

## KÜRESEL RÜZGAR ATLASI VALİDASYONU: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Yüksel Kalay<sup>1</sup>, Ferhat Bingöl<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü  
<sup>1</sup>yukselkalay@iyte.edu.tr, <sup>2</sup>ferhatbingol@iyte.edu.tr

### ÖZET

Rüzgar enerjisine olan yatırımların hem küresel hem de yerel ölçekte artmasıyla birlikte fizibilite çalışmaları büyük önem kazanmıştır. Fizibilite çalışmalarına destek olması sebebiyle Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından hazırlanmış olan Global Wind Atlas - Küresel Rüzgar Atlası gün geçtikçe önem kazanmakta ve yatırımın yapılacağı alan için ön bilgi sağlayabilmektedir. Atlas yayınlanmadan önce dünya genelinde bir çok alanda doğruluğu test edilmiştir. Bu çalışmada da Küresel Rüzgar Atlası kullanılarak Türkiye örneği incelenmiş, veri farklı alanlarda doğruluk tespitine tabi tutulmuştur. Üç farklı bölgede yer alan ticari amaçlı kurulan ölçüm direklerinden alınan veriler kullanılarak atlas doğruluğu değerlendirilmiştir. Modelleme aracı olarak Rüzgar Atlası Metodolojisini içeren WAsP yazılımı kullanılmıştır. Çalışma, hem büyük hem de küçük yatırımcıların atlastan yararlanarak doğru karar ve yorumlar ortaya çıkarabilmesi için büyük önem arz etmektedir.

### 1. GİRİŞ

Güvenilir bir rüzgar enerjisi yatırımı için en önemli şartlardan biri, yatırım yapılacak bölgede rüzgar potansiyelinin doğru tespit edilmesidir. Bu amaçla bilinen klasik ölçüm yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan en bilineni yatırım yapılacak bölgede uygun bir noktaya meteorolojik ölçüm direği kurulmasıdır. Meteorolojik ölçüm direği kurmak yerine lidar, sodar gibi uzaktan ölçüm yöntemlerinin kullanılması da dünya genelinde oldukça yaygındır. Ancak bilinen tüm ölçüm yöntemleri yatırım için ekstra maliyet yaratmaktadır. Klasik ölçüm yöntemlerine başvurmadan, bölgenin kabaca rüzgar potansiyeli tahminini yapabilmek için geniş arazileri (ör: bölge, ülke, kıta vb.) nümerik rüzgar atlaslarıyla modellemek ve bu verileri kullanmak günümüzde en çok tercih edilen yöntemdir. Yatırımcıya zaman kazandırması yanında, ölçüm için dikilmesi zorunlu direğin nereye dikilmesi gerektiği konusunda en iyi tahmini yapmaya yarayabilir.

Bu amaçla, küresel ve yerel ölçekte birçok nümerik rüzgar atlası çalışması mevcuttur. Bu sebeple geliştirilen Avrupa Rüzgar Atlası (1989)[1], Rusya Rüzgar Atlası (2000)[2], Mısır Rüzgar Atlası (2006)[3], Güney Afrika Orta-Ölçek Rüzgar Atlası (2008)[4], Finlandiya Rüzgar Atlası (2009)[5], Küresel Rüzgar Atlası (2015-2018 ve 2019)[6] önemli çalışmalardan bazılarıdır. Genellikle meteorolojik ölçüm noktalarından alınan veriler yardımıyla doğruluk testi yapılabilir. Ölçüm noktalarından yararlanmak dışında daha birçok farklı metolla doğruluğu test etmek mümkündür. Örneğin, Mısır Rüzgar Atlası için 30 dan fazla ölçüm noktası kullanılarak doğruluk test edilmeye çalışılmıştır [3]. Güney Afrika Orta-Ölçek Rüzgar Atlası doğruluk testi için 17 farklı meteoroloji istasyonu kullanılmıştır [4]. Finlandiya için üretilen rüzgar atlası 20 den fazla noktada test edilmiştir [5]. Tüm dünya için üretilen Küresel Rüzgar Atlası ise 43 farklı noktada test edilmiştir [6]. Mümkün olduğunca fazla noktada test edilmiş olmalarına rağmen rüzgar atlaslarının güvenilirliği bölgeden bölgeye, ülkeden ülkeye değişiklik gösterir. Kısacası farklı arazi yapılarında ve farklı yüksekliklerde rüzgar atlaslarının doğruluğu değişmektedir. Bu çalışmada Küresel Rüzgar Atlası'nın doğruluğu Türkiye için 3 farklı ölçüm noktasından yararlanılarak, farklı yüksekliklerde test edilmiştir.

## 2. ÇALIŞMA SAHALARI VE VERİ SETLERİ

Atlasın doğruluğu için üç farklı bölgede yer alan ticari amaçla kurulan ölçüm direklerinden yararlanılmıştır. Bir adet Marmara Bölgesi'nde (Direk-1), 1 adet Ege Bölgesi'nde (Direk-2) ve 1 adet Akdeniz Bölgesi'nde (Direk-3) yer alan ölçüm direkleri çalışmada yer almaktadır. Direkler Türkiye'nin rüzgar enerji yatırımının yüzde 70'inden fazlasını ihtiva eden bu üç bölgeden özellikle seçilmiştir. Kullanılan ölçüm direklerine ait genel bilgi aşağıda Tablo 1'de paylaşılmıştır.

