

## RÜZGAR ÖLÇÜMLERİNDE KARARSIZLIK ANALİZİ

**Faruk Tuna, Ferhat Bingöl\***

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, URLA, İZMİR  
\*ferhatbingol@iyte.edu.tr

### ÖZET

Türkiye’de rüzgar ölçüm direklerinden alınan veriler havanın kararlılığına göre analiz edilmemekte ve bundan dolayı dikey rüzgar profillerinin ölçüm ve hesaplamalarında hatalar yapılmaktadır. Bu çalışma Türkiye’deki yüzlerce ölçüm direğinde kullanılabilir bir kararlılık modeli çalışması içerir. Rüzgar hız profiline belirlenmesinde havanın genelde neutral durumlar göz önüne alınır. Bu sebeple neutral olmayan alanlarda beklenen ile ölçülen hız değerlerinde oldukça büyük farklılıklar gözlenebilir. Bunun sonucunda fizibilite çalışmalarında ve burgaç/ekstrem hız hesaplamalarında ciddi hatalar oluşmaktadır. Çalışma kapsamında geleneksel ölçüm cihazları ile yapılan (ör: hız, yön, sıcaklık, basınç, bağıl nem) kararlılık analizi, aynı ölçüm direkleri üzerinde ek cihazlarla (ör: ek olarak 1 ya da 2 sonic anemometre, farklı yüksekliklerde sıcaklık ölçümü vb.) tekrarlanmış yani farklı kararlılık analizleri iki farklı cihaz grubuyla aynı veri için tekrarlanmıştır. Çalışmadaki amaç hata payını anlamak ve Türkiye’de sonic anemometre bulundurmayan tüm direklerde kararlılık analizini belirsizliğini bilecek şekilde yapabilecek bir metodoloji geliştirmektir.

### 1.GİRİŞ

Rüzgar enerjisi yatırımlarında yapılacak ilk adım tesisin kurulacağı alanda kurulacak bir direktan asgari bir senelik tüm mevsimleri içeren bir ölçüm yapmaktır. Ölçüm için geleneksel ölçüm direkleri kullanılır. Uzaktan algılama cihazları yeni yeni tanınmaya başlasa da Türkiye’de halen geleneksel ölçüm direkleri yönetmeliklerde belirtilen standarttır. Ülkemizde yapılan rüzgar alanındaki çalışmalarda, dikey rüzgar hız profiline belirlenmesinde havanın sadece neutral durumları göz önüne alınmıştır. Bu sebeple özellikle de daha kompleks alanlarda (dağ, vadi vb.) beklenen ile ölçülen hız değerlerinde oldukça büyük farklılıklar gözlenebilir. Toplanan verilerin tümünün neutral olduğu savıyla kararlılık parametresinin etkisi ihmal edilerek istatistikler oluşturulmakta ve bu bilgi sadece neutral koşullar için geliştirilmiş modellerde kullanılmaktadır. Bunun sonucunda fizibilite çalışmalarında ve burgaç/ekstrem hız hesaplamalarında ciddi hatalar oluşmaktadır.

Çalışma kapsamında geleneksel ölçüm cihazları ile yapılan (ör: hız, yön, sıcaklık, basınç, bağıl nem) kararlılık analizi, aynı ölçüm direkleri üzerinde aslında analizin yapılması için daha ideal olan ek cihazlarla (ör: ek olarak 1 ya da 2 sonic anemometre, farklı yüksekliklerde sıcaklık ölçümü vb.) tekrarlanmış ve oluşan hatanın enerji üretim tahminlerindeki etkisi ve belirsizliği sayısal olarak incelenmiştir. Literatüre bakıldığında çok kapsamlı olan kararlılık analizine ülkemizde gereken önem verilmediği gözlenmiştir. Bu nedenden ötürü yapılan bu çalışmada detaylı bir analiz ile örnek bir konumundaki (National Renewable Energy Laboratory, NREL, Colorado 2010) sonuçları gösterilmiştir. Hedeflenen kazanım kapsamında dikilecek olan ölçüm direğinden aynı şekilde datalar alarak bunların analizinin yapılması ve bunun 2 ölçüm cihazı ile başarılması söz konusudur.

