



SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması: Kırıkkale Örneği

Drought Investigation Using SPI and SPEI Methods: A Case Study in Kırıkkale

Gaye Aktürk¹, Utku Zeybekoğlu², Osman Yıldız²

^{1,3}Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, Türkiye
²Sinop Üniversitesi, Boyabat Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Boyabat, 57200 Sinop, Türkiye

Başvuru/Received: 09/04/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Kuraklık, çeşitli sosyal ve çevresel etkileri olan en önemli doğal afetlerden biridir. Bu nedenle, kuraklığı izlemek için özellikle uygun bir indis seçmek çok önemlidir. Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) kuraklık izlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yarı kurak özelliklere sahip Kırıkkale ilinde kuraklığın gelişimini ve özelliklerini incelemek amacıyla SPI ve SPEI yöntemleri kullanılarak kuraklık analizi yapılmıştır. Kırıkkale meteoroloji istasyonundan 1963-2018 yılları arasında aylık yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI ve SPEI değerleri hesaplanmıştır. SPEI hesaplamasında potansiyel evapotranspirasyon (PET) değerleri hesaplanırken Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılmış ve iki farklı SPEI değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasında yüksek korelasyon değerleri elde edilmiştir. SPI ve SPEI yöntemlerinin çalışma alanında kuraklığın tespiti ve izlenmesinde uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır

Anahtar Kelimeler

“Kuraklık, SPI, SPEI, Thornthwaite Metodu, Hargreaves Metodu”

Abstract

Drought is one of the most important natural disasters with various social and environmental effects. Therefore, it is very important to choose a particularly suitable index for monitoring drought. Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) are widely used in drought monitoring. In this study, drought analysis was carried out using SPI and SPEI methods in order to examine the development and characteristics of drought in the city of Kırıkkale, which has semi-arid characteristics. SPI and SPEI values were calculated on 1, 3, 6, 9 and 12-month time scales by using monthly precipitation and temperature data from Kırıkkale meteorology station between 1963 and 2018. While calculating the potential evapotranspiration (PET) values in the SPEI calculation, Thornthwaite and Hargreaves models were used and two different SPEI values were obtained. As a result, high correlation values were obtained between all indices in the same time scale. It has been concluded that SPI and SPEI methods are applicable in the detection and monitoring of drought in the study area.

Key Words

“Drought, SPI, SPEI, Thornthwaite Method, Hargreaves Method”

1. Giriş

İklim değişikliği genel olarak, iklimin ortalama durumunda ya da onun değişkenliğinde onlarca ya da daha uzun yıllar boyunca süren istatistiksel olarak anlamlı değişimler olarak tanımlanabilir. Son yıllarda iklim değişikliği, hidrolojik çevrim, su kaynakları ile onların yerel-bölgesel-küresel yönetimi ve dağıtımı üzerinde gün geçtikçe daha fazla etkili olmakla birlikte dünyanın birçok bölgesinde su kıtlığı ve kuraklık olaylarının yaşanmasına neden olmaktadır (Türkeş, 2008a; Türkeş, 2008b; Şen, 2005). Günümüzde belirgin ve yaygın olarak meydana gelen su kıtlığı ve kuraklık olaylarının sıklığı ve yoğunluğu artmakta ve beraberinde sosyoekonomik açıdan birçok probleme neden olmaktadır. Hemen her ülkede özellikle su kalitesi hızla bozulma eğilimine girmiştir. Ortaya çıkan sorunlar zaman içerisinde hem kapsam olarak hem de boyut olarak çeşitlenmekte ve küresel boyutlarda önemli problemler teşkil etmektedir. Bu sorunlar günümüzde su kaynaklarının geliştirilmesi, kontrolü ve yönetiminde yeni yaklaşımlara ihtiyaç olduğunu ortaya çıkarmış ve uluslararası gündemde bu olgular ilk sıralara taşınmıştır.

Uluslararası çölleşme ile mücadele sözleşmesinde kuraklık için “*Kuraklık, yağışların kaydedilen normal düzeylerin önemli ölçüde altına düşmesi sonucu arazi ve su kaynakları ile üretim sistemlerini olumsuz olarak etkileyen ve ciddi hidrolojik dengesizliklere yol açan doğal bir olay*” şeklinde tanımlama yapılmıştır (WMO, 1997). Kuraklık için bu şekilde genel bir tanım verilmekle birlikte, neredeki suyun göz önüne alınacağına (örneğin; yağış, akış, zemin nemi, yeraltı suyu, baraj haznelerindeki su), hangi sürenin seçileceğine, eksikliğin aşması gereken değer için yapılan kabule ve kuraklığın kaplaması gereken bölge için seçilen büyüklüğe göre farklı tanımlamalara varılabilmektedir (Beyazıt ve Önöz, 2008). Genel olarak, yeryüzünün herhangi bir yerinde ve belli bir zaman süresince yağışın normalin ya da ortalamasının altında gerçekleşmesi kuraklığın birçok tanımında esas alınmış ve yağış eksikliği, uzun süre devam etmesi ve olumsuz etkilere sahip olması ise ortak terimler haline gelmiştir. Bu şekilde kuraklık olaylarının birbirinden farklı alanlarda etkili olması kuraklık tanımlamalarını genişletmiştir (Şen, 2009). Tüm dünyada yaygın olarak etkileri gözlenen kuraklık olayı meteorolojik kuraklık, tarımsal kuraklık, hidrolojik kuraklık ve sosyoekonomik kuraklık olarak dört farklı şekilde ele alınmaktadır. Meteorolojik kuraklık belirli bir bölgenin belli bir periyodun ortalamasına göre yağış miktarının azalması veya belirli bir zaman periyoduna ait normallerde meydana gelen sapmalar olarak tanımlanmakta olup, ilk görülen kuraklık türüdür (Anisfeld, 2010). Hidrolojik kuraklık, su kaynaklarının (yağışlar, yeraltı ve yüzey suları) beklenen normal seviyelerin ve ortalamaların altında kalması olarak tanımlanabilmekte ve meteorolojik kuraklık sona erdikten sonra dahi uzun bir süre varlığını sürdürebilmektedir. Bitkinin ihtiyaç duyduğu miktardaki suyun toprakta bulunmaması tarımsal kuraklığı işaret etmektedir (Kadioğlu, 2008). Kuraklığın tarıma, canlılara ve su kaynakları ile bu kaynaklardan faydalanması gereken endüstriler üzerindeki etkisi ise sosyoekonomik kuraklığı oluşturmaktadır (Anisfeld, 2010). Meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklıktan kaynaklanabilecek olası etkilerin en aza indirilebilmesi için kuraklığın etkileyebileceği alanlar incelenerek, kuraklığın şiddeti ve süresine bağlı olarak gerekli planlamalar yapılarak kuraklığa hazırlıklı olunmalıdır (Mishra & Singh, 2010).

Kuraklık, belirli bir zaman periyodunda yağışların beklenen miktardan az olması, ihtiyacın altında su bulunması gibi tanımlamaların ortak noktası olan su eksikliği sebebiyle meydana gelmektedir. Kuraklık, farklı çevre ve meteorolojik şartlar altında oluşup, canlıların olumsuz etkilenmesine, can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır (Beyazıt & Önöz, 2008). Karmaşık bir yapıya sahip olan ve sayısallaştırılması zor olan kuraklık; frekans, süre, şiddeti ve etkilediği alan gibi niteliksel özelliklerle karakterize edilebilir. Alansal boyutu ile değerlendirildiğinde diğer doğal afetlerden çok daha büyüktür. Özellikle diğer hidrolojik afetlerle karşılaştırıldığında, gelişim bakımından yavaşlığının yanı sıra kuraklığın başladığı ve bittiği anı tespit etmek çok zordur. Genellikle yalnızca insan faaliyetleri ve çevre etkilendiğinde kuraklığı belirlememiz mümkündür (Burton, vd., 1978; Vicente-Serrano vd., 2005). Bu sebeple, kuraklık olaylarını belirlemek, tahmin etmek ve izlemek kolay olmamaktadır. Kuraklıkların alansal ve zamansal boyutlarını açıkça belirlenmesine ait güçlüklerin beraberinde, kuraklığın farklı zaman periyodlarında izlenmesi ile ilgili de önemli problemler mevcuttur. Örneğin, su kaynaklarının yağış eksikliğine karşı farklı tepkileri, zaman ölçeklerinin bir fonksiyonu olarak belirgin bir şekilde değişmektedir (Changnon & Easterling, 1989; Elfatih vd., 1999; Pandey & Ramasastri, 2001).