**Tablo 1.** Çalışmada Kullanılan Ölçüm Direkleri

	<b>Marmara (Direk-1)</b>	<b>Ege (Direk-2)</b>	<b>Akdeniz (Direk-3)</b>
<b>Deniz Seviyesinden Yükseklik</b>	340 m	1053 m	1640 m
<b>Ölçüm Yüksekliği</b>	86 m	80 m	86 m
<b>Ölçüm Süresi</b>	1 yıl, kayıpsız	1 yıl, kayıpsız	1 yıl, kayıpsız
<b>RIX<sup>1</sup></b>	9.2% Orta engebeli	42.7% Çok engebeli	3.8% Düz

<sup>1</sup> *Ruggedness Index (Engebelilik İndeksi) WASP yazılımı geliştiricileri tarafından kullanıla sunulmuş bir indeksleme yöntemidir. Konu hakkındaki detaylı bilgi yazılımın yardım dosyalarında bulunmaktadır.*

Çalışmada ölçüm direklerinden elde edilen rüzgar verileri dışında topografya verileri de kullanılmıştır. Ölçüm direği merkez nokta alınarak 5km x 5km'lik bir çalışma alanı oluşturulmuştur. WASP Map Editor yazılımı aracılığıyla, Küresel Rüzgar Atlasında kullanılan yükselti ve pürüzlülük haritaları çalışma alanları için oluşturulmuş olup ve aynen kullanılmıştır. Bu haritalar, WASP modelinde hem atlasların oluşturulması hem de araziye ait bilgilerin toplanmasında gereklidir.

Çalışmada kullanılan ölçüm direklerinden Direk-1, Marmara Bölgesinde deniz seviyesinden 340 metre yükseklikte yer almaktadır. Direk üzerinde 86 metrede yer alan ölçüm cihazlarından yararlanılarak, rüzgar hızı ve yönü verileri kullanılmıştır. Veri kaybının yaşanmadığı bir yıllık ölçüm verisi çalışmaya dahil edilmiştir. Ölçüm sahası etrafında herhangi bir yerleşim alanı bulunmamakta olup, çalışma alanı içerisinde minimum ve maksimum pürüzlülük değerleri sırasıyla 0.005 metre ve 1.5 metredir. Minimum ve maksimum yükseklik değerleri ise sırayla 0 metre ve 400 metredir. Oluşturulan topografya haritasına göre, sahaya ait RIX değeri %9.2 olarak hesaplanmıştır. Bu değer %5 den fazla olması, sahanın karmaşıklığının arttığını göstermektedir.

Ölçüm direklerinden Direk-2 ise Ege Bölgesinde 1054 metre yükseklikte yer almaktadır. 80 metrede yer alan ölçüm cihazları kullanılarak rüzgar hız ve yön verisi elde edilmiştir. Yine ölçümün sürekli olarak sağlandığı, kayıpların olmadığı bir yıllık veri çalışmada kullanılmıştır. Ölçüm sahası etrafında doğal bitki örtüsü olan makiler dışında yerleşim alanları gibi büyük engeller bulunmamaktadır. Çalışma alanının içerisinde pürüzlülük değerleri 0.05 metreden 1.5 metreye kadar değişmekte olup, minimum yükselti 100 metre ve maksimum yükselti 1380 metredir. Çalışma alanının engebelerini ve koşullarını belirlemek amacıyla hesaplanan, engemelilik indeksi %42.7 olarak hesaplanmıştır. Marmara Bölgesi'ndeki çalışma alanıyla kıyaslandığında, bu alanın kompleks arazi koşullarına sahip olduğunu söylenebilir.

Çalışmada kullanılan üçüncü bir diğer ölçüm direği Direk-3 de Akdeniz bölgesinde 1640 metrede yer almaktadır. 86 metrede ölçümü yapılan rüzgar hız ve yön verileri kullanılmıştır. Yine ölçüm kayıplarının olmadığı 1 yıllık süreçte toplanan veri setinden yararlanılmıştır. Ölçüm sahası etrafında herhangi bir engel bulunmamakla beraber, alan bitki örtüsünden yoksun çıplak bir araziye sahiptir. Pürüzlülük değerleri 0.005 metreden 1.5 metreye kadar değişirken, yükselti değerleri 280 metreden 1640 metreye kadar değişiklik göstermektedir. Sahanın engemelilik indeksi %3.8 olarak belirlenmiş olup, bu değer çalışılan diğer iki sahaya karşılaştırma yapıldığında oldukça küçüktür. Çalışma alanının kompleks olmayan bir arazi yapısına sahip olduğunu gösterir.

