

I- METİN:

A. GİRİŞ:

1. Proje konusu, "Gelibolu Modeli" Rüzgar Türbinlerinin teknik verimlilik parametrelerinin araştırılmasıdır.

2. Projenin amacı: Projede, söz konusu rüzgar türbinlerinin, verimlilik parametrelerinin, türbinin teknik verimliliği üzerindeki etkilerinin, model, test ve analiz çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak belirlenmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

3. Metod: "Gelibolu Modeli" Rüzgar Türbinlerinin proje kapsamında uygulama modellerinin üretilmesi gerekmiştir.

Bu modeller, küçültme faktörleri dikkate alınarak üretilmiştir. Modeller üzerinde verimlilik ile ilgili test ve analizler, öğretim üyelerince veya onların destek ve gözetimlerinde, sistematik şekilde yapılmıştır. Proje kapsamında, ayrıca, bulunan sonuçlar, literatürde bulunabilen diğer rüzgar türbin tipleri ile metodik olarak karşılaştırılmıştır.

4. Literatür Bilgileri: Rüzgar enerjisi ve rüzgar türbinleri ile ilgili literatür, tarihte yeralan eski uygulamaların yanında, ileri teknoloji ürünü rüzgar türbinlerini de kapsamaktadır. Ancak bu teknolojinin yine de henüz bakir bulunduğu, bu nedenle yeni gelişmelere açık olduğu söylenebilir.

Rüzgar enerjisinden yararlanarak enerji üreten güç makinaları olan rüzgar türbinlerinde, türbin kanatlarının ana milinin (rotor ekseninin) yeryüzüne karşı konumuna göre, belli başlı iki tür ile ilgili uygulamalar literatürde yer almaktadır:

a) Yatay milli rüzgar türbinleri.

b) Dikey milli rüzgar türbinleri.

Bu klasik sınıflandırma içerisinde yer alan türbinlerden, **yatay milli rüzgar türbinlerinin** başlıcaları şunlardır:

Modern pervaneli türbinler (2 veya 3 kanatlı), Çiftlik tipi (Çoklu kanatlı, tarımsal su çıkarma veya lokal elektrik üretimi amaçlı), Hollanda tipi (4 kanatlı) ve diğer tür yatay milli türbinler (tek kanatlı vs.) **(Şekil:8)**

Görüldüğü gibi, klasik sınıflandırmada yatay milli rüzgar türbinleri, bir kısmı iyice yaygınlaşmış olan, iyi bilinen birkaç türbin türü ile sınırlı bulunmaktadır. Modern pervaneli türbinler, bugün uygulamada en çok karşılaşılan ve halen en iyi geliştirilmiş bulunan türbinlerdir.

BETZ Limiti olarak bilinen, türbinlerin maksimum verimlilik sınırı (**% 59,26**) ile ilgili kuram da, bu tür yatay milli rüzgar türbinlerinin hava akımları karşısındaki teorik konumları örnek olarak verilerek öngörülmüş bulunmaktadır.

Dikey milli türbinler ise, ana rotor eksenini yeryüzüne dik olarak yataklanmış ve değişik türlerde güç kanatlarına sahip bulunan rüzgar türbinleridir: Bu türbinlerin bellibaşlı klasik türleri, 1929 -1931 yıllarında değişik patentleri alınan "**Savonius**" ve 1931 yılında patenti alınan "**Darrieus**" türbinleridir. **(Şekil:9)**

Bu iki tür türbinin zaman içinde muhtelif kombinasyonları ve geliştirme modelleri bulunmuş ve pratikte uygulanmıştır.

Bunlardan başka "**Giromill (=cyclogiro)**" adı verilen bir rüzgar türbini tipi de mevcuttur (**Şekil:3, 9**). Giromill türbini, görünüm olarak "Darrieus" tipi türbinlere benzemekle beraber, onun aksine bu türbinde kanat açıları da değiştirilebilmektedir.

Dikey milli rüzgar türbinleri arasında sayılabilecek olan diğer bir tür rüzgar türbini ise, "**Tornado**" adı verilen tipteki rüzgar türbinidir. Burada, özellikle "Gelibolu Modeli Rüzgar Türbinlerinde" oluşan ek vakum gücünün önemini belirten ve projemiz açısından, önemli bir örnek olması bakımından bu türbinin çalışma prensibi de açıklanmaya çalışılacaktır:

Tornado tipi türbin, dikey kule görünümünde silindirik ve sabit bir yapıya sahip olup, üzerinde çevresel olarak bazı hava kanalları ve hava kapakları yer almaktadır.

Bu kapaklar rüzgar yönlerine göre uygun şekilde açılarak veya kapatılarak, silindirik türbinin arka cephesinde ve üstünde bir vakum gücü oluşması sağlanmaktadır.

Bu emiş gücü ise, türbin içinde, türbinin dibindeki yarıklardan türbinin tepesine doğru kuvvetli bir hava akımı sağlamaktadır.

Bu yükselen hava akımının önüne yerleştirilen dik milli pervane kanatları hızla ve güçlü şekilde dönerek enerji üretmektedir.

Dikey milli rüzgar türbinleri değişik aerodinamik ve mekanik özelliklere sahip bulunmaları nedeniyle değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu şekilde birçok değişik tipte dik milli rüzgar türbin türlerinin mevcut olduğu görülmekte ve dik milli rüzgar türbinleri, yeni geliştirmelere de açık yapısal özellikler göstermektedirler.

Bu alanda da, yatay milli rüzgar türbinlerinde olduğu gibi, araştırma, buluş, geliştirme faaliyetlerinin artması ile zamanla daha yüksek verimli rüzgar türbinlerinin ortaya çıkabileceği öngörülmektedir.

Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması ayrıca, türbin kanatlarının hava akımlarının güçleri karşısında etkilenme özellikleri açısından da verilmektedir: Bu etkiler başlıca, sürüklenme, (=süpürme), (=drag) etkisi ve kaldırma (=çekme, emme), (=lift) etkileri olarak tanımlanabilecek etkilerdir. (Uyar, 1985) (Şekil:1, 2)

Geniş yüzeyli kepçe kanatlı, süpürme (=sürüklenme), (=drag) etkisine sahip, (=Savonius ve Savonius benzeri) rüzgar türbin türlerinde, dönme momenti (T) (=kanatları döndüren itme kuvveti), "Darrieus" türü kanatlara oranla karşılaştırmalı olarak büyüktür. Buna rağmen, kanadın aerodinamik yapısının kısıtlılığı nedeniyle, kanadın açılma hızı (v_o) düşük kalmaktadır.

