



Yenilenebilir Enerjiyi Gökler

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

den Toplamak

Toplumların zenginliği ve fakirliğiyle enerjiye erişimleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu söylemek yanlış olmaz. Daha çok üretim yapılan daha zengin toplumlar daha çok enerji tüketiciler. Gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaı da artan üretimle beraber giderek artıyor. İnsanlara daha iyi eğitim, sağlık, beslenme ve iř olanakları sunmanın yolu daha çok miktarda enerjiye daha ucuz bir biçimde erişmekten geçiyor. Bugüne kadar insanların enerji ihtiyaını karşılayan ana kaynak fosil ve nükleer yakıtlardı. Ancak yer altında milyonlarca yıl içinde oluşan fosil yakıtların hem yenilenme hızı günümüzdeki tketicim hızını karşılayacak düzeyde değil hem de çevreye verdiği zarar söz konusu. Nükleer yakıtların kullanıldığı enerji santrallerininse çevresel felakatlere sebep olma potansiyelleri görece yüksek. Giderek artan enerji ihtiyaını çevreye zarar vermeden, sürdürülebilir bir biçimde karşılamanın yolu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekten geçiyor. Tüm dünyanın enerji ihtiyaını karşılayabilecek düzeyde bol ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri rüzgâr enerjisi.

Bugün rzgrdan enerji elde etmek için karalar üzerine ya da sığ denizlerin tabanlarına kurulan türbinler rüzgâr enerjisinden tam kapasiteyle yararlanmaya imkn vermiyor. Çünkü güçlü rüzgârlar yeryüzünün yakınlarından çok göklerde esiyor. Bu yüzden günümüzde bazı araştırmacılar rüzgâr enerjisini göklerden toplamak için kullanılacak teknolojiler geliştirmek üzere çalışmalar yapıyor. Bazı firmalar geliştirdikleri sistemleri test etmeye başladı bile.

Yeryüzündeki ve Göklerdeki Rüzgâr Enerjisi

Günümüzde rüzgâr enerjisinden yararlanmak için yaygın olarak karasal bölgelerde rüzgâr türbinleri kuruluyor. Yaklaşık 100 metre yüksekliğindeki tipik bir rüzgâr türbininden 1,5 MW güç elde edilebiliyor. Ancak bu rüzgâr türbinleri hiçbir zaman tam kapasite ile çalışmıyor. Çünkü yeryüzüne yakın hava katmanlarındaki rüzgârlar sürekli değil ara sıra esiyor. Bu yüzden sıradan rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerji çoğu zaman azami kapasitenin yarısına bile ulaşmıyor.

Rüzgâr türbinlerinden daha fazla enerji elde etmenin bir yolu, daha küçük alanlarda daha çok güç üretebilecek türbinler kurmaktan geçiyor. Yüksek irtifalardaki hava akımları genellikle daha güçlü olduğu için bu durum türbinlerin yüksekliğinin ve kanat uzunluğunun artırılması anlamına geliyor. 2000'lerin başlarından beri yatırım yapılan bir alansa açık denizlere rüzgâr türbinleri kurmak. Yeryüzünde denizler karalardan daha çok alan kaplar. Ayrıca kıyıdan uzaklaştıkça rüzgârlar genellikle hem güçlenir hem de daha düzenli ve sık esmeye başlar. Bu yüzden denizlerden elde edilebilecek rüzgâr enerjisi potansiyel olarak karalardan elde edilebilecek olandan daha fazladır. Ancak sıradan rüzgâr türbinleri sadece sığ sulara ya da özel olarak tasarlanmış yüzer platformların üzerine kurulabiliyor. Bu da denizlerden elde edilebilecek rüzgâr enerjisi miktarını sınırlıyor.

Dünya'daki rüzgâr enerjisinin büyük kısmı esasen atmosferin yeryüzüne yakın kısımlarında değil yükseklerinde bulunur. Bilimsel çalışmalar atmosferin alt katmanlarındaki rüzgârların sıradan rüzgâr türbinlerine sağlayabileceği azami gücün 400 TW olduğunu gösteriyor. Söz konusu olan atmosferin tamamı olduğundaysa bu değer 1800 TW'a çıkıyor. Üstelik yüksek irtifalardaki rüzgârlar daha güçlü olmanın yanı sıra daha düzenli ve sürekli de. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinden daha fazla yararlanabilmenin bir yolu da enerjiyi göklerden toplamaktan geçiyor. Peki ama nasıl? Cevap: yüz metre karelik uçurtmalarla, havada asılı kalan rüzgâr türbinleriyle, planörlerle, balonlu uçurt-



