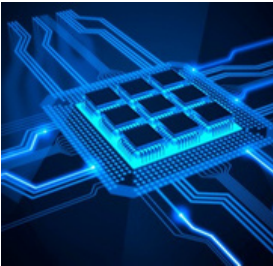


1st MACHINA+

YAĞIZ ALP GÖKTUNA



Hidrojen Enerjisi:

Hidrojen enerjisi, **evrende en bol bulunan element** olan hidrojenin (H_2), moleküler yapısındaki kimyasal bağlarda depolanan enerjinin; yanma (kombüsyon) veya elektrokimyasal dönüşüm yoluyla açığa çıkarılması ve kullanılması sürecidir. Teknik literatürde hidrojen, birincil bir enerji kaynağı (kömür veya güneş ışığı gibi) değil, üretilmesi için başka bir enerji girdisine ihtiyaç duyan bir **ikincil enerji taşıyıcısı** olarak tanımlanır.

Hidrojen, bilinen tüm yakıtlar arasında **en yüksek enerji içeriğine sahiptir**. Alt ısı değeri yaklaşık **120 MJ/kg** seviyesindedir ki bu, geleneksel benzinin enerji yoğunluğunun neredeyse **üç katıdır**.

Ancak bu potansiyel, fiziksel bir **sorunu** da beraberinde getirir: **Hacimsel yoğunluk**. Gaz halindeki düşük yoğunluğu nedeniyle hidrojeni depolamak, atmosferik basınçta **verimsizdir**. Bu nedenle endüstriyel uygulamalar, gazın **350 ila 700 bar** gibi çok yüksek basınçlarda sıkıştırılmasını veya **-253C'de** sıvılaştırılmasını gerektirir.

Hidrojen, doğada serbest halde **bulunması zor** bir elementtir. Bu yüzden enerji sistemlerindeki rolü, doğrudan bir kaynak olmaktan çok, onu nasıl **ürettiğimizle** şekillenir. Bugün dünya genelinde kullanılan hidrojenin büyük bölümü, **fosil yakıt temelli yöntemlerle elde edilmektedir**. En yaygın yöntem olan buhar metan reformasyonu, **ekonomik açıdan avantajlı olsa da** yüksek karbon salımı nedeniyle **çevresel açıdan tartışmalıdır**.

Daha **temiz** bir alternatif olarak öne çıkan **su elektrolizi** ise, hidrojenin geleceği açısından kritik bir yere sahiptir. Elektroliz sürecinde su, elektrik enerjisi yardımıyla hidrojen ve oksijene ayrıştırılır. Eğer bu işlem yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrikle yapılırsa, ortaya çıkan ürün **“yeşil hidrojen”** olarak adlandırılır. Teoride bakıldığında bu yöntem, karbon salımı olmadan hidrojen üretmenin en net yoludur. Ancak **pratikte işler bu kadar basit değildir**. Elektroliz sistemleri hâlen **pahalıdır** ve enerji dönüşüm sürecinde **ciddi kayıplar yaşanır**. Bu da, yeşil hidrojenin bugün için neden sınırlı ölçekte kaldığını açıklar. Güncel araştırmalar bu noktada, elektrolizör verimini artırmaya ve kayıpları azaltmaya odaklanmaktadır.

Hidrojenin en sık **yanlış anlaşılan** yönlerinden biri, onun birincil bir enerji kaynağı olarak görülmesidir. Oysa hidrojen, kömür ya da güneş gibi doğrudan enerji üreten bir unsur **değildir**. Daha çok elektrik gibi, **enerjiyi taşıyan bir ara formdur**. Nasıl üretildiği, ne kadar temiz ya da kirli olduğunu belirler.

Bu özellik, hidrojeni özellikle enerji depolama açısından ilginç kılar.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi düşünüldüğünde, fazla üretilen elektriğin hidrojen formunda depolanması mantıklı bir seçenek olarak öne çıkar. İhtiyaç duyulduğunda bu hidrojen, **yakıt pilleri aracılığıyla tekrar elektrığe dönüştürülebilir**.

