

## Beyaz Hidrojen

Lütfi TAŞKIRAN<sup>1</sup> ve Ejder YAPICI<sup>1</sup>

### Öz

Hidrojen hafif bir gazdır. Yoğunluğu havanın 1/14'ü kadar olan hidrojen atmosfer basıncında 253°C'de sıvı hale gelmektedir. 21. yüzyılın enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilen hidrojene yönelik çeşitli Ar-Ge faaliyetleri giderek hız kazanmaktadır. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmekte ve böylelikle elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Günümüzde birincil enerji kaynağı olarak roket yakıtı vb. amaçlarla kullanılıyor olmasına rağmen gelecekteki enerji sistemlerinde daha büyük ve önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Uzun mesafeli uçuşlar ve endüstriyel ısıtma gibi kolayca elektrikleştirilemeyen süreçlerin karbon ayak izini azaltmak için çözümler sunabileceği düşünülmektedir. İşin püf noktası, hidrojenin büyük çoğunluğunun enerji tüketen ve atmosfere büyük miktarda karbondioksit salan bir süreçle doğal gaz kullanılarak üretilmesidir. Beyaz hidrojen, doğal olarak oluşmuş, yani jeolojik ya da biyolojik süreçlerle yeraltında oluşmuş hidrojen gazıdır. Diğer hidrojen türlerinden farklı olarak beyaz hidrojen, endüstriyel bir işlem veya enerji kaynağı kullanılarak üretilmez. Bunun yerine, yeraltında doğal olarak oluşan ve depolanan hidrojen rezervlerinden elde edilir. Beyaz hidrojen, hidrojen ekonomisi ve enerji sektörü için önemli bir doğal kaynak potansiyeli olabilir. Ancak bu alandaki araştırmalar ve keşifler henüz başlangıç aşamasında olduğundan, beyaz hidrojenin endüstriyel ve ticari alanda ne kadar uygulanabilir olduğunun tespiti zaman alacaktır. Bu nedenle, beyaz hidrojen konusu, enerji ve çevre bilimleri alanında gelecekte daha fazla araştırılmaya ihtiyaç duyulan bir konudur.

### 1. Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi Nedir?

Hidrojen, bir proton ve bir elektrondan oluşan, dünya üzerindeki en basit ve en yaygın olarak bulunan elementtir. Hidrojen kararsız yapısından dolayı dünya üzerinde serbest formda bulunmamakta, farklı bileşiklerin içerisinde yer almaktadır. Örneğin, su molekülü iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomundan oluşmaktadır. Hidrokarbon olarak bilinen petrol türevi organik bileşiklerin içerisinde de değişik sayılarda hidrojen atomları bulunmaktadır. Hidrojen

enerjisi, hidrojenin saf halde ayrışmasının bir sonucu olarak moleküllerinden salınan kimyasal bir enerjidir. Bu enerji, çeşitli yöntemlerle ısı ve elektrik enerjisi biçimlerine dönüştürülebilmektedir. Hidrojen enerjisi ulaştırmadan sanayiye, uzay roketlerinden petrol üretimine kadar birçok yerde kullanılmaktadır. Yüksek verimliliği ve çevre dostu bir kaynak olması nedeniyle, hidrojen enerjisi üzerindeki araştırmalar 1970'li yıllarda başlamış ve giderek yoğunlaşmıştır. 1974 yılında Miami'de yapılan Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı sayesinde dünya hidrojen enerjisi kavramı ile tanışmıştır.