Kuraklık olaylarının izlenebilmesi için araştırmacılar tarafından çok çeşitli indisler geliştirilmiş olup, bu indisler yağış gibi tek bir meteorolojik parametrenin kullanımının yanı sıra birçok değişkeni içeren yöntemlerin de kullanımına imkan vermektedir (Mckee vd., 1993; Palmer, 1965; Vicente-Serrano vd., 2010; Willeke vd., 1994; Tsakiris & Vangelis, 2005; Gibbs & Maher, 1967; Shukla ve Wood, 2008; Wu vd., 2001; Byun & Wilhite, 1999). Kuraklık indisleri, kuraklık olaylarının zamanda ve etki alanında sürekli izlenmesine, şiddetinin ve alansal boyutunun nicelik bakımından değerlendirilmesine ve daha erken tanımlanmasına yani kuraklığın tahmin edilmesine ve mevcut iklim altında yönetim stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlaması açısından çok önemlidir. Söz konusu kuraklık indisleri arasında Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) çoklu zaman ölçeklerinde kullanılabilme, çeşitli kuraklık türlerini temsil edebilme ve kuraklık niteliklerindeki (şiddet, süre, frekans ve etki alanı) değişiklikleri daha iyi yansıtabilme özelliklerine sahip olduklarından literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mishra & Singh, 2010). SPI ve SPEI'nin teorileri benzer olup, SPI ve SPEI'nin hesaplamasında kullanılan parametreler arasında farklılıklar vardır. SPI; sıcaklık, bağıl nem, buharlaşma, rüzgar hızı, vs. gibi kuraklık koşullarının oluşmasında etkili olan diğer değişkenleri dikkate almayıp, sadece yağış parametresini tek bir sayısal değere dönüştürerek, farklı iklimlere sahip bölgelerdeki kuraklıkları tanımlamak ve izlemek amacıyla geliştirilmiştir (Mckee vd., 1993; Çamalan vd., 2017). Yaygın olarak kullanılan SPI, devam eden periyotta yağış eksikliklerini belirlemekte ve yağış azalmasını çoklu zaman ölçümlerinde farklı zaman dilimlerinde izleme olanağı vermektedir. Ayrıca, SPI ile farklı zaman dilimlerinde kurak ve nemli süreler hesaplanabilir ve yağış açığının çeşitli su kaynakları üzerindeki etkileri

de belirlenebilir (Wang vd., 2017). Yakın zamanda, Vicente-Serrano ve diğerleri (2010) tarafından yeni bir kuraklık indisi olarak önerilen SPEI ise, yağış parametresine ek olarak kullanılan potansiyel evapotranspirasyon (PET) parametresi arasındaki kümülatif farka dayanarak hesaplanabilir ve böylelikle yüzey suyu dengesindeki değişimi kapsamlı bir şekilde yansıtılabilir (Zhang vd., 2017). SPEI, özellikle Palmer Kuraklık Şiddet İndisi (PDSI)'nin sıcaklık dalgalanmaları ve eğilimlerinin neden olduğu evapotranspirasyonda oluşan değişimlere hassasiyeti ile SPI'nın farklı zaman ölçeklerinde ve basit hesaplanabilmesi avantajlarını birleştirir (Wang vd., 2017).

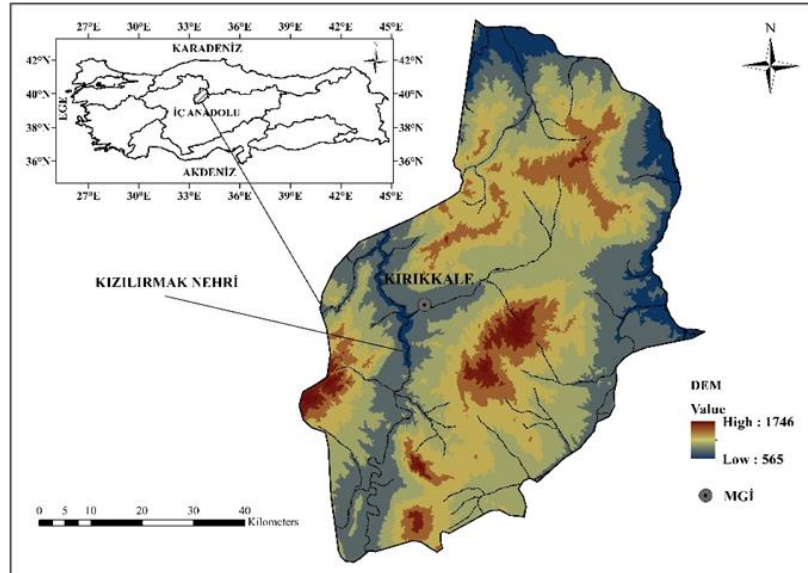
Son yıllarda iklim değişikliği üzerine yapılan birçok çalışmada, hızla gelişen endüstrileşme ile birlikte küresel sıcaklıkta önemli artışların meydana geldiği ortaya konulmuştur (Citakoglu vd., 2019). Çeşitli iklim modelleri ile yapılan tahminlere göre 21. yüzyıl sonunda sıcaklıklarda belirgin artışların meydana geleceği öngörülmektedir (IPCC, 2001, 2007, 2013, 2019; SYGM, 2016). Bu sebeple, kuraklığın doğru bir şekilde değerlendirilmesi için küresel ısınma ile birlikte sıcaklıklarda meydana gelen artma trendi sonucu oluşan buharlaşmadaki artış göz ardı edilmemelidir. Dolayısıyla SPEI yöntemi, kuraklık izlemede SPI yönteminden belirgin şekilde daha iyi olduğu düşünülmektedir (Mathbout vd., 2018). Ancak, SPEI yönteminin özellikle kurak bölgelerde uygulanabilirliği sınırlı kalmaktadır (Shaowei vd., 2003). Diğer taraftan, SPI yöntemi halen tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, kuraklık izlemede SPI ve SPEI yöntemleri arasındaki fark ve bölgesel uygulanabilirliği hala tartışmaya açık konulardır (Pei vd., 2020).

Ülkemizde yarı kurak iklim özellikleri görülen İç Anadolu Bölgesi'nde yıllık yağış yüksekliği ülke ortalamasının altında kalmakta ve kuraklıktan en fazla etkilenen bölgelerin başında gelmektedir. Bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesinde yer alan Kırıkkale ilinde meydana gelen kuraklıkların zaman içerisindeki gelişimini ve özelliklerini incelemek amacıyla SPI ve SPEI yöntemleri ile kuraklık analizi yapılmıştır. Çalışmada, Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 yılları arasındaki Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) elde edilen mevcut aylık ortalama yağış verisi, aylık ortalama sıcaklık verisi, aylık maksimum sıcaklık verisi ve aylık minimum sıcaklık verisi kullanılarak, 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI ve SPEI değerleri hesaplanmıştır. Geçmiş dönemlerde meydana gelen kuraklıkların karakteristik özellikleri incelenmiş, seçilen indislerin bölge için uygulanabilirliği, performansları ve arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Ayrıca, söz konusu indislerden SPEI hesabında PET değerleri için Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılarak 2 farklı SPEI değeri elde edilmiştir (Thornthwaite, 1948; Hargreaves & Samani, 1985). Burada elde edilen kuraklık tahmini sonuçlarının, çalışma alanındaki kuraklık risk analizi ve yönetimi çalışmaları için önemli bilgiler sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Method