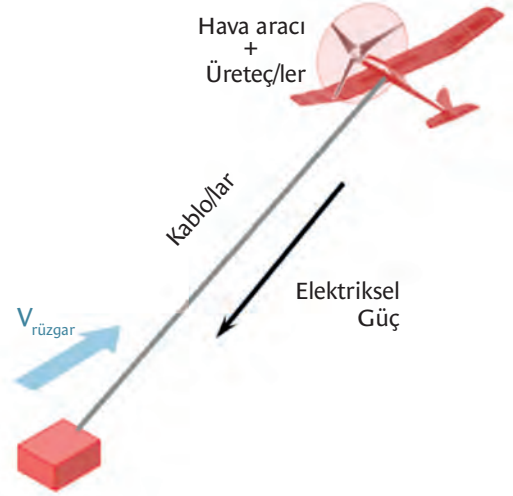
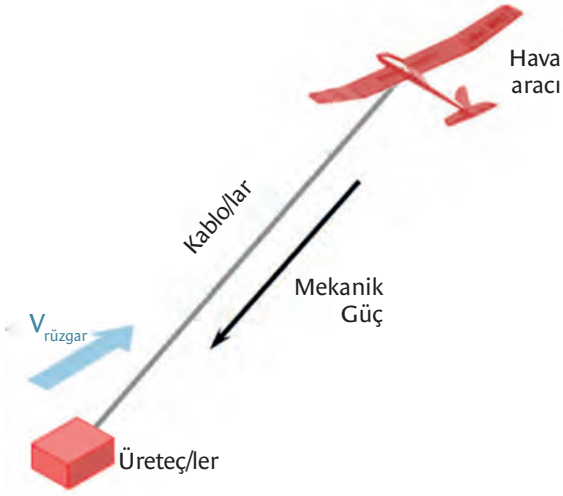
Tek bir uçurtmanın art arda çekilen fotoğraflarının birleştirilmesiyle oluşturulmuş bu görüntüde uçurtmanın enerji üretimi sırasında havada 8 çizdiği görülüyor.

malarla, türbinler taşıyan insansız hava araçlarıyla... Rüzgârlardaki 1800 TW gücün sadece %1'ini toplamak bile bugün tüm dünyanın enerji ihtiyacını karşılamaya yetebilir.

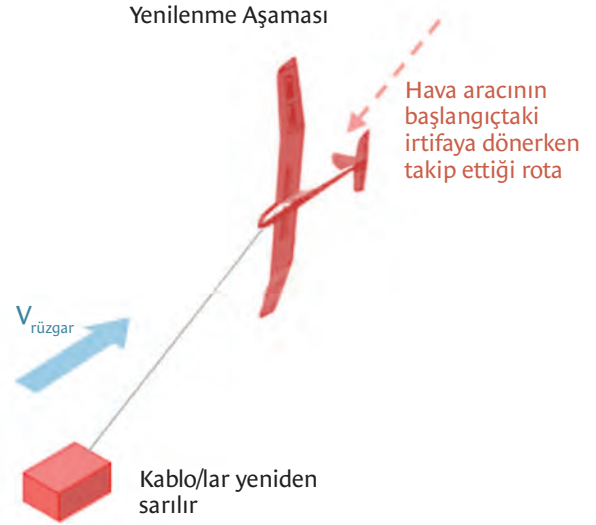
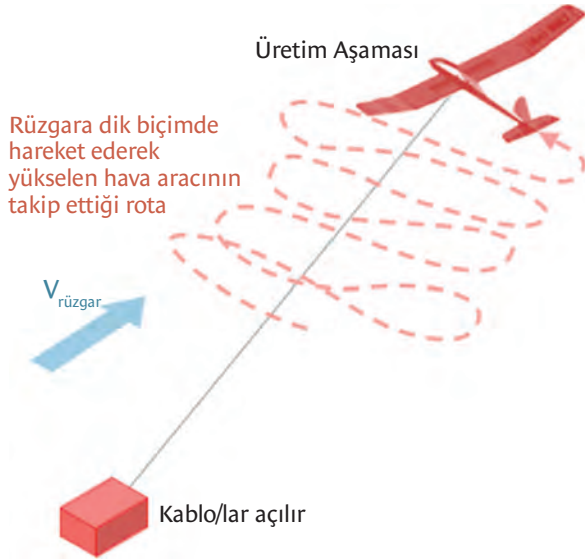
Göklerden Rüzgâr Enerjisi Toplamının Yolları

Rüzgâr enerjisinden yararlanmanın insanlar için yeni bir olgu olduğu söylenemez. Yüzerce yıldır yel değirmenlerinde buğday öğütmek ya da yelkenli gemilerle denizlerde yol almak için rüzgâr enerjisinden yararlanılıyor. Ancak bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak büyük ölçekte rüzgâr enerjisinden yararlanma çabalarının görece yeni olduğu söylenebilir.

