



DOĞU KARADENİZ HAVZASINDA MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE DEBİ SÜREKLİLİK EĞRİLERİNİN MODELLENMESİ

MODELING OF FLOW DURATION CURVES USING MATHEMATICAL METHODS IN THE EASTERN BLACK SEA BASIN

Fatih SAKA¹

Menar ACLUNİ²

Ömer YÜKSEK³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1577087>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
sakafatih@hotmail.com.

Geliş Tarihi
(Received)
31.10.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
29.05.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
02.06.2025

Öz

Su mühendisliği çalışmalarında debi tahmini kritik olup, Debi süreklilik eğrileri (DSE) hidrolojide önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak, sadece akım gözlem istasyonlarında doğrudan oluşturulabiliyorken, ölçüm eksikliği olan veya ölçümü bulunmayan bölgelerde DSE tahminle oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, DSE'nin Doğu Karadeniz Havza'sında matematiksel yöntemlerle bölgeselleştirme ile tahmini yapılmıştır. Havzadaki 39 adet akım gözlem istasyonu debi verileri ile meteoroloji istasyonlarının sıcaklık ve yağış verileri kullanılmıştır.

DSE'nin genel şekline uyumu açısından logaritmik ve ekspanansiyel denklemler kullanılarak her istasyonun %0-100 aşılma olasılıklarına karşılık gelen debi verileri analiz edilmiş ve regresyon katsayıları hesaplanmıştır. Ekspanansiyel denklemde tahminin standart hata değerinin 0,312 ile logaritmik olandan daha iyi sonuç verdiği, her bir istasyon için bulunan denklemlerde belirlene katsayısının 0,869 ile logaritmik denklemlerden daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca DSE'nin şekline uygunluğu da göz önüne alınarak ekspanansiyel seçilmiş ve denklem katsayıları istasyonların topoğrafik ve iklimsel özellikleriyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca katsayısının drenaj alanı ve ortalama yıllık toplam yağış değerleriyle tahmin edilebildiği iki farklı denklem, be katsayısının drenaj alanı, drenaj yoğunluğu, akarsu drenaj ağının ortalama eğimi ve ortalama yıllık toplam yağış değerleriyle tahmin edilebildiği beş farklı denklem bulunmuştur. Çalışma sonucunda, havza özellikleri ile elde edilecek ve be katsayıları yardımıyla, Doğu Karadeniz Havza'sındaki herhangi bir noktada, DSE'nin genel şeklini tahmin edebilmemize imkân sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Debi Süreklilik Eğrisi, Doğu Karadeniz Havzası, Regresyon analizi.

Abstract

In hydrological studies related to water engineering, flow estimation plays a critical role, with flow duration curves (FDC) widely used as a key analytical tool. However, FDC can only be directly constructed at streamflow gauging stations with sufficient data; in regions with limited or no measurements, they must be estimated. This study estimates FDC through regionalization using mathematical methods in the Eastern Black Sea Basin. Streamflow data from 39 gauging stations, along with temperature and precipitation data from meteorological stations within the basin, were utilized.

To capture the general shape of the FDC, logarithmic and exponential equations were applied to flow values corresponding to exceedance probabilities ranging from %0-100. Regression coefficients were calculated for each station. The exponential model yielded superior results, with a lower standard error of estimation (0,312) and a higher coefficient of determination (0,869) compared to the logarithmic model. Based on its better conformity to the overall FDC shape, the exponential model was selected. Its coefficients were then related to the topographic and climatic characteristics of stations. Two equations were developed to estimate the coefficient *ae* using drainage area and mean annual precipitation, while five equations were derived to estimate the coefficient *be* based on drainage area, drainage density, average stream slope, and mean annual total precipitation. The results demonstrate that the general shape of FDC at any location within the Eastern Black Sea Basin can be predicted using basin characteristics and the estimated *ae* and *be* coefficients.

Keywords: Flow Duration Curve, Eastern Black Sea Basin, Regression analysis.

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
sakafatih@karabuk.edu.tr.

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.
mnoora2011@gmail.com.

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye.
yuksekk@ktu.edu.tr.

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında, özellikle hidroelektrik santrallerde, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve su kalitesi çalışmaları büyük önem taşımaktadır (LeBoutillier & Waylen, 1993; Sivapalan ve ark., 2003). Bu bağlamda, araştırmacılar ve mühendisler tarafından su kaynaklarının uzun vadeli değerlendirilmesinde kritik bir araç olarak debi süreklilik eğrileri (DSE) kullanılmakta olup, DSE hidrolojik sistemlerin değişken akış rejimlerini analiz etme ve sürdürülebilir kullanım stratejilerini geliştirme açısından temel bir rol oynamaktadır (Karimi ve ark., 2021). DSE'ler, belirli bir akarsu havzasındaki günlük, aylık veya diğer zaman aralıklı akarsu akımlarının aşıldığı zaman yüzdelerini (%10, %20 vb.) gösteren bir grafiklerdir (Castellarin ve ark., 2004; Vogel & Fennessey, 1994). Bu haliyle bir tek debi değerini değil, debi değişimini görebilmeye imkân tanımaktadır (Naito & Parker, 2019). DSE, su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde kullanışlı bilgiler vermektedir (Vogel & Fennessey, 1995). Hidroelektrik potansiyelin değerlendirilmesinde (Eshra ve ark., 2021), taşkın analizinde (Seçkin & Topçu, 2016), ağaçlandırmanın hidrolojik etkilerinde (Lane ve ark., 2005; Tsuruta ve ark., 2020), nehirlerde çökelti birikmesinde (Naito & Parker, 2019), su kalitesi yönetiminde (Morrison & Bonta, 2008; Yi ve ark., 2025), akarsu akımlarının zaman serisi çalışmalarında (Sanchez Lozano ve ark., 2025) düşük (Orta & Aksoy, 2022; V. U. Smakhtin, 2001; Zhao ve ark., 2021) ve yüksek akarsu akımlarının çalışılmasında (Sarigil ve ark., 2024), akarsu taban akımı tahmininde (F. S. Demir & Sevimli, 2022; V. Demir & Tona, 2021) ve su temini (Müller ve ark., 2014) gibi su kaynaklarının planlamasında ve tasarımlarında DSE önemli bir planlama metodudur. Dünyada; Filipinler (Ibarra ve ark., 2021; Quimpo ve ark., 1983), Yunanistan (Mimikou & Kaemaki, 1985; Niadas, 2005; Tzoraki, 2020), Kanada (Khaliq, 2020; LeBoutillier & Waylen, 1993), İtalya (Franchini & Suppo, 1996; Tarpanelli & Domeneghetti, 2021), Güney Afrika (V. Y. Smakhtin ve ark., 1997), Hindistan (Dey ve ark., 2024; Singh ve ark., 2001), Tayvan (Yu ve ark., 2002), Portekiz (Croker ve ark., 2003), ABD (Fennessey & Vogel, 1990; Ridolfi ve ark., 2018), Fransa (Sauquet & Catalogne, 2011), Yeni Zelanda (Booker & Snelder, 2012), Romanya (Tănase & Petre, n.d.), İran (Kazemi & Porhemmat, 2018), Japonya (Tsuruta ve ark., 2020), Güney Kore (Kim ve ark., 2017; Yi ve ark., 2025) ve Çin (Lan ve ark., 2025; Luan ve ark., 2021; Ma ve ark., 2024) gibi ülkelerde DSE'nin bölgeselleştirilmesi çalışmaları yapılmıştır. DSE tahmininde yapay sinir ağları (Ley ve ark., 2023), ters mesafe ağırlığı (Göğsu & Özgür Hastaoğlu, 2019), basit Tyler beceri puanı (Goodarzi & Vazirian, 2023) ve adım adım regresyon (Sajjad ve ark., 2024) metodlarının klasik yöntemlere ek olarak kullanıldığı da görülmüştür. DSE'nin yetersiz veya eksik verilere sahip olan havzalarda, istatistiksel yöntemler kullanılarak bölgeselleştirme analizleriyle tahmin edilebilmesi mümkündür (Luan ve ark., 2021). Bu kapsamda, maksimum yağış miktarlarındaki değişiklikler incelendiğinde (Seçkin & Topçu, 2016), su debilerindeki değişimler de analiz edilmektedir. Akarsu debilerinin havza karakteristikleri ilişkileri regresyon analizleri ile değerlendirilebilir (Ghotbi ve ark., 2020). Su kaynakları araştırmalarında kullanılan havza özellikleri, topografik ve iklimsel (meteorolojik) olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yüzeysel akış üzerinde etkili olan tipik topografik veriler; drenaj alanı, havza eğimi, akarsu uzunluğu, akarsu sayısı, ortalama akarsu eğimi, akarsu ve drenaj yoğunluğunu değişkenleri olarak sayılabilir (Saka & Yüksek, 2017).

