

# PJ ve BYC Modellerine Göre Buharlaşıma Oluk Yüksekliği Hesaplama Algoritmalarının Karşılaştırılması

Samet Karakulah, Caner Arslan, Barış Babaoğlu, Mustafa Sungur  
TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN  
Ankara

[samet.karakulah\[\]](mailto:samet.karakulah@tubitak.gov.tr), [caner.arslan\[\]](mailto:caner.arslan@tubitak.gov.tr), [baris.babaoğlu\[\]](mailto:baris.babaoğlu@tubitak.gov.tr), [mustafa.sungur\[\]](mailto:mustafa.sungur@tubitak.gov.tr) [[@tubitak.gov.tr](mailto:@tubitak.gov.tr)]

**Özet:** Bu çalışmada; atmosferik parametreleri (rüzgâr hızı, hava ve deniz sıcaklığı, basınç ve bağıl nem) kullanarak buharlaşma oluk yüksekliği (BOY) hesaplayan iki farklı model incelenmiş ve MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu iki modelin, farklı atmosfer parametrelerine göre hesaplanan BOY değerleri literatürde geçen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, modellerin dayandığı meteorolojik olgular, teori ve algoritma yapıları özetlenmiştir.

**Abstract:** In this work; two models calculating evaporation duct height (edh) using atmospheric bulk parameters (wind speed, air and sea temperature, pressure and relative humidity) are examined. These models are implemented in MATLAB environment. Edh values are computed for different input parameters and compared with models given in literature. Theoretical details, meteorological facts, and algorithms behind these models are also summarized for completeness.

## 1. Giriş

Elektromanyetik (EM) dalgalar, atmosferde yayılırken kırılma indisinin ( $n$ ) yükseklikle değişimden ötürü dünya yüzeyine doğru bükülmeye başlar. Eğer bu bükülme dünyanın eğiminden daha fazla olursa EM dalgaları oluk içinde hapsolür ve ufuk ötesi yayılım yapabilirler. Oluk, EM dalga yayılımına etki eden önemli faktörlerden biridir. Deniz yüzeyi üzerinde düşük yüksekliklerde su buharının doymunluğa ulaşım nem oranının aniden düşmesi sonucu buharlaşma oluğu oluşur. BOY, kırılma indisinin dikey gradyanına bağılı olarak değişir. Bu kırılma indisi değeri 1'e çok yakın olduğu için ( $n$ ) yerine literatürde sıklıkla ölçeklenmiş kırılma ( $N$ ) ya da değiştirilmiş kırılma ( $M$ ) parametresi kullanılmaktadır. Bu parametreler ve aralarındaki ilişki denklem (1)'deki gibi ifade edilir [1]:

$$N = (n-1) \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \left( P + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1)$$
$$M = N + \frac{z}{10^{-6} r_e} \approx N + 0.157z$$

Burada  $T(K)$  sıcaklığı,  $P(hPa)$  atmosfer basıncını ve  $e(hPa)$  su buharı basıncını göstermektedir.  $r_e(m)$  dünyanın yarıçapını (6371000 m) ve  $z(m)$  deniz yüzeyinden yüksekliği belirtmektedir. BOY ( $z_d$ ),  $M$  profilinin değerinin minimum ve yüksekliğe bağılı türevinin sıfıra eşit olduğu yüksekliktir [1] ve denklem (2)'deki gibi tanımlanır:

$$\left[ \frac{\partial M}{\partial z} \right]_{z=z_d} = 77.6 \left[ \frac{d}{dz} \left( \frac{P}{T} \right) + 4810 \frac{d}{dz} \left( \frac{e}{T^2} \right) \right]_{z=z_d} + 0.157 = 0 \quad (2)$$

Denklem (2)'yi çözebilmek için sıcaklık, atmosfer basıncı ve su buharı basıncının yüksekliğe bağılı değişimleri hesaplanmalıdır. Bu çalışmada, sıcaklık, atmosfer basıncı ve su buharı basıncı değişimlerinin modellenmesi amacıyla Paulus ve Jeske tarafından geliştirilen PJ modeli ve Babin, Young ve Carton tarafından geliştirilen BYC hesaplama modeli gerçekleştirilip sonuçları karşılaştırılacaktır.