2.1. Çalışma Alanı ve Veri

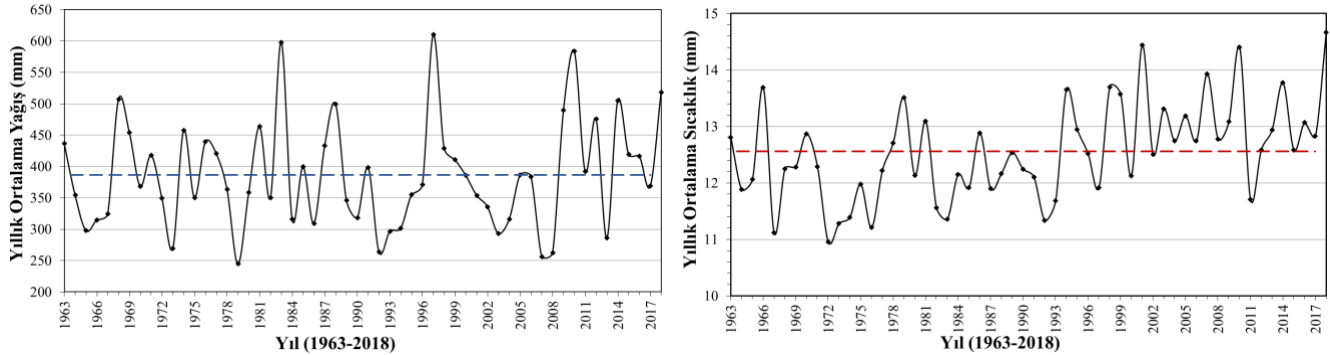
Çalışma alanı olarak seçilen Kırıkkale ili, yarı kurak iklim özellikleri görülen İç Anadolu bölgesinin Orta Kızılırmak bölümünde 33°20'-34°25' doğu meridyenleri, 39°20'-40°20' kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Yaklaşık olarak 4694 km² yüzölçümüne sahip olan Kırıkkale ilinde, kot yüksekliği 565-1746 m aralığında değişmektedir (Şekil 1). Kırıkkale'de kış ayları soğuk ve yağışlı, yaz ayları ise sıcak ve kurak geçmektedir.



Şekil 1. Kırıkkale İlının Coğrafi Konumu ve Yükseklik Haritası

Çalışma alanında yıllık ortalama yağış miktarı 386 mm civarındadır. Bu değer, ülke geneli için hesaplanan yıllık ortalama yağış miktarının yaklaşık olarak %67'sine karşılık gelmektedir. Toplam yıllık yağış değeri yıldan yıla farklılık göstermekte olup, minimum yağış 1979 yılında 245 mm iken, maksimum yağış 1997 yılında 610 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Bölgede en fazla yağış ilkbahar mevsiminde nisan ve mayıs aylarında, en az yağış ise yaz mevsiminde temmuz ve ağustos aylarında görülmektedir. Aylık ortalama

yağış mayıs ayında 54 mm civarında iken, temmuz ve ağustos aylarında yaklaşık olarak 10 mm'ye kadar düşmektedir. Kış mevsiminden sonra en yağışlı mevsimin ilkbahar mevsimi olduğu gözlemlenmiştir. Kırıkkale'de yıllık sıcaklık ortalaması ise 12.6 °C'dir (Şekil 2). En sıcak aylar temmuz ve ağustos, en soğuk aylar ise ocak ve şubat olup, bölgede en yüksek ve en düşük ortalama sıcaklık değeri arasındaki fark 20 °C'nin üzerindedir. Aylık ortalama sıcaklık temmuz ve ağustos aylarında yaklaşık olarak 24~25 °C iken, ocak ve şubat aylarında 0~2 °C civarına düşmektedir. Özellikle bölgede 2000'li yıllardan itibaren sıcaklıkta belirgin artışlar söz konusudur.



Şekil 2. Kırıkkale Yıllık Yağış ve Sıcaklık Zaman Serileri

Bu çalışmada, MGM'den elde edilen Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 yılları arasındaki 56 yıllık dönemde mevcut aylık ortalama yağış, aylık ortalama sıcaklık, aylık maksimum sıcaklık ve aylık minimum sıcaklık verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verilere ait istatistiksel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonundan Elde Edilen Verilere Ait İstatistiksel Bilgiler

	Aylık Toplam Yağış (mm)	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	Aylık Minimum Sıcaklık (°C)	Aylık Maksimum Sıcaklık (°C)
Ortalama	32.18	12.56	0.49	25.70
Maksimum	172.70	28.70	16.80	41.80
Minimum	0.00	-5.00	-22.40	3.90
Standart Sapma	27.03	8.55	8.47	9.13
Çarpıklık	1.07	-0.07	-0.20	-0.31
Basıklık	1.33	-1.20	-0.71	-1.08

2.2. Yöntem

2.2.1. Swed-Eisenhart (run) test

Run Testi (Swed & Eisenhart, 1943), verilerin aynı popülasyondan geldiği ve birbirinden bağımsız olduğunu kontrol etmek amacıyla zaman serilerine uygulanan parametrik olmayan bir testtir. Bu testte verilerin homojenliği H_0 (homojen) veya H_1 (homojen değil) varsayımları kontrol edilir (Oliver, 1981). Gözlem serisinin homojenliğine Denklem 1'de hesaplanan Z değeri sonucunda karar verilir.

$$Z = \frac{r - \frac{N_a N_b + 1}{N_a + N_b}}{\sqrt{\frac{2N_a N_b (2N_a N_b - N)}{N^2 (N-1)}}} \quad (1)$$

Denklemden; Z; test sonucunu, N; veri sayısını, r; değişim (run) sayısını, N_a ; serinin ortanca değerinden küçük değerlerin sayısını, N_b ise ortancada büyük değerlerin sayısını ifade etmektedir. Elde edilen Z değeri $\pm 1,96$ arasında ise verilerin %95 güven aralığında H_0 varsayımının kabul edilerek ve verilerin homojen dağıldığı kabul edilir, aksi durumda H_1 hipotezi kabul edilmektedir (Swed ve Eisenhart, 1943; Toros, 1993).

Çalışmada, Kırıkkale istasyonuna ait gözlem değerlerinin homojenliği Run testi kullanılarak kontrol edilmiştir. %95 güven seviyesi için toplam yağış, ortalama sıcaklık, minimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık serilerine ait Run testi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Run testi sonuçlarına göre tüm Kırıkkale istasyonuna ait yağış ve sıcaklık serilerinde %95 güven düzeyinde H_1 varsayımının kabul edildiği belirlenmiştir.

Tablo 2. Meteorolojik Parametrelere Ait Run Testi Sonuçları

	Aylık Toplam Yağış	Aylık Ortalama Sıcaklık	Aylık Minimum Sıcaklık	Aylık Maksimum Sıcaklık
Ortanca	26.8	12.8	0.1	27.3
r	273	113	113	119
N	672	672	672	672
N _a	336	336	337	337
N _b	336	336	335	335
Z	-4.79	-17.14	-17.14	-16.68
Z _{kr}	±1.96	±1.96	±1.96	±1.96
Varsayım	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁

2.2.2. Standartlaştırılmış yağış indisi (SPI) hesabı

Bu yöntem, farklı iklimlere sahip bölgelerdeki kuraklıkları tanımlamak ve izlemek amacıyla 1993 yılında McKee ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (McKee vd., 1993). İhtiyaç duyulan tek meteorolojik değişken yağış değerlerine bağlı olarak kolay hesaplanabilen SPI ile herhangi bir bölgedeki belirli bir zaman zaman ölçeğinde kurak veya sulak olaylardaki anormallikler belirlenebilir (Sırdaş, 2002). Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından dünya çapında kullanılması tavsiye edilen indislerden biri olan SPI, devam eden periyotta yağış eksikliklerini hesaplamakta ve yağış azalmasını çoklu zaman ölçümlerinde farklı zaman dilimlerinde izleme olasılığını vermektedir. Ayrıca, yöntem ile yağışta meydana gelen azalmanın yeraltı suyu, su biriktirme haznesi depolaması, zemin nemi, kar yığını ve akarsu gibi hidrolojik sistemler üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir (Sırdaş, 2002). İndisin spesifik olarak hesaplanma yöntemi aşağıdaki gibidir:

Thom (1958), Gama dağılımının iklimsel yağış serilerini en iyi temsil eden dağılım olduğunu ortaya koymuştur. Gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}; \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (2)$$

