



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması

Calculation of air density for wind energy systems use

Yazar (Author): Ferhat BİNGÖL

ORCID: 0000-0002-8071-3814

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bingöl F., “Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 273-281, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.385523

Rüzgar Enerji Sistemleri için Hava Yoğunluğunun Hesaplanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Ferhat BİNGÖL*

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gülbahçe Kampüsü, 35433, Urla, İzmir, Türkiye
(Geliş/Received : 08.02.2017 ; Kabul/Accepted : 09.06.2017)

ÖZ

Rüzgar tarlaları son yıllarda dünyada ve Türkiye’de deniz seviyesindeki alanların yanı sıra yüksek rüzgar hızı kapasitesine sahip dağlık bölgelerde de kurulmaya başlamıştır. Ancak, dikkat edilmesi gereken en önemli nokta bu konularda hava yoğunluğunun azaldığı ve bunun da rüzgar türbinlerinden üretim gücüne doğrudan etkilediğidir. Küçük görünen farklar eğer fizibilite aşamasında yanlış hesaplanırsa uzun yıllar üretim göz önüne alındığında önemli farklar yaratabilirler. Bu çalışmada Türkiye’de 126 ölçüm yapılmış nokta için temelde iki farklı yöntem kullanılarak yoğunluk hesabı yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Genel itibarıyla, sonuçlar yıllık ortalamalar dikkate alındığında iki metotta da birbirine yakın çıkmakta ama aylık ortalamalarda %2 seviyelerine ulaşan üretim tahmininde hatalara yol açacak farklılıklar göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbinleri, hava yoğunluğu, fizibilite.

Calculation of Air Density for Wind Energy Systems Use

ABSTRACT

In recent years, wind farms are being located at mountainous high altitude locations in Turkey. Nevertheless, most important point to pay attention for those locations are that the air density is lower and this effects the production of wind turbines directly. If the feasibility calculations are not performed in detail on the subject, small effects of air density can create a big loss in long term operational wind farms. In this study, two known methods (i) International standards for calculations and (ii) widely used engineering method are applied on datasets from 126 weathers stations all around Turkey and calculations are compared with each other. Results show similarities on yearly averages but outlines up to 2% differences in different months of the year.

Keywords: Wind turbines, air density, feasibility

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücü 10 sene içinde 200 katı aşan bir büyüme sağlanmış ve öncü yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur. Diğer gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynakları güneş, jeotermal ve biyokütle de büyüme hızlarını artırarak yenilenebilir enerjileri Türkiye’nin petrol, kömür ve doğal gazdan sonra 4’üncü büyük enerji kaynağı olmaya aday hale getirmiştir [1]. Rüzgar enerjisinde arzın artırılabilmesi için temel kıstas büyümenin sağlıklı ve sürdürülebilir bir şekilde yapılmasıdır. Şu ana kadar ulaşımı kolay, düz ve rüzgar konusunda verimli arazilerin deniz seviyesine yakın noktalarda bulunan konumlar tercih edilmiştir. Buna karşın, birçok rüzgar enerjileri kapasite atlasına [2,3] ve Türkiye için en güncel çalışmalara [4,5] bakıldığında, ulaşımı zor, yüksek rakımlı noktalarda da Türkiye’nin rüzgar enerji kapasitesinin önemli bir bölümünün bulunduğu görülmektedir.

Yüksek rakımlı noktalarda rüzgar kapasitesinin varlığına dikkat edildiği kadar hava yoğunluğu değerine de dikkat etmek gerekir. Rüzgar türbinlerinin üreteceği güç, rüzgar hızının (U [m/s]) küpüne, kanat süpürme alanına (A

[m²]), türbinin güç katsayısına (C_p) ve hava yoğunluğuna (ρ [kg/m³]) [6] bağlıdır (Denklem 1). Rüzgar türbinlerin karakteristik özelliklerini (A , C_p) aynı türbini kullandığımızı farz ederek göz ardı edersek, bir rüzgar türbininin farklı noktalarda farklı oranda enerji üretmesine yol açan iki bağımsız değişkenin, hava yoğunluğu (ρ) ve rüzgar hızı (U) olduğunu söyleyebiliriz.

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

Rüzgar hızı için ölçüm ve modellemeye ya da bunların birleşik çözümlerine dayalı rüzgar atlas metodolojileri geliştirilmiş ve bu sayede bir noktadaki rüzgar hızı istatistik olarak modellenenebilir hale getirilmiştir. Hava yoğunluğunu hesaplamak için ise ölçüm yapılmalıdır. Saha ölçümlerinde bu sebeple rüzgar yön ve hızları dışında sıcaklık, basınç ve nem de dahil edilmekte ve bu veriler en az bir sene süreyle toplanmaktadır. Dört mevsimi içeren bir senelik bir dönem için hava yoğunluğunun ortalaması alınarak modelleme yazılımlarında sahanın ortalama hava yoğunluğu olarak kullanılır.

Genel olarak hava yoğunluğunun bu hesaplama eklenmesi, üretilen enerjinin hesaplanmasından sonra hava yoğunluğuna göre her bir türbin noktasındaki üretim tahminin güncellenmesine ya da hesaplama öncesi rüzgar güç eğrisinin hava yoğunluğuna göre güncellenmesine

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ferhat.bingol@iyte.edu.tr

dayanır. Günümüzde bazı mühendislik uygulamalarında tüm arazide tek bir hava yoğunluğuna göre güncelleme yapılırken (ör: WAsP Yazılımı), daha yeni modellerde bir mühendislik yöntemi olan deniz seviyesinden yükseklik ve yıllık ortalama sıcaklığa göre hava yoğunluğunun her bir olası türbin noktası için hesaplanmasına dayanır (ör: WAT - Windfarm Assessment Tool).