## 2. Paulus - Jeske (PJ) Modeli

PJ modeli 1973 yılında Jeske tarafından ortaya atılmış ve 1984 yılında Paulus'un güncellemesiyle oluşmuştur. AREPS yazılımı [2] da dâhil olmak üzere literatürde geniş çapta kullanılmış bir BOY hesaplama modelidir. PJ modeli, girdi olarak; deniz sıcaklığını, sabit 1000 hPa hava basıncını, 6 metre yükseklikteki hava sıcaklığını, bağılı nemi ve rüzgâr hızını kullanmaktadır [3]. PJ modeli denklem (1)'de belirtilen değerler yerine potansiyel kırılımı ( $N_p$ ), potansiyel sıcaklığı ( $\theta$ ) ve potansiyel su buharı basıncını ( $e_p$ ) kullanmaktadır. Potansiyel değerler, sabit 1000 hPa hava basıncı kullanılarak hesaplanmaktadır. Jeske'nin belirttiği üzere potansiyel kırılım korunumlu bir özellik

olduğundan benzerlik parametresi gibi davranmaktadır. Bu yüzden PJ modeli, Monin-Obukhov benzerlik (MOS) teorisine dayanmaktadır [1]. Bu sayede potansiyel kırılımın dikey değişimi benzerlik ifadeleri cinsinden ifade edilebilmektedir. PJ modeli, karmaşık türbülans denklemlerini çözmek yerine ampirik modellere dayalı yaklaşımlar kullanmaktadır. Düşük rüzgâr hızlarında (< 1 m/s) MOS teorisi geçerli sonuçlar vermemektedir. Maksimum oluk yüksekliği 40 metre olacak şekilde sınırlandırılmıştır [3].

## 2.1. Monin – Obukhov Benzerlik (MOS) Teorisi

1946 yılında Obukhov ve 1954 yılında Monin'in katkılarıyla geliştirilen bu teori, literatürde mikro meteorolojinin başlangıç noktası kabul edilmektedir. Buharlaştırma oluşu yüzey katmanı ile sınırlı olduğundan BOY modelleri MOS teorisine dayanmaktadır [4]. Yüzey katmanı, yüzeyden ortalama 100 metre yüksekliğe kadar olan bölgedir. MOS teorisi, deniz yüzey katmanı içerisinde oluşan türbülans ve akı gibi atmosferik etkileri modellemeye çalışır. Yarı ampirik bir teoridir ve parametreleri deneysel olarak belirlenir. BOY hesaplama modelleri, MOS teorisini farklı şekillerde kullanmaktadır. Bu teoriye göre; potansiyel sıcaklığın ve nemin dikey gradyan profilleri ( $\partial\theta/\partial z$  ve  $\partial q/\partial z$ ) kararlılık parametresi olarak tanımlanan ( $\zeta=z/L$ ) cinsinden ifade edilir [4]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial\theta}{\partial z} &= \frac{\theta_*}{kz} \varphi_h(\zeta) \\ \frac{\partial q}{\partial z} &= \frac{q_*}{kz} \varphi_h(\zeta)\end{aligned}\quad (3)$$

Bu denklemlerde  $z$  yüksekliği,  $L$  Monin - Obukhov (MO) uzunluğunu ve  $k$  (=0.4) von Karman sabiti olarak tanımlanır.  $\theta_*$  ve  $q_*$  sırasıyla sıcaklık ve nem için ölçekleme parametrelerini ve  $\varphi_h$  sıcaklık ve nem için tanımlanan evrensel fonksiyonu belirtmektedir.  $L$ 'nin negatif/pozitif değerleri için atmosfer kararsız/kararlı olarak tanımlanmaktadır. Hava sıcaklığı deniz sıcaklığından küçük ise kararsız, büyük ise kararlı atmosfer olarak ifade edilir. Sıcaklık ve nemin dikey profilleri denklem (3)'te verilen ifadelerin çözümü ile bulunur [4]:

$$\begin{aligned}\theta(z) &= \theta(0) + \frac{\theta_*}{k} \left[ \ln \frac{z}{z_{o\theta}} - \psi_h(\zeta) \right] \\ q(z) &= q(0) + \frac{q_*}{k} \left[ \ln \frac{z}{z_{oq}} - \psi_h(\zeta) \right]\end{aligned}\quad (4)$$

