

Doymuş suyun bazı termofiziksel özellikleri için basit korelasyonlar

Mustafa GÜNEŞ*, Neslihan ÇOLAK-GÜNEŞ

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, 35100 Bornova, İzmir.

Geliş Tarihi (Received Date): 07.03.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 03.04.2018

Özet

Bu çalışmada, bilgisayar destekli hesaplama yazılımlarında kullanılmak üzere, 0.01-370°C sıcaklık aralığında doymuş suyun bazı termofiziksel özellikleri için basit korelasyonlar geliştirilmiştir. Çalışılan termofiziksel özellikler yoğunluk, sabit basınçta özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozitedir. Eğri uydurma işleminde en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Her bir termofiziksel özellik için seçilen korelasyonlar, geçerli olduğu sıcaklık aralığı, doğrusal korelasyon katsayısı, maksimum mutlak hata ve maksimum yüzde hata değerleriyle birlikte verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Doymuş su, termofiziksel özellik, eğri uydurma, bilgisayar destekli hesaplama.

Simple correlations for some thermophysical properties of saturated water

Abstract

In this study, simple correlations were developed for some thermophysical properties of saturated water at 0.01-370 °C temperature for use in computer-aided calculation software. Studied thermophysical properties are density, specific heat at constant pressure, heat transfer coefficient and dynamic viscosity. In order to fit the curves data, the least squares method has been applied. Correlations chosen for each thermophysical property have been given together with the valid temperature range, linear correlation coefficient, maximum absolute error, and maximum percent error.

* Mustafa GÜNEŞ, mgunes27@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7042-3605>

Neslihan ÇOLAK-GÜNEŞ, neslihan.colak78@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0868-0448>

Keywords: Saturated water, thermophysical property, curve fitting, computer aided calculation.

1. Giriş

Isı ve kütle transferini içeren pek çok proseste doymuş su kullanılır. Bu proseslerin ısı ve kütle transferi hesaplamaları için bilinmesi gereken özelliklerinin başında, suyun termofiziksel özellikleri gelir. Bu termofiziksel özellikler, sıcaklığa ve/veya basınca bağlı olarak (genellikle) tablo formatında literatürde [1-8] derlenmiş ve kullanıma sunulmuştur.

Sistemlerin tasarımı için yapılan hesaplamalarda gereken termofiziksel özellikler, hesap yapılan sıcaklık değeri tabloda yer alıyorsa doğrudan tablodan okunarak, yer almıyorsa bu sıcaklığa en yakın iki değer arasında doğrusal interpolasyon yapılarak belirlenir. Farklı sıcaklıklar için tekrarlı termofiziksel özellik okunması gereken durumlarda bu işlem, hem sıkıcıdır hem de pratik değildir. Bu durumda bilgisayar destekli hesaplama (BDH) yapmak kaçınılmaz olur.

Bilgisayar destekli hesaplamada termofiziksel özellik kullanımı farklı şekillerde yapılır. Bunlar içerisinde en yaygın olanları (i) bilgisayar programına veri girişinin kullanıcı tarafından klavyeden yapılması, (ii) veri dosyası hazırlanması, (iii) başkaları tarafından hazırlanmış bir termofiziksel özellik hesaplayıcı programdan yararlanılması veya (iv) önceden geliştirilmiş korelasyonların kullanılmasıdır. Bunlardan ilk yöntem, basit olmasına rağmen hesaplama işleminde ciddi bir zaman kaybına yol açtığından çok önerilmez. İkinci yöntem, her kullanıcının kendi tablosunu hazırlamasını ve bilgisayar programına entegre etmesini gerektirir. Bu durumda hem veri tablosunun hazırlanması hem de yazılıma entegrasyonu sıkıcı ve zahmetlidir. Üçüncü yöntem, hem ilgili programın (genellikle) satın alınmasını gerektirmesi hem de satın alınan bu programın geliştirilen yeni hesaplama yazılımıyla entegrasyonunda ortaya çıkan problemler nedeniyle çok rağbet görmez. Bu nedenle BDH için pek çok araştırmacı, termofiziksel özellikler için geliştirilmiş korelasyonları [9-18] kullanmayı tercih eder.

