

Kozmik Işın Nötron Sayacı ile Ölçülen Toprak Neminin Hidrolojik Modellerde Kullanımı

Mustafa Berk DUYGU¹
Zuhal AKYÜREK²

ÖZ

Kozmik ışınlar yeryüzüne çarptığında ortaya çıkan nötronlar hidrojen ile temas ettiklerinde enerjilerini kaybetmektedirler. Enerjisi azalmış nötronlar sayılarak bir bölgenin toprak nemi yüksek başarı ile tespit edilebilmektedir. Bu prensip ile çalışan kozmik ışın nötron sayacı (CRNP) ülkemizde ilk olarak Niğde-Çakıt havzasında denenmiş ve elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur. Yaklaşık 670 metre çapında bir alan için toprak nemi bilgisini sürekli olarak sağlayabilen CRNP, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte toprak nemi verisine ihtiyaç duyan hidrolojik çalışmalar için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. 11 Kasım 2016 ile 01 Temmuz 2019 tarihleri arasında, CRNP ile saatlik olarak düzenli veri temini yapılmış olup, elde edilen verilerin aynı bölgede bulunan zaman alanı reflektometresi (TDR) cihazıyla da çok uyumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Biriktirmeli kavramsal bir model olan NAM modeli ile hidrolojik değişkenlerin akıma olan etkileri belirlenebilmektedir. Bu çalışmada CRNP ile elde edilen toprak nemi verileri NAM kavramsal modelinin iyileştirilmesinde kullanılmış, modelin kalibrasyonunda toprak nemi verilerinin de dikkate alınmasıyla Çakıt Havzası debi verileri için Kling-Gupta Verimlilik skoru 0,56(Kalibrasyon) ve 0,42(Doğrulama)'dan 0,81(Kalibrasyon) ve 0,64(Doğrulama)'ya yükselmiştir. Hem Çakıt Havzası hem de Darboğaz Alt Havzası için istatistiksel ölçütlerin çoğunda benzer gelişmeler kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kozmik ışın nötron sayacı, CRNP, toprak nemi.

ABSTRACT

Using Soil Moisture Measured by the Cosmic Ray Neutron Probe in Hydrological Models

Scattered neutrons which occur as a result of the collision between cosmic rays and the Earth surface, lose their energy when they come into contact with hydrogen. The soil moisture of

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 25 Ağustos 2021 günü ulaşmıştır. 14 Nisan 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.986949>

1 T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara
mustafaberk.duygu@tarimorman.gov.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0946-3656>

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara
zakyurek@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3744-2702>

a region can be determined with high success by counting these neutrons with reduced energy. Cosmic ray neutron probe (CRNP) works using this principle, it was first tested in Turkey at Çakıt basin and the results are presented in this study. CRNP can continuously provide soil moisture information for an area with a diameter of approximately 670 meters, thus, constitutes an important alternative for hydrological studies that require soil moisture data with high spatial and temporal resolution. Between 11 November 2016 and 01 July 2019, regular hourly data were obtained with CRNP, and it was determined that the data has very consistent results with the time domain reflectometer (TDR) located in the study area. NAM, which is a lumped conceptual model, helps determining the effects of hydrological variables on the discharge outputs. In this study, soil moisture data obtained with CRNP were used to improve the NAM conceptual model and Kling-Gupta Efficiency score for the discharge data of Çakıt Basin increased from 0.56(Calibration) and 0.42(Validation) to 0.81(Calibration) and 0.64(Validation). Similar improvements were noted for most of the statistical measures for both Çakıt Basin and Darboğaz sub-basin.

Keywords: Cosmic ray neutron probe, CRNP, soil moisture.

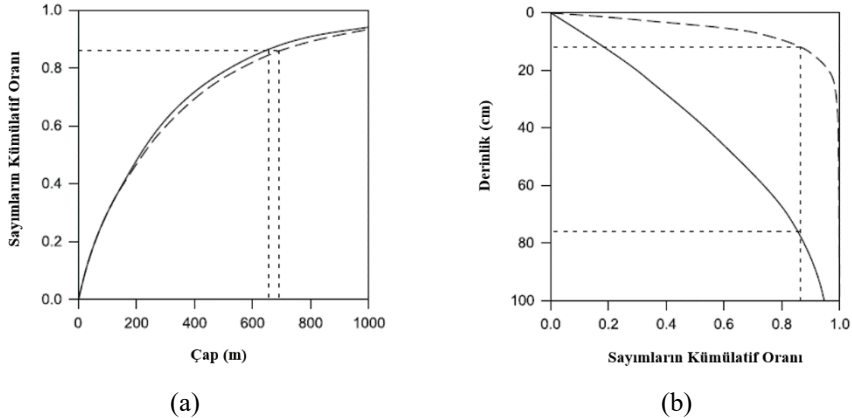
1. GİRİŞ

Toprak nem içeriği hidrolojik döngünün önemli değişkenlerinden biridir ve su kaynakları mühendisliğinin çeşitli alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Mekânsal ve zamansal çözünürlüğü uygun olan toprak nemi verisine sahip olduğunda taşkın ve kuraklık gibi doğal afetlerin risk seviyesinin belirlenmesinden tarımsal sulama sistemlerinin etkinliğinin artırılmasına kadar birçok farklı alanda karar alma süreçleri geliştirilebilmektedir. Toprak su içeriğini ölçmek için çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. 19. Yüzyıldan beri laboratuvar testleri ile toprağın önce tartılması, ardından fırınlanması ve tekrar tartılması ile buharlaşan su miktarının ve dolayısıyla toprak nem içeriğinin tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntem yalnızca örnek alınan kısıtlı bir alan için doğru sonuç vermektedir. Ayrıca, zaman içerisinde tekrarlanarak toprak neminin zaman ile değişiminin elde edilmesi çok yoğun iş gücü ve maliyet gerektirmektedir. Bu şekilde elde edilen toprak nemi verisi, uygun mekânsal ve zamansal çözünürlüğe sahip değildir. Bu nedenle toprak nemini tespit etmek için laboratuvar testine alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Toprağın elektromanyetik özelliklerinin nemliliğe karşı değişimini kullanarak “Zaman Alanı Reflektometresi (TDR)” yöntemi geliştirilmiştir [1]. Bu yöntem ile aynı nokta ve toprak derinliği için farklı zamanlarda toprak nemi ölçümü yapmak kolaylaşmış olsa da TDR yönteminin ölçüm alanı kısıtlıdır. Jeofiziksel yöntemler kullanılarak da toprağın nem miktarı belirlenmektedir. Bu anlamda yer radarı olarak da bilinen GPR metodu [2] ile geniş alanlar ve farklı toprak derinlikleri için toprak nemi ölçümü yapılabilmektedir ancak bu yöntem ile sürekli olarak toprak nemi ölçümü yapmak için yoğun emek, bilgi birikimi ve kaynak ihtiyacı gerekmektedir. Yer gözlemlerinin yanı sıra uydular aracılığı ile de toprak nemi saptanabilir. Pasif ve aktif mikrodalga uzaktan algılama yöntemleri [3, 4] ile de toprağın ilk birkaç santimetrelük bölümündeki su miktarı ile ilgili fikir sahibi olmak mümkündür, ancak uyduların ürünlerinin mekânsal çözünürlüğü onlarca hektar olabilmekte, uyduların dünyanın etrafındaki hareket hızına bağlı olarak aynı nokta için ölçüm sıklıkları haftalar düzeyini bulabilmektedir. Bütün bu ölçüm türlerinden farklı olarak, toprak nem içeriği ortamda bulunan yavaşlatılmış nötron miktarının sayılması sonucu da ölçülebilmektedir. Nötron sayıları ve toprak su içeriği arasındaki ilişki belirlendikten sonra [5] ilk nötron sayaçları

geliştirilmiştir. Hızlı nötronlar havada çeşitli elementlerle karşılaştıklarında hızlarını kaybederler, hidrojen bu noktada diğer elementlere kıyasla çok daha etkili olduğundan yavaşlatılmış nötron sayısı ortamdaki hidrojen miktarı hakkında bilgi verebilmektedir. Hidrojen de doğada en çok su formunda bulunduğundan nötron sayaçları ile su miktarı ölçülebilmektedir. İlk nötron sayaçları nötron kaynağı olarak radyoaktif elementler kullanmaktaydılar. Bu maddelerin kontrolü çevre açısından problem oluşturduğundan sürekli olarak kullanılmaları ve cihazın çalışma alanında bırakılıp sürekli olarak veri sağlanması mümkün değildir. 2008 yılında keşfedilen kozmik ışın toprak nemi sayacı [6, 7] bu sorunu ortadan kaldırmış ve kozmik ışınların nötron sayaçlarında nötron kaynağı olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Kozmik ışınlar ilk olarak 20. yüzyılın başlarında tanımlanmış olup [8], sonrasında kozmik ışınların yeryüzü ile teması sonucu oluşan parçacıklar keşfedilmiştir [9]. Toprak su içeriği ile düşük enerjili nötron sayısı arasında bir ilişki olduğuna dair literatürde çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [10, 11, 12]. Yavaşlatılmış nötronların nasıl ölçüleceği ise Knoll, 2010 tarafından [13] detaylı olarak açıklanmıştır. Kozmik ışın nötron sayaçlarının [6] keşfi ile de kozmik ışınların yeryüzüne ulaşması ile yavaşlatılmış nötronların toprak nemi ölçümünde ne şekilde kullanılacağı belirtilmiştir. 2015 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada [14], model kaynaklı toprak nemi verisi ile uydu kaynaklı bitki gelişimi verilerinin ülkemizde zamansal ve mekânsal olarak geniş ölçekli hidrolojik çalışmalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu çalışmada kozmik ışın nötron sayaçları ile toprak nemi ölçümünün detayları ve Türkiye'deki örnek uygulaması ortaya konulmuş olup CRNP ile elde edilen toprak nemi verisinin hidrolojik modelleri iyileştirmede kullanımı tartışılmıştır.