Güncel Tartışmalar ve Eleştiriler:

Hidrojen enerjisi söz konusu olduğunda ortalık genelde fazla pembe çiziliyor.

Sunumlarda “**geleceğin yakıtı**” diye

geçiyor ama gerçek dünyada tablo o kadar **net değil**. Hatta bazı isimler bu konuya hiç romantik bakmıyor. Elon Musk bunların başında geliyor.

Hidrojenli otomobiller için yaptığı bir yorumda, bu fikri “*duyduğu en saçma enerji çözümlerinden biri*” olarak tanımlamıştı. Sert bir laf ama altı boş değil.

Mantık şu: Elektriği alıyorsun, hidrojene çeviriyorsun, sonra tekrar elektrığe dönüyorsun. Her adımda **enerji kaybı** var. Musk’a göre bu kadar dolambaçlı bir yol varken, elektriği doğrudan bataryada tutmak çok daha mantıklı.

Bu yüzden Tesla cephesinde hidrojen **hiçbir zaman ciddi bir seçenek olmadı**.

Şirket tüm yatırımını batarya teknolojilerine yaptı ve yapmaya da devam ediyor. **Aslında bu tercih, hidrojenin neden her alanda tutunamadığını da iyi özetliyor**.

Otomotiv tarafında tablo **genel olarak benzer**. Toyota ve Hyundai gibi birkaç marka hidrojenli araçları uzun süredir deniyor ama iş vitrine geldiğinde işler yavaşlıyor. **İstasyon yok, maliyet yüksek, bakım karmaşık. Günlük kullanım için hâlâ zor**.

Ama bu, hidrojenin **tamamen çöpe atıldığı anlamına gelmiyor**. Almanya’da çelik üretiminde kömür yerine hidrojen kullanmaya çalışan tesisler var.

Son birkaç yıldır “**hidrojen ekonomisi**” diye bir ifade sürekli karşımıza çıkıyor. Raporlarda, zirvelerde, devlet sunumlarında... Sanki ortada halihazırda çalışan, oturmuş bir sistem varmış gibi. Ama biraz durup bakınca, bu ifadenin şimdilik **daha çok bir hedef** tanımı olduğunu fark ediyorsun.

Devletlerin ve büyük kurumların hidrojene bu kadar sıcak bakmasının nedeni teknik olmaktan çok **politik**. **Hidrojen, kağıt üzerinde tertemiz duruyor**. Karbon salımı yok, bacadan duman çıkmıyor, net-zero hedeflerine cuk oturuyor. Bu da onu, uzun vadeli enerji planlarında “**iyi bir hikâye**” haline getiriyor. Hikâye iyi olunca fon da geliyor, teşvik de.

Avrupa Birliği’nin hidrojen stratejilerine bakınca bu durum netleşiyor. Milyarlarca euroluk bütçeler ayrılıyor, pilot projeler destekleniyor, yol haritaları çiziliyor. Ama bu projelerin büyük kısmı hâlâ sınırlı ölçekte ve devlet desteği olmadan ayakta durabilecek noktada değil. Yani ortada dönen bir ekonomi değil, **daha çok geleceğe yatırım yapan bir beklenti var**.

Bir de işin sanayi tarafı var. Büyük enerji şirketleri için hidrojen, mevcut altyapıyı tamamen çöpe atmadan “**yeşil**” görünmenin bir yolu. Doğalgaz hatlarının bir kısmını hidrojene uyarlamak, sıfırdan sistem kurmaktan çok daha cazip. Bu da hidrojeni teknik olarak değilse bile **stratejik olarak değerli** kılıyor.

Ama tüm bu tabloya rağmen şu sorunun cevabı hâlâ net değil: “**Hidrojen, devlet desteği olmadan kendi başına ayakta durabilir mi?**” Bugün için cevap **büyük ihtimalle hayır**. Üretim pahalı, depolama zor, altyapı eksik. Buna rağmen “**ekonomi**” kelimesinin bu kadar rahat kullanılması, beklenti ile gerçek arasındaki **mesafeyi biraz bulanıklaştırıyor**.