Sonic anemometre kullanımı ile anlık ölçümler alınarak Obukhov yüksekliği hesaplanmış bunun yardımı ile kararlılık (stabilite) sınıflarına bakılarak dikey rüzgar profilinde düzeltmeler yapılır, böylece hatalar azaltılmış olur. Fincan anemometrelerin kullanım sayısı son yıllarda beklenmedik bir şekilde artış göstermiştir bu nedenden ötürü aynı ölçüm direğinde 2 cihazın kıyaslanması ve ortalama değerler yardımı ile aynı analizin nasıl yapılması gerektiği gösterilmiştir.

## 2. TEORİ

İlk olarak dikey rüzgar hızı ifadesi şu şekilde tanımlanmıştır. [1]

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_*}{l} \quad (1)$$

U yatay rüzgar hızını, z yerden yüksekliği,  $u_*$  lokal sürtünme hızını ve  $l$  'de yerel karışma yüksekliğini belirtmektedir. Yüzey tabakada karışma yüksekliği  $l_{SL}$  ise  $l$  ile denk sayılabilir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$l_{SL} = Kz\phi_m \quad (2)$$

$\kappa$ , von Karman sabitini (0.4) ve  $\phi_m$  boyutsuz Monin- Obukhov benzerlik teorisinin birimsiz hız parameteresini temsil eder [2]. Parameterenin açılımı aşağıdaki gibidir

$$\phi_m = \frac{Kz}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3)$$

$u_*$  yüzey-tabaka sürtünme hızıdır.  $\phi_m$  duruma göre aşağıdaki şekilde değişkenlik gösterir.

Tablo 1: Boyutsuz Monin-Obukhov parametresinin hesaplanması

<b>Unstable</b>	$\phi_m = (1 - az / L)^p$
<b>Stable</b>	$\phi_m = 1 + bz / L$
<b>Neutral</b>	$\phi_m = 1$

A, b ve p deneysel değerleri L ise Obukov yüksekliğini ifade etmektedir. Daha detaylı hesaplama yöntemleri Tablo 2' de verilmiştir. Obukov yüksekliği ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$L = - \frac{u_*^3 T_o}{Kg w' \Theta_v' } \quad (4)$$

$T_o$  ortalama yüzey-tabaka sıcaklığı,  $g$  yerçekimi gücü ivmesi ve  $\overline{w'\Theta_v'}$  yüzey-tabaka kinematik sanal hız değişkenini temsil etmektedir.  $u_{*o}$  değerinin  $u_*$  değerine eşit olduğu farz edilirse ve ilk 3 denklem birleştirilirse yüzey tabaka rüzgar profilini elde edilmiş olur.

$$\frac{U}{u_{*o}} = \frac{1}{K} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \psi_m \right] \quad (5)$$

$z_o$  yüzey pürüzlülük yüksekliği ve  $\psi_m$  ise dayabatik düzeltme terimi olarak adlandırılır.  $\phi_m = 1$  olduğu neutral durumda  $\psi_m = 0$  olmakta ve bilinen logaritmik dikey rüzgar profiline dönüşmektedir.

$$U = \frac{u_*}{K} \left[ \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \right] \quad (6)$$

Obukhov yüksekliğinin hesaplanmasında 2 yöntem kullanılmıştır bunlar;

## 2.1.ORTALAMA DEĞERLER İLE HESAPLAMA

Yöntem cup anemometreler için uygundur çünkü düşey yöndeki hız bileşenindeki dalgalanmalar bu cihazlar ile ölçülemediğinden bu yöntem daha geçerli olacaktır. Ölçek uzunluğu (length scale) aşağıdaki formülle hesaplanır

$$L = -\frac{\rho c_p u_*^3}{\kappa g H_V}; \quad (7)$$

Burada,  $k$ : von Kármán sabiti ve yaklaşık değeri 0.4 olarak,  $g$ : yerçekimi ivmesi,  $\rho$  ( $m^3/kg$ ) havanın yoğunluğunu,  $c_p$  ( $J/kgK$ ) havanın ısı sığasını,  $u_{*o}$  ( $m/s$ ) ise sınır tabaka üzerindeki yüzey tabaka sürtünme hızını gösterir,  $u_* = (\tau/\rho)^{1/2}$  ( $m/s$ ) havanın sürtünme hızını gösterir. Obukhov uzunluğu hesaplanmasında sürtünme hızından sonra aynı şekilde önemli olan diğer bir parametre de  $H_V$  kinematik ısı akısıdır,  $\nu$  alt indisi sanal akı değerini ifade etmektedir ve  $H_V = H + 0.61T_a c_p E$  ile hesaplanır [3].  $T_a$  yüzey üzerindeki sıcaklık ifadesini,  $E$  yüzeyde gerçekleşen buharlaşma oranını gösterir. Kinematik ısı akısını ifade etmede kullanılan başka bir gösterimde  $H_V = -(\rho C_p K_H \frac{\partial \theta}{\partial z})$  şeklindedir [4]. Burada  $K_H$  girdap korelasyonunu,  $\frac{\partial \theta}{\partial z}$  ise sıcaklığın yüksekliğe göre değişimini gösterir.