2. KOZMİK IŞIN NÖTRON SAYACI (CRNP)

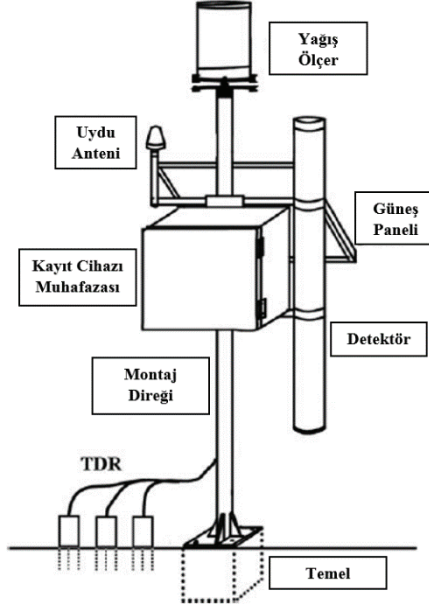
Kozmik Işın Nötron Sayaçları (CRNP) ile toprak neminin ölçümü hidrojen atomları ile yavaşlatılmış nötronların sayılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile yaklaşık 600 m



Şekil 1 - a) CRNP'den yatay olarak uzaklaşılması ile nötron sayımlarının değişiminin kümülatif oranı, b) Derinlik ile nötron sayımları değişiminin kümülatif oranı arasındaki ilişki. Düz çizgi kuru toprak durumunu, kesikli çizgi ise %40 doyumluk oranındaki toprak durumunu göstermektedir. [6]

çapındaki bir alan için sürekli olarak (saatlik) toprak nemi verisinin ölçülmesi mümkün olmaktadır [15]. Bu seviyedeki bir mekânsal ve zamansal çözünürlük toprak nemi verisine ihtiyaç duyan birçok hidrolojik çalışma için yeterli olmaktadır. CRNP'lerin yataydaki ölçüm alanı büyüklüğü toprak neminden bağımsız olarak belirlenebiliyor olmakla birlikte (Şekil 1-a), düşeydeki ölçüm alanı yani ölçüm derinliği, toprak nem miktarı ile ters orantılıdır (Şekil 1-b) [6].

CRNP'lerin şematik görünümü Şekil 2'de gösterilmektedir. CRNP içerisinde yer alan nötron detektörü bir veri kaydediciye bağlanmıştır. Güneş paneli ile enerji ihtiyacı karşılanan CRNP yudu ya da şebeke bağlantısı ile sürekli olarak anlık veri sağlayabilmektedir.



Şekil 2 - Kozmik Işın Nötron Sayacının Kurulum Şeması [16]

3. CRNP İLE TOPRAK NEMİNİN ELDE EDİLMESİ

3.1. CRNP ile Elde Edilen Yavaşlatılmış Nötron Sayımlarının Çevresel Etkiler Hesaba Katılarak Düzeltilmesi

Kozmik ışınların şiddeti ve dünyamıza ulaştığında göstereceği etkileri farklı bölgelerde farklı şekillerde olabilmektedir. Bu farklılıklar temelde hava basıncı, havadaki su buharı miktarı ve uzaydan gelen kozmik ışınların yoğunluğu ile ilişkilidir.

Atmosferik hava basıncına göre nötron sayılarının düzeltilmesi deniz seviyesinin referans atmosferik basıncı ve atmosferik azaltım katsayısı kullanılarak gerçekleştirilir (Denklemler 1)[17].

$$f_p = \exp[\beta(P - P_{ref})] \quad (1)$$

Kozmik ışın kaynaklı nötronlar yalnızca toprak nemi ile değil hidrojen içeriği olan su buharı ile de yavaşlatılabilirler. Havanın içerdiği neme yönelik olarak nötron sayılarının düzeltilmesi referans koşullardaki mutlak nem değeri kullanılarak gerçekleştirilir. (Denklemler 2) [18].

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(\rho_{v0} - \rho_{v0}^{ref}) \quad (2)$$

Son olarak da dünyamıza gelen kozmik ışınların yoğunluğunun değişkenliği göz önüne alınarak bir düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda ölçüm yapan ve nötron akısı ölçen cihazlar dünyanın farklı yerlerinde bulunmakta ve Neutron Monitor Database (NMDB) kapsamında verilerini yayınlamaktadırlar [19]. Bu cihazlar tarafından gerçekleştirilen ölçümler CRNP'den farklı olarak su miktarından etkilenmez çünkü CRNP yalnızca yavaşlatılmış nötronları ölçmektedir. Referans olarak jeomanyetik kesme rijitliği CRNP'nin kurulduğu alana yakın olan bir NMDB istasyonu seçilerek Denklem-3 kullanılarak gelen nötron akısının değişimine göre düzeltmeler gerçekleştirilir.

$$f_i = \frac{I_m}{I_{ref}} \quad (3)$$

Sayılan her bir etmen için bir düzeltme katsayısı belirlendikten sonra nötron sayılarının düzeltilmesi Denklem-4 kullanılarak gerçekleştirilir. [16]

$$N = N_{raw} \left(\frac{f_p f_{wv}}{f_i} \right) \quad (4)$$

3.2. Düzeltilen Nötron Sayıları ile Toprak Nemi Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

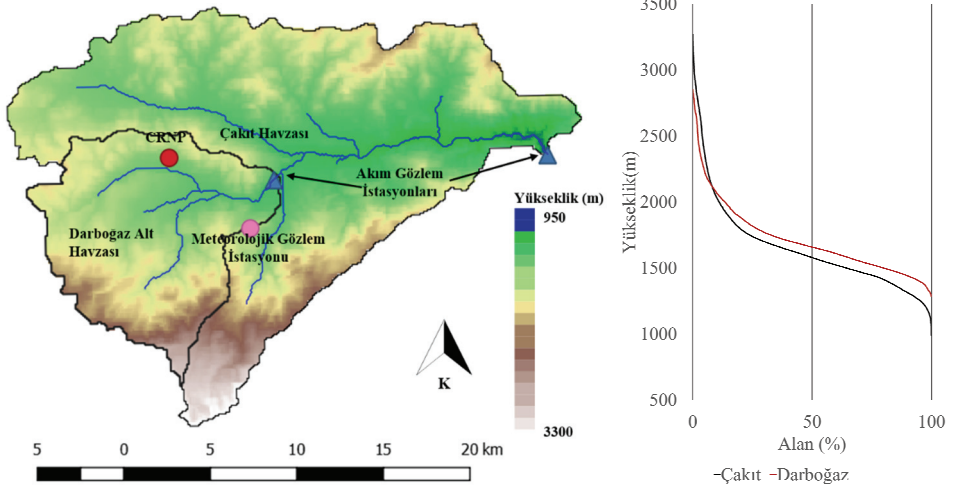
Enerjisi azaltılmış nötron sayıları ile toprak su içeriği arasında doğrusal olmayan ters bir orantı bulunmaktadır [7]. MCNPX nötron parçacık modeli kullanılarak [20] farklı nötron sayımlarında toprak neminin nasıl değiştiğinin hesaplanabilmesi için N_0 kalibrasyon yöntemi oluşturulmuştur [7]. Sonrasında kristal kafes suyu ve topraktaki organik maddelerin de nötron sayılarını doğrudan etkileyeceği ortaya konmuş ve N_0 kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir [21, 22, 23].

Bu yönteme göre toprak nem içeriği Denklem-5 [16] kullanılarak hesaplanabilir.

$$\theta = \left(\frac{0.0808}{\left(\frac{N}{N_0}\right)^{-0.372}} - 0.115 - w_{lat} - w_{SOM} \right) \rho_{bd} \quad (5)$$

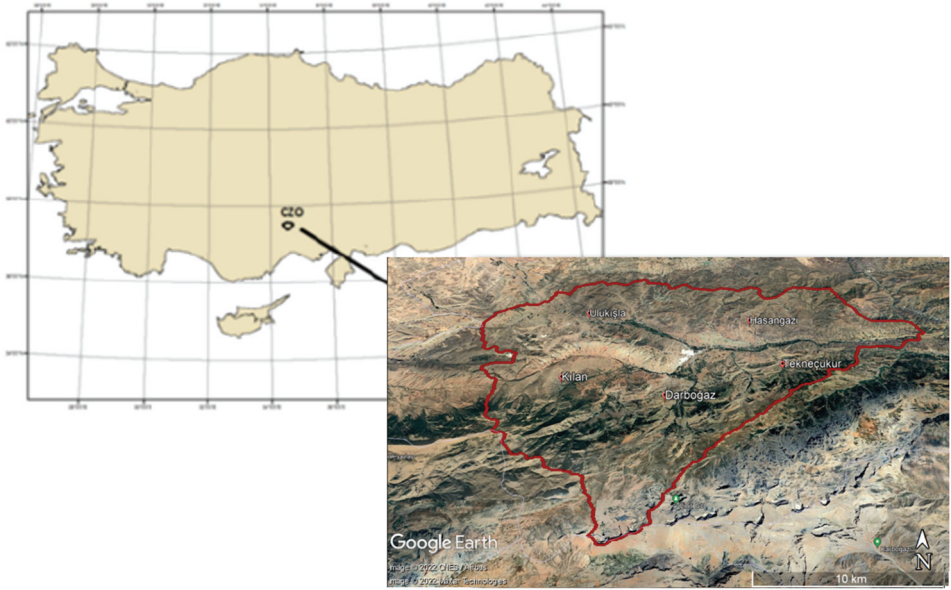
4. ÖRNEK CRNP UYGULAMASI (ÇAKIT HAVZASI)

Çakıt Havzası çalışma alanına (Şekil 3) kurulan CRNP istasyonundan TUBITAK 115Y041 Projesi kapsamında 11 Kasım 2016 – 01 Temmuz 2019 tarihleri arasında veri alınmıştır. 2016 yılı aralık ayında gerçekleşen aşırı kar yağışı nedeniyle meydana gelen veri kaybı hariç bölgeden sürekli olarak saatlik veri akışı sağlanmıştır.