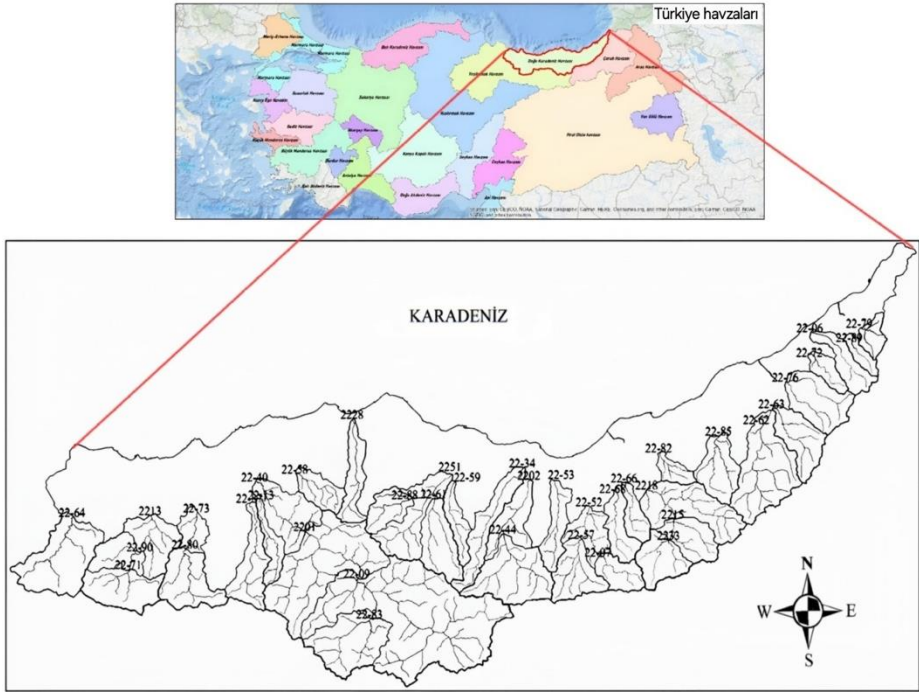
Doğu Karadeniz Havzası, zengin su kaynakları, biyolojik çeşitliliği ve ekolojik önemi ile yüksek yağış potansiyeli nedeniyle farklı bir öneme sahiptir (Zengin ve ark., 2017). Ayrıca, havza yağış alanı büyüklüğünde 2023 yılında havzalar içinde, 11. sırada olmasına rağmen, ortalama yıllık akışta 16.4 km^3 değeriyle Fırat-Dicle'den hemen sonra gelmektedir. Bu haliyle potansiyel iştirak oranı %9.2 olarak 2. sırada yer almasıyla (Devlet Su İşleri, 2024), su kaynakları açısından da önemi anlaşılmaktadır. Çalışmamızda, havzadaki herhangi bir akarsu noktasındaki DSE'nin havza özellikleri kullanılarak tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Böylece havzada planlanacak su kaynakları planlama aşamalarında bir ön değerlendirme sağlayacağı düşünülmüştür. Havzada DSE'nin modellenmesi çalışmaları matematiksel yöntemler ile DSE'nin genel şeklinin tahmini şeklinde planlanmıştır. Havzadaki akım gözlem istasyonlarına (Metin girmek için buraya tıklayın veya dokunun.AGİ) ait drenaj alanları ve akarsu kolları çizilmiş, her bir AGİ'ye ait ortalama yıllık toplam yağış miktarı, ortalama sıcaklık değeri, ortalama akarsu eğimi ve drenaj yoğunluğu gibi havza özellikleri belirlenmiştir. Doğu Karadeniz Havzası verileri kullanılarak regresyon analizleri ile bölgeselleştirme yapılmıştır. Farklı aşılma olasılığına sahip debileri gösteren DSE şeklinin havza karakteristikleri ile ilişkilendirilerek ölçüm bulunmayan veya az olan noktalara ait DSE'lerin tahmini yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı

Doğu Karadeniz Havzası'nın toplam yağış alanı 22846 km^2 'dir (Devlet Su İşleri, 2024), Türkiye'nin kuzeydoğu kesiminde $40^{\circ}15'-41^{\circ}34'$ kuzey enlemleri ile $36^{\circ}43'-41^{\circ}35'$ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Kuzeyde Karadeniz, doğuda Kaçkar Dağları, güneyde Yamanlı, Soğanlı, Kemer, Iğdır Dağları, batıda Çarşamba Ovası'nın doğusuna kadar uzanan bu havza, alan olarak Türkiye'nin %2,92'sini teşkil etmektedir. Doğu Karadeniz Havzası'nın yıllık ortalama yağış yüksekliği 1198 mm ; yıllık ortalama akışı ise $566,23 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, n.d.).

