

Karstik kaynak boşalım modelleme esasları: Susuz karst akifer kavramsal modeli örneği, Seydişehir, Türkiye

A guideline for karst spring discharge modeling: The example of Susuz karst aquifer conceptual model, Seydişehir, Turkey

Süleyman Selim ÇALLI^{1*}, Mehmet ÇELİK¹

¹Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.
scalli@ankara.edu.tr, mehmetcelik@ankara.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.06.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 26.08.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.07.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.68822
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Karstik akiferler sahip oldukları beslenme (noktasal ve alansal), depolama (kanal ve matriks), dolaşım (yerel ve yaygın) ve boşalım (laminar ve türbülanslı) özellikleri bakımından heterojen yeraltı suyu sistemleri olup, hem doğal hem de doğal olmayan tehditlere karşı gözenekli akiferlere kıyasla çok hızlı tepki veren hassas ortamlardır. İklim değişikliği ve nüfus artışı gibi güncel tehditler dikkate alındığında karstik yeraltı suları üzerindeki baskının günden güne artması kaçınılmazdır. Karstik yeraltı sularının sürdürülebilir kullanımı ise onların kavramsal ve sayısal modellerinin geliştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Karstik akiferlerin sayısal modelleri ise basitten karmaşığa doğru (i) kara kutu modeller, (ii) kavramsal modeller ve (iii) fiziksel modeller olmak üzere üç farklı yaklaşıma göre oluşturulabilmektedir. Bu çalışma karstik bir akiferin sayısal boşalım modelinin kavramsal modelleme yaklaşımı kullanılarak nasıl oluşturulması gerektiği hususunu en temelden ele alarak açıklamıştır. Bu kapsamda veri ihtiyacı, veri toplama teknikleri, veri işleme yöntemleri, model yapısal yeterliliği ve son olarak model uygulamasının yapılması hususlarına değinilmiştir. Çalışmada kullanılan metodolojinin örnek bir uygulaması Orta Toros karst kuşağında yer alan Susuz karst akiferi ve Pınarbaşı karst kaynağı boşalım modeli sonuçları üzerinden açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Karst, Yeraltı suyu, Kaynak boşalımı, Hidrolojik kavramsal model

Abstract

Karstic aquifers are heterogeneous groundwater systems by means of recharge (diffuse and concentrated), storage (matrix and conduit), flow (local or regional), and discharge (laminar and turbulent) characteristics, hence giving quicker responses to both natural and artificial threats while compared to the porous aquifers. Considering the most devastating threats of climate change and increasing population, the stress on the karst groundwater is increasing inevitably. Sustainable usage of these groundwater systems could only be possible by developing the numerical models. Numerical models of the karst aquifers could be developed by using (i) black-box models, (ii) conceptual models, and (iii) physical models from simple to complicated, respectively. This study is explaining how to build a successful numerical model to a karst aquifer by using the conceptual modelling approach from the very basic concepts such as data requirements and data collection methods, data processing techniques, structural adequacy of the model, and finally the application procedures. The given methodology is explained by the results of a case study of the Pınarbaşı spring, Susuz karst aquifer, Central Taurus karst belt.

Keywords: Karst, Groundwater, Spring discharge, Hydrological conceptual model

1 Giriş

Karstik akiferler çatlak ve kanal tipi (üçüncül) gözenekliliğe sahip yeraltı suyu sistemleri olup, yüksek verimli su kaynakları olarak değerlendirilebilir. Karstik akiferlerde beslenme noktasal ve alansal, depolama kanal ve matriks (gözenek) depolaması, dolaşım yerel ve yaygın, boşalım ise laminar ve türbülanslı boşalım karakterinde olup, bu sistemler hem beslenme hem depolama ve dolaşım hem de boşalım özellikleri açısından heterojen sistemlerdir [1]. Dünya nüfusunun yaklaşık 1/3'ü içme suyunu karstik su kaynaklarından karşılamakta olup Akdeniz çevresinde yer alan ülkelerin çoğu doğrudan karstik kaynaklardan içme suyu ihtiyacını karşılamakta ve bu kaynakların önemi gün geçtikçe daha da artmaktadır [2],[3].

Son yıllarda ortaya konan iklim çalışmaları [4]-[6] yakın ve orta gelecekte Akdeniz kuşağında yer alan ülkelerde yağış miktarında azalış, düzensiz yağış dağılımı ve sıcaklıklarda artış öngörmektedir. Bu nedenle karst araştırmacıları özellikle Akdeniz kuşağında yer alan karstik yeraltı suları üzerindeki baskının günden güne artacağına dikkat çekmektedir. Karst

akiferlerinin sürdürülebilir kullanımının planlanabilmesi için sayısal modellerinin geliştirilmesi ve gelecek iklim ve alan kullanımı senaryolarına göre boşalım tahminleri yapılması büyük önem taşımaktadır [105]. Bir karstik akiferin sayısal modelinin geliştirilebilmesi akiferin kavramsal modelinin başarılı bir şekilde ortaya konması ile mümkündür.

Karstik akiferlerde sayısal modelleme yaklaşımları temelde basitten karmaşığa (i) kara kutu modeller, (ii) kavramsal modeller ve (iii) fiziksel modeller olarak üç sınıfta toplanabilir [7]. Kara kutu modeller karstik akiferi içerisi bilinmeyen kara bir kutuya benzetmektedir [8]. Bu modeller karstik akifer girdisi olan verilerin (yağış, sıcaklık, potansiyel buharlaşma-terleme) bir dizi matematiksel işlem (transfer fonksiyonundan) geçirildikten sonra kaynak boşalımına ya da yeraltı suyu seviyesine dönüştürülmesini amaçlayan modellerdir. Kara kutu modelleri içerisinde transfer fonksiyonları [8]-[10], istatistiksel modeller [11],[12] ve yapay zeka modelleri [13]-[16] son yıllarda karst hidrolojisinde sıkça kullanılmaktadır. Fiziksel modeller ise çok sayıda model girdisi, model parametresi ve model değişkenine ihtiyaç duyan, oldukça karmaşık modeller olup, karst hidrolojisinde az sayıda

*Yazışılan yazar/Corresponding author

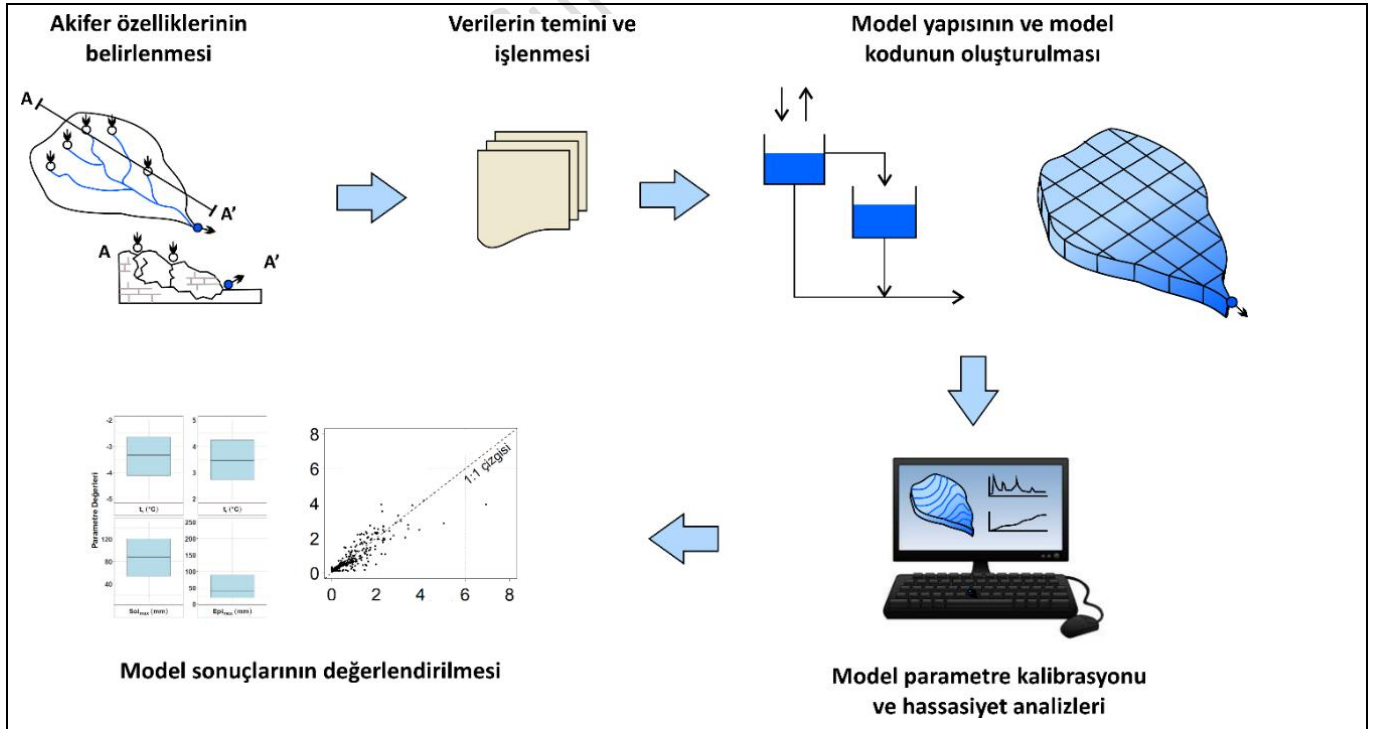
da olsa uygulamalarına erişmek mümkündür [17],[18],[19],[20]. Bu iki uç örneğin arasında yer alan kavramsal modeller ise hem veri ihtiyacının erişilebilir seviyede olması, hem de sistem hidrodinamiğine dair bilgiler içermesi neticesinde literatürde en çok tercih edilen modelleme yaklaşımıdır. Kavramsal modeller gri kutu modeller olarak da tanımlanmıştır [21]. Jaiswal et al. (2020) fiziksel ve kavramsal hidrolojik modeller arasında, [23] ise yapay zeka modelleri ile kavramsal modeller arasında son derece yararlı karşılaştırmalar yaparak bu yaklaşımların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır.

Karstik akiferlerde (i) alana yayılan modelleme [18],[19],[20], (ii) noktaya yığılan modelleme [24],[25] ve (iii) hibrit modelleme [26],[27],[28] yaklaşımları kullanılarak üç farklı türde kavramsal hidrojeolojik modelleme yapılabilmektedir. Alana yayılan modellerde (spatially distributed models) karstik akifer karelej yöntemi ile alt parçalara bölünerek her bir parçaya ait girdiler (örn. Yağış, sıcaklık), akılar (örn. x, y ve z yönünde akış, buharlaşma-terleme), değişkenler (örn. su seviyesi, toprak nemi) ve model parametrelerinin (örn. hidrolik iletkenlik katsayısı, depolama katsayısı) belirlenmesi gerekmektedir. Alana yayılan modeller yüksek alansal çözünürlüğe sahip model verisi ihtiyacı duyduğu için pratikte uygulanması zahmetli olan modellerdir. Alana yayılan modellerin uygulanabilirliğini basitleştirmek için eşdeğer gözenekli ortam yaklaşımı (EPM), ikili ortam yaklaşımı (DC) veya bütünlük iki ayrı ortam yaklaşımı (CDC) gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır [7]. Bu yaklaşımlar sayesinde kareleja bölünen karst akiferinin her bir hücresinde tek tek girdi, çıktı, değişken ve parametreleri belirlemek yerine bazı model hücrelerinde yapılan ölçümlerin alana yayılabilmesi sağlanmaktadır.