(a)

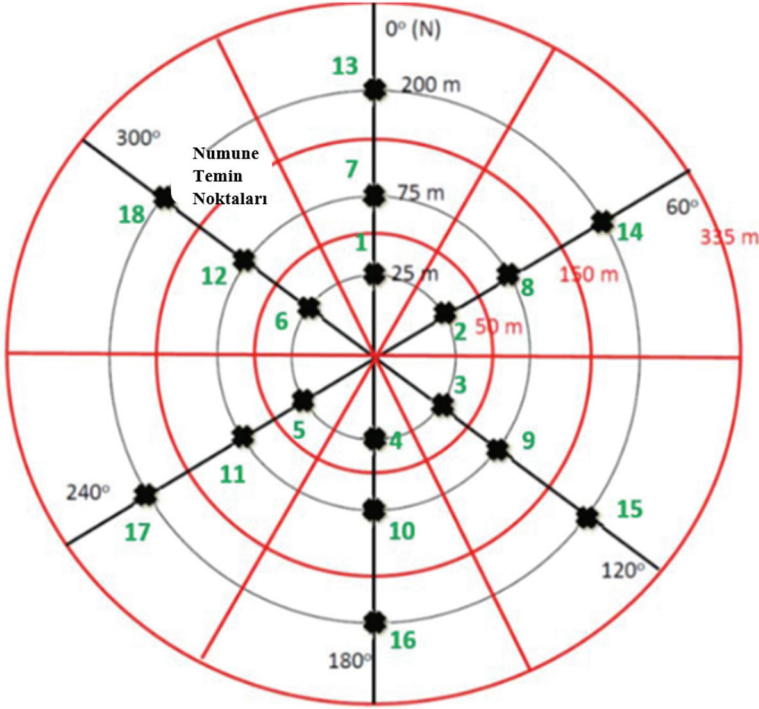
(b)



(c)

Şekil 3 - Niğde İli Çakıt Havzası Çalışma Alanı, a) Sayısal Yükselti Haritası, b) Hipsometrik Eğriler, c) Havzanın Türkiye'deki Yeri

N_0 kalibrasyon yönteminin çalışma alanında uygulanması için gerekli olan referans örnekleme çalışması 3 ve 5 Aralık 2016 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen her bir numune temin noktası (Şekil 4) için 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 cm derinliklerinden numuneler alınmıştır [24].



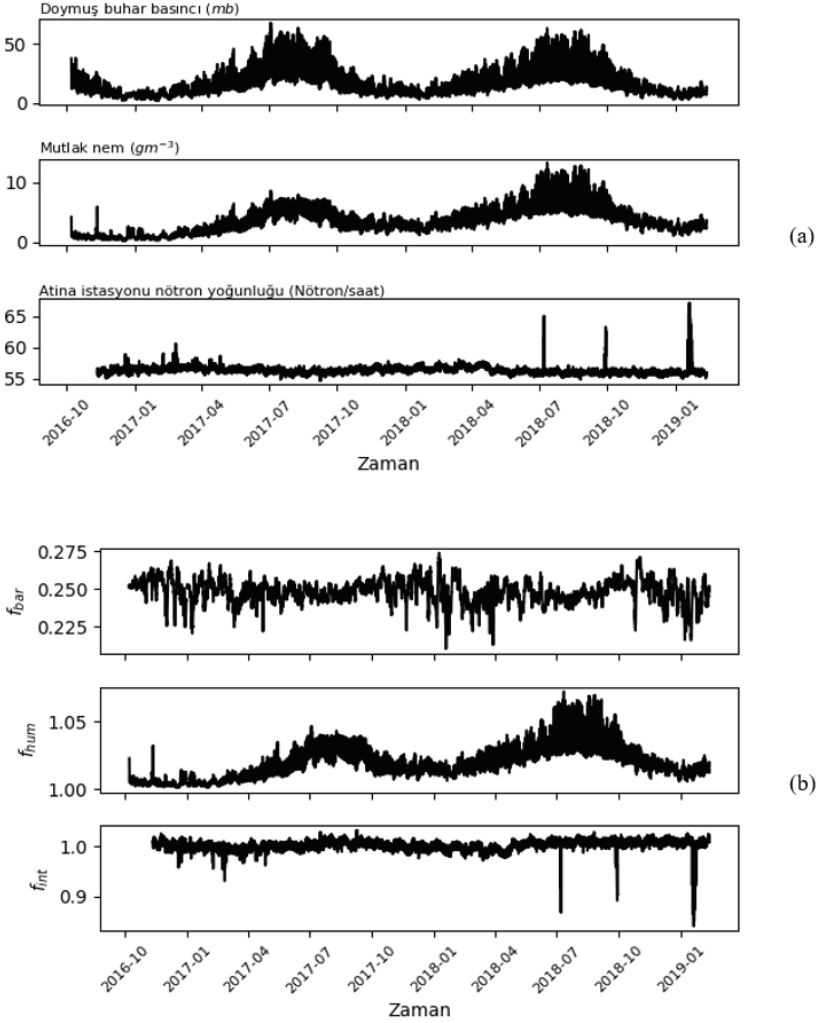
Şekil 4 - Toprak Referans Örnekleme Çalışması Numune Temin Noktaları [24]

Örnekleme çalışmasından elde edilen örneklerin laboratuvar testleri sonucunda ortalama toprak su içeriği 0.148kg/kg olarak belirlenmiştir. Örneklerin ortalama yoğunluğu 1.495 gr/cm³'tür. Kristal kafes suyu ve organik madde değerleri ihmal edilebilecek kadar az olduğu için 0 olarak alınmıştır. Bu durumda Denklem-5'e göre N_0 değeri saatte 1933,4 sayım olarak hesaplanmıştır ve bundan sonraki bütün toprak nemi hesaplamalarında bu değer kullanılmıştır.

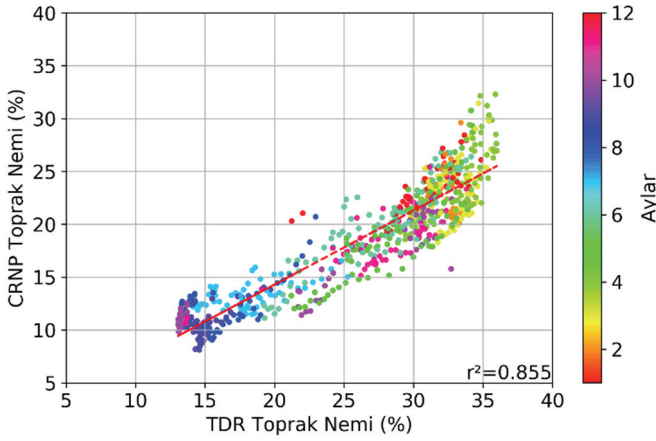
Cihazın kullanımı için gerekli olan nötron sayımı düzeltmeleri, çalışma alanında yer alan Ulukışla Meteorolojik Gözlem İstasyonu'ndan elde edilen veriler ile gerçekleştirilmiştir. Dünyamıza ulaşan kozmik ışınların yoğunluğu ile ilgili düzeltme için NMDB veri tabanında bulunan ve Çakıt Havzasına en yakın jeomanyetik kesme rijitliğine sahip olan Atina istasyonu referans olarak alınmıştır. Her iki istasyonun bulunduğu bölgenin kesme rijitliği 7.9 GV olduğu için ilave bir düzeltme gerçekleştirilmemiştir. Söz konusu düzeltmelerde kullanılan değişkenler ve düzeltme katsayıları Şekil 5'te gösterilmektedir.

N_0 yöntemi kullanıldığında, nötron sayımları doğrudan toprak nemi ile ilişkilendirilir ve hesaplamalar buna göre gerçekleştirilir. Ancak kış aylarında havzada kar birikmesi olduğunda nötron sayımları yalnızca toprak nemi ile değil kar miktarı ile de ilişkilidir ve yavaşlatılan nötronların ne kadarının kardan ne kadarının toprak neminden etkilendiğini anlamak imkânsız hale gelir. Bu nedenle havzada kar yükü olan dönemler analizlerden çıkarılmıştır.

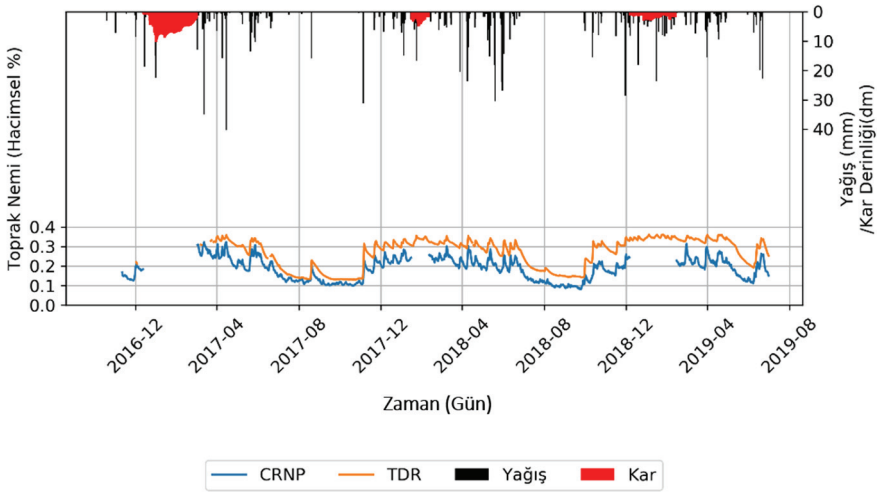
Elde edilen toprak nemi zaman serisi çalışma alanında CRNP'nin hemen yanında 5 cm derinliğe yerleştirilmiş olan TDR toprak nemi ölçüm cihazı ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6a ve Şekil 6b).



Şekil 5 - Çakıt Havzası CRNP Nötron Düzeltmeleri İçin Gerekli Olan Çevresel Değişkenler (a) ve Hesaplanan Düzeltme Katsayıları (b)



(a)



(b)

Şekil 6 - Çakıt Havzasında CRNP ve TDR ile Ölçülen Toprak Neminin Karşılaştırılması a) Dağılım Grafiği, b) Zaman Serisi

5. CRNP TOPRAK NEMİ VERİSİNİN KAVRAMSAL HİDROLOJİK MODELLEMEDE KULLANIMI

Hidrolojik çalışmalarda havza ölçeğinde sürekli veri elde etmek en büyük zorluklardan birini oluşturmaktadır. Kozmik Işın Nötron Algılama (CRNS) ile toprak nemi ölçüm metodu, diğer yöntemlere kıyasla yatayda daha geniş ölçüm alanına sahip olması nedeniyle [6] ölçümleri havzayı daha iyi temsil etmekte ve bu da verilerin hidrolojik çalışmalarda kullanılması için çok önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Hidrolojik modellerin debi verileriyle kalibrasyonu, hidrolojik çalışmalarda en yaygın yaklaşım olmasına rağmen, hidrolojik modellerin toprak nem verileri [25, 26, 27] kullanılarak kalibrasyonunu içeren çalışmalar da

bulunmaktadır. Széles vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kavramsal hidrolojik modelin toprak nemi kullanıldığında etkinliğinin önemli ölçüde arttığı sonucuna ulaşılmıştır [27]. Bir diğer çalışmada ise [25] hidrolojik modellerin geliştirilmesinde CRNS kaynaklı verilerin kullanımı değerlendirilmiş ve Birleşik Krallıkta bulunan nemli özelliklere sahip çalışma alanında bu yöntemin hidrolojik model sonuçlarına az da olsa geliştirici etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, Türkiye'de bulunan yarı kurak bir çalışma sahası olan Çakıt Havzası için hidrolojik modelin kalibrasyonunda CRNS tabanlı toprak nemi verilerinin kullanılmasının faydaları araştırılmıştır. Çakıt Havzası (421 km²) ve alt havzalarından biri (Darboğaz Alt Havzası – 121 km²) için hidrolojik çalışmalar yapılmıştır (Şekil 3-a) Çakıt havzasının ortalama yüksekliği 1580 m, Darboğaz alt havzasının ortalama yüksekliği ise 1659 m'dir (Şekil 3-b).

