



MTA Yerbilimleri ve Madencilik Dergisi

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



Doğal hidrojen aramacılığı: Hedef litolojiler, yüzey indikatörleri ve jeofizik-jeokimyasal yaklaşımlar

İlkin ÖZSÖZ^{a*}, Ferhat KARACA^b, Pir Çağatay KARTAL^c, Mustafa Batuhan ERTEKİN^d, Zeynep ÖNAL^c, Özge AHİPAŞAOĞLU^a ve Aslıhan YILMAZ^a

^aMaden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Marmara Bölge Müdürlüğü, Kocaeli, Türkiye

^bMaden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi, Ankara, Türkiye

^cMaden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Deniz Araştırmaları Dairesi, Ankara, Türkiye

^dTürkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Tabii Kaynaklar Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Doğal H₂ Aramacılığı, İndikatörler, Arama Yöntemleri, Ekonomik Değerlendirme, Rezervuar Analizi.

ÖZ

Bu çalışma, doğal hidrojenin oluşumu, rezervuar özellikleri ve karasal doğal H₂ arama tekniklerini ele almaktadır. Denizel ve jeotermal ortamlarda aramacılık potansiyel taşısa da, yüksek maliyetli deniz tabanı operasyonları ve mevcut teknolojik kısıtlar nedeniyle ekonomik değildir. Türkiye'nin doğal hidrojen potansiyeli ve izlenmesi gereken yol haritası da incelenmektedir. Doğal H₂ keşifleri genellikle rastlantısaldir ve çoğu hidrokarbon aramaları sırasında tespit edilmiştir. Arama potansiyelindeki belirsizlikleri azaltmak için toprak gaz analizleri, yüzey indikatörleri ve saha çalışmaları kullanılabilir. Ancak ekonomik potansiyelin belirlenmesi için kapsamlı bir model gereklidir. Bu model dört aşamadan oluşur: (i) havza ölçeğinde jeolojik ve jeofizik verilerle öncelikli alanların seçilmesi, (ii) yatırım öncesi lojistik, altyapı ve maliyet değerlendirmeleri, (iii) saha ölçeğinde jeolojik, jeofizik ve jeokimyasal ayrıntılı çalışmalarla hedeflerin daraltılması, (iv) keşif sondajı ve testlerle H₂ varlığının ve üretilebilirliğinin doğrulanması. Türkiye, özellikle ofiyolit kuşaklarındaki serpantinleşmiş ultrabazik kayalar, bantlı demir formasyonları ve uranyum-toryumca zengin granitik birimler ile umut vadeden bir konumdadır. Dünya genelinde doğal H₂ zenginleşmeleri Mali, ABD, Avustralya, Brezilya, Rusya, Umman ve İspanya'da rapor edilmiştir.

Gönderim Tarihi: 10.03.2025

Kabul Tarihi: 06.09.2025

Keywords:

Natural H₂ Exploration, Indicators, Exploration Methods, Economic Evaluation, Reservoir Analysis.

ABSTRACT

This study examines the formation of natural hydrogen, reservoir characteristics, and terrestrial exploration techniques. Although marine and geothermal environments hold potential, exploration in these settings is not economically viable due to costly seafloor operations and current technological limitations. The natural hydrogen potential of Türkiye and the roadmap to be followed are also discussed. Natural H₂ discoveries are mostly incidental, often detected during hydrocarbon exploration. Soil gas analyses, surface indicators, and field studies can reduce exploration uncertainties; however, assessing economic potential requires a comprehensive model. This model consists of four stages: (i) basin-scale geological and geophysical assessments to identify priority areas, (ii) pre-investment evaluations of logistics, infrastructure, and cost uncertainties without final commercial commitment, (iii) site-specific geological, geophysical, and geochemical studies to narrow exploration targets, and (iv) exploratory drilling and testing to confirm H₂ presence and producibility through flow tests and sample analyses. Türkiye is considered promising due to

Received Date: 10.03.2025

Accepted Date: 06.09.2025

Atıf Bilgisi: Özsoz, İ., Karaca, F., Kartal, P. Ç., Ertekin, M. B., Önal, Z., Ahıpaşaoğlu, Ö., Yılmaz, A. 2025. Doğal hidrojen aramacılığı: Hedef litolojiler, yüzey indikatörleri ve jeofizik-jeokimyasal yaklaşımlar. MTA Yerbilimleri ve Madencilik Dergisi 8, 26-40.

*Başvurulan yazar: İlkin Özsoz, ilkin.ozsoz@mta.gov.tr

potential source lithologies such as serpentized ultrabasic rocks in ophiolite belts, banded iron formations, and uranium–thorium-rich granitic units. Globally, natural H₂ accumulations have been reported in Mali, the USA, Australia, Brazil, Russia, Oman, and Spain.

1. Giriş

Global olarak büyüyen fosil yakıt kaynaklı enerji tüketimi çevresel endişeler ve iklim değişikliklerine yol açmakta ve yenilenebilir enerji alanında farklı enerji kaynaklarının gereksinimini gözler önüne sermektedir. Ayrıca fosil yakıtların sınırlı olması da güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve hidrojen enerjisi sektörlerine yatırım yapılmasını ve bu sektörlerin gelişmesini sağlamıştır (Çelik ve Yıldız, 2017). Geleceğin enerji kaynağı mutlaka ekonomik ve düşük veya sıfır karbon emisyonuna sahip olmalıdır. Bu bağlamda doğal (beyaz) hidrojen, global anlamda yapılacak olan enerji devrimi için bir yapıtaşı görevi üstlenecektir (Smith vd., 2005; Murray vd., 2020).

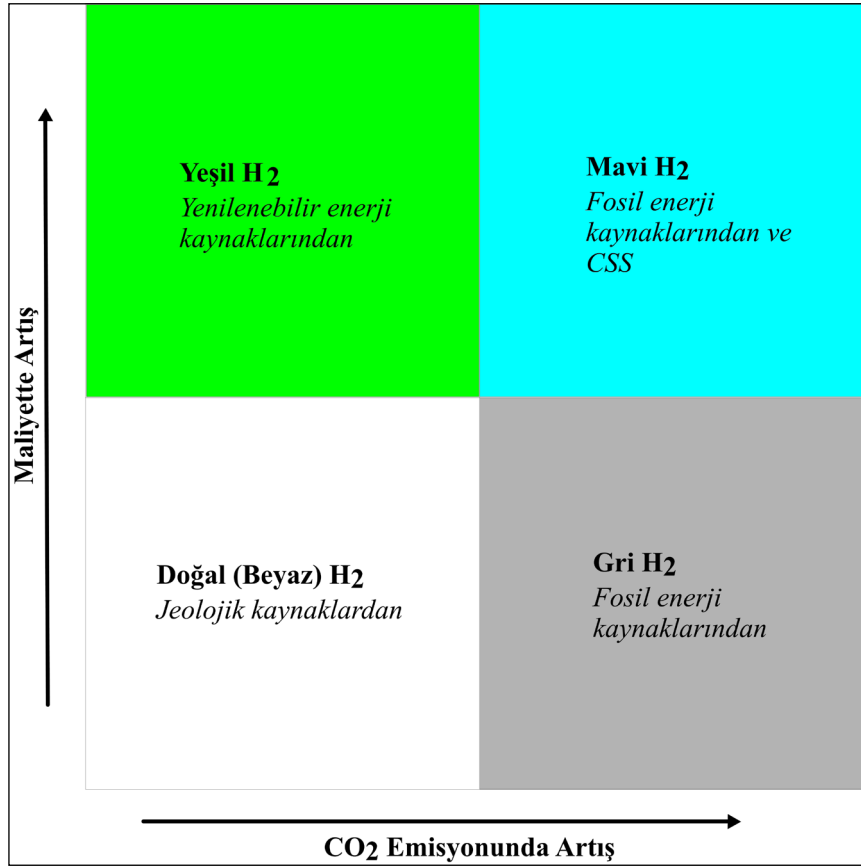
Hidrojen, üretim yöntemine ve enerji kaynağına bağlı olarak farklı türlerde sınıflandırılmakta olup, her bir türün çevresel etkisi ve ekonomik potansiyeli değişmektedir. Doğal hidrojen enerji bakımından zengin, düşük maliyetli ve sürdürülebilir temiz enerji geleceği açısından kritik öneme sahip bir alternatif olarak görülmektedir. Günümüzde hidrojen; fosil kaynaklardan elde edilen gri hidrojen, fosil kaynaklarla birlikte karbon tutma teknolojilerinin kullanıldığı mavi hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojen ve jeolojik kaynaklardan sağlanan doğal (beyaz) hidrojen gibi başlıca türlere ayrılmaktadır. Bunlara ek olarak, siyah ve kahverengi hidrojen üretiminde karbon yoğunluğu en yüksek seviyededir. Turkuaz hidrojen ise gri hidrojen üretimine benzer şekilde “metan pirolizi” yöntemiyle üretilmekte, buhar üretimi elektrikle sağlanmakta ve oluşan CO₂ katı formda geri dönüştürülebilmektedir; ancak doğal gaz bağımlılığı yaratmaktadır. Pembe, mor ve kırmızı hidrojen, yeşil hidrojenin elektroliz yöntemini nükleer enerji kaynaklarıyla kullanır; pembe nükleer elektrikten, kırmızı nükleer ısıdan (termoliz) ve mor ise bu iki yöntemin birleşiminden elde edilir. Sarı hidrojenin tanımı zamanla değişmiş olup başlangıçta yalnızca güneş enerjisiyle üretilirken, günümüzde elektrik şebekesinden sağlanan enerji ile üretim olarak tanımlanmakta ve karbon yoğunluğu, şebekenin

enerji kaynağına bağlıdır. Turuncu hidrojen ise belirli jeolojik formasyonlara CO₂ ile zenginleştirilmiş su enjekte edilerek hem hidrojen üretimini hem de katı karbonatlar oluşturarak karbonun yeraltında depolanmasını amaçlar (Çizelge 1). Şekil 1’de başlıca hidrojen tiplerinin üretim maliyetleri ve meydana getirdiği CO₂ emisyonları bakımından inceleyen grafik verilmiştir.