Güneş [11] tarafından yapılan çalışmada, 0-100 °C sıcaklık aralığında doymuş suyun termofiziksel özellikleri için korelasyonlar önerilmiştir. Bu çalışmada, BDH yazılımlarında kullanılmak üzere, 0.01-370 °C sıcaklık aralığında doymuş suyun bazı termofiziksel özellikleri için basit korelasyonlar geliştirilmiştir. Çalışılan termofiziksel özellikler yoğunluk(ρ), sabit basınçta özgül ısı(c_p), ısı iletim katsayısı(k) ve dinamik viskozite(μ)dir.

2. Veri ve yöntem

Doymuş su için sıcaklığa ve/veya basınca bağlı olarak literatürde [1-8] verilen termofiziksel özellik tabloları incelenmiş ve daha geniş sıcaklık aralığına sahip olması nedeniyle bu çalışmada; c_p , k , μ için Rohsenow ve arkadaşları [2] tarafından derlenen termofiziksel özellik verisi kullanılmıştır. Yoğunluk verisi ise Çengel ve Boles [8]'tan alınmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, termofiziksel özellik verisinden sıcaklık vektörü ($\{T_{ij}\}$) ve termofiziksel özellik matrisi ($[Y_{ij}]$) oluşturulmuştur. Burada i indisi sıcaklığı, j indisi ise termofiziksel özelliği gösterir. Çalışılacak özelliğe en uygun korelasyonun ilkel formunu belirlemek amacıyla, her bir termofiziksel özelliğin sıcaklığa göre değişen serpilme diyagramları çizilmiştir. Araştırılacak korelasyonun ilkel formunun belirlenmesinden sonra eğri uydurma işlemi, en küçük kareler yöntemini kullanan genel amaçlı bir bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır. Her bir termofiziksel özelliğe en uygun korelasyonun belirlenmesinde ise doğrusal korelasyon katsayısı(r), maksimum mutlak hata(MMH) ve maksimum yüzde hata(MYH) değerleri göz önüne alınmıştır. Bu değerlerden, doğrusal korelasyon katsayısı

$$r = \frac{n(\sum y_d y_c) - (\sum y_d)(\sum y_c)}{\sqrt{n(\sum y_d^2) - (\sum y_d)^2} \sqrt{n(\sum y_c^2) - (\sum y_c)^2}} \quad (1)$$

ifadesinden hesaplanır [19]. MMH ve MYH değerleri için kullanılacak denklemler ise (sırasıyla)

$$MMH = |y_d - y_c| \quad (2)$$

$$MYH = \frac{MMH}{y_d} 100 \quad (3)$$

şeklinde dir. Yukarıdaki denklemlerde n korelasyon katsayısının hesabında kullanılacak veri çiftinin sayısını, y_d gözönüne alınan sıcaklıktaki termofiziksel özellik datasını, y_c ise aynı sıcaklık için korelasyondan hesaplanan değeri gösterir.

3. Bulgular ve tartışma

Termofiziksel özelliklere eğri uydurma için yapılan ön çalışmada, göz önüne alınan termofiziksel özelliğe 0.01-370°C sıcaklık aralığında tek bir denklem uydurulmasının, özellikle MMH ve MYH değerlerinin yüksek çıkmasına yol açtığı görülmüştür. Bu hata değerlerini düşürebilmek için yapılan çalışma sonunda ρ ve k iki, μ üç, c_p ise dört alt sıcaklık aralığında incelenmiştir.

Doymuş suyun seçilen termofiziksel özellikleri için türetilen korelasyonlar, korelasyonun geçerli olduğu sıcaklık aralığı ve seçimde kullanılan 3 parametre (r, MMH ve MYH) ile birlikte Tablo 1'de özetlenmiştir. Burada MMH kolonundaki değerlerin birimi, ait olduğu özelliğin birimiyle aynı alınmalıdır.

Tablo 1. Doymuş suyun bazı termofiziksel özellikleri için türetilen korelasyonlar.