Kavramsal hidrolojik modelin kalibrasyonunda toprak nemi verisinin sürekliliği önem arz ettiğinden kar birikmesi vb. nedenlerle CRNP ile ölçülemeyen toprak nemi verisi TDR ve havzadaki meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler ile çalıştırılan Noah Yer Sistem Modelinden (Noah LSM) elde edilen toprak nemi verisi ile doldurulmuştur [28].

Debi verileri, Şekil 3-a'da gösterildiği gibi biri Darboğaz alt havzasının çıkışında, diğeri ise Çakıt havzasının çıkışında yer alan iki akım gözlem istasyonundan elde edilmiştir.

5.1. Kullanılan İstatistiksel Ölçütler

Bu çalışmada, gözlenen debi ve toprak nemi değerleri, model ile üretilen değerler ile çeşitli istatistiksel ölçütler kullanılarak karşılaştırılmış ve bu sayede hidrolojik modelleme performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, kalibrasyon ve doğrulama periyotları ayrı ayrı dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan istatistiksel ölçütler; Nash Sutcliffe Verimliliği (NSE) [29] (Denklem-6), Logaritmik Nash Sutcliffe Verimliliği (logNSE) (Denklem- 7), Ortalama Kare Hatası (RMSE) [30] (Denklem-8), Yüzde Sapma (PBIAS) [31] (Denklem-9), Korelasyon Katsayısı (r²) [32] (Denklem-10), Görelî Hacim Hatası (VE) [33] (Denklem-11) ve Kling-Gupta Verimliliği (KGE)'dir [34] (Denklem-12). NSE hesabında, mükemmel bir modelin NSE değerinin 1 olacağı düşünülerek bir hidrolojik modelin tahmin hatası hesaplanmaktadır. Logaritmik NSE ise genellikle düşük debilerin bir havzanın hakim karakteristiği olduğu durumlarda kullanılır. RMSE, simülasyonların ortalama hatasının doğrudan temsilidir. PBIAS, simüle edilen değerlerin gözlemlenenlerden farklı olma eğiliminin bir göstergesidir. r² değerleri -1 ile 1 arasında değişir; burada -1 tersine korelasyonu, 0 olmayan korelasyonu ve 1 de doğrudan doğrusal ilişkiyi gösterir. VE, kümülatif akım veya toprak nemi verilerinin tahmin edilmesindeki hatadır. KGE, doğrusal ilişkiyi, sapmayı ve varyans oranını temsil eden üç göstergenin birlikte değerlendirilmesi ile hesaplanmaktadır.

$$NSE_x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{sim}^i - x_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_{obs}^i - \bar{x}_{obs})^2} \quad (6)$$

$$\logNSE_x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(x_{sim}^i) - \ln(x_{obs}^i))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(x_{obs}^i) - \ln(\bar{x}_{obs}))^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{obs}^i - x_{sim}^i)^2} \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N x_{obs}^i - \sum_{i=1}^N x_{sim}^i}{\sum_{i=1}^N x_{sim}^i} \times 100 \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{cov(x_{obs}, x_{sim})}{\sigma_{x_{obs}} \sigma_{x_{sim}}} \quad (10)$$

$$VE_X = \frac{\sum_{i=1}^N x_{sim}^i - \sum_{i=1}^N x_{obs}^i}{\sum_{i=1}^N x_{obs}^i} \quad (11)$$

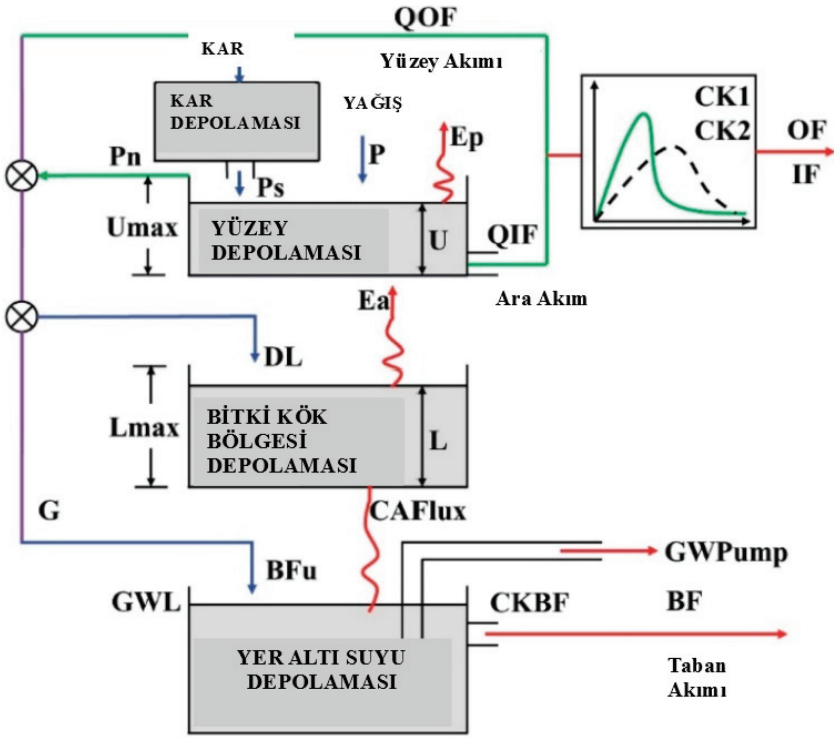
$$KGE_X = \sqrt{(1 - r)^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{x_{sim}}}{\sigma_{x_{obs}}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{x}_{sim}}{\bar{x}_{obs}}\right)^2} \quad (12)$$

Burada; x_{obs} , x_{sim} sırasıyla gözlemlenen ve simüle edilen değişken zaman serilerini (Örneğin gözlenen ve simüle edilen debi veya toprak nemi), \bar{x} ise değişkenin ortalama değerini ifade eder.

5.2. Nam Kavramsal Modeli

Kavramsal hidrolojik modeller, hidrolojik döngüdeki doğal ilişkileri taklit ederek hidrolojik döngü parametrelerinin tahmin edilmesi için kullanılır. Bu modeller genellikle havzalar ölçeğinde oluşturulur ve çalışılan alanın yağış-akış ilişkisini anlamak için kullanılır. Green-Ampt yöntemi [35], Rasyonel metod [36] ve Soil Conservation Services (SCS) Eğri Numarası yöntemi [37] dahil olmak üzere çeşitli özelliklerde farklı yağış-akış modelleri vardır. Kavramsal hidrolojik modeller, hidrolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür modellere örnek olarak HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) [38], HEC-HMS (Hidrolojik Modelleme Sistemi) [39] ve NAM (NedborAfstromnings Modeli) [40] verilebilir. Bu çalışmada, hidroloji alanındaki çeşitli uygulamalarda [41, 42, 43, 44, 45, 46] kullanılan toplu ve deterministik bir kavramsal model olan NAM [40] modeli kullanılarak yağış-akış ilişkisi araştırılmıştır. Suyun havzada üç farklı şekilde hareket edeceği (yüzey akışı, yüzey altı ve taban akışı) düşünülerek her bir zaman adımı için toprak neminin sürekli olarak hesaplanması NAM modelinin ana çalışma prensibidir. Bu nedenle gözlemlenen toprak nemi verilerinin kalibrasyonda kullanılması daha çok anlam kazanmaktadır. NAM ve benzeri toplu kavramsal modeller, bir havzanın özelliklerini tek bir parametre kümesi ve değişkenlerle temsil eder; burada, nihai parametre kümesini tahmin etmek için kullanılan modelin fiziksel yapısı, modelin hidrolojik gözlemler kullanılarak kalibrasyonuna dayanır. Her bir zaman adımı için, NAM, Şekil 7'de gösterildiği gibi [47] birbiriyle ilişkili dört tip depolamayı (kar, yüzey, kök veya alt bölge ve yeraltı suyu) kullanarak havza çıktısı olan akış verisini tahmin eder.

Bu çalışmada NAM modelinin kalibrasyonu üç farklı yaklaşımla yapılmıştır. İlk yaklaşım, gözlenen debiyi kullanarak modeli kalibre etmek, ikinci yaklaşım, modeli kök bölgesi için tahmin edilen toprak nemi verilerini kullanarak kalibre etmek ve üçüncü yaklaşım, hem gözlenen debiyi hem de toprak nemini kullanarak modeli kalibre etmektir.



Şekil 7 - NAM Kavramsal Modeli Şeması [46]

İlk yaklaşımda, modelin kalibrasyonu, Nash Sutcliffe Verimliliği değerleri NSE_Q (Denklemler-6) kullanılarak akım ölçme istasyonlarından elde edilen gözlenen akım verileri dikkate alınarak yapılmıştır. Amaç fonksiyonunun $(1 - NSE_Q)$ en küçük değerini elde etmek hedeflenmiştir. İkinci yaklaşımda, amaç fonksiyonunun $(1 - NSE_{SM})$ en küçük değerini elde etmek için toprak nem değerlerinin Nash Sutcliffe Verimliliği (NSE_{SM}) kullanılarak tahmini kök bölgesi toprak nemi verileri ile modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Üçüncü yaklaşımda ise, [48] tarafından önerilen metodoloji kullanılarak toprak nemi ve akım verisi birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımda en düşük değeri elde etmek için kullanılan amaç fonksiyonu Denklem-12 ile gösterilmektedir. Bu formüldeki F_Q ve F_{SM} sırasıyla akıma ve toprak nemine bağlı amaç fonksiyonlarını temsil etmekte olup "a" değeri akımın ağırlık katsayısını göstermektedir. Bu değer [49] tarafından önerildiği şekliyle 5/7 olarak alınmıştır. F_{SM} değerinin hesaplanması için Nash Sutcliffe Verimliliği $(1 - NSE_{SM})$ kullanılmakla birlikte F_Q değerinin hesaplanması için (Denklemler-13) farklı istatistiksel yöntemlerin kombinasyonu kullanılmıştır (Denklemler-14,15,16,17).

