in Turkish), 21, pp137-155.

Brinkmann, R., Parise, M. & Dye, D. (2008) Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida, *Engineering Geology,* 99, 3-4, pp169-184.

Bunge, M. (1963) A General black box theory, *Philosophy of Science*, 30, 4, pp346-358.

Buyuksarac, A. (2007) Investigation into the regional wrench tectonics of inner East Anatolia (Turkey) using potential field data, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*,160, 1, pp86-95.

Cardarelli, E., Di Filippo, G. & Tuccinardi, E. (2006) Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study, *Near Surface Geophysics*, 4, 6, pp387-392.

Cauer, W. (1941) *Theorie der linearen Wechselstromschaltungen*, Vol.1, Akademische Verlags-Gesellschaft Becker und Erler, Germany.

Closson, D. & Karaki, N.A. (2009) Salt karst and tectonics: Sinkholes development along tension cracks between parallel strike-slip faults, Dead Sea, Jordan, *Earth surface processes and landforms*, 34, 10, pp1408-1421.

Coskuner, B., Eren, Y. & Parlar, S. (2021) *The relationship between sinkholes, fractures and automatically derived lineation in Karapinar*

(Konya, Central Anatolia) region, 2cd, Int. Gobeklitepe Scientific Studies Congress, March 20-21st 2021, Sanliurfa, Turkey, pp268-269.

Coskuner, B. & Eren, Y. (2025) *Geology and morphology of the Belkuyu sinkhole (Konya, Turkiye)*, Formation models of Konya sinkholes and their relation to earthquake, Ed. Demircioglu, R.), Bidge publication, Ankara, Turkey, pp66-85.

Christiansson, R. & Hudson, J.A. (2003) ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 4: quality control of rock stress estimation, *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 7-8, pp1021-1025.

Dogan, U. & Yilmaz, M. (2011) Natural and induced sinkholes of the obruk plateau and Karapinar-Hotamıs plain, Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 2, pp496-508.

Dursun, A.E. (2022) Risk analysis of natural sinkholes hazards in Karapinar basin (Konya, Turkey), *Arabian J. of Geosciences*, *15,* 3, 279.

Edmonds, C.N. (2008) Karst and mining geohazards with particular reference to the Chalk outcrop, England, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,* 41, 3, pp261-278.

Elliott, J.R., Fang, J., Lazecky, M., Maghsoudi, Y., Ou, Q., Payne, J.A., Rollins, C., Wang, D., Hooper, A. & Wright, T.J. (2026) Deformation, strains and velocities for the Alpine Himalayan belt from trans-continental Sentinel-1 InSAR & GNSS, *Remote Sensing of Environment*, 338, 115320.

England, P., Houseman, G. & Nocquet, J.M. (2016) Constraints from GPS measurements on the dynamics of deformation in Anatolia and the Aegean, *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, pp8888–8916.

Eren, Y., Parlar, S., Coskuner, B., & Arslan, S. (2024) Geological and morphological features of the Karapinar sinkholes (Konya, Central Anatolia, Türkiye), *Journal of Earth Science*, 35, 5, pp1654-1668.

Eren, Y., Coskuner, B. & Parlar, S. (2025) An Example of Intracontinental Cross Faults Formation from the Vicinity of Karapinar (Konya–Central Anatolia), *Acta Geologica Polonica*, 75, 1, e35.

Fabbri, S., Sauro, F., Santagata, T., Rossi, G. & De Waele, J. (2017) High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy), *Geomorphology*, *280*, pp16-29.

Florea, L. (2005) Using State-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure, *Journal of Cave and Karst Studies,* 67, 2, pp120-124.

Funk, B., Flores-Orozco, A. & Steiner, M. (2024) Possibilities and limitations of cave detection with ERT*, Geomorphology*, 462, 109332.

Gocmez, G., Eren, Y., Aydin, Y. & Sogut, A.R. (2000) Karapinar cevresinde yeni olusan obruk, *Karapinar Symposium*, Oct.26-27th 2000, pp305-316.

Gokay, M.K. (2010) Sinkholes formed due to natural and mining activities, *Seminar note,* Seminar; May 5th, 2010, Selcuk Univ., Faculty of Eng. & Arch., Main Amphitheatre, Konya, Turkey, p136.