Çizelge 1- Farklı hidrojen türleri ve elde ediliş yollarının karşılaştırması.

Hidrojen Kaynağı	Elde Ediliş Yolu
Gri Hidrojen	Fosil Kaynaklardan
Mavi Hidrojen	Fosil kaynaklardan + karbon tutma ve depolama (CCS) teknolojileri
Yeşil Hidrojen	Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektroliz
Beyaz Hidrojen	Jeolojik kaynaklardan doğal olarak oluşan hidrojen
Siyah / Kahverengi Hidrojen	Karbon yoğunluğu en yüksek üretim; kömür vb. fosil yakıtlar
Turkuaz Hidrojen	Metan pirolizi yöntemi; CO ₂ katı formda geri dönüştürülür (ancak doğal gaz bağımlılığı yaratır)
Pembe Hidrojen	Elektroliz yöntemi, nükleer elektrik kullanılarak
Kırmızı Hidrojen	Nükleer ısı (termoliz) ile üretim
Mor Hidrojen	Nükleer elektrik + nükleer ısı yöntemlerinin birleşimi
Sarı Hidrojen	Başlangıçta sadece güneş enerjisiyle, günümüzde şebeke elektriğiyle
Turuncu Hidrojen	Belirli jeolojik formasyonlara CO ₂ ile zenginleştirilmiş su enjekte edilerek; hem hidrojen üretimi hem de karbonun yeraltında depolanması

Bugüne kadar enerji kaynağı olarak hidrojen üzerine yapılan incelemeler, hidrojenin depolanması, hazırlanması ve lojistik üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak doğal hidrojen aramacılığı üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları oldukça sığ bir düzeyde kalmıştır (Davies vd., 2024; Jackson vd., 2024; Patonia vd., 2024). Araştırma ve geliştirme çalışmaları, doğal hidrojenin keşif aşamasındaki arama maliyetlerini düşürme ve başarı oranını artırma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, doğal hidrojenin oluşumu, karakteristik özellikleri ve bulunduğu

Şekil 1- Başlıca hidrojen kaynakları ve CO₂ Emisyonu.

bölgelerdeki tektonik özellikle iyice anlaşılmalıdır (Wang vd., 2023).

Geçmişte, doğal hidrojenin önemi ve potansiyeli gözden kaçırılmış veya ekonomik değer taşımadığı düşünülmüştür. Aslında, doğal hidrojenin havada çok hızlı difüze olduğu hesaba katılır ise rezerv alanları bulmanın imkansızla yakın olduğunu düşünmek doğal hidrojen kaynaklarını önemsemek için oldukça makul bir sebep olarak değerlendirilebilir. Hidrojen, petrol ve doğalgaz gibi uzun süreler jeolojik kapanlarda kalamamaktadır (Johnsgard, 1988). Ancak bahsi geçen kısıtlara rağmen, doğal hidrojenin ana enerji kaynaklarından biri olması fikri, Mali'de 2007 yılında rastlantısal olarak keşfedilen doğal hidrojen birikimi olan kuyudan sonra yaygınlaşmaya başlamıştır (Diallo vd., 2022). Bahsi geçen rastlantısal keşiften sonra doğal hidrojen oluşumu ve aramacılığı üzerine bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar genel olarak okyanus ortası sırtlara (Mével, 2003; Proskurowski vd., 2006; Klein vd., 2017) ve doğal

hidrojen bulundurabilecek rezervuarlara ve jeolojik ortamlara odaklanmıştır (Larin vd., 2015; Zgonnik vd., 2015; Prinzhofer vd., 2018; Boreham vd., 2021; Lefevre vd., 2021). Günümüzde, denizel ve jeotermal alanlarda doğal H₂ aramacılığı, potansiyel barındırır bile ekonomik olmaktan uzaktır.

Lévy vd. (2023), hidrojen aramacılığını genel hatları ile dört ayrı kategoriye bölmüştür; ilk aşama literatürden elde edilen bilgiler ve uzaktan algılama teknikleri ile H₂ potansiyeli olan bölgelerin belirlenmesi, ikinci aşama sahada jeofizik ölçümlerin (manyetik, gravite, sismik vb.) gerçekleştirilmesi ile gaz ve kayaç örneklemelerinin yapılması, üçüncü aşama alınan örneklerin laboratuvarında incelenmesi ve son aşama ise rezervuar sisteminin karakterize edilmesi olarak nitelendirilebilir.

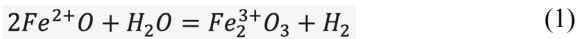
Bu çalışmanın amacı doğal hidrojenin oluşumu, rezervuarların karakteristik özellikleri ve karada yapılan doğal hidrojen arama tekniklerinin irdelenmesidir. Karasal arama teknikleri genel olarak;

uzaktan algılama ve literatür verilerine dayalı ön saha seçimi, arazide gaz ölçümü ve örnekleme, jeofizik ölçümler (manyetik, gravite, sismik vb.), laboratuvar analizleri ve keşif sondajı aşamalarından oluşmaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında Türkiye'nin doğal hidrojen potansiyeli ve doğal hidrojen aramacılığında izlemesi gereken yol haritası üzerine fikir ve görüşlere de yer verilecektir.

2. Doğal H₂ Oluşumu ve Jeolojik Ortamı

Doğal H₂ oluşumu kapsamında üç ana kategori ön plana çıkmaktadır. İlk kategori Fe²⁺ ile H₂'nin redoks tepkimesine bağlı ortaya çıkan H₂. Bu oluşum şeklinde H₂ jeolojik açıdan serpantinleşme ve hematitleşme bölgelerinde ortaya çıkmaktadır. İkinci kategori, suyun radyasyona maruz kalarak iyonize olması ile (radyoliz) ortaya çıkan H₂. Üçüncü ve son kategori ise organik olgunlaşma ile ortaya çıkan H₂ olarak sınıflandırılabilir (Lévy vd., 2023).

Genel olarak, ilk kategoride bahsedildiği üzere H₂ serpantinleşme ile ortaya çıkan bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Ayrıntılı olarak bakıldığında, peridotitin su ile altere olarak serpantinite dönüşmesi ile meydana gelmektedir. Mineralojik olarak, olivin, serpentine ve manyetite altere olur ve H₂ meydana gelir. Bu süreç 150° ve 350° sıcaklıklarda okyanuslarda (Klein vd., 2013), karasal alanlarda ise düşük sıcaklıklarda ofiyolitik kuşaklarda gözlenmektedir (Neal ve Stanger, 1983; Etiopie, 2017; Vacquand vd., 2018). Serpantinleşme süreci, kimyasal olarak, olivinde bulunan Fe²⁺'nin manyetitte bulunan Fe³⁺'ya oksitlendiği ve içerisinde bulunan H₂O'nun H₂'ye indirgendiği bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Fe²⁺'nin Fe³⁺'ya oksitlendiği kimyasal tepkime aşağıda verilmiştir:



Redoks reaksiyonları, H₂ meydana getiren birçok alterasyon sürecinde gözlenmektedir. Örnek olarak, bantlı demir formasyonlarında manyetitin, maghemit ve hematite altere olma süreçlerinde redoks reaksiyonları gözlenebilmektedir (Geymond vd., 2022). Yapılan çalışmalar, bu tip süreçlerin genellikle kraton bölgelerinde ve düşük sıcaklıklarda meydana geldiğini göstermiştir (Geymond vd., 2023).

İkinci kategoride bahsedilen radyoliz sonucu meydana gelen H₂, uranyum, toryum ve potasyumun radyoaktif bozunma süreci sonucunda su molekülleri ile etkileşime geçerek H ve OH olarak ayrışması olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç genellikle Arkeyan ve Proterozoyik yaşlı uranyum, toryum ve potasyum bulunduran kayaçların bulunduğu bölgelerde gözlenmektedir.

Son olarak, organik maddenin (kömür ve şeylli kömür) yüksek sıcaklıklarda termal olarak ayrışması (piroliz) sonucu serbest gaz olarak H₂ meydana getirdiğini gösteren birçok çalışma mevcuttur (Suzuki vd., 2017; Horsfield vd., 2022; Mahlstedt vd., 2022).