$$F_{joint} = a \cdot F_Q + (1 - a) \cdot F_{SM} \quad (12)$$

$$F_Q = F_{logNS} + F_{BoxNS} + F_{KGE} + F_{bias} \quad (13)$$

$$F_{logNS} = \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}^i + v) - \ln(Q_{obs}^i + v)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}^i + v) - \ln(Q_{obs}^i + v)]^2} \quad (14)$$

v : Sıfırdan Farklı En Küçük Akım Değeri

$$F_{BoxNS} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}^i - \bar{Q}_{obs})^2}, \left(Q' = \frac{(Q+1)^\gamma - 1}{\gamma}, \gamma = 0.3 \right) \quad (15)$$

$$F_{KGE} = \sqrt{(1-r)^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}\right)^2} \quad (16)$$

$$F_{bias} = \left[\max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}, \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right]^2 \quad (17)$$

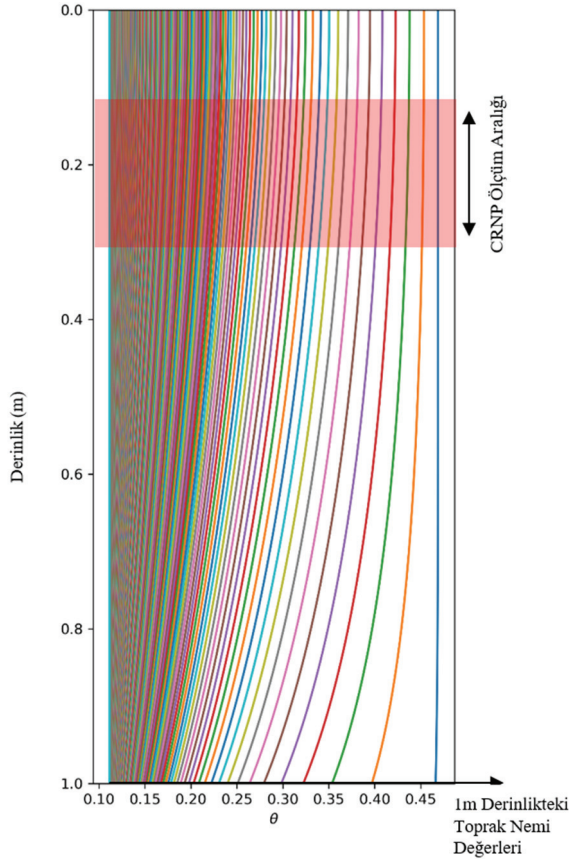
Modelin kalibrasyonu ve doğrulaması yağış, debi, potansiyel buharlaşma ve toprak nemi verileri kullanılarak yapılmıştır. Kalibrasyon dönemi 2016-10-01 ve 2018-09-30 arasındadır, doğrulama dönemi ise 2018-09-30 ve 2019-07-01 arasındadır.

5.3. Toprak Nemi Verisinin Model Çıktılarına Uyumlu Hale Getirilmesi

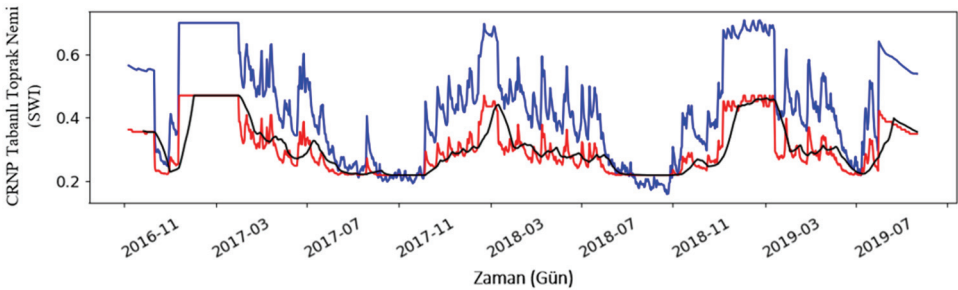
Bu çalışmada temelde CRNP ile elde edilen toprak nemi verileri kullanılmakla birlikte CRNP verisinin temin edilemediği dönemler için TDR ve Noah modelinden elde edilen toprak nemi değerleri kullanılmıştır. Farklı toprak nemi verilerinin farklı özellikleri bulunmakla birlikte bu çalışma için en büyük farklılık ölçüm derinliğinden kaynaklanmaktadır. Çakıt havzasında yer alan TDR 5 cm derinlikten ölçüm yaparken Noah modeli 4 farklı derinlikte toprak nemi değeri verebilmektedir. CRNP'nin ölçüm derinliği ise sabit olmamakla birlikte toprak nem miktarına bağlıdır [50]. CRNP'nin etkin derinliği (z^*) Denklem-18 ile tespit edilir [51].

$$z^* = \frac{5.8}{(\rho_{\{bd\}}\tau + \theta + 0.0829)} \quad (18)$$

Çalışmalarda kullanılan NAM kavramsal modeli de toprakta tutulan su miktarını bitki kök derinliği üzerinden tahmin etmektedir. Çakıt havzasında yer alan çalışma alanında toprak karakteristiklerine göre [52] 80 cm ile 120 cm arasında değişebilen olası çeşitli bitki köklenme derinliklerinin olduğu varsayılmış olup bu değer çalışmanın geri kalanında 1 metre olarak alınmıştır. Model ayrıca toprak nemini yüzey suyu indeksi (SWI) cinsinden vermekte olup model sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılabilmesi için ölçüm değerleri gözeneklilik değerine bölünerek SWI değeri elde edilmiş ve hesaplamalar bu şekilde gerçekleştirilmiştir. NAM kavramsal modeli için kabul edilen derinlikte toprak nemi değerlerini elde etmek için Richards denkleminin kapalı form çözümü [53] ve zaman alanında üstel filtreleme yaklaşımı [53] kullanılmıştır. CRNP'nin etkin derinliği bu çalışma için 12 ile 25 cm arasında değişmektedir ve her bir zaman adımı için, Şekil 8 ile verilen toprak nem profili kullanılarak kök bölgesi toprak nemi değerleri elde edilmektedir (Şekil 9).



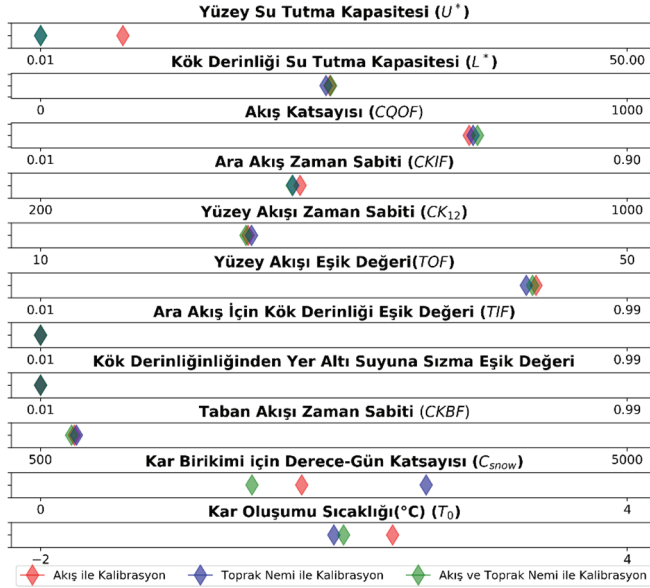
Şekil 8 - Richards Denklemine Göre Çakıt Havzası Toprak Nemi Düşey Profilleri, farklı renkler farklı muhtemel toprak nemi profillerini temsil etmektedir.



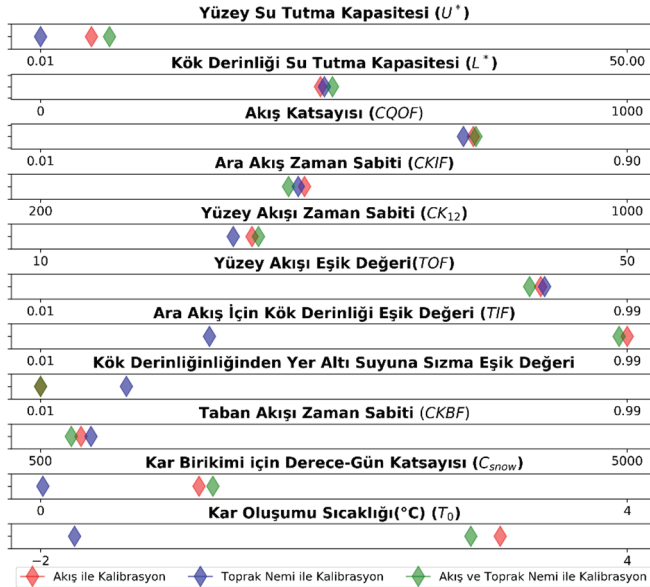
Şekil 9 - Bitki Kök Derinliği İçin Hesaplanan Toprak Nemi (Mavi: Ölçüm derinliğindeki toprak nemi, Kırmızı: Richards Denklemi ile Hesaplanan Kök Derinliği Toprak Nemi, Siyah: Üstel Filtreleme ile hesaplanan toprak nemi)

5.4. Nam Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

Üç farklı kalibrasyon yöntemi ile NAM modelinde kullanılan parametreler Çakıt ve Darboğaz havzalarında kalibre edilmiş, elde edilen sonuçlar Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir.