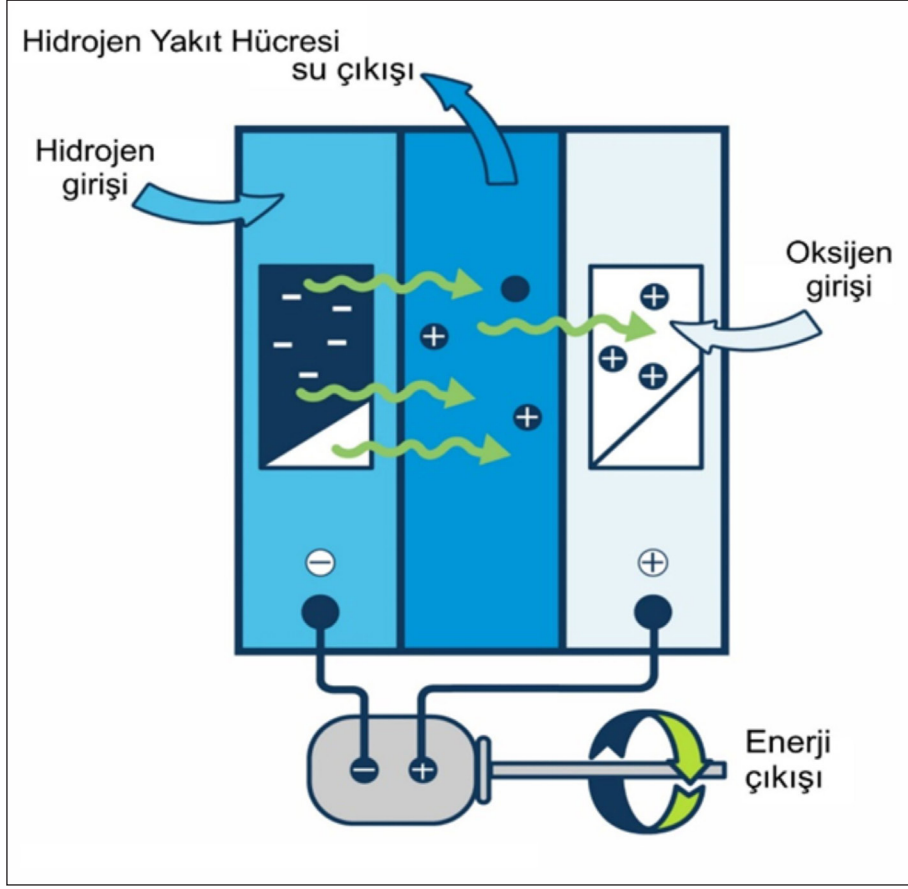
### 2. Hidrojen Enerjisi'nin Özellikleri

Hidrojen hafif bir gazdır. Yoğunluğu havanın 1/14'ü kadar olan hidrojen atmosfer basıncında 253 °C'de sıvı hale gelmektedir. Hidrojen gazının ısı değeri, metreküp başına yaklaşık 12 megajul (MJ) olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise, metreküp başına 8.400 MJ'dur. Hidrojenin oksijenli yanması sonucunda ortaya çıkan sıcaklık yaklaşık 2.600 °C'dir. Hidrojen moleküllerinin ayrıştırılması sonucunda oluşan hidrojen atomlarının tekrar birleşmesiyle ise 3.400 °C'lik bir sıcaklık oluşmaktadır.

21. yüzyılın enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilen hidrojen için çeşitli Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilerek bir enerji taşıyıcısı olarak depolanabilmekte ve böylelikle elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde yalnızca su, elektrik ve ısı üreten temiz bir yakıt olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1). Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere neredeyse tüm sektörlerdeki geniş uygulama yelpazelerindeki kullanım potansiyelleri ile enerji üretimi alanında önemli bir role sahiptirler. Hidrojen ve yakıt hücrelerinin aşağıda sıralanan çeşitli sektörlerde veya sistemlerde uygulamaları mevcuttur;

- Dağıtmık veya birleşik ısı ve güç sistemleri;
- Yedek güç sistemleri;
- Yenilenebilir enerji depolama;
- Hava, kara ve deniz yolu taşıma araçları için yardımcı güç.

<sup>1</sup>Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.



Şekil 1- Bir Hidrojen Yakıt Hücresinin giriş ve çıkışlarıyla nasıl çalıştığını gösteren diyagram (<https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>'den değiştirilerek alınmıştır).