Bahsi geçen kategoriler haricinde derinde bulunan doğal H₂'nin ayrışması (degassing) (Zgonnik, 2020), mekanik etki sırasında ortaya çıkan H₂ (mechanoradical) (Hirose vd., 2011) ve volkanik bölgelerde H₂S' in ayrışması sonucu meydana gelen H₂ diğer potansiyel alanları oluşturmaktadır. Ancak bahsi geçen potansiyel alanlarda yapılmış çok fazla çalışma olmaması nedeniyle bu çalışma kapsamında değerlendirme yapılmayacaktır.

Verilen bilgiler ışığında H₂ üretiminin gözlenebileceği litolojiler gruplanır ise; 1. Grup kayaçları: Bazik ve ultrabazik kayaçlar (peridotit, gabro, bazalt); 2. Grup kayaçları: Demir içeren kayaçlar (bantlı demir formasyonları), sokulum kayaçlar (biyotitçe zengin granit gibi); 3. Grup kayaçları: Radyoaktif element içeriğince zengin kayaçlar; 4. Grup Kayaçları: Organik madde bakımından zengin kömür, şeyl ve şeylli kömür gibi kayaçlar olarak sınıflandırılabilir (Lévy vd., 2023). Sınıflandırmanın tablolaştırılmış hali Çizelge 2'de verilmiştir.

Doğal H₂ potansiyeli bakımından ofiyolitler ile ilişkili olan 1. Grup kayaçlar için Ronda (İspanya) (Etiopie vd., 2016); Antalya (Türkiye) (Etiopie vd., 2011; Etiopie, 2023) (Ofiyolitlerle ilişkili 1. Grup kayaçlar bakımından Türkiye'de birden çok ofiyolit kuşağı teorik olarak potansiyel sunmakta olup Antalya yalnızca literatürde belgelenmiş bir örnektir); Umman (Neal ve Stanger, 1983; Chavagnac vd., 2013); Zambales (Filipinler) (Abrajano vd., 1988); Yeni Kaledonya (Deville ve Prinzhofer, 2016) ve Balkanlar

Çizelge 2- Doğal H₂ aramacılığı için belirlenen hedef litolojiler, mineraller ve ilgili süreçler (Lévy vd., 2023).

	OKYANUSAL KÖKEN	KARASAL KÖKEN		
KAYAÇ GRUBU	1. GRUP	2. GRUP	3. GRUP	4. GRUP
H ₂ ÜRETEK KAYAÇ VEYA ORTAM TİPİ	Okyanusal litosfer, ofiyolitler	Demir İçeren Kayaçlar (Bantlı demir formasyonları)	Granitik ve sedimanter kayaçlar	Organik açıdan zengin kayaçlar (kömür, şeyl, hidrokarbon sahaları)
SÜREÇ	Redoks tepkimeleri	Redoks tepkimeleri	Radyoliz	Organik olgunlaşma
İLGİLİ MİNERALLER	Olivin, piroksen, amfibol, klorit, serpantin, manyetit, pirotit	Olivin, piroksen, amfibol, klorit, serpantin, manyetit, garnet, siderit, pirotit	Uranyum mineralleri, mika, potasyum feldspat, kil mineralleri	Organik maddeler (kerojen)

(Lévy vd., 2023) öne çıkan hedef bölgeler olma potansiyeline sahiptir.

Bantlı demir formasyonlarının varlığı ile ilişkili olan 2. Grup kayaçlar için Brezilya, Avustralya, Amerika Birleşik Devletleri, Namibya ve Rusya ilk akla gelen hedef bölgeler olmaktadır. Bantlı demir formasyonlarının varlığına ek olarak magmatik kayaçlar, Arkeyan ve Prekambriyen kayaçların bulunduğu bölgeler 2. Grup kayaçlar sınıfında değerlendirilebilir. 2. Grup kayaçlar için Fe²⁺ içeren amfibol indirgeyici, su ise oksitleyici olarak düşünülebilir (Lévy vd., 2023). Bu nedenle Fe²⁺ bakımından zengin kayaçlar, suyla gerçekleşen redoks tepkimeleri sayesinde güncel koşullarda H₂ üretebilme potansiyeli taşır. Buna karşılık Fe³⁺ bakımından zengin kayaçlar, H₂ üretiminin geçmişte gerçekleştiğine işaret edebilir; ancak demir zaten oksitlenmiş olduğundan bu kayaçların ilave H₂ üretme potansiyeli düşüktür (Lévy vd., 2023).

Suyun radyolizi sonucu doğal H₂ 'nin meydana geldiği bölgeler için tanımlanan 3. Grup kayaçlar her bölgede farklı ölçeklerde gözlenebilir. 3. Grup kayaçlarının büyük ölçekte gözlemlendiği bölgeler genellikle Arkeyan ve Proterozoyik yaşlı kayaçlardır. Bunun nedeni, uranyum ve toryumca zengin minerallerin bu kayaçların içerisinde bol miktarda bulunmasıdır. Ayrıca radyoliz sürecinin net bir şekilde ayırt edilebilmesi için bölgedeki He varlığı önemli bir indikatör olmaktadır. Çünkü kabukta meydana gelen He yalnızca radyoaktivite ile ilişkilidir. H₂ ve He, Avustralya (Leila vd., 2022), Güney Afrika (Karolytê vd., 2022) ve Amerika'da (Halford vd., 2022) yapılan çalışmalarda beraber bulunmuştur.

4. Grup kayaçlar için, teoride doğal H₂'nin hidrokarbon ve kömür sahaları ile doğrudan bir ilişkisi

olduğunu düşünmek mantıklı olsa bile uygulamada bu durum açık bir şekilde ispatlanamamıştır. Zgonnik, (2020) yaptığı çalışma hidrokarbon ve kömür sahalarında ortaya çıkan H₂ değerlerini sınıflandırmış ve net bir ilişki saptayamamış olsa bile bu sahalarda ana odak H₂ olmadığı için büyük ihtimal ile bölgedeki H₂ miktarı gerçek değer çok altında saptanmıştır.

MTA verileri ve mevcut jeolojik haritalar dikkate alındığında, Türkiye'de 2., 3. ve 4. Grup kayaçlara ait tahmini potansiyel alanlar belirlenebilmektedir. 2. Grup kayaçlar (bantlı demir formasyonları ve Fe açısından zengin magmatik kayaçlar) için Zonguldak–Karabük–Safranbolu çevresindeki Paleozoyik yaşlı demirli formasyonlar, Divriği (Sivas) ve Hekimhan–Hasançelebi (Malatya) manyetit-hematit yatakları ile Doğu Karadeniz magmatik kuşağındaki Fe bakımından zengin sokulum kayaçları öne çıkmaktadır. 3. Grup kayaçlar (U, Th, K açısından zengin granitik ve sedimanter kayaçlar) bakımından Kazdağı masifi (Balıkesir–Çanakkale), Menderes masifi (Aydın–İzmir–Manisa), Kırşehir masifi ve Doğu Pontid granitoidleri potansiyel göstermektedir. 4. Grup kayaçlar (organik maddece zengin kömür, şeyl ve şeylli kömürler) açısından ise Zonguldak taşkömürü havzası, Afşin–Elbistan linyit havzası, Soma–Kınık, Tunçbilek–Seyitömer (Kütahya) ve Çayırhan (Ankara) sahaları sayılabilir. Bu alanlar, mevcut jeolojik veriler ve literatür ışığında teorik olarak doğal H₂ oluşumuna uygun olsa da, sahada yapılmış sistematik doğal H₂ ölçümleri ve doğrulayıcı çalışmalar bulunmamaktadır.

Genel olarak, arama yapılan bölgede bahsi geçen 4 grup kayaç içerisinde herhangi birinin bulunması çalışma alanında doğal H₂ potansiyeline işaret etmektedir. Eğer Çizelge 2'de verilen kayaç gruplarından birden fazlası çalışma alanında mevcut ise başarı olasılığı daha da artmaktadır. Doğal H₂

aramacılığında yalnızca kayaç gruplarına bağlı kalmak hedef saha belirlemede yanıltıcı olabilir. Bu nedenle doğal H_2 varlığına işaret eden indikatörlerden de faydalanmak gerekir.

3. Doğal H_2 Varlığını Gösteren İndikatörler

Potansiyel alanlar, dört hedef kayaç grubundan bir ya da birkaçının varlığına göre belirlendikten sonra doğal H_2 varlığını doğrulamaya yönelik indikatörler araştırılmalıdır. Literatür araştırması ile doğal H_2 çıkış bölgeleri ile H_2 gaz üreten kuyuların varlığı araştırılmalı ve haritalanmalıdır.