Doğu Karadeniz Havzası 22. Bölge sınırları içinde yer almakta olup, batıda 22-64 istasyonundan doğuda 22-79 istasyonuna kadar olan AGİ'leri kapsamaktadır. AGİ'lerin olduğu çalışma alanı, toplamda 17143 km^2 alana sahiptir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma Bölgesinde Bulunan 39 Adet AGİ'nin Drenaj Havzaları ve Akarsu Kolları

2.2. Hidrolojide DSE

DSE'nin ilk kullanımı, yaklaşık olarak 1880 yılında Clemens Herschel'e atfedilmektedir (Fennessey & Vogel, 1990) özellikle de, 1915 yılından beri hidrolojide genel bir kullanıma sahiptir (Searcy, 1959). DSE, belirli bir akarsu akımının, belirli bir yerdeki ele alınan bir zaman diliminde gözlemlendiği veya aşıldığı zaman yüzdelelerini gösteren bir eğridir (Ghotbi ve ark., 2020; Saka & Yüksek, 2017).

DSE elde edilirken, debiler büyüktürden küçüğe dizilerek düzenlenir (LeBoutillier & Waylen, 1993; Vogel & Fennessey, 1994), sonrasında aşılma olasılığı hesaplanır. Her bir debinin aşılma ihtimali, Weibull (1939)'un aşağıdaki denklem ile bulunabilir (V. Demir & Tona, 2021; Saka & Törehan Babacan, 2019).

$$p=m/(N+1)$$

m: Sıraya dizilmiş debilerin (sıra numarasını)

N: Toplam veri sayısıdır

İki tür DSE'den bahsedilebilir: tüm akım kayıtlarının DSE'si ve yıllık DSE (LeBoutillier & Waylen, 1993; Vogel & Fennessey, 1994). Yıllık DSE, yıllık akış rejimi değişimlerini, özellikle ıslak veya kuru bir hidrolojik yılda meydana gelen değişimleri yakalamak için faydalıdır (Vogel & Fennessey, 1994).

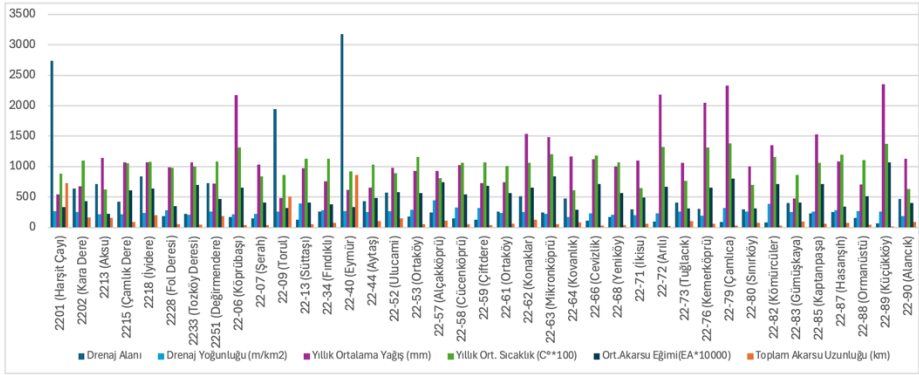
Ölçümü bulunan havzaların parametrelerini kalibre etmek ve ardından akış ve DSE'yi tahmin etmek için parametreleri, ölçümü olmayan havzalara aktarmak popüler bir yaklaşımdır (Kim ve ark., 2017). Başka bir yaklaşımda, olasılıksal (örneğin, log-normal, kappa veya gama dağılımları) veya matematiksel (üssel, logaritmik veya polinom fonksiyonları gibi) fonksiyonlar DSE'ye uyarlanır (Palizban ve ark., 2025). Bu çalışmada yıllık DSE'lerin matematiksel denklemlerle tahmini yapılmıştır.

2.3. Kullanılan Veriler

Çalışmada, 10 yıllık veri ölçümü bulunan, yıllık değerlerinde kopukluk olmayan 39 AGİ belirlenmiş ve bu istasyonların günlük ortalama akım ölçümleri (m^3/sn), Devlet Su İşleri (DSİ)'den temin edilmiştir. Bu verilerde baraj yapımı sebebiyle homojenliğin bozulmadığına dikkat edilerek, en yeni verilerden eskiye doğru toplamda 10 yıllık veri seçilmiştir. 1/25000 ölçekli standart topoğrafik haritalar NetCAD kullanılarak konumlandırılmış, 39 AGİ'ye ait havzaların drenaj alanları ve akarsu kolları belirlenmiş, Thiessen poligonları elde edilmiştir. Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden yağış ve sıcaklık verileri 5 yıldan daha uzun olan istasyonların verileri temin edilerek, çalışmada 30 adet gözlem istasyonu kullanılmıştır. Her bir AGİ'nin toplam akarsu uzunlukları (L_{top}), drenaj alanları (A), drenaj yoğunluğu (Y_d), ortalama eğimleri (E_a), yıllık ortalama sıcaklık (S_{ort}), ortalama yıllık toplam yağış (Y_{top}) değerleri belirlenerek çoklu regresyon analizinde kullanılmıştır. Bu değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 1'de, AGİ'lere göre değerleri ise Şekil 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Çoklu Regresyon Bağımsız Değişkenlerinin Tanımlayıcı İstatistikleri

	A, km^2	Y_{top}, mm	S_{ort}, C°	L_{top}, km	$Y_d, m/km^2$	$E_a, \%$
N	39	39	39	39	39	39
Aralık	3104,4	1883,91	7,68	839,61	279,1	8,506
Min.	68,5	471,87	6,1	17,72	167,2	2,205
Maks.	3172,9	2355,78	13,78	857,33	446,3	10,711
Ortalama	484,9641	1126,5667	10,16	123,5476	260,0872	5,34274
Std. Sapma	668,9295	496,85954	2,09107	178,00083	56,781	1,84305



Şekil 2. İstasyonlara Ait Çalışmada Kullanılan Havza Karakteristikleri

2.4. DSE'nin Matematiksel Fonksiyonlarının Belirlenmesi

DSE'nin genel şekline uygun olan matematiksel fonksiyonlardan eksponansiyel ve güç eğrileri denklemleri kullanılabilir (Quimpo ve ark., 1983). Eksponansiyel denklemle yazılırsa, regresyon denklemini genel şekli (1) denklemdir.

$$\hat{Q} = a_e \cdot \exp(-b_e \cdot x) \quad (1)$$

Burada, a_e : Debinin aşılma olasılığı en düşük olan başlangıç değerini b_e : Debinin aşılma olasılığı ile değişimini gösteren eksponansiyel katsayılarını, x : Aşılma olasılığını ve $\hat{Q}$: Regresyon modeli kullanılarak tahmin edilen, aşılma olasılıklarına karşılık gelen debi değerlerini temsil etmektedir.