Bu denklemlerde  $z_{o\theta}$  ve  $z_{oq}$  sırasıyla sıcaklık ve nem için pürüzlülük yükseklikleri (m),  $\theta(0)$  deniz sıcaklığı,  $q(0)$  yüzey doyum nemi,  $\psi_h$  sıcaklık ve nem için integral fonksiyonudur. Buradan elde edilen nem profilinden denklem (2)'de kullanılmak üzere su buharı basıncı hesaplanmaktadır. Denklem (3) ve (4)'te belirtilen parametreler MO parametreleri olarak adlandırılmaktadır. İntegral fonksiyonları ile evrensel fonksiyonlar arasındaki ilişki denklem (5)'teki gibi tanımlanmaktadır [4]:

$$\psi(\zeta) = \int_0^{\zeta} \frac{1 - \varphi(\xi)}{\xi} d\xi \quad (5)$$

## 3. Babin – Young – Carton (BYC) Modeli

BYC modeli Babin, Young ve Carton tarafından 1997 yılında geliştirilen bir BOY hesaplama modelidir ve MOS teoriye dayanmaktadır. BYC modelinde, türbülans denklemleri PJ modelinde kullanılan ampirik teknikler yerine analitik yöntemlerle bulunmaktadır. Bu parametreler, sıcaklık ve nem akılarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu akılardan da oluk yüksekliğini hesaplamak için gerekli MOS profilleri denklem (3), (4) ve (5)'te belirtildiği gibi hesaplanmaktadır [1]. BYC modelinde kullanılan TOGA COARE algoritması sayesinde MO parametreleri daha doğru bir şekilde hesaplanmaktadır. Düşük rüzgâr hızlarında yapılan düzeltme ile MOS teorisinin geçerliliği artırılmıştır [1]. Atmosfer basıncının dikey gradyanını hesaplamak için barometrik formül kullanılmaktadır. Buna göre basınç yükseklikle üstel olarak azalmaktadır. Hesaplanan hava sıcaklığı, hava basıncı ve su buharı basıncı profillerine göre BOY iteratif olarak bulunur. Yani seçilen bir yükseklik için denklem (2)'nin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Denklem sağlanmıyorsa bir sonraki yükseklik seçilir. Denklem (2)'yi sağlayan yükseklik BOY olarak tanımlanır [1].

### 3.1. TOGA COARE Algoritması

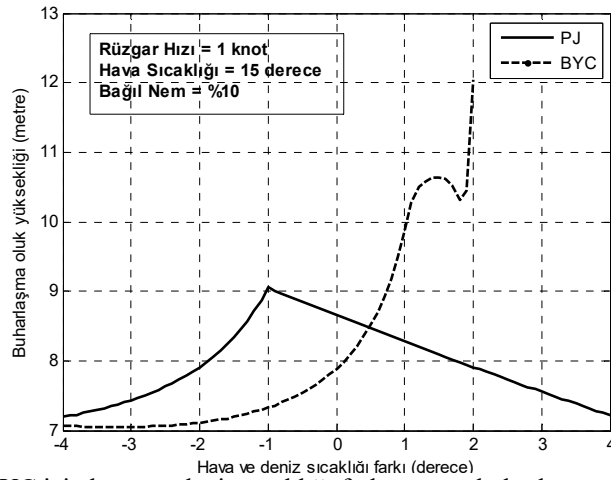
TOGA COARE algoritması 1996 yılında Fairall vd. tarafından geliştirilmiştir. Çalışmalarına 1992 yılında başlanmış olup Pasifik okyanusunda yaklaşık 10000 saatlik meteorolojik ölçümler sonucunda tamamlanmıştır. Atmosferik parametreler (rüzgâr hızı, sıcaklık, basınç, nem vb.) kullanılarak yüzey akı değerleri ve MO parametreleri daha doğru hesaplanmaktadır. Rüzgâr hızı, hava ve deniz sıcaklığı, basınç, nem ve ölçüm yüksekliği girdi olarak alınmaktadır. Ölçekleme parametreleri ( $\theta^*$  ve  $q^*$ ), pürüzlülük yükseklikleri ( $z_{0\theta}$  ve  $z_{0q}$ ) ve MO uzunluğu ( $L$ ) çıktı olarak verilmektedir [5].