Burada x yağış toplamı, $\Gamma(\alpha)$ Gama fonksiyonu ve sırasıyla α ve β şekil ve ölçek parametrelerini temsil etmektedir. Optimum α ve β parametrelerinin tahmininde maksimum olasılık yöntemi kullanılır (Guttman, 1999; Yuan & Zhou, 2008; Liu vd., 2012; Bacanlı & Kargı, 2019).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \quad A = \ln(\bar{x}) - \sum \frac{\ln(x)}{n} \quad (3)$$

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (4)$$

$t=x/\beta$ olduğu zaman, bu eşitlik eksik gamma fonksiyonunu oluşturmaktadır (Sırdaş, 2002).

$$G(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Gamma fonksiyonu $x=0$ için tanımsız olur ve yağış dağılımı sıfır değerleri de içerebilir. Bu durumda toplam olasılık dağılımı aşağıdaki şekilde yazılabilir (Sırdaş, 2002);

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Burada “q” sıfırın olasılığıdır ve eğer “m” yağış zaman serisinde sıfırların sayısı ise “q=m/n” olarak tahmin edilir. Kümülatif olasılık $H(x)$, standartlaştırılmış normal dağılıma dönüştürülür. Böylece, ortalaması sıfır (0) ve varyans değeri ise bir (1) olan SPI değerini ifade eden standart normal rastgele değeri Z değeri elde edilir. Kümülatif olasılık, Z adı verilen standart normal rastgele değişkene aşağıdaki formüllerle dönüştürülebilir (Sırdaş, 2002; Yacoub & Tayfur, 2020; Abramowitz & Stegun, 1965).

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} \quad 0 < H(x) < 0.5 \quad (7)$$

$$SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2} \right)} \quad 0.5 < H(x) < 1.0 \quad (8)$$

Burada sabitler, $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$ ve $d_3=0.001308$ şeklinde tanımlanabilir.

2.2.3. Standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon indisi (SPEI) hesabı

Bu yöntem esasında PDSI'nin buharlaşma talebindeki değişikliklere hassasiyeti ile SPI'nın çoklu zaman ölçeği ve basit hesaplanabilme özellikleri bir araya getirilerek 2010 yılında Vicente-Serrano ve diğerleri tarafından önerilmiştir (Vicente-Serrano vd., 2010). Kuraklık olaylarını tanımlamak, belirlemek ve izlemek amacıyla geliştirilen SPEI, küresel ısınmanın kurak şartlar üzerindeki etkilerini ve sonuçlarını açıklama konusunda da etkindir. Yağış parametresine ek olarak, sıcaklık parametresine bağlı olarak elde edilen PET değerlerini de kapsayan SPEI'nın hesap adımları, SPI ile aynıdır (Çamalan vd., 2017; Yüce & Eşit, 2020). Su dengesi ilkesine dayanan SPEI, bölgenin kurak ve nemli koşullarını değerlendirmek amacıyla yağış (P) ve PET arasındaki farkı giriş şartı olarak kullanılarak hesaplanmaktadır (Tirivarombo vd., 2018). İklim-su dengesi matematiksel olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (9)$$

Burada, D_i analiz edilen (i) aydaki su fazlası veya eksikliği (mm), P_i (i) ayındaki yağış (mm) ve PET_i (i) ayındaki potansiyel evapotranspirasyondur (mm). İlk olarak, D serisinin bulunabilmesi için PET değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yirminci yüzyıldan itibaren birçok PET modeli geliştirilmiş olsa da bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar Thornthwaite, Hargreaves ve Penman-Monteith modelleridir (Thornthwaite, 1948; Hargreaves & Samani, 1985; Allen vd., 1998; Beguería vd., 2013; Ogunrinde vd., 2020). Çoğu PET modelinin hesaplamaları için bir veya daha fazla hidrometeorolojik değişken gerekmektedir. Bu çalışmada PET değerleri Thornthwaite ve Hargreaves modelleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Thornthwaite (1948) seçilen istasyonun aylık ortalama sıcaklık değerlerini ve istasyonun bulunduğu enlem bilgilerini gerektiren verilere ihtiyaç duyulan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem ile aylık PET değerleri aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanabilir.

$$PET(T) = 16 * \left(\frac{10*T}{I}\right)^A * G \quad (10)$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (11)$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad (12)$$

$$A = 6.7510 * 10^{-7} * I^3 - 7.7110 * 10^{-5} * I^2 + 1.791210 * 10^{-2} * I + 0.49239 \quad (13)$$

Burada, $PET(T)$; Thornthwaite yöntemi ile elde edilen potansiyel evapotranspirasyon (mm), i aylık sıcaklık indisi, T aylık ortalama sıcaklık ($^{\circ}C$), I yıllık sıcaklık indisi, A bir parametre, G ise enlem düzeltme katsayısı olarak tanımlanmaktadır (Thornthwaite, 1948).

Hargreaves ve Samani (1985) PET değerini sadece hava sıcaklığı ve radyasyona iliştiiren kolay bir metot geliştirmiştir. Bu yöntemde günlük PET değerleri hesaplanmaktadır ve bunun için ortalama maksimum ve ortalama minimum sıcaklık verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hargreaves-Samani denkleminin orijinali aşağıdaki gibidir (Hargreaves & Samani, 1985; Çobaner vd., 2018; Droogers & Allen, 2002):

$$PET(H) = 0.0023 * 0.408 * R_a * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * \left(\frac{T_{max}+T_{min}}{2} + 17.8\right) \quad (14)$$

Burada, $PET(H)$; Hargreaves yöntemi ile elde edilen potansiyel evapotranspirasyon (mm), R_a extraterrestrial radyasyon ($MJ/m^2/gün$), T_{max} maksimum sıcaklık ($^{\circ}C$), T_{min} minimum sıcaklık ($^{\circ}C$) olarak tanımlanmaktadır (Hargreaves ve Samani, 1985; Çobaner vd., 2018).

SPEI, SPI'deki ile aynı adımlar kullanılarak hesaplanabilir ve log-lojistik dağılımının standart normal dağılıma dönüştürülmesiyle belirlenebilir (Kumanlioglu, 2020). Hesaplanan D veri serisine uyması için Denklem 15'te verilen üç parametrelili log-lojistik olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmaktadır (Pei vd., 2020).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (15)$$

Denklemdaki α , β ve γ parametreleri sırasıyla ölçek, şekil ve orijin parametreleridir. Belirli bir zaman ölçeğinin kümülatif dağılım fonksiyonu $F(x)$, Denklem 16'da verilmiştir. SPEI ise Denklem 17'de gösterildiği üzere $F(x)$ 'in standartlaştırılmış değerleri olarak kolaylıkla bulunabilir (Vicente-Serrano vd.,2010; Pei vd., 2020; Abramowitz & Stegun, 1965):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (16)$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (17)$$

$$W = \sqrt{2 \ln(p)} \quad (18)$$

Denklem 18’de (p), belirlenen bir D değerini aşma olasılığı olup, $p = 1 - F(x)$ (Pei vd., 2020). Eğer $p > 0.5$ ise p , $(1 - p)$ ile yer değiştirir ve hesaplanan SPEI’nin işareti tersine çevrilir. Denklem 17’deki sabitler, $c_0= 2.515547$, $c_1= 0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1= 1.432788$, $d_2= 0.189269$, $d_3= 0.001308$ olarak belirlenmiştir. Verilen hesaplama yöntemi sonucunda ortalama değeri sıfır ve standart sapması bir olan SPEI değerleri elde edilir (Pei vd., 2020).

Çalışmada kavram karışıklığı yaşanmaması amacıyla PET(T) değerleri kullanılarak elde edilen SPEI değerleri SPEI(T) ve PET(H) değerleri kullanılarak elde edilen SPEI değerleri ise SPEI(H) olarak ifade edilmiştir. SPI ve SPEI dünya çapında yapılan araştırmalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, 1, 3, 6, 12, 24 ve 48 ay gibi çeşitli zaman ölçeklerinde hesaplanarak farklı kuraklık türlerini temsil etmektedir. Tablo 3’te çalışmada kullanılan kuraklık indislerine ait aşırı nemlilikten aşırı kuraklığa kadar değişen nemli ve kuraklık sınıflandırması verilmiştir (Li vd., 2015; Kassaye vd., 2021; Salvacion vd., 2021). Çalışmanın amacı doğrultusunda nemli durumlar tek bir sınıf olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, SPI ve SPEI değerleri nemli, normale yakın ve kurak şeklinde 3 farklı sınıfa ayrılmıştır. Diğer taraftan, kuraklıklara ait karakteristik özellikler incelenirken orta kurak, şiddetli kurak ve aşırı kurak durumlar üzerinde durulmuştur.