Noktaya yığılan modeller (lumped models) ise karstik akiferin hidrodinamiğinin bir noktaya indirgenerek kaynak boşalım

hidrografi üzerinden değerlendirilebileceği varsayımına dayanmaktadır. Bu modellerde yüksek alansal çözünürlüğe sahip veriden ziyade yüksek zamansal çözünürlüğe sahip veri ihtiyacı bulunmaktadır [7]. İhtiyaç duyulan verilerin başında ise yüksek zamansal çözünürlüğe sahip kaynak boşalım verileri gelmektedir. Noktaya yığılan modellerde havzaya düşen temsil edici yağış, havzadan gerçekleşen ortalama potansiyel buharlaşma terleme gibi model girdileri bir tek zaman serisi şeklinde belirlenmektedir. Hibrit modellerde ise (semi-distributed models) çoğunlukla karst akiferi farklı yükselti kuşaklarına, farklı havza karakteristiklerine ya da farklı hidrolojik koşullara göre alt parçalara bölünmektedir. Söz konusu olan her bir alt parçanın bütünleştirilmesi sonucunda yine noktaya yığılan modellerde olduğu gibi kaynak boşalım zaman serileri elde edilebilmektedir. Hibrit modellerin bir diğer avantajı da noktaya yığılan modelleme yapısı üzerinde alana yayılı model girdilerinin kullanılabilmesidir [16],[29].

Karstik akiferlerde kavramsal modelleme yöntemi ile akım ve boşalım tahmini yapabilmek için (i) karst akiferinin beslenme-dolaşım ve boşalım özelliklerinin belirlenmesi (ii) model girdi ve çıktı verilerinin temin edilmesi (iii) kullanılacak modelin kodlanması (veya uygun model kodunun seçilmesi) (iv) model parametrelerinin kalibre edilmesi ve (v) model sonuçlarının değerlendirilmesi şeklinde beş aşamadan oluşan bir metodoloji izlenmesi önerilmektedir (Şekil 1). Bu çalışmanın amacı karstik akiferlerde kavramsal modelleme yöntemi ile kaynak boşalım modeli yapmak için izlenmesi gereken hidrojeolojik çalışma metodolojisini yukarıda belirtilen sırayla detaylandırmak ve bir bütün halinde ortaya koymaktır. Çalışma kapsamında tanımlanan metodoloji Orta Toros karst kuşağında yer alan Susuz karst akiferi üzerinde bir örnek uygulama ile detaylandırılmıştır.



Şekil 1. Kavramsal karst hidrolojik modeli geliştirme aşamalarının şematik gösterimi
Figure 1. The schematic of the steps to build a conceptual karst hydrological model

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Karst Akiferinin Beslenme, Dolaşım, Depolama ve Boşalım Özelliklerinin Belirlenmesi

Karst akiferlerinde hidrodinamik modelleme çalışması yapabilmeyen en önemli ön koşullarından birisi karst akifer sisteminin karakterizasyonudur. Beslenme, dolaşım, depolama ve boşalım özelliklerinin belirlenmesi bir karst akiferinin hidrodinamik kavramsal modelinin oluşturulması açısından son derece önemlidir. Gözenekli akiferlerde beslenme alanı sınırı belirlenmesinde sıkça kullanılan doruk ağı havza sınırı belirleme yöntemi karstik akiferlerde tek başına yeterli olmamaktadır. Bir karst akiferi doruk ağı sınırının dışından beslenebileceği gibi, bazı durumlarda doruk ağı sınırı içerisinde havza dışına kayıp-kaçak akışı gözlemlendiği de görülebilmektedir. Bu nedenle karst akiferlerinde beslenme-boşalım ilişkisinin aydınlatılması ve beslenme alanı sınırının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Karst akiferlerinde beslenme boşalım ilişkisinin duraylı izotoplar [30]-[32] ve hidrokimyasal veriler ile [33]-[37] aydınlatıldığı pek çok çalışmaya erişmek mümkündür. Bunlara ek olarak izleyici boyalar [38],[39], askı sedimentler [40]-[43] ve (mikro)biyolojik izleyiciler [44]-[47] de karstik yeraltısuyunun beslenme boşalım ilişkisine ışık tutmaktadır. Karst akiferlerinde yeraltısuyunun dolaşım karakteristiği de boşalım hidrograflarının çekilme eğrisi analizleri [48]-[54], zaman serisi analizleri [52],[55]-[57] ve sistem içsel hidrodinamiğinin araştırılması ile [29],[31],[58] aydınlatılabilmektedir. Ayrıca karst akiferi içerisinde yeraltısuyunun yaklaşık dolaşım süresinin belirlenmesi [59]-[61], karstik akiferlerde sığ/derin farklı kökenli suların karışımı ile ilgili ipuçları vermektedir.

2.2 Model girdi ve çıktı zaman serilerinin elde edilmesi ve değerlendirilmesi

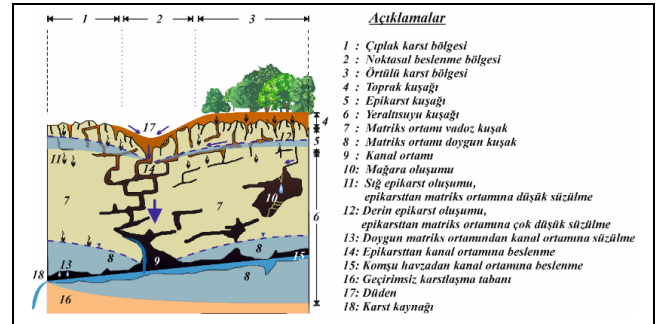
Karst hidrolojik modellerinde model girdisi olarak kullanılan en temel veriler yağış (P) ve hava sıcaklığı (T) verileridir. Bunlar dışında model su bilançosunun önemli bileşenlerinden birisi de potansiyel buharlaşma terleme (PET) zaman serileridir. PET zaman serileri model tarafından hesaplanabildiği gibi bazen de hazır veri olarak da modele dahil edilebilmektedir. PET hesaplamalarında en temel veriler hava sıcaklığı ve havzanın enlemi olmakla birlikte güneş radyasyonu [62],[63] rüzgâr yönü ve hızı [64],[65] ve toprak nemi [66],[67] gibi ilave verilere de ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu veriler çoğunlukla karst akiferi çevresinde yer alan yağış istasyonlarından temin edilerek model ihtiyacına göre (alana yayılan modeller için karelej yöntemi ya da noktaya yayılan modeller için interpolasyon yöntemleri ile) işlenmektedir. Model çıktısı olarak çoğunlukla karstik kaynak boşalım hidrografları kullanılmaktadır. Kaynak boşalım noktasına ya da kaynak tarafından boşaltılan suların toplandığı düzgün bir kanala yerleştirilen su seviyesi ölçer cihazlarla kanal içerisinde yüksek zamansal çözünürlükle (saatlik, günlük) su seviyesi ölçümleri alınabilmektedir. Su seviyesinin farklı olduğu dönemlerde (tercihen düşük, ortalama ve yüksek dönemlerde) kanal içerisinde bir muline (ya da daha gelişmiş sonik cihazlar) kullanılarak suyun akım hızı [$L T^{-1}$] belirlenmektedir. Kanaldaki suyun yüksekliği ve kanalın genişliği çarpılarak kanalın ıslak kesit alanı elde edilmekte [L^2], kanalın ıslak kesit alanı ile suyun akım hızının çarpımı sonucunda kaynağın boşalım debisi [$L^3 T^{-1}$] hesaplanabilmektedir [68]. Kanaldaki su seviyeleri ve farklı su seviyelerinde elde edilen debi değerleri iki eksenli de

aritmetik olan grafiğe aktarıldığında seviye-debi ilişkisini ifade eden anahtar eğri elde edilmektedir. Anahtar eğri denklemi elde edildikten sonra anlık ölçüm cihazları tarafından kanal içerisinde ölçülen su seviyesi verileri debi değerlerine dönüştürülebilmektedir. Anahtar eğri elde edilmesi ile ilgili farklı yaklaşımlar [69]-[71]'de açıklanmıştır.

Kaynak boşalım modellemesinde önemli faktörlerden birisi de model girdi verilerinin zamansal çözünürlüğü ve çıktı verilerinin zamansal çözünürlüğünün birbirleri ile uyumlu olmasıdır. Örneğin saatlik boşalım ölçümü alınan bir karstik kaynaktan saatlik boşalım tahmini yapılabilmesi için, saatlik yağış, sıcaklık ve potansiyel buharlaşma-terleme verileri gerekmektedir. Bu nedenle çoğu çalışmada model girdi verilerinin günlük zamansal çözünürlüğe olmasından dolayı kaynak boşalım verileri de günlük çözünürlüğe dönüştürülmektedir.

2.3 Kavramsal modelin oluşturulması ve matematiksel modele geçiş

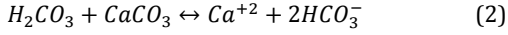
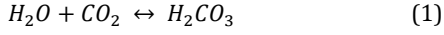
Karst akiferinin beslenme, dolaşım, depolama ve boşalım karakteristiklerinin belirlenmesi ve modelde kullanılacak verilerin temin edilmesinden sonra en önemli işlem modellenecek karst akiferini en iyi şekilde temsil edecek kavramsal modelin oluşturulmasıdır. Kavramsal modelde, model iç rezervuarları olan toprak, epikarst, kanal ve matriks rezervuarlarının birbirleri ile hidrodinamik ilişkisine karar verilmesi gerekmektedir. Bunlar dikkate alınarak modelin değişkenleri (örn. Toprak nemi, epikarst, kanal ve matriks depolamaları), rezervuarlar arası akıları, bu akıları kontrol eden akım denklemleri ve bu denklemlerde kullanılan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Çoğunlukla modelin en sığ rezervuarı olan toprak kuşağında depolama toprak nemi olarak ifade edilmektedir. Toprak nemi arazi kapasitesi olarak belirlenen belli bir seviyeye ulaştığında düşey yönde yeraltısuyu akışı başlamakta, toprak kuşağından epikarst kuşağına su transferi gerçekleşmektedir [72],[73]. Toprak nemi doygunluk fazlasına ulaştığında ise yüzeysel akışa geçmektedir. Yüzeysel akışa geçen sular havzayı terk edebileceği gibi bölgede yer alan bir düden aracılığıyla doğrudan karst akiferinin kanal rezervuarına da iletebilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Bir karst sisteminin bileşenlerinin şematik kesit üzerinde gösterimi [68].

Figure 2. A schematic view of the features of a karst system [68].

Toprak kuşağın altında yer alan epikarst kuşağı en yüksek karstlaşmanın görüldüğü ortamı oluşturmaktadır. Özellikle organik madde açısından zengin toprak kuşaktan süzülen sular yüksek miktarda CO_2 ile etkileşerek H_2CO_3 oluşturmakta ve bu zayıf asit de kireçtaşını çözmektedir (1, 2).



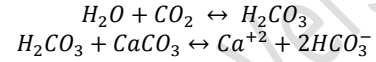
Dolayısıyla epikarst kuşağı su kapasitesi ve transferi konusunda önemli bir kuşağı temsil etmektedir. Epikarst kuşağından kireçtaşı matris rezervuarına difüzyon beslenme, kanal rezervuarına ise konsantrasyon beslenme gerçekleşmektedir. Söz konusu hidrodinamik süreçlerin kavramsal modelde temsil edilmesi modelin kaynak boşalım tahmini konusundaki yeteneğini artırmaktadır (Şekil 3).