### 3. METOT VE HESAPLAMALARI

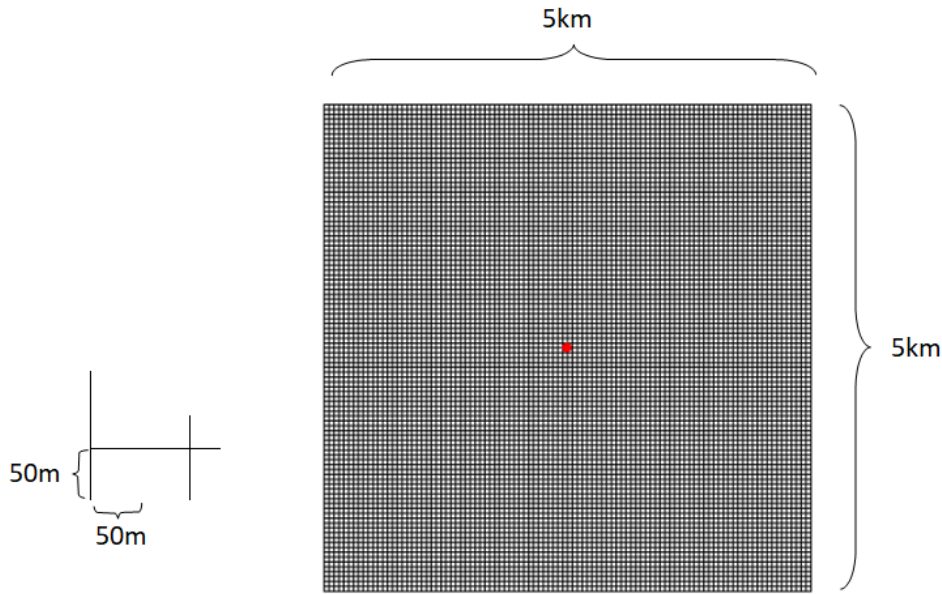
Küresel Rüzgar Atlası doğruluğu test edilirken dört farklı yöntem kullanılmıştır[6]. Bu çalışmada ölçüm direği verisi ve bu noktaya en yakın olan Küresel Rüzgar Atlası verisi kullanılarak oluşturulan rüzgar atlasları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma rüzgar gücü yoğunluğu, rüzgar hızı, Weibull A ve k parametreleri üzerinden yapılmıştır. Weibull parametrelerini içeren dağılım denklemi ve rüzgar gücü yoğunluğu denklemi aşağıda verilmiştir [7,8].

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right) \quad (1)$$

$v$ = rüzgar hızı (m/s),  $k$ = Weibull şekil parametresi (birimsiz),  $A$ = Weibull ölçek parametresi (m/s)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

$P$ = güç yoğunluğu ( $W/m^2$ ),  $\rho$ = hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  $A$ = tarama alanı ( $m^2$ ),  $v$ = rüzgar hızı (m/s).

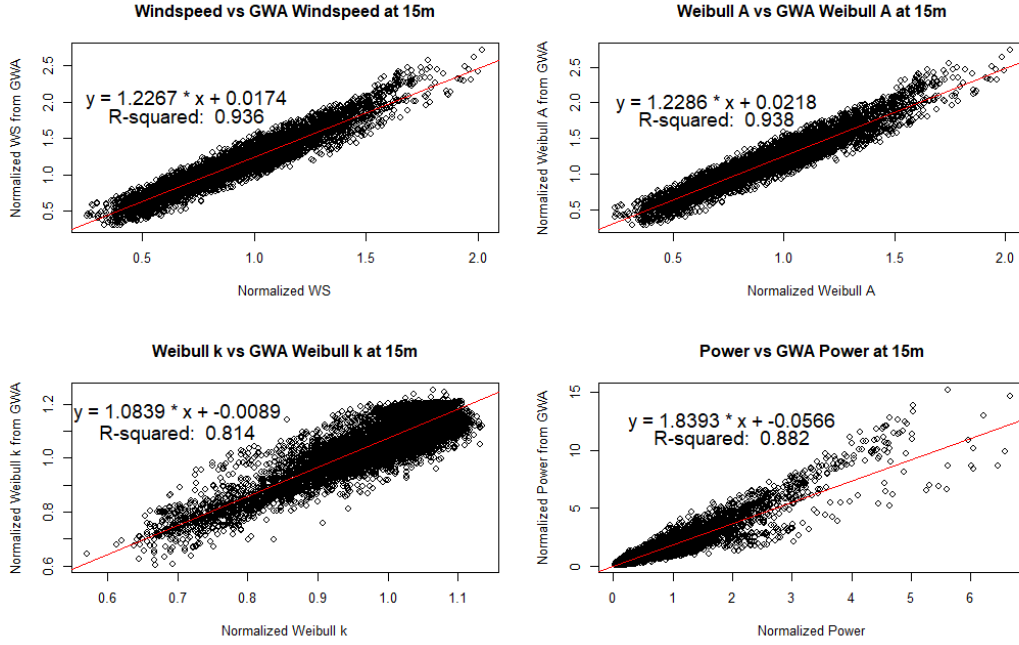


**Şekil 1.** Hesaplama için yapılan bölümlenme. 5km x 5km'lik alanın için 50m x 50m hücelere bölünmüş ve ölçüm direği haritanın tam ortasında yer almaktadır.