Korelasyon	Sıcaklık Aralığı (°C)	r	MMH	MYH (%)
<i>Yoğunluk</i> ρ [kg/m ³] $\rho = -0.0025T^2 - 0.1858T + 1002.4$ $\rho = -0.026T^2 + 13.821T - 1089$	$0 < T < 280$ $280 \leq T \leq 370$	0.9998 0.9962	2.400 13.495	0.252 2.986
<i>Sabit basınçta özgül ısı</i> c_p [kJ/(kg°C)] $c_p = 1E-05T^2 - 0.0013T + 4.2111$ $c_p = 0.0001T^2 - 0.0407T + 8.4398$ $c_p = 0.0017T^2 - 1.0208T + 159.42$ $c_p = 0.17T^2 - 120.21T + 21258$	$0 < T \leq 200$ $200 < T < 300$ $300 \leq T \leq 350$ $350 < T \leq 370$	0.9986 0.9989 0.9966 1.0000	0.146 0.463 0.598 0.600	3.244 8.407 7.231 3.936
<i>Isı iletim katsayısı</i> k [W/(m°C)] $k = (-0.0058T^2 + 1.6338T + 573.12)1E-3$ $k = (-0.0271T^2 + 15.473T - 1669.8)1E-3$	$0 < T \leq 300$ $300 < T \leq 370$	0.9991 0.9924	4E-3 13E-3	0.724 3.162
<i>Dinamik viskozite</i> μ [Ns/m ²] $\mu = (3.4894T^2 - 413.97T + 17181)1E-7$ $\mu = (0.1764T^2 - 67.246T + 7848.8)1E-7$ $\mu = (-4.0839T + 2115.5)1E-7$	$0 < T < 60$ $60 \leq T < 200$ $200 \leq T \leq 370$	0.9977 0.9963 0.9953	344E-7 181E-7 40E-7	4.725 5.013 7.173

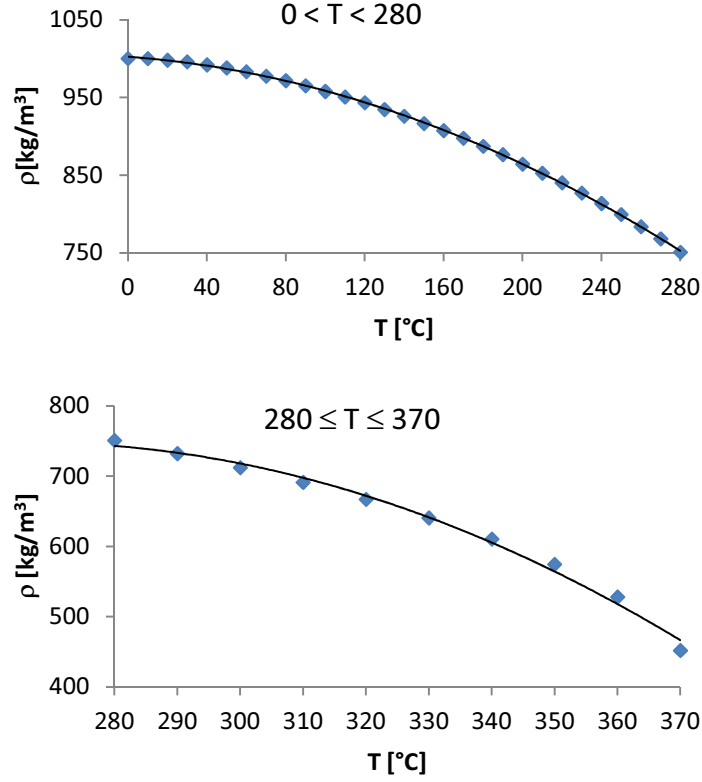
Termofiziksel özellik verisi ile korelasyonlardan hesaplanan değerler için bulunan r değerlerine göre bir değerlendirme yapıldığında, 4 termofiziksel özellik için önerilen 11 korelasyonun r değerinin 0.99 civarında olduğu görülmektedir.

Yoğunluk için türetilen korelasyonlardan hesaplanmış değerlerin veri ile karşılaştırılması Şekil 1’de verilmiştir. İlk korelasyon için MMH değeri 0.01°C’ta 2.4 kg/m³ olurken MYH değeri %0.252’dir ve 270°C değerine aittir. İkinci korelasyon için MMH ve MYH değerleri 370°C değerinde ortaya çıkmıştır ve (sırasıyla) 13.495 kg/m³ ve %2.986’dır.