2.4 Model parametre kalibrasyonu ve belirsizlik analizlerinin yapılması

Karst akiferlerin heterojenitesinin model tarafından temsil edilebilmesi, model karmaşıklığının ve model parametre sayısının artmasına neden olabilmektedir. Söz konusu olan model parametrelerinin bazıları (arazi kapasitesi, toprak/epikarst depolaması, kanal hidrolik iletkenlik katsayısı vb.) fiziksel olarak anlamlı ve ölçülebilir parametreler olup bazıları (çekilme katsayısı vb.) deneysel parametrelerdir. Bu nedenle model parametrelerinin tamamının bilinmesi çoğu çalışmada mümkün olmamaktadır. Bu eksikliğin giderilmesi için model parametrelerinin kalibre edilmesi önerilmektedir. Model parametreleri doğrudan kaynak boşalım verileri kullanılarak kalibre edilebileceği gibi model içsel seviyelerine ait ölçümlerin (örn. Toprak nemi ölçümleri) bulunması durumunda modelin iç bileşenleri ayrı ayrı kalibre edilebilmektedir [29],[76].

Karst hidrolojik modellerinde kalibrasyon için kaynak boşalımı zaman serilerinin ısınma, kalibrasyon ve validasyon dönemi

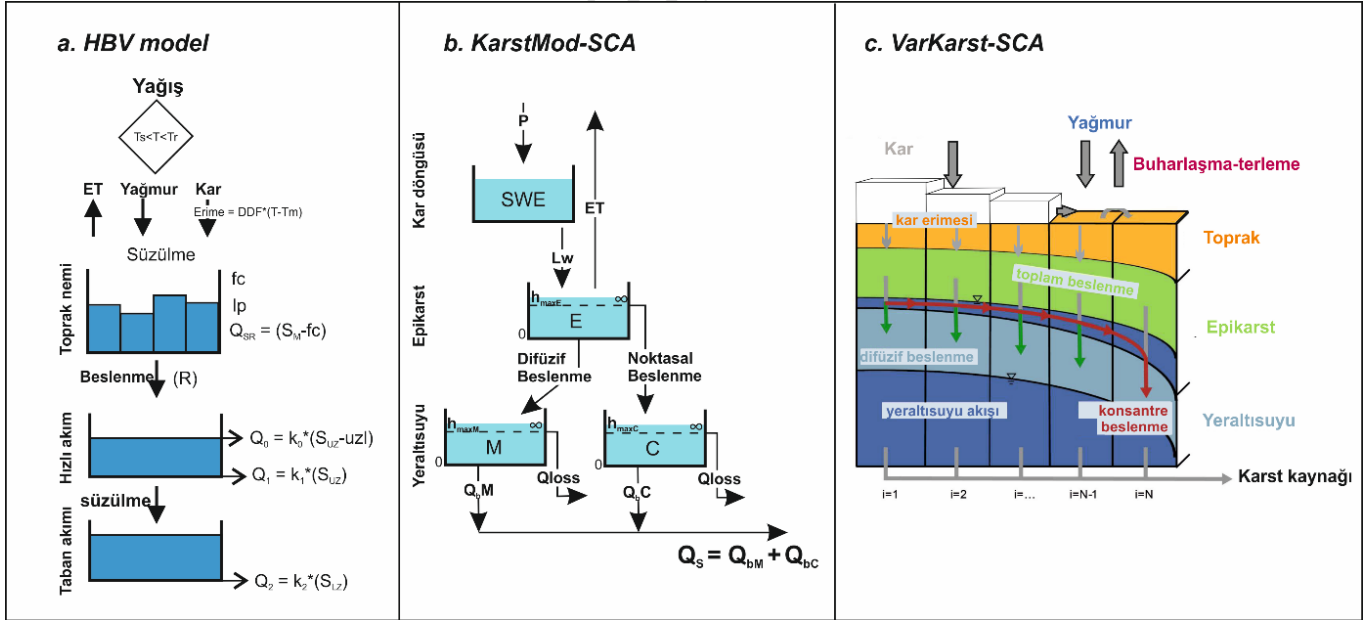
olmak üzere üç alt döneme ayrılması önerilmektedir. Model simülasyonlarında ilksel ve sınır koşullarından kaynaklı belirsizliklerin model tarafından elenebilmesi için zaman serisinin içerisinde belirli bir süre (model geliştiricinin bilgisi ve deneyimi ile ilişkili) ısınma periyodu olarak ayrılmalıdır. Bu dönem içerisinde (özellikle ilk bölümde) kaynakta ölçülen boşalım değerleri ile model boşalım simülasyonları arasındaki hata yüksek olduğu için bu dönem içerisinde elde edilen simülasyonlar model performans metriği hesaplamalarında kullanılmamaktadır. Isınma döneminden sonra geride kalan zaman serisinin yaklaşık %60'lık kısmı model kalibrasyonu için kullanılmakta, geriye kalan kısmı ise kalibrasyon periyodunda elde edilen parametrelerin geçerliliğini test etmek için kullanılmaktadır.



Model kalibrasyonu aşamasında en önemli etmenlerden birisi de model performansının belirlenmesi amacıyla kullanılan performans metriklerinin seçimidir [29]. Performans metriklerinin seçilmesi hususunda farklı görüşler bulunmakta olup çoğunlukla araştırmacılar Nash-Sutcliffe katsayısı (NSE) [77] ve Kling-Gupta katsayısı (KGE) [78] istatistiksel metriklerini tercih etmektedir. NSE ve KGE performans metriklerinin matematiksel eşitlikleri (3) ve (4)'te verilmiştir.

$$NSE_Q = 1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$KGE_Q = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4)$$



Şekil 3. Homojen yeraltısuyu sistemleri için tercih edilen klasik havza modeli olan (a) HBV modeli [74],[75] ve karst hidrolojik modelleri (b) noktaya yığılan model formunda geliştirilen KarstMod-SCA [25],[29] ve (c) hibrit model formunda geliştirilen VarKarst-SCA [26] kavramsal modellerinin şematik gösterimleri ([68]'den alınmıştır)

Figure 3. (a) The structure of a homogeneous catchment hydrological model of HBV model [74],[75], (b) the structure of KarstMod-SCA [25],[29] which is developed as a lumped conceptual model, (c) the structure of a heterogeneous VarKarst-SCA [26] model which is developed as a semi-distributed conceptual hydrological model (edited from [68]).

Burada Q_{sim} model tarafından hesaplanan kaynak boşalım debisini [L^3T^{-1}], Q_{obs} kaynaktaki ölçülen boşalım debisini [L^3T^{-1}], \bar{Q}_{obs} ise ölçülen boşalım zaman serisinin ortalama değeri [L^3T^{-1}] ifade etmektedir.

Bu yöntem ile model en başarılı kalibrasyon performansını elde etmek için sürekli denemeler yapmaktadır. Model denemeleri sonucunda elde edilen model performansları belirli kriterler kullanılarak (örn NSE > 0.4 gibi) başarılı ve başarısız olarak değerlendirilebilmektedir [100]. Örneğin modelin elde ettiği boşalım hidrografi ile kaynaktaki ölçülen boşalım hidrografi arasındaki en yüksek benzerliği elde edebilmek için en yüksek model performansını aramak gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilmiş pek çok model optimizasyon algoritması bulunmaktadır. Bu algoritmalarından bazıları Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu [79], Yarasa Optimizasyonu [80], Diferansiyel Evrim Optimizasyonu [81], Particle Swarm Optimizasyonu [82], Sinüs Kosinüs Optimizasyonu [83] olup bunların temelinde model tarafından hesaplanan değişkenin ölçülen değişkenle arasındaki hatayı minimize etme prensibi yer almaktadır. Söz konusu model optimizasyon algoritmaları en düşük hatayı elde edene dek farklı parametrelere değeri ile model fonksiyonunu çalıştırmakta, en sonunda belirli bir iyileştirmeden öteye gidemediğinde denemeleri sonlandırarak en optimal parametre değerlerini kullanıcı ile paylaşmaktadır.

2.5 Model bulgularının değerlendirilmesi

Hidrolojik modelleme çalışmalarının en önemli aşamalarından birisi de model sonuçlarının değerlendirilmesidir. Model optimizasyonu sonucunda elde edilen parametre setlerinin anlamlı olup olmadığının değerlendirilmesi için model içsel rezervuarlarında elde edilen seviye ve akıların kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır [29],[31]. Söz konusu olan çalışmada elde bulunan arazi ölçümleri (örn. Kar derinliği, toprak nemi, kuyularda yeraltısuyu seviyesi gibi) ile model tarafından hesaplanan model içsel seviyeleri (örn. Kar su eşleniği, toprak ve epikarst depolaması, kanal rezervuarındaki su seviyesi değişimi gibi) karşılaştırılarak modelin gerçeğe ne kadar yakın tahminler yaptığı değerlendirilmelidir. Eğer söz konusu çalışmada bu şekilde arazi ölçümleri bulunmayıp yalnızca boşalım verisi bulunuyorsa o durumda en yüksek model performansını veren parametre setlerinin (örn. NSE > 0.4 koşulunu sağlayan parametre setlerinin tamamı) Box ve Whisker dağılım grafikleri çizilerek parametre belirsizlikleri hakkında fikir elde edilebilmektedir [84]. Daha dar bir alana sıkıştırılmış parametre değerleri daha başarılı ve daha belirli parametre değerlerine, daha geniş alanda dağılım gösteren parametreler ise daha yüksek belirsizliğe sahip olarak değerlendirilebilmektedir [84].

Alternatif bir model optimizasyonu yöntemi olarak Monte Carlo [85] ya da Latin Hypercube [86] gibi örnekleme teknikleri ile "n" adet satırdan ve "p" adet sütundan oluşan uniform dağılıma sahip parametre havuzu oluşturularak, "n x p" boyutunda bir parametre matrisi oluşturulabilmektedir [68]. Burada; p modelde kullanılan parametre sayısını, n ise her bir parametrenin kaç farklı kopyasının oluşturulacağını belirtmektedir (5).

$$P_i = P_{min} + (r \times (P_{max} - P_{min})) \quad (5)$$

Burada; P_i model tarafından hesaplanan parametre değerini, r örnekleme yöntemi tarafından [0-1] aralığında elde edilen parametre dağılım değerini, P_{max} ve P_{min} ise ilgili parametrenin

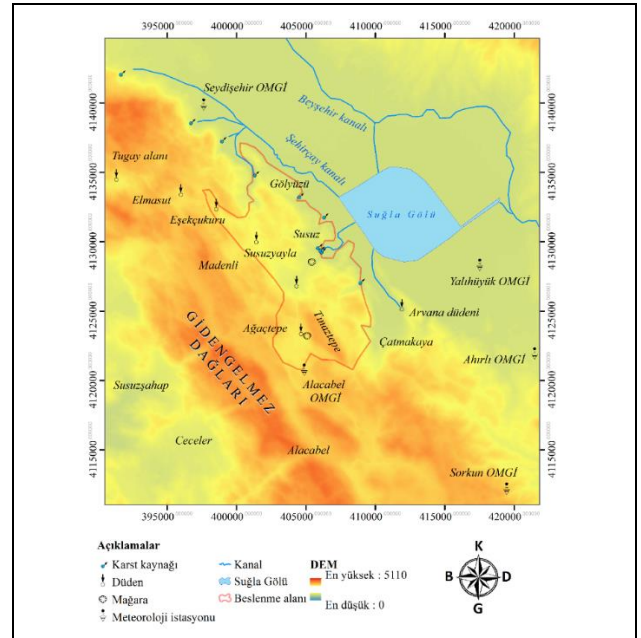
kullanıcı tarafından belirlenmiş olan en üst ve en alt alabileceği sınır değerlerini temsil etmektedir.