Türbinlerin güç eğrileri üreticiler tarafından türbin kullanıcılarına genelde 15°C, standart hava basıncı ve %0 bağıl nem koşulları için hava yoğunluğuna (1.225~ kg/m³) göre hesaplanarak verilir. Oysa ki, hava yoğunluğu deniz seviyesinde farklı basınç ve neme göre değişebileceği gibi deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça düşebilir. Şu anda rüzgar türbinlerinin kullanıldığı yüksekliklerde 0.9 kg/m³'e kadar düştüğü gözlenen hava yoğunluğu, fizibilite hesaplarına katılmaz ise, büyük çaplı üretim tahmini hatasına yol açar. Denklem 1'de görüldüğü gibi, doğru orantılı düşüşe göre aynı özelliklere sahip iki türbin aynı rüzgar hızları altında %25'i aşan üretim kaybı yaratabilir. Yine Denklem 1'e göre teorik olarak kaybı karşılamak için rüzgar hızının deniz seviyesine göre %9 civarında artması farkın kapatılmasını sağlar ancak yüksek rakımlı bölgelere çıkıldıkça türbin konulabilecek her noktada mikro-meteorolojik şartların bu lineer dengeyi sağlaması kesin değildir çünkü dikey rüzgar profilleri [7] deniz seviyesinden yüksekliğe değil buldukları yerden yüksekliklerine bağlıdır [8,9]. Dolayısıyla deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça hava yoğunluğunun düştüğü ölçüde rüzgar hızının artacağı söylenemez.

Üretim hesabında bu kadar önemli olan hava yoğunluğunun hesaplanması için geliştirilen ilk standartlar 1981 yılına dayanır [10]. Geliştirilen hesaplama yöntemi o sene içinde standart haline gelmiş ve konu hakkındaki çalışmalar hesaplamaların 1992 yılında son halini almasına kadar [11] devam etmiştir. Daha sonra sabit değerlerde yapılan güncellemelerle geliştirilmiş ve yeni sürümleri çıkmıştır [12,13,14]. Yayınlanan son standart [15] bu çalışmada esas alınan hesaplama yöntemidir.

Bahsi geçen tüm çalışmalar hesapları üç atmosfer parametresine; hava sıcaklığı (t), hava basıncı (p) ve bağıl nem (h), bağlamıştır; $\rho(t,p,h)$. Öte yandan, bu çalışmaların rüzgar enerji sistemlerinde yapılan hesaplamalara etkisi hesaplanan hava yoğunluğuna göre rüzgar türbin üretim tahmini üzerindedir. Uluslararası standartları belirleyen IEC Teknik Komite 88 grubu, güç eğrilerinin hesaplanmış/ölçülmüş hava yoğunluğuna göre güncellenmesi başlığını ilk defa 2005 yılında IEC 61400-12-1 nolu standart içinde yayınlamıştır [16]. Belirtilen standart, güncel hava yoğunluğu hesaplama yöntemleri üzerine tavsiye içermemekte sadece hesaplanmış değerlerin güç eğrisini yeniden düzenlemek için nasıl kullanılacağı üzerindedir. Bu standardın uzun süre güncellenmemesinden dolayı rüzgar enerjisi sektöründe özellikle modelleme yazılımı geliştirenler yine güç eğrilerinin güncellenmesi üzerine metodolojiler geliştirmişlerdir [17,18,19]. Referans gösterilen çalışmalar, tümüyle hesaplanmış bir hava yoğunluğu değerinin güç eğrisinin

güncellenmesinde kullanılmasını hedefleyen sonuçlar içermektedir. Aynı bakış açısı, çalışmamız sırasında yürürlükte olan IEC 61400-12-1 standardının 2017 yılında yayınlanmış sürümünde de devam etmiştir [20]. Literatür taramasında görüldüğü üzere uluslararası standart metodun, mühendislik metodu ile ne kadar bağdaştığını araştırmış bilimsel yayın kısıtlıdır ve genelde açık deniz ya da okyanus üzerindeki hava yoğunluğunun gece ve gündüz arasında yüksek farklılık göstermesi ve bunun rüzgar tarlalarına etkisi konuları çalışılmıştır [21]. Sunulan çalışma bunların aksine hava yoğunluğunun hesaplandığı yöntemleri karşılaştıran ilk yayınlardan biridir.

Bir sonraki bölümde, bahsi geçen bilimsel ve mühendislik yöntemleri tanıtılmıştır. Daha sonra, karşılaştırmanın yapılabilmesi için kullanılan verilerin kaynakları konusunda bilgi verilmiştir. Takip eden bölümde ise iki yöntem ile hava yoğunluğu ayrı ayrı hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

Kullanılan mühendislik yönteminin gerçek değerlerden ne kadar farklı olduğunu karşılaştırmak için hava yoğunluğunun hesaplanmasında "Uluslararası Ağırlık ve Ölçüm Komitesi (CIPM)" yöntemi temel kıstas olarak alınmıştır. CIPM hava yoğunluğunun hesaplanmasında standartlar geliştirmektedir ve otoritedir. İki yöntem takip eden alt başlıklarda açıklanmıştır.