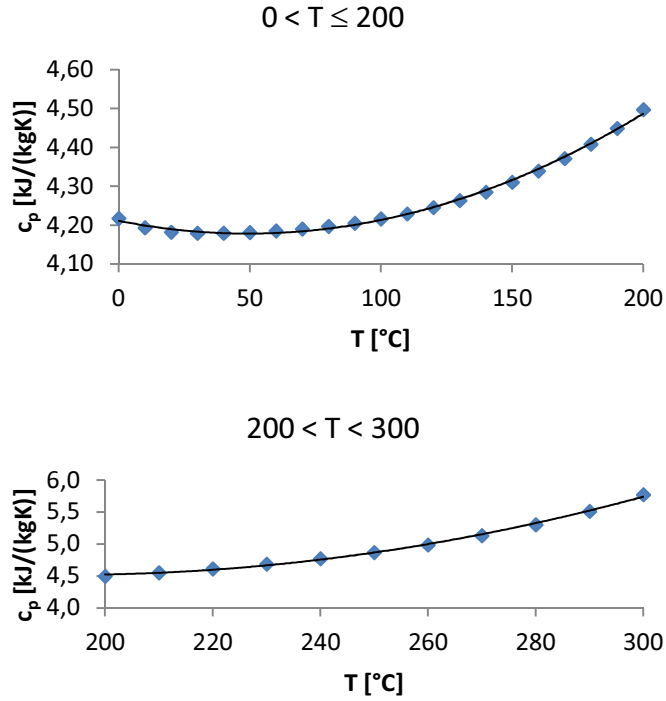
Dört alt sıcaklık aralığında geçerli olan sabit basınçta özgül ısı korelasyonlarının veri ile karşılaştırılması Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu korelasyonların MMH değerleri 0.146 ile 0.600 kJ/(kg°C) arasında değişirken, MYH değerlerinin %3.244 ile %8.407 arasında olduğu görülmüştür.

Şekil 3, ısı iletim katsayısı için türetilen korelasyonlardan hesaplanmış değerlerin veri ile karşılaştırılmasını gösterir. Türetilen ilk korelasyon 0.01-300°C aralığı için geçerlidir ve 0.01°C’da meydana gelen MMH ve MYH değerleri (sırasıyla) 4E-3 W/(m°C) ve %0.724’tür. İkinci korelasyonun MMH ve MYH değerleri (sırasıyla) 13E-3 W/(m°C) ve %3.162’dir ve 360°C değerine aittir.

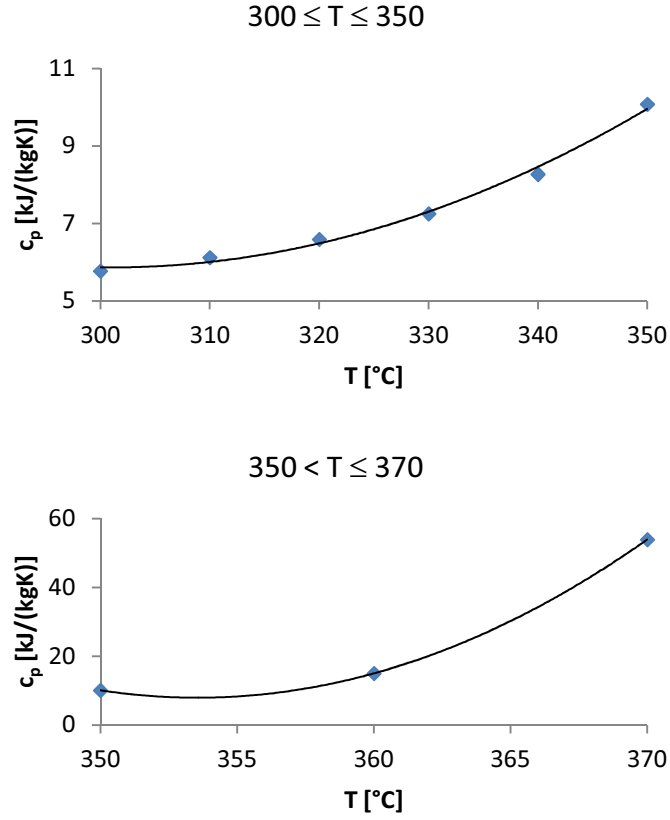
Dinamik viskozite için önerilen üç korelasyonun veri ile karşılaştırılması Şekil 4’te verilmiştir. Bu korelasyonların MMH değerleri (sırasıyla) 344E-7, 181E-7 ve 40E-7 Ns/m²; MYH değerleri ise (sırasıyla) %4.725, %5.013 ve %7.173’tür.