Bu nedenle de ana milli döndüren kuvvet (Q), sınırlı kalmaktadır:

$$Q = (v_o) \times T \quad [4]$$

Uygun aerodinamik kesitli (uçak kanadı kesitine benzer kesitli) kanatlara sahip olan (Darrieus; Giromill gibi) türbin tipleri ise, kaldırma (=çekme), (=lift) etkisi yüksek türbinlerdendir.

Bunlarda kanatların döndürme momenti (T), daha küçük olmakla beraber, kanatların aerodinamik yapısının uygunluğu nedeniyle, kanat uçları rüzgar hızından birçok kat daha yüksek hızda dönebilmektedir. Bu yüksek hız ise, kanat uçlarının yüksek açısal hıza (v_o) sahip olduğu anlamındadır.

Bu türbinler, süpürme (=sürüklenme), (=drag) etkili diğer türbinlere (yani döndürme momenti yüksek, fakat düşük turlu türbinlere) oranla eşdeğer veya daha yüksek tork güçlerine (Q) erişebilmektedir.

Bu durumu aşağıda bir tablo üzerinde karşılaştırmalı olarak gösterebilmek mümkündür:

Türbinin Özelliği	Dönme Gücü	Dönme Momenti	Açısal Hız:
DRAG etkili	Q=	T	v_o
LIFT etkili :	Q=	t	V_o

$$T > t \quad ; \quad V_o > v_o \quad [5]$$

$$Q = (T \times v_o) = (t \times V_o) \quad [6]$$

Uygulamada, genellikle "lift" (=çekme, kaldırma) etkili kanatlara sahip rüzgar türbinlerinde, "kanat-uçlarının-hızları" (=tip-speed-ratio, TSR) oranının, ilgili türbin geometrisinin optimum değerlerine kadar artırılabilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle, bu türbinlerin güçleri ve verimlilikleri, sürüklenme (=süpürme; drag) etkili kanatlara sahip türbinlere oranla daha yüksek değerlerde elde edilmektedir:

Bu durumda, örneğin, **Darrieus** tipi "lift" (=çekme, kaldırma) etkili türbinler, **Savonius** tipi "drag" (=süpürme, sürüklenme) etkili türbinlerden, karşılaştırılmalı olarak daha verimli olmaktadır.

Ancak, "lift" (=kaldırma) etkili bu türbinlerin önemli bir sakıncası, rüzgar karşısında kendiliklerinden, ilk-dönme (**cut-in**) hareketine geçememeleri veya çok zor harekete geçebilmeleridir.

Bu sorunun nedeni, türbinin her iki yanında olumlu ve olumsuz rüzgar bölgeleri arasında bulunan kanatlar üzerinde oluşan zıt kuvvet momentlerinin, birbirlerini kısmen gidermesi, toplam bileşke güçlerini azaltmasıdır. Böylece başlangıçta, ancak küçük bir kuvvet farkı olarak oluşan güç (t), türbinin ilk hareket atalet momentini (=türbin durgunluğunu) yenmeye, dolayısıyla kanatlara ilk hareketi (cut-in) vermeye yetmemektedir.

Bu sorunun önlenmesi için genellikle, bu türbinler, daha dar çaplı "sürüklenme" (=süpürme;drag) özelliğine sahip "Savonius" türü bir türbinle merkezde kombine edilirler. (**Şekil:8**)

Böylelikle oluşan komple "karma" türbin, düşük rüzgar hızlarında da ilk-harekete (cut-in) geçebilme özelliği kazanabilmektedir.

Ancak bu kanat katkısı sadece ilk hız kazandırmakta, türbinin genel veriminin artması açısından etkisi sınırlı kalmaktadır. Diğer bir ifade ile bu "karma" türbinin esas verimi, kepçe türü "Savonius" kanatlardan değil, yüksek kanat uç hızıyla dönebilen ve uçak kanadına benzer kesite sahip (genellikle NACA profil no.larına sahip) "Darrieus" tipi kanatlardan sağlanmaktadır. (**Şekil:7**)

5. Eksiklik gideren aerodinamik çözümler:

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbinlerinde dikey milli rüzgar türbinlerinde mevcut bir teknik eksiklik giderilmiş olmaktadır: "Gelibolu Modeli" rüzgar türbinleri "güç-artırma-kanatlarına" sahip bulunması yanında, bu kanatlarla aynı zamanda yönelme de yapabilme özelliğinde olduğundan, türündeki dikey milli rüzgar türbinlerinin en önemli eksikliklerini gideren aerodinamik çözümler getirmektedir.

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbinleri, bu yönden aşağıda belirtilen türbinlere oranla belirgin ek avantajlar sağlamaktadır:

Bu türbinler şunlardır:

- a) Güç artırıcı kanatları bulunan (**Augmented wind turbines**),(=AWT) dikey milli türbinler,
- b) Güç artırıcı kanatları bulunmayan, fakat kanat açıları yönlendirilebilen, (**Cyclogiro**) tipi dikey milli türbinler,
- c) Güç artırım etkisine sahip olamayan (**Darrieus**) tipi dikey milli türbinler.

Yukarıda öngörülen bilgilerin ışığında, dik milli türbinler arasında, belki yeni bir sınıflandırma olarak, "Güç-Artırım = augmentation" kanatlarının mevcut olup olmadığına göre bir sınıflandırma şekli aşağıdaki şekilde önerilebilir:

- * Güç artırım (augmentation) Kanatlarına sahip dik milli rüzgar türbinlerinde:

- i) Kendiliğinden yönelme yapamayan güç artırım kanatlı dik milli türbinler (Örnek: Kingston Polytechnic türbini, AWT) (EK:3) (Şekil:9)
- ii) Kendiliğinden yönelme de yapabilen güç artırım kanatlı dik milli türbinler (Örnek: Gelibolu Modeli Rüzgar Türbini),

olarak ikili bir sınıflandırma yapılabilir:(Şekil:4, 6, 9)

Eksiklik gideren özelliklerin diğer bir önemi ise, fonksiyonel açıdan "giromill, cyclogiro" türü rüzgar türbinlerinin, (Şekil:3) mekanik yöneltme probleminin tamamen ortadan kaldırılabilmesi, bununla birlikte verimde belirgin artmanın sağlanmasıdır:

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbininde yer alan "Güç-Artırım- Yöneltme-Kanatları" (=GAYK), herhangi bir yöneltme mekanizmasına gerek kalmaksızın, yön tayinini rüzgara karşı kendiliğinden yapabilmektedir. Bu fonksiyon, GAYK kanatların sahip olduğu, özel geometrik tasarımın aerodinamik özelliği nedeniyle, kendiliğinden ve rüzgar tarafından gerçekleştirilmektedir.