Monte Carlo ya da Latin Hypercube yöntemleri ile yeterli sayıda parametre kombinasyonu oluşturulup oluşturulmadığı model geliştiricinin bilgisine ve deneyimine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Çallı et al. (2022) 11 adet parametre içeren bir karst hidrolojik modelinde 10⁶ farklı parametre kombinasyonun yeterli olacağını belirtmiştir. Bu yöntemlerde elde edilen parametre setlerinin her birisi model fonksiyonu içerisine girilerek boşalım tahminleri yapılabilmektedir. Şayet kullanılan parametre seti model performans metriği (örneğin NSE) tarafından belirlenen eşik değerin üzerinde sonuç vermiş ise, bu parametre seti anlamlı parametre seti olarak kaydedilmektedir [100]. Parametre havuzundaki tüm kombinasyonlar teker teker denendikten sonra elde anlamlı sonuç veren kaç adet parametre seti olduğuna bakılarak bu parametrelerin Box ve Whisker grafikleri üzerindeki dağılımları incelenebilmektedir. Anlamlı parametre setlerinden elde edilen boşalım hidrograflarının %95'lik belirsizlik bandı çizilerek en başarılı boşalım tahmini ile belirsizlik bandının arasındaki uyum ve belirsizlik bandının genişliği üzerinden sonuçlar yorumlanabilmektedir.

3 Susuz karst akifer kavramsal model sonuçları

3.1 Susuz Karst Akiferinin Beslenme-Dolaşım ve Boşalım Özelliklerinin Belirlenmesi

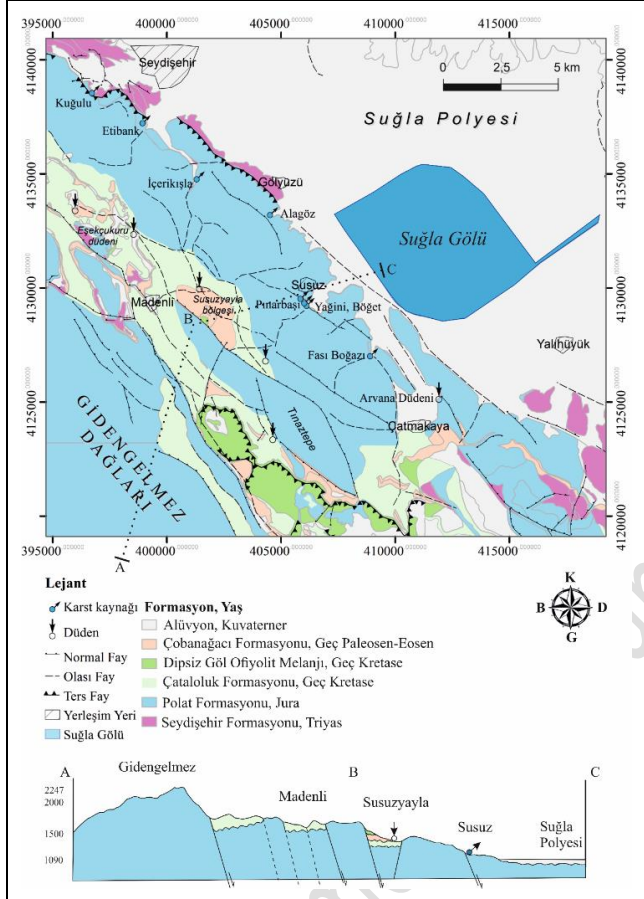
Susuz karst akiferi Konya ili Seydişehir ilçesi güneyinde yer alan Susuz köyünden ismini almıştır. Bölgede en yüksek kot (2400m) Gidengelmez Dağları zirvesine, en düşük kot ise (1085) Suğla Polyesinin en derin noktası olan Arvana düdenine aittir (Şekil 4).



Şekil 4. Susuz karst akiferi beslenme alanı ve çevresindeki meteoroloji istasyonlarının bölgeye ait sayısal yükselti haritası üzerinde gösterimi

Figure 4. The view of the recharge contributing area of the Susuz karst aquifer and the surrounding meteorological stations on the Digital Elevation Map.

Bölge Akdeniz iklimi ile Karasal iklim arasında bir geçiş iklimine sahiptir. Yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. Bölgeye yıl boyunca düşen yağış ortalama 750 mm dolayında hesaplanmış olup bunun yaklaşık %25'inin kar yağışı şeklinde gerçekleştiği Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'ne (DMİGM) ait Seydişehir (1110 m) ve Alacabel (1520 m) Otomatik Meteorolojik Gözlem İstasyonları (OMGI) verileri üzerinden belirlenmiştir [68]. Sahayı büyük oranda Mesozoyik yaşlı karstik kireçtaşları kaplamaktadır. Susuzayla mevkiinde karasal kırıntılı çökeller, Ağaçtepe'de sınırlı miktarda ofiyolit ve serpantiniter ve tabanda, Gölyüzü mevkiinde yüzlek veren şistleri görmek mümkündür (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Jeoloji haritası[90]'dan değiştirilerek alınmıştır) ve A-B-C hattı boyunca enine kesiti

Figure 5. Geological map of the study area (Map is edited from [90]) and the cross section through A-B-C line.

Özgül (1976) bölgedeki birimleri Geyikdağı Birliği içerisinde değerlendirmiştir. Karbonatlı birimlerin tabanında yer alan Triyas yaşlı şist ve kalkışistlerden oluşan formasyon [88] tarafından Seydişehir şistleri olarak tanımlanmıştır ve bu birim [89]'a göre Mesozoyik yaşlı karstik birimlerin potansiyel karstlaşma tabanını oluşturmaktadır.

Altta Orta-Geç Cambriyen yaşlı Çaltepe Formasyonu ile geçişli olan Seydişehir Formasyonu'nun üzerinde Jura yaşlı Polat Formasyonu uyumsuz olarak, tektonik dokanakla yer almaktadır. Formasyon ileri derecede karstlaşmış olup, kırık-çatlaklarda terra rossa tipi toprak oluşumları gözlenmektedir. Formasyon Gölyüzü-Susuz-Çatmakaya hattı boyunca Suğla Polyesini örten Kuvaterner çökelleri ile dokanak halinde olup (Şekil 5), formasyonun oluşturduğu karstik akifer Tablo 1'de görülen kaynaklar tarafından boşaltılmaktadır.

Polat Formasyonunun üzerine gelen Üst Kretase yaşlı Çataloluk Formasyonu özellikle Susuzayla ve Ağaçtepe çevresinde yüzlek vermektedir (Şekil 5). Formasyon yüzlek verdiği bölgelerde karstlaşma izleri barındırmakta olup, sahip olduğu çözünme olukları, lapa ve kamenitza yapıları ile karakteristik bir görünüme sahiptir. Çataloluk Formasyonu üzerine yerleşen Çobanağacı Formasyonu Paleosen yaşlı kireçtaşları ile Lütseyen yaşlı filişten oluşmaktadır. Çobanağacı Formasyonu kireçtaşları ince tabakalı ve laminallı morfolojisi ile bölgedeki diğer kireçtaşlarından makroskopik ölçekte kolayca ayırt edilebilmekte olup Susuzayla çevresinde ve Tınaztepe dolini dolayında görülebilmektedir (Şekil 5).

Polat Formasyonunun üzerine gelen Üst Kretase yaşlı Çataloluk Formasyonu özellikle Susuzayla ve Ağaçtepe çevresinde yüzlek vermektedir (Şekil 5). Formasyon yüzlek verdiği bölgelerde karstlaşma izleri barındırmakta olup, sahip olduğu çözünme olukları, lapa ve kamenitza yapıları ile karakteristik bir görünüme sahiptir. Çataloluk Formasyonu üzerine yerleşen Çobanağacı Formasyonu Paleosen yaşlı kireçtaşları ile Lütseyen yaşlı filişten oluşmaktadır. Çobanağacı Formasyonu kireçtaşları ince tabakalı ve laminallı morfolojisi ile bölgedeki diğer kireçtaşlarından makroskopik ölçekte kolayca ayırt edilebilmekte olup Susuzayla çevresinde ve Tınaztepe dolini dolayında görülebilmektedir (Şekil 5). Polat Formasyonunun üzerine gelen Üst Kretase yaşlı Çataloluk Formasyonu özellikle Susuzayla ve Ağaçtepe çevresinde yüzlek vermektedir (Şekil 5). Formasyon yüzlek verdiği bölgelerde karstlaşma izleri barındırmakta olup, sahip olduğu çözünme olukları, lapa ve kamenitza yapıları ile karakteristik bir görünüme sahiptir. Çataloluk Formasyonu üzerine yerleşen Çobanağacı Formasyonu Paleosen yaşlı kireçtaşları ile Lütseyen yaşlı filişten oluşmaktadır. Çobanağacı Formasyonu kireçtaşları ince tabakalı ve laminallı morfolojisi ile bölgedeki diğer kireçtaşlarından makroskopik ölçekte kolayca ayırt edilebilmekte olup Susuzayla çevresinde ve Tınaztepe dolini dolayında görülebilmektedir (Şekil 5).

Tablo 1. Suğla Polyesi'ne boşalım yapan başlıca karstik kaynaklara ait bilgiler.

Table 1. Informations related to the major karst springs discharging through Suğla Polje.

Kaynak Adı	Enlem (UTM 36N)	Boylam (UTM 36N)	Boşalım kotu (m)	Boşalım tipi	Ortalama boşalım süresi (ay)	Ortalama debi (L/s)
İçerikışla	401165	4134399	1123	Mevsimsel	4-6	200
Alagöz	404642	4133256	1103	Sürekli	12	500
SK-4	405618	4132626	1104	Mevsimsel	< 3	100
Pınarbaşı	407023	4129865	1099	Mevsimsel	6-8	400
Yağini	406048	4129131	1109	Mevsimsel	< 1	10
Böğet	406045	4129120	1107	Mevsimsel	< 1	10
Fası Boğazı	408873	4126966	1096	Mevsimsel	< 3	50

Çalışma sahasında Tınaztepe dolayında görülen ve sınırlı miktarda Susuzyayla civarında da gözlenen ofiyolitik birimler (Şekil 5), çalışma sahası dışında ve güneydoğusunda yer alan Dipsiz Göl civarında yaygın olup, [87] tarafından Dipsiz Göl Ofiyolit Melanjı olarak adlandırılmıştır. Birim, [89] tarafından yarı geçirimli olarak tanımlanmış olup, özellikle bahar aylarında yükselen hava sıcaklığına bağlı olarak ofiyolitik birimler üzerindeki kar örtüsü eriyerek yüzeysel akışa geçmekte ve toplanan sular Tınaztepe dolini aracılığıyla karst akiferini noktasal olarak beslemektedir.

Karst akiferinin beslenme boşalım ilişkisinin aydınlatılması için hidrojeokimya ve izotop çalışmaları ile birlikte kaynak sularında taşınan askı sedimentlerin mineralojik incelemesi [43],[92] ve izleyici boya deneylerinden [91],[92],[93] yararlanılmıştır. Kaynak sularının kimyası analizi sonucunda suların CaCO_3 su tipinde olduğu ve kalsit ve dolomit minerallerince doygunluğa ulaşmadığı tespit edilmiştir [89]. Karst akiferi içerisinde kanal baskın dolaşım hakim olduğundan sular hızlı bir şekilde kaynağa doğru akmakta ve sular yeterli miktarda kalsit ve dolomit minerallerini çözememektedir. Bölgedeki kar yağışlarından ve kaynak sularından toplanan numunelerin duraylı oksijen izotopları ($\delta^{18}\text{O}$) incelendiğinde kaynak sularının yaklaşık olarak 1490 m kotundan beslendiği sonucuna ulaşılmıştır [43],[91]. Sonrasında potansiyel beslenme alanı içerisinde bulunan kayalardan alınan numunelerde ince kesit analizleri yapılmış ve kaynaklar tarafından taşınan askı sedimentlerde yapılan ince kesit görüntüleri ile karşılaştırılmıştır [43]. Bu analizlerin sonucuna göre karst akiferinin potansiyel beslenme bölgeleri Tınaztepe dolini ve çevresi, Susuzyayla bölgesi ve Elmasut yöresi olarak tahmin edilmiş olup su kimyası analizleri de suların kökensel olarak bu bölgelerden beslendiğini doğrulamaktadır. Sonra sırasıyla Susuzyayla [92], Tınaztepe [93] ve Elmasut [93] yörelerinde yer alan düdenlerden izleme deneyleri yapılmış ve karst akiferinin beslenme alanı sınırı netleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. (a) İzleme deneyinde kullanılan Na-floresan boya, (b) kaynak sularında izleyici konsantrasyonu ölçümünde kullanılan florometre cihazı (c) Susuzyayla bölgesinden, (d) Tınaztepe dolininden (e) Elmasut Eşekçukuru düdeninden yapılan izleyici enjeksiyonu ve (f) Elmasut Eşekçukuru düdeninde enjeksiyon sonrası yapay besleme.