Doğal hidrojen için “ekonomik arama derinliği”, jeolojik, teknik ve finansal kısıtlar altında sondaj ve üretimin ekonomik kaldığı üst sınırı ifade eder. Güncel çalışmalar, sızıntı ve birikimlerin çoğunlukla sığ-orta derinliklerde (genellikle <1500 m) yoğunlaştığını; belirli jeolojik ortamlarda 3000 m’ye kadar fizibilitenin tartışılabilirliğini göstermektedir. Hidrojenin hareketliliği ve birikimi, özellikle kırıklı/serpantinleşmiş kayaçlarda, kabuğun orta seviyelerinde daha elverişlidir. Bununla birlikte ~2000–3000 m’nin ötesinde artan basınç-sıcaklık ve azalan geçirgenlik nedeniyle çıkarım teknik olarak mümkün olsa da ekonomik rasyonalite zayıflar. Derinlik eşiği sahaya özgüdür; yapısal süreksizlik ağı, efektif geçirgenlik, radyolitik üretim ve göç yolları gibi parametreler belirleyicidir. Nitekim Mali ve Rusya’da 300–1200 m aralığındaki sığ kuyular üretken sistemlere örnek teşkil etmektedir (Park vd., 2024; Etiyopya ve Orban, 2025; Higgins vd., 2025).

Doğal H_2 aramalarında kullanılabilecek önemli bir saha indikatörü, çözünen gazların suda yarattığı kabarcık ve köpürmelerin sürekli olarak izlenmesidir. H_2 nin suda suda çözünme derecesi artan basınç ile doğru orantılıdır. Basınç yüzeye doğru azalırken H_2 ’nin kaynaktan uzaklaşmasına ve suda kabarcıkların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, serpantinleşme gözlenen ofiyolitik bölgelerde meydana gelebilmektedir. Zengin H_2 bulunduran bu kaynaklar Yeni Kaledonya’da, Umman’da, Filipinler’de ve Balkanlar’da gözlemlenmiştir (Vacquand vd., 2018; Randazzo vd., 2021; Lévy vd.,

2023). Bahsi geçen alanlarda yapılan ölçümlerde suyun yüksek derecede alkaline olduğu ve pH’nın 9’dan yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüksek pH ise serpantinleşme ile ilişkilendirilmiştir (Lévy vd., 2023). Sonuç olarak ofiyolitik kuşaklarda suda gözlenen kabarcıklar bölgede H_2 barındıran kayaçların varlığını tespit edebilmek için önemli bir indikatör olarak değerlendirilmelidir.

Yüzeyde ve bitki örtüsünde olağan dışı olarak gözlenebilen dairesel belirtiler [İngilizcesi: fairy-circles veya sub-circular depression (SCD)] doğal H_2 aramalarında başlıca yüzey morfolojik indikatörlerden biri olarak değerlendirilebilir. Bu tip dairesel şekiller bölgedeki H_2 varlığı hakkında önemli bir indikatör olsa da her dairesel belirtili olan bölgede doğal H_2 bulunabileceği anlamı çıkarılamaz. Literatüre bakıldığında H_2 varlığı ile yüzeydeki dairesel belirtilerin ilişkili olduğu bölgeler; Doğu Avrupa Kratonu, Rusya (Larin vd., 2015); Karolina Sahilleri, Amerika Birleşik Devletleri (Zgonnik vd., 2015), Bourakebougou, Mali (Prinzhofer vd., 2018), Minas Gerasis ve São Francisco Baseni, Brezilya (Prinzhofer vd., 2019; Moretti vd., 2021b) ve Kanguru Adası ve Batı Avustralya, Avustralya (Moretti vd., 2021a; Frery vd., 2021) olarak verilmiştir.

Yüzeydeki dairesel belirtileri saptamak için farklı teknikler kullanılabilir. Bu tekniklerden ilki uydu görüntülerinin morfolojik karakteristiklerinin (boyut, derinlik ve eğim) saptanmasıdır. Dairesel belirtilerin boyutu 25 m’den 1 km’ye kadar çıkabilmektedir (Moretti vd., 2021a). Nadir olarak görülse de dairesel belirtiler birkaç metre yüksekliğinde dom biçimli bir yapı olarak tespit edilebilir. Topoğrafya kullanılarak elde edilen eğim haritalarında ise dairesel belirtiler rahatlıkla tespit edilebilir. Dairesel belirtileri saptamada kullanılabilecek ikinci teknik, multi-spektral anomalilerdir. Moretti vd. (2022) ‘nin yapmış olduğu çalışma Landsat multi-spektral görüntülerden bitki örtüsü endekslerini aerosol bandı ile kombine ederek H_2 barındıran dairesel belirtilerde bitki örtüsünün dairenin kenarlarında olduğunu ve dairenin içinin bitki örtüsünden yoksun olduğunu göstermiştir. Böylece, H_2 barındıran dairesel belirtileri ayırt edilebilir kılmışlardır.

4. Doğal H₂ Aramacılığında Ofis, Saha ve Laboratuvar Çalışmaları

4.1. Doğal H₂ Aramacılığında Ofis Çalışmaları

Genel olarak doğal H₂ aramalarında doğrudan yüzeyde gözlenebilen veya literatürde tespit edilmiş H₂ emareleri, serpantinleşmeyi tespit edebilen jeofizik yöntemler, sulara gözlenen kabarcıklar ve yüzeyde gözlenen dairesel belirtiler olmak üzere dört adet indikatör bulunmaktadır. Belirtilen indikatörler ilgili veri mevcut ise ofis çalışmaları ile hızlı ve ekonomik bir şekilde literatür taraması ve yeniden veri işlem teknikleri ile elde edilebilir. Şekil 2’de doğal H₂ aramaları için uygulanacak ofis çalışmaları aşamalı bir şekilde şematik olarak gösterilmiştir.

4.2. Doğal H₂ Aramacılığında Saha ve Laboratuvar Çalışmaları

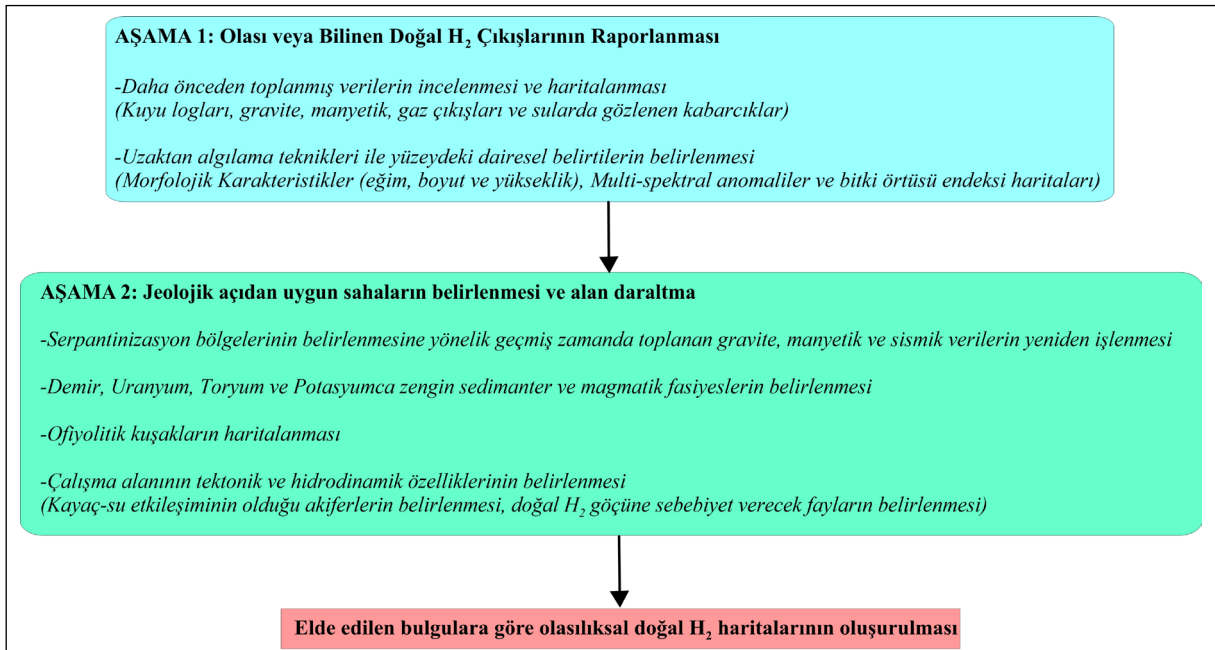
Olasılıksal doğal H₂ dağılım haritaları, ofis çalışmalarında elde edildikten sonra potansiyeli olan bölgeler için saha çalışmaları yapılması gerekmektedir. Saha çalışmaları gaz örnekleme ve sahada yapılan fiziksel parametre ölçümleri olmak üzere ikiye ayrılabilir.