Logaritmik dönüşüm yapılarak çalışmada kullanılan diğer denklem genel şekli (2)'de görülmektedir.

$$\hat{Q} = a_l + b_l \cdot \ln x \quad (2)$$

Burada, a_l, b_l : Logaritmik dönüşümle regresyon denklemi katsayılarıdır.

2.5. Çoklu Regresyon Denklemleri ile Parametrelerin Bölgeselleştirilmesi

Bölgeselleştirme analizinin yapılabilmesi amacıyla, bölgedeki 39 AGİ'nin coğrafi ve iklimsel özellikleri kullanılmıştır. Eksponansiyel fonksiyon katsayıları 39 AGİ'nin havza özellikleriyle ilişkilendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, öncelikle basit regresyonlar denenmiştir. En basit ifade edilebilen denklemler daha kullanışlı olsa da, çalışmada korelasyonu artıracak ve hataları daha da düşürebilecek olması düşünülerek, çoklu regresyon denklemleri de oluşturulmuştur. Çoklu regresyon modelinin genel şekli, a_e değişkeninin ilişkileri için kullanılan denklemin genel şekli (3) aşağıda görülmektedir. b_e değişkeninin ilişkileri için kullanılan denklemin genel şekli ise (4) denklemi ile verilmiştir.

$$\widehat{a_e} = b_0 + b_1 \cdot A + b_2 \cdot L_{top} + b_3 \cdot Y_d + b_4 \cdot E_a + b_5 \cdot Y_{top} + b_6 \cdot S_{ort} + e \quad (3)$$

Burada,

$\widehat{a_e}$: a_e parametresinin regresyon denklemi ile tahmin edilen değeri

b_0 : Sabit terimi

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$: Çoklu doğrusal regresyon denklem katsayıları

e : Modelin stokastik bileşeni olan ve modele dahil edilmeyen değişkenleri ifade eden hata terimidir

$$\widehat{b_e} = c_0 \cdot A^{c_1} \cdot L_{top}^{c_2} \cdot Y_d^{c_3} \cdot E_a^{c_4} \cdot Y_{top}^{c_5} \cdot S_{ort}^{c_6} \quad (4)$$

Burada,

$\widehat{b_e}$: b_e parametresinin regresyon denklemi ile tahmin edilen değeri

c_0 : Sabit terimi

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$: Çoklu eğrisel regresyon denklem katsayıları.

2.6. Regresyon Hatalarının Hesaplanması

Çalışmada, elde edilen regresyon ilişkilerinin başarısında, belirleme katsayısına ek olarak meydana gelen hatalar da ele alınmıştır. Tablo 4 ve 5'te yer alan rölatif hata değerleri hesaplanırken (5) denklemi kullanılmış ve daha sonra ortalama değerleri belirlenmiştir.

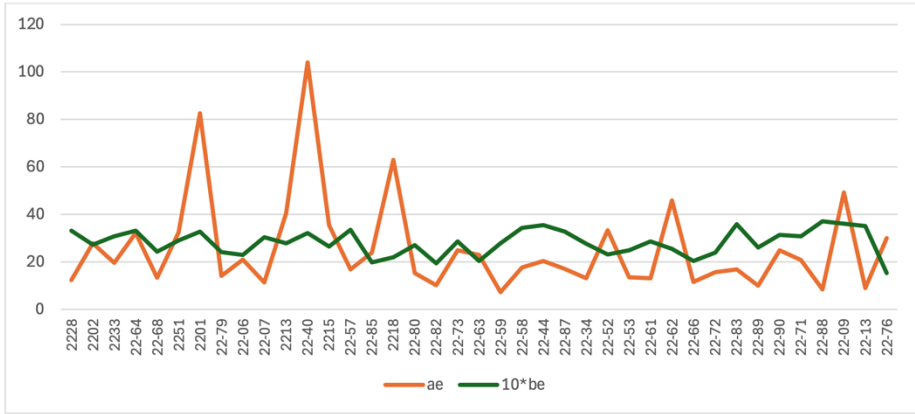
$$\%R.H. = \frac{|Q - \hat{Q}|}{Q} 100 \quad (5)$$

Burada, Q : ölçülmüş akım değeri, $\hat{Q}$: tahmin edilmiş olan akım değeri.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

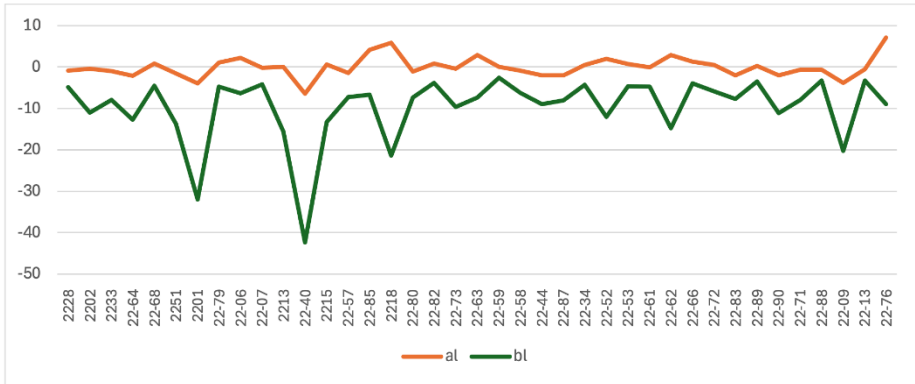
3.1. Matematiksel Yöntemlerle Tahmin Edilen DSE'ler

(1) ve (2) numaralı denklemlerle verilen ilişkiler havzada bulunan tüm istasyonlarda araştırılarak, regresyon ilişkilerinin katsayıları elde edilmiştir. Öncelikle, %0-%100 aşılma olasılığı aralığındaki debi değerleri eksponansiyel denkleme göre regresyon eşitlikleri bulunmuş ve elde edilen a_e ve b_e katsayıları Şekil 3'te (b_e katsayı değişiminin daha anlaşılır olması açısından 10 ile çarpılmış hali çizdirilmiştir) verilmiştir. a_e katsayısı 7,22 ile 103,94 arasında değişiklik göstermiş, ortalaması 25,70 ve standart sapması 20,23 olarak belirlenmiştir. Bu katsayının, %95 güven aralığı alt sınırı 19,14, üst sınırı ise 32,25 olarak bulunmuştur.