Tablo 3. SPI ve SPEI Metoduna Göre İndis Değerleri ve Sınıflandırılması

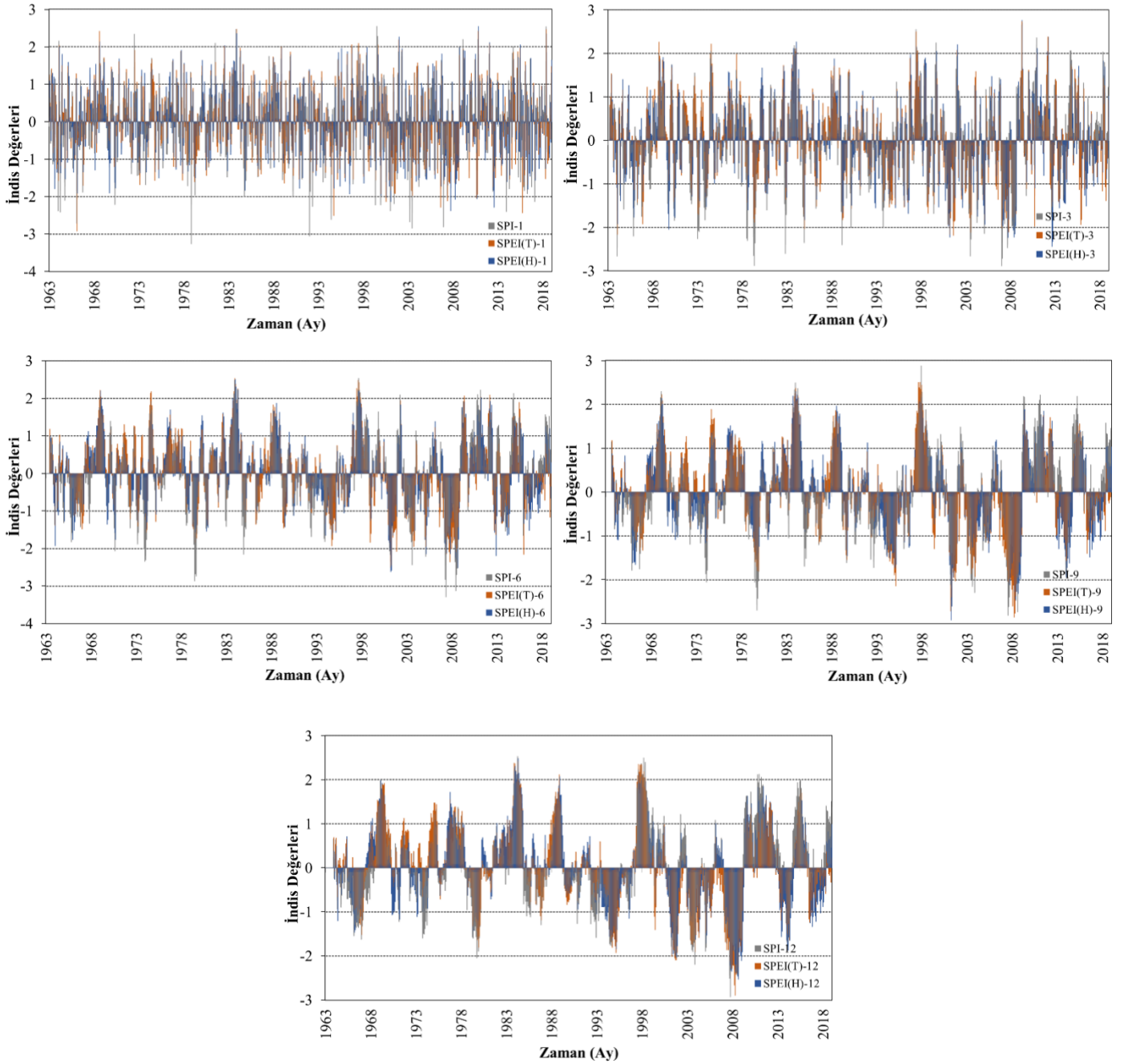
Sınıflandırma	SPEI	SPI
Aşırı Nemli	≥ 2	≥ 2
Çok Nemli	1.5 ~ 1.99	1.5 ~ 1.99
Orta Nemli	1 ~ 1.49	1 ~ 1.49
Normale Yakın	-0.99 ~ 0.99	-0.99 ~ 0.99
Orta Kurak	-1 ~ 1.49	-1 ~ 1.49
Şiddetli Kurak	-1.5 ~ -1.99	-1.5 ~ -1.99
Aşırı Kurak	≤ -2	≤ -2

3. Araştırma ve Bulgular

Bu çalışma, İç Anadolu Bölgesinde yer alan Kırıkkale ilinde 1963-2018 yılları arasındaki dönemde meydana gelen kuraklık olaylarının farklı zaman dilimlerindeki gelişimini izlemek ve karakteristik özelliklerini (kuraklık sıklığı, kuraklık süresi ve kuraklık şiddeti) tanımlamak amacıyla, SPI ve SPEI değerleri hesaplanarak kuraklık analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında, ilk olarak SPI ve SPEI yöntemleri kullanarak elde edilen geçmiş dönemlerde gözlemlenen kuraklık olaylarının karakteristik özellikleri farklı zaman ölçeklerinde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise farklı zaman ölçeklerinde bulunan indis değerleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

3.1. Kuraklıkların Zamansal Değişimi ve Kuraklık Özelliklerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması

1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçekleri için hesaplanan SPI ve SPEI değerleri kullanılarak farklı periyotlardaki kurak ve nemli dönemlere ait zamansal değişim incelenmiştir. Şekil 3’ten görüldüğü gibi SPI ile SPEI(T) ve SPEI(H) için kısa zaman ölçeklerde kurak dönemlerin frekansı çok fazladır. Zaman ölçeği arttıkça kuraklık eğilimi daha belirgin hale gelmekte, kurak dönemlerin frekansında azalma ve kuraklık genliklerinde ve sürelerinde artış gözlenmektedir. İndislere ait aylık zaman serilerinde kısa zaman ölçeklerinde SPI değerlerinin değişimi göze çarpmaktadır. Aşırı ve şiddetli kuraklıkları SPI aylık serisinde nispeten daha belirgin şekilde yansıtmakta ve şiddet bakımından SPEI(T) ve SPEI(H) arasında farklılıklar bulunmaktadır. Fakat zaman ölçeği arttıkça bu fark azalmakta ve indis değerleri arasında tutarlılık gözlenmektedir. Ayrıca, 2007 ve 2008 yıllarında meydana gelen aşırı şiddetli kuraklıklar üç indis için göz önüne alınan zaman ölçeklerinde belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 3. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonuna Ait SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) Değerlerinin Zamansal Değişimi