Belki de hidrojeni yanlış yerden zorluyoruz. Her alanda çözüm gibi sunmak yerine, nerede işe yaradığına odaklanmak daha mantıklı olabilir. **Çünkü bir teknolojinin geleceği, ne kadar umut vadettiğiyle değil, nerede gerçekten çalıştığıyla belirleniyor**.

Verimlilik

Tartışmaları:

Hidrojen konusu açıldığında sohbet genelde hızlıca “**temiz enerji**” noktasına gelir. Ama iş verimliliğe gelince ortam biraz sessizleşir. Çünkü rakamlar, anlatılan hikâyeyle her zaman uyumlu değildir. **Basitçe söylemek gerekirse, hidrojen sistemlerinde enerji pek yerinde durmaz**.

Elektrik üretilir, elektrolizle hidrojene çevrilir, depolanır, taşınır ve sonunda tekrar elektriğe dönüştürülür. **Bu zincirin her halkasında bir miktar enerji kaybolur.** Tek tek bakıldığında makul görünen kayıplar, bütün sistem toplandığında **ciddi bir fark yaratır.**

Kâğıt üzerinde bir elektrolizör için **%70 civarı verim değerleri görmek mümkündür.** Yakıt pilleri için de benzer rakamlar telaffuz edilir. Ancak bu sayılar genellikle ideal koşulları temsil eder. Gerçek dünyada sıcaklık artar, saflık düşer, yardımcı sistemler devreye girer. Soğutma, kompresörler, güç elektroniği... Hepsi enerji ister. **Sonuçta başlangıçta elindeki elektriğin önemli bir kısmı, sisteme girmeden kaybolur.**

Bu yüzden hidrojenle çalışan “**tam döngü**” sistemlerde toplam verim çoğu zaman **%30’ların altına düşer.** Yani ürettiğin elektriğin üçte ikisinden fazlası, süreç boyunca farklı formlarda dağılır. İşte tam bu noktada, özellikle bataryayla yapılan karşılaştırmalar **kaçınılmaz** hale gelir.

Bataryalar da kusursuz değildir ama zincir daha kısadır. Elektrik üretilir, depolanır ve kullanılır. Arada fazladan dönüşüm yoktur. Bu da özellikle düşük ve orta güç gerektiren uygulamalarda bataryaları **daha mantıklı bir seçenek haline getirir.**

Hidrojenin savunulduğu noktalar genelde bu tablonun dışında kalır. Çok uzun süreli depolama gereken durumlar, yüksek enerji yoğunluğu ihtiyacı olan sistemler veya bataryaların fiziksel olarak yetersiz kaldığı uygulamalar. Yani mesele, hangi teknolojinin “daha iyi” olduğu değil, hangi koşulda hangisinin **daha az kötü** olduğu sorusudur.

Verimlilik rakamları bu yüzden rahatsız edicidir. **Çünkü teknoloji seçimini romantik söylemlerden çıkarıp, doğrudan mühendislik gerçeklerine indirger.** Ve bazen bu gerçekler, kulağa hoş gelmez.

İnternette hidrojen konusu açıldığında tartışmalar çoğu zaman tek bir noktada kilitleniyor: **“Hidrojen balonu patladı.”** Sosyal medyada dolaşan videolar, alev topuna dönen deneyler ya da bağlamından koparılmış kazalar, sanki tüm teknolojiyi tek bir anekdota indirmek için tekrar tekrar dolaşıma sokuluyor. Bu tür içerikler hızla yayılıyor, çünkü **korku ilgi çekiyor; teknik açıklamalar ise nadiren aynı etkiyi yaratıyor.**

Oysa sürdürülebilirlik amacı taşıyan projelerin çıkış noktası, tekil olaylar üzerinden korku üretmek **değil**. **İnsanlığın enerji ihtiyacını, mevcut kaynakları tamamen tüketmeden nasıl karşılayabileceğimizi sorgulamak**. Hidrojen de bu sorgulamanın bir parçası. **Ne kusursuz bir çözüm ne de internette çizildiği gibi patlamaya hazır bir balon**.