Hidrojen, metanın buhar reformasyonu ile hidrokarbon yakıtla tepkimeye girdiği yüksek sıcaklıktaki bir işlem ile üretilebilmektedir. Bir başka yaygın hidrojen üretim yöntemi elektroliz olarak adlandırılmaktadır. Bakteri veya mikroalg gibi mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik tepkimeler aracılığıyla da hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tip biyolojik işlemlerde mikroorganizmalar bitkisel ürünleri tüketerek hidrojen gazı üretmektedir. Ayrıca, güneş ışığı kullanılarak da hidrojen üretimi yapılmaktadır. Bu üretim şekilleri fotobiyolojik, fotoelektrokimyasal, fotovoltaj odaklı elektroliz ve termokimyasal yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla, hidrojenin üretim yöntemine göre hidrojen enerjisinin renk kodlarıyla sınıflandırılması yapılmaktadır (Şekil 2).

Renk kodlamasında ayrıca üretim sürecinde oluşabilen sera gazı salınımı da dikkate alınmaktadır. Farklı üretim yöntemlerine ilişkin bilgiler Şekil 3'te gösterilmiştir.

### 3. Beyaz Hidrojen

Günümüzde birincil enerji kaynağı olarak roket yakıtı amaçlı kullanılmasına rağmen hidrojenin gelecekteki enerji sistemlerinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Uzun mesafeli uçuşlar ve endüstriyel ısıtma gibi kolayca elektrikleştirilemeyen süreçlerin karbon ayak izini azaltmak için iyi bir çözüm sunabileceği düşünülmektedir. İşin püf noktası, hidrojenin büyük çoğunluğunun enerji tüketen ve atmosfere büyük miktarda karbondioksit salan bir süreçle doğal gaz kullanılarak üretilmesidir. Beyaz hidrojen, doğal olarak, yani jeolojik ya da biyolojik süreçlerle yeraltında oluşan hidrojen gazıdır. Diğer hidrojen türlerinden farklı olarak beyaz hidrojen, endüstriyel bir işlemle veya herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak üretilmez. Bunun yerine, yeraltında doğal olarak oluşan ve depolanan hidrojen rezervlerinden elde edilir.



Şekil 2- Hidrojen renk kodları ve elde edildiği kaynak ve yöntemler (www.solar3gw.org).

Teknoloji	Birincil Enerji/Elektrik Kaynağı	Karbon Ayak İzi (kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Maliyeti (ABD doları/kgH <sub>2</sub> )
Su elektrolizi	Yenilenebilir enerji	<1	4,0-9,0
Su elektrolizi	Nükleer enerji	<2	3,5-7,0
Piroliz	Fosil yakıt	<3	1,25-2,20
Buhar metan reformlama (karbon yakalama ile)	Doğal gaz, kömür	<4	1,5-3,00
Buhar metan reformlama (karbon yakalamadan)	Doğal gaz	8-10	0,5-1,70
Gazlaştırma	Kömür	>20	1,0-2,2

Şekil 3- Kaynaklarına göre hidrojen üretim yöntemleri (Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, 2023).

Bilim insanları bir süredir hidrojenin doğal olarak da oluştuğunu, jeolojik süreçlerle üretildiğini biliyor. Doğal kaynaklardan yararlanmak, fosil yakıtlardan hidrojen üretilmesi sorununu ortadan kaldıracaktır, bu şekilde atmosfere büyük miktarlarda karbon salınması engellenecektir. Ancak ne kadar hidrojen gaz rezervine sahip olduğu veya bu rezervlerin nerelerde bulunabileceği hakkında çok az literatür bilgisi mevcuttur.

### 3.1. Beyaz Hidrojen Kaynakları

Beyaz hidrojen, aşağıdaki doğal süreçlerle oluşabilir (Şekil 4):