2.1 Uluslararası Ölçüm Standartları Yöntemi

(Method of International Measurement Standards)

CIPM hava yoğunluğunu (ρ), hava sıcaklığı (t), hava basıncı (p) ve bağıl nem (h) ile Denklem 2'deki gibi ilişkilendirmiştir [15].

$$\rho(t, p, h) = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (2)$$

Burada molar gaz sabiti, $R=8.314472$ J/mol.K, kuru havanın molar kütlesi, $M_a=28.96546 \times 10^{-3}$ kg/mol ve suyun molar kütlesi $M_v=18.01525 \times 10^{-3}$ kg/mol olarak alınabilir. Su buharı mol kesri, x_v , doymuş buhar basıncı p_{sv} ile artış katsayısının, f , çarpımı ve hava basıncına bölümüyle bulunur (Denklem 3).

$$x_v = \frac{p_{sv}}{f} \quad (3)$$

Doymuş buhar basıncı ve artış katsayısının deneysel çıktılara dayalı formülleri Denklem 4 ve 5'de verilmiştir.

$$p_{sv} = 1 \text{ Pa} \times e^{(c_1 T^2 + c_2 T + c_3 + \frac{D}{T})} \quad (4)$$

$$f = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad (5)$$

Sıkıştırılabilirlik katsayısı, Z ise CIPM-81/91 denklemleriyle [15] aynı şekilde hesaplanır:

$$Z = 1 - p/t [a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \quad (6)$$

$$- (b_0 + b_1 T +) x_v + (c_0 + c_1 T) x_v^2] + \frac{p^2}{t^2(d + e x_v^2)}$$

¹ <http://www.bipm.org/en/committees/cipm>

2.2 Mühendislik Yöntemi (Engineering Method)

Rüzgar enerjilerinde eğer ölçüm sırasında toplanan veriler arasında basınç p ve bağıl nem h yok ise, tavsiye edilen yöntem bu değişkenleri deniz seviyesinden yükseklik (z) ve sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) değerlerini kullanarak hesaplamak ve buradan hava yoğunluğuna ulaşılmasıdır [22]. Yani, sadece sıcaklık ölçümü bilgisi ve sabit olan yükseklik bilgisini kullanmaktır.

Hava basıncı, sıcaklık ve yüksekliğe bağlı olarak Denklem 7 gibi yazılabilir [9]. Burada, düşey sıcaklık gradyanı, $L=0.0065$ K/m, deniz seviyesi standart sıcaklığı, $t_0=288.15$ K, deniz seviyesi standart atmosferik basınç $p_0=101325$ Pa ve yer çekimi sabiti, $g=9.80665$ m/s² olarak alınır.

$$p(z) = p_0 \left[1 - \frac{Lz}{t_0} \right]^{\frac{gM_a}{RL}} \quad (7)$$

Sonuç olarak mühendislik yöntemi bilinmeyenleri ikiye indirir, deniz seviyesinden yükseklik (z) ve sıcaklık (T).

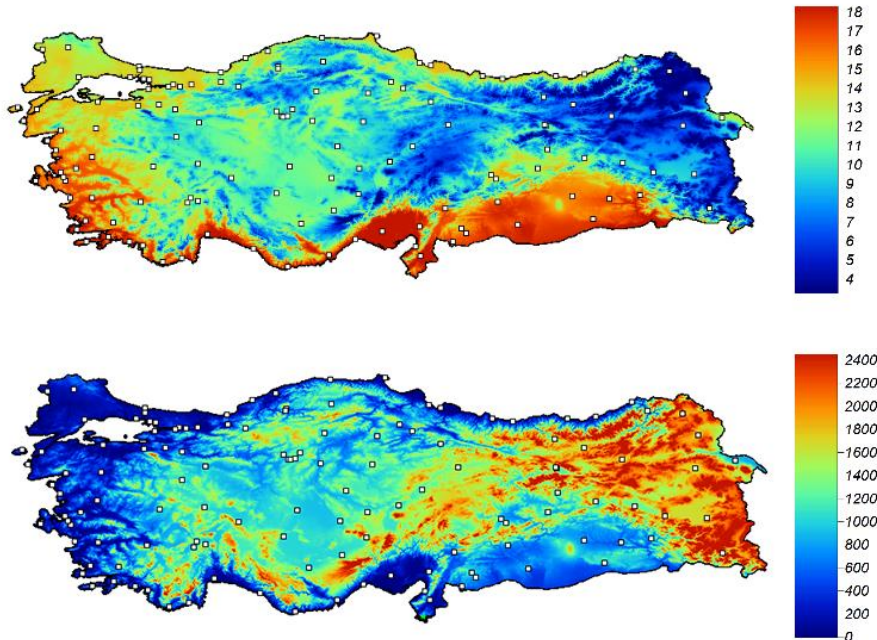
3. VERİ (DATA)

Yöntem bölümünde açıklanan CIPM ve mühendislik hava yoğunluğu hesaplama yöntemleri karşılaştırmak için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından paylaşılan 126 ölçüm direği verisi, uydu verilerine dayalı sayısal yükseklik modeli verisi ve uzun dönem sıcaklık bilgilerine dayalı sıcaklık arşivi verileri kullanılmıştır (Şekil-1).

MGM direk verileri CIPM ölçüm standartlarına uygun olarak $\rho(t,p,h)$ formülünde kullanılmıştır. MGM'nin

Türkiye çapında 360'dan daha fazla ölçüm istasyonu vardır. Bunların arasından seçim yaparken şu kriterler gözletilmiştir (a) Türkiye'nin genelini kapsayacak bölgesel ve homojen dağılımı sağlamak; (b) Ölçüm sürelerinin en az 4 sene sürekli olması ve ölçülmüş verinin yüzde 90'ının üstünde olması. MGM'nin bu gereksinimlerini karşılayan direkleri ortalama 8 ila 12 m olup kurum tarafından kurulur, işletilir, arşivlenir ve cihazların bakımı standartlara uygun olarak düzenli olarak yapılır. Direklerden toplanan veriler rüzgar hızı (m/s), rüzgar yönü ($^{\circ}$), basınç (Pa), sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve bağıl nem (%) verileridir. Direkler hava yoğunluğunun hesabı için gerekli 3 parametreyi başarıyla toplamaktadır.