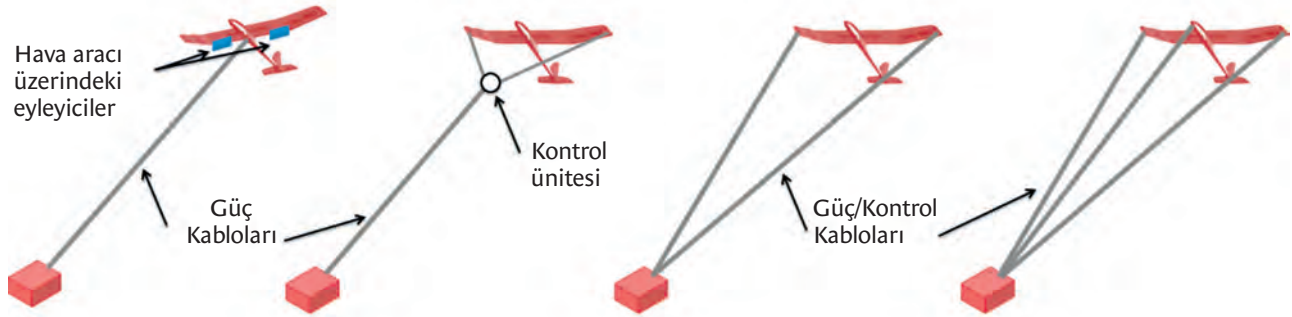
Göklerdeki rüzgâr enerjisinin nasıl toplanabileceğiyle ilgili ilk çığır açıcı çalışma 1970'lerin sonlarında Miles Loyd tarafından yapılmıştı. O sıralar dünya genelinde bir petrol krizi yaşanıyordu. Loyd da var olan enerji krizinden çıkmanın bir yolunun göklerden rüzgâr enerjisi toplamak olduğunu düşünmüştü. Loyd 1980 yılında yayınladığı makalesinde bir uçurtma hayal etmişti. Bu uçurtmadan verimli bir biçimde enerji elde etmek için önerdiği yöntemse çocukluğunda uçurtma uçurmuş hemen her çocuğun iyi bildiği bir fiziksel gerçeğe dayanıyordu: Rüzgâra dik biçimde hareket eden bir uçurtmanın ipindeki gerilim rüzgârı arkasına almış bir uçurtmanın ipindeki gerilimden çok daha büyüktür.



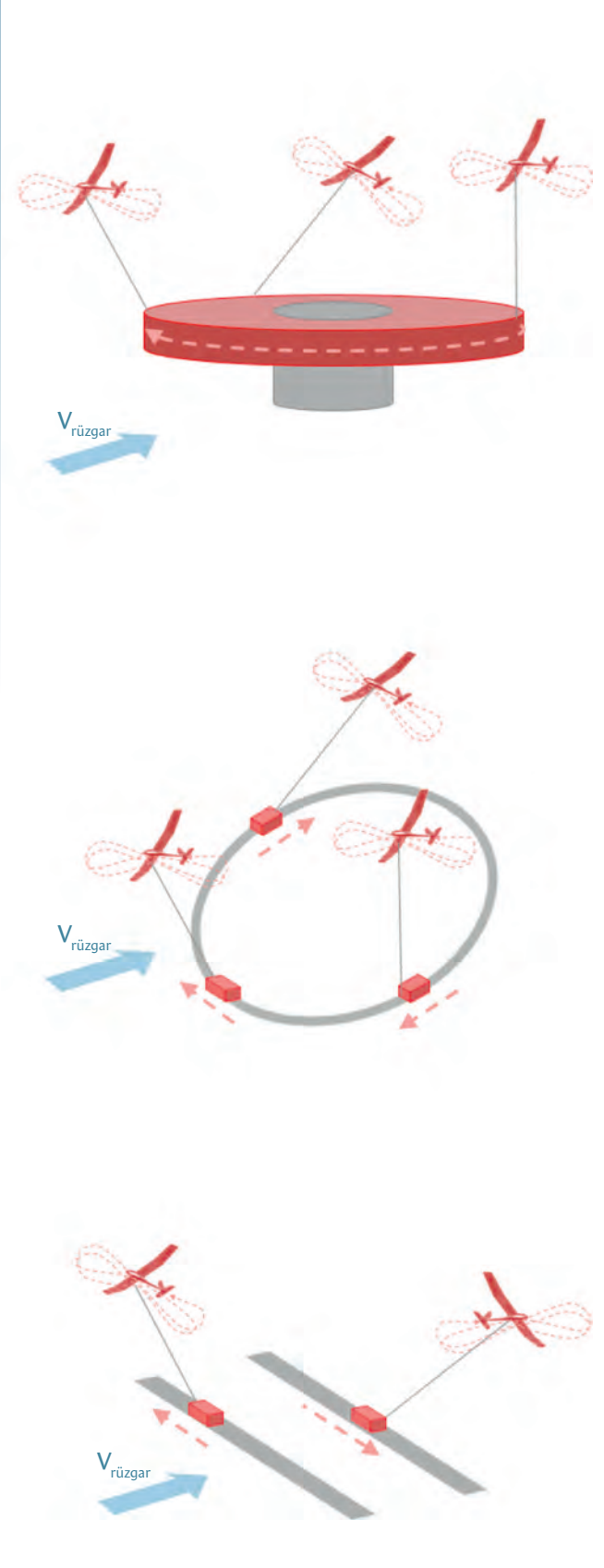
Hava kaynaklı enerji sistemleriyle enerji elde etmenin iki farklı yolu. Bazı sistemlerde hava aracının çektiği kablolar üretici harekete geçirir (solda). Bazı sistemlerdeyse üreteçler hava aracının üzerindedir (sağda). Elde edilen enerji elektrik kablolarıyla yer istasyonuna aktarılır.