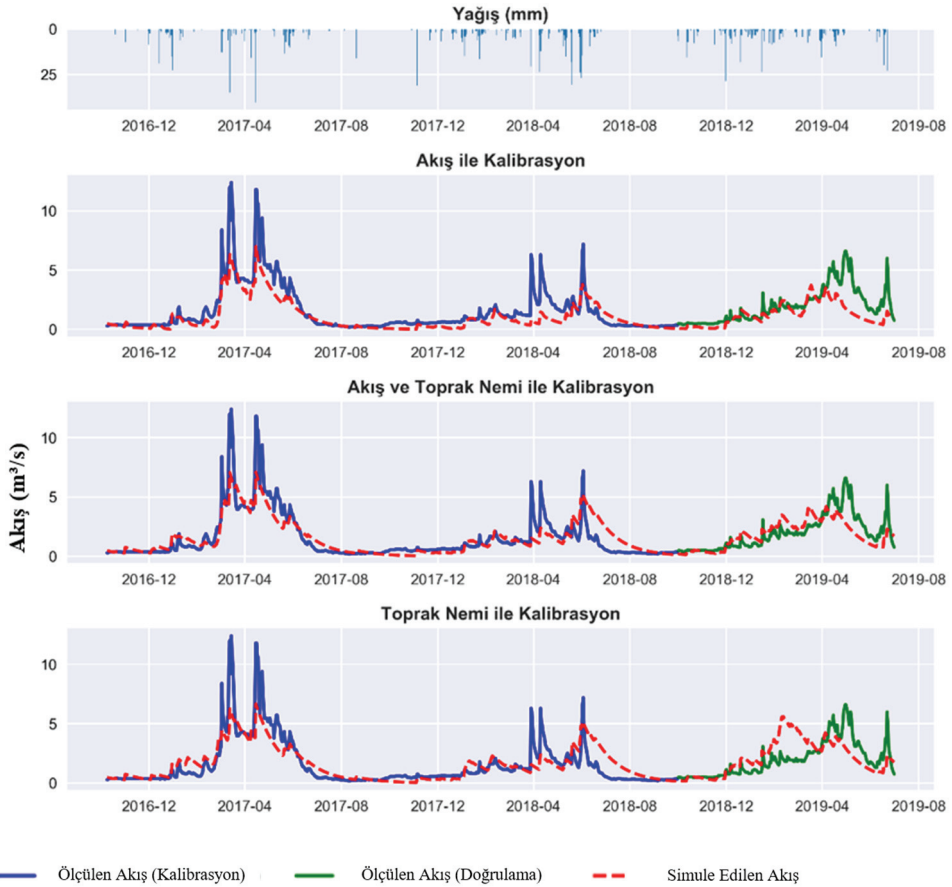


Şekil 10 - Çakıt Havzası İçin Kalibre Edilen Hidrolojik Model Parametreleri

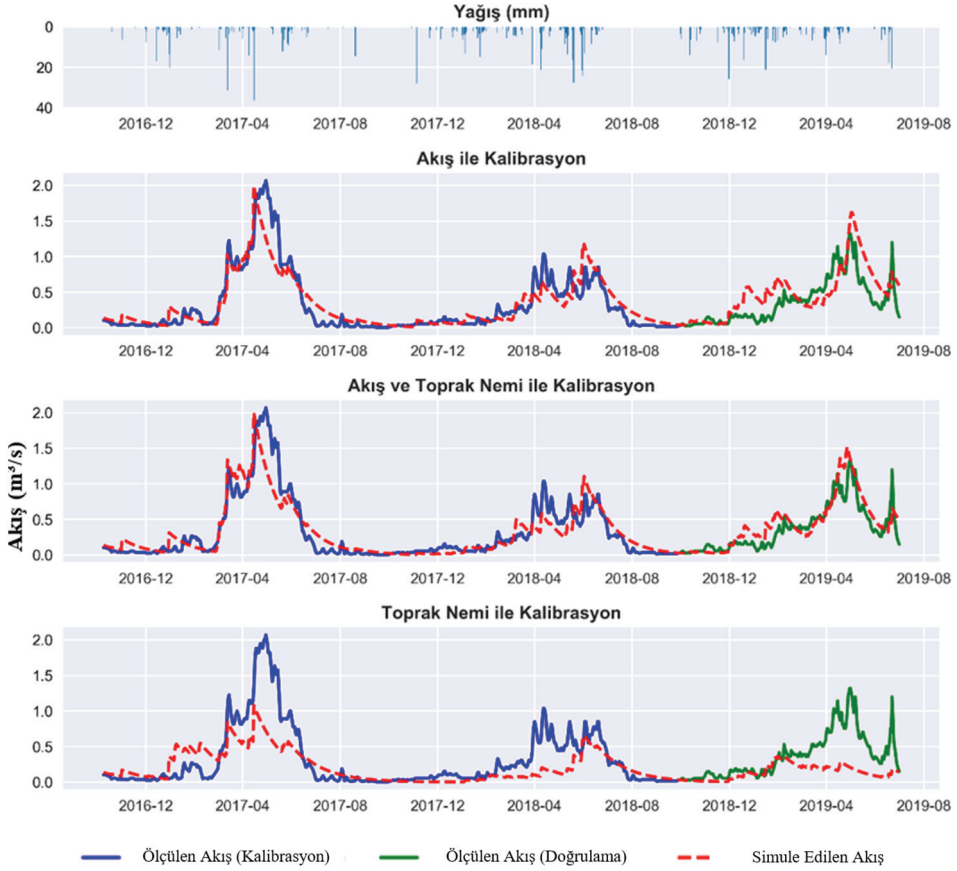


Şekil 11 - Darboğaz Alt Havzası İçin Kalibre Edilen Hidrolojik Model Parametreleri

NAM hidrolojik modeli, kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler kullanılarak çalıştırılmıştır. Çakıt havzası için, NAM modelinin kalibre edilen parametrelerinden Maksimum Yüzey Suyu Depolama(U^*), Kar Birikimi Derece-Gün Katsayısı (C_{snow}) ve Kar Oluşumu Sıcaklığı (T_0) farklı kalibrasyon türlerinde farklı değerler almıştır. Bu havzada toprak nemi kalibreli ve debi kalibreli modeller arasındaki temel fark, yüzey ve kar depolama hesaplamalarında ortaya çıkmaktadır. Çakıt Havzası'ndan farklı olarak Darboğaz Havzası için hesaplanan parametreler kalibrasyon tipine göre daha fazla farklılık göstermekte olup, bu havza için tüm su depolama çeşitlerinin hesaplanması her kalibrasyon tipi için birbirinden farklılık göstermektedir. Üç farklı kalibrasyon yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar Şekil 12'de (Çakıt havzası) ve Şekil 13'te (Darboğaz alt havzası) sunulmaktadır.



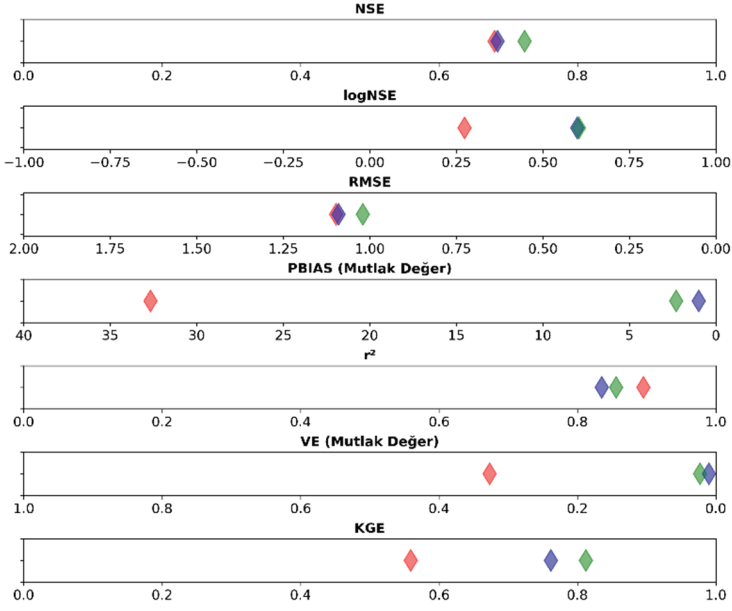
Şekil 12 - Çakıt Havzası İçin Hidrolojik Model ile Simüle Edilmiş ve Gözlenmiş Debi Değerleri



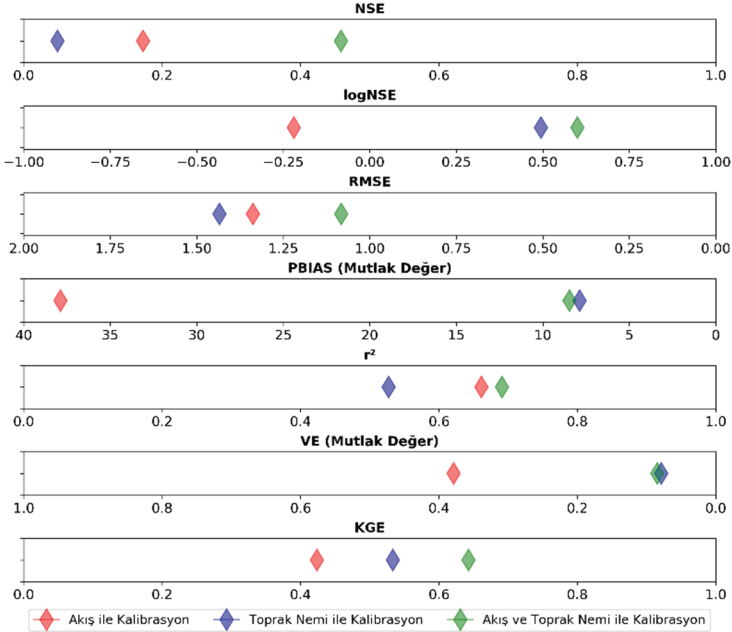
Şekil 13 - Darboğaz Havzası İçin Hidrolojik Model ile Simüle Edilmiş ve Gözlenmiş Debi Değerleri

Model performanslarını gösteren istatistikler Şekil 14 ve Şekil 15 ile gösterilmektedir. Bu şekillerde gösterilen sonuçlar şeklin sağ tarafına yaklaştıkça model istatistiklerinin de iyileştiği görülebilmektedir. Söz konusu grafiklerde, debi ve toprak nemi ile kalibrasyon sonucu elde edilen değerlerin yalnızca debi ile elde edilen değerlere kıyasla genel olarak şekillerin sağına daha yakın olması toprak nemi verisi ile hidrolojik model istatistiklerinin iyileştirilebildiğinin bir göstergesidir.

Şekil 14 ve Şekil 15 ile sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, modele debi verileriyle birlikte toprak nemi verilerinin dahil edilmesi durumunda ortaya çıkan istatistiklerin daha iyi olduğu görülebilmektedir. NSE ve KGE değerleri toprak neminin modelde kullanılması ile önemli ölçüde iyileştirilmiştir. İki havza karşılaştırıldığında, toprak nemi verileri kalibrasyona dahil edildiğinde Darboğaz alt havzası için istatistiksel ölçütlerin iyileşmesi daha belirgin olmuştur. İstatistiksel ölçütlerin bir kısmında, kalibrasyon için tek başına toprak nemi verilerinin kullanılması bile model tahminlerini iyileştirmiştir, ancak en iyi sonuçlar toprak nemi ve debi değerleri birlikte kullanıldığında elde edilmektedir.