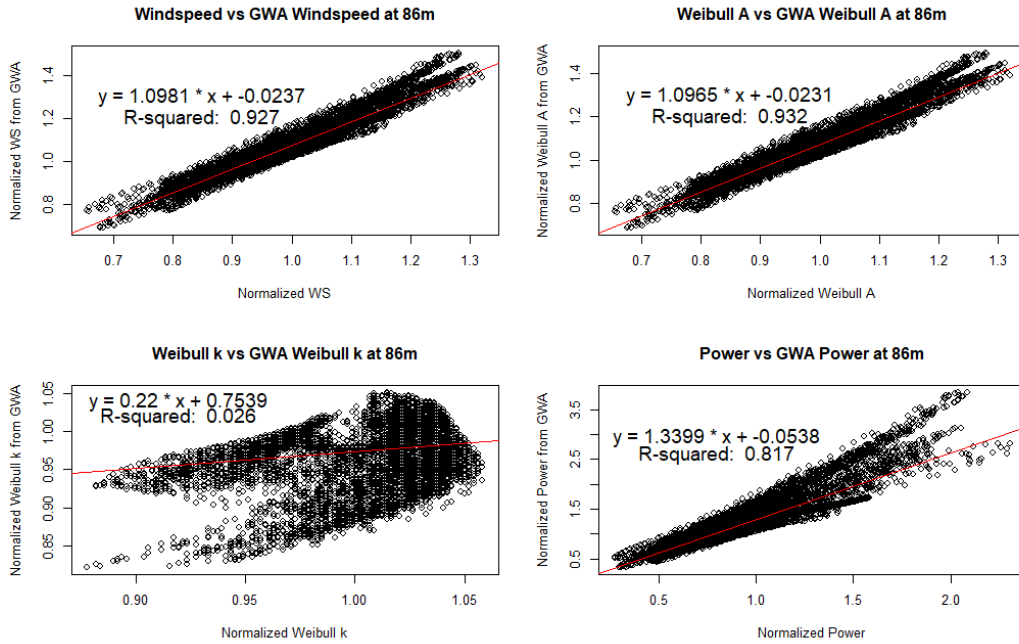
İlk olarak ölçüm direklerinden elde edilen veri setleriyle WASP 12.2 modelinden yararlanarak geliştirilmiş rüzgar iklimi elde edilmiştir. Ardından ölçüm direğine en yakın noktadan Küresel Rüzgar Atlasına ait geliştirilmiş rüzgar iklimi dosyası indirilmiştir. Her iki iklim dosyası ve oluşturulan topografya haritaları kullanılarak 15 metre, 100 metre dahil olmak üzere ve ayrıca ölçüm yüksekliklerinde rüzgar atlasları oluşturulmuştur. Çalışmalar 5 km x 5km lik alan içerisinde 50 metre çözünürlükte ve toplamda 10000 hesap hücresi ile yürütülmüştür (Şekil 1). Atlaslar karşılaştırılarak aralarında lineer denklemler oluşturulmuş ve  $R^2$  değerleri incelenmiştir. Hesaplanan değerler ortalamalarına bölünerek normalize edilmiştir.

İlk olarak Marmara bölgesinde bulunan Direk-1 kullanılarak atlaslar arasında rüzgar gücü, rüzgar hızı, A ve k parametreleri ilişkisi incelenmiştir. Ölçüm direği ve ona en yakın Küresel Rüzgar Atlası noktası arasında yaklaşık 4 kilometre mesafe bulunmaktadır. Atlaslar 15 metre,

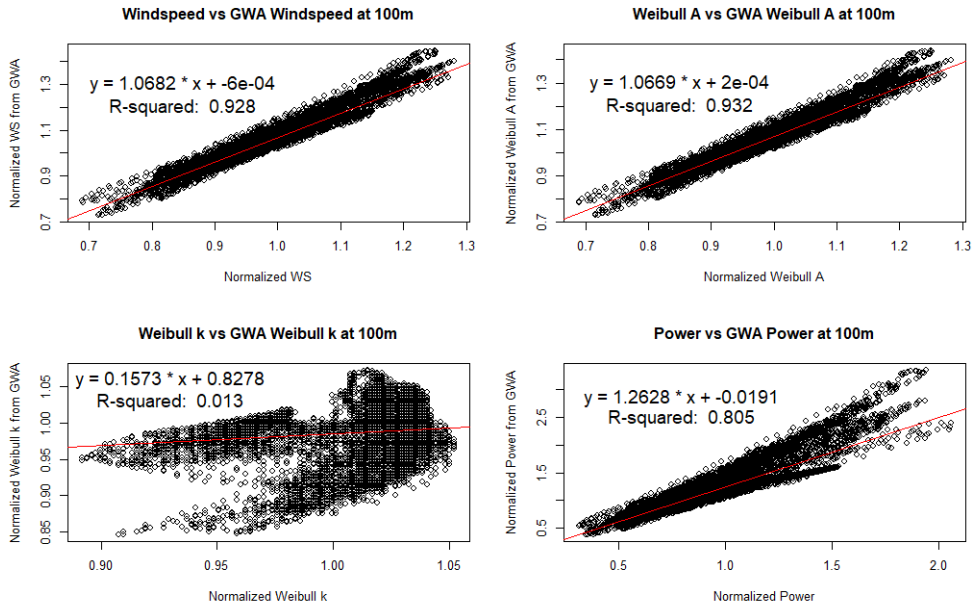
86 metre (ölçüm yüksekliği) ve 100 metre olmak üzere oluşturulmuş ve rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu, Weibull A ve k parametreleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2-3-4'de seçilen parametreler arasındaki ilişki ve oluşturulan lineer denklemler sırasıyla 15m, 86m ve 100m olmak üzere yer almaktadır.