Enerji üretiminin yer istasyonunda yapıldığı sistemlerde üretim periyodik olarak onlarca saniye kesintiye uğrar. Araç havada yavaş yavaş yükselirken enerji elde edilir (solda). Araç başlangıç konumuna dönerken az da olsa enerji tüketilir (sağda).



Çeşitli firmalar tarafından üzerine çalışılan HKRES'ler



Yer istasyonunun hareketli olduğu sistemler tasarlamak ve üretmek de mümkün.



TwingTec firması tarafından üretilen bu HKRES yanında durduğu rüzgâr türbiniyle hemen hemen aynı gücü üretiyor.

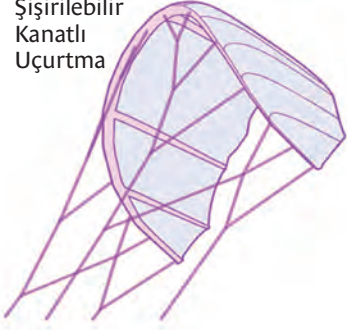
Lloyd rüzgâra dik biçimde hareket eden uçurtmalarla enerji toplamak için iki yöntem önermişti. Birincisi, uçurtmayı yeryüzüne bağlayan halattaki kaldırma kuvveti yeryüzündeki bir kütleyi hareket ettirmek için kullanılabilir. Örneğin halat sabit bir eksen etrafında dönebilen bir makaranın etrafına dolanır. Uçurtma göklerde yükselirken makaranın yapacağı dönme hareketi bir elektrik üreticini çalıştırmak için kullanılır. İkincisi, uçurtmanın üzerine ufak rüzgâr türbinleri yerleştirilir ve üretilen elektrik enerjisi iletken kablolarla yeryüzüne aktarılır.

Lloyd yaptığı kuramsal tahminlerde tek bir uçurtmadan 45 MW güç elde etmenin mümkün olduğunu hesaplamıştı. Bu değer bugünkü en gelişmiş rüzgâr türbinlerinin kapasitesinin bile üzerindedir. Şu an için ticari olarak satışı yapılan en gelişmiş rüzgâr türbini olan MHI Vestas V164 9,5 MW güç üretiyor. Prototip aşamasında olan GE Wind Energy şirketine ait 260 metre yüksekliğindeki devasa Haliade-X türbinleriyse 12 MW güç üretebiliyor.