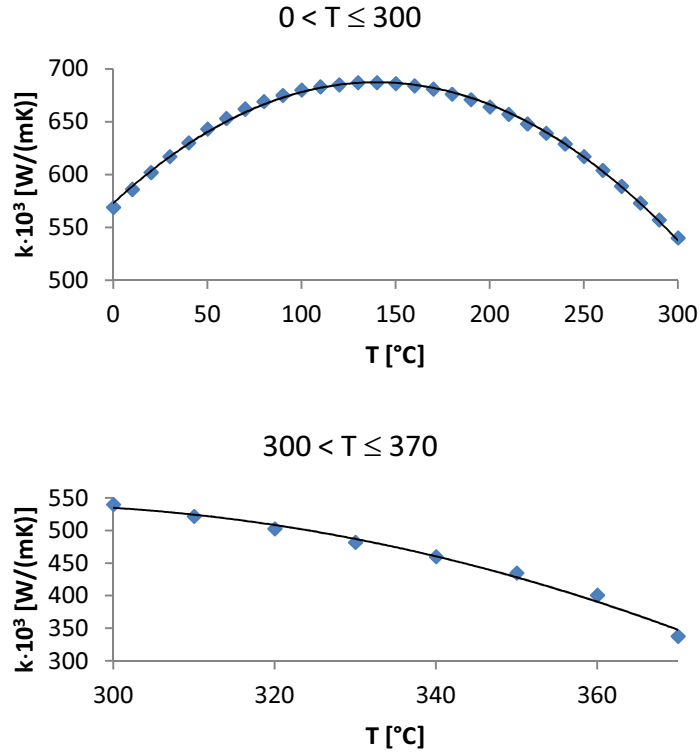
Şekil 1. Yoğunluk için türetilen korelasyonların veri ile karşılaştırılması (♦: veri, – korelasyon).



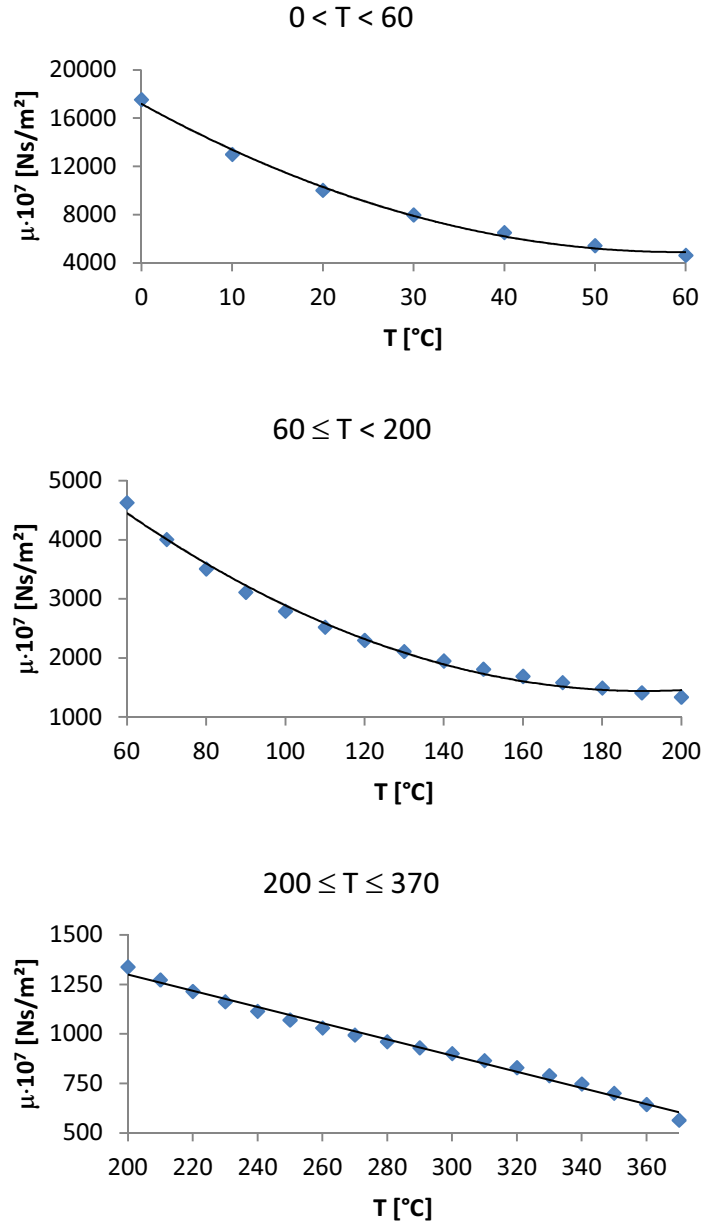
Şekil 2. Sabit basınçta özgül ısı için türetilen korelasyonların veri ile karşılaştırılması (♦: veri, – korelasyon)