Bu suretle, "Gelibolu Modeli" rüzgar türbinine rüzgarın sadece olumlu (döndüren) kuvvetleri kanalize edilmekte, durduran (olumsuz) kuvvetleri ise toplam gücü azaltacak yerde, GAYK kanatlarla kendiliğinden olumluya dönüştürülerek, olumlu tork gücüne eklenmekte ve türbinin tur sayılarını ve gücünü birkaç katına kadar artırabilmektedir.

Oysa, laboratuvar testlerinde dünyada en yüksek verimli olarak (%60), tespit edilmiş bulunan, "Cyclogiro, giromill" türü rüzgar türbinlerinde, doğrusal ve dik durumda bulunan "Darrieus tipi" kanatlar, ancak mekanik bir düzenleme ile ve

ana şafta bağlı bir "kam-mili" mekanizması ile, her turda rüzgara göre daima yön tayini yaptırılarak mekanik olarak yönlendirilmektedir:

Böylece "giromill" türü türbin kanatları olumlu bölgede iken (**Şekil:2**), yani kanatlar rüzgar tarafından doğru yönde itilerek döndürülürken, -bir anlamda- "hedef büyültmekte", fakat diğer olumsuz bölgede, yani kanatlar milin diğer tarafından ilerleyerek rüzgara karşı giderken, -bir anlamda- "hedef küçültmektedir". Bu mekanizma ise döndüren kuvvetleri artırarak verimi yükseltmektedir. (**Şekil:3**)
(**EK:4**)

"Giromill, =cyclogiro" türü rüzgar türbinlerinin verim yönünden bu üstün başarısına rağmen, söz konusu mekanik yöneltme gereğinin zorluğu ile, yol açtığı mekanik sorunlar ve imalat güçlükleri nedeniyle, ticari olarak seri üretime girildiği tespit edilememiştir. "Giromill, cyclogiro" türü rüzgar türbinlerinin, bu çok yüksek teknik verimliliğine (% 60) rağmen ekonomik kullanımdan uzak kalması, rüzgar enerjisi teknolojisi ve dünya ekonomisi için kayıptır: "Gelibolu Modeli" rüzgar türbini, "Giromill, cyclogiro" türü rüzgar türbinlerinin bu dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. (Şekil:4)

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbini, mekanik ayarlama ve yön tayini gerekmeksizin, "Darrieus türü" rüzgar türbinleri ile kombine edildiğinde, bu türbinleri -bir nevi- "giromill, cyclogiro" türü rüzgar türbinlerine dönüştürmekte, daha düşük "Uç hızı oranı = tip speed ratio" ile, daha yüksek tur sayılarına ve güç artışına erişmektedir. (**Şekil:9**)

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbinlerinin, literatürde yeralan ve dünya tatbikatında rastlanan "Darrieus türü" rüzgar türbinlerinin ve "kepçe kesitli" kanatlara sahip "Savonius türü" rüzgar türbinlerinin, tur sayılarını ve güçlerini de "bir kaç katı"

oranında artırdığı, yapılan testler ve durum tespit raporları ile belirgin olarak ortaya koyulmuştur. (**Şekil:5, 9**) (**Tablo:1, 2**)

İncelenen Verimlilik Parametreleri (Özet)

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbinleri, yaklaşık oniki yıldır üzerinde çalışılan buluş mahiyetinde orijinal bir geometrik tasarıma sahip bir rüzgar türbini türüdür. (**Şener, 1990**),

Bu tasarımın orijinalliğini, türbinin dışında yer alan "Yöneltme-Güç Artırma Kanatları" (=GAYK) oluşturmaktadır. (**Şekil:4**)

Dikey milli rüzgar türbin sistemleri yön tayini bakımından, herhangi bir tür yöneltme mekanizmasına genelde ihtiyaç göstermemektedirler. Bu klasik fakat önemli özellik, ilk bakışta, "Yöneltme ve güç artırma kanatlarının" gereksizliği veya önemsizliği yönünde peşin bir yanılığa düşme hatasını getirebilmektedir:

Bu nedenle burada, "Güç-Artırım-Yöneltme-Kanatlarının" fonksiyonlarının ve türbinin toplam verimine katkılarının çok iyi algılanması gerektiği önerilmektedir:

"Güç-Artırım-Yöneltme-Kanatları", hem olumlu (döndüren) rüzgar güçlerinin, kanatlarda dönme yönünde "pozitif bir dönme etkisi" oluşturmaya imkan vermektedir, hem de olumsuz (durduran) rüzgar güçlerinin, içteki güç kanatlarını frenletme, durdurma yönündeki "negatif etkilerine" karşı, bunları iten (drag) ve çeken (lift) olumsuz kuvvetlerinden korumaktadırlar. "GAYK-Kanatlarının" fonksiyonları sadece bu kadarla kalmamaktadır:

Bu kanatlar, aynı zamanda söz edilen olumsuz (durduran) kuvvetlerin, türbinin yanından geçip giderek, türbin arkasında vakum (wake) oluşturması ile, bu defa olumlu ek bir "çekme (lift), emiş gücüne" dönüşmesine yol açmaktadır. Bu ek olumlu kuvvet ise, döndüren kuvvetlere eklenerek, içte dönmekte olan güç kanatlarını, arka taraflarından da çekerek döndüren ek bir vakum gücü oluşturmaktadır. (**Şekil:10**)

Proje kapsamı araştırmalar sonucu, verimliliği etkileyen parametreler iki gruba ayrılmış bulunmaktadır:

a) Zorunlu parametreler (Güç-Artırım-Yönelme Kanatları (=GAYK) ile ilgili parametreler.)

Bu parametreler, başlangıçta sezgisel yaklaşımla bir buluşa dayanmakta, yıllar süren araştırmalar ve denemeler sonucunda geliştirilen "Güç-Artırım-Yönelme-Kanatları" GAYK özel tasarımı, projeye veri olarak katılmış bulunmaktadır.

Tasarımın değiştirilmesi halinde türbin verimi olumsuz yönde etkilenebilmektedir.

b) Deęiřtirilebilen parametreler : (Güç-üretim kanatları ile ilgili parametreler.)

Bu parametrelerle ilgili detaylı açıklamalar, raporun "parametrelerle" ilgili ileri bölümünde verilmektedir.

6. Ulusal rüzgar enerji potansiyeli ve projenin rüzgar enerji potansiyelinin değerlendirilmesi açısından önemi:

Ülkemizin yararları açısından, ulusal rüzgar enerjisi potansiyelimizin değerlendirilmesinin, sosyo-ekonomik ve stratejik önem ve öncelikler taşıdığı öngörülmektedir.