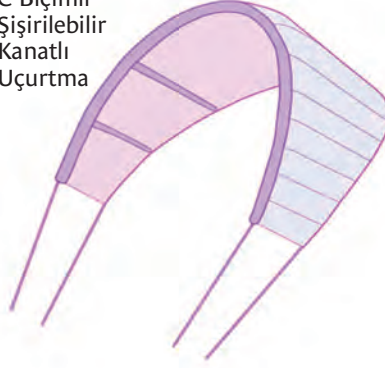


Ampyx Power firması tarafından tasarlanmış ve üretilmiş bir HKRES

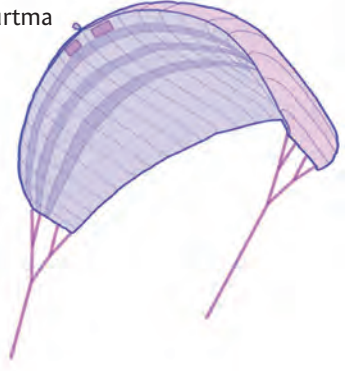
Şişirilebilir
Kanatlı
Uçurtma



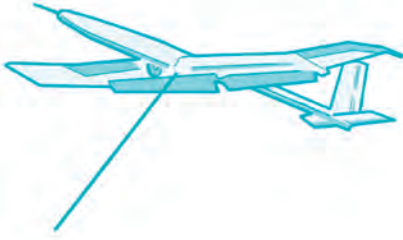
C Biçimli
Şişirilebilir
Kanatlı
Uçurtma



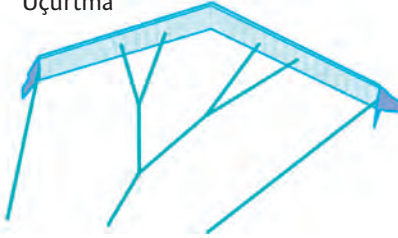
Folyo
Uçurtma



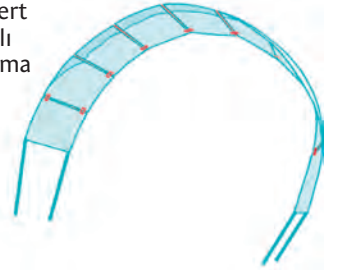
Planör



Sert Kanatlı
Uçurtma

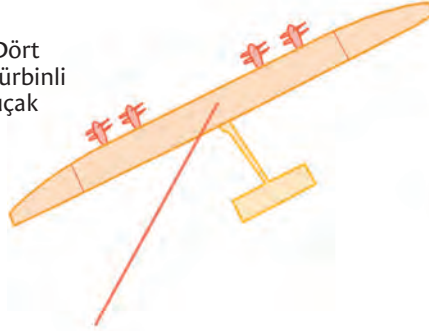


Yarı Sert
Kanatlı
Uçurtma

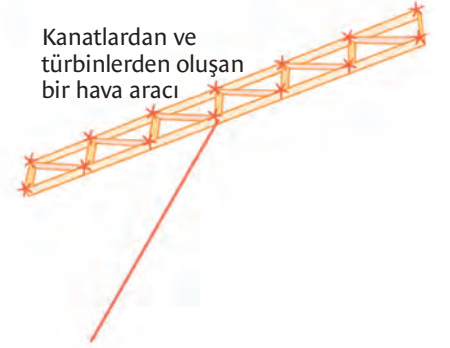


Enerji üretiminin yer istasyonunda yapıldığı sistemlerin çeşitli örnekleri

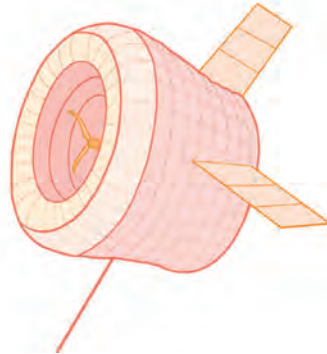
Dört
türbinli
uçak



Kanatlardan ve
türbinlerden oluşan
bir hava aracı



Havada asılı kalan
türbinli balon



Enerji üreten dört
pervaneli hava aracı



Enerji üretiminin havada yapıldığı sistemlerin çeşitli örnekleri





Loyd hesaplarında hem uçurtma ve kabloların kütle-sini hem de kablolardaki hava sürtünmesini ihmal etmiş-ti. Bu yüzden 45 MW tahmininin gerçekçi olduğu söyle-nemez. Ancak Loyd'un fikirleri ilerleyen yıllarda da etkili olmaya devam etti.

Hava Kaynaklı Rüzgâr Enerjisi Sistemleri

Bugün gökyüzünden rüzgâr enerjisi toplamak için üzerine çalışmalar yapılan hava araçlarına uçurtma-ların yanı sıra planörleri, havada asılı kalan türbinleri, balonlu uçurtmaları ve diğerlerini de eklemek lazım. Atmosferin 200 metre ila 10 kilometre yüksekliğindeki bölgelerinde çalışmaları için tasarlanan bu hava kaynak-lı rüzgâr enerjisi sistemlerinin (HKRES) genel olarak iki ana bileşenden oluştuğu söylenebilir: bir yer istasyonu ve bu yer istasyonu ile bağlantılı bir hava aracı.

HKRES'ler, sahip oldukları özelliklere göre çeşitli baş-lıklar altında sınıflandırılabilir. Bazı HKRES'lerde ener-ji üretimi yer istasyonunda yapılırken bazılarında ise enerji uçan hava aracında üretildikten sonra yer ista-sonuna aktarılır. Enerjinin yerde üretildiği sistemlerde hava aracı genellikle bir ya da birkaç kabloyla hareketli bir düzeneğe bağlıdır. Bu hareketli düzenek istasyonun tamamı olabileceği gibi sadece bir parçası da olabilir. İstasyonun sabit olduğu sistemlerde iplerin sağladığı çekiş, bir elektrik motorunu hareket ettirmek için kulla-nılır. Bu sistemlerde çalışma süreci iki aşamadan oluşur. Birinci aşamada, araç havada yükselirken kablolar üre-teçleri hareket ettirir ve elektrik enerjisi üretilir. İkinci aşamadaysa araç alçalarak başlangıçtaki yüksekliğine geri dönerken kablolar yeniden yer istasyonundaki dü-

zeneğe sarılır ve az da olsa enerji tüketilir. Gökyüzünde genellikle 8 sayısının şekline benzer bir rota takip eden bu sistemler, sadece birinci aşamada enerji üretildiği için yer istasyonuna sürekli güç sağlamaz. Üretimin pe-riyodik olarak onlarca saniye kesintiye uğraması büyük bataryalara ya da kapasitörlere ihtiyaç duyulmasına neden olur. Kabloların sağladığı çekişin yer istasyonun tamamını hareket ettirdiği sistemlerdeyse kesintisiz güç üretilmesi amaçlanır. Ancak çok daha karmaşık olan bu sistemlerin şu an geliştirilme aşamasında olan tek bir prototipi vardır. Bu sistemde istasyonun hareketi hava aracının rotasını kontrol etmek için kullanılır. Enerji üretimi de istasyonun hareketinin bir elektrik motoruna aktarılmasıyla sağlanır.