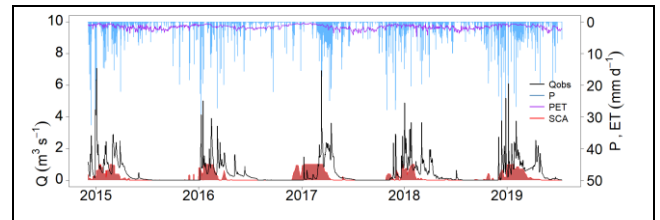
Figure 6. (a) The Uranine fluorescent dye, (b) fluorometer device, (c) injection from Susuzyayla Muharrem swallow hole, (d) Tınaztepe doline, (e) Elmasut Eşekçukuru swallow hole, and (f) artificial water injection at Eşekçukuru swallow hole.

İzleme deneyleri sonucunda karst akiferinin beslenme alanı yaklaşık olarak 70 km^2 ’lik bir alana yayılmakta olup Susuzyayla, Elmasut ve Tınaztepe bölgelerini içerisine almaktadır (Şekil 4). İzleme deneyleri sonucunda karst akiferi içerisindeki yeraltısuyu akım hızı yaklaşık 2 km/gün olarak hesaplanmıştır [93].

Karstik akiferin hidrodinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için Pınarbaşı kaynağında toplanan saatlik boşalım verilerinin çekilme eğrisi analizleri [94] ve zaman serisi analizleri [52] yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında [49] ve [95]’in kriterleri dikkate alındığında karst akiferinin karstlaşma derecesinin yüksek olduğu, akifer içerisinde yeraltısuyunun süreksizlikler, kanallar ve mağara sistemleri tarafından kontrol edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.2 Modelde kullanılan verilerin temini ve işlenmesi

Susuz karst akiferinin boşalım modelinde kullanılan verilerden günlük toplam yağış ve günlük ortalama hava sıcaklığı verileri bölgedeki Seydişehir, Alacabel, Ahırlı, Yalhhüyük ve Sorkun meteoroloji istasyonlarından temin edilmiştir [96]. Karst akiferi için temsil edici bölge olarak Susuzyayla mevki seçilmiş olup istasyonlardan elde edilen yağış ve sıcaklık verileri Susuzyayla bölgesine göre IDW interpolasyon yöntemi kullanılarak bir tek zaman serisi haline getirilmiştir [68]. Potansiyel buharlaşma-terleme hesaplamaları için R’da geliştirilmiş olan potansiyel buharlaşma-terleme hesaplama paketi olan SPEI paketi içerisindeki Thorntwaite [97] yöntemini kullanılmıştır. Model kalibrasyonu için ihtiyaç duyulan kaynak boşalım verileri Pınarbaşı kaynağına [91] tarafından kurulan akım gözlem istasyonundan temin edilmiştir. Akım gözlem istasyonu saatlik çözünürlükte boşalım ölçümleri almakta olup sonrasında bu veriler model girdi verilerinin günlük zamansal çözünürlüğe sahip olmasından dolayı günlük toplam boşalım verisine R içerisinde bulunan zoo paketi içerisindeki “aggregate” fonksiyonu ile dönüştürülmüştür. Karst akiferinin dağlık bir bölgede yer alması ve yağışların kış döneminde kar şeklinde gerçekleşmesinden ötürü kavramsal hidrolojik modelde bir kar döngüsüne ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda [29] tarafından geliştirilmiş olan SCA kar döngüsünün kullanılmasına karar verilmiştir. Söz konusu kar döngüsünün uydu tabanlı karla kaplı alan ölçümlerine ihtiyaç duyması nedeniyle MODIS günlük kar örtüsü verileri (MOD10A1) kullanılmıştır (bkz.[29]). MODIS haritaları R ortamında yazılmış olan MODISrsp paketi [98] kullanılarak indirilmiş ve işlenmiştir. Elde edilen tüm model verileri Şekil 7’te görülmektedir.



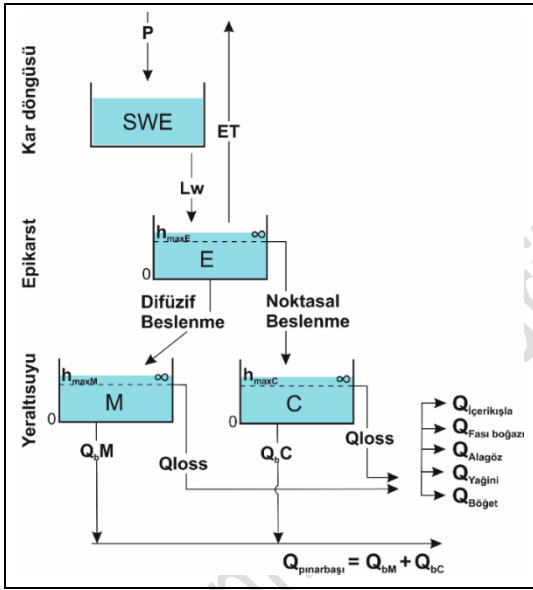
Şekil 7. Model çalışmasında kullanılan günlük toplam yağış (P), günlük potansiyel buharlaşma-terleme (PET), günlük karla kaplı alan (SCA) ve günlük kaynak boşalım (Qobs) grafikleri

Figure 7. The datasets used in the paper: Daily total precipitation (P), Daily potential evapotranspiration (PET), Daily snow covered area (SCA) and Daily observed spring discharge (Qobs).

3.3 Model kodunun seçilmesi ve geliştirilmesi

Hidrolojik kavramsal model çalışmalarında en önemli aşamalardan birisi de model kodunun seçilmesi aşamasıdır. Modelleneyecek karst akiferinin baskın hidrodinamik süreçlerinin kullanılacak model kodu tarafından temsil edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında seçilen model [25] tarafından geliştirilmiş olan KarstMod modelinin [29] tarafından dağlık havzalar için geliştirilmiş versiyonu olan KarstMod-SCA modelidir.

Modelin geliştirilmiş versiyonu en üstte bir kar rezervuarı (SWE) ve bunun altında sırasıyla Epikarst (E) ve epikarst rezervuarının altında iki paralel rezervuar olan kanal (C) ve matriks (M) olmak üzere üç adet rezervuar sahiptir (Şekil 8). Karst akiferine düşen yağışlar P ilk önce SCA döngüsü tarafından sıvı fazdaki yağış (yağmur) ya da katı fazdaki yağış (kar) olarak ikiye ayrılmakta ve kar yağışları SWE rezervuarında biriktirilip uygun şartlar oluştuğunda eritilmektedir [29]. Eriyen kar suları ve yağmur sularının toplamı modelde L_w [LT^{-1}] olarak ifade edilmiş olup E rezervuarının girdi akısını oluşturmaktadır. E rezervuarından gerçekleşen çıktılar potansiyel buharlaşma-terleme (ET), M rezervuarına gerçekleşen difüzyif beslenme [LT^{-1}] ve C rezervuarına gerçekleşen konsantre beslenme [LT^{-1}] akılarından oluşmaktadır.



Şekil 8. Susuz karst akiferi hidrojeolojik kavramsal modelinin şematik gösterimi ([68]'den alınmıştır)

Figure 8. The conceptual model structure of the susuz karst aquifer (edited from [68]).

E rezervuarından C rezervuarına konsantre beslenme gerçekleşebilmesi için E rezervuarındaki su seviyesinin bir kritik seviyeye (h_{maxE}) ulaşması gerekmektedir. M rezervuarına girdi akısı E rezervuarından gerçekleşen difüzyif beslenme [LT^{-1}] çıktı ise M rezervuarından kaynak boşalmasına giden Q_{bM} [LT^{-1}] akısı ve kayıp kaçak akısı olan Q_{loss} [LT^{-1}] tan oluşmaktadır. Benzer şekilde C rezervuarına girdi akısı E rezervuarından gerçekleşen konsantre beslenme [LT^{-1}], çıktı ise C rezervuarından kaynak boşalmasına giden Q_{bC} [LT^{-1}] akısı ve kayıp kaçak kısmı olan Q_{loss} [LT^{-1}] tan oluşmaktadır. Q_{loss} akılarının gerçekleşebilmesi için M ve C rezervuarlarında su seviyelerinin kritik seviyeye ulaşması gerekmekte olup bu seviyeler M ve C rezervuarları için sırasıyla h_{maxM} ve h_{maxC}

parametreleriyle ifade edilmektedir. Q_{loss} akılarının toplam boşalım miktarının karst akiferini boşaltan diğer kaynaklar olan İçerikışla, Fası Boğazı, Alagöz, Yağini ve Böğet kaynaklarının boşalmalarına eşit olduğu varsayılmaktadır. İleri derecede karstlaşmanın görüldüğü bölgelerde boşalım hidrografında yüksek ve sivri pik boşalmımlarla birlikte uzun süreli çekilme eğrileri bir arada bulunuyorsa, modelde klasik yapıdan ziyade sonsuz karakteristik zaman yapısının kullanılması önerilmektedir [25]. Söz konusu rezervuarın birim tepkisi olan $w(t)$ (5)'teki gibi hesaplanmaktadır [99].

$$w(t) = \frac{\alpha_A \times \tau_A^{\alpha_A}}{(\tau_A + t)^{\alpha_A + 1}} \quad (5)$$

$$Q_{bA} = R \times w(t) \quad (6)$$

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \theta_i A_i(t) \quad (7)$$

$$Q_{bA}(t) = \sum_{i=1}^N \theta_i Q_{bAi}(t) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \theta_i = 1 \quad (9)$$

Burada; A ilgilenilen model kompartmanını, R ise bu kompartmana girdi akısını temsil etmektedir. α_A (0,1) pozitif üssü, τ_A ise zaman ölçeğini temsil etmektedir. α_A 'nın 1'den büyük olduğu durumlarda zaman ölçeği sonlu karakteristik sahibi olacağından 0 ile 1 arasında değer alması önerilmektedir. A kompartmanından boşalım miktarı her bir n paralel rezervuarın boşalmalarının ağırlıklı toplamına eşittir (7), (8), (9).

KarstMod-SCA modelinde seviye değişkenleri olan SWE, E, M ve C'nin birim zamanda kütle dengliği eşitlikleri (10) - (12) arasında detaylı olarak verilmiştir [25].

$$\frac{dSWE}{dt} = P_{snow} - Q_{melt} \quad (10)$$

$$\frac{dE}{dt} = L_w - ET - Q_{loss} - Q_{EM} - Q_{EC} \quad (11)$$

$$\frac{dM}{dt} = Q_{EM} - Q_{Mpump} - Q_{bM} - Q_{loss} \quad (12)$$

$$\frac{dC}{dt} = Q_{EC} - Q_{CS} - Q_{Cpump} - Q_{bC} - Q_{loss} \quad (13)$$

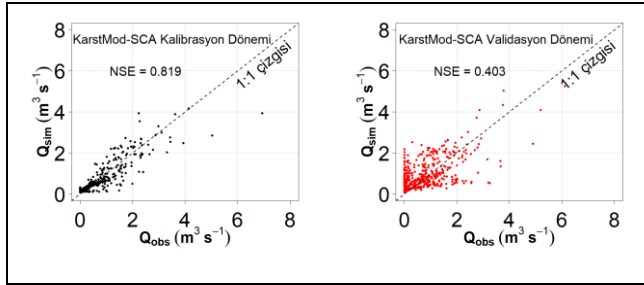
Burada P_{snow} kar formunda düşen yağış, Q_{melt} kar erimesi ile oluşan akışı, L_w yağmur formunda düşen yağış ile birlikte (eğer varsa) kar erimesi ile gelen su miktarının toplamını, ET gerçek buharlaşma-terlemeyi ifade etmektedir. Q_{EM} epikarsttan matrikse gerçekleşen difüzyif beslenme Q_{EC} ise epikarsttan kanala gerçekleşen konsantre beslenmeyi ifade etmektedir. Q_{Mpump} ve Q_{Cpump} ise (eğer var ise) sırasıyla matriks ve kanal rezervuarlarından pompajla çekilen su debilerini temsil etmektedir. Q_{bM} ve Q_{bC} sırasıyla matriks ve kanal rezervuarlarında kaynak boşalmasına giden su miktarını, Q_{loss} ise kayıp-kaçak miktarını temsil etmektedir.