### 4. Numerik Sonuçlar

Bölüm 2 ve 3'te belirtildiği şekilde PJ ve BYC modelleri, MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Farklı girdi değerleri için bu iki model tarafından hesaplanan BOY değerleri, PJ makalesindeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. **Tablo 1.**'de açıklandığı üzere, gerçekleştirilen PJ modeli sonuçları ile PJ makale sonuçları %1'den düşük hata ile uyusmaktadır. **Şekil 1.**'de görüldüğü üzere, kararsız atmosferik durumlarda BYC modelinde hesaplanan BOY değerleri, PJ modelindeki değerlere göre daha düşük çıkmıştır. Kararlı durumlarda ise; hava ile deniz sıcaklığı arasındaki fark arttıkça PJ modelinde BOY değerlerinin düştüğü, BYC modelinde BOY değerlerinin hızlı arttığı ve belirli bir sıcaklık farkından sonra BOY değerlerinin hesaplanmadığı görülmektedir. BYC modeli, analitik yöntemler kullandığı ve MO parametreleri üzerinde düzeltmeler yaptığı için, bu model sonuçlarının deneysel sonuçlarla PJ modeline göre daha iyi uyacağı değerlendirilmektedir. Literatürde, kararlı durumlar için oluk yüksekliğini doğru şekilde hesaplayabilecek algoritma geliştirme çalışmaları hâlen devam etmektedir.

**Tablo 1.** Farklı girdi parametreleri için gerçekleştirilen PJ ve BYC modellerine göre oluk yüksekliklerinin karşılaştırılması

Girdiler					Sonuçlar		
Hava sıcaklığı (°C)	Deniz sıcaklığı (°C)	Atmosfer Durumu	Bağıl nem (%)	Rüzgâr hızı (knots)	PJ Makale BOY (m)	MATLAB-PJ BOY(m)	MATLAB-BYC BOY (m)
0	16	Kararsız	10	20	17.3	17.3204	13.53
15	15	Stabil	10	1	8.7	8.657	6.19
15	16	Kararsız	75	1	3.8	3.7917	2.96
30	15	Kararlı	75	20	13.9	13.8787	-



**Şekil 1.** PJ ve BYC için hava ve deniz sıcaklığı farkına göre buharlaşma oluk yükseklikleri

### Kaynaklar

- [1]. Babin S. M., Young G. S., ve Carton J. A., "A New Model of the Oceanic Evaporation Duct," J. Applied Meteorology, s.194-197, 1997.
- [2]. www.public.navy.mil/SPAWAR/PACIFIC/55480/PAGES/NewinAREPS.aspx AREPS Ver. 3.6.01.39, 2006
- [3]. Paulus A.R., "Specification for Evaporation Duct Height Calculations", Technical Document 1596, Naval Ocean Systems Center, July 1989.
- [4]. Ivanov V. K., et al., "Determination of the Evaporation Duct Height from Standard Meteorological Data," Atmospheric and Oceanic Physics, s.36-37, 2006.
- [5]. Fairall C. W., et al., "Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment," J. Geophys. Res., 101, 3747-3764. 1996.