Enerjinin havada elde edilip yeryüzüne aktarıldığı sistemlerse havada kaldıkları her an güç üretebilirler. Üretim, sadece havalanma ve iniş sırasında kesintiye uğ-rar. Üstelik toplanan rüzgâr enerjisinin bir kısmı aracın kendi enerji ihtiyacını karşılamak için de kullanılabilir. Sürekli yükselip alçalması gerekmeyen hava araçları daha basit rotalar takip eder. Ancak sıradan kablolar-göre genellikle daha kalın olan iletken kabloların sür-tünmeyi artırması bu sistemlerin verimini düşürür.

Üzerinde Çalışılan Alternatifler

Farklı alternatiflerin gerçek dünyada nasıl perfor-mans göstereceğini anlamaya çalışan araştırmacılar pro-totipler üretilip test ediyorlar.

Bir HKRES'nin sağlayacağı güç pek çok değişkene bağlıdır. İstisanasız tüm HKRES'lerde hava aracının kü-tlesinin artması kablolardaki gerilimin azalmasıyla sonuç-



Makani firması tarafından tasarlanıp üretilmiş bir HKRES

lanıyor. Bu durum özellikle enerji üretiminin yer istasyonunda yapıldığı sistemler için önemli. Bu sistemlerde elektrik motorunun çalışmasını kablolardaki gerilim sağladığı için hava aracının kütlesi arttıkça elde edilen güç azalıyor. Enerji üretiminin hava aracı üzerindeki türbinlerle yapıldığı sistemlerdeyse durum farklı. Kuramsal tahminler hava aracının kütlesinin elde edilecek enerjiye önemli bir etkisinin olmadığına işaret ediyor ve gözlemler de bu tahmini doğruluyor.

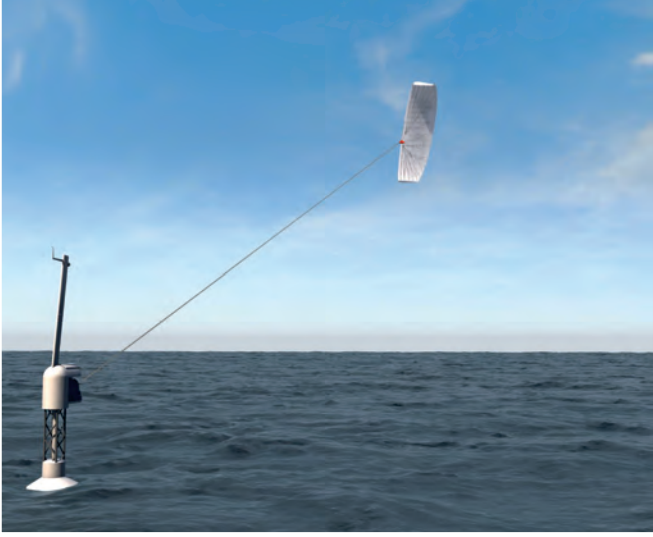
Hâlâ tartışmalı olan bir konu hava aracının kanatlarının esnek mi yoksa sert mi olmasının daha iyi olduğu. Esnek kanatlı araçlar, testler sırasındaki kazaları daha hafif hasarlarla atlatıyorlar. Ayrıca kütleleri daha hafif olduğu için daha fazla güç sağlayabiliyorlar. Sert kanatlı araçlar ise hem aerodinamik verimliliği daha yüksek hem de daha dayanıklılar. Şu an için hangi seçeneğin uzun vadede öne çıkacağını kestirmek zor.

HKRES'lerin hangi irtifalarda daha verimli çalışacağı da cevaplanmayı bekleyen bir diğer soru. İrtifa yükseldikçe rüzgârlar daha şiddetli esmeye başlar. Ancak araçların

daha yüksek irtifalarda çalışması aynı zamanda daha uzun kabloları ihtiyaç duyulması anlamına gelir. Daha uzun kablolar ise daha fazla hava sürtünmesi demektir. Şu an için hangi irtifanın daha iyi olduğu ile ilgili tahminler, doğru olduğu varsayılan hipotezlere göre değişiyor. Bir tahmine göre, kablolardaki hava sürtünmesinin azaltılabilmesi durumunda 1000 metre civarındaki yükseklikler ideal sonuçlar verebilir.