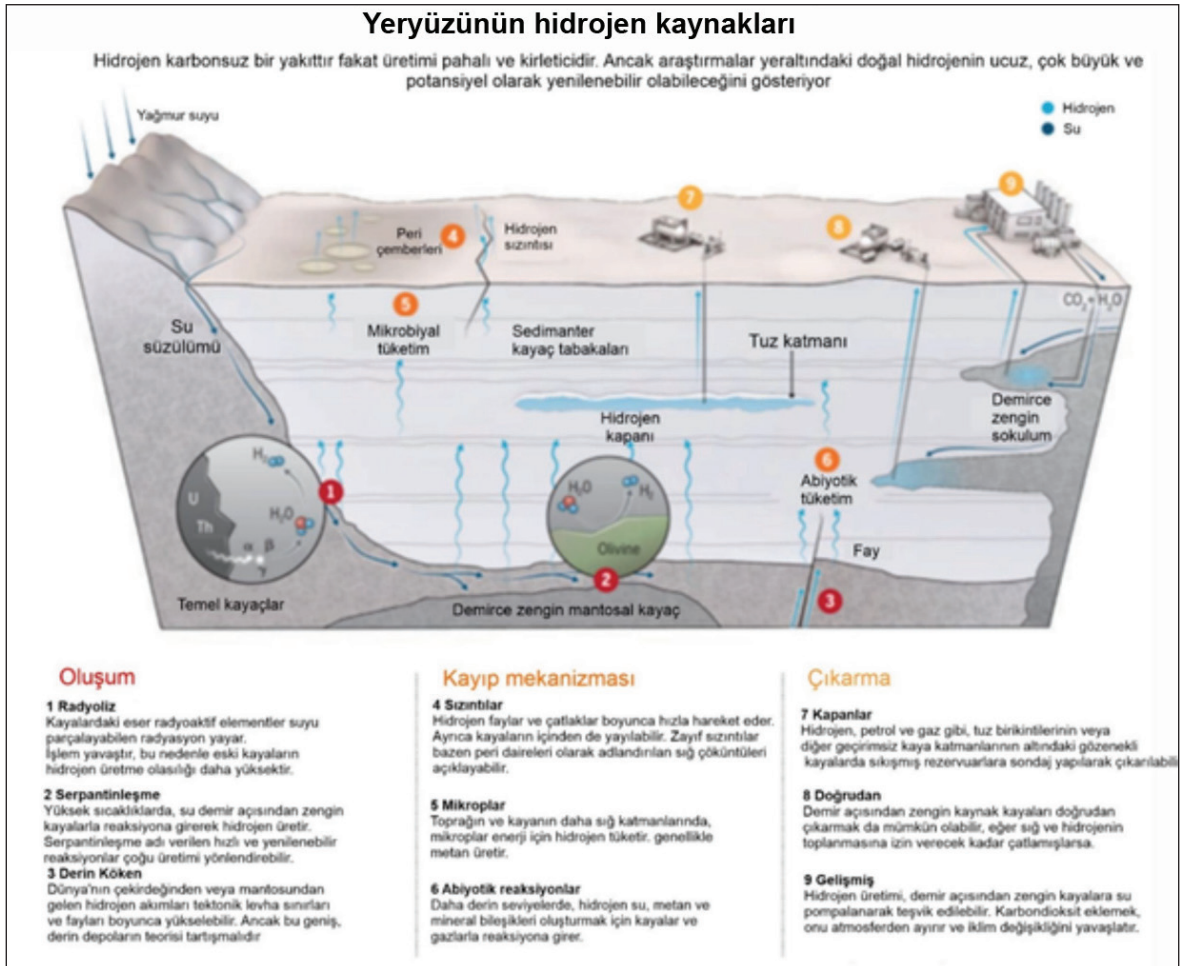
1. Jeolojik Aktivite: Yerkabuğundaki jeotermal aktiviteler sonucunda hidrojen üretimi. Magma ve yeraltı suyu arasındaki reaksiyonlar, hidrojen gazının serbest kalmasına neden olabilir.

2. Biyolojik Süreçler: Bazı mikroorganizmaların, biyolojik faaliyetler sırasında hidrojen gazı üretmesi. Bu mikroorganizmaların, anaerobik (oksijensiz) ortamda organik maddeleri parçalayarak hidrojeni açığa çıkarmasıyla gerçekleşmektedir.

3. Yeraltı Kayaç Reaksiyonları: Bazı kayaç türleri, yeraltındaki yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altında hidrojen üretebilir. Örneğin, ultramafik kayaçların su ile reaksiyona girmesi sonucunda hidrojen açığa çıkabilir (<https://e360.yale.edu/features/natural-geologic-hydrogen-climate-change>).