Elbette hidrojenin güvenlik riskleri var. Yüksek basınç, kaçaklar, depolama problemleri... Bunların hepsi gerçek. Ancak aynı mantıkla bakıldığında benzin, doğalgaz ya da lityum bataryalar da risksiz değil. Fark şu: Alışık olduğumuz riskleri normal kabul ediyoruz, yeni olanları ise daha kolay abartıyoruz. Bu yüzden *“hidrojen balonu patladı”* gibi söylemler, meseleyi anlamaktan çok basitleştiriyor. Asıl konuşulması gereken, bu teknolojilerin nerede, hangi şartlarda ve hangi ölçekte anlamlı olduğu. Sürdürülebilirliğe katkı sağlama iddiası taşıyan her projeyi, viral korku videoları üzerinden yargılamak, tartışmayı ilerletmekten çok **kısırlaştırıyor**.

Belki de ihtiyaç duyduğumuz şey, bir teknolojiyi ya tamamen kutsamak ya da tamamen gömmek değil. Onu bağlamı içinde değerlendirmek. **Çünkü enerji dönüşümü, tek bir patlama videosuyla çözülecek kadar basit bir mesele değil**.

Peki Hidrojen Ne Zaman İşimize Yarar?

Hidrojen enerjisi ne mucize bir çözüm ne de tamamen gereksiz bir fikir. Asıl mesele, ne zaman ve

nerede kullanıldığı. Bugün hidrojenin önündeki problem, teknik olarak çalışmaması değil; çoğu alanda daha basit ve ucuz alternatiflerin bulunması.

Hidrojen, özellikle enerjinin uzun süre depolanması gerektiği senaryolarda anlam kazanmaya başlar. **Güneşin ve rüzgârın bol olduğu ama bu enerjinin her zaman tüketilemediği sistemlerde, fazla elektriğin hidrojen formunda saklanması mantıklı bir seçenek olabilir**. Burada hızdan çok süre önemlidir.

Ağır sanayi, hidrojenin en gerçekçi kullanım alanlarından biridir. Çelik üretimi gibi yüksek sıcaklık ve sürekli enerji gerektiren proseslerde, elektrifikasyon her zaman mümkün değildir. Bu tür alanlarda hidrojen, **fosil yakıtlara kıyasla daha temiz bir alternatif sunabilir.**

Taşımacılık tarafında hidrojenin yeri daha sınırlıdır. Şehir içi ulaşımında bataryalar açık ara öndedir. Ancak çok ağır yük taşıyan, uzun süre durmadan çalışması gereken sistemlerde hidrojen hâlâ masadadır. Burada avantaj, hızlı dolun ve yüksek enerji yoğunluğudur.

Buna karşılık, günlük kullanım ve küçük ölçekli uygulamalarda hidrojen çoğu zaman gereksiz yere karmaşıktır. Depolama, altyapı ve verimlilik sorunları, bu alanlarda **hidrojeni mantıklı bir tercih olmaktan çıkarır.**

Özetle hidrojen, her problemi çözecek bir teknoloji değildir. Ama doğru problemle eşleştğinde, gerçekten işe yarar. **Onu başarısız yapan şey teknik yetersizlikten çok, yanlış beklentilerle yanlış yerde zorlanmasıdır.**

Hidrojen enerjisi üzerine yapılan tartışmaların çoğu, onu ya olması gerekenden fazla yüceltir ya da tamamen gözden düşürür. Oysa gerçek tablo bu iki uç arasında yer alıyor. **Hidrojen, her alanda devrim yaratacak bir çözüm değil; ama doğru yerde, doğru ölçekte kullanıldığında anlamlı bir araç.**

Bu nedenle asıl soru “*hidrojen işe yarıyor mu?*” değil, “*nerede işe yarıyor?*”. Enerji dönüşümünün geleceği tek bir teknolojiye bağlı olmayacak. Elektrik, batarya, hidrojen ve diğer çözümler; birbirlerinin alternatifi olmaktan çok **tamamlayıcısı** olacak.

Hidrojenin kaderi de burada şekilleniyor. Onu bir vaat olarak değil, bir mühendislik tercihi olarak ele aldığımızda, beklentilerle gerçekler arasındaki mesafe kapanmaya başlıyor.