Sistemlerin güvenli bir biçimde çalışması için hava araçlarını yer istasyonuna bağlayan kabloların elektrotatik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekiyor. Günümüzde bu sistemlerde yaygın olarak kısaca UHMWPE olarak adlandırılan düşük maliyetli, mükemmel mekanik özelliklere sahip polimer kablolar kullanılıyor. Bugüne kadar bu kabloların kuru ya da nemli hava koşulları altında nasıl performans göstereceğini tespit etmek için yapılan çalışmalarda fırtına bulutlarındaki statik elektrik alanların parlamalara ya da boşalmalara sebep olmadığı gözlemlenmemiş. Ancak özellikle iletken olmayan kablolar yıldırımların ürettiği dinamik elektrik alanlara maruz kaldıklarında parlamaları ve boşalmaları

tetikleyebiliyor. HKRES'lerin fırtınalı havalarda çalışması beklenmediğinden bu durumun bir sorun teşkil etmeyeceği söylenebilir. Ancak sistemlerin güvenli bir biçimde çalışabileceği "en kötü hava koşullarının" da tespit edilmesi gerekiyor.



Skysails firması tarafından denizlerde kullanılmak üzere tasarlanıp üretilmiş bir HKRES

HKRES'lerin Avantajları

Bir rüzgârın sağlayabileceği güç, rüzgârın hızının küpüyle orantılıdır. Örneğin rüzgârın hızı iki katına çıktığında sağladığı güç sekiz katına çıkar. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinden daha fazla yararlanmak daha güçlü rüzgârlara erişmekten geçiyor. HKRES'lerin standart türbinler karşısındaki en önemli avantajı da zaten standart türbinlerin ulaşamadığı, güçlü rüzgârların estiği irtifalarda çalışmaları. Ayrıca standart türbinler sadece karalarda ve sığ sularda çalışıyor. HKRES'ler ise deniz tabanına türbin kurulamayan açık denizlerden bile rüzgâr enerjisi toplayabilir. Ayrıca yüzer türbinlerle karşılaştırıldığında da HKRES'leri taşıyan platformlar açık denizlerdeki zorlu koşullara karşı daha dayanıklıdır.

HKRES'lerin sıradan türbinlere göre bir diğer avantajı, kütlelerinin düşük olması. Göklerden rüzgâr enerjisi toplayan bir uçurtmayı taban ve kule gibi enerji üretimine katkısı olmayan ağır kısımlarından arındırılmış bir rüzgâr türbinine benzetebilirsiniz. Örneğin yaklaşık

1,5 MW güç üreten 80 metre yüksekliğindeki standart bir rüzgâr türbininin ağırlığı 100 tona varırken, toplam ağırlığı sadece 1 ton olan bir drone ve yer istasyonu 100 kW güç üretmeyi başarabiliyor. Kütlelerin düşmesi doğal olarak enerjinin üretim maliyetini de düşürüyor. Bu durum rüzgâr enerjisinin geleceği açısından özellikle önemli olabilir. Çünkü standart rüzgâr türbinlerinin ürettiği enerjinin maliyeti şu an enerjinin ortalama satış fiyatının üzerinde.

HKRES'lerin standart türbinler gibi sabit olmaması da bir diğer avantaj. Standart türbinlerin aksine hava aracının çalıştığı irtifa ve hareket yönü, maksimum verim alınacak biçimde, rüzgârların hızına ve esme yönüne göre ayarlanabilir.

Aşılması Gereken Zorluklar

HKRES sistemlerinin güvenli ve verimli bir biçimde çalışabilmesi için aşılması gereken pek çok zorluk var: hava trafiği, zorlu atmosfer koşulları, kablo ve kanatlar da kullanılan malzemelerin çok dayanıksız ya da çok ağır olması, elektriksel bağlantıların endüstriyel standartlara uygun olmaması vb.

HKRES'lerin çalışması sırasında felakete sebep olabilecek pek çok şey var: zayıf bağlantıların kopması, aşırı güçlü rüzgârlar, yıldırımlar... Bu ve benzeri durumlar için bir çözüm hava araçlarını herhangi bir acil durum sırasında yere inebilecek biçimde tasarlamak olabilir. Örneğin, Ampyx Power şirketi topladığı enerjinin bir kısmını depolayıp kendisine saklayan uçurtmalar tasarlıyor. Böylece uçurtmanın kabloları kopsa bile depoladığı enerjiyle yere inmeyi başarması amaçlanıyor. Ancak HKRES'lerle ilgili en önemli zorluk da belki de bu noktada başlıyor. Bu cihazların havalanmalarını ve yere inişlerini otomatikleştirmek çok zor; özellikle de açık denizlerde çalışması planlan, yüzer, hareketli platformların üzerinde iniş kalkış yapacak hava araçları için. Söz konusu olan büyük ölçekte enerji üretecek, birbirinden bağımsız çok sayıda HKRES'nin bir arada çalışacağı santraller olduğunda durum daha da zorlaşıyor. Örneğin 300 tane hava aracının olduğu bir santrali düşünelim. Her bir araç tek bir seferde 2 gün havada kalabilse bile bu durum bir yıl içinde yakla-

şık 55.000 kalkış ve iniş olacağı anlamına gelir. Bu kadar çok sayıda aracın çevredeki insanlar, hava araçları ve santralin kendisi için tehlike arz etmeden nasıl çalışacağı hâlâ üzerine araştırmalar yapılması gereken önemli bir sorun.