4.2.1. Gaz Örnekleme ve Karakterizasyonu

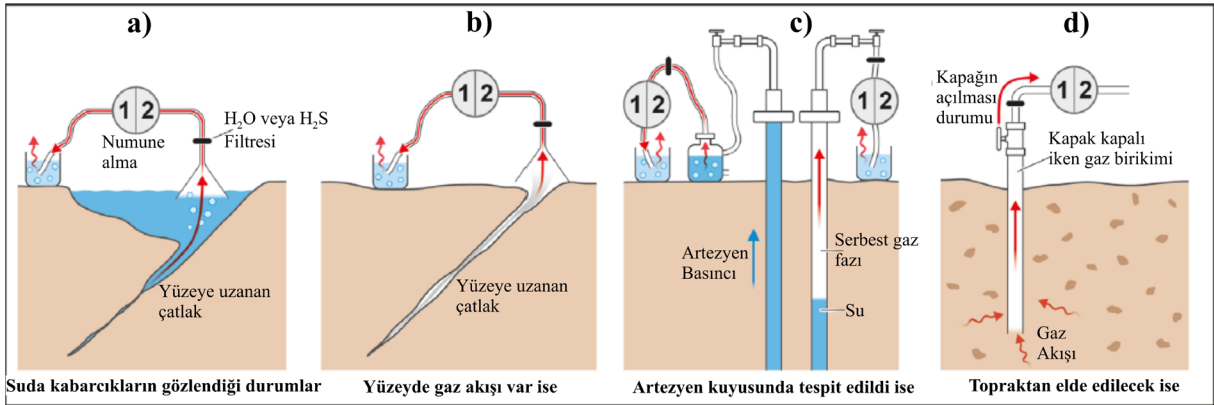
Gaz örnekleme için kaynak tiplerine göre farklı örnekleme yöntemleri kullanılmaktadır. Şekil 3’de bahsedilen farklı kaynak tipleri ve kullanılan örnekleme yöntemleri gösterilmiştir.

Suda kabarcık gözlenen durumlar (Şekil 3a) ve serbest gaz akışı (Şekil 3b) gözlenen durumlar için uygulanacak teknik benzerdir. Teknik kapsamında bir huni gaz akışının gözlemlendiği yerin üzerine ters bir şekilde yerleştirilir. Yerleştirilen huni 100°C üzerindeki sıcaklığa karşı dirençli silikon bir tüpe bağlıdır. Tüpün diğer ucu ise bir su kabına bağlı olmalıdır. Bu sayede su kabı içerisinde gaz kaynaklı kabarcıkların oluşumu gözlenebilir ve gaz akışının tüpün içerisinde kalması sağlanabilir. Bu teknik Pasquet vd. (2022) tarafından detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Artezyen kuyusunda tespit edilen doğal doğal H₂ (Şekil 3c) için uygulanacak teknik oldukça basittir. Bu teknik Guélard vd., 2017 tarafından detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Kuyularda gaz akışı için oluşturulan kanal hali hazırda kuyu muhafaza borusu tarafından sağlanmış durumdadır. Kapalı bir artezyen kuyusunda, artezyen basıncına bağlı olarak muhafaza borusu içerisinde serbest gaz fazı ve basınçlı su birikmektedir.



Şekil 2- H₂ aramacılığında ofis çalışmaları kapsamında indikatörlerin kullanımı ve doğal H₂ emareleri olan bölgelerin belirlenmesi için izlenecek adımlar.



Şekil 3- Şematik gaz örnekleme yöntemleri: (a) suda kabarcık gözlenen durumlar, (b) serbest gaz akışı, (c) kuyudan örnekleme, (d) topraktan örnekleme (Lévy vd., 2023).

Serbest gaz fazı bulunan borunun ucu yarı kapalı bir kaba bir vana ile bağlanarak gaz elde edilebilir.

Diğer tekniklerin aksine topraktan yapılan doğal H_2 örneklemeleri (Şekil 3d) oldukça zordur çünkü gaz akışı sürekli değildir ve çok azdır. Bu nedenle topraktan yapılan gaz örneklemeleri konusunda çalışmalar devam etmekte ve yeni teknikler üzerinde çalışılmaktadır. Bu çalışmada günümüzde kullanılan ve kısmi olarak başarı sağlanan topraktan örnekleme tekniği anlatılacaktır. İlk olarak doğal H_2 gözlenen alanda yaklaşık 1 metre derinliğinde bir kuyu açılır. Daha sonra altında birkaç deliği bulunan bir tüp açılan sondaj deliğine yerleştirilir. Bu sayede kuyuda bulunan gaz tüpün tepesine doğru yönlendirilir. Tüpün diğer ucundaki valf kapatılarak, tüpte gaz birikmesi sağlanır. Gaz birikme süreleri gaz akışı ile ilgilidir. Bu nedenle saatler veya günler ölçeğinde değişebilmektedir (Lévy vd., 2023).

Bahsi geçen yöntemlerden en uygun olanı ile gaz örnekleri alındıktan sonra gaz kimyası ve karakterizasyonu yapılmalıdır. Bu kapsamda gaz kromatografisi (GC), H_2 ile birlikte CH_4 , N_2 , CO_2 ve He gibi eşlik eden gazları tanımlayıp inceler; özellikle Termal İletkenlik Dedektörü (TCD) ile hızlı ve maliyet-etkin izleme olanağı sağlar. Elde edilen bileşim yüzdeleri, elverişli jeolojik ortamlarda H_2 'nin ppm düzeylerinden %20–30'un üzerine çıkabildiğini gösterebilir (ör. North Perth Basin; Vidavskiy vd., 2024). Tanısal gaz oranları (örn. H_2/CH_4 , H_2/N_2) köken yorumunda kullanılır: $H_2/N_2 > 0,1$ genellikle doğal sızıntı lehinedir; yüksek He/H_2 oranı ise derin

kabuksal/manto katkısını düşündürür (Han vd., 2022). Devamında İzotop Oranı Kütle Spektrometrisi (IRMS) ile H, C, N ve He izotopları analiz edilerek süreç ve kaynak ayrımı güçlendirilir.

4.2.2. Sahada Yapılan Jeofizik Ölçümler

Doğal H_2 aramacılığında 1. grup (okyanusal litosfer, ofiyolitler) ve 2. grup (Demir İçeren Kayaçlar) (Bantlı demir formasyonları) hedef kayaçların belirlenmesinde manyetik ölçümler önemli bulgular ortaya koyabilmektedir. Ofiyolitik bölgelerde manyetik verinin anomali oluşturmasının sebebi genel hatları ile yaş ve soğuma süreçlerindeki farklılık, litolojik farklılık, hidrotermal alterasyon veya denizsuyu ile oluşan alterasyon nedeniyle bir kontrast oluşturmaktadır ve bu bölgeler manyetik anomali haritasında belirlenebilmektedir. 2. grup hedef kayaçlar için ise manyetik anomali demir içeriği bakımından zengin kayaçların içerisinde bulunan mineral içeriği (manyetit, hematit ve pirotit) ve manyetik duyarlılık değerleri nedeniyle bir kontrast oluşturmaktadır.

Lefeuvre vd. (2021), Pireneler'in batısında yaptığı çalışmada jeofizik yöntemlerden sismik, gravite ve manyetik yöntemlerin doğal H_2 aramalarında serpantinleşme gözlenen bölgelerde iyi yanıt verdiğini göstermiştir. Doğrudan bir H_2 belirtisi yok ise 2B ve 3B sismik yansıma verilerini yorumlayarak yer altında bulunan potansiyel olarak doğal H_2 içeren alanlar belirlenebilir. Sismik yansıma verilerinde gaz bacaları ve sediman birim üzerinde gaz çıkışı

nedeniyle gözlenen izler (pockmark) bölgedeki gaz akışını işaret eder ve gaz kimyası, sismik yöntemler ile belirlenemese bile doğal H₂ varlığına işaret edebilmektedir (Leila vd., 2022).

Mauléon Baseninde, toplanan gravite verilerinde Bouguer anomali haritası oluşturulmuş ve bu harita da 20 mGal'in üstündeki yüksek pozitif anomalilerin sığ derinlikte bulunan bir kaynaktan geldiğini ve bu kaynağın ise alt kabuk veya manto kökenli kayaçlardan geldiğini öne sürmüştür (Vacher ve Souriau, 2001; Pedreira vd., 2007; Pedrera vd., 2017; Özsöz, 2021; Özsöz ve Toker, 2022). Mauléon Baseninde toplanan manyetik anomalilerinde, gravite anomalilerine benzer bir yanıt verdiği ve manto kayaçlarının bulunduğu alanlarda anomali saptandığı belirtilmiştir. Ayrıca manyetik suseptibilite değerlerinin serpantinleşme derecesi ile ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Toft vd., 1990; Oufi vd., 2002; Özsöz ve Pamukçu, 2022). Litosferik mantoda bulunan ultramafik kayaçlar serpantinleşme sırasında paramanyetik özellik gösterir ve bu durum manyetik oluşumunu etkiler dolaylı olarak da manyetik anomali oluşumuna neden olur. Son olarak Mauléon Baseninin batısında toplanan sismik yansıma verilerinden Full Waveform Inversion (FWI) ile sismik hızlar elde edilmiş ve bulunan hızlar P dalgası için kabaca 7,3 km/sn, S dalgası için yaklaşık 4,2 km/sn olarak verilmiştir. Elde edilen hız değerleri de 8-10 km derinlikte yükselen serpantinleşmiş magmatik bir sokulumun varlığını teyit etmiştir (Christensen, 2004; Wang vd., 2016). Sonuç olarak jeofizik yöntemlerden sismik, gravite ve manyetik yöntemler doğal H₂'nin meydana gelmesinde önemli bir yeri olan serpantinleşme bölgelerinin bulunmasında önemli bir indikatör olarak ekonomik çözümler sunabilmektedir.