Gokay, M.K. (2011) Stability of natural cavities (sinkholes, caves etc.) and underground excavations (galleries, tunnels, depositories, underground-cities etc.), *Seminar note,* Seminar; Feb. 2nd, 2011, Selcuk Univ., Faculty of Eng.&Arch., Mining Eng., Dept., Konya, Turkey, p134.

Gokay M.K. & Dogan, K. (2017) Risks originated by Yarimoglu sinkhole, *Int. Symp. on Occupational Safety and Hygiene*, Apr.10-11th 2017, Guimaraes, Portugal, ISBN 978-989-98203-7-1, pp1-2.

Gokay, M.K. & Mesutoglu, M. (2025) Induced stresses and displacements caused by sinkhole development, *Konya Journal of Eng. Sci.*, 13, 1, pp204-219.

Gokay, M.K. (2025) *Interaction matrix considerations for rock shearing parameters,* Kaya mekaniginden cevher hazirlamaya guncel yaklasimlar, (Current approaches from rock mechanics to ore preparation), (Ed. Ozdemir, E.), ISBN 978-625-372-669-1, Bidge Publication, Ankara, Turkey, pp91-120.

Gokkaya, E., Gutierrez, F. & Tuncel, E. (2026) Spatial-temporal patterns of sinkhole development in the Konya Basin, Türkiye, Implications for susceptibility and time-variant hazard assessment. *Eng. Geology*, 360, 108480.

Gunay, G., Corekcioglu, I. & Ovul, G. (2011) Geologic and hydrogeologic factors affecting sinkhole (obruk) development in Central Turkey, *Carbonates and Evaporites*, 26, 1, pp3–9.

Hanna, K., Hodges, S., Pfeiffer, J. & Heasley, K. (2011) Engineering geophysical application to mine subsidence risk assessment, *Geozarad Impacting Transportation in the Appalachian Region*, Aug.2-4th 2011, Chatanooga, TN, US.

Haskel-Ittah, M. (2023) Explanatory black boxes and mechanistic reasoning, J. Research in Sci. Teach., 60, 4, pp915-933.

He, Z., Wang, F., Deng, J., Chen, F., Li, H. & Li, B. (2023) Fracture and energy evolution of rock specimens with a circular hole under multilevel cyclic loading, *Theoretical & Applied Fracture Mechanics*, 127, 103996.

Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. & Muller, B. (2010) Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008, *Tectonophysics*, *482,* 1-4, pp3-15.

Huang, H.H. (2007) Geomorphologic investigations on karst terrain: a GIS-assisted case study on the island of Barbados, *MSc Thesis,* Department of Bioresource Engineering, Macdonald Campus, McGill University, Montréal, Québec, Canada, p95.

Hudson, J.A. (1992) *Rock engineering system, theory and practice*, Ellis-Harwood Press, London, UK.

Hudson, J.A., Cornet, F.H. & Christiansson, R. (2003) ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 1: Strategy for rock stress estimation, *Int. J. of Rock Mech.& Mining Sci.,* 40, 7-8, pp991-998.

Haimson, B.C. & Cornet, F.H. (2003) ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF*), International journal of rock mechanics and mining sciences*, 40, 7-8, pp1011-1020.

Itasca, (2026a) UDEC, Distinct-Element Modelling of Jointed and Blocky Materials in 2D, *Itasca software, Web page*, www.itascasoftware. com/products /udec/, Retriviewed in Apr. 2026.

Itasca, (2026b) 3DEC, Distinct-Element Modelling of Jointed and Blocky Materials in 3D, *Itasca software, Web page,* www.itascasoftware. com/ products /3dec/, Retriviewed in Apr. 2026.

Ji, P.X., Viegas, G. & Zhang, Q.B. (2024) Mechanical and fracturing characteristics of defected rock-like materials under biaxial compression, *Inter. J. of Rock Mech. & Mining Sciences,* 176, 105692.

Karadeniz, K.E. (2019) In-situ stress magnitude and orientation determination of Ankara Kazan District from FMI log, *MSc Thesis,* The Graduate School of Nat.&Applied Sci., Middle East Tech. Univ., p116.

Kaufmann, G. (2014) Geophysical mapping of solution and collapse sinkholes, *Journal of Applied Geophysics*, 111, pp271-288.