3.4 Model parametrelerinin kalibrasyonu ve belirsizlik analizleri

KarstMod modeli bir grafik kullanıcı ara yüzüne sahip modelleme platformudur (<https://sokarst.org/en/softwares-en/karstmod-en/>). İçerisinde kullanıcı tarafından belirlenen alt ve üst sınır değerleri arasında yine kullanıcı tarafından belirlenen sayıda Monte Carlo yöntemine göre parametrelere değerler atayarak GLUE [100] metodolojisini kullanan ve en başarılı model sonucunu elde etmek üzerine programlanmış bir kalibrasyon aracı bulunmaktadır. Model performanslarının değerlendirilmesi ise [77] tarafından geliştirilmiş olan ve (3)'te verilen NSE_Q performans metriği kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan model yapısında yer alan parametreler ve bu parametrelerin kalibrasyonu aşamasında belirlenen alt ve üst sınır değerleri Tablo 2'de görülmektedir.

3.5 Model sonuçlarının değerlendirilmesi

Susuz karst akiferinin KarstMod-SCA modeli kullanılarak elde edilmiş en başarılı boşalım sonuçları Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. En yüksek performansı veren model simülasyonuna ait boşalım verilerinin kaynaktan ölçülen boşalım verileri ile birlikte dağılım grafiği üzerinde gösterimi.

Figure 9. The model simulation results having the highest model performance in the calibration period.

Model kalibrasyon döneminde $NSE = 0.819$ performansına ulaşarak başarılı bir şekilde sistem hidrodinamiğini yansıtmaktadır. Şekil 9'da verilen dağılım grafiğinde ölçülen ve modellenen boşalım değerlerinin özellikle kalibrasyon döneminde 1:1 çizgisi çevresinde kümelenmesi model performansının hem düşük hem de yüksek boşalım dönemlerinde başarılı olduğuna işaret etmektedir. Elde edilen 10.000 adet başarılı model sonucunun ($NSE > 0.4$) % 95'lik güven aralığı içerisindeki dağılımları ve en başarılı boşalım simülasyonu ($NSE = 0.819$) Şekil 10a'da verilmiştir. %95'lik güven aralığının çok geniş olmaması model sonuçlarındaki

belirsizliklerin çok yüksek olmadığına işaret etmektedir. Model hem pik boşalım dönemlerinde hem de çekilme dönemlerinde başarılı bir şekilde boşalım tahmini yapabilmektedir.

Özellikle kar yağışlarının çok etkili olduğu Aralık 2016–Haziran 2017 dönemi boyunca modelin boşalım simülasyonlarında son derece başarılı performans sergilediği görülmektedir (Şekil 10a). Model performansının değerlendirilmesi yalnızca boşalım hidrografları üzerinden değil, aynı zamanda model içsel rezervuarları olan E, C ve M'deki su seviyesi değerleri üzerinden de yorumlanmıştır (Şekil 10b). Her ne kadar model iç rezervuarlarında bir ölçüm verisi bulunmasa da [29], elde edilen değerlerin gerçekliği model geliştiricinin sistem hakkındaki kavramsal bilgisi açısından başarılı olarak değerlendirilmiştir. Sistemin en hızlı tepki veren kısmı E rezervuarı olarak ortaya çıkmış ve E rezervuarında maksimum depolama yaklaşık 50 mm dolayında hesaplanmıştır. E rezervuarındaki su seviyesindeki hızlı artış bölgedeki toprak örtüsünün zayıf olması ve yağışların çok hızlı bir şekilde E rezervuarına ulaşabilmesi ile mümkündür. Benzer şekilde E rezervuarında maksimum depolamaya ulaşıldıktan sonra rezervuardaki sular yatayda akışa geçerek C rezervuarına hızlı bir şekilde iletilmekte ve C rezervuarına konsantrasyon beslenmeye neden olmaktadır. C rezervuarında su seviyesinin çok yükselmemesinin nedenlerinden birisi kanal sistemlerinin hidrolik iletkenliğinin çok yüksek olmasıdır. C rezervuarındaki yeraltısuyunun ortalama geçiş süresinin model tarafından yaklaşık 4 gün olarak hesaplanmış olması da bunu destekler niteliktedir. Bölgede yapılan izleme deneylerinden elde edilen yaklaşık yeraltı suyu akım hızları dikkate alındığında (1300-1700 m/gün) kanal ortamındaki yeraltı suyu akımının hızlı olduğu ortaya çıkmaktadır ve model simülasyonları gerçek hidrodinamik sistemle uyumlu ilerlemektedir. Ayrıca bölgedeki faylar ve süreksizlikler dikkate alındığında yeraltı suyu gerçek akım hızı 3000 m/gün değerlerine kadar artmaktadır [68],[92]. Diğer taraftan M rezervuarı en düşük hidrolik iletkenliğe sahip ortamı teşkil ettiği için M ortamına gerçekleşen beslenme de, M rezervuarından kaynağa gerçekleşen boşalım da yavaş gerçekleşmektedir (Şekil 10b).

Model yeteneğini ortaya koyan bir başka model rezervuarı da kar simülasyonlarıdır. SCA kar döngüsü ile elde edilen kar su eşleniği (SWE) grafikleri ile MODIS uydularından elde edilen kar örtüsü ölçümleri karşılaştırıldığında ikisi arasındaki uyum göze çarpmaktadır (Şekil 10c). Kar simülasyonlarının en başarılı olduğu dönem Aralık 2016–Temmuz 2017 arasındaki dönem olup, söz konusu dönemde kar yağışları zaman serisi içerisindeki diğer yılların çok üzerindedir.

Tablo 2. Karstmod-SCA model parametreleri ve Susuz karst akiferi modeli için belirlenen alt ve üst sınır değerleri.

Table 2. The parameters of the KarstMod-SCA model and their upper-lower boundaries for the Susuz karst aquifer.

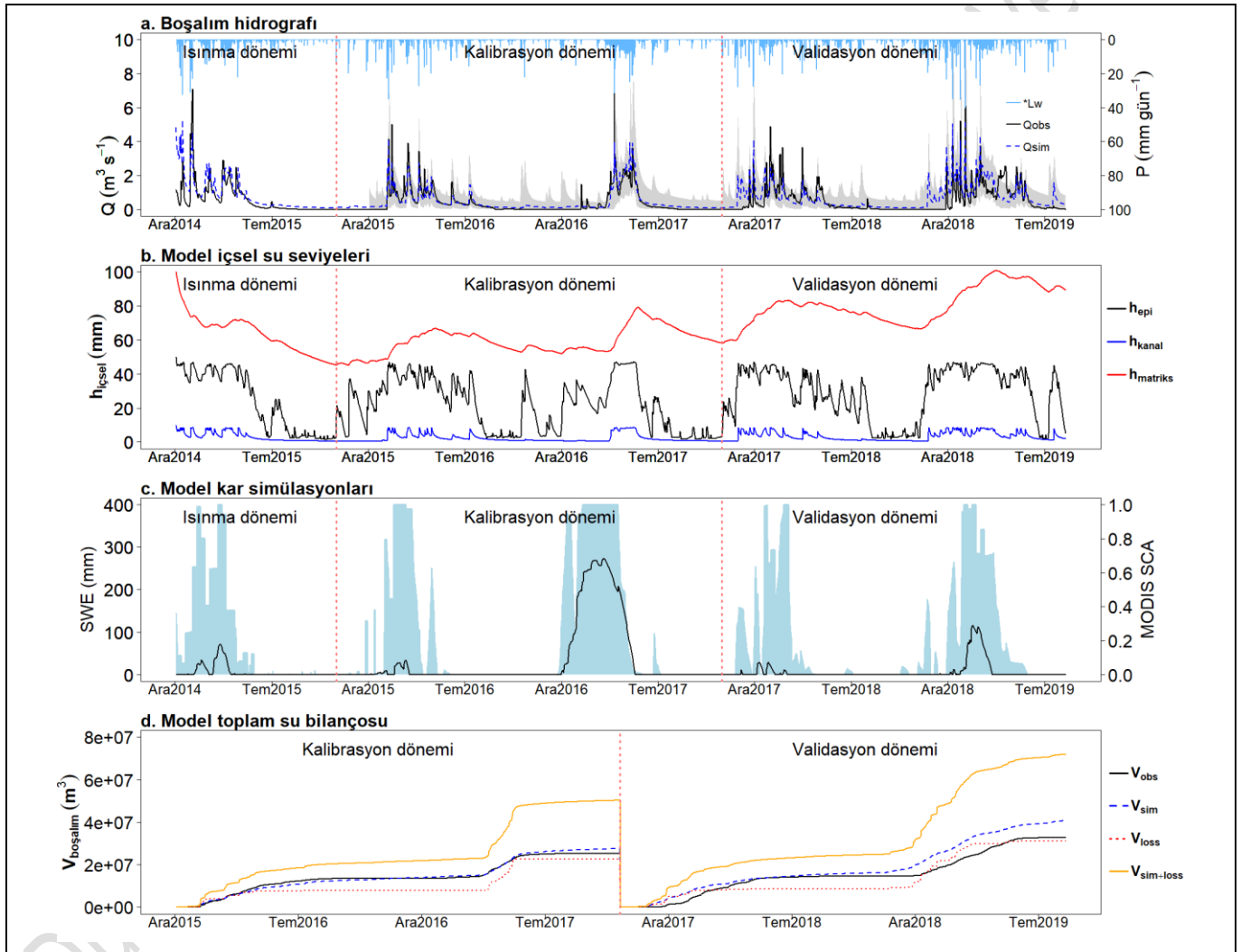
	Parametre	Birim	Açıklama	Alt sınır	Üst sınır
Hidrolojik model parametreleri	ac	gün^{-1}		0.2	0.8
	ae	gün^{-1}	Pozitif üs (çekilme katsayısı)	0.2	0.8
	am	gün^{-1}		0.2	0.8
	tc	gün	Kanal ortamı yeraltı suyu geçiş süresi	1	5
	te	gün	Epikarst ortamı yeraltı suyu geçiş süresi	5	15
	tm	gün	Matriks ortamı yeraltı suyu geçiş süresi	15	60
	h_{minE}	mm	Minimum epikarst depolaması	0	50
	h_{maxE}	mm	Maksimum epikarst depolaması	0	500
	h_{maxC}	mm	Maksimum kanal depolaması	0	500
	h_{maxM}	mm	Maksimum matriks depolaması	0	1500
	RA	km^2	Beslenme alanı	40	100

Söz konusu dönemde karst akiferinde ortalama SWE 300 mm dolayında iken diğer yıllarda bu miktar en fazla 100 mm değerlerine ulaşmıştır (Şekil 10c). MODIS uydularının kar haritalamada kullandığı NDSI (Normalized Difference Snow Index) indeksi 0.4'ten düşük değerler aldığı kar örtüsünü belirlemede kesin sonuçlar verememektedir [101],[102],[103]. Bu nedenle 2016-2017 kış döneminde MODIS uydularının diğer yıllara göre kar örtüsü haritalamada daha başarılı olduğu düşünülmektedir. Diğer yıllarda ise bölgede kar yağışları zayıf olduğu için MODIS uyduları da kar örtüsü haritalarında büyük belirsizlikler içermektedir. Model tarafından karst akiferine ait boşalım miktarı kalibrasyon

dönemi için yaklaşık 50×10^6 m³ dolayında hesaplanmıştır (Şekil 10d).