Şekil 2. (Devam) Sabit basınçta özgül ısı için türetilen korelasyonların veri ile karşılaştırılması (♦: veri, – korelasyon).



Şekil 3. Isı iletim katsayısı için türetilen korelasyonların veri ile karşılaştırılması (♦: veri, – korelasyon).



Şekil 4. Dinamik viskozite için türetilen korelasyonların veri ile karşılaştırılması (♦: veri, – korelasyon).

4. Sonuç

Bu çalışmada, doymuş suyun 0.01-370°C sıcaklık aralığında yoğunluğunun, sabit basınçta özgül ısısının, ısı iletim katsayısının ve dinamik viskozitesinin; bilgisayar destekli hesaplama yazılımlarında kolaylıkla kullanılabilmesini sağlayacak basit korelasyonlar geliştirilmiştir. Korelasyonları kullanabilmek için yapılması gereken, hesaplama amacıyla kullanılan genel amaçlı matematik yazılımlarında veya geliştirilen özel amaçlı yazılımlarda, hesaplamanın yapılacağı satıra korelasyonları yazmaktır.

Seçilen dört termofiziksel özellik için önerilen 11 korelasyonun r değeri 0.99 civarındadır. MYH değerlerinin ise %0.252 ile %8.407 arasında olduğu görülmüştür.

Buna göre, BDH yazılımlarında kullanılmak için önerilen korelasyonlardan hesaplanan değerlerin literatürden alınan veri ile (kabul edilebilir bir hata sınırı içerisinde) uyumlu olduğu söylenebilir.

Burada verilen korelasyonlardan çalışılan sıcaklık için elde edilen değerler; ısı difüzyon katsayısı [$\alpha = k/(\rho c_p)$], kinematik viskozite [$\nu = \mu/\rho$] ve Prandtl sayısı [$Pr = c_p \mu/k$] hesabında da kullanılabilir. Böylece 0.01-370°C sıcaklık aralığında doymuş su için geliştirilen korelasyonlarla hesaplanabilecek toplam termofiziksel özellik sayısı yediye çıkacaktır.

Çalışmada elde edilen korelasyonlar, doymuş su için literatürde [11,12,14,15,18] verilenlerden daha basittir ve/veya daha geniş sıcaklık aralığı için geçerlidir. Bu korelasyonlar, doymuş suyun kullanıldığı (özellikle ısı ve kütle transferini içeren) pek çok prosesin tasarımı için yapılan BDH'lerde kolaylıkla kullanılabilir.