KH, (2021) Konya Karapinar Inoba Obrugu Dis-Ic cekimi ve anlatimi (HD), *Karapinar Haber*, Jan. 2cd 2021, *Web page*; www.youtube. com/watch?v=dyAClA8Yuq4, Retrieved in Apr. 2026.

Kutoglu, S.H., Akgun, E. & Softa, M. (2026) Delineating the Central Anatolia Transition Zone (CATZ): Constraints from Integrated Geodetic (GNSS/InSAR) and Seismic Data, *Sensors*, Switzerland, 26, 2, 505.

Lin, C. (2019) Estimation of 2D and 3D In-situ Stresses Using Back Analysis of Measurements of Well/Borehole Deformation, *PhD Thesis*, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada, P213.

Lipar, M., Stepisnik, U. & Ferk, M. (2019) Multiphase breakdown sequence of collapse doline morphogenesis: An example from Quaternary aeolianites in Western Australia, *Geomorphology,* 327, pp572-584.

Liu, R., Sun, H., Qin, J. & Zheng, Z. (2023) A multi-geophysical approach to assess potential sinkholes in an urban area, *Engineering Geology*, 318, 107100.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000) Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, B3, pp5695-5719.

McCoy, K.J. & Kozar, M.D. (2008) Use of sinkhole and specific capacity distributions to assess vertical gradients in a karst aquifer, *Environmental Geology,* 54, 5, pp921-935.

Menezes, D.F., Bezerra, F.H., Balsamo, F., Arcari, A., Maia, R.P., & Cazarin, C.L. (2020) Subsidence rings and fracture pattern around dolines in carbonate platforms–Implications for evolution and petrophysical properties of collapse structures, *Marine and Petroleum Geo.,* 113, 104113.

Mazzullo, S.J. (2004) Overview of porosity evolution in carbonate reservoirs. *Kansas Geol. Soc. Bull.,* 79. 1&2, p19.

Nocquet, J.M. (2012) Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results, *Tectonophys.,* 579, pp220–242.

Orhan, O., Haghshenas-Haghighi, M., Demir, V., Gokkaya, E., Gutierrez, F. & Al-Halbouni, D. (2023) Spatial and temporal patterns of land subsidence and sinkhole occurrence in the Konya Endorheic Basin, Turkey, *Geosciences*, *14*, 1, 5.

Ozdemir, A. (2015) Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey), *Geomorphology*, 245, pp40-50.

Ozdemir, A. (2016) Sinkhole susceptibility mapping using logistic regression in Karapinar (Konya, Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 2, pp681-707.

Ozturk, M.Z., Sener, M.F., Sener, M., & Simsek, M. (2018) Structural controls on distribution of dolines on Mount Anamas (Taurus Mountains, Turkey), *Geomorphology,* 317, pp107-116.

Panek, T., Margielewski, W., Taborík, P., Urban, J., Hradecky, J. & Szura, C. (2010) Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: Case studies from the Polish Flysch Carpathians, *Geomorphology,* 123, 1-2, pp165-180.

Parise, M. (2012) A present risk from past activities: sinkhole occurrence above underground quarries, *Carbonates and Evaporites*, 27, 2, pp109-118.

Parlar, S., Eren, Y., Coskuner, B. & Arslan, S. (2021) *Geological characteristics of sinkholes around the Meyil, Yirce and Akkuyu (Obruk*

plateau-Karapinar, Konya, 2cd, International Gobeklitepe Scientific Studies Congress, March 20-21st 2021, SanliUrfa, Turkey, Pp266-267.

Parlar, S. (2025) *Morphological characteristics and formation model of sinkholes in the area between Bolluk lake and Akincilar (Konya),* (Formation models of Konya sinkholes and their relation to earthquake, Ed. Demircioglu, R.), Bidge publication, Ankara, Turkey, pp39-65.

Putiska, R., Nikolaj, M., Dostal, I. & Kusnirak, D. (2012) Determination of cavities using electrical resistivity tomography, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42, 2, pp201-211.

Sahu, P. & Lokhande, R.D. (2015) An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining, *Procedia Earth and Planetary Science,* 11, pp63-75.

Sancar, K., Uslan, E., Gonul, O. & Ulugergerli, E.U. (2025) Konya plain sinkholes in the light of satellite gravity data, Nigde Omer Halisdemir Univ., *Journal of Social Science Inst.*, 7, 2, pp428-438.