## 2.2.HIZLI TEPKİLİ ÖLÇÜM CİHAZLARI İLE HESAPLAMA

Diğer yöntemde ise sonic anemometre yardımıyla ölçümler yapılır ilk formülden tek farkı sonic anemometre ile tüm hız bileşenlerinde ki sapmalar ölçülebilir.

$$L = -\frac{\theta u_*^3}{\kappa g (u' \theta_V')_o} \quad (8)$$

Burada;  $u_{*0}$  ile  $u_*$  arasındaki ilişki aşağıdaki gösterildiği gibidir.

$$u_* = u_{*0} + \left( \frac{f_c v_g}{2u_{*0}} \right) z \quad (9)$$

Sürtünme hızının 0 olduğu noktanın yüksekliği bize sınır tabaka yüksekliğini verir. Rossby-Montgomery formülüne göre bu yükseklik şu şekilde bulunur:

$$z_i = C \frac{u_{*0}}{f_c} \quad (10)$$

Burada,  $f_c$  Coriolis parametresidir, C ise sabit bir değer olup atmosferik sınır yüksekliği ile sınır tabaka sürtünmesi ve Coriolis parametresi arasındaki oranı ifade eder. Atmosferik sınır yüksekliğinden sonra hızı etkileyen parametrelerde bir değişim söz konusudur. Coriolis etkisi ile Jeostrofik etkiler önem kazanırken sürtünme etkisi önemini yitirmeye başlar [5] Farklı yayınlarda C sabitinin değiştiği görülmüştür. C=0.195; [5], C=0.5; [6] ve C=0.1 ; [7]. Atmosferik sınır tabaka ( $z_i$ ) ile sürtünme hızı ( $u_*$ ) arasındaki ilişki aynı zamanda şu şekilde ifade edilir [7].

$$u_* = u_{*0} \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right) \quad (11)$$