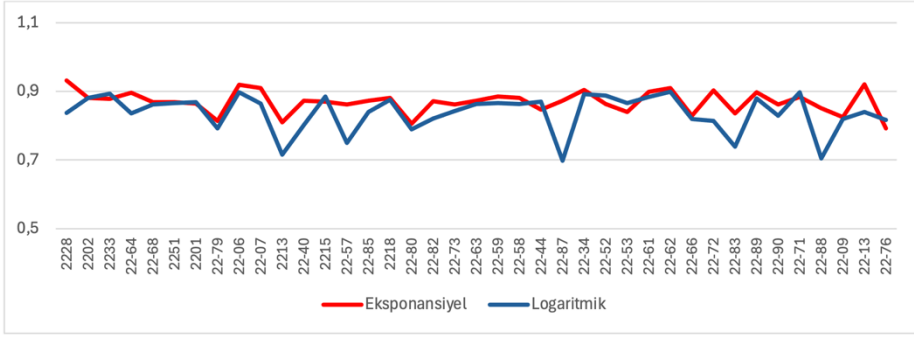
Şekil 3. Eksponansiyel Dönüşümle İstasyon Numaralarına Göre a_e ve b_e Katsayıları

Daha sonra, %0-%100 aşılma olasılığı aralığındaki debi değerlerinin logaritmik denkleme göre regresyon eşitlikleri bulunmuş ve elde edilen a_l ve b_l katsayıları Şekil 4'te verilmiştir.



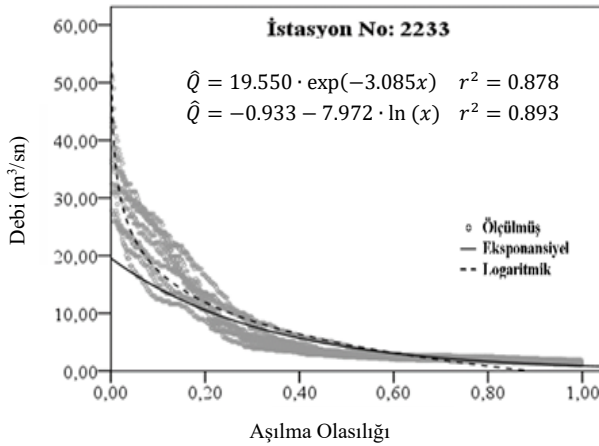
Şekil 4. Logaritmik Dönüşümle İstasyon Numaralarına Göre a_l ve b_l Katsayıları

Bu iki denklem sistemleriyle, her AGİ için elde edilen denklemlerin belirleme katsayıları (r^2) Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Ekspansiyonel ve Logaritmik Dönüşümlerle İstasyon Numaralarına Göre Belirleme Katsayısı (r^2) Değerleri

Elde edilen denklem belirleme katsayılarına bakıldığında, ekspansiyonel denklemlerin ortalamasının 0,869, logaritmik denklemlerin ortalamasının 0,837 olduğu ve ekspansiyonel değerlerinin genelde daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Çalışma alanındaki 39 adet istasyondan logaritmik dönüşümde daha yüksek değer veren 2233 (yeni gösterimle: E022A033) numaralı istasyona ait oluşturulan DSE'ler ve denklemler aşağıdaki şekilde görülmektedir. Eski gösterimdeki 2233 gösteriminde, 22 bölge numarasını 33 ise istasyon numarasını ifade etmektedir. Yine eski gösterimde 22 ile 33 arasında çizgi olmadığında Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından kurulan istasyonları göstermekteydi. Eğer arada çizgi varsa DSİ tarafından kurulan istasyonları ifade ediyordu. 2233 istasyonu 1296 m kotunda ve 223,1 km² alana sahiptir.

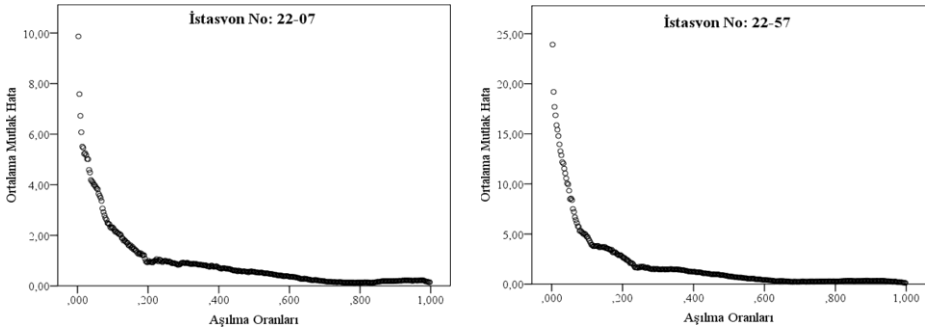


Şekil 6. 2233 Numaralı İstasyonun %0-100 Aşılma Olasılığına Sahip 10 Yıllık Günlük Ortalama Akımlarıyla Uygulanan Regresyon Denklemleri.

Şekil 6'ya dikkat edilirse, düşük aşılma olasılıklarında ekspansiyonel denklemin uyumda eksiklikleri olduğu söylenebilir. Ancak logaritmik denklem ile elde edilen grafik değerlerinin, yaklaşık 0,83 gibi bir değerden sonra, sıfır değeri verdiği ve özellikle DSE'nin uç bölgesini modellemekte başarısız olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmamızda hem belirleme katsayı ortalamasının daha yüksek olması hem de genel şeklini ifade etmekteki uygunluğu sebebiyle eksponansiyel denklem tercih edilmiştir.

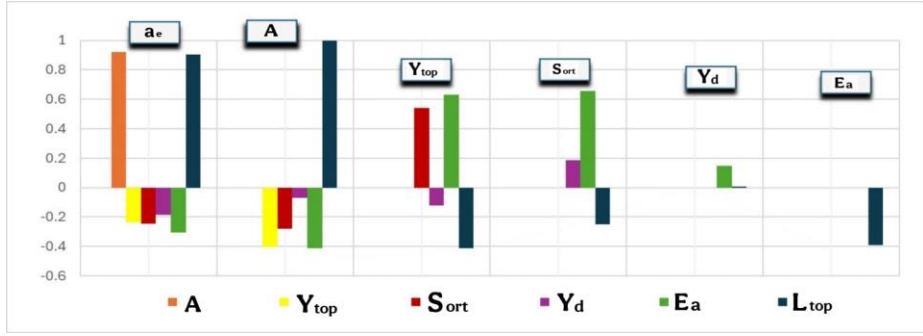
Çalışma alanındaki 39 adet istasyondan, örnek olarak seçilen 22-07 (yeni gösterimle: D022A007) ve 22-57 (yeni gösterimle: D022A057) numaralı istasyonların eksponansiyel fonksiyonlarına ait, aşılma olasılıklarına karşılık gelen ortalama mutlak hata değerlerinin değişimi Şekil 7'de gösterilmektedir. 22-07 istasyonu 1114 m kotunda ve 154,7 km² alana sahiptir. 22-57 istasyonu 650 m kotunda ve 242,6 km² alana sahiptir.



Şekil 7. %0-%100 Aşılma Olasılıklarındaki Debilerin, Eksponansiyel Denkleme Göre Hesaplanan Ortalama Mutlak Hataları.