Mühendislik metodu olan $\rho(T,z)$ hesaplamasında kullanılmak üzere ise sıcaklık verileri WorldClim [23] veri setinden alınmıştır. Bu veri seti noktasal veriye ek olarak ölçülmüş verilerden interpolasyon yöntemiyle yaratılmış yüksek çözünürlüklü aylık ortalama değerler içeren bir veri tabanıdır. 1950 ve 2000 yılları arasında toplanmış sıcaklık ve yağmur verilerini dünya meridyenlerini 10 arc-dakika ve 30 saniye arasında büyüklüklerde interpolate etmek için kullanılmış ve 0.0083° (yaklaşık 1~km) çözünürlükte bir sıcaklık veri tabanı oluşturmuştur. 12 aylık sıcaklıkların ayrı ayrı alınabilmesinin yanı sıra, bunların yıllık ortalaması da hesaplanabilir. Direklerin deniz seviyesinden yüksekliği ise yine MGM saha bilgilerinde bulunmasına karşın tam anlamıyla bir veri seti karşılaştırması yapabilmek için rüzgar enerjilerinde saha haritalarını çıkarmak için sıkça kullanılan Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) veri setinin 4.1



Şekil 1. Analizde kullanılan 126 istasyon (beyaz kareler). WorldClim verilerine göre Türkiye'nin yıllık sıcaklık ortalamaları [$^{\circ}\text{C}$] (üstte) ve SRTM 4.1 veri setine göre deniz seviyesinden yükseklik bilgileri [m] (altta) (126 stations that are used in the analysis (white squares). Averaged temperature atlas of Turkey derived from WorldClim dataset (top). SRTM 4.1 based elevation values for Turkey (bottom))

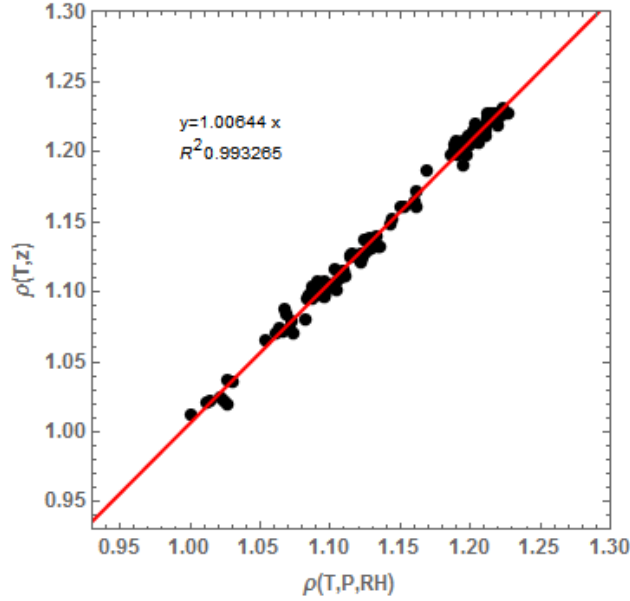
sürümü² kullanılmıştır [24]. SRTM verisi 2001 yılına dayanıyor olsa dahi daha yeni olan başka sayısal çalışmalarla yamalanmış ve boşlukları tamamen doldurulmuştur. Sonuç olarak iki farklı hesaplama yöntemi iki farklı veri grubuyla yapılmıştır.

4. BULGULAR (RESULTS)

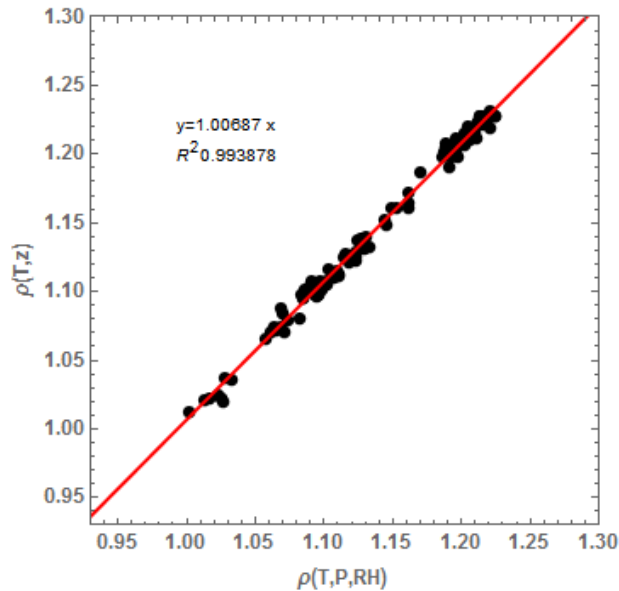
İlk adım olarak, her istasyon için tüm veri kullanılarak yıllık ve aylık ortalamalara göre bilimsel yöntem ile hesaplanmıştır. Mühendislik yöntemini uygulamak

içinse, istasyon konumlarına göre istasyonların deniz seviyesinden yüksekliği SRTM 4.1 veri setinden alınmıştır. Sıcaklık verileri ise WorldClim veri tabanında aylık ve yıllık olarak alınmıştır. Yıllık ve aylık ortalamalar üzerine hesaplanmış iki metodun karşılaştırması Şekil-2 ve Şekil-3'de sunulmuştur. Hata payının binde 6-7 mertebelerinde olduğu gözlenmiştir.