### 4. Petrol ve Gaz Sistemi Yaklaşımlarından Yararlanma

Bilim insanlarının, hidrojen depolanma potansiyelini tespit edebilmek amacıyla, hidrojenin nasıl oluştuğunu, kayaç katmanları içerisinde nereden



Şekil 4- Yeryüzünde doğal hidrojen oluşum süreçleri (<https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>'den değiştirilerek alınmıştır).

taşındığını, rezervini ve yayılımını anlamak için daha iyi bir jeolojik modele ihtiyaçları olmuştur. Ancak bu süreç sıfırdan başlamamaktadır. Petrol jeolojisi alanındaki geçmiş deneyimlere dayanarak, petrol sistemi yaklaşımını kullanan bir model oluşturmak için çalışılmaktadır.

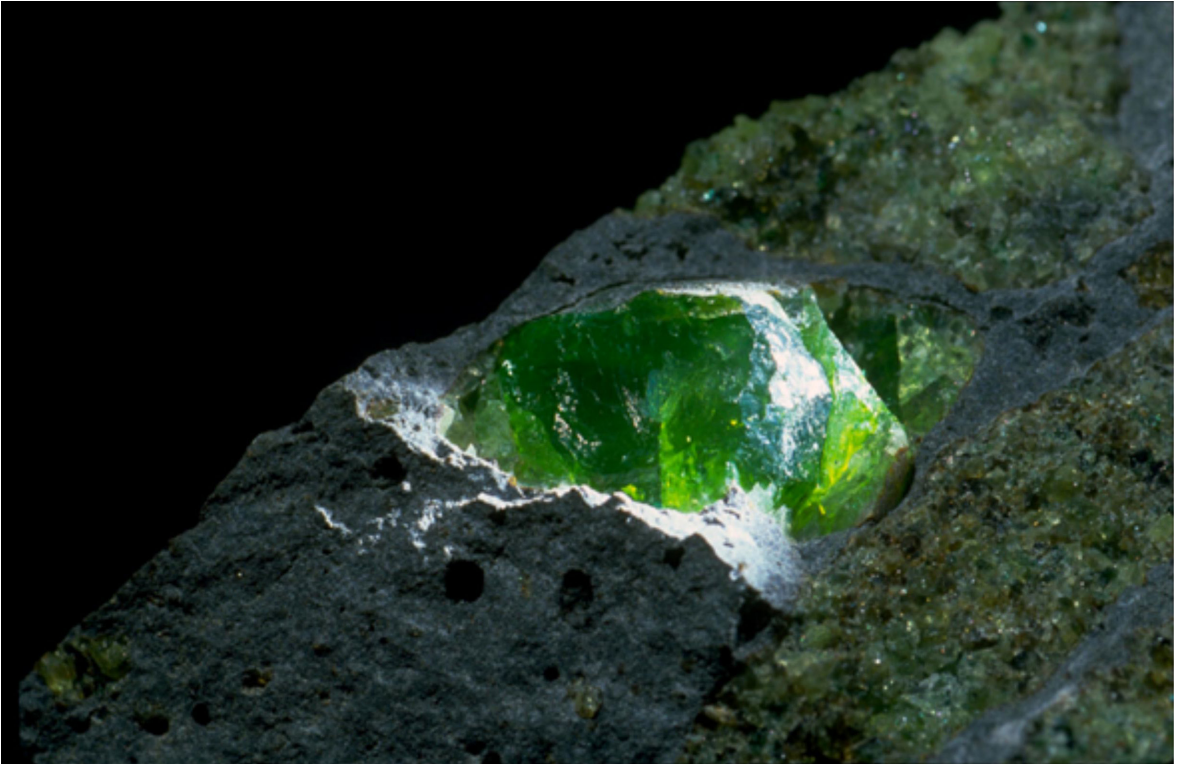
## 5. Hidrojen Sistemi

Petrol sistemi modelini hidrojen birikimlerine uyarlamak için jeologlar, doğal hidrojenin kaya katmanları içerisinde nasıl oluştuğunu, oluştuğundan sonra hangi doğal süreçlerin hidrojeni etkileyebileceğini ve hidrojenin yüzeye doğru yolculuğu sırasında kaya katmanları arasında nasıl sıkışabileceğini tespit etmelidir.