Proje bu açıdan da alternatif öneriler getirmesi bakımından önem taşımaktadır.

7. Dünya uygulamaları açısından önemi:

Dünyada rüzgar teknolojisinin gelişiminin ve bu daldaki uygulamaların, maalesef belki Türkiye hariç, emsal ülkelerde, hırslı ve dinamik bir yarış içerisinde, çarpıcı bir artış trendi gösterdiği, kurulan ticari rüzgar türbinlerinin, artık 1 - 2 MW'lık dev büyüklüklerde alınıp satılabildiği gözlenmektedir.

Özellikle yatay milli türbinlerde erişilebilen %37.7 gibi yüksek elektriksel performanslar ve bunun da üzerinde olan aerodinamik performans, "BETZ limiti" sınırlarına (%59.26) oldukça yaklaşmış, türbinler büyüdükçe tesis maliyetleri daha da düşmüş, (halen komple anahtar teslimi 1000 \$/KW'ın altında), bununla birlikte beher Kwh elektrik üretim maliyetleri 10 cent/Kwh'ın da altına inmiş olup, bu maliyet 3 -5 cent'lere doğru giderek düşmektedir.

Ülkeler son yıllarda binlerce MW toplam kapasitesinde rüzgar santralleri kurarak, bu alanda hem ulusal, hem de uluslararası düzeyde, ülkelerinin enerji ve sosyo-ekonomik sorunlarının çözümleri için, rüzgar enerjisinden cesur beklentilere girmişlerdir.

Örneğin; Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar 100.000 MW rüzgar türbin kurulu gücü oluşturmayı planlamaktadır.(EWEA, 1991).

Ülkelerde son aylarda kurulan yüzlerce MW tutarında rüzgar santralleri bu büyük (Almanya 1994'te toplam 632 MW) projenin tatbik edilmekte olduğunu göstermektedir. Diğer yandan teknik düzeyde, rüzgar türbinlerinin tasarım gelişmeleri kıyasıya bir rekabet ve yoğun bir araştırma ortamı oluşturmaktadır.

Özellikle yatay türbinlerin verimliliklerinde, mevcut teknik verimlerin üzerinde sağlanabilecek yüzde bir kaç puanlık verim artışı başarısı uğrunda, ülkelerin, uluslararası enerji kuruluşlarının hatta firmaların, milyonlarca dolarlık araştırma bütçelerini rahatça harcadıkları, bunun yanında binlerce beyin gücü ve iş gücünü rüzgar türbin üretimlerine tahsis ettikleri gözlenmektedir.

Teknik yönden bu çabaların sonunda sağlanan ve halen daha da ilerisi beklenen başarılar ve çalışmalar, bu dalda dünya pazar payından bu ülkeler lehine, dış ticaret hacimlerinin şaşırtıcı şekilde genişlemesini sağlamış bulunmaktadır ve bu payları giderek artmaktadır. Danimarka bu örneği 1987'lerde yaşamıştır. Sıra şimdi ABD, Japonya, İngiltere, Almanya'da görünmektedir.

Yukarıdaki açıklamaların ışığında, "Gelibolu Modeli" rüzgar türbininin de, Türkiye için şanslı bir ihracat malı olarak geliştirilebileceği öngörülmektedir. Enerji ihtiyaçlarımızın artan trendi yanında, dış ticaret hacmimiz ve lisans gelirleri olanakları bakımından, ülkemiz bu tür fırsatlara sahip çıkmalıdır.

B- İNCELENEN PARAMETRELER:

1. Genel: Güç-Artırım-Yönelme-Kanatlarının (=GAYK) etkilerinin incelenmesi ve Bulgular:

Yukarı bölümlerde belirtildiği gibi, dikey mile sahip rüzgar türbinleri, genel olarak yön tayini gereği olmaksızın çalışmaktadırlar. Ancak kanatlar, daima, "döndüren" ve "frenleten" kuvvetler arasında oluşan bileşke sonucu, "olumlu döndürme kuvveti" farkı sebebiyle dönerler.

Dikey milli türbinlerde, güç üreten normal kanatların dışına "güç artırma kanatlarının" eklenmesi (augmentation=güç artırımı özelliği kazandırılması) mümkündür. Bu durumda ise aşağıdaki yararlar sağlanır:

- a) **Olumlu yönlendirilme:** Döndüren yöndeki olumlu rüzgar gücü, türbinin güç kanatlarını döndürmek üzere doğrudan doğruya sistem içerisine kanalize edilmiş olur.
- b) **Olumsuz güçlerin siperlenmesi:** Durdurma yönündeki olumsuz rüzgar gücü türbin sisteminin dışına kanalize edilmiş olur. Bunun nedeni dıştaki kanatların, güç oluşturan kanatları siperlemesi ve frenleme etkisinin önemli kısmını yok etmesidir.
- c) **Ek vakum (wake) gücü kazanma:** Türbinin güç artırma kanatlarının hacimsel varlığı, hava akımlarını, türbinin üstüne ve yanlarına doğru saptırır. Bu sapma, türbinin projeksiyon kesitine yönelen ve türbinin yanından geçen hava akımlarının yönlerinin de saptırılmasına yol açar. Böylece türbinin arkasında ek bir vakum (wake) gücü oluşturur. Bu güç ise güç kanatlarının arkalarından

bu vakumla emilerek, dönme güçlerinin artmasında olumlu ek bir katkı sağlamaktadır.

2. Güç Artırma Kanatlarının sorunları: Bu olumlu etkilere karşılık, güç artırıcı kanatlar şu zorluk ve mahzurları da oluştururlar:

a) Yönelmenin gerekliliği: Güç artırıcı kanatlar hava akımlarının geliş yönüne karşı muhakkak kendiliğinden duyarlı veya sonradan ayarlanabilir olmalıdırlar. Böylece her rüzgar yönü için, olumlu (döndürücü) akımlara yol vermeli, olumsuz(durdurucu) hava akımlarını engellemelidir.

Bunun sağlanması, güç artırıcı kanatların pozisyonlarının her yöne (360°) değiştirilebilmesini ve bu açısal ayarlamayı sağlayacak ek teçhizatın da sisteme eklenmesini gerektirir.

"Gelibolu Modeli" ise, gerekli yönelme özelliğini kendiliğinden sağlamaktadır.

b) Konstrüksiyon güçlükleri: Türbin güçleri arttıkça, türbin konstrüksiyonu da büyüyeceğinden, kumanda ve yönelme sistemleri ağırlaşır ve karmaşıklaşır. Bu ise pratik uygulanmaları zorlaştırır, hatta imkansız kılabilir.