Şekil 7 incelendiğinde, özellikle aşılma olasılığının düşük olduğu yüksek akım tahminlerinde denklemin hatasının fazla olduğu görülmektedir. Şekil 6'daki yüksek debi değerlerinin diğer debilerden fark göstermesiyle oluşan bu durumun sebebini göstermektedir. Başlangıçta gözlenen bu hatalar, ortalama hata değerini de etkilemektedir.

Daha sonra a_e ve b_e katsayılarının havzanın özellikleri ile modellenmesi amacıyla regresyon çalışmaları yapılmıştır. a_e katsayısının önce diğer havza parametreleriyle olan korelasyon değerleri incelenmiştir (Şekil 8). Basit regresyon kurulması amacıyla incelendiğinde A değeriyle 0,920 (Tablo 2) korelasyon değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Ancak çoklu regresyon denklemleri ile tahminin standart hatasının daha da düşürülüp düşürülemeyeceği araştırılmış ve Tablo 2'de görülen L_{top} ve Y_{top} değişkenlerinin eklenmesiyle elde edilen çoklu korelasyon katsayılarının daha yükseldiği ve tahminin standart hatalarının düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 8. $a_{e,0-100}$ Parametresi ve Bağımsız Değişkenler Arasındaki Kısmi Korelasyon Değerleri

Tablo 2. Çoklu Regresyon $a_{e,0-100}$ Parametresinin

Modelde kullanılan parametreler	A	A, L_{top}	A, L_{top}, Y_{top}
Korelasyon katsayısı	,920	,933	,942
Belirleme katsayısı	0,846	0,87	0,887
Tahminin Standart Hatası	8,032925	7,501908	7,09304

Ancak Tablo 3'teki çoklu doğrusal ilişki istatistiklerine bakıldığında, küçük tolerans değeri ve yüksek varyans artış faktörü ($VAF > 10$) ile A ve L_{top} değerleri arasında bir problem olduğu görülmüştür. Bu problemin varlığını doğrulamak için Şekil 8'deki karşılaştırmalar tekrar kontrol edilmiştir. A ve L_{top} arasındaki korelasyon katsayısının 0,996 değeri ile çok yüksek bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin birbirinden bağımsız olması gerekliliğinden dolayı, bu bağımsız değişkenlerden birinin modelden çıkarılması gerekmiştir.

Tablo 3. $a_{e,0-100}$ Parametresi İçin Çoklu Regresyon Katsayıları.

Model	Sabit	A	Sabit	A	L_{top}	Sabit	A	L_{top}	Y_{top}
Katsayılar	b	12,204	0,028	11,218	0,08	-0,197	3,88	0,077	-0,179
	Std. Hata	1,596	0,002	1,54	0,021	0,078	3,512	0,02	0,074
b için 95,0% Güven Aralığı	Alt Sınır	8,971	0,024	8,094	0,038	-0,355	-3,25	0,037	-0,329
	Üst Sınır	15,438	0,032	14,342	0,122	-0,039	11,011	0,117	-0,028
Çoklu Bağlantı İstatistikleri	Tolerans	1				0,008	0,008		0,008
	VAF	1				129,618	129,618		130,255

Bu aşamada A değerinin havzayı tarif etmekte daha anlamlı olduğuna karar verilerek L_{top} değerleri regresyon eşitliğinde olmadan yapılmasının daha doğru olduğu

değerlendirilmiş, tekrar regresyon denklemleri incelenmiş ve Tablo 4’de görülen katsayılar elde edilmiştir.

Tablo 4. a_e Katsayısına Ait Çoklu Regresyon Denklemi Nihai Sonuçları.

$\widehat{a_e} = b_0 + b_0A + b_0Y_{top}$		
	$ae,0-100$	
	(a)	(b)
b_0	12,20442	3,92451
b_1	0,02782	0,02977
b_2	-	0,00651
R^2	0,846	0,868
$RH_{ort} (\%)$	28,21	24,45

b_e katsayısı 1,541 ile 3,715 arasında değişmektedir, ortalaması 2,82 ve standart sapması 0,54 olarak belirlenmiştir. Bu katsayının %95 güven aralığı alt sınırı 2,64, üst sınırı ise 2,99 olarak belirlenmiştir. b_e değişkeninin bağımsız değişkenler arasındaki en yüksek korelasyonunun Y_{top} değeriyle olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, oluşturulan regresyon denkleminin çoklu belirleme katsayısı 0,364 (Tablo 5-(c) denklemi) ve Durbin Watson katsayısı 1,478 olarak hesaplanmıştır. Durbin Watson değerinin 2 değerine yakınlığı otokorelasyon olmadığı ve denklemin kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 5’te görüleceği üzere, b_e değişkenini regresyon analizinde çoklu belirlilik katsayılarının artırılması amacıyla basit eğrisel ilişki ve çoklu ilişkiler de dikkate alınmıştır. En yüksek belirleme katsayısı 0,505 olarak bulunmuştur.

Tablo 5. b_e Katsayısına Ait Çoklu Regresyon Denklemi Sonuçları.

		Denklem	R^2	$RH_{ort} (\%)$
$b_{e,0-100}$	(a)	$24,894 \cdot Y_{top}^{-0,3167}$	0,400	13,6
	(b)	$3,27629 + 0,00102Y_d - 0,00064Y_{top}$	0,375	14,2
	(c)	$3,55632 - 0,00066Y_{top}$	0,364	14,4
	(d)	$41,7815 \cdot A^{-0,0626} \cdot E_a^{-0,224} Y_{top}^{-0,2875}$	0,497	12,2
	(e)	$19,059 \cdot A^{-0,0528} \cdot Y_d^{0,1037} E_a^{-0,2342} Y_{top}^{-0,2628}$	0,505	12,2

4. İRDELEME VE SONUÇLAR

Her bir istasyona uygulanan basit eğrisel regresyon analizlerinde, %0-%100 aşılma olasılığına karşılık gelen debiler için fonksiyonların ortalama belirleme katsayıları logaritmik dönüşümde 0,837, eksponansiyel dönüşümde ise 0,869 olarak hesaplanmıştır. Eksponansiyel denklemin genel şeklinin ve özellikle uç noktaları ifade etmekteki başarısının daha iyi olduğu görülmüştür. Tahminin standart hatası ortalaması, logaritmik dönüşüm için 4,13, eksponansiyel dönüşüm için ise 0,312 değerleri bulunmuştur. Bu nedenlerle, eksponansiyel denklemin havza karakteristikleriyle daha iyi bir uyum sağladığı tespit edilmiş ve bu fonksiyonun parametreleri kullanılarak DSE'nin daha güvenilir modellenebileceğine karar verilmiştir.

a_e katsayısının %0-%100 aşılma olasılığı aralığında (7,221-103,945) değişmektedir ve ortalama 25,696 olarak belirlenmiştir. b_e katsayısı ise 1,541 ile 3,715 arasında değerler alırken, ortalaması 2,816 olarak hesaplanmıştır. a_e katsayısının çoklu regresyon denklemleri sonuçlarına göre, rölatif hataların şu şekilde değiştiği gözlemlenmiştir: (a) denklemi için rölatif hata, (%0,14-%118,1) değişmesiyle, ortalaması %28,21'dir. (b) denklemi için ise rölatif hatalar (%0,75 -%111,69) a değişmekte, ortalaması %24,45'tir.