Hidrojen üreten düzinelerce doğal süreç olduğu bilinmektedir ancak hidrojen kaynak potansiyelini anlamak, bu mekanizmalardan hangilerinin büyük miktarlarda gaz üretebileceğini belirlemeyi gerektirmektedir. Bu tür bir süreç, yeraltı suyunun olivin gibi demir açısından zengin minerallerle etkileşime girmesiyle gerçekleşmektedir. Bu etkileşim, suyun oksijene indirgenmesine, minerallerdeki demirle bağ kurmasına ve ardından çevredeki kayalarda hidrojen birikimine neden olabilmektedir (Şekil 5).

Hidrojen oluştuğundan sonra, çeşitli doğal süreçler gazı tüketebilmektedir. Özellikle, birçok mikrop türü hidrojenle hayatta kalmakta ve mikrobiyologlar tarafından artık hidrojenle beslenen geniş, derin bir biyosfer tanımlanmaktadır (Jackson vd., 2024). Ek olarak, petrolün organik açıdan zengin kayalarda oluştuğu süreç, mevcut tüm hidrojeni tüketmektedir. Bu, hidrojenin metan veya propan gibi hidrokarbon gazlarla nadiren bulunmasının nedenlerinden biridir.

Bu süreçler esnasında tüketilmeyen hidrojen gözenekli kayalara ulaşabilir ve burada bir gaz birikimi oluşturabilir. Ancak birikimin devam edebilmesi için gazı kapanlayacak etkili bir rezervuar kayası mevcut olmalıdır. Onlarca yıldır, jeologlar rezervuar kayalarının hidrojen birikimlerini etkili bir şekilde kapanlayamayacaklarını varsaymışlardır. Çünkü hidrojenin küçük boyutunun en pekişmiş kayalardan bile kaçmasına izin vereceği düşünülmüştür. Ancak çalışmalar, iki hidrojen atomundan oluşan bir molekülün çapının tek bir helyum atomunun çapına yaklaşık olarak eşit olduğunu ve iki gazın benzer kaya katmanları tarafından yakalanma olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir (Jackson vd., 2024). 100 milyon yıla kadar yeraltında korunabilen helyum birikimleri olduğundan, hidrojenin benzer zaman aralıkları boyunca kapanlanabileceğini varsaymak mantıklı olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5- Bir olivin minerali olan Forsterit. Olivinle etkileşime giren yeraltı suyu, çevredeki kaya katmanlarında hidrojen birikmesine neden olabilmektedir (<https://e360.yale.edu/features/natural-geologic-hydrogen-climate-change>).

## 6. Hidrojen Arama ve Üretimi

Jeolojik hidrojen kaynakları için gerçekleştirilen keşif çalışmalarında, petrol keşfinde şu anda kullanılan stratejilerin ve teknolojilerin çoğunun, maden ve jeotermal kaynak keşfinde kullanılan bazı ek yöntemlerle birlikte kullanılması öngörülmektedir. Hidrojenin çeliği kırılğan hale getirme potansiyeli nedeniyle, rezervuarlarda sıkışmış hidrojenin üretimi biraz daha farklı yöntemler gerektirmektedir. Aksi takdirde, şu anda doğal gaz üretimi ve geliştirme amacıyla kullanılan aynı sondaj ve tamamlama donanım ve ekipmanları kullanılabilir.

Ancak, doğal gaz sahalarının aksine, doğal hidrojen sahalarındaki gazın bir kısmı, su azaltımı yoluyla hidrojen üretiminin hızınlığı göz önüne alındığında yenilenebilir olarak değerlendirilmektedir. Bazı araştırmacılar jeolojik hidrojen üretmek için rezervuarların ve kapanların gerekli olmayabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca jeotermal enerji üretiminin artırılmasına benzer şekilde, üretimi teşvik etmek için şu anda hidrojen üretmeyen demir açısından zengin kayalara sıcak su enjekte edilebileceği öne sürülmektedir (Kärcher vd., 2023).