"Gelibolu Modeli", söz konusu yönelme mekanizmaları gerektirmemesi yönünden de avantajlı ve pratik bir tasarım durumundadır.

c) Yönelmenin güçlükleri: Türbin gücü ile beraber yüksekliği de arttıkça, rüzgarın farklı yönlerden gelme ihtimali de artacağından türbini döndüren ve frenleyen akımların ayırtedilebilmesi olanağı azalır; dolayısı ile türbin gücü de

azalır. Buna çözüm getirebilecek yöneltme mekanizmaları ise, maliyeti ve ağırlığı artırır, pratik uygulamaları zorlaştırır.

"Gelibolu Modeli" ise, kendiliğinden, anında ve kararlı yönelmesi ile bu güçlüğü de basit ve kesin aerodinamik bir çözüm getirmektedir.

3. "Gelibolu Modeli" rüzgar türbinlerinde verimliliği etkileyen parametreler:

a) Genel: Önceki maddede incelenen "güç-artırım- kanatlarının" faydaları, "Gelibolu Modeli" rüzgar türbinleri için de aynen geçerlidir. Özel profile sahip bulunan aerodinamik yapılı "güç artırım ve yönlendirme kanatları", bu türbinlere ayrıca, aşağıda belirtilen ek avantajları da sağlamaktadır:

i) Türbin, olumlu güçleri olumsuz güçlerden **tam** ayırırken, rüzgara karşı da **tam bir yönlenme sağlar;**

ii) olumsuz güçleri olumsuz bölge üzerinden de kısmen (yaklaşık %30) türbin içine saptırarak, olumlu güç haline dönüştürür ve bu hava akımlarını da sisteme kanalize eder. (Tepe etkisi); (Sekil:10)

iii) olumsuz güçlerin, sistemin üstüne ve yanlarına kesiksiz, kararlı ve yoğun şekilde saptırılmasına ve sonuçta, türbinin arkasında olumlu bir vakum (wake) gücü haline dönüşmesine imkan sağlar.

b) (Güç-artırım-yönlendirme-kanatlarında) verimlilik parametreleri:

i) Güç artırma kanadı kesitini oluşturan özel profil.

- ii) Güç artırma kanatlarının 60'ar derecelik yerleşim prensibi: (Merkeze göre 120°'lik tam simetri)

c) Verimlilik parametreleri: (Güç üreten kanatlarda)

- i) Güç kanatları **kesit profili**.
- ii) Güç kanatlarının, sistem merkezi ile oluşan "**Merkez açıları**".

d) Parametrelerin irdelenmesinde izlenen yöntem:

Genel olarak, mevcut olabilecek parametrelerden, boyutsuz parametreler, benzeşim metodu ile algılanmaya çalışılarak ayırma aşamasına girilmiştir.

Bu nedenle "boyutlu" olarak tanımlanan ve kısıtlandırılabilen parametreler ayıklanmıştır. Bu çalışmada boyutsal analiz ve taraması yapılmıştır. Boyutlu parametreler ayıklanarak, kısıtlı sayıda boyutsuz parametreye indirgenmiştir. Kısıtlı sayıya indirgenen bu parametreler de kendi aralarında ikiye ayrılmaktadır:

- i) "Güç-Artırım-Yöneltme-Kanatları"ndaki parametreler.
- ii) "Güç-üreten-Kanatlardaki" verimlilik parametreleri.

Çalışmalarımızda, tüm verimlilik parametreleri üzerinde,

- i) değişen,
- ii) sabit tutulan parametreler olarak, aşama aşama sistemli ve metodlu deneyler planlanarak, bunlar öğretim üyeleri gözetimi, destek ve bilgisi içerisinde gerçekleştirilmiştir.

II- GELİŞMELER:

A- ÇALIŞMAMIZIN DAYANDIĞI TEMEL BİLGİLER:

Rüzgar enerjisi, alternatif enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisidir. Rüzgarın gücü, akmakta olan hava kütesinin hızının küpü ile orantılı olarak artmaktadır.

Rüzgarın gücü, kinetik enerji formülüne göre, türbinden geçmekte olan hava kütesinin (**m**) hızının (**v**) küpü ile orantılıdır.

Hız arttıkça rüzgarın gücü, rüzgarın hızının küpü oranında artmaktadır.

1. Türbinlerle ilgili sınıflandırmalar:

Literatür, çok eski tarihli rüzgar türbini uygulamalarının yanında, son yılların ileri teknoloji ürünü olan türbinleri de kapsamaktadır. Ancak rüzgar teknolojisinin henüz bakir olduğu, yeni gelişmelere açık bulunduğu anlaşılmaktadır.

A. Yatay mile sahip-pervaneli türbin tipleri: (Şekil:8)

- a) Modern pervaneli** (2 veya 3 kanatlı),
- b) Amerika-çiftlik** tipi (çoklu kanatlı),
- c) Hollanda** tipi (4 kanatlı),
- d) Diğer** yatay milli türbinler (Dengeli tek kanatlı; vs.)

B. Dikey mile sahip rüzgar türbin tipleri: (Şekil:9)

- a) Klemin (1925)** (Kepçe türü; özel "S" kesitli),
- b) Savonius (1931)** (Kepçe türü, özel "Kesik-S" kesitli),
- c) Darrieus (1931)** (Uçak kanadı kesitli),
- d) Darrieus-tipi elips veya dikey, NACA** profilli kanatlar),
- e) Giromill (=Cyclogiro) tipi** (Kanat hücum açısı mekanik olarak rüzgara göre ayarlanan, NACA profil kesitli kanatlar),
- f) Güç artırıcı (Augmented) kanatları olan:**
 - i- Kendinden yönelmesiz, (Kingston polytechnic), (AWT), (EK:3)**
 - ii- Kendinden yönelmeli, ("Gelibolu") (Şekil:4)**

Proje çalışmalarımızda, türbinlerin hava akımları karşısındaki durumları ve bunların hava akımları üzerinde oluşturdukları etkileri ile ilgili olarak yeni bir tür sınıflandırmanın öngörülebileceği görüşü ortaya çıkmıştır:

Çalışmalarımızın temelinde mevcut literatür bilgileri esas olarak alınmış olmakla beraber, projenin gelişimi nedeniyle, rüzgar türbinlerinin **aşağıda belirtilen değişik bir tasnifi** de öngörülmüş bulunmaktadır:

Bu bakış açısından, rüzgar türbin sistemleri incelendiğinde, rüzgar enerjisinin kullanılabilir enerjiye dönüşümünün, esas itibariyle iki gruba ayrılacak rüzgar türbin sistemleri ile sağlanmakta olduğu görülmektedir:

- a) Yüzeysel tarama yapan sistemler** (Genellikle yatay milli, pervaneli türbinler: (Şekil:8)

b) Hacimsel tarama yapan sistemler (Genellikle dikey milli, örneğin "S kesitli", "Savonius" veya uçak kanadı "Darrieus" kesitli, elips veya dikey şekilde yerleştirilen kanatlı türbinler: **(Şekil:9)**

Bu tür bir sınıflandırmanın pratik bir yarar getirip getirmeyeceği tartışmaya açıktır. Ancak "hacimsel tarama yapan" dikey milli rüzgar türbinlerinin genellikle türbinin projeksiyon kesitinden daha geniş bir alandan (etki bölgesi), geçmekte olan hava akımlarından, vakum "wake" etkisi nedeniyle etkilenmekte oldukları izlenmekte olduğundan, teorik açıdan böyle bir sınıflandırmanın dikkate alınabileceği öngörülmektedir:

Bu etkinin en belirgin örneği, "Giromill" tipi rüzgar türbinleri ve bu türbinlerin çalışma özelliklerinde görülmektedir. **(Şekil:3)**

Bu nedenle türbin verimliliklerinin hesaplanmasında, hacimsel tarama yapan türbinlerde, türbinin sadece projeksiyon kesitinin esas alınması kuralı yanında, türbinin kütlesi nedeniyle etkilediği hava akımlarının türbinin etrafından geçmekte bulunduğu akım bölgesi kesitinin, "etki bölgesinin": de dikkate alınmasının gerektiği konusundaki önerinin **(Şener, 1986)** tartışılmasına olanak sağlamak üzere konu burada irdelenmeye sunulmaktadır.

2. Türbinlerin verimlilik sınırları:

Yüzeysel tarama yapan rüzgar türbin sistemleri, (kısaca yatay milli pervaneli türbinleri), "**Betz limiti**" olarak bilinen bir verimlilik sınırına (**% 59.26**) tabidirler. Bu limit ile ilgili matematiksel açıklamalar, fiktif silindirik bir bölgeden yatay milli pervaneli bir türbine doğru gelen hava akımlarının varlığı dikkate alınarak

öngörölmüştür: Nitekim, yatay milli olarak çalışan bu sistemlerde pervane, rüzgara karşı yüzeysel bir alanı, (silindir kesiti) (=daire) taramaktadır.

Bu tür sistemlerde "kanat-uç-hızı" (=Tip speed ratio) oranları, rüzgar hızına nazaran arttıkça, verimlilik oranları, giderek bir noktaya kadar yükselebilmekte ancak, yukarıda belirtilen verim oranı ile sınırlı kalmaktadır.

Gerçekten bu türbinlerden en yüksek verim, rüzgar hızının, türbinin arkasında eski hızının 1/3' üne düşürülebilmesine imkan sağlayan türbin kanat tasarımı, kanat sayısı ve kanat tur sayılarına erişilmesi halinde elde edilebilmektedir.

3. Hacimsel tarama yapan sistemlerin durumu: .

Hacimsel tarama yapan sistemlerde (dikey milli, dikey veya elips kanatlı türbinler) türbin, hava akımları karşısında hacimsel bir yapı oluşturmaktadır.

Böylece, türbinin projeksiyon kesitinin dışından geçmekte olan hava akımları da, cismin (türbinin) varlığı nedeni ile saptırılmakta, böylece ön cephede ek basınç ve arka cephede ise vakumdan doğan ek çekme (=lift; wake) etkileri oluşmakta, bunlar da türbinlerin verimliliklerini etkileyebilmektedir. Bu duruma örnek olarak, **özellik gösteren türbinleri sayabiliriz:**

4. Özellik gösteren türbinler:

Nitekim literatürde, "**giromill (cyclogiro)**" olarak bilinen dikey milli ve hacimsel tarama yapan bir tür rüzgar türbininde, verimin %60 olarak tespit edildiği belirtilmektedir.

Bu verim yüzdesinin ise, yukarıda izah edilen ek basınç ve vakum etkilerinden oluştuğu belirtilerek, bu nedenle "**Betz limitini - istisnaen - bir miktar aştığı**" söz konusu literatürde devamla açıklanmaktadır. (**McLaughlin, 1979**)

Yine, **Tornado türbinlerinde** türbin verimleri oldukça yüksek (net aerodinamik verim % 47'nin üzerinde) bulunmaktadır. Bunun nedeninin, türbinin kütlesi tarafından saptırılan hava akımlarının geniş **etki bölgesinde** yol açtığı "**ek-vakum**" etkileri nedeniyle oluştuğu tartışılabilir.

B. ARAŞTIRMANIN DAYANDIĞI VERİLER:

Proje çalışmalarımızda Ankara, İstanbul ve Erzurum'daki Üniversitelerimiz ile ayrıca, Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğünden, çeşitli bilgi, veri temini, kaynak ve imkanlarından yararlanma şeklinde destekler sağlanmıştır.

1. Tarihçe: Bu projenin temel hareket noktası, 12 yıl öncesine kadar inen, rüzgar enerjisinin değerlendirilmesinde yeni tasarıma sahip bir tür rüzgar türbininin oluşturulması konusundaki, araştırma ve buluş çalışmalarımıza dayanmaktadır. 1990 yılı başlarında bu buluş ile ilgili patent işlemleri yapılmıştır.

2. **Türkiye 5. Enerji Kongresi'nde**, 1990 Ekim'inde bir tebliğ ile Ayrıca "Gelibolu Modeli" rüzgar türbini, literatüre tanıtılmıştır. (**Şener, 1990**)

3. **Diğer Kaynaklar:** Proje dolayısıyla, gerekli veriler ve literatür kaynakları yönünden, Üniversitelerimizden, DPT kütüphanesinden, EİE Genel Müdürlüğünden, Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğünden, çalışmalarımızda kullanılan teknik veriler, tasarım bilgileri, malzeme bilgileri derlenmiştir.