Basit eğrisel regresyon metotları kullanılarak eksponansiyel dönüşümün uygulandığı farklı aşılma olasılığı aralıklarındaki mutlak hata ortalamaları incelendiğinde, düşük aşılma olasılığı olan ekstrem debi değerlerinde yüksek mutlak hata değerlerinin ortaya çıktığı dikkat çekmektedir. Aşılma olasılığı büyüdüğünde (düşük debilerde), daha doğru bir yaklaşım elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu sebeple aşılma olasılığının %10-%100, %20-%100, %30-%100 ve %50-%100 gibi aralıklarında eksponansiyel dönüşümün daha etkili olacağı düşünülmektedir.

Drenaj alanı ile toplam akarsu uzunluğu arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiş ve regresyon analizinde, daha etkili bir parametre olan drenaj alanı kullanılmıştır. Basit eğrisel denklemin bir değişkeni olan a_e 'nin havza özellikleriyle yapılan çoklu regresyon denklemleri ele alındığında; a_e değişkeninin havza alanı ve yıllık toplam yağış ile daha güçlü bir ilişkisi olduğu bulunmuştur. İki farklı model belirlenmiş ve çoklu belirleme katsayıları (0,702-0,868) değişmektedir. Drenaj alanının regresyon denklemindeki etkisinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Hata kareleri toplamı ifade edilen hatalarda bir azalma olmasına karşın, toplam kareler toplamını ve regresyon kareleri toplamını ifade eden toplam regresyonda bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, çoklu belirleme katsayısında daha düşük sonuçlar elde edilmesine yol açmıştır. Bu, hataların arttığı anlamına gelmez, ancak regresyon denkleminin açıkladığı kısmın oranının daha düşük olduğunu gösterir. b_e katsayısının belirlenmesi için yıllık ortalama toplam yağış değerinin aşılma olasılığı önemlidir. Bu değere, drenaj alanı, drenaj yoğunluğu ve akarsuların ortalama eğiminin de etki ettiği anlaşılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: 2008.112.001.5) tarafından desteklenmiştir. Yazarlar olarak, özellikle DSİ ve MGM çalışanlarına yardımlarından dolayı teşekkür ediyoruz.

Yazarların Katkısı

Yazarlar, çalışmaya eşit şekilde katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Booker, D. J., & Snelder, T. H. (2012). Comparing methods for estimating flow duration curves at ungauged sites. *Journal of Hydrology*, 434–435, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.031>
- Castellarin, A., Galeati, G., Brandimarte, L., Montanari, A., & Brath, A. (2004). Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 27(10), 953–965. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.08.005>
- Crocker, K. M., Young, A. R., Zaidman, M. D., & Rees, H. G. (2003). Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 427–439. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.427.45287>
- Demir, F. S., & Sevimli, V. F. (2022). Investigation of Base Flow Reserve in Konya Closed Basin. 2 nd Advanced Engineering Days.
- Demir, V., & Tona, A. U. (2021). Debi-Sürek Eğrisi Yardımıyla Taban Akımının Hesaplaması: Samsun Kürtün Irmağı Örneği. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.916024>
- Devlet Su İşleri. (2024, December). DSİ 2023 Yılı Resmi Su Kaynakları İstatistikleri. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1916>
- Dey, P., Mathai, J., Sivapalan, M., & Mujumdar, P. P. (2024). On the regional-scale variability in flow duration curves in Peninsular India. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(7), 1493–1514. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1493-2024>
- Eshra, N. M., Zobaa, A. F., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Assessment of mini and micro hydropower potential in Egypt: Multi-criteria analysis. *Energy Reports*, 7, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.165>
- Fennessey, N., & Vogel, R. M. (1990). Regional Flow-Duration Curves for Ungauged Sites in Massachusetts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4).
- Franchini, M., & Suppo, M. (1996). Regional Analysis of Flow Duration Curves for a Limestone Region. *Water Resources Management*, 10, 199–218.
- Ghotbi, S., Wang, D., Singh, A., Blöschl, G., & Sivapalan, M. (2020). A New Framework for Exploring Process Controls of Flow Duration Curves. *Water Resources Research*, 56(1). <https://doi.org/10.1029/2019WR026083>

- Göğsu, S., & Özgür Hastaoğlu, K. (2019). Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yönteminde Güç Fonksiyonu Etkisinin İncelenmesi (17).
- Goodarzi, M. R., & Vazirian, M. (2023). A geostatistical approach to estimate flow duration curve parameters in ungauged basins. *Applied Water Science*, 13(9). <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01993-4>
- Ibarra, D. E., David, C. P. C., & Tolentino, P. L. M. (2021). Technical note: Evaluation and bias correction of an observation-based global runoff dataset using streamflow observations from small tropical catchments in the Philippines. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2805–2820.
- Karimi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., & Heydari, M. (2021). Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. *Acta Geophysica*, 69(1), 285–293.
- Kazemi, R., & Porhemmat, J. (2018). Investigating the effect of hierarchical clustering methods on accurately modeling of runoff coefficient in Karkheh Basin. *Watershed Engineering and Management*, 10(1), 81–94.
- Khalik, M. (2020). Assessment of Canada's hydrokinetic resources : A review of hydrologic considerations. National Research Council Canada = Conseil national de recherches Canada.
- Kim, D., Jung, I. W., & Chun, J. A. (2017). A comparative assessment of rainfall-runoff modelling against regional flow duration curves for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5647–5661.
- Lan, T., Zhang, J., Li, H., Zhang, H., Gong, X., Sun, J., Chen, Y. D., & Xu, C. Y. (2025). Flow duration curve prediction: A framework integrating regionalization and copula model. *Journal of Hydrology*, 647. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132364>
- Lane, P. N. J., Best, A. E., Hickel, K., & Zhang, L. (2005). The response of flow duration curves to afforestation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.006>
- LeBoutillier, D. W., & Waylen, P. R. (1993). A stochastic model of flow duration curves. *Water Resources Research*, 29(10), 3535–3541. <https://doi.org/10.1029/93WR01409>
- Ley, A., Bormann, H., & Casper, M. (2023). Intercomparing LSTM and RNN to a Conceptual Hydrological Model for a Low-Land River with a Focus on the Flow Duration Curve. *Water (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/w15030505>
- Luan, J., Liu, D., Lin, M., & Huang, Q. (2021). The construction of the flow duration curve and the regionalization parameters analysis in the northwest of China. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6), 2639–2653. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.324>