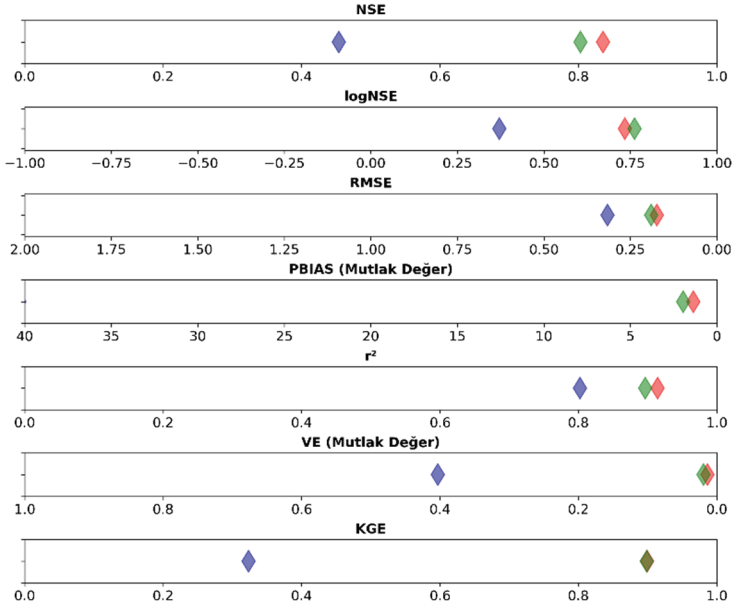


(a)

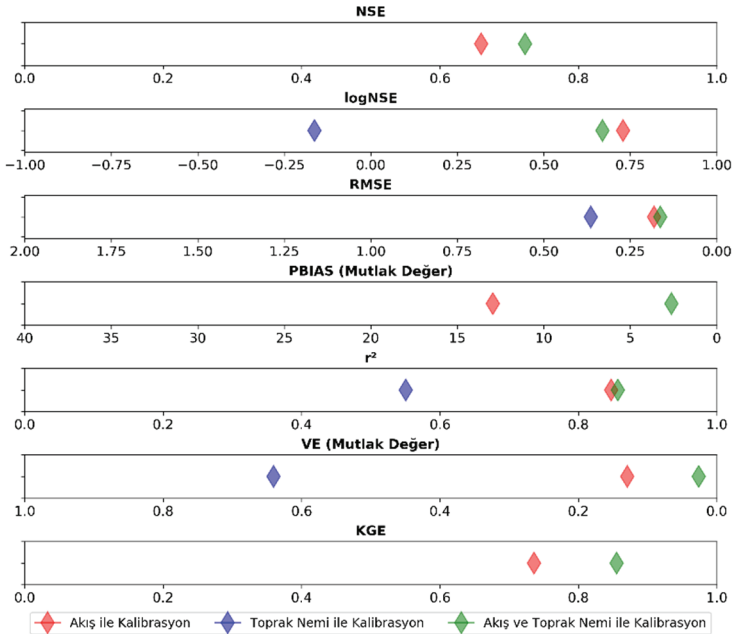


(b)

Şekil 14 - Çakıt Havzası için üç Farklı Kalibrasyon Yöntemi ile Elde Edilen Model İstatistikleri: (a) Kalibrasyon Dönemi (b) Doğrulama Dönemi



(a)



(b)

Şekil 15 - Darboğaz Havzası için üç Farklı Kalibrasyon Yöntemi ile Elde Edilen Model İstatistikleri: (a) Kalibrasyon Dönemi (b) Doğrulama Dönemi

Modelin kalibrasyon periyodu, bu tür çalışmalar için çok sınırlı bir zaman aralığı olarak değerlendirilebilecek olan iki su yılını kapsamaktadır. Kalibrasyon için kullanılan sürenin yetersizliğine rağmen, doğrulama periyodunda debi değerleri oldukça doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Kalibrasyon periyodunun daha uzun olduğu koşullarda, modelin ısınma süresi de hesaba katılarak ilk birkaç aylık kalibrasyon verileri analizlerden çıkarılarak çok daha iyi istatistikler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, CRNP'nin eksik verileri diğer toprak nemi verileri (TDR ve Noah LSM) ile doldurulmuş olup, CRNP verilerinin analizin tamamında kullanımı modelin verimini daha da artırabilmektedir. Ayrıca, Çakıt Havzasında kalibrasyonun ikinci yılında meydana gelen pik akımlar bu çalışmada kullanılan modelleme yaklaşımı ile tam doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Bu durum muhtemel sebeplerinden biri, NAM modelinin kar erimesini havza şartlarını tam olarak yansıtacak şekilde modelleyememesi olabilir. Havzanın yüksek bölgelerinde kar birikmesi olan dönemlerde şiddetli sağanak yağışların olması [55] yağışın kinetik enerjisi ile kar yükünün erimesine yol açmaktadır. Bu durum hidrolojik modellere yansıtılmadığından yoğun sağanak yağış görülen dönemlerde pik akımlar yakalanamayabilmektedir. Yukarıda belirtilen eksikliklere rağmen, NAM modeli her iki havza için de çok iyi performans göstermiştir ve model istatistiklerini iyileştirmede akım ve toprak nemi verilerini birlikte kullanan bütünlük kalibrasyonunun etkisi açıkça görülmektedir.

Kavramsal modelde toprak nemi verileri (CRNP) kullanıldığında istatistiksel ölçütlerin büyük bölümünün iyileştirildiği görülmektedir. KGE ve NSE değerleri, hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemlerinde yalnızca debi ile gerçekleştirilen kalibrasyona kıyasla oldukça iyileştirilmiştir. NAM modeli daha küçük alanların hidrolojik davranışını temsil etmede daha başarılı olduğu için iyileştirmelerin etkileri Darboğaz alt havzasında Çakıt havzasından daha belirgindir. Bazı parametreler için sadece toprak nemi verileri kullanılarak hidrolojik modelin kalibrasyonu, hidrolojik modelin sadece debi verileri kullanılarak kalibrasyonundan daha iyi olsa da, modelin gerçek anlamda iyileştirilmesi toprak nemi ve debi verileri birlikte kullanıldığında mümkün olmaktadır. Özellikle akım ölçümlerinin yeterli olmadığı havzalarda, CRNP bazlı toprak nemi verisi hidrolojik modellerin etkinliği artırmada kullanılabilir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma ile Türkiye'de ilk defa Kozmik Işın Nötron Sayacının (CRNP) toprak nemi ölçümü için uygulaması Çakıt Havzasında gerçekleştirilmiş ve elde edilen toprak nemi değerleri NAM hidrolojik modelinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Çakıt Havzasında ölçülen yavaşlatılmış nötron sayımlarının toprak nemi hesaplanmasında kullanılması için, çalışma alanında yer alan meteoroloji gözlem istasyonundan ve Çakıt Havzasına benzer jeomanyetik özelliklere sahip olan Atina NMDB istasyonundan elde edilen veriler ile gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Kozmik Işın Nötron Sayacının yakınlarında yer alan TDR ölçüm aleti ile de CRNP ölçümleri karşılaştırılmıştır. Her iki toprak nemi verisi arasında çok yüksek korelasyon görülmekle birlikte ölçüm derinliklerinin farklı olması sebebiyle TDR verisi düzenli bir şekilde CRNP verisinden bir miktar yüksek çıkmaktadır. CRNP'nin ölçüm derinliği toprak nem miktarına bağlı olarak 0-12 ile 0-76 cm arasında değişmekte iken TDR ölçümleri 5 cm derinlikten gerçekleştirilmiştir. Yüzeeye yakın olan cihazın biraz daha yüksek değerler vermesi bu anlamda normal karşılanmalıdır. CRNP ile TDR verisinin yağışlara verdiği tepkilerin aynı olması da CRNP'nin güvenilirliğini artırmaktadır. Sonuç olarak

onlarca hektar genişliğindeki bir alanın toprak nemi ile ilgili olarak düzenli veri sağlayabilen CRNP cihazı Çakıt Havzası çalışma alanında denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen bütün faydalarının yanı sıra, CRNP cihazının iki temel problemi bulunmaktadır. Birincisi kar birikmesinin olduğu dönemlerde veri sağlayamıyor olması, ikincisi de ölçüm derinliğinin sabit olmayıp nem içeriğine bağlı olarak 12 ile 76 cm arasında değişmesidir. Bu iki problemin göz ardı edilebildiği hidrolojik ve tarımsal çalışmalarda geniş alanlarda sürekli olarak güvenilir veri sağlaması sebebiyle Kozmik Işın Nötron Sayaçları diğer toprak nemi ölçüm yöntemlerine önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca kozmik ışın sayımı tabanlı teknolojiler kar yükünün belirlenmesi için de kullanılmaktadır. Gelecekte kar ve toprak nemi miktarlarının ayırımının yapılabileceği bir sistemin geliştirilmesi ve CRNP toprak nemi ölçümünün potansiyelinin artırılması da mümkündür.

Bu çalışmada kullanılan CRNP Türkiye’de kullanılan ilk ve tek CRNP’dir. Dünyada CRNP verilerinin bir araya getirilip değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuş olan ulusal ve uluslararası veri ağları bulunmaktadır. Gelecekte yapılacak hidrolojik ve tarımsal araştırmalar ve uygulamalar için, geniş alanlarda toprak nemi ölçümündeki etkinliği bu çalışma ile de sunulmuş olan CRNP istasyonları Türkiye’de farklı noktalarda da kurulmalı ve ülkemiz için de bir CRNP veri ağı oluşturulmalıdır.