Kırıkkale meteoroloji istasyonu için 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeğinde hesaplanan SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerleri için rölatif frekans analizi yapılmıştır. Tablo 3'te verilen sınıflandırma nemli, normale yakın ve kurak durum olarak ayrılmış ve elde edilen rölatif frekans yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir. 5 farklı zaman ölçeğinde elde edilen SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans analizi sonuçlarına göre, nemli veya kurak durumlara nispeten normale yakın durumlar daha fazla olup bu kategoride tüm rölatif frekans değerlerinin %60'ı aştığı belirlenmiştir. Normale yakın sınıfta rölatif frekansın minimum değeri %63.1 olarak SPEI(H) ile 1 aylık zaman ölçeğinde, maksimum değeri ise %69.1 olarak SPEI(T) ile 12 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. Tablo 4'te görüldüğü gibi, nemli, normale yakın ve toplam kurak kategoride frekans yüzdelerinin maksimum ve minimum değerleri SPI için ağırlıklı olarak 3 ve 12 aylık zaman ölçeğinde bulunurken, SPEI(T) ve SPEI(H) için ağırlıklı olarak 1 ve 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Ayrıca, toplam kurak ve nemli duruma ait rölatif frekans değerlerinin üç indis için de yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 1 aylık zaman ölçeğinde SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) rölatif frekans değerleri nemli sınıfta sırasıyla %17.1, %18 ve %18 olarak belirlenirken, toplam kurak sınıfta %14.9, %17.6 ve %18.9 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda kurak kategori tek başına değerlendirildiğinde, üç indisin 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçekleri için orta kurak rölatif frekans değerlerinin, şiddetli ve aşırı kurak kategorilerine ait rölatif frekans değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Detaylı olarak incelendiğinde, orta kurak

sınıfta maksimum rölatif frekans %13.1 olarak SPEI(H) ile 1 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans ise %6.7 olarak SPEI(T) ile 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Şiddetli kurak sınıfta ise maksimum rölatif frekans %6.5 olarak SPI ile 1 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans %3.3 olarak SPI ile 12 aylık zaman ölçeğinde görülmüştür. Son olarak, aşırı kurak sınıfta maksimum rölatif frekans %3.3 olarak SPI ile 3 aylık zaman ölçeğinde, minimum rölatif frekans %0.9 olarak SPEI(T) ile 1 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. Aşırı kurak sınıfta zaman ölçeği arttıkça SPI değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinde azalma, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinde ise artma söz konusudur. Özellikle aşırı kurak sınıfı için tüm zaman ölçeklerinde SPI değerlerinin rölatif frekans yüzdeleri, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdelerinden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin rölatif frekans yüzdeleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Bunlar arasında yaklaşık olarak %90 korelasyon tespit edilmiştir. Sonuç olarak, tüm kategoriler kendi içinde değerlendirildiğinde üç indis içinde rölatif frekans değerlerinin hemen hemen benzer olduğu ve aralarında küçük farklılıklar olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonu İçin Rölatif Frekans Yüzde Değerleri

Dönem		1	3	6	9	12
Nemli (%)	SPI	17.1	14.8	15.9	17.2	18.3
	SPEI(T)	18.0	17.0	15.3	16.9	16.0
	SPEI(H)	18.0	17.5	16.9	17.8	16.3
Normale Yakın (%)	SPI	68.0	69.0	68.2	67.0	66.0
	SPEI(T)	64.4	65.5	67.2	67.3	69.1
	SPEI(H)	63.1	65.4	65.2	65.8	67.5
Orta Kurak (%)	SPI	8.5	7.2	9.3	9.6	7.9
	SPEI(T)	11.5	10.9	10.6	8.4	6.7
	SPEI(H)	13.1	10.4	11.7	10.1	9.8
Şiddetli (%)	SPI	3.3	5.8	3.7	3.3	6.5
	SPEI(T)	5.1	5.4	5.5	5.4	5.7
	SPEI(H)	4.9	5.5	4.5	4.5	4.4
Aşırı Kurak (%)	SPI	3.1	3.3	2.8	2.9	1.4
	SPEI(T)	1.0	1.2	1.3	2.0	2.4
	SPEI(H)	0.9	1.2	1.6	1.8	2.0

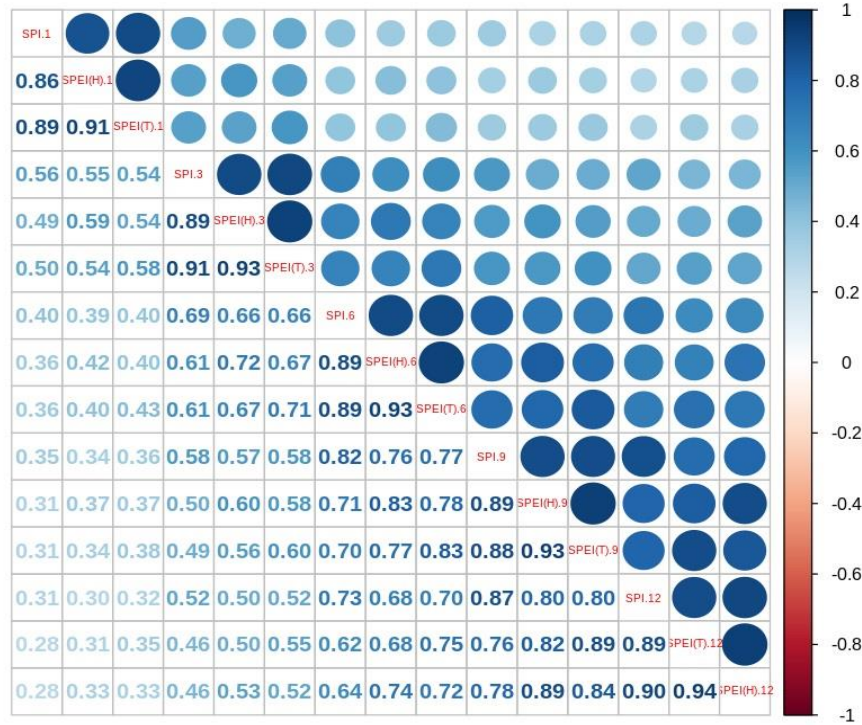
Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait 1963-2018 dönemi için hesaplanan 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeğinde kurak dönemlerin süresi, büyüklüğü ve şiddetini içeren kuraklık özellikleri incelenmiştir. Tablo 5'te her bir indis için 5 farklı zaman ölçeğinde incelenen kuraklık olaylarının kuraklık sınıfı, ortalama şiddet ve ortalama süreleri ile incelenen kuraklıkların en şiddetli ve en uzun süreli ile buldukları başlangıç ve bitiş zamanları verilmiştir. Üç indis için kuraklık olaylarının toplamı değerlendirildiğinde, genel olarak zaman ölçeği arttıkça yaşanan kuraklık olaylarının sayısında azalma görülmüştür. Fakat kuraklık periyodu uzadıkça hesaplanan üç indis için ortama kuraklık süresinde ve yaşanan en uzun kuraklık süresinde artış söz konusudur. Örneğin SPEI(T) yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre, 1 aylık zaman ölçeğinde 118 ayda çeşitli şiddetlerde kuraklık olayları yaşanırken, 12 aylık zaman ölçeğinde toplamda 98 ayda çeşitli şiddetlerde kuraklık olayları yaşanmıştır. Yine aynı indis için 1 aylık zaman ölçeğinde ortalama kuraklık süresi 1.34 ve yaşanan en uzun süreli kuraklık 3 ay olarak bulunurken, 12 aylık zaman ölçeğinde ortalama kuraklık süresi 6.13 ve yaşanan en uzun süreli kuraklık 24 ay olarak bulunmuştur. Kuraklık olayları şiddet bakımından değerlendirildiğinde, tüm indisler için hesaplanan 5 farklı zaman ölçeğindeki ortalama şiddet değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve -0.23 ile -0.27 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Maksimum kuraklık şiddeti ise her indis için küçük farklılıklar göstermektedir. Özellikle SPI yöntemi ile elde edilen maksimum kuraklık şiddetleri (9 aylık zaman ölçeği hariç), SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan değerlere göre nispeten daha yüksektir. Örneğin maksimum şiddet 6 aylık zaman ölçeğinde SPI yöntemi ile -3.29 (Mayıs 2007), SPEI(T) yöntemi ile -2.5 (Mart 2001) ve SPEI(H) yöntemi ile -2.61 (Mart 2001) olarak bulunmuştur. En uzun süreli ve en şiddetli kuraklık olaylarının yaşandığı zamanlar incelendiğinde, üç indis içinde ağırlıklı olarak 2000'li yıllar göze çarpmaktadır. Türkiye genelinde kuraklık olaylarının en şiddetli ve geniş yayımlı olanlarından 2001, 2007 ve 2008 yıllarında meydana gelen kuraklıkların seçilen çalışma alanının da etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan kuraklıkların en uzun süreli ve en şiddetli olanlarının 2000'li yıllarda görülmesinin nedenin, bu yıllardan sonra sıcaklıkta meydana gelen artma eğiliminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 5. Kırıkkale Meteoroloji İstasyonun Farklı Zaman Ölçekleri İçin Kuraklık Karakteristikleri