Şekil 2. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

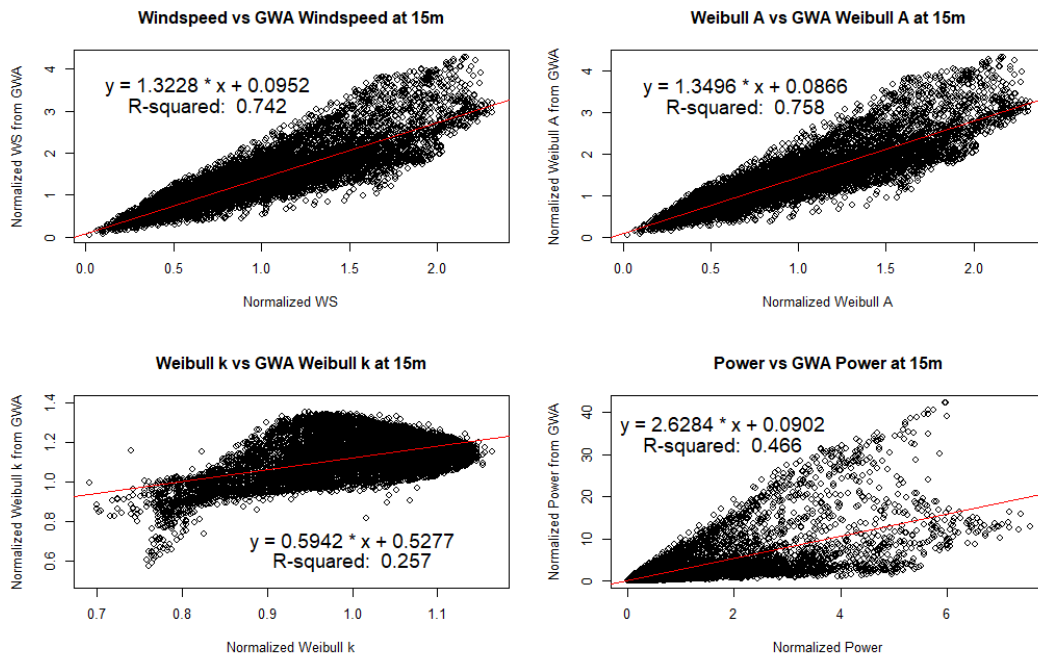


Şekil 3. 86 metrede (ölçüm yük.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