Jeolojik hidrojen çok fazla umut vadetse de gerçek kaynak potansiyelinin tespiti, hidrojen sisteminin bileşenlerini çevreleyen belirsizliği azaltmak ve keşif stratejileri geliştirmek için daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Sonraki adımlar arasında küresel kaynak potansiyelini tespit etmek, hidrojen sistemi modelleriyle birlikte yayınlamak ve jeolojik hidrojen kaynakları içerme olasılığı en yüksek alanların ön haritalamasını yapıp haritalarını yayınlamak yer almaktadır. Daha sonraki süreçlerde petrol sistemi araştırmalarında olduğu gibi model oluşturularak hidrojen içermesi muhtemel kayaçları ve hidrojen birikimine yol açabilecek gözeneklilik vb. unsurları değerlendirmek gerekmektedir.

## 7. Serpantinleşmeye Bağlı Hidrojen Oluşumu

Serpantinleşme, suyun olivin açısından zengin ultramafik kayaçlarla etkileşime girmesiyle tetiklenen hızlı ve etkili bir metamorfik reaksiyondur. Çeşitli jeotektonik ortamlarda meydana geldiği bilinen yaygın bir jeolojik süreçtir.

Orta düzeydeki su-kaya oranlarında, yüksek sıcaklıktaki serpantinleşme (200-320°C), verimli bir kaynak oluşturmaya yetecek hacim ve oranda gaz fazında hidrojen üretecektir.

Hidrojen üretim oranı, su dağıtım hızı (damlama veya akma) ve su-kaya etkileşiminin etkin yüzey alanı (tane boyutu/geçirgenlik) dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olacaktır.

Serpantinleşme, ultramafik jeokütellerin mekansal olarak sınırlı olma eğiliminde olması ve hidrojen üretiminin su-protolit etkileşiminin olduğu yerde yoğunlaşması nedeniyle bir “nokta kaynak” olarak tanımlanabilir.

Hidrojen üretiminin zaman ve mekana odaklanması, potansiyel olarak ticari hacimlerde gaz fazının göçünü yoğunlaştırabilen bir hidrojen sistemini beslemek için yeterlidir.

Sıcaklık ve basınç koşullarına (yani derinliğe) bağlı olarak hidrojen, protolitten gaz fazında veya çözeltili halinde dışarı atılır. Hidrojen, süreç esnasında sıcaklık-basınç daha sığ derinliklerde azaldığında gaz fazında çözünme gösterir.

Daha fazla hareket kabiliyetine sahip olmasına rağmen gaz fazındaki hidrojen göçü geçirimsiz formasyonlar tarafından kontrol edilecek ve uygun sızdırmazlık/tutma koşulları altında önemli kolon yükseklikleri oluşturabilecektir.

Kapanlanmış hidrojen gazı birikiminden bir miktar difüze olmuş hidrojen kaybı olacaktır ancak metanda olduğu gibi bunun hacimsel olarak önemli miktarlarda olması beklenmez. Bu nedenle hidrojen, jeolojik zaman süreci boyunca kapanlanarak tutulabilir.

Hidrojen üretimi yeniye veya devam ediyorsa, kapanların aktif olarak geri dolması ve potansiyel olarak yenilenebilir bir kaynak oluşturması olasılığı vardır.

Hidrojen, hidrokarbon gazları vasıtası ile aynı şekilde üretilip kullanılabilir. Hidrojen üretim çeşitleri, kıtasal kratonlar, ofiyolitler ve konverjan zonlardaki erişilebilir-jeotektonik ortamların kendilerine özgü protolit-su etkileşim rejimlerine dayanmaktadır (Zhang vd., 2022).

## 8. Beyaz Hidrojenin Avantajları

- Karbon Nötr Üretim: Beyaz hidrojen, endüstriyel bir işlem olmadan doğal olarak oluştuğu için karbon emisyonu yaratmaz.
- Doğrudan Erişim: Yeraltında doğal olarak depolandığı için, bu rezervler keşfedilip çıkarılabilirse, doğrudan kullanıma uygun olabilir.

- Sürdürülebilir Kaynak: Yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duymadan hidrojen elde etme potansiyeli vardır (Meyer vd., 2021).