- Ma, L., Liu, D., Luan, J., Ming, G., Meng, X., & Huang, Q. (2024). Connecting flow duration curve and precipitation duration curve based on the relationship deduced from machine learning in the watersheds of northern China. *Journal of Hydrology*, 635. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131235>
- Mimikou, M., & Kaemaki, S. (1985). Regionalization of flow duration characteristics. *Journal of Hydrology*, 82(1), 77–91. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90048-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90048-4)
- Morrison, M. A., & Bonta, J. V. (2008). Development of Duration-Curve Based Methods for Quantifying Variability and Change in Watershed Hydrology and Water Quality.
- Müller, M. F., Dralle, D. N., & Thompson, S. E. (2014). Analytical model for flow duration curves in seasonally dry climates. *Water Resources Research*, 50(7), 5510–5531. <https://doi.org/10.1002/2014WR015301>
- Naito, K., & Parker, G. (2019). Can Bankfull Discharge and Bankfull Channel Characteristics of an Alluvial Meandering River be Cospecified From a Flow Duration Curve? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(10), 2381–2401. <https://doi.org/10.1029/2018JF004971>
- Niadas, I.A. (2005). Regional flow duration curve estimation in small ungauged catchments using instantaneous flow measurements and a censored data approach. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), 48–66.
- Orta, S., & Aksoy, H. (2022). Development of Low Flow Duration-Frequency Curves by Hybrid Frequency Analysis. *Water Resources Management*, 36(5), 1521–1534.
- Palizban, P., Zahraie, B., & Dolatabadi, N. (2025). Estimation of standardized flow Duration curve for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 653. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132787>
- Quimpo, R., Alejandrino, A., & McNally, T. (1983). Regionalized Flow Duration Curves for Philippines. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce - Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, 109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1983\)109:4\(320\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1983)109:4(320))
- Ridolfi, E., Kumar, H., & Bárdossy, A. (2018). A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-347>
- Sajjad, H. W., Waseem, M., Arshed, A. B., Abbasi, A. H., Laraib, M., & Khalid, O. (2024). Flow Duration Curve Estimation at Ungauged Basin Using Regionalization Approaches. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4185382/v1>
- Saka, F., & Törehan Babacan, H. (2019). Discharge Estimation by Drainage Area Ratio Method at Some Specific Discharges for 2251 Stream Gauging Station in East Black Sea Basin, Turkey. *Journal of Investigations on Engineering & Technology (JIET)*, 2(1).

- Saka, F., & Yüksek, Ö. (2017). Regionalisation of discharges having certain exceedance probabilities and Eastern Black Sea Basin sample. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 335–342. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322154>
- Sanchez Lozano, J. L., Rojas Lesmes, D. J., Romero Bustamante, E. G., Hales, R. C., Nelson, E. J., Williams, G. P., Ames, D. P., Jones, N. L., Gutierrez, A. L., & Cardona Almeida, C. (2025). Historical simulation performance evaluation and monthly flow duration curve quantile-mapping (MFDC-QM) of the GEOGLOWS ECMWF streamflow hydrologic model. *Environmental Modelling and Software*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106235>
- Sarigil, G., Cavus, Y., Aksoy, H., & Eris, E. (2024). Frequency curves of high and low flows in intermittent river basins for hydrological analysis and hydraulic design. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(8), 3079–3092. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02732-0>
- Sauquet, E., & Catalogne, C. (2011). Comparison of catchment grouping methods for flow duration curve estimation at ungauged sites in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2421–2435. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2421-2011>
- Searcy, J. K. (1959). Flow-Duration Curves Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques. United States Government Printing Office.
- Seçkin, N., & Topçu, E. (2016). Adana ve çevre illerde gözlenen yıllık maksimum yağışların bölgesel frekans analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 1049–1062. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278460>
- Singh, R. D., Mishra, S. K., & Chowdhary, H. (2001). Regional Flow-Duration Models for Large Number of Ungauged Himalayan Catchments for Planning Microhydro Projects. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(4), 310–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:4\(310\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:4(310))
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J. J., Mendiola, E. M., O'Connell, P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., & Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857–880. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147–186. www.elsevier.com/locate/jhydrol
- Smakhtin, V. Y., Hughes, D. A., & Creuse-naudin, E. (1997). Regionalization of daily flow characteristics in part of the Eastern Cape, South Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 42(6), 919–936. <https://doi.org/10.1080/02626669709492088>

- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (n.d.). Retrieved May 11, 2025, from <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=150>
- Tănase, I., & Petre, C. (n.d.). A Regionalization Method of Flow Duration Curve for Estimating Streamflow in Ungauged Catchments.
- Tarpanelli, A., & Domeneghetti, A. (2021). Flow duration curves from surface reflectance in the near infrared band. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083458>
- Tsuruta, K., Kosugi, Y., Katsuyama, M., Kosugi, K., Suzuki, M., & Tani, M. (2020). Long-term effects of evapotranspiration on the flow duration curve in a coniferous plantation forest over 40 years. *Hydrological Research Letters*, 14(1), 1–8. <https://doi.org/10.3178/hrl.14.1>
- Tzoraki, O. (2020). Operating Small Hydropower Plants in Greece under Intermittent Flow Uncertainty: The Case of Tsiknias River (Lesvos). *Challenges*, 11(2), 17. <https://doi.org/10.3390/challe11020017>
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1994). Flow-Duration Curves. I: New Interpretation And Confidence Intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4).
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1995). Flow Duration Curves II: A Review of Applications in Water Resources Planning. *Water Resources Bulletin*, 31(6).
- Yi, S., Yoon, J., Lee, C., Lee, S., Ji, J., Lee, E., & Yi, J. (2025). Advancing flow duration curve prediction in ungauged basins using machine learning and deep learning. <https://doi.org/10.5194/hess-2024-355>
- Yu, P.-S., Yang, T.-C., & Wang, Y.-C. (2002). Uncertainty Analysis of Regional Flow Duration Curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(6), 424–430. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128, 6\(424\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128, 6(424)).
- Zengin, M., Kurtoğlu, O., Şengül, H., & Çakmak, E. (2017). Impact Of Run-Of-River Hydropower Plants Operation On Aquatic Ecosystem And Trout (*Salmo Labrax*) Population in The Eastern Black Sea Region. *Turkish Journal of Aquatic Sciences*, 189–207. <https://doi.org/10.18864/tjas201718>
- Zhao, W., Guan, X., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, L., & Mamer, E. A. (2021). Development of flow-duration-frequency curves for episodic low streamflow. *Advances in Water Resources*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104021>