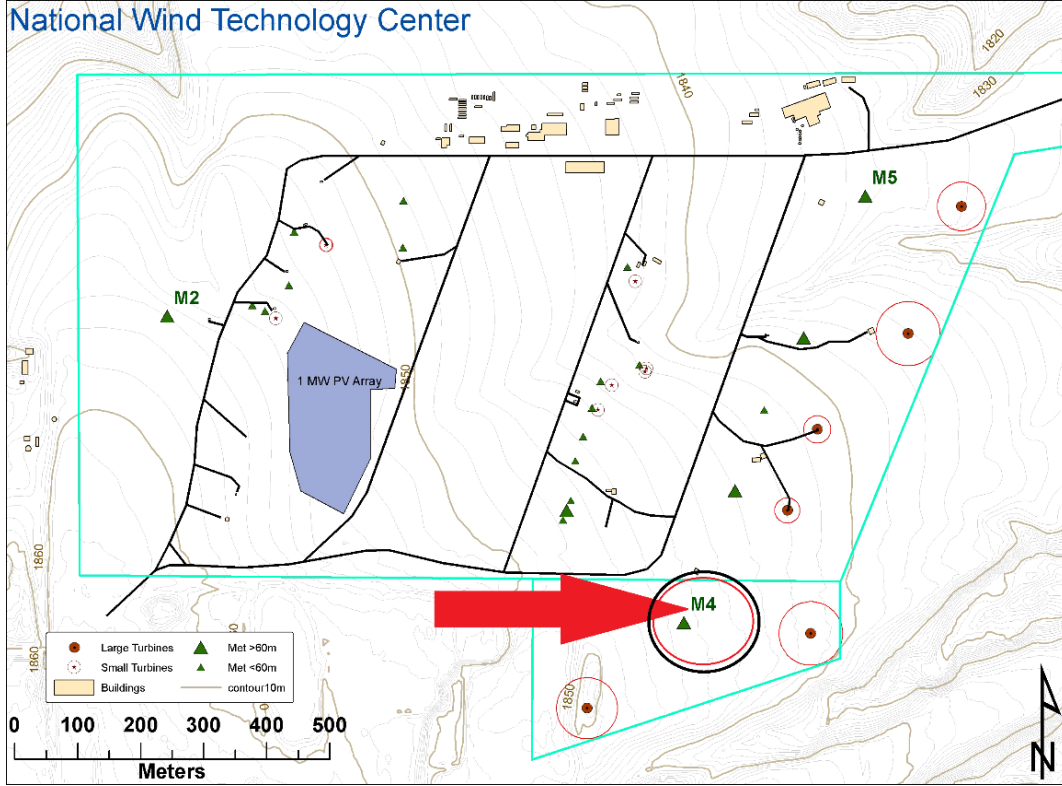
Bu ifade de  $z_i = \frac{u_{*0}}{f_c} \left( -\frac{2u_{*0}}{v_g} \right)$  'ye eşittir ve C değerinin aslında  $\left( -\frac{2u_{*0}}{v_g} \right)$  'ye eşit olduğu görülür. Sürtünme hızı ifadesine geri dönüş yapılırsa bu ifadenin sonic anemometre yardımıyla hesaplanacağı belirtilmiştir ve bunun için hızlardaki dalgalanmalardan faydalanılmaktadır.  $u_* = (-\overline{u'w'})^{1/2}$  ; u yere paralel olan yöndeki hızı temsil ederken, w yere dik yöndeki hızı ifade etmede kullanılır. Bu dalgalanmaların değişiminin ortalamasına bakılır diğer bir deyişle de momentum akısının karekökü hesaplanır. Momentumun,  $-\overline{u'w'} = K_m \frac{\partial u}{\partial z}$  şeklinde de ifade edildiği gözlenmiştir.  $K_m$  momentum türbülans değişim katsayısı ya da diğer adıyla girdap viskozitesidir. Hız ölçümünde görülen diğer bir ifade de yatay yöndeki hız değişiminin şiddetidir s ile gösterilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$s = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$\theta'_v$  potansiyel sıcaklık değişimini ifade eder  $\theta'_v = \theta_0(1 + 0.61r)$  şeklinde hesaplanır ve referans sıcaklık değeri  $\theta_0 = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{0.286}$  iken referans basınç değeri 100 kPa olarak alınır ise doymamış hava için bu denklem yeniden düzenlenebilir,  $\theta_0 = T + \left( \frac{g}{c_p} \right) z_{ref}$  ; bu denklemde ki  $z_{ref}$  parametresi 100kPa basınç seviyesi ile olan farkı,  $g/c_p$  ifadesi ise yüksekliğe bağlı sıcaklık düşüş oranını ifade etmektedir, r parametresi ise doymamış havadaki karışım oranını gösterir yani nem için kullanılan parametredir,  $r = \frac{0.622e_p}{P - e_p}$  formülü ile hesaplanır, bu denklem sayesinde bağıl nem r değerine dönüşmektedir.  $e_p$  su buharının kısmi basıncını gösterir,  $e_s$  ise doymuş su buharı basıncını gösterir ve  $e_p = e_s \frac{RH}{100}$  formülü sayesinde bir dönüşüm gerçekleştirilebilir. Suyun doymuş buhar basıncı için  $e_s = 6.1078 \times 10^{7.5T/(273.3+T)}$  denklemi kullanılmaktadır. Özgül nemi (q) bulmak içinde  $q = \frac{r}{1+r}$  denklemi kullanılmaktadır.

### 3.SONUÇ

Bu çalışmada, mevkisi  $105.23^\circ$  Batı ve  $39.6^\circ$  Kuzey, Boulder yakınları, Colorado, olan ve 2010 yılında dikilmiş olan 135m uzunluğunda NREL’de yer alan meteorolojik ölçüm direğinden alınan veriler kullanılmıştır. 2011 yılında faaliyete geçmiş olan bu direktan alınan verilere NREL’ in web sitesinden ulaşmak mümkündür. 135m yüksekliğinde olması ve 15m, 30m, 50m, 76m, 100m ve 131m’ de yer alan sonic ve fincan gibi ölçüm cihazları ile sonuçların kıyaslanıp doğrulanması konusunda güzel bir referanstır.