Manyetik anomaliler toplandıktan sonra saha için ısı akısı haritaları oluşturulabilir ve hidrojenin oluşumu ve göçü hakkında bilgi edinilebilir. Ancak doğal H₂ aramacılığında bu haritalar oluşturulurken radyojenik ısı üretimi de hesaba katılmalı bu nedenle mutlaka sahada kuyu verileri olmalı ve buradan yapılacak ölçümler ile ısı akısı haritaları desteklenmelidir.

Ölçümler sonucu elde edilen manyetik veri geleneksel arama jeofiziği çalışmalarındaki toplam manyetik alan (birimi: nT) şeklinde kullanılarak

çalışma alanına ait önemli bulgular elde edilebilir. Ancak doğal H₂ aramacılığında geleneksel toplam manyetik alana ek olarak doğrudan malzemenin manyetik özelliği ile ilgili olan manyetizasyon genliği (birimi: A/m) kullanılarak özellikle demirce zengin kayaçların saptanması sağlanabilmektedir. Manyetizasyon genliğinin elde edilebilmesi için indüklenen manyetik alan ve kalıntı mıknatıslanma etkilerini yansıtan suseptibilite değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrenin elde edilebilmesi için vektörel manyetik ters çözüm işleminin yapılarak hem indüklenmiş manyetik alan hem de kalıntı mıknatıslanmadan etkilenen manyetik suseptibilite değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir (MacLeod vd., 2013). Bunun nedeni yüksek derecede manyetize olmuş kayaçlarda hem yer manyetik alanın hem de kalıntı mıknatıslanma etkisinin ihmal edilemeyecek derecede büyük olmasından kaynaklıdır. Daha sonraki aşamada da manyetik suseptibilite ile toplam manyetik alan şiddeti çarpılarak manyetizasyon genliği elde edilebilir.

Çizelge 2'de verilen 3. Grup (Radyoliz) kayaçların hakim olduğu bölgelerde ise radyometrik prospeksiyon etüdları büyük bir önem arz etmektedir. Bu tip ortamlarda hidrojen üretimi uranyum, toryum ve potasyumun radyoaktif bozunması sırasında su moleküllerinin parçalanmasına dayandığı için bölgedeki uranyum, toryum ve potasyum dağılım haritaları büyük önem arz etmektedir. Özellikle havadan toplanan radyometrik veriler bu tip kayaçların dominant olduğu bölgelerde alan daraltma imkanı sağlayacaktır.

Organik açıdan zengin kayaçların veya 4. Grup kayaçların bulunduğu bölgelerdeki hidrojen üretimi, organik madde ile ilişkili olduğu için bu tip ortamlarda hidrokarbon aramacılığında da aktif olarak kullanılan sismik yansıma yöntemi ile bölgedeki rezervuarın tanımlanması sağlanabilecektir.

Belirtilen kayaç grupları içerisinde en belirgin anomali veren kayaç grupları 1. ve 2. Grup kayaçlardır. Bu nedenle bu kayaç gruplarına odaklanılması arama projesinin başarı oranını arttıracaktır. Çalışma sahasında 1'den fazla kayaç grubunun birlikte gözlemlenmesi doğal H₂ keşfinin olasılığını arttıran bir etmendir.

Doğal H_2 aramacılığında kuyu loglarının kullanımı, hidrojen açısından zengin yeraltı ortamlarının dolaylı olarak tespiti ve karakterizasyonu için kritiktir. Özellikle NMR (Nükleer Manyetik Rezonans) logları, sedimanter ve kristalen kayalarda erişilebilir gözenekliliği ve reaktif mineral yüzeylerini belirleyerek H_2 göçü ve depolanması açısından değerli bilgi sağlar. Nötron porozite logları hidrojen varlığını ima edebilse de, su-hidrojen ayrımını yapabilmek için rezistivite logları ile birlikte yorumlanmalıdır. Spektral gama-ray logları, uranyum ve toryum gibi radyoaktif elementlerin dağılımını ortaya koyarak radyolitik H_2 üretimine elverişli zonları işaret eder. Akustik/sonik loglar kırık yoğunluğu ve litolojik özellikleri değerlendirerek H_2 hareketliliğini etkileyen yapısal geçirgenliği sınırlar. Sondaj çamuru gaz logları ise sondaj sırasında serbest H_2 'yi gerçek zamanlı izleme olanağı sunar (atmosfere gaz kaybı gibi sınırlamalar dikkate alınmalıdır). En güvenilir tanımlama, çoklu logların çapraz-grafik (crossplot) analizleriyle bütüncül yorumlanmasıyla elde edilir. Bu nedenle çalışma kapsamına NMR, nötron porozite+rezistivite, spektral gama-ray, akustik/sonik ve çamur gaz loglarının birlikte dahil edilmesi önerilir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Başlangıçta doğal H_2 tespitleri çoğunlukla rastlantısal olup hidrokarbon aramalarına eşlik eden kuyularda raporlanmıştır ancak günümüzde hedef litolojiler, indikatörler ve çok disiplinli veri setleri (yüzey gaz ölçümleri, jeofizik ve uzaktan algılama) kullanılarak doğrudan doğal H_2 'yi hedefleyen arama çalışmaları yürütülebilmektedir. Toprakten alınan gaz örnekleri ve kayaç analizleri arama riskini düşürmek için kullanılabilir. Ayrıca yüzey indikatörleri ve saha çalışmaları da bölgedeki doğal H_2 varlığını tespit etmek açısından faydalı sonuçlar verebilmektedir. Ancak sahanın ekonomik üretim potansiyeline sahip olup olmadığını belirlemek için bütün teknikler bir arada kullanılmalı ve kapsayıcı bir model oluşturulmalıdır. Bu kapsayıcı model havza ölçeğinde değerlendirme, ticari değerlendirme, saha özelinde değerlendirme ile keşif sondajı ve değerlendirme olmak üzere dört ana başlıkta incelenebilir.

Dört ana başlığın ilki olan havza ölçeğinde değerlendirme kapsamında çalışma alanı geniş

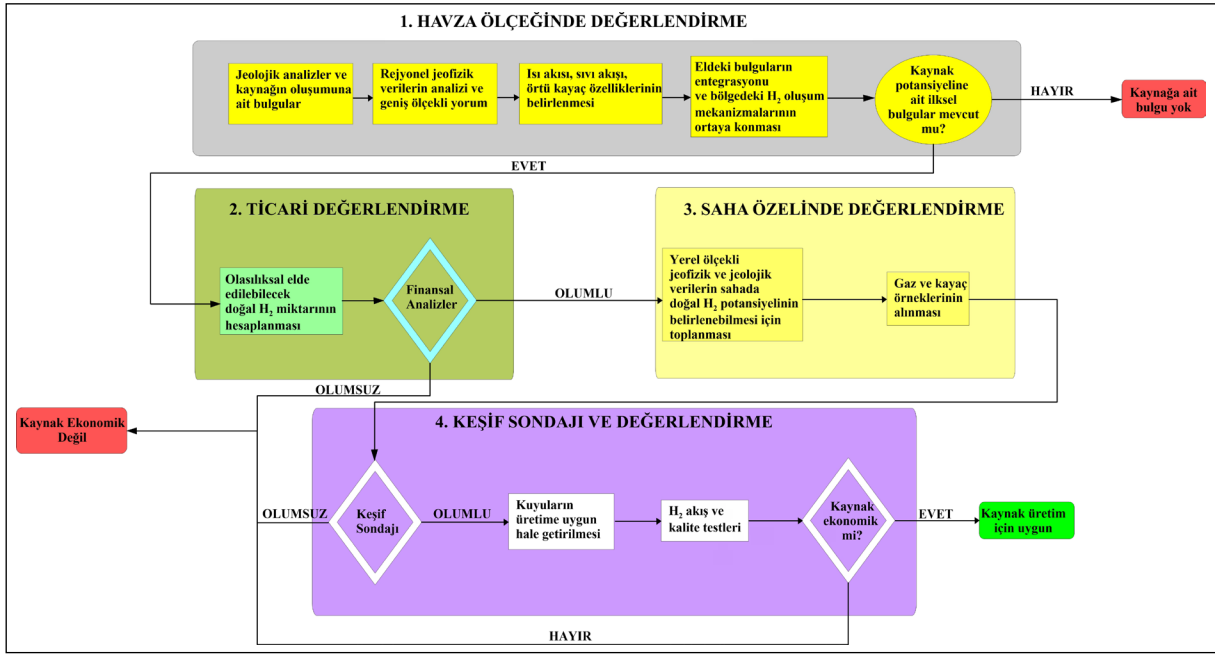
ölçekli incelenir (Şekil 2). Eğer mevcut ise daha önce toplanmış olan uzaktan algılama, jeolojik ve jeofizik verileri yorumlanarak çalışma alanındaki H_2 potansiyeli ve H_2 oluşum mekanizmaları araştırılır. Ayrıca çalışma alanına ait geniş ölçekli ısı akısı, sıvı akışı ve örtü kayaç özelliklerine dair analizler yapılır. Çalışma alanının doğal H_2 açısından geniş ölçekli potansiyeli elde bulunan veriler ışığında belirlenir. Havza ölçeğinde değerlendirme aşamasında daha önceden farklı amaçlar ile toplanan veri setleri kaynağa ait bulguların belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle arama çalışmalarına başlamadan önce kapsamlı bir veritabanı oluşturmak oldukça önemlidir.