İndis	Kuraklık Sayısı (Ay)				Toplam	Ortalama Kuraklık		En Uzun Süreli Kuraklık		Süre (Ay)	Maksimum Kuraklık	
	Kuraklık Periyodu	Orta Kurak	Şiddetli Kurak	Aşırı Kurak		Süre	Şiddet	Başlangıç	Bitiş		Şiddet	Zaman (Ay)
SPI	1	57	22	21	100	1.20	-0.23	1978/5	1978/8	4	-3.27	1978/11
	3	48	39	22	109	2.22	-0.27	2008/2	2008/8	7	-2.89	2007/1
	6	62	25	19	106	2.72	-0.25	2007/3	2007/10	8	-3.29	2007/5
	9	64	22	19	105	2.84	-0.24	2001/1	2001/10	10	-2.81	2007/7
	12	52	43	9	104	4.16	-0.24	2007/5	2009/1	21	-2.93	2007/10
SPEI(T)	1	77	34	7	118	1.34	-0.25	2001/6	2001/8	3	-2.92	1966/2
	3	73	36	8	117	2.34	-0.25	2007/5	2007/11	7	-2.18	2001/8
	6	71	37	9	117	3.25	-0.26	2007/3	2008/10	20	-2.50	2001/3
	9	56	36	13	105	4.38	-0.24	2006/12	2008/12	25	-2.85	2008/3
	12	44	38	16	98	6.13	-0.23	2007/2	2009/1	24	-2.89	2008/4
SPEI(H)	1	88	33	6	127	1.31	-0.26	2008/3	2008/8	6	-2.38	2007/9
	3	70	37	8	115	2.21	-0.25	2000/11	2001/4	6	-2.44	2012/8
	6	78	30	11	119	2.83	-0.25	2007/3	2008/1	11	-2.61	2001/3
	9	67	30	12	109	3.63	-0.24	2007/5	2008/12	20	-2.92	2001/3
	12	65	29	13	107	4.28	-0.24	2007/5	2009/2	22	-2.53	2008/8

3.2. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) Arasındaki İlişki

Çalışmanın bu bölümünde 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanan SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanarak, farklı zaman ölçeklerindeki kuraklık indisleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla hesaplanan korelasyon katsayılarının dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, her indis kendi içinde değerlendirildiğinde zaman ölçeği arttıkça korelasyon değerinde düşme görülmektedir. Örneğin, SPI 1 ile SPI 3 ve SPI 12 arasındaki korelasyonlar sırasıyla 0.56 ve 0.31 olarak bulunmuştur. Yapılan karşılaştırmada aynı zaman ölçeklerinde en yüksek korelasyon SPEI(T) ve SPEI(H) arasında ($R=0.94$) 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilmiştir. Diğer taraftan, en düşük korelasyon ise SPEI(H) ve SPI arasında ($R=0.86$) 1 aylık zaman ölçeğinde bulunmuştur. SPEI(T) ve SPEI(H) arasındaki korelasyonlar değerlendirildiğinde, iki indis arasındaki ilişkinin daha kuvvetli olduğu ve zaman ölçeği uzadıkça elde edilen korelasyon değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. SPEI(T) ve SPEI(H) arasında korelasyon değeri 1 aylık zaman ölçeğinde $R=0.91$ iken, 12 aylık zaman ölçeğinde $R=0.94$ olarak bulunmuştur. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) ile karşılaştırıldığında ise SPI'nin her iki indis ile arasındaki ilişkisinin kuvvetli olduğu tespit edilmiştir. SPI ile SPEI(T) arasında en yüksek korelasyon 3 aylık zaman ölçeğinde $R=0.91$ ve en düşük korelasyon 9 aylık zaman ölçeğinde $R=0.88$ 'dir. SPI ile SPEI(H) arasında ise en yüksek korelasyon 12 aylık zaman ölçeğinde $R=0.90$ ve en düşük korelasyon 1 aylık zaman ölçeğinde $R=0.86$ 'dir. Elde edilen sonuçlara göre, aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasındaki korelasyon değerlerinin 0.85'i aştığı ve en kuvvetli ilişkinin SPEI(T) ve SPEI(H) arasında olduğu bulunmuştur.



Şekil 4. Farklı Zaman Ölçeklerindeki Kuraklık İndislerinin Arasındaki Korelasyonlar

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 1963-2018 yılları arasındaki dönemde Kırıkkale meteoroloji istasyonuna ait meteorolojik veriler kullanılarak 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda, Kırıkkale ilinde geçmiş dönemlerde meydana gelen kuraklıkların karakteristik özellikleri incelenmiş ve seçilen indislerin çalışma alanı için uygulanabilirliği, performansları ve aralarındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- I. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin zamansal değişimi farklı zaman ölçeklerinde nispeten benzerlik göstermiş ve özellikle zaman ölçeği arttıkça benzerlik daha belirgin hale gelmiştir. İndislere ait aylık zamansal değişimlerinde özellikle kısa zaman ölçeklerinde SPI ile hesaplanan kuraklık şiddetlerinin SPEI(T) ve SPEI(H) ile hesaplanandan daha fazla ve belirgin olduğu görülmüştür. Zaman ölçeği uzadıkça üç indise ait değişimlerin temelde tutarlılık gösterdiği gözlenmiştir. Her üç indis için kısa zaman ölçeklerinde kurak dönemlerin frekansı çok fazladır. Ancak, zaman ölçeği arttıkça kuraklık eğilimi daha belirgin hale gelmiş, kurak dönemlerin frekansında azalma ve kuraklık günlüklerinde ve sürelerinde artış olmuştur.
- II. Rölatif frekans analizi sonuçlarına göre, nemli, normale yakın ve kurak sınıflar kendi içinde değerlendirildiğinde, üç indis için rölatif frekans değerlerinin nispeten benzer olduğu fark edilmiştir. SPI, SPEI(T) ve SPEI(H) değerlerinin nemli veya kurak durumlara nispeten normale yakın durum için daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüş olup normale yakın kategoride tüm rölatif frekans değerlerinin %60'ı aştığı belirlenmiştir.
- III. Kuraklık periyodu uzadıkça hesaplanan üç indis için ortama ve en uzun kuraklık sürelerinde artış söz konusudur. Buna ilaveten, farklı zaman ölçeklerinde ortalama şiddet değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bulunmuştur. Maksimum kuraklık şiddeti ise her indis için küçük farklılıklar göstermekte olup SPI yöntemi ile elde edilen maksimum kuraklık şiddetleri (9 aylık zaman ölçeği hariç), SPEI(T) ve SPEI(H) yöntemleri ile hesaplanan değerlere göre nispeten daha yüksektir. En uzun süreli ve en şiddetli kuraklık olayları 2000'li yıllarda yaşanmıştır.
- IV. Aynı zaman ölçeğinde tüm indisler arasındaki yüksek korelasyon elde edilmiş ve korelasyon değerlerinin 0.85'i aştığı ve en kuvvetli ilişkinin SPEI(T) ve SPEI(H) arasında olduğu bulunmuştur.

Bu çalışma, Kırıkkale'de kuraklık olaylarının izlenmesi, kuraklık özelliklerinin belirlenmesi ile kuraklık indislerinin değerlendirilmesi ve seçimi için önemli bilgiler sağlamaktadır. İndisler arasında aynı zaman ölçeklerinde yüksek korelasyonlar görülmesi sebebiyle, çalışma bölgesinde SPI ve SPEI yöntemlerinin kuraklığı tanımlamak, tespit etmek ve izlemek için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. İleriki çalışmalarda, burada kullanılan indislerden farklı kuraklık indisleri incelenerek elde edilen bulguların karşılaştırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, makalede kullanılan meteorolojik verilerin temin edildiği Meteoroloji Genel Müdürlüğü ile yapıcı eleştirileriyle makalenin gelişimine katkı sunan isimlere içtenlikle teşekkürlerini sunarlar.

Refesanslar

Abramowitz, M., & Stegun, I.A. (1965). Handbook of mathematical formulas, graphs and mathematical tables. Dover Publications Inc, New York.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements”, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.