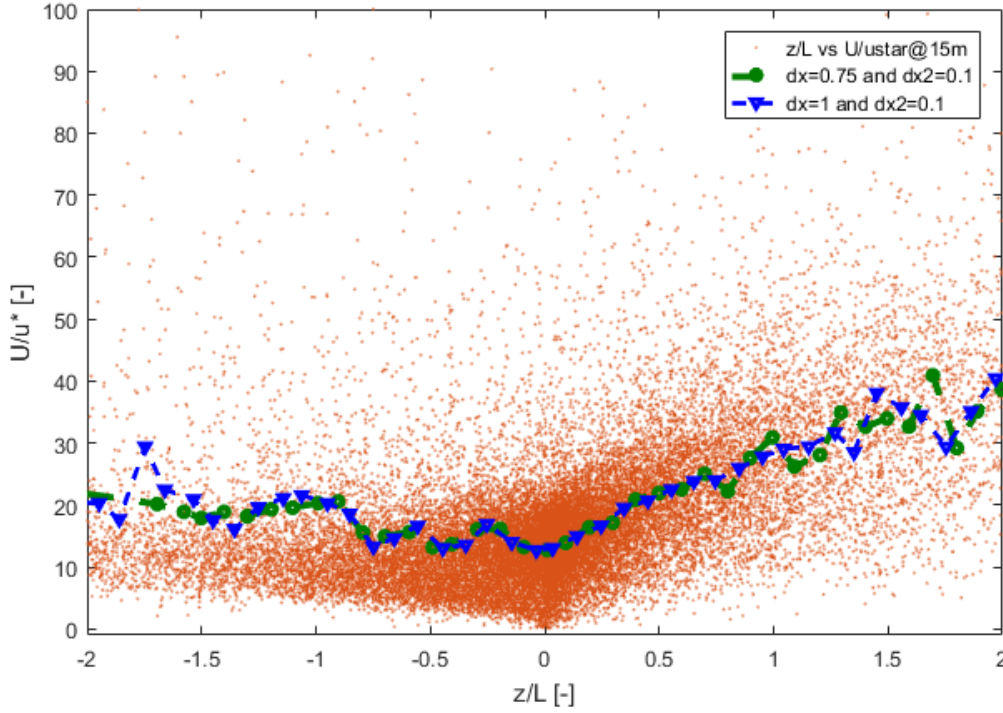
Şekil 1. M4 direğinin konumu [9]

Şekil 1’ de M4 direğinin konumu kırmızı ok ve sırasıyla siyah ve kırmızı çemberlerle işaretlenmiştir. Bu resimde M4 direğinin NREL’ deki pozisyonu daha iyi görülmektedir.



Şekil 2. M4 direğinden alınmış resimler [9]

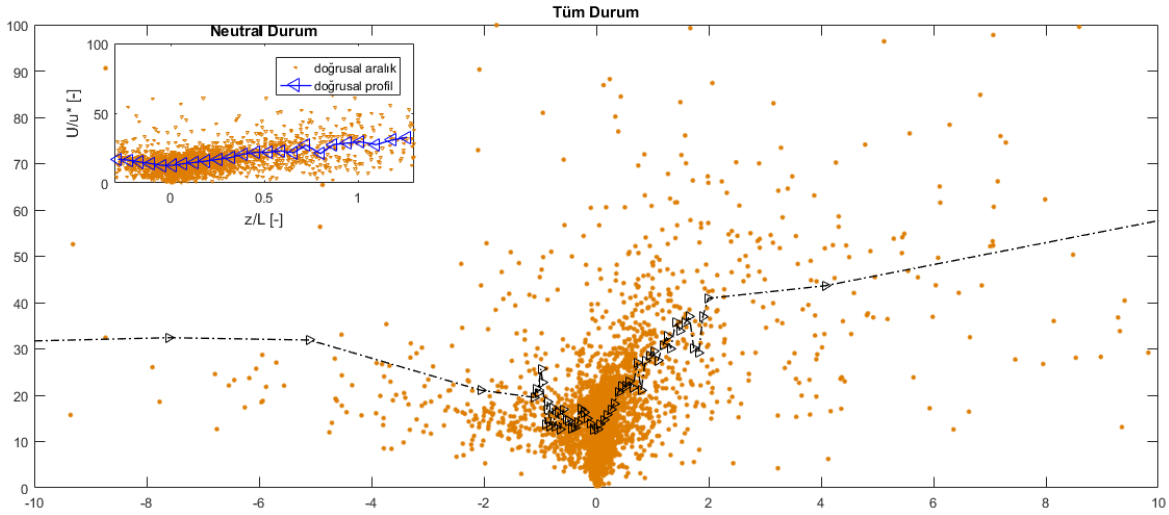
Şekil 2' de ise M4 ölçüm direğinden farklı açılarda alınmış olan resimler görünmektedir. Konum bu şekilde belirtildikten sonra buradan alınan verilerle yapılan analizler sonucunda kararlılık analizinin etkisi şu şekilde gösterilir.