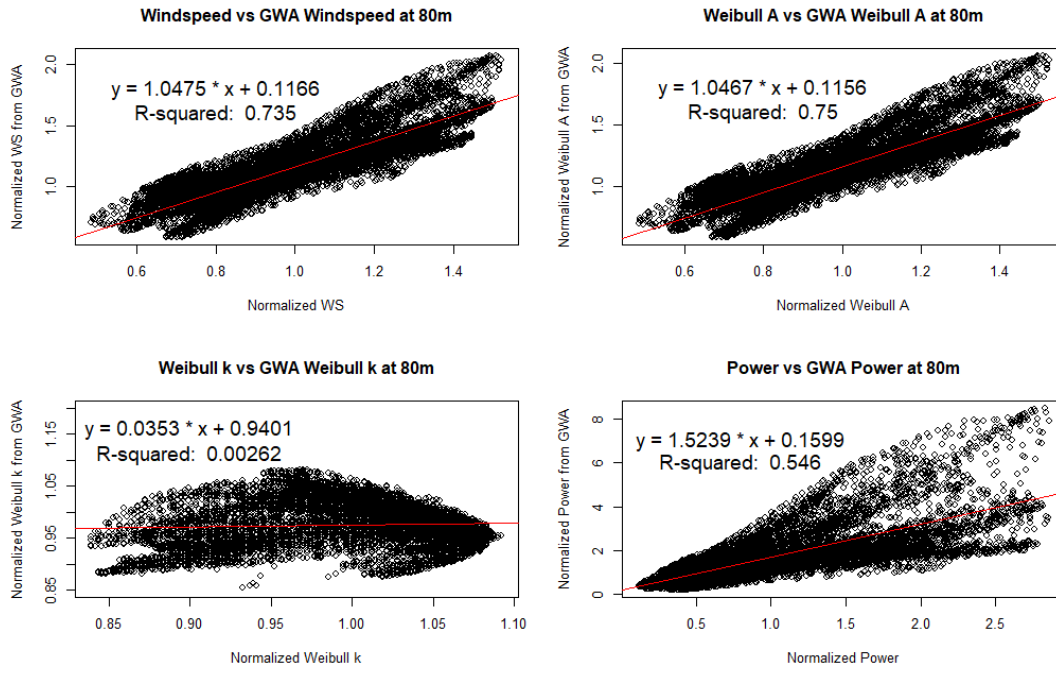


Şekil 4. 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

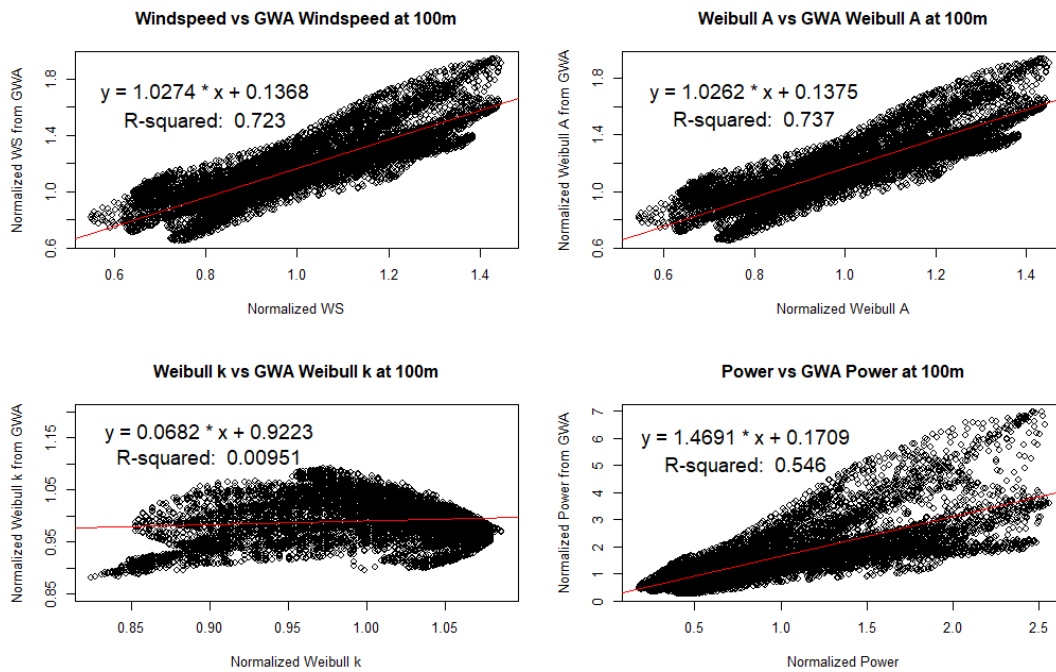
Aynı yöntem Ege ve Akdeniz Bölgesi'nde yer alan ölçüm direkleri Direk-2 ve Direk-3 için de uygulanmış ve yine rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu, Weibull A ve k parametreleri farklı yüksekliklerde oluşturulan atlaslarda karşılaştırılmıştır. Ege Bölgesi'nde yer alan Direk-2 için 15 metre, 80 metre (ölçüm yüksekliği), ve 100 metrede atlaslar üretilmiştir. Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 için 15 metre, 86 metre (ölçüm yüksekliği) ve 100 metrede atlaslar üretilmiştir. Ölçüm direklerine en yakın Küresel Rüzgar Atlası noktası, Direk-2 için yaklaşık 3.78 km iken, Direk-3 için 4.05 km mesafedir. Şekil 5-6-7'de Ege Bölgesi'ndeki Direk-2 ye ait çalışma sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 8-9-10'da ise Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 e ait çalışma sonuçları yer almaktadır.



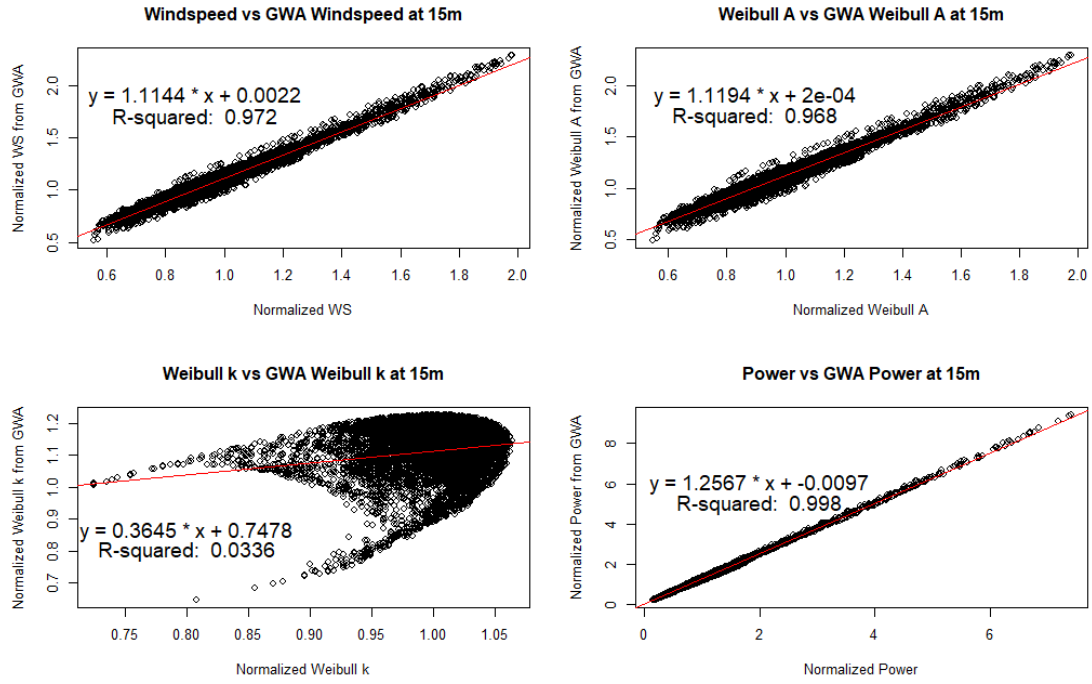
Şekil 5. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