4. Teknik Bilgi ve veriler:

a) Rüzgar enerjisi, hava akımlarının kinetik enerjisinden doğmaktadır. Hareket halinde bulunan havanın kütlesi, hızının karesi ile orantılı bir enerji oluşturmaktadır:

$$\text{Enerji} = 1/2 m.v^2 \quad [7]$$

Havanın kütlesi (m), havanın özgül ağırlığı ile, birim zamanda kesit alandan geçmekte olan hava hacminin çarpımıdır. Diğer bir ifade ile, hareket halinde olan hava kütlesi,(havanın özgül ağırlığı (ρ) $\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$ olduğundan), her saniye, hareket halindeki hava kütlesinin hızının (v), küpü ile, özgül ağırlığının çarpımının, yarısı kadar bir kinetik enerjiye sahip bulunmaktadır. (**Uyar, 1985**)

$$W = 1/2 \rho v^3 \quad [8]$$

Görüldüğü üzere rüzgar hızı (v), aritmetik dizi ile (hızın nominal "rakamsal" değerine oranla artış) gösterirken, gücün (W), geometrik dizi halinde (hızın küpü ile orantılı) artışına yol açmaktadır:

$$\text{(Güç = Watt / m}^2 \text{ / saniye)}$$

Örnek olarak, matematiksel değeri (nominal olarak) eşit artan rüzgar hızları karşısında, beher (m^2) yüzeye yönelen rüzgar gücünün artışları aşağıda -ampirik karşılaştırmalarla- gösterilmektedir:

DEĞİŞİK RÜZGAR HIZLARINDA GÜCÜN GEOMETRİK OLARAK ARTIŞI

Rüzgar Hızı (v)	Watt / m^2	NOTLAR
1 m/sn(4 km/s)	0.6 W/m^2	(= Bir mum enerjisinden az)
5 m/sn(18 km/s)	78 W/m^2	(= 2 ad.floresan lamba kadar)
10 m/sn(36 km/s)	625 W/m^2	(= 1 Beygir gücünden az)
15 m/sn(54 km/s)	2100 W/m^2	(= 2 Beygir Gücü/ m^2 'den çok)
20 m/sn(78 km/s)	5000 W/m^2	(= 6 Beygir Gücü/ m^2 'den çok)
25 m/sn(90 km/s)	9700 W/m^2	(=12 Beygir Gücü/ m^2 'den çok)
30 m/sn(108 km/s)	16500 W/m^2	(=21 Beygir Gücü/ m^2 'den çok)

(Daha yüksek hızlar, büyük fırtına, bora, tornado, tayfun gibi aşırı güçlere sahip rüzgarlardır.)

b) Rüzgar türbinlerinde iş gören hava akımları, türbinin kanatlarını iki şekilde etkilemektedir:

i) **iten güçler** (drag= süpürme, etkisi)

ii) **çeken (kaldıran) güçler** (lift= çekme, kaldırma, emme etkisi) (**Şekil:2**)

Genellikle yalnızca (drag=itme) gücüne dayanarak çalışan çoklu kanatlı sistemlerin oldukça verimsiz kaldıkları görülmektedir. Buna mukabil, (lift= emme, çekme, kaldırma) sistemlerinde türbin verimlerinin çok daha yüksek olduğu bilinmektedir. Modern pervaneli (2 veya 3 kanatlı) rüzgar türbinlerinde (lift) etkisinin, (drag) etkisine nazaran onlarca kat fazla olduğu belirlenmiştir.

c) Yatay ve dikey milli türbinler, bu iki etkiden yararlanma bakımından farklı özelliklere sahiptirler:

i) **Yatay milli türbinlerde:** Sadece olumlu güçler kanatları döndürmektedir.

Bunlar:

D (Drag) pozitif = D_p (iterek döndüren olumlu tki)

L (lift) pozitif = L_p (çekerek döndüren olumlu etki)

ii) **Dikey milli türbinlerde:** Yukarıdaki kuvvetlere ek olarak olumsuz bölgede, aşağıda belirtilen frenletici (olumsuz) kuvvetler de sistemin kuvvet dengesine katılmaktadır. (**Şekil:1**)

D (Drag) negatif = D_n (iterek frenleten olumsuz etki)

L (Lift) negatif = L_n (çekerek frenleten olumsuz etki)

Bu durumda sistemin dönmesi için gerekli güç (**Q1**), kabaca, bu iki grup kuvvetin bileşkesinden oluşan net farktan (=döndürme kuvvetinden) oluşmaktadır:

$$\text{Döndürme kuvveti} = Q1 = (D_p + L_n) - (D_n + L_n) \quad [9]$$

Yukarıda belirtilen güç dengesi, yalnızca klasik türdeki **dikey milli** türbin sistemleri için söz konusudur.

d) **Güç-artırım-kanatlarına sahip** dikey milli rüzgar türbinlerinde (augmented wind turbines, AWT) yukarıda belirtilen kuvvet dengesi olumlu (=döndüren) kuvvetler lehine değişerek formül aşağıdaki şekli almaktadır:

$$\text{Döndürme kuvveti} = Q_2 = [(D_p + L_{p1}) + L_{p2}] - D_n \quad [10]$$

Görüldüğü üzere formül çok **önemli bir şekilde** değişmektedir.

Bunun ifade ettiği anlam şudur: Güç artırıcı kanatlara sahip (**AWT** türbinleri gibi), rüzgar türbinlerinde döndürme kuvveti (**Q₂**), bu tür kanatlara sahip bulunmayan türbinlere oranla, döndürme kuvvetleri (**Q₁**) yönünden bariz (belirgin) bir üstünlüğe sahip bulunmaktadır.

$$(Q_2 > Q_1) \quad [11]$$

Bu üstünlük iki nedenle ortaya çıkmaktadır: (**Şekil:9, 12**)

I) Olumsuz hava akımları, (drag=süpürme,) etkisi yönünden siperlenerek, güç kanatlarını geriye doğru süpüren olumsuz etki giderilmiş olmaktadır.

Bununla birlikte olumsuz **D_n** (=Drag negatif) etkisi de, aynı güç- artırım-kanatları tarafından sistemin geri tarafında (arka bölgede) siperlenerek, güç üreten kanatların, arka cephelerinden emilerek frenletilmesi gibi olumsuz (**L_n**) (=lift negatif) etkisi de giderilmektedir.

O halde [9] no.lu denklemin ikinci kısmını teşkil eden (**D_n + L_n**) etkileri önemli miktarda azalmakta ve güç kanatları üzerinde frenletme etkisi yapamaz duruma gelmektedirler.

- ii) Dikey milli türbin sistemlerinin olumsuz (frenleten) bölgesinden, yukarıdaki açıklamalara göre, saparak yönlerini değiştiren hava akımları ise henüz güçlerini kaybetmemiş bulunduğundan, türbinin projeksiyon kesit bölgesinin dışından geçmekte olan hava akımlarının da, bir miktar saptırılmasına yol açmakta, böylece türbinin arka tarafında bir alçak basınç (lift, wake) bölgesi oluşturmaktadır.

Bu emme gücü ise, olumsuz bir gücün oluşturduğu olumlu bir çekme gücü olarak, türbinin güç kanatlarının bu vakum gücü ile emilerek, kanatların dönme yönünde çekilmesine katkıda bulunmak üzere güç dengesine eklenmektedir.