Şekil 3. Birimsiz Obukhov parametresine karşılık normalize edilmiş hız grafiği

Bu grafikte x-ekseni ile birimsizleştirilmiş olan hız görülmektedir. Burada 2012 yılındaki tüm aylar baz alınarak oluşturulmuş olan bu grafikte  $z/L$  değeri  $-0.2$ ' ye yaklaştıkça unstable koşulu sonlanmakta ve neutral şartların etkisi başlamaktadır,  $0.2$ ' den sonra ise stable şartlar başlar ve giderek şiddetlenir buda profilde sapmalara ve doğrusal bir durumdan çıkmaya neden olur, stable ve unstable da durum doğrusal olmaz iken  $-0.2$  ile  $0.2$  arasında yani neutral şartlar altında lineer bir değişim gözlenir.

Bu grafikteki profili görmek adına  $[-2,2]$  aralığı  $dx2=0.1$ ' lik aralıklara bölünmüş geri kalan kısım ise  $dx$ ' lik parçalara bölünmüş ve o aralıktaki değerlerin ortalaması alınarak profil belirlenmeye çalışılmıştır. Mavi çizgiler ile yapılan yaklaşımın neutral aralık içerisinde doğrusallık nedeniyle siyah çizgiler ile neredeyse aynı olduğu ancak stable ve unstable şartlar başladığında saptığı gözlenir ve bu fark  $dx1$  değerinden kaynaklanmaktadır.