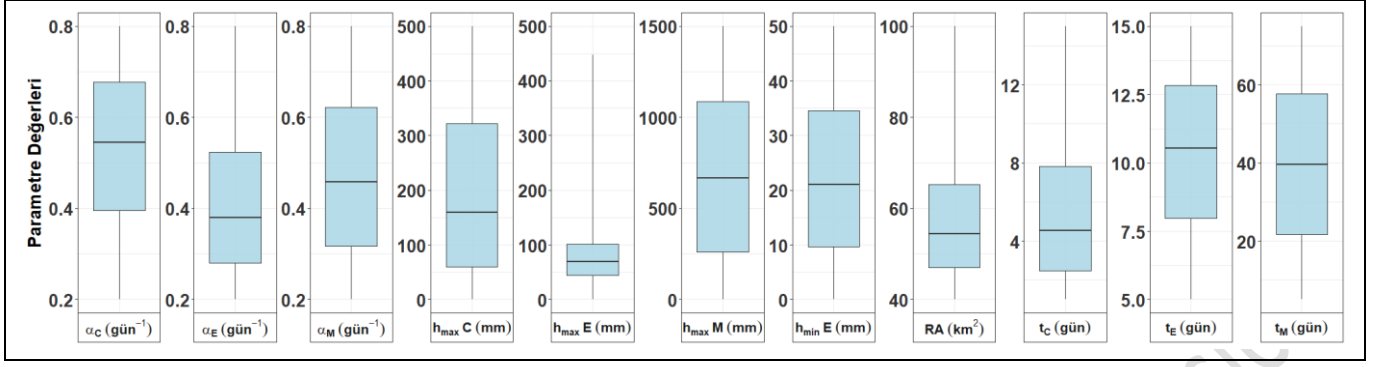
Bu boşalım miktarının ise yaklaşık 25×10^6 m³ kadarı tek başına Pınarbaşı kaynağından boşalmıştır. Geriye kalan ve model kurgusunda kayıp-kaçak olarak belirlenen (Şekil 8) boşalımın çoğunlukla Alagöz kaynağı tarafından (yaklaşık 20×10^6 m³) ve geriye kalan kısmının da başta Fası Boğazı kaynağı olmak üzere diğer kaynaklar tarafından boşaltıldığı belirlenmiştir [68].

Model parametrelerinin kalibrasyon aşamasında eşik değer olarak belirlenen $NSE > 0,4$ kriterini sağlayan tüm parametre değerleri kaydedilmiş ve bu parametrelerin dağılımları Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. En başarılı model simülasyonuna ait (a) boşalım hidrografi %95 belirsizlik bandı ile birlikte, (b) model iç rezervuarlarındaki (epikarst, matriks ve kanal) su seviyesi değişimleri, (c) kar simülasyonları ve (d) model toplam su bilançosu.

Figure 10. (a) Discharge hydrograph together with the 95% uncertainty bound of the behavioural discharge simulations, (b) model internal states, (c) SWE simulations against MODIS snow cover data, and (d) water budget of the Susuz karst aquifer.



Şekil 11. KarstMod-SCA modeli NSE > 0,4 koşulunu sağlayan model parametrelerinin Box ve Whisker grafiği üzerindeki dağılımları

Figure 11. Box and Whisker plots of the behavioural parameter samples (NSE > 0.4) of KarstMod-SCA model

Söz konusu parametre dağılım grafiğinde diğer parametrelerden ilk bakışta ayrılan $h_{max}E$ (mm) parametresidir. Bu parametrede %25 ve %75'lik dağılım değerlerinin birbirlerine yakın olması, parametrenin görece dar bir aralığa sıkıştırılabildiğini ve daha az belirsizlik içerdiğini göstermektedir. Bu nedenle modelin en başarılı olarak tahmin ettiği parametre olarak ifade edilebilen $h_{max}E$ (mm) parametresi, E rezervuarından C rezervuarına konsantrasyon beslenmeyi kontrol eden eşik su seviyesi değerini ifade etmektedir. Şekil 11'e göre en az belirsizlik içererek tahmin edilen parametreler sıralamasında $h_{max}E$ (mm) parametresini sırasıyla beslenme alanını ifade eden RA (km²) ve E çekilme katsayısını ifade eden α_E (gün⁻¹) takip etmektedir. Tüm bu parametrelerin ortak noktası, bunların modelin sığ kısmının hidrodinamiğini kontrol eden parametreler olmasıdır. Buradan yola çıkarak modelin sığ rezervuarı olan E rezervuarının model hidrodinamiği üzerinde etkin olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Karst akiferinin derin dolaşımli kısımlarını oluşturan C ve M ortamını temsil eden model parametrelerinde C rezervuarındaki ortalama geçiş süresini temsil eden t_C (gün) dışında diğerlerinde ileri derecede bir kısıtlama gözlenmemekle birlikte bu parametrelerin model sonuçları üzerindeki etkisinin daha düşük olduğu düşünülmektedir [29].

4 Tartışma ve öneriler

Bu çalışma kapsamında karstik bir akiferde kavramsal modelleme yaklaşımı ile sayısal boşalım modeli yapabilmek için uygulanması gereken hidrolojik ve hidrojeolojik metodoloji detaylı olarak açıklanmış ve Orta Toros karst kuşağında yer alan Susuz karst akiferi örneği üzerinden detaylandırılmıştır. Her ne kadar son yıllarda çok sayıda yapay zeka ve makine öğrenmesi odaklı modellere yönelim olsa da [13],[16] bu modellerin sistem hidrodinamik süreçlerini temsil etmedeki yetersizlikleri kavramsal modellerin önemini ortaya koymuştur [23],[104]. Seçilen kavramsal modelin akifer karakteristiğini temsil etmede yeterli olması veya (en azından) geliştirilebilir olmasının yanında ihtiyaç duyduğu verilerin alansal ve zamansal çözünürlüğünün yeterliliği de önem taşımaktadır. Örneğin karst akiferi içerisinde açılmış kuyuların olması ve bu kuyulardan seviye ölçümleri alınması durumunda [104] eldeki model kodunun da E, C ya da M rezervuarlarında seviye ölçümlerine göre kalibre edilebilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Model kodunun sistem hidrodinamiğini temsil etmede yeterli gelmediği durumlarda da modelin havza karakteristikleri ve eldeki verilerle örtüşmesi için geliştirilebilmesi gerekmektedir [29]. Bu nedenle bu çalışmada özellikle dağlık bir karst akiferinin modeli yapılmak istenmiş ve

orijinalinde bir kar döngüsüne sahip olmayan KarstMod modeli SCA kar döngüsü ile geliştirilerek temsil edici hale getirilmiştir. Model kar döngüsü için ise MODIS Günlük karla kaplı alan MOD10A1 haritalarından yararlanılarak model içerisinde nasıl veri asimilasyonu yapılacağı da örnek uygulama ile gösterilmiştir. Karstik akiferlerin miktar ve kalite açısından kontrol altında tutulması, bu yeraltı suyu sistemlerinin sürdürülebilir kullanımının sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle ülkemizdeki karstik kaynaklarda olabildiğince anlık boşalım ölçümleri yapan otomatik ölçüm istasyonların kurulması, kaynak sularında boşalım, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik gibi fizikokimyasal parametrelerin izlenmesi önerilmektedir.

5 Conclusion

In this study, we explained the suitable methodology to how to build a numerical conceptual hydrological model to predict spring discharge in karstic environments. By doing this, we have given examples of the previous modelling results that we obtained at Pınarbaşı karst spring, Central Taurus karst region, Turkey. While there is a trend on using the AI models for the water resources predictions in recent years [13],[16] the value of the conceptual models is critical considering the system representation [23],[104]. Additionally, accessible and editable model codes and model structure together with adequate spatial and temporal resolution of the model input data is essential. For instance, the availability of the water head measurements in E, C, or M reservoirs helps the modeler to multi variable calibration of the model. For the cases where the model structure is not enough representative for the system's hydrodynamics, there could be a need to improve the model to better represent the system hydrodynamics [29]. In the present case study, we improved the KarstMod model with the SCA snow routine to better represent the mountainous hydrodynamics of the karst system. We used MODIS MOD10A1 coded daily snow covered area products to improve the snow simulations of the model. By doing this, we also showed an example to how to assimilate satellite data to the hydrological model. This is very important that karst springs should be monitored by quantitative and qualitatively to sustainable usage of these groundwater systems. For this reason, we recommend to increase the number of the discharge gauging stations collecting high temporal resolution (daily or hourly) discharge data together with physico-chemical variables such as water temperature and electrical conductivity.

6 Teşekkür

7 Yazar katkı beyanı

Yazar 1 model analizlerinin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım konusunda, Yazar 2 ise verilerin temini ve makale metninin eleştirel incelemesi konusunda katkıda bulunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur."