İkinci ana başlıkta ön ticari değerlendirme (ön-fizibilite) gerçekleştirilir: Saha erişimi ve altyapı seçenekleri, sermaye giderleri ile işletme giderleri için kaba büyüklük tahminleri, vergi/rejim etkileri ve taşıma-depolama zinciri senaryo düzeyinde gözden geçirilir. Bu aşamada olası doğal H_2 hacimleri için olasılıksal aralıklar hesaplanır, başlıca teknik ve ticari riskler tanımlanır; amaç, ayrıntılı saha çalışmalarına (3. aşama) geçiş için eleme/geçit kararı vermektir. Dolayısıyla burada yapılan analizler nihai kârlılık kararı değildir.

Üçüncü ana başlık olan saha özelinde değerlendirme aşamasında ise ilk ana başlıkta yapılan uzaktan algılama, jeolojik ve jeofizik çalışmalar yerel ölçekli ve daha ayrıntılı bir şekilde sahada uygulanır. Bu çalışmalara ek olarak, hidrojen kaynağının bileşimi ve kalitesini analiz etmek için gaz ve kaya örnekleri alınır (Şekil 3).

Son aşama olan keşif sondajı ve değerlendirme aşamasında ise ilk olarak yer altından doğrudan örnekler alabilmek için sondaj kuyuları açılır. Böylece hidrojenin varlığı ve özellikleri doğrulanır. Sondaj başarılı olduktan sonra, kuyular hidrojen üretimine hazır hale getirilir. Kuyuların uygun şekilde kapatılması ve donatılması sağlanır. Daha sonra kuyularda akış ve H_2 kalite testi yapılır. Bu adım, kaynağın ekonomik olup olmadığını belirler. Şekil 4'te doğal H_2 aramalarında kullanılması gereken kapsayıcı model diyagramı gösterilmektedir.

Şekil 4'te verilen bütüncül model şeması doğal H_2 aramalarında uygulanması gereken adımları



Şekil 4- Doğal H₂ aramalarında kullanılması gereken bütüncül model diyagramı.

genel hatları ile açıklamaktadır. Bu aşamalar arama projesinde eksiksiz olarak yerine getirilmelidir. Arama projesindeki başarı, teknik ve finansal açıdan doğru değerlendirmelerin yapılmasına bağlı olduğu kadar farklı mesleklerin multi-disipliner çalışma kabiliyetine bağlıdır.

Ülkemiz H₂ üreten ortam ve kayac tipleri bölümünde belirtilen kayac grupları bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca geçmişten günümüze kadar gelen jeoloji ve jeofizik etüdler düşünüldüğünde veritabanı açısından zengin bir veri tabanına da sahip olduğu açıktır. Enerji dönüşümü açısından atılım yapılabilmesi açısından doğal H₂ aramalarına başlanması büyük önem arz etmektedir. Unutulmamalıdır ki, gelecekte yapılacak olan tartışmalar doğal H₂ kaynaklarının verimliliği veya mevcut olup olmadığı üzerine değil, rezervuarların nerede olduğu ve üretim için ekonomik olup olmadığı üzerine yapılacaktır.

Katkı Belirtme

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'ne, bizlere multidisipliner çalışma fırsatı sunduğu için teşekkür ederiz.

Değinilen Belgeler

- Abrajano, T. A., Sturchio, N. C., Bohlke, J. K., Lyon, G. L., Poreda, R. J., Stevens, C. M. 1988. Methane-hydrogen gas seeps, Zambales Ophiolite, Philippines: Deep or shallow origin?, *Chemical Geology* 71(1-3), 211-222. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90116-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90116-7)
- Boreham, C. J., Edwards, D. S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., van der Wielen, S., Champion, D., Blewett, R., Feitz, A., Henson, P. A. 2021. Hydrogen in Australian natural gas: Occurrences, sources and resources, *The Australian Energy Producers Journal* 61(1), 163. <https://doi.org/10.1071/aj20044>
- Chavagnac, V., Monnin, C., Ceuleneer, G., Boulart, C., Hoareau, G. 2013. Characterization of hyperalkaline fluids produced by low-temperature serpentinization of mantle peridotites in the Oman and Ligurian ophiolites, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14(7), 2496-2522. <https://doi.org/10.1002/ggge.20147>
- Christensen, N. I. 2004. Serpentinities, peridotites, and seismology, *International Geology Review* 46(9), 795-816. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.9.795>
- Çelik, D., Yıldız, M. 2017. Investigation of hydrogen production methods in accordance with green

- chemistry principles. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(36), 23395–23401. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.104>
- Davies, K., Esteban, L., Keshavarz, A., Iglauer, S. 2024. Advancing natural hydrogen exploration: Headspace gas analysis in water-logged environments. *Energy and Fuels* 38(3), pp.2010–2017.
- Déville, E., Prinzhofer, A. 2016. The origin of N₂-H₂-CH₄-rich natural gas seepages in ophiolitic context: A major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia, *Chemical Geology* 440, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.011>
- Diallo, A., Cissé, C. S. T., Lemay, J., Brière, D. J. 2022. La découverte de l'hydrogène naturel par Hydroma, un « Game Changer » pour la transition énergétique, *Annales Des Mines - Réalités Industrielles* 2(4), 154–160. <https://doi.org/10.3917/rindu1.224.0154>
- Etiopé, G. 2017. Abiotic Methane in Continental Serpentinization Sites: An Overview, *Procedia Earth and Planetary Science* 17, 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.006>
- Etiopé, G. 2023. Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): Gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(25), pp.9172–9184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025>
- Etiopé, G., Orbán, A. 2025. Surface gas geochemical exploration for natural hydrogen: Uncertainties and holistic interpretation. *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage and Transportation*.
- Etiopé, G., Schoell, M., Hosgörmez, H. 2011. Abiotic methane flux from the Chimaera seep and Tekirova ophiolites (Turkey): Understanding gas exhalation from low temperature serpentinization and implications for Mars, *Earth and Planetary Science Letters* 310(1–2), 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.08.001>
- Etiopé, G., Vadillo, I., Whiticar, M. J., Marques, J. M., Carreira, P. M., Tiago, I., Benavente, J., Jiménez, P., Urresti, B. 2016. Abiotic methane seepage in the Ronda peridotite massif, southern Spain, *Applied Geochemistry* 66, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.12.001>
- Frery, E., Langhi, L., Maison, M., Moretti, I. 2021. Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(61), 31158–31173. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.023>
- Geymond, U., Briolet, T., Combaudon, V., Sissmann, O., Martinez, I., Duttine, M., Moretti, I. 2023. Reassessing the role of magnetite during natural hydrogen generation, *Frontiers in Earth Science* 11, 1169356. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1169356>
- Geymond, U., Ramanaidou, E., Lévy, D., Ouaya, A., Moretti, I. 2022. Can Weathering of Banded Iron Formations Generate Natural Hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa, *Minerals* 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020163>
- Guélard, J., Beaumont, V., Rouchon, V., Guyot, F., Pillot, D., Jézéquel, D., Ader, M., Newell, K. D., Déville, E. 2017. Natural H₂ in Kansas: Deep or shallow origin, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18(5), 1841–1865. <https://doi.org/10.1002/2016GC006544>
- Halford, D. T., Karolytė, R., Barry, P. H., Whyte, C. J., Darrah, T. H., Cuzella, J. J., Sonnenberg, S. A., Ballentine, C. J. 2022. High helium reservoirs in the Four Corners area of the Colorado Plateau, USA, *Chemical Geology* 596. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120790>
- Han, S., Tang, Z., Wang, C., Horsfield, B., Wang, T., Mahlstedt, N. 2022. Hydrogen-rich gas discovery in continental scientific drilling project of Songliao Basin, Northeast China: New insights into deep Earth exploration. *Science Bulletin* 67(10), 1003–1006. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.02.008>
- Higgins, P.M., Song, M., Warr, O., Sherwood Lollar, B. 2025. Natural H₂ and sulfate production via radiolysis in low porosity and permeability crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 130(6), p.e2025JG008863. <https://doi.org/10.1029/2025JG008863>
- Hirose, T., Kawagucci, S., Suzuki, K. 2011. Mechanoradical H₂ generation during simulated faulting: Implications for an earthquake-driven subsurface biosphere, *Geophysical Research Letters* 38(17), 17303. <https://doi.org/10.1029/2011GL048850>
- Horsfield, B., Mahlstedt, N., Weniger, P., Misch, D., Vranjes-Wessely, S., Han, S., Wang, C. 2022. Molecular hydrogen from organic sources in the deep