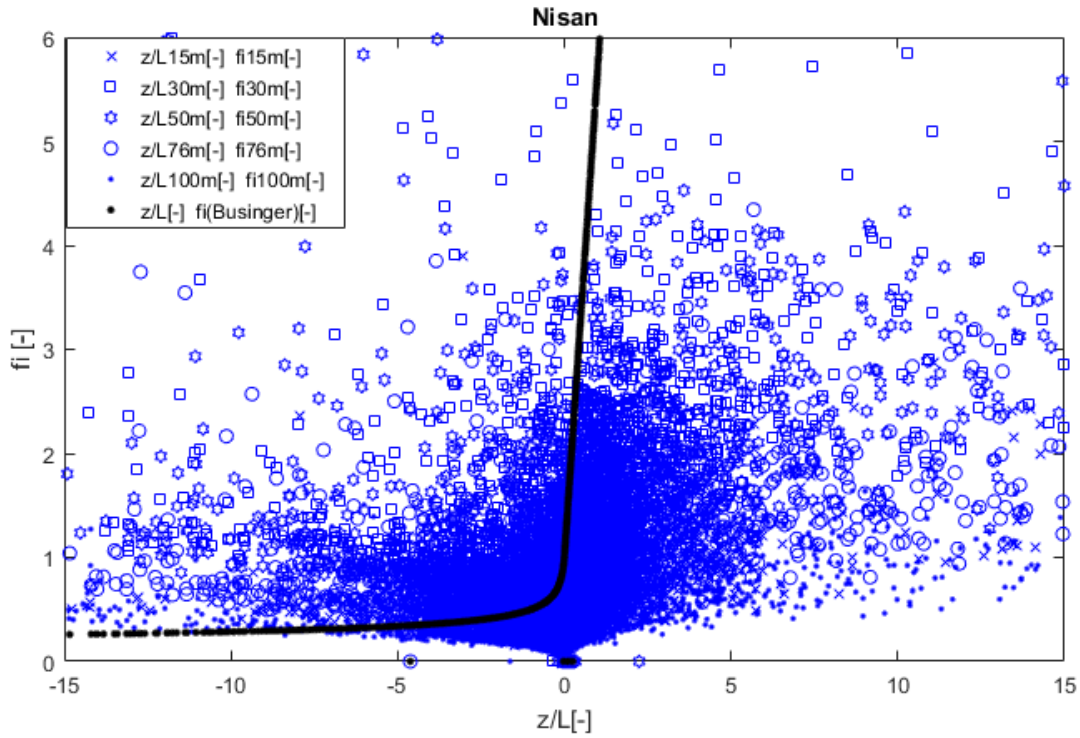


**Şekil 4.** Birimsiz Obukhov parametresi ile normalize edilmiş hızda neutral aralığın yakından incelenmesi

Şekil 4’ te farklı olarak neutral şartlar için grafiğin sol üst kısmın da yakından bir görünüm verilmiştir ve doğrusal hız değişimi burada açıkça görülmektedir ayrıca stable ve unstable şartların etkisi de grafiğin geneline bakıldığında anlaşılır. Bu grafik Şekil3’ ten farklı olarak sadece Nisan ayı için ölçülmüş veriler dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Şekil5 için yine Nisan ayı verileri kullanılmıştır ve burada farklı olarak boyutsuz Obukhov yüksekliğine göre boyutsuz hızdaki (Boyutsuz Monin-Obukhov hız parametresi) değişim gösterilmiştir. Tüm yükseklikler dikkate alınarak oluşturulmuş bu grafikte siyah kalın çizgi Businger yaklaşımı ile ölçülmüş değerlerin durumunu gösterir.

Yükseklığe bağlı olarak rüzgar hızlarında beklenenden daha yüksek sapmalar meydana geldiği görülmektedir. Bunun yanı sıra neutral şartlar altında ise rüzgar hızlarında bir yükseliş görülmektedir bunun nedeni sürtünme etkilerinin giderek etkisini yitirmesidir ve stable durumlarda da çoğu zaman pozitif bir yönde artış görülmektedir bu da düzeltme faktörünün etkisi göstermektedir.



Şekil 5. Farklı yükseklikler için oluşturulmuş  $z/L$  ve boyutsuz hız parametresi

Ülkemizdeki yapılan yaygın hata profilin tüm dataların kararlılık durumları dikkate alınmadan sanki neutral durumlar varmış gibi değerlendirilmesiyle ve rüzgarın sadece neutral davranış sergiliyor olduğunun düşünülmesidir. Bu çalışma sonunda iki önemli husus belirtilebilir.

- Yavaş tepki veren anlık yerine ortalama değerleri kullanan cup anemometre gibi ölçüm cihazlarını her ne kadar sonic anemometreler kadar iyi sonuç vermese de kararsızlık analizi içinde kullanmak faydalı olabilir. Ancak bunun belirsizliği hesaplanmalıdır.
- Genel olarak, eğer herhangi bir çalışma da neutral şartları kullanan modeller kullanılacaksa neutral veri kısmının dikkate alınması ve buna göre işlem yapılması ya da tüm data kullanılacaksa kararlılık parametreleri barındıran bir model kullanılması tavsiye edilir.

## TEŞEKKÜR

Bu proje ERANET - Yeni Avrupa Rüzgar Atlası – (TÜBİTAK proje no 215M385) tarafından desteklenmektedir. Ölçüm verilerini paylaşan NREL, Rüzgar Enerjileri Bölümüne teşekkür ederiz.



**KAYNAKLAR**

- [1] **Prandtl, L.**, 1932: Meteorologische Anwendung der Strömungslehre (Meteorological application of fluid mechanics). Beitr. Phys. Atmos., 188-202.
- [2] **Monin, A. S. ve Obukhov**, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst. 24(151):163-187.
- [3] **Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi, and E. F. Bradley**, 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
- [4] **Dyer, A. J.**, 1974: A review of flux-profile relationships. Bound.-Layer Meteor., 7, 363-372.
- [5] **Rosby, C. G. and R. B. Montgomery**, 1935: The layers of frictional influence in wind and ocean currents. Pap. Phys. Oceanogr. Meteor., 3 (3), 101 pp
- [6] **Zilitinkevich, S. S. and D. V. Mironov**, 1996: A multi-limit formulation for the equilibrium depth of a stably stratified boundary layer. Bound.-Layer Meteor., 81, 325-351.
- [7] **Seibert, P., F. Beyrich, S.-E. Gryning, S. Jørgen, A. Rasmussen, and P. Tercier**, 2000: Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmos. Env., 34, 1001-1027.
- [8] **Panofsky, H. A. and J. A. Dutton**, 1984: Atmospheric turbulence. John Wiley & Sons, 397 pp.
- [9] **National Wind Technology Center**, USA , [nwtc.nrel.gov/](http://nwtc.nrel.gov/)