Sari, F., Kahveci, M., Somay-Altas, M. & Tusat, E. (2021) Evaluating sinkhole formation with multicriteria decision analysis: A case study in Karapinar-Konya, Turkey, *Arabian J. of Geosciences*, 14, 4, 281.

Sengor, A.M.C., Tuysuz, O., Imren, C., Sakınc, M., Eyidogan, H., Gorur, N., ... & Rangin, C. (2005) The North Anatolian fault: A new look, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.,* 33, 1, pp37-112.

Senturk, F. (1969) *Isotope techniques applied to groundwater movement in the Konya closed basin Turkey*, IAEA Contract No:445.

Sjöberg, J., Christiansson, R. & Hudson, J.A. (2003) ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: overcoring methods, *International J. of Rock Mech.&Mining Sciences,* 40, 7-8, pp999-1010.

Stephansson, O. & Zang, A. (2014) *ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site,* (The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, Cham: Springer International Publishing), pp187-201.

Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F. & McNeill, S.R. (1983) Determination of displacements using an improved digital correlation method, *Image Vis. Comput*., 1, pp133-139.

Sutton, M.A., Cheng, M.Q., Peters, W.H., Chao, Y.J. & McNeill, S.R. (1986) Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis, *Image Vis. Comput*., 4, pp143-150.

Törk, K. (Project chairman), Erduran, B., Ozgur, C., Guner, I.N. & Yavuz, S. (Hydrogeology group), Ates, S., Mutlu, G., Ozerk, O.C., Sertel, N., Yeleser, L. and Bulut-Ustun, A. (Geology group), (2009) *Konya havzasinda karstik cokuntu alanlarinin belirlenmesi ve tehlike*

degerlendirilmesi projesi, MTA, Geophysical group, Geotechnical group, *MTA Raporu*, Maden Tetkik Arama Genel Mudurlugu, MTA, (General Directorate of Mineral Research & Expl.), (Unpublished), Turkey.

Törk, K., Erduran, B., Yilmaz, N.P., Sulukcu, S., Guner, I.N., Ates, S., Mutlu. G., Keles. S., Cinar. A., Demirbas, S., Ozerk, O.C., Bulut, A., Sertel, N., Yeleser, L., Avci, K., Ayva, A. & Toksoy, A.T. (2013) *Konya havzasinda karstik cokuntu alanlarinin belirlenmesi ve tehlike degerlendirilmesi, MTA Report*, Maden Tetkik Arama Genel Mudurlugu, MTA, (General directorate of mineral research and exploration), Turkey.

Ulu, U. (2009a) *Geological Maps of Turkey, Karaman: M30 Sheet*, Maden Tetkik Arama Genel Mudurlugu, MTA, (General Directorate of Mineral Research and Exploration), Ankara, Turkey.

Ulu, U. (2009b) *Geological Maps of Turkey, Karaman: M31 Sheet*, Maden Tetkik Arama Genel Mudurlugu, MTA, (General Directorate of Mineral Research and Exploration), Ankara, Turkey.

Upchurch, S.B. & Littlefield, J.R. (1988) Evaluation of data for sinkhole-development risk models, *Environmental Geology & Water Sci.,* 12, pp135-140.

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Dusar, M., Martens, V. & Duchateau, P. (2007) Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium), *Geomorphology*, 91, 1-2, pp19-37.

Weiss, J.R., Walters, R.J., Morishita, Y., Wright, T.J., Lazecky, M., Wang, H., ... & Parsons, B. (2020) High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data, *Geophysical Research Letters,* 47, 17, e2020GL087376.

Yavuz, S. (2010) Konya-Karapinar havzasi karstik ozelliklerinin belirlenmesinde hidrojeolojik parametrelerin kullanilmasi. *MSc Thesis*, Cukurova Univ., Natural Science Enst., Adana, Turkey.

Yesilmaden, H.M., Inan, C.A., Kurtulus, B., Canoglu, M.C., Avsar, O. & Razack, M. (2021) Land subsidence assessment under excessive groundwater pumping using ESA Sentinel-1 satellite data: a case study of Konya Basin, Turkey, *Environmental Earth Sciences*, 80, 11, 409.

Zimbardo, M., Cannone, C., Ercoli, L. & Nocilla, A. (2018) A risk assessment proposal for underground cavities in Hard Soils-Soft Rocks, *Inter., J. of rock mechanics and mining sciences*, *103*, pp43-54.


BİDGE