Aynı veri setleri ve yöntemler ikinci adımda aylık ortalamalara göre hesaplanmış ve mevsimsel değişkenliğin hesaplamalara olan etkisi incelenmek istenmiştir. Sonuçlar Şekil-4 ve Şekil-5'de sunulmuştur.

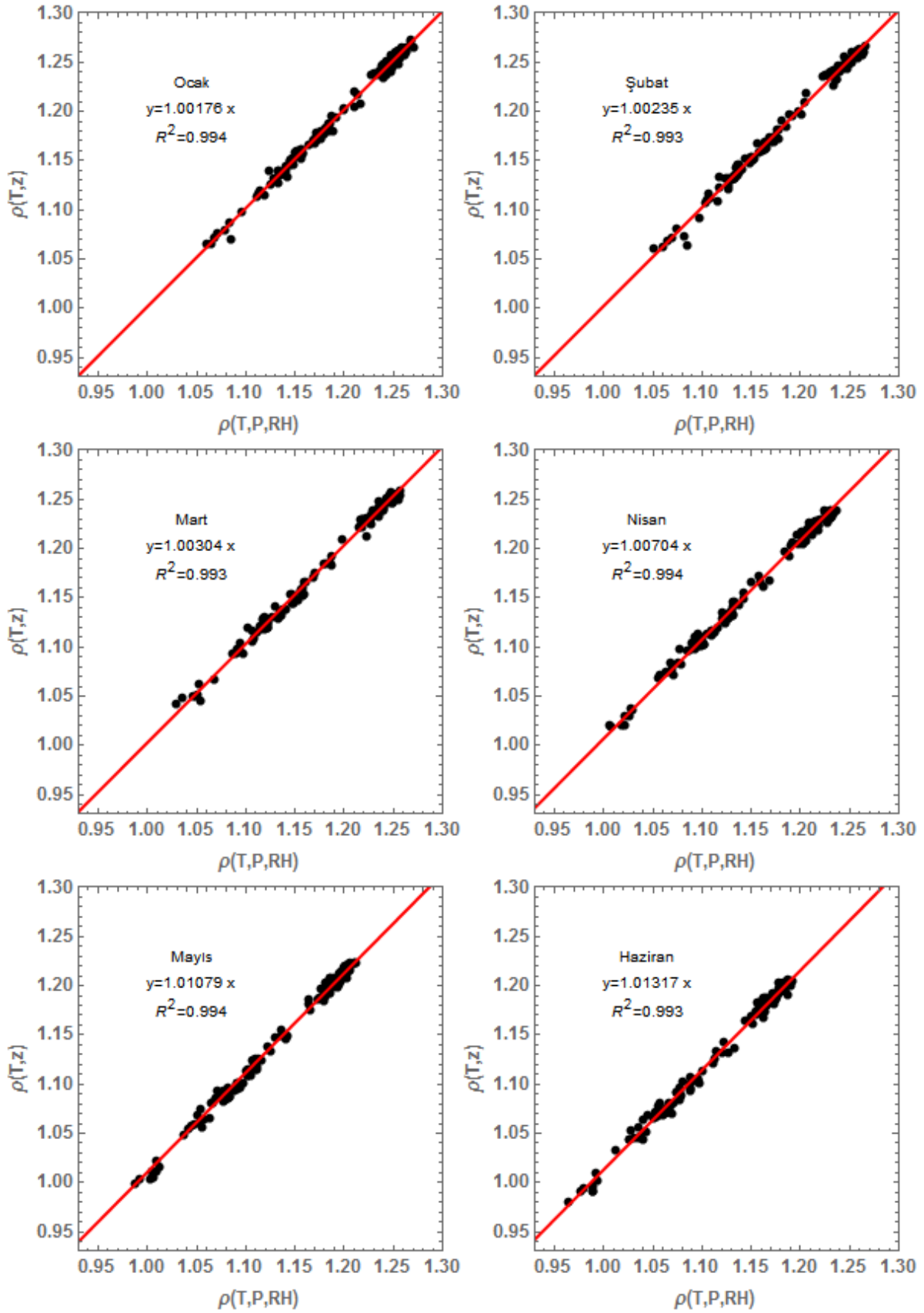


Şekil 2. Tüm verilerin yıllık ortalamasından her bir istasyon için hesaplanan iki farklı hava yoğunluğunun karşılaştırması. (Scatter plot of two methods for yearly averages)