Anisfeld, S.C. (2010). Water resources. Island Press, Washington, DC.

Bacanli, U.G., & Kargi, P.G. (2019). Drought analysis in long and short term periods: Bursa case”, Journal of Natural Hazards and Environment, vol. 5, no. 1, pp. 166-174.

Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., & Latorre, B. (2013). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) Revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. Int. J. Climatol., vol. 34, pp. 3001–3023.

Beyazıt, M., & Önöz, B. (2008). Taşkın ve kuraklık hidrolojisi. Nobel Yayın Dağıtım, s. 212-215, Ankara.

Burton, I., Kates, R.W., & White, G.F. (1978). The environment as hazard”, Oxford University Press, New York.

Byun, H.R., & Wilhite, D.A. (1999). Objective quantification of drought severity and duration. Journal of Climate, vol. 12, no. 9, pp. 2747-2756.

Changnon, S.A., & Easterling, W.E. (1989). Measuring drought impacts:the Illinois case. Water Resour. Bull., vol. 25, pp. 27–42.

Citakoglu, H., Ozeren, Y., & Coskun, O. (2019). Short time drought estimation of Sakarya Basin station with wavelet model–adaptive neuro–fuzzy inference system. IWW'2019: International Conference on Image Processing, Wavelet and Applications, vol.1, no.1, pp.190-197, Kocaeli, Turkey.

Çamalan, G., Akgündüz, A.S., Ayvaci, H., Çetin, S., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017). SPEI indisine göre Türkiye geneli kuraklık değişim ve eğilim projeksiyonları. IV. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi, TİKDEK 5-7 Temmuz, İstanbul.

Çobaner, M., Çıtakoğlu, H., Haktanır, T., & Yelkara, F. (2018). Determination of optimum Hargreaves-Samani equation for Mediterranean region. Dicle University Journal of Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 181–190.

Droogers, P., & Allen, R.G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data condition. Journal of Irrigation and Drainage Systems, vol. 16, no. 1, pp. 33-45.

Elfatih, A., Eltahir, B., & Yeh, P.J.F. (1999). On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. Water Resour. Res., vol. 35, pp. 1199–1217.

Gibbs, W.J., & Maher, J.V. (1967). Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology Bulletin, 48, Melbourne, Australia.

Guttman, N.B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. Journal of American Water Resources Association, vol. 35, no. 2, pp. 311-322.

Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference cropevapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric., vol. 1, no. 2, pp. 96-99.

IPCC (2001). Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge and New York.

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge and New York.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bexand P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- IPCC (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. 234 Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
- Kadioğlu, M. (2008). Kuraklık Kırımı Risk Yönetimi. Ed: Kadioğlu, M. ve Özdamar, E., Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri. JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, s. 277-300, Ankara.
- Kassaye, A.Y., Shao, G., Wang, X., & Wu, S. (2021). Quantification of drought severity change in Ethiopia during 1952–2017. *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, no. 4, pp. 5096–5121.
- Kumanlioglu, A.A. (2020). Characterizing meteorological and hydrological droughts: A case study of the Gediz River Basin, Turkey”, *Meteorological Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 1-17.
- Li, X., He, B., Quan, X., Liao, Z., & Bai, X. (2015). Use of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982–2012. *Remote Sens.*, vol. 7, no. 8, pp. 10917-10937.
- Liu, L., Yang, H., Hocker, J.E., Shafer, M.A., Carter, L.M., Gourley, J.J., Bednarczyk, N.C., Yong, B., & Adhikari, P. (2012). Analyzing projected changes and trends of temperature and precipitation in the southern USA from 16 downscaled global climate models. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 109, pp. 345–360.
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J.A., Martin-Vide, J., Bech, J., & Rodrigo, F.S. (2018). Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmos. Res.*, vol. 200, pp. 153–168.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, pp.179-184, Anaheim, CA.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, vol. 391, pp. 202-216.
- Ogunrinde, A.T., Olasehinde, D.A., & Olotu, Y. (2020). Assessing the sensitivity of standardized precipitation evapotranspiration index to three potential evapotranspiration models in Nigeria. *Sci. Afr.*, vol. 8, pp. 1-16.
- Oliver, J.E. (1981). *Climatology: Selected Applications*. Edward Arnold 260 pp, London.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Pandey, R.P., & Ramasastri, K.S. (2001). Relationship between the commonclimatic parameters and average drought frequency. *Hydrol. Processes*, vol. 15, pp. 1019–1032.
- Pei, Z., Fang, S., Wang, L., & Yang, W. (2020). Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. *Water*, vol. 12, no. 7, pp. 1-20.
- Salvacion, A.R. (2021). Mapping meteorological drought hazard in the Philippines using SPI and SPEI”, *Spat. Inf. Res.*, vol. 29, no. 6, pp. 949–960.
- Şen, Z. (2005). İklim değişikliği ve su kaynaklarına etkisi. 22 Mart Dünya Su Günü İklim Değişikliğinin Su ve Enerji Kaynaklarımıza Etkisi Paneli, İstanbul.
- Şen, Z. (2009). Kuraklık afet ve modern hesaplama yöntemleri. 3. Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

- Shaowei, Z., Hongchao, Z., Pengcheng, R., Guangjie, X., Bangdong, L., Wencheng, D., & Liying, W. (2013). Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China”, *Clim. Environ. Res.*, vol. 18, pp. 617–625.
- Shukla, S., & Wood, A. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 2, pp. 1-7.
- Sırdaş, S. (2002). Meteorolojik kuraklık modellemesi ve Türkiye uygulaması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- SYGM, (2016). İklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi projesi, proje nihai raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/iklim%20de%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Finin%20su%20kaynaklar%C4%B1na%20etkisi/Iklim_NihaiRapor.pdf.
- Swed F. S., Eisenhart C. (1943). Tables for testing randomness of grouping in a sequence of alternatives. *Annals of Mathematical Statistics*, Cilt 14, s.66-87.
- Thom, H.C.S. (1958). A Note on the gamma distribution. *Mon. Weather Rev.*, vol. 86, pp. 117-122.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38, no. 1, pp. 55-94.
- Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI)” *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C*, vol. 106, pp. 1–10.
- Toros, H. (1993), *Klimatolojik Serilerden Türkiye İkliminde Trend Analizi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, vol. 9, no. 10, pp. 3-11.
- Türkeş, M. (2008a). Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, c. 1, s. 1., s. 45-64.
- Türkeş, M. (2008b). İklim değişikliği ve küresel ısınma olgusu: bilimsel değerlendirme. Yay. Haz; E.Karakaya, s. 21-57 *Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü: İklim Değişikliğinin Bilimsel, Ekonomik ve Politik Analizi*. Bağlam Yayınları No: 308, İstanbul.
- Vicente-Serrano, S.M., & Lopez-Moreno J.I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, pp. 523-533.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A Multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, pp. 1696-1718.
- Wang, H., Pan, Y., & Chen, Y. (2017). Comparison of three drought indices and their evolutionary characteristics in the arid region of northwestern China. *Atmos. Sci. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 132-139.
- Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (1987). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, vol. 10, no. 3, pp. 111–120.
- Willeke, G., Hosking, J., Wallis, J.R., & Guttman, N.B. (1994). The national drought atlas. U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Report 94.
- WMO (1997). Extreme agrometeorological events. CagM-X Working Group, Geneva.
- Wu, H., Hayes, M.J., Welss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, vol. 21, no. 6, pp. 745-758.
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2020). Spatial and Temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania. *J. Afr. Earth Sci.*, vol. 163, no. 1, pp. 1-12.

- Yuan, Y., & Zhou, W. (2008). Influences of the Indian Ocean Dipole on the Asian summer monsoon in the following year. *International Journal of Climatology*, vol. 28, no. 14, pp. 1849–1859.
- Yüce, M.İ., & Eşit, M. (2020). Determination of the drought risk map of Ceyhan Basin by SPI and SPEI methods. *Su Kaynakları*, c. 5, s. 2, pp. 1–8.
- Zhang, Q., Qi, T., Singh, V.P., Chen, Y.D. & Xiao, M. (2015). Regional frequency analysis of droughts in China: A multivariate perspective. *Water Resour. Manag.*, vol. 29, pp. 1767–1787.