Semboller

BF	Taban akışı
BFu	Yüzeyden yer altı suyu depolamasına sızan su
CKBF	Taban akışı zaman sabiti
CKBF	Taban akışı zaman sabiti
CKIF	Ara akış zaman sabiti
CQOF	Yüzey akışı zaman sabiti
C_{snow}	Kar oluşumu için derece-gün katsayısı
Ea	Terleme
Ep	Buharlaştırma
f_i	Gelen nötron yoğunluğu için düzeltme faktörü.
f_p	Atmosfer basınç değişimi için düzeltme faktörü
f_{wv}	Atmosferik su buharı değişiklikleri için düzeltme faktörü
G	Yer altı suyu depolaması
GWL	Yer altı suyu seviyesi
GWPump	Yer altı suyu çekimi
IF	Ara akış
I_m	Herhangi bir belirli zaman için nötron sayacının sayımı

I_{ref}	Aynı nötron sayacı için keyfi olarak belirlenen belirli bir zaman için referans nötron sayımı.
KGE	Kling Gupta verimliliği
L*,L_{max}	Kök derinliği su tutma kapasitesi
logNSE	Logaritmik Nash Sutcliffe verimliliği
N	Düzeltilmiş nötron akısı
N	Referans basıncına ve nötron yoğunluğuna normalize edilen nötron sayımı
N₀	Aynı referans koşulları altında kuru toprakta nötron sayımı.
N_{raw}	CRNP'den alınan düzeltilmemiş nötron sayısı
NSE	Nash sutcliffe verimliliği
OF	Yüzey akışı
P	Yağış (hidrolojik model için)
P	Atmosferik basınç (mb)
PBIAS	Yüzde sapma
P_{ref}	Referans atmosferik basınç (mb) (Deniz seviyesindeki atmosferik basınç (1013.25 hPa) genellikle kullanılır.)
Ps	Kar erimesi kaynaklı yüzey suyu
QIF	Ara akış debisi
QOF	Yüzey akış debisi
r²	Korelasyon katsayısı
RMSE	Ortalama Kare Hatası
T₀	Kar oluşumu sıcaklığı
TIF	Ara akış için kök derinliği eşik değeri
TOF	Yüzey akışı eşik değeri
U*,U_{max}	Yüzey su tutma kapasitesi
VE	Görelî hacim hatası
W_{lat}	Kristal kafes suyu
W_{SOM}	Toprak organik maddesinin su eşdeğeri
z*	Etkin derinlik (cm)
β	Atmosferik azaltım katsayısı (cm ² g ⁻¹ ya da mb ⁻¹)
θ	Hacimsel su varlığı

ρ_{bd}	Toprağın yığın yoğunluğu (g/cm^3).
ρ_{v0}	Yüzeğe yakın mutlak nemi ($g\ m^{-3}$)
ρ_{v0}^{ref}	Referans mutlak nem ($g\ m^{-3}$)

Teşekkür

Bu çalışma TUBITAK 115Y041 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] G. C. Topp, J. Davis, A. P. Annan, “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines”, *Water resources research*, 16(3), 574–582, 1980.
- [2] J. Huisman, S. Hubbard, J. Redman, A. Annan, “Measuring soil water content with ground penetrating radar”, *Vadose zone journal*, 2(4), 476–491, 2003.
- [3] S. Hong & I. Shin, “A physically-based inversion algorithm for retrieving soil moisture in passive microwave remote sensing”, *Journal of hydrology*, 405(1-2), 24–30, 2011.
- [4] D. Entekhabi, S. Yueh, P. E. O’Neill, K. H. Kellogg, A. Allen, R. Bindlish, M. Brown, S. Chan, A. Colliander, W. T. Crow, vd. , “Smop handbook—soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space”, 2014.
- [5] W. Gardner & D. Kirkham, “Determination of soil moisture by neutron scattering”, *Soil Science*, 73(5), 391–402, 1952.
- [6] M. Zreda, D. Desilets, T. Ferré, R. L. Scott, “Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons”, *Geophysical research letters*, 35(21), 2008.
- [7] D. Desilets, M. Zreda, T. Ferré, “Nature’s neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays”, *Water Resources Research*, 46(11), 2010.
- [8] V. F. Hess, “Observations of the penetrating radiation on seven balloon flights”, *Physik. Zeitschr*, 13, 1084–1091, 1912.
- [9] S. Glasstone & M. C. Edlund, “The elements of nuclear reactor theory”, 1952.
- [10] H. A. Bethe, S. A. Korff, G. Placzek, “On the interpretation of neutron measurements in cosmic radiation”, *Physical Review*, 57(7), 573, 1940.
- [11] L. Hendrick & R. Edge, “Cosmic-ray neutrons near the earth”, *Physical Review*, 145(4), 1023, 1966.
- [12] M. Kodama, S. Kudo, T. Kosuge, “Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement”, *Soil science*, 140(4), 237–242, 1985.
- [13] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.

- [14] Bulut, B., YILMAZ, M. T., “Türkiye’deki 2007 ve 2013 Yılı Kuraklıklarının NOAH Hidrolojik Modeli ile İncelenmesi.” *Teknik Dergi*, 27(4), 7619-7634, 2016.
- [15] D. Desilets & M. Zreda, “Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and monte carlo simulations”, *Water Resources Research*, 49(6), 3566–3575, 2013.
- [16] A. Hawdon, D. McJannet, J. Wallace, “Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across australia”, *Water Resources Research*, 50(6), 5029–5043, 2014.
- [17] D. Desilets, M. Zreda, T. Prabu, “Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: new measurements at low latitude”, *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3-4), 265–276, 2006.
- [18] R. Rosolem, W. Shuttleworth, M. Zreda, T. Franz, X. Zeng, S. Kurc, “The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1659– 1671, 2013.
- [19] J. A. Simpson, “The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor”, in *Cosmic Rays and Earth*, 11–32, Springer, 2000.
- [20] D. B. Pelowitz, “MCNPXTM user’s manual”, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 5(369), 2005.
- [21] M. Zreda, W. Shuttleworth, X. Zeng, C. Zweck, D. Desilets, T. Franz, R. Rosolem, “Cosmos: the cosmic-ray soil moisture observing system”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4079–4099, 2012.
- [22] T. Franz, M. Zreda, R. Rosolem, T. Ferre, “A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 453–460, 2013.
- [23] J. Dong, T. E. Ochsner, M. Zreda, M. H. Cosh, C. B. Zou, “Calibration and validation of the cosmos rover for surface soil moisture measurement”, *Vadose zone journal*, 13(4), 2014.
- [24] G. Demir, “Soil water content estimation from point scale to plot scale,” *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, 2018.
- [25] K. Dimitrova-Petrova, J. Geris, E. M. Wilkinson, R. Rosolem, L. Verrot, A. Lilly, C. Soulsby, “Opportunities and challenges in using catchment-scale storage estimates from cosmic ray neutron sensors for rainfall-runoff modelling”, *Journal of Hydrology*, 124-878, 2020.
- [26] D. Kundu, R. W. Vervoort, F. F. van Ogtrop, “The value of remotely sensed surface soil moisture for model calibration using swat”, *Hydrological Processes*, 31(15), pp. 2764–2780, 2017.
- [27] B. Széles, J. Parajka, P. Hogan, R. Silasari, L. Pavlin, P. Strauss, G. Blöschl, “The added value of different data types for calibrating and testing a hydrologic model in a small catchment”, *Water resources research*, 56(10), 2020.

- [28] M. B. Duygu & Z. Akyürek, “Using cosmic-ray neutron probes in validating satellite soil moisture products and land surface models”, *Water*, 11(7), 1362, 2019.
- [29] J. E. Nash & J. V. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles”, *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290, 1970.
- [30] J. S. Armstrong & F. Collopy, “Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons”, *International journal of forecasting*, 8(1), 69–80, 1992.
- [31] S. Sorooshian, Q. Duan, V. K. Gupta, “Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the sacramento soil moisture accounting model”, *Water resources research*, 29(4), 1185–1194, 1993.
- [32] J. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Nelson Education, 2011.
- [33] R. E. Criss & W. E. Winston, “Do nash values have value? discussion and alternate proposals”, *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), 2723–2725, 2008.
- [34] H. V. Gupta & H. Kling, “On typical range, sensitivity, and normalization of mean squared error and nash-sutcliffe efficiency type metrics”, *Water Resources Research*, 47(10), 2011.
- [35] W. H. Green & G. Ampt, “Studies on soil physics.”, *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24, 1911.
- [36] M. B. McPherson, “Some notes on the rational method of storm drain design”, *American Society of Civil Engineers*, 1969.
- [37] A. T. Hjelmfelt Jr, “Investigation of curve number procedure”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(6), 725–737, 1991.
- [38] S. Bergström, *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. 1976.
- [39] A. D. Feldman, “Hec models for water resources system simulation: theory and experience”, in *Advances in hydroscience*, 12, 297–423, Elsevier, 1981.
- [40] S. A. Nielsen & E. Hansen, “Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis”, *Hydrology Research*, 4(3), 171–190, 1973.
- [41] N. Agrawal & T. Desmukh, “Rainfall runoff modeling using Mike 11 NAM – a review”, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(6), 659–667, 2016.
- [42] C. Doulgeris, P. Georgiou, D. Papadimos, D. Papamichail, “Evaluating three different model setups in the Mike 11 NAM model”, 241–249, 2011.
- [43] C. Doulgeris, P. Georgiou, D. Papadimos, D. Papamichail, “Ecosystem approach to water resources management using the Mike 11 modeling system in the strymonas river and lake kerkini”, *Journal of environmental management*, 94(1), 132–143, 2012.

- [44] E. K. Lafdani, A. M. Nia, A. Pahlavanravi, A. Ahmadi, M. Jajarmizadeh”, Research article daily rainfall-runoff prediction and simulation using ann, anfansand conceptual hydrological Mike11/NAM models”, *Int. J. Eng. Technol*, 1, 32–50, 2013.
- [45] M. M. Rahman, D. Arya, N. Goel, A. P. Dhamy, “Design flow and stage computations in the teesta river, bangladesh, using frequency analysis and Mike11 modeling”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 176–186, 2011.
- [46] F. T. Teshome, H. K. Bayabil, L. Thakural, F. G. Welidehanna, vd. , “Verification of the Mike11-NAM model for simulating streamflow”, *Journal of Environmental Protection*, 11(2), 152, 2020.
- [47] F. T. Teshome, H. K. Bayabil, L. Thakural, F. G. Welidehanna, vd. , “Verification of the mike11-nam model for simulating streamflow,” *Journal of Environmental Protection*, 11(2), 152, 2020.
- [48] Y. Li, S. Grimaldi, V. R. Pauwels, J. P. Walker, “Hydrologic model calibration using remotely sensed soil moisture and discharge measurements: The impact on predictions at gauged and ungauged locations” *Journal of hydrology*, 557, 897–909, 2018.
- [49] C. Francois, A. Quesney, C. Otlé, “Sequential assimilation of ERS-1 SAR data into a coupled land surface–hydrological model using an extended kalmanfilter”, *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 473–487, 2003.
- [50] M. Köhli, M. Schrön, M. Zreda, U. Schmidt, P. Dietrich, S. Zacharias”, Footprint characteristics revised for field scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons”, *Water Resources Research*, 51(7), 5772–5790, 2015.
- [51] T. E. Franz, M. Zreda, T. Ferre, R. Rosolem, C. Zweck, S. Stillman, X. Zeng, W. Shuttleworth, “Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources”, *Water Resources Research*, 48(8), 2012.
- [52] A. Phocaides, “Technical handbook on pressurized irrigation techniques”, FAO, Rome, 372, 2000.
- [53] M. T. Van Genuchten, “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil science society of America journal*, 44(5), 892–898, 1980.
- [54] W. Wagner, G. Lemoine, H. Rott, “A method for estimating soil moisture from ers scatterometer and soil data”, *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191–207, 1999.
- [55] R. D. Harr, “Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in western oregon: A new look at old studies,” *Water Resources Research*, 70(7), 1095–1100, 1986.