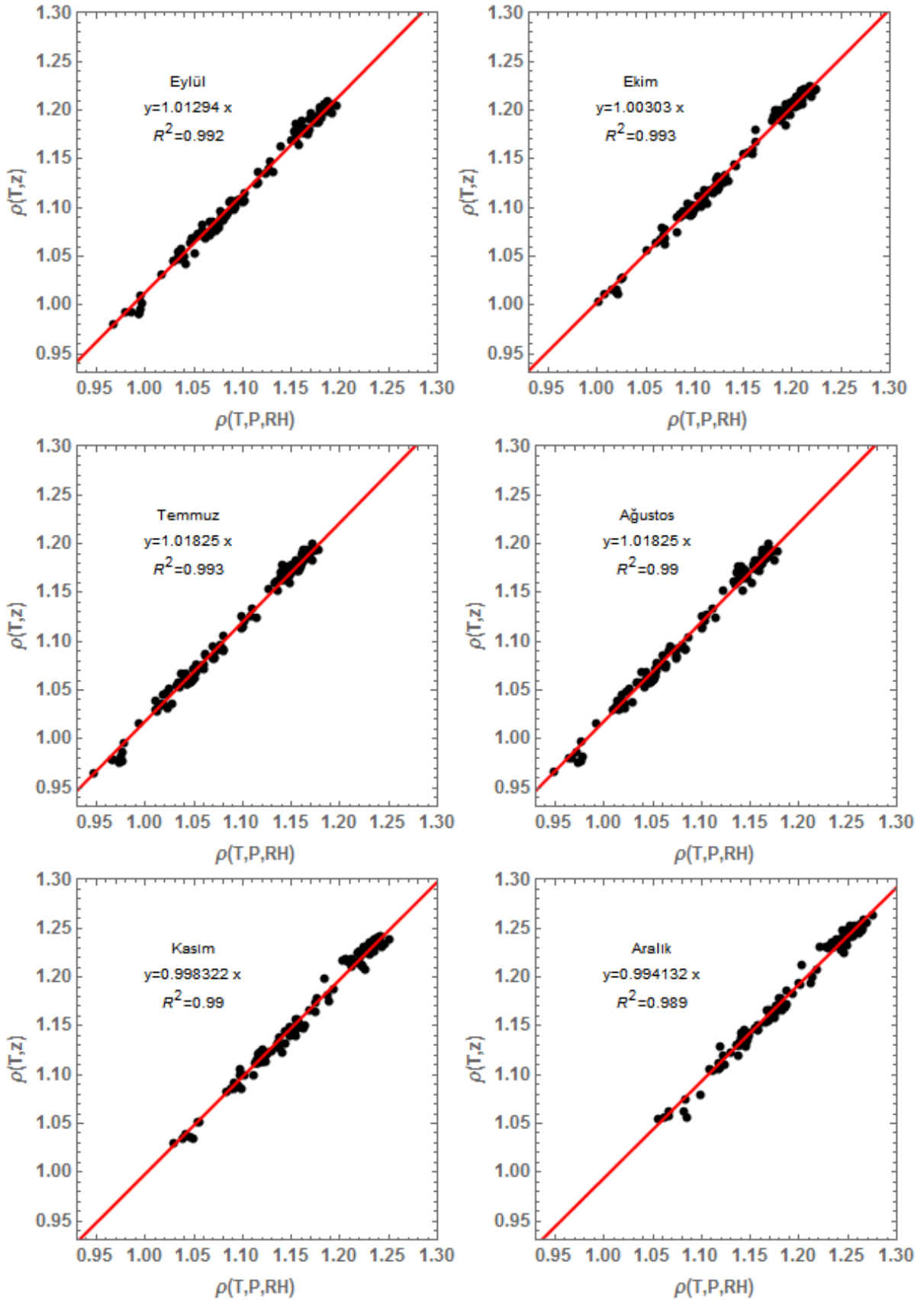


Şekil 3. Tüm verilerin aylık ortalamasından her bir istasyon için hesaplanan iki farklı hava yoğunluğunun karşılaştırması. (Scatter plot of two methods for monthly averages)

² <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>



Şekil 4. İki yöntemin ay bazında karşılaştırması (Ocak-Haziran) (Monthly comparison of the two methods (January-June))



Şekil 5. İki yöntemin ay bazında karşılaştırması (Temmuz-Aralık) (Monthly comparison of the two methods (July-December))

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Türkiye'nin 126 farklı noktasında toplanan 4 senelik hava sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nem verileri kullanılarak bahsi geçen noktaların hava yoğunluğu hesabı CIPM tarafından yayınlanan en güncel yöntemle göre hesaplanmıştır [15]. CIPM yöntemine dayalı hesaplamalar gerçeğe en yakın sonuçlar olarak öngörülmüş ve aynı noktalar için WorldClim sıcaklık verisi ve SRTM 4.1 sayısal yükseklik modeli kullanılarak hava yoğunluğu tahmini aylık ve yıllık bazda mühendislik yöntemi kullanılarak da yapılmıştır. Bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Bu çalışma ile CIPM metodu kullanılarak Türkiye için ilk defa hava yoğunluğu hesabı sağlanması yüksek rakımlar için yapılmıştır. Hava sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nem verileriyle yapılan CIPM'in yayınladığı (Denklem 2) hesaplama yöntemi ile rüzgar enerjileri konusunda modelleme çalışmalarında da kullanılması tavsiye edilen yöntem (Denklem 2,7) arasında güç ve enerji üretimi hesabına etkiyen ve dikkate alınması gereken bir sapma yoktur. Sapma binde 6 mertebesindedir. Yüksek rakımlı ve düşük hava yoğunluğuna sahip noktalarda dahi, $\rho(t,z)$ yöntemi aylık ya da daha kısa periyotlarla toplanmış şekilde kullanılabilir. Ancak, aynı karşılaştırma aylar için yapıldığında hatanın binde 2 mertebesine düşebildiği ya da yüzde 2 mertebesine çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, belirli aylarda üretim tahminine olan etkisi dikkate alınması gerekir bir seviyededir.
- 50 yıllık WorldClim verilerinin aylık ve yıllık ortalamalarından alınan sonuçlar, ölçüm değerlerinin kullanıldığı aylık ortalama verilerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Bu sebeple bu ortalama verilerin mühendislik çalışmalarında ön-hesap seviyesinde kullanılabilme olanağı gözlenmiştir; sahanın ortalama yüksekliği ve yıllık ortalama bilgilerine dayanarak yıllık hava yoğunluğu ortalaması hesaplanabilir. Bu çalışmada verilen hata payları üretim hesabına etkisi gözlemlenen hata oranı olarak da alınabilir. Günümüzde güncel araştırma projelerinde fizibilite çalışmalarında belirsizliğin %3'e indirilmesne çalışılmaktadır [25] ve uygulanan mühendislik metodu bu hedefe ulaşma da yardımcı olabilir.
- $\rho(T,z)$ metodunu kullanarak Türkiye'nin yüksekliklerinin tamamı göz önüne alınarak bir cetvel hazırlanmış ve bu cetvel Ek-A'da sunulmuştur. Cetvelde yer alan deniz seviyesinden yükseklik ve sıcaklıklara göre ara değerler doğrusal oranlama yöntemi ile bulunabilir.