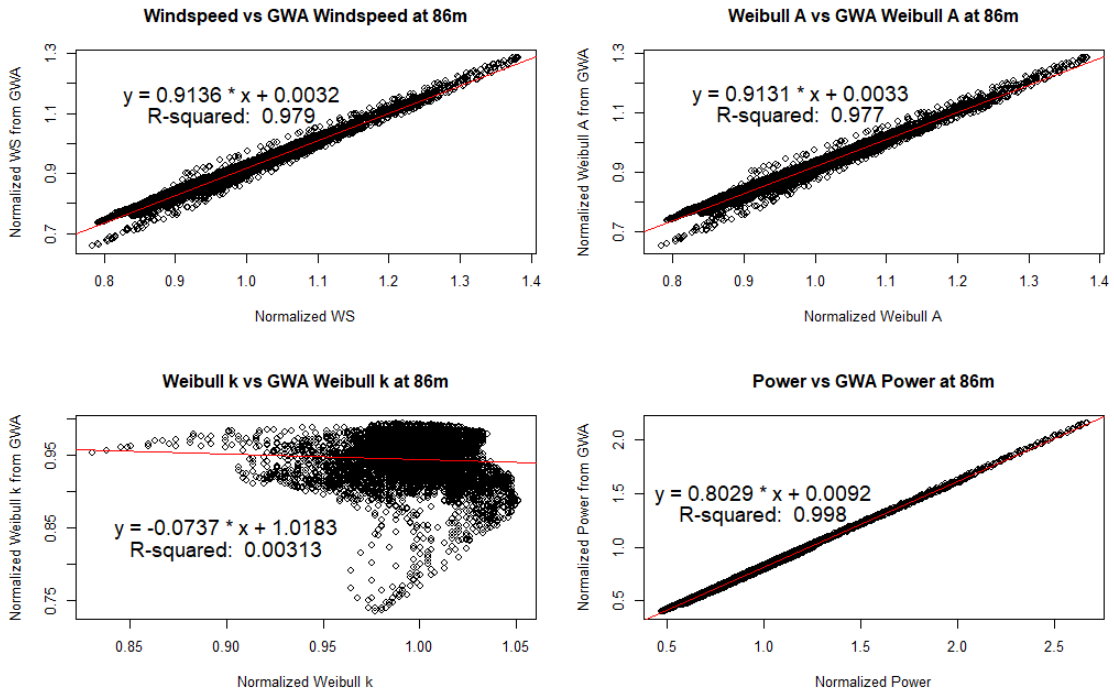
Şekil 6. 80 metrede (ölçüm yük.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



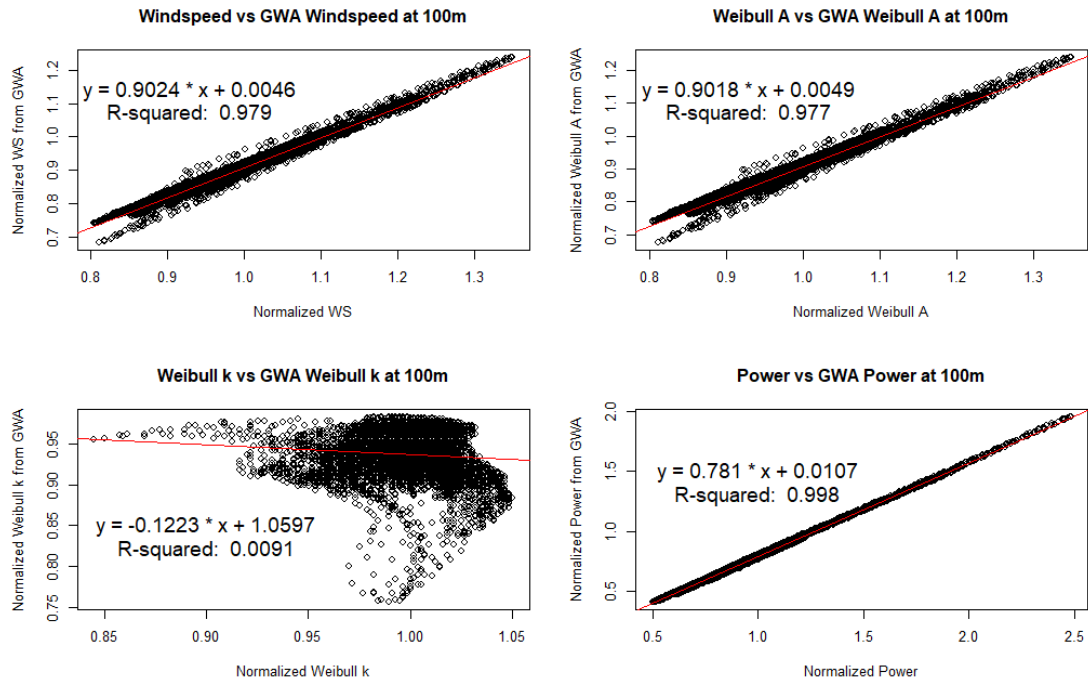
Şekil 7. 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



Şekil 8. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)



Şekil 9. 86 metrede (ölçüm yüks.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)



**Şekil 10.** 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)

3 farklı bölgedeki çalışmaya ait grafikler incelendiğinde genellikle rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu ve Weibull A parametreleri arasında bir uyum olduğu ancak Weibull k parametresi için bu uyumun oldukça zayıf olduğu açıkça görülmektedir.