### 9. Beyaz Hidrojenin Dezavantajları

- Keşif ve Çıkarım Maliyetleri: Doğal hidrojen rezervlerinin bulunması ve çıkarılması maliyetli olabilir. Ayrıca, bu kaynakların ne kadar sürdürülebilir olduğu da tam olarak bilinmemektedir.
- Sınırlı Bilgi: Beyaz hidrojen rezervleri hakkında yapılan araştırmalar henüz sınırlı olduğundan, bu konuda kapsamlı bir bilgi birikimi bulunmamaktadır (Meyer vd., 2021).

### 10. Beyaz Hidrojenin Diğer Hidrojen Türleri ile Karşılaştırılması

Hidrojen sınıflandırmasında yer alan diğer renk kodları, genellikle hidrojenin nasıl üretildiğini ve bu üretim süreçlerinin çevresel etkilerini gösterir:

- Yeşil Hidrojen: Su elektrolizi yoluyla yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilir. Karbon emisyonu yoktur.
- Mavi Hidrojen: Fosil yakıtlardan üretilir ancak karbon emisyonları yakalanır ve depolanır.
- Gri Hidrojen: Fosil yakıtlardan üretilir ve karbon emisyonları atmosfere salınır.
- Turkuaz Hidrojen: Metan piroliziyle üretilir, karbon katı formda çıkar.

Beyaz hidrojenin avantajı, doğrudan doğadan elde edilmesi nedeniyle çevresel etkisinin minimum olmasıdır. Ancak bu avantajlar, geniş çaplı bir keşif ve çıkarma süreci gerektirdiğinden henüz tam anlamıyla değerlendirilememiştir.

### 11. Tartışma ve Sonuçlar

Beyaz hidrojen, hidrojen ekonomisi ve enerji sektörü için potansiyel olarak önemli bir doğal kaynak olabilir. Ancak bu alandaki araştırmalar ve keşifler henüz başlangıç aşamasında olduğundan, beyaz hidrojenin endüstriyel ve ticari alanda ne kadar uygulanabilir olduğu zamanla daha iyi anlaşılacaktır. Bu nedenle, beyaz hidrojen konusu, enerji ve çevre bilimleri alanında gelecekte daha fazla araştırılmaya ihtiyaç duyulan bir konudur.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında ülkemiz jeolojisi dikkate alındığında serpantinleşmiş ofiyolitik kayaların ülkemizde de var olduğu ve ciddi yayılımlar sunduğu bilinmektedir. Antalya-Kemer-Çıralı'da yapılan bir çalışmada, Olimpos'ta Yanartaş olarak bilinen turistik bölgede %7-13 arasında hidrojen gazı ölçülmüştür. Ayrıca beyaz hidrojen oluşabileceği alanlar olarak değerlendirilen tuz sahaları da ülkemizde yayılım göstermektedir.

Güncel literatürde hidrojene ev sahipliği yapabilecek potansiyele sahip olduğumuz ortaya konulmuştur. Literatür ve teknik gelişmeler takip edilerek ülkemizde de hidrojene yönelik çalışmalar yapılabilir. Fakat hidrojenin, aranması, araştırılması ve geliştirilmesi açısından henüz herhangi bir yasal düzenleme bulunmamaktadır.

### Değinilen Belgeler

- 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*, Volume 2 (18), p. 1–9.
- Kärcher, K., Weber, R., Robinson, L. 2023. Hydrogen production: Current status and future prospects. *Energy Reports*, 9.
- Meyer, L. E., Jansen, J. A., Reiter, R. 2021. Exploring natural hydrogen reserves: Opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (12).
- Solar 3GW, <https://www.solar3gw.org/>, Erişim: 20.11.2024
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası, 2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- USGS science for a changing world, <https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy>, Erişim: 13.04.2023
- Yale Environment 360, <https://e360.yale.edu/features/natural-geologic-hydrogen-climate-change>, Erişim: 25.01.2024
- Zhang, L., Wang, J., Liu, Z. 2022. Hydrogen production via natural processes: A review on the potential for natural hydrogen as an energy resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112148.