Semboller ve kısaltmalar

<i>BDH</i>	: Bilgisayar destekli hesaplama
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı [$\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$]
k	: Isı iletim katsayısı [$\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$]
<i>MMH</i>	: Maksimum mutlak hata
<i>MYH</i>	: Maksimum yüzde hata [%]
n	: Veri sayısı [-]
Pr	: Prandtl sayısı [-]
r	: Doğrusal korelasyon katsayısı [-]
$\{T_i\}$: Sıcaklık vektörü [$^\circ\text{C}$]
y_c	: Korelasyondan hesaplanan termofiziksel özellik değeri
y_d	: Termofiziksel özellik matrisinden alınan data
$[Y_{ij}]$: Termofiziksel özellik matrisi
α	: Isı difüzyon katsayısı [m^2/s]
μ	: Dinamik viskozite [Ns/m^2]
ν	: Kinematik viskozite [m^2/s]
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]

Kaynaklar

- [1] Eckert, E.R.G. ve Drake, M.R., **Analysis of Heat and Mass Transfer**, 777, McGraw-Hill, New York, (1972).
- [2] Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. ve Cho, Y.I., **Handbook of Heat Transfer (3rd Edition)**, 2.26-2.35, New York, (1988).
- [3] Raznjevic, K., **Handbook of Thermodynamic Tables (2nd Edition)**, Begell House, New York, (1995).
- [4] Incropera, F.P. ve Dewitt, D.P., **Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri (4. Basımdan Çeviri)**, 914-915, Literatür, İstanbul, (2001).
- [5] Çengel, Y.A., **Heat and Mass Transfer – A Practical Approach (3rd Edition)**, 854-855, McGraw-Hill, Singapore, (2006).

- [6] Kothandaraman, C.P., **Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Revised 3rd Edition)**, 709, New Age, New Delhi, (2006).
- [7] Wagner, W. ve Kretzschmar, H-J., **International Steam Tables (2nd Edition)**, Springer, Heidelberg, (2008).
- [8] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., **Termodinamik - Mühendislik Yaklaşımıyla (5. Basımdan Çeviri)**, 890-891, Güven Bilimsel, İzmir, (2008).
- [9] Lu, B.C.Y., Ruether, J.A. ve Chiu, C.H., Generalized Correlation of Saturated Liquid Densities, **Journal of Chemical & Engineering Data**, 18 (3), 241–243, (1973).
- [10] George, S.K., Density, Thermal Expansivity, and Compressibility of Liquid Water from 0° to 150°C: Correlations and Tables for Atmospheric Pressure and Saturation Reviewed and Expressed on 1968 Temperature Scale, **Journal of Chemical & Engineering Data**, 20 (1), 97–105, (1975).
- [11] Güneş, M., Su ve Havanın Bazı Termofiziksel Özellikleri İçin Korelasyonlar **Termodinamik**, 6 (67), 64-69, (1998).
- [12] Popiel, C.O. ve Wojtkowiak, J., Simple Formulas for Thermophysical Properties of Liquid Water for Heat Transfer Calculations (from 0°C to 150°C), **Heat Transfer Engineering**, 19 (3), 87-101, (1998).
- [13] Güneş, M., Correlations for Some Thermophysical Properties of Air, **Proceedings, 12th International Drying Symposium** (Noordwijkerhout-Netherlands), Paper no : 215, Elsevier, Amsterdam, (2000).
- [14] Wagner, W. and Pruß, A., The IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use, **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 31(2), 387-535, (2002).
- [15] Patek, J., Hruby, J., Klomfar, J. ve Souckova, M., Reference correlations for thermophysical properties of liquid water at 0.1 MPa, **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 3 (1), 21-29, (2009).
- [16] Mostafa H., Sharqawy, M.H., Lienhard V,J.H. ve Zubair, S.M., Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data, **Desalination and Water Treatment**, 16 (1-3), 354-380, (2010).
- [17] Li, C., Wu, X., Jia, W. and Sun, O., New correlations for water content of sweet and sour natural gases, **International Journal of Oil, Gas and Coal Technology**, 6(4), 392-407, (2013).
- [18] Daucik, K., Dooley, R.B., Release on the IAPWS formulation 2011 for the thermal conductivity of ordinary water substance, (2011). www.iapws.org/relguide/ThCond.html, (04.01.2018).
- [19] Triola, M.F., **Elementary Statistics (11th Edition)**, 520, Addison-Wesley, Boston, (2012).