#### 4. SONUÇ

Üç farklı bölgede, üç farklı ölçüm direğiyle Küresel Rüzgar Atlası'nın doğruluğu test edilmiştir. Üç farklı çalışma alanı da farklı engebelik değerlerine sahiptir yani tüm çalışma alanlarının arazi yapısı farklıdır. Karmaşık arazi yapısına göre büyükten küçüğe sıralama yaparsak; Ege Bölgesi'ndeki Direk-2, Marmara Bölgesi'ndeki Direk-1 ve Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 çalışma alanı olacaktır. Bu durumda engebelik indeksi en yüksek olan Direk-2 deki sonuçların diğerlerine göre tutarsız olduğu gözlenmiştir. Tüm çalışmaya ait sonuçlar Tablo 2'de yer almaktadır. Weibull k parametresi hemen hemen tüm sahalar ve yüksekliklerde uyum göstermemektedir. Sadece 15m yüksekliklerde belki kabul edilebilir seviyede olsa dahi, tutarsızlığı açıkça gözlenmektedir. Ayrıca Weibull-k, Direk-3'e ait engebelik değeri oldukça düşük ve rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu ve Weibull A parametreleri arasında uyum oldukça fazladır. Bu çalışma alanı için güç yoğunluğuna göre  $R^2$  değeri %97 den fazladır. Ancak Direk-2 ye ait sonuçlar incelendiğinde  $R^2$  değerinin oldukça düştüğü gözlenmiştir. Bu düşüşün temel sebebi arazinin yapısının karmaşık hale gelmesi olarak düşünülebilir. Buna göre, Küresel Rüzgar Atlası'nın arazinin karmaşık yapıda olmadığı alanlarda oldukça tutarlı olduğunu görebiliriz. Çalışmanın daha fazla noktada tekrar edilmesi atlasının güvenilirliği konusunda daha fazla bilgi verecektir ancak küçük yatırımcılar, saha koşullarını göz önüne alarak fizibilite çalışmalarında rahatlıkla Küresel Rüzgar Atlası'ndan yararlanabilir.



**Tablo 2.** Karşılaştırma tablosu. 15m ve 100m seçilmiş yükseklikler olup, ara yükseklik ölçüm yüksekliğidir.

Direk	z [m]	U [m/sn]			A [m/sn]			k [-]			Güç Yoğunluğu [W/m <sup>2</sup> ]		
		Eğim	Ofset	R <sup>2</sup>	Eğim	Ofset	R <sup>2</sup>	Eğim	Ofset	R <sup>2</sup>	Eğim	Ofset	R <sup>2</sup>
1	15	1.2267	0.0174	0.936	1.2286	0.0218	0.938	1.0839	-0.0089	0.814	1.8393	-0.0566	0.882
	86	1.0981	-0.0237	0.927	1.0965	-0.0231	0.932	0.2200	0.7539	0.026	1.3399	-0.0538	0.817
	100	1.0682	-0.0006	0.928	1.0669	0.0002	0.932	0.1573	0.8278	0.013	1.2628	-0.0191	0.805
2	15	1.3228	0.0952	0.742	1.3496	0.0866	0.758	0.5942	0.5277	0.257	2.6284	0.0902	0.466
	80	1.0475	0.1166	0.735	1.0467	0.1156	0.750	0.0353	0.9401	0.003	1.5239	0.1599	0.546
	100	1.0274	0.1368	0.723	1.0262	0.1375	0.737	0.0682	0.9223	0.010	1.4691	0.1709	0.546
3	15	1.1144	0.0022	0.972	1.1194	0.0002	0.968	0.3645	0.7478	0.034	1.2560	-0.0097	0.998
	86	0.9136	0.0032	0.979	0.9131	0.0033	0.977	-0.0737	1.0183	0.003	0.8029	0.0092	0.998
	100	0.9024	0.0046	0.979	0.9018	0.0049	0.977	-0.1233	1.0597	0.009	0.7810	0.0107	0.998

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 216M505 numaralı projesi ve Avrupa Birliği, Latin Amerika ve Karayip Ülkeleri Ortak İnovasyon ve Araştırma Faaliyetleri Ağı (ERaNet-LAC) kapsamında fonlanmış olan Küçük Rüzgâr Türbinlerinin Optimizasyonu ve Ticari Promosyonu - Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion (SWTOMP) projesi içinde desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Troen, I., & Lundtang Petersen, E. 1989. European Wind Atlas. Roskilde: Risø National Laboratory.
- [2] Starkov, A.N., L. Landberg, P.P. Bezroukikh and M.M. Borisenko. 2000. Russian Wind Atlas. Russian-Danish Institute for Energy Efficiency, Moscow; Risø National Laboratory, Roskilde. 551 pp. ISBN 5-7542-0067-6.
- [3] Mortensen, N. G., Said Said, U., & Badger, J. 2006. *Wind Atlas for Egypt*. In Proceedings of the Third Middle East-North Africa Renewable Energy Conference
- [4] Hahmann, A. N., Lennard, C., Badger, J., Vincent, C. L., Kelly, M. C., Volker, P. J. H., Refslund, J. 2015. *Mesoscale modeling for the Wind Atlas of South Africa (WASA) project*. DTU Wind Energy.
- [5] Tammelin, B, Vihma, T, Atlaskin, E, Badger, J, Fortelius, C, Gregow, H, Horttanainen, M, Hyvönen, R, Kilpinen, J, Latikka, J, Ljungberg, K, Mortensen, NG, Niemelä, S, Ruosteenoja, K, Salonen, K, Suomi, I & Venäläinen, A. 2013. *Production of the Finnish Wind Atlas*. Wind Energy, vol. 16, s. 19-35.
- [6] Mortensen, N. G. , Davis, N. , Badger, J. , & Hahmann, A. N. 2017. *Global Wind Atlas – validation and uncertainty*.
- [7] < <https://wind-data.ch/tools/weibull.php> >, 28.08.2019
- [8] < <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine> >, 28.08.2019