Yüksek irtifalarda çalışması planlanan araçlar için başka bir zorluk da farklı irtifalardaki koşulların farklı olması. Aracın sadece çalışması planlanan irtifadaki sıcaklık, basınç ve rüzgâr koşullarına uygun biçimde tasarlanması yeterli olmayacaktır. Çünkü aracın bu irtifalara ulaşması için daha alçak katmanları da aşması, dolayısıyla bu bölgelerde de güvenli biçimde çalışabilecek biçimde tasarlanması gerekir.

Hava Kaynaklı Rüzgâr Enerjisinin Bugünü ve Geleceği

Hava kaynaklı rüzgâr enerjisi ile ilgili araştırmalara bugüne kadar onlarca milyon dolar harcanmış durumda. Ancak enerji piyasasının büyüklüğü, rüzgâr enerjisinin sahip olduğu potansiyel ve hava kaynaklı sistemleri üretmenin ve işletmenin zorluğu düşünüldüğünde bu meblağın büyük olmadığını, aksine küçük olduğunu söylemek gerekir. Yine de hem enerji sektöründeki büyük firmalar hem de özel olarak bu işe odaklanan daha küçük firmalar hava kaynaklı enerji sistemleri üzerinde çalışmalar yapmaya devam ediyorlar.

Google'ı da bünyesinde bulunduran Alphabet şirketinin sahibi olduğu Makani firması, yakın zamanlarda Norveç fiyortlarında 600 kW güç üreten uçurtmalarını test etti. Uçurtmaların doğal koşullar altında nasıl davrandığıyla ilgili veriler topladı. Ampyx Power isimli Hollanda menşeli bir şirket yüzer platformlardan havalanabilen sistemler üzerine çalışmalar yapıyor. Şirketin en gelişmiş modelinin kapasitesi 300 kW. Skysails isimli bir Alman firması ise kendi geliştirdiği bir uçurtmayı bir çevre koruma örgütüne ait gemiye çoktan monte etti bile. Uçurtma geminin enerji ihtiyacının tamamını olmasa da bir kısmını karşılamaya devam ediyor. Şirket 2020 içinde 500 kW'a kadar güç üreten sistemleri piyasaya sürmeyi planlıyor. Benzer çalışmalar yapan çok sayıda başka firmayı da sayıp bu listeyi uzatmak mümkün.



KiteGen firması tarafından tasarlanıp üretilmiş bir HKRES

Şu an için HKRES'lerin ürettiği enerjinin maliyeti yüksek. Ayrıca sistemlerin ne ölçüde güvenli olduğu da tam olarak bilinmiyor. Bu yüzden geliştirdikleri ürünleri test etmek ve geliştirmek isteyen firmalar her tarafı şebekelerle donatılmış şehirlere değil, enerjiye erişimin zor olduğu uçra bölgelere yöneliyorlar. Örneğin Kitepower isimli Hollanda firması, Karayipler'deki Curaçao Adası'nda test amaçlı ufak bir HKRES parkı kurdu. Park, şirketin Hollanda'daki Delft şehrinde bulunan merkezinden idare ediliyor. Uzaktan yapılan gözlemlerle araçların hangi sıklıkla bakıma ihtiyaç duyduğu tespit edilmeye çalışılıyor ve sistemin performansı hakkında veri toplanıyor. Yerdeki araçların havalanması içinse şirketin bölgedeki çalışanlarından yardım alınıyor.

Önümüzdeki yıllarda hava kaynaklı rüzgâr enerjisi üzerine yapılan çalışmaların ivmelenmesi, şu an devam eden çeşitli projelerin tamamlanması ve test edilmesi bekleniyor. Geliştirilen teknolojilerin güvenlik ve verim açısından ne kadar olgunlaşacağını ve var olan teknolojilerle ne ölçüde rekabet edebileceğini ise zaman gösterecek. ■

Kaynaklar

Cherubini, Antonello ve ark., "Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 51, s. 1461, 2015.

Loyd, Miles L., "Crosswind Kite Power", *Journal of Energy*, Cilt 4, s. 106, 1980.

Harris, Margaret, "The promise and challenges of airborne wind energy", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/the-promise-and-challenges-of-airborne-wind-energy/>, 2019.