SEMBOLLER

U	m/s	Rüzgar hızı
P	W	Güç
A	m ²	Kanat süpürme alanı
C_p	-	Güç katsayısı
ρ	Kg/m ³	Hava yoğunluğu
T	°C	Hava sıcaklığı (Celsius)
t	°K	Hava sıcaklığı (Kelvin)
p	mBar	Hava basıncı
h	%	Bağıl Nem
x_v	-	Su buharı mol kesri
Z	-	Sıkıştırılabilirlik katsayısı
R	J/mol.K	Molar gaz sabiti
M_a	Kg/mol	Kuru havanın molar kütlesi
M_v	Kg/mol	Suyun molar kütlesi
p_{sv}	mBar	Doymuş buhar basıncı
f	-	Artış katsayısı

SABİTLER

C_1	1/K ²	1.2378847 x 10 ⁻⁵
C_2	1/K	1.9121316 x 10 ⁻²
C_3	1/K ²	1.2378847 x 10 ⁻⁵
C_4	K	6.3431645 x 10 ³
a	-	1.00062
β	1/Pa	3.14 x 10 ⁻⁸
γ	1/K ²	5.6 x 10 ⁻⁷
a_o	K/P	1.58123 x 10 ⁻⁶
a_1	1/P	-2.9331 x 10 ⁻⁸
a_2	1/KP	1.1043 x 10 ⁻¹⁰
b_o	K/P	5.707 x 10 ⁻⁶
b_1	1/P	-2.051 x 10 ⁻⁸
c_o	K/P	1.9898 x 10 ⁻⁴
c_1	1/P	-2.376 x 10 ⁻⁶
d	K ² /P ²	1.83 x 10 ⁻¹¹
e	1/P	-0.765 x 10 ⁻⁸

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 114C016 nolu "Üniform Rüzgar Atlaslarının Adaptasyonu: Türkiye Örneği" projesi tarafından desteklenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne paylaştıkları veriler için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] *Türkiye Rüzgar Enerjileri Birliği*, İstatistik Raporu, Ocak (2017).
- [2] Yenilenebilir Enerjiler Genel Müdürlüğü. REPA (İl Bazlı Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası), (2012).
- [3] Jake Badger, Neil Davis, Andrea N. Hahmann, Bjarke Tobias Olsen, Xiaoli Guo Larsén, Mark C. Kelly, Patrick Volker, Merete Badger, Tobias Torben Ahsbals, Niels Gylling Mortensen, Hans Ejsing Jørgensen, Erik Lundtang Petersen, Julia Lange, and Nicolas Fichaux. The new worldwide microscale wind resource assessment data on IRENA's Global Atlas. The EUDP Global Wind Atlas, (2015).
- [4] Ferhat Bingöl. Adaptation of Uniform Wind Atlases: Case Study of Turkey. TÜBİTAK (114C016) Final Report.
- [5] Sinem Değirmenci. Environmental Impact And Capacity Analysis Of Renewable Energy Resources: Case Study Of Wind Energy In Turkey. Master's thesis, Izmir Institute of Technology, (2016).
- [6] M.O.L. Hansen. Aerodynamics of Wind Turbines. Earthscan, (2013).
- [7] H. Tennekes. The logarithmic wind profile. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30(2): 234–238, (1973).
- [8] J. C. Kaimal and J. J. Finnigan. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford University Press, (1994).
- [9] R Stull. Meteorology for Scientists & Engineers. Univ. of British Columbia, 3rd edition, (2011).
- [10] P Giacomo. Equation for the determination of the density of moist air (1981). *Metrologia*, 18(1): 33, (1982).
- [11] R S Davis. Equation for the determination of the density of moist air (1981/91). *Metrologia*, 29(1): 67, (1992).
- [12] A Picard and H Fang. Three methods of determining the density of moist air during mass comparisons. *Metrologia*, 39(1): 31, (2002).
- [13] A Picard, H Fang, and M Gläser. Discrepancies in air density determination between the thermodynamic formula and a gravimetric method: evidence for a new value of the mole fraction of argon in air. *Metrologia*, 41(6):396, (2004).
- [14] S Y Park, J S Kim, J B Lee, M B Esler, R S Davis, and R I Wielgosz. A redetermination of the argon content of air for buoyancy corrections in mass standard comparisons. *Metrologia*, 41(6):387, (2004).
- [15] A Picard, R S Davis, M Gläser, and K Fujii. Revised formula for the density of moist air (cipm-2007). *Metrologia*, 45(2):149, (2008).
- [16] Wind turbines - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (iec 61400-12-1:2005), (2005).
- [17] Lasse Svenningsen. Power curve air density correction and other power curve options in windpro. Technical report, EMD International A/S, (2010).
- [18] J.W. Wagenaar and P.J. Eecen. Dependence of power performance on atmospheric conditions and possible corrections. Technical report, ECN Wind Energy, 2011. In Proceedings at EWEA (2011).
- [19] Mark Young. Power curve measurement experiences, and new approaches. In EWEA Resource Assessment Workshop - Dublin, (2013).
- [20] Wind energy generation systems - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (iec 61400-12-1: (2017).
- [21] R. Feistel, D. G. Wright, H.-J. Kretzschmar, E. Hagen, S. Herrmann, and R. Span. Thermodynamic properties of sea air. *Ocean Science*, 6(1):91–141, (2010).
- [22] Technical University of Denmark. WASP, Help Documents, version 11 edition, (2014).
- [23] Robert J. Hijmans, Susan E. Cameron, Juan L. Parra, Peter G. Jones, and Andy Jarvis. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15): 1965–1978, (2005).
- [24] H. I. Reuter, A. Nelson, and A. Jarvis. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9): 983–1008, (2007).
- [25] Erik Lundtang Petersen, Ib Troen, Hans Ejsing Jørgensen, and Jakob Mann. The new European wind atlas. *Energy Bulletin*, 1(17): 34–39, (2014).