- Songliao Basin, P.R. China, *International Journal of Hydrogen Energy* 47(38), 16750–16774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.208>
- Jackson, O., Lawrence, S.R., Hutchinson, I.P., Stocks, A.E., Barnicoat, A.C., Powney, M. 2024. Natural hydrogen: Sources, systems and exploration plays. *Geoenergy* 2(1), pp.geoenergy2024-002. <https://doi.org/10.1144/geoenergy2024-002>
- Johnsgard, S.K. 1988. The fracture pattern of north-central Kansas and its relation to hydrogen soil gas anomalies over the midcontinent rift system. University of Kansas, Kansas.
- Karolytė, R., Warr, O., van Heerden, E., Flude, S., de Lange, F., Webb, S., Ballentine, C. J., Sherwood Lollar, B. 2022. The role of porosity in H₂/He production ratios in fracture fluids from the Witwatersrand Basin, South Africa, *Chemical Geology* 595. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120788>
- Klein, F., Bach, W., McCollom, T. M. 2013. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks, *Lithos* 178, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008>
- Klein, F., Marschall, H. R., Bowring, S. A., Humphris, S. E., Horning, G. 2017. Mid-ocean ridge serpentinite in the Puerto Rico Trench: From seafloor spreading to subduction, *Journal of Petrology* 58(9), 1729–1754. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx071>
- Larin, N., Zgonnik, V., Rodina, S., Deville, E., Prinzhofer, A., Larin, V. N. 2015. Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia, *Natural Resources Research* 24(3), 369–383. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>
- Lefevre, N., Truche, L., Donzé, F. V., Ducoux, M., Barré, G., Fakoury, R. A., Calassou, S., Gaucher, E. C. 2021. Native H₂ Exploration in the Western Pyrenean Foothills, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22(8). <https://doi.org/10.1029/2021GC009917>
- Leila, M., Loiseau, K., Moretti, I. 2022. Controls on generation and accumulation of blended gases (CH₄/H₂/He) in the Neoproterozoic Amadeus Basin, Australia, *Marine and Petroleum Geology* 140. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105643>
- Lévy, D., Roche, V., Pasquet, G., Combaudon, V., Geymond, U., Loiseau, K., Moretti, I. 2023. Natural H₂ exploration: tools and workflows to characterize a play, *Science and Technology for Energy Transition* 78, 27.
- MacLeod, I. N., Ellis, R. G. 2013. Magnetic Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. A Forum on the Application of Remanent Magnetisation and Self-Demagnetisation Estimation to Mineral Exploration. 23rd ASEG Conference and Exhibition, 11-14 August 2013, Melbourne.
- Mahlstedt, N., Horsfield, B., Weniger, P., Misch, D., Shi, X., Noah, M., Boreham, C. 2022. Molecular hydrogen from organic sources in geological systems, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 105. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104704>
- Mével, C. 2003. Serpentinisation des péridotites abyssales aux dorsales océaniques, *Geoscience* 335 (10–11), 825–852. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.08.006>
- Moretti, I., Brouilly, E., Loiseau, K., Prinzhofer, A., Deville, E. 2021a. Hydrogen emanations in intracratonic areas: New guide lines for early exploration basin screening, *Geosciences (Switzerland)* 11(3). <https://doi.org/10.3390/geosciences11030145>
- Moretti, I., Geymond, U., Pasquet, G., Aimar, L., Rabaute, A. 2022. Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 47(84), 35588–35607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.135>
- Moretti, I., Prinzhofer, A., Françolin, J., Pacheco, C., Rosanne, M., Rupin, F., Mertens, J. 2021b. Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a Brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(5), 3615–3628. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.026>
- Murray, J., Clément, A., Fritz, B., Schmittbuhl, J., Bordmann, V., Fleury, J. M. 2020. Abiotic hydrogen generation from biotite-rich granite: A case study of the Soultz-sous-Forêts geothermal site, France, *Applied Geochemistry* 119. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104631>
- Neal, C., Stanger, G. 1983. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman, *Earth and Planetary Science Letters* 66(C), 315–320. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90144-9)
- Oufi, O., Cannat, M., Horen, H. 2002. Magnetic properties of variably serpentinized abyssal peridotites, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107(B5). <https://doi.org/10.1029/2001jb000549>

- Özsöz, İ. 2021. İlk_Inv: A Matlab Based Algorithm for Rapid Computation of Pseudo-3D Density Contrast Distribution by using Bouguer Gravity Data, *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration* 166(166), 1–36. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.959011>
- Özsöz, İ., Pamukçu, A. 2022. Interpretation of the magnetic anomalies over the Mid-Atlantic Ocean Ridge using Swarm-A satellite, *Geofizika* 39(1), 1–23. <https://doi.org/10.15233/gfz.2022.39.3>
- Özsöz, İ., Toker, C. E. 2022. Interpretation of satellite gravity anomalies with pseudo-depth slicing method filter in Turkey, *Bulletin Of The Mineral Research and Exploration* 1–39. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.974936>
- Park, M., Choi, H., Choi, H., Lee, C., Jung, S.P. 2024. Natural Hydrogen, the Ultimate Green Energy: Current Status and Prospects. *J Korean Soc Environ Eng* 46(9), 485–497. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.9.485>
- Pasquet, G., Hassan, R. H., Sissmann, O., Varet, J., Moretti, I. 2022. An Attempt to Study Natural H₂ Resources across an Oceanic Ridge Penetrating a Continent: The Asal–Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti), *Geosciences (Switzerland)* 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010016>
- Patonia, A., Lambert, M., Lin, N., Shuster, M., Austin, B.E.G.U. 2024. Natural (geologic) hydrogen and its potential role in a net-zero carbon future: Is all that glitters gold. *Oxford Institute for Energy Studies*.
- Pedreira, A., García-Senz, J., Ayala, C., Ruiz-Constán, A., Rodríguez-Fernández, L. R., Robador, A., González Menéndez, L. 2017. Reconstruction of the Exhumed Mantle Across the North Iberian Margin by Crustal-Scale 3-D Gravity Inversion and Geological Cross Section, *Tectonics* 36(12), 3155–3177. <https://doi.org/10.1002/2017TC004716>
- Pedreira, D., Pulgar, J. A., Gallart, J., Torné, M. 2007. Three-dimensional gravity and magnetic modeling of crustal indentation and wedging in the western Pyrenees-Cantabrian Mountains, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112(12). <https://doi.org/10.1029/2007JB005021>
- Prinzhofer, A., Moretti, I., Françolin, J., Pacheco, C., D’Agostino, A., Werly, J., Rupin, F. 2019. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂ -emitting structure, *International Journal of Hydrogen Energy* 44(12), 5676–5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
- Prinzhofer, A., Tahara Cissé, C. S., Diallo, A. B. 2018. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali), *International Journal of Hydrogen Energy* 43(42), 19315–19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- Proskurowski, G., Lilley, M. D., Kelley, D. S., Olson, E. J. 2006. Low temperature volatile production at the Lost City Hydrothermal Field, evidence from a hydrogen stable isotope geothermometer, *Chemical Geology* 229(4), 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.11.005>
- Randazzo, P., Caracausi, A., Aiuppa, A., Cardellini, C., Chiodini, G., D’Alessandro, W., Li Vigni, L., Papic, P., Marinkovic, G., Ionescu, A. 2021. Active Degassing of Deeply Sourced Fluids in Central Europe: New Evidences From a Geochemical Study in Serbia, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22(11). <https://doi.org/10.1029/2021GC010017>
- Smith, N. J. P., Shepherd, T. J., Styles, M. T., Williams, G. M. 2005. Hydrogen exploration: A review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe, *Petroleum Geology Conference Proceedings* 6(0), 349–358. <https://doi.org/10.1144/0060349>
- Suzuki, N., Saito, H., Hoshino, T. 2017. Hydrogen gas of organic origin in shales and metapelites, *International Journal of Coal Geology* 173, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.02.014>
- Toft, P. B., Arkani-Hamed, J., Haggerty, S. E. 1990. The effects of serpentinization on density and magnetic susceptibility: A petrophysical model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 65(1–2), 137–157. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90082-9)
- Vacher, P., Souriau, A. 2001. A three-dimensional model of the Pyrenean deep structure based on gravity modelling, seismic images and petrological constraint, *Geophysical Journal International* 145(2), 460–470. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540X.2001.01393.x>
- Vacquand, C., Deville, E., Beaumont, V., Guyot, F., Sissmann, O., Pillot, D., Arcilla, C., Prinzhofer, A. 2018. Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H₂-CH₄-N₂ gas mixtures, *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta 223, 437–461. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.018>
- Vidavskiy, V., Rezaee, R., Larin, N., Dorrington, R., Spivey, M., Vidavskiy, V. 2024. Natural Hydrogen in North Perth Basin, WA Australia: Detection in Soil Gas for Early Exploration. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0532.v1>
- Wang, Y., Chevrot, S., Monteiller, V., Komatitsch, D., Mouthereau, F., Manatschal, G., Sylvander, M., Diaz, J., Ruiz, M., Grimaud, F., Benahmed, S., Pauchet, H., Martin, R. 2016. The deep roots of the western Pyrenees revealed by full waveform inversion of teleseismic P waves, Geology 44(6), 475–478. <https://doi.org/10.1130/G37812.1>
- Wang, L., Jin, Z., Chen, X., Su, Y., Huang, X. 2023. The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen. Energies 16(5), 2400).
- Zgonnik, V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. Earth-Science Reviews 203.
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N., Pillot, D., Farrell, K. M. 2015. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA), Progress in Earth and Planetary Science 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0062-5>