- e) Açıkça görülmektedir ki, yukarıda belirtildiği gibi, [9] no.lu formülü oluşturan (Q_1) gücü, [10] no.lu formülü oluşturan (Q_2) gücünden daima küçük olmaktadır.

$$(Q_2 > Q_1)$$

[11]

- f) Deneysel sonuçlar, bu olumlu farkın, güç-artırım-yöneltilme- kanatlarının, sisteme eklenmesi yoluyla, herhangi bir türdeki klasik dikey milli türbinlerin güçlerini yaklaşık 3 katından fazla artırabildiğini göstermiştir. (Tablo:3, 4)

Basit bir matematiksel örnekle bu sonucu irdeleyebiliriz:

Varsayım:

Olumlu, $D_p = 2$ kg., olumsuz, $D_n = 1$ kg.

Olumlu, $L_p = 3$ kg., olumsuz, $L_n = 2$ kg,

kuvvet değerleri yukarıda görüldüğü şekilde alındığında, (L_n)'nin, açıklandığı şekilde olumlu kuvvete dönüştüğünü ve (L_p) olumlu gücüne dönüşerek formüle eklendiğini ve (D_n)'nin de herhangi bir şekilde türbini olumsuz etkilemeye devam ettiğini varsayarsak, [9] no.lu formüle göre, $Q_1=2$ kg. [10] no.lu formüle göre, $Q_2=6$ kg., (yani Q_1 'in üç katı) olarak hesaplanır.

Görüldüğü üzere en makul kuvvet değerleri alınsa bile, oluşan döndürme kuvveti farkları bir önceki değerin (Q_1), sadece "kesri (=yüzdesi) kadar" bir artış değil, bir önceki değerin (Q_1), "birkaç katı kadar artış" oluşturmaktadır.

Yukarıdaki hesaplamada varsayım olarak alınan değerler sadece örneği belirtmek için verilmiştir: Buna rağmen görüldüğü üzere bu basit formül ve örnek dahi, önceki denge gücünün 3 katı kadar bir artış farklılığının matematiksel olarak oluşabilmesinin mümkün olabileceğini göstermektedir:

Ekli tablolarda yer alan deneysel sonuçlar da bu hesaplama ve gözlemleri doğrulamaktadır. (Tablo:3, 4)

g) Nitekim, güç-artırma-kanatlarına sahip dikey milli rüzgar türbinleri arasında yer alan ve aynı zamanda kendiliğinden, otomatik olarak ve hiç bir ek güç ve müdahale gerekmeksizin rüzgara karşı kesin ve tam bir yönelme yapabilen ve bunu her rüzgar yönü için anında sağlayabilen, sonra bu yönelmesini kararlı sürdürebilen, "Gelibolu Modeli rüzgar türbinleri" modellerinde, yukarıda belirtilen formüllerdeki (Q_2 / Q_1) oranının 4,9 katına kadar artış gösterdiği Üniversite testlerinde belirlenmiştir. (Tablo:2, 3, 4)

h) Kanat-Uç-Hızı-Oranı = Tip-speed-ratio, TSR) :

Literatürde, Türbin verimliliklerinin belirlenmesinde önemli kıstaslardan birisi olarak, kanatların uç hızlarının, rüzgar hızlarına (**v**) olan **oranları (=TSR)** esas alınmaktadır.**(Şekil:3)**

Türbin verimliliklerinin yer aldığı güç eğrisi grafiklerinde, rüzgar hızına nazaran, türbin kanadının ucunun hızı oranlanarak, rüzgardan kaç defa daha hızlı yol alabildiği (TSR oranı) belirlenmiştir.

Türbin türlerine göre, türbinlerin geometrik ve aerodinamik karakteristikleri değiştiğinden, türbinlerin maksimum verime erişebilmesi için gerekli uç-hız-oranları (TSR) da değişik değerler almaktadır:

i) Örneğin, "kepçeli türü" dikey milli sistemlerde (Klemin, Savonius, vb.) TSR, maksimum güçte, genellikle 1'in altında kalmaktadır. Bunun anlamı, kanat uç hızının, maksimum verim durumunda dahi, rüzgar hızına erişemediği ve onu geçemediğidir. (Şekil:9)

ii) "Darrieus" tipi dikey milli sistemlerde, kanat-uç- hızı oranı, 3 ila 5,5 arasında iken, türbinin aerodinamik verimi maksimum olmaktadır. (Şekil:9)

iii) "Cyclogiro(=giromill)" tipi rüzgar türbinlerinde, maksimum verim (yaklaşık %60), TSR (=kanat-uç- hızı),2 ila 2,5 olduğunda, yani, kanat ucunun hızı, rüzgar hızından 2 ila 2,5 defa daha hızlı iken sağlandığı literatürde tespit edilmektedir. (Şekil:3)

iv) "Modern pervaneli" yatay milli sistemlerde, TSR, rüzgar hızının, yaklaşık 5 ila 8 katı arasında iken, en iyi verim alınabilmekte olduğu görülmektedir. (McLaughlin,1979)

v) "Gelibolu Modeli" rüzgar türbininde, "cyclogiro" tipi türbinlere benzer verim özellikleri nedeniyle ve türbinin yapısı itibariyle güç kanatlarında, "Darrieus" tipi kanatların kullanılması ile bu kanatları daha yüksek kanat-uç- hızlarına eriştiğinden, en uygun uç-hız oranlarının, rüzgar hızının 2 ila 3,5 katı arasında olabileceği öngörülmektedir.

i) Katı-ağırlık-oranı (=Solidity):

"Gelibolu Modeli" rüzgar türbinlerinde diğer tüm türbin türlerinde olduğu gibi kanatların imal edildiği malzemelerin ağırlığının, kanatların ilk hareket hızına, uç- hızına ve türbinin atalet momentine direkt olarak etkisi bulunmaktadır.

"Ağırlık oranı" veya "Katı-ağırlık-oranı" (**Solidity**) olarak tanımlanabilecek olan, kanat ağırlığının (kütlesinin), kanat hacmine oranının (tüm yapım malzemelerinin ağırlık, özgül ağırlık ve hacim kombinasyonları dikkate alındığında), tüm dolu hacmin teorik ağırlığının azami 0,13 - 0,15'i civarında olması önerilmektedir.

Belirtilen katı-ağırlık-oranı (Solidity) aşıldığında kanatlar gereğinden fazla ağırlaşacağından, ilk-hareket (cut-in) hızı için, (atalet momenti etkisi nedeni ile) türbinin harekete geçebilmesi için, daha yüksek rüzgar hızı gerekmekte, bu ise TSR (kanat-uç-hızı-oranını) ve türbin verimini olumsuz etkilemektedir.