EK-A Tablo 1. Türkiye için hava yoğunluğu cetveli [kg/m³]. Hata payı ± 0.0026 kg/m³. Hava sıcaklığı ilk satır [oC] ve deniz seviyesinden yükseklik ilk sütunda [m] verilmiştir.

	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	1.453	1.424	1.396	1.369	1.342	1.317	1.293	1.270	1.247	1.226	1.205	1.184	1.165	1.146	1.127
100	1.436	1.407	1.379	1.352	1.327	1.302	1.278	1.255	1.233	1.211	1.190	1.170	1.151	1.132	1.114
200	1.419	1.390	1.363	1.336	1.311	1.286	1.263	1.240	1.218	1.197	1.176	1.157	1.137	1.119	1.101
300	1.402	1.374	1.347	1.321	1.295	1.271	1.248	1.225	1.204	1.183	1.162	1.143	1.124	1.106	1.088
400	1.386	1.358	1.331	1.305	1.280	1.256	1.233	1.211	1.189	1.169	1.149	1.129	1.111	1.092	1.075
500	1.369	1.341	1.315	1.289	1.265	1.241	1.218	1.196	1.175	1.155	1.135	1.116	1.097	1.079	1.062
600	1.353	1.325	1.299	1.274	1.250	1.226	1.204	1.182	1.161	1.141	1.121	1.102	1.084	1.067	1.050
700	1.337	1.310	1.284	1.259	1.235	1.212	1.189	1.168	1.147	1.127	1.108	1.089	1.071	1.054	1.037
800	1.321	1.294	1.268	1.244	1.220	1.197	1.175	1.154	1.133	1.114	1.095	1.076	1.058	1.041	1.025
900	1.305	1.278	1.253	1.229	1.205	1.183	1.161	1.140	1.120	1.100	1.081	1.063	1.046	1.029	1.012
1000	1.289	1.263	1.238	1.214	1.191	1.168	1.147	1.126	1.106	1.087	1.068	1.050	1.033	1.016	1.000
1100	1.273	1.248	1.223	1.199	1.176	1.154	1.133	1.113	1.093	1.074	1.056	1.038	1.021	1.004	0.988
1200	1.258	1.233	1.208	1.185	1.162	1.140	1.119	1.099	1.080	1.061	1.043	1.025	1.008	0.992	0.976
1300	1.243	1.218	1.193	1.170	1.148	1.126	1.106	1.086	1.067	1.048	1.030	1.013	0.996	0.980	0.964
1400	1.228	1.203	1.179	1.156	1.134	1.113	1.092	1.073	1.054	1.035	1.018	1.000	0.984	0.968	0.952
1500	1.213	1.188	1.165	1.142	1.120	1.099	1.079	1.060	1.041	1.023	1.005	0.988	0.972	0.956	0.941
1600	1.198	1.174	1.150	1.128	1.106	1.086	1.066	1.047	1.028	1.010	0.993	0.976	0.960	0.944	0.929
1700	1.183	1.159	1.136	1.114	1.093	1.072	1.053	1.034	1.015	0.998	0.981	0.964	0.948	0.933	0.918
1800	1.169	1.145	1.122	1.100	1.079	1.059	1.040	1.021	1.003	0.986	0.969	0.952	0.937	0.921	0.907
1900	1.154	1.131	1.108	1.087	1.066	1.046	1.027	1.009	0.991	0.973	0.957	0.941	0.925	0.910	0.896
2000	1.140	1.117	1.095	1.074	1.053	1.033	1.014	0.996	0.978	0.961	0.945	0.929	0.914	0.899	0.884
2100	1.126	1.103	1.081	1.060	1.040	1.021	1.002	0.984	0.966	0.950	0.933	0.918	0.902	0.888	0.874
2200	1.112	1.089	1.068	1.047	1.027	1.008	0.989	0.972	0.954	0.938	0.922	0.906	0.891	0.877	0.863
2300	1.098	1.076	1.055	1.034	1.014	0.995	0.977	0.959	0.943	0.926	0.910	0.895	0.880	0.866	0.852
2400	1.084	1.063	1.041	1.021	1.002	0.983	0.965	0.948	0.931	0.915	0.899	0.884	0.869	0.855	0.841
2500	1.071	1.049	1.028	1.008	0.989	0.971	0.953	0.936	0.919	0.903	0.888	0.873	0.858	0.844	0.831
2600	1.058	1.036	1.016	0.996	0.977	0.959	0.941	0.924	0.908	0.892	0.877	0.862	0.848	0.834	0.821
2700	1.044	1.023	1.003	0.983	0.965	0.947	0.929	0.912	0.896	0.881	0.866	0.851	0.837	0.823	0.810
2800	1.031	1.010	0.990	0.971	0.952	0.935	0.918	0.901	0.885	0.870	0.855	0.840	0.827	0.813	0.800
2900	1.018	0.998	0.978	0.959	0.940	0.923	0.906	0.890	0.874	0.859	0.844	0.830	0.816	0.803	0.790
3000	1.005	0.985	0.965	0.947	0.929	0.911	0.895	0.878	0.863	0.848	0.833	0.819	0.806	0.793	0.780