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] Smart PL, Hobbs SL. "Characterisation of carbonate aquifers: a conceptual base". In *Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference. National Water Well Association, Dublin OH. 1986.* p 1-14, 7 fig, 25 ref (Vol. 1986).
- [2] Ford DC, Williams PW. "Karst geomorphology and hydrology" (Vol. 601). London: Unwin Hyman. 1989.
- [3] Bakalowicz M. "Karst groundwater: a challenge for new resources". *Hydrogeology journal*, 13, 148-160. 2005.
- [4] Giorgi F, Lionello P. "Climate change projections for the Mediterranean region". *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104. 2008.
- [5] Lelieveld J, Hadjinicolaou P, Kostopoulou E, Chenoweth J, El Maayar M, Giannakopoulos C, ... Xoplaki E. "Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East". *Climatic change*, 114, 667-687. 2012.
- [6] Cramer W, Guiot J, Fader M, Garrabou J, Gattuso JP, Iglesias A, ... Xoplaki E. "Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean". *Nature Climate Change*, 8(11), 972-980. 2018.
- [7] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, Lange J, Weiler M. "Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches". *Reviews of Geophysics*, 52(3), 218-242. 2014.
- [8] Jukić D, Denić-Jukić V. "Nonlinear kernel functions for karst aquifers". *Journal of hydrology*, 328(1-2), 360-374. 2006.
- [9] Denić-Jukić V, Jukić D. "Composite transfer functions for karst aquifers". *Journal of hydrology*, 274(1-4), 80-94. 2003.
- [10] Jukić D, Denić-Jukić V. "Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model". *Journal of hydrology*, 373(3-4), 302-315. 2009.
- [11] Salerno F, Tartari G. "A coupled approach of surface hydrological modelling and Wavelet Analysis for understanding the baseflow components of river discharge in karst environments". *Journal of hydrology*, 376(1-2), 295-306. 2009.
- [12] Hao Y, Zhao J, Li H, Cao B, Li Z, Yeh TCJ. "Karst Hydrological Processes and Grey System Model1". *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 48(4), 656-666. 2012.
- [13] Kurtulus B, Razack M. "Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy". *Journal of Hydrology*, 381(1-2), 101-111. 2010.
- [14] Kovačević M, Ivanišević N, Dašić T, Marković L. "Application of artificial neural networks for hydrological modelling in karst". *Grđevinar*, 70(01.), 1-10. 2018.
- [15] Sezen C, Partal T. "The utilization of a GR4J model and wavelet-based artificial neural network for rainfall-runoff modelling". *Water Supply*, 19(5), 1295-1304. 2019.
- [16] Wunsch A, Liesch T, Cinkus G, Ravbar N, Chen Z, Mazzilli N, ... Goldscheider N. "Karst spring discharge modeling based on deep learning using spatially distributed input data". *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2405-2430. 2022.
- [17] Li J, Yuan D, Liu J, Jiang Y, Chen Y, Hsu KL, Sorooshian S. "Predicting floods in a large karst river basin by coupling PERSIANN-CCS QPEs with a physically based distributed hydrological model". *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1505-1532. 2019.
- [18] Li J, Hong A, Yuan D, Jiang Y, Deng S, Cao C, Liu J. "A new distributed karst-tunnel hydrological model and tunnel hydrological effect simulations". *Journal of Hydrology*, 593, 125639. 2021.
- [19] Yang W, Chen L, Deng F, Lv S. "Application of an improved distributed Xinanjiang hydrological model for flood prediction in a karst catchment in South-Western China". *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12649. 2020.
- [20] Yang W, Chen L, Chen X, Chen H. "Sub-daily precipitation-streamflow modelling of the karst-dominated basin using an improved grid-based distributed Xinanjiang hydrological model". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101125. 2022.
- [21] Kiraly L. "Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach". *Bulletin du Centre d'hydrogéologie*, 16, 77-98. 1998.
- [22] Jaiswal RK, Ali S, Bharti B. "Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models". *Applied water science*, 10(1), 48. 2020.
- [23] Sezen C, Bezak N, Bai Y, Šraj M. "Hydrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models". *Journal of Hydrology*, 576, 98-110. 2019.
- [24] Sarrazin F, Hartmann A, Pianosi F, Rosolem R, Wagener T. "V2Karst V1. 1: a parsimonious large-scale integrated vegetation-recharge model to simulate the impact of climate and land cover change in karst regions". *Geoscientific Model Development*, 11(12), 4933-4964. 2018.
- [25] Mazzilli N, Guinot V, Jourde H, Lecoq N, Labat D, Arfib B, Baudement C, Danquigny C, Dal Soglio L, Bertin D. "KarstMod: a modelling platform for rainfall-discharge analysis and modelling dedicated to karst systems". *Environ. Modell. Software* 122, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>. 2019.
- [26] Hartmann A, Barbera JA, Lange J, Andreo B, Weiler M. "Progress in the hydrologic simulation of time variant recharge areas of karst systems-Exemplified at a karst spring in Southern Spain". *Adv. Water Resour.* 54, 149-160. 2013.
- [27] Bittner D, Narany TS, Kohl B, Disse M, Chiogna G. "Modeling the hydrological impact of land use change in a dolomite-dominated karst system". *Journal of Hydrology*, 567, 267-279. 2018.
- [28] Ollivier C, Mazzilli N, Oliosio A, Chalikakis K, Carrière SD, Danquigny C, Emblanch C. "Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows". *Science of the Total Environment*, 703, 134368. 2020.

- [29] Çallı SS, Çallı KÖ, Yılmaz MT, Çelik M. "Contribution of the satellite-data driven snow routine to a karst hydrological model". *Journal of Hydrology*, 607, 127511. 2022.
- [30] Herczeg AL, Leaney FWJ, Stadler MF, Allan GL, Fifield LK. "Chemical and isotopic indicators of point-source recharge to a karst aquifer, South Australia". *Journal of Hydrology*, 192(1-4), 271-299. 1997.
- [31] Perrin J, Jeannin PY, Zwahlen F. "Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland". *Journal of hydrology*, 279(1-4), 106-124. 2003.
- [32] Doctor DH, Lojen S, Horvat M. "A stable isotope investigation of the classical karst aquifer: evaluating karst groundwater components for water quality preservation". *Acta carsologica*, 29(1), 79-92. 2000.
- [33] White WB. "Karst hydrology: recent developments and open questions". *Engineering geology*, 65(2-3), 85-105. 2002.
- [34] White W. "Chemistry and karst". *Acta Carsologica*, 44(3). 2015.
- [35] Perrin J, Jeannin PY, Zwahlen F. "Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at Milandre test site, Swiss Jura". *Hydrogeology Journal*, 11, 673-686. 2003.
- [36] Barbieri M, Boschetti T, Petitta M, Tallini M. "Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy)". *Applied Geochemistry*, 20(11), 2063-2081. 2005.
- [37] Doctor DH, Alexander EC, Petrič M, Kogovšek J, Urbanc J, Lojen S, Stichler W. "Quantification of karst aquifer discharge components during storm events through end-member mixing analysis using natural chemistry and stable isotopes as tracers". *Hydrogeology Journal*, 14, 1171-1191. 2006.
- [38] Goldscheider N, Meiman J, Pronk M, Smart C. "Tracer tests in karst hydrogeology and speleology". *International Journal of speleology*, 37(1), 27-40. 2008.
- [39] Aydin H, Ekmekçi M, Soyulu ME. "Effects of sinuosity factor on hydrodynamic parameters estimation in karst systems: a dye tracer experiment from the Beyyayla sinkhole (Eskişehir, Turkey)". *Environmental Earth Sciences*, 71, 3921-3933. 2014.
- [40] Mahler BJ, Lynch FL. "Muddy waters: temporal variation in sediment discharging from a karst spring". *Journal of Hydrology*, 214(1-4), 165-178. 1999.
- [41] Drysdale R, Pierotti L, Piccini L, Baldacci F. "Suspended sediments in karst spring waters near Massa (Tuscany), Italy". *Environmental Geology*, 40, 1037-1050. 2001.
- [42] Herman EK, Tancredi JH, Toran L, White WB. "Mineralogy of suspended sediment in three karst springs". *Hydrogeology Journal*, 15, 255-266. 2007.
- [43] Çelik M, Çallı SS, Karakaş ZS. "The role of mineralogical studies in delineating the recharge area and groundwater circulation of Susuz springs, Central Taurus Belt, Turkey". *Hydrogeology Journal*, 1-17. 2022.
- [44] Mahler B, Massei N. "Anthropogenic contaminants as tracers in an urbanizing karst aquifer". *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1-2), 81-106. 2007.
- [45] Palandačić A, Bonacci O, Snoj A. "Molecular data as a possible tool for tracing groundwater flow in karst environment: example of *Delminichthys adspersus* in Dinaric karst system". *Ecology*, 5(6), 791-797. 2012.
- [46] Bandy AM, Cook K, Fryar AE, Zhu J. "Differential transport of *Escherichia coli* isolates compared to abiotic tracers in a karst aquifer". *Groundwater*, 58(1), 70-78. 2020.
- [47] Yi Y, Zhong J, Bao H, Mostafa KM, Xu S, Xiao HY, Li SL. "The impacts of reservoirs on the sources and transport of riverine organic carbon in the karst area: a multi-tracer study". *Water Research*, 194, 116933. 2021.
- [48] Kovács A, Perrochet P, Király L, Jeannin PY. "A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis". *Journal of hydrology*, 303(1-4), 152-164. 2005.
- [49] Malík P, Vojtková S. "Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs". *Environmental earth sciences*, 65, 2245-2257. 2012.
- [50] Fiorillo F. "The recession of spring hydrographs, focused on karst aquifers". *Water resources management*, 28, 1781-1805. 2014.
- [51] Eris E, Wittenberg H. "Estimation of baseflow and water transfer in karst catchments in Mediterranean Turkey by nonlinear recession analysis". *Journal of Hydrology*, 530, 500-507. 2015.
- [52] Çelik M, Çallı SS. "Conduit and fracture flow characteristics of Pınarbaşı spring, Central Taurus Region, Seydişehir, Turkey". *Acta Carsologica*, 50(1). 2021.
- [53] Olarinoye T, Gleeson T, Hartmann A. "Karst spring recession and classification: efficient, automated methods for both fast-and slow-flow components". *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(21), 5431-5447. 2022.
- [54] Çallı KÖ, Hartmann A. "A Comparative Evaluation of Automated Recession Extraction Procedures for Karst Spring Hydrographs". *Turkish Journal of Water Science and Management*, 6(1), 2-30. 2022.
- [55] Panagopoulos G, Lambrakis N. "The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete)". *Journal of hydrology*, 329(3-4), 368-376. 2006.
- [56] Katsanou K, Lambrakis N, Tayfur G, Baba A. "Describing the karst evolution by the exploitation of hydrologic time-series data". *Water Resources Management*, 29, 3131-3147. 2015.
- [57] Kurniawan IA, Adji TN, Nurkholis A, Haryono E, Fatoni H, Waskito WA, ... Agniy RF. "Karst aquifer response by time series analysis applications in Jonggrangan Karst, Java Island, Indonesia". *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-14. 2019.
- [58] Willimas PW. "The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review". 2008.
- [59] Dreiss SJ. "Regional scale transport in a karst aquifer: 2. Linear systems and time moment analysis". *Water Resources Research*, 25(1), 126-134. 1989.
- [60] Zhang Z, Chen X, Cheng Q, Soulsby C. "Characterizing the variability of transit time distributions and young water fractions in karst catchments using flux tracking". *Hydrological Processes*, 34(15), 3156-3174. 2020.
- [61] Çallı KÖ, Bittner D, Liu Y, Çallı SS, Melsen LA, Bense V, Hartmann A. "Revealing the positive influence of Young Water Fractions derived from stable isotopes on the robustness of karst water resources predictions". *Journal of Hydrology*, 129549. 2023.
- [62] Dogwiler T, Wicks C. "Thermal variations in the hyporheic zone of a karst stream". *International journal of Speleology*, 35(2), 1. 2006.

- [63] Xiao B, Bai X, Zhao C, Tan Q, Li Y, Luo G, ... Du C. "Responses of carbon and water use efficiencies to climate and land use changes in China's karst areas". *Journal of Hydrology*, 617, 128968. 2023.
- [64] Martínez-Santos P, Andreu JM. "Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers". *Journal of hydrology*, 388(3-4), 389-398. 2010.
- [65] Baalousha HM, Barth N, Ramasomanana FH, Ahzi S. "Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS: a case study from Qatar karst aquifer". *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 1319-1329. 2018.
- [66] Allocca V, De Vita P, Manna F, Nimmo JR. "Groundwater recharge assessment at local and episodic scale in a soil mantled perched karst aquifer in southern Italy". *Journal of Hydrology*, 529, 843-853. 2015.
- [67] Berthelin R, Olarinoye T, Rinderer M, Mudarra M, Demand D, Scheller M, Hartmann A. "Estimating karst groundwater recharge from soil moisture observations—a new method tested at the Swabian Alb, southwest Germany". *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(2), 385-400. 2023.
- [68] Çallı SS. Dağlık karst akiferleri için parametrik yağış-karstik kaynak boşalımı modeli geliştirilmesi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye. 2023.
- [69] Dymond JR, Christian R. "Accuracy of discharge determined from a rating curve". *Hydrological Sciences Journal*, 27(4), 493-504. 1982.
- [70] Sivapragasam C, Muttill N. "Discharge rating curve extension—a new approach". *Water Resources Management*, 19, 505-520. 2005.
- [71] Dottori F, Martina MLV, Todini E. "A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement". *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 847-863. 2009.
- [72] Cassel DK, Nielsen DR. "Field capacity and available water capacity. Methods of soil analysis: Part 1". *Physical and mineralogical methods*, 5, 901-926. 1986.
- [73] Schaap MG, Leij FJ, Van Genuchten MT. "Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions". *Journal of hydrology*, 251(3-4), 163-176. 2001.
- [74] Bergström S. "Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments". 1976.
- [75] Bergstrom S. "The HBV model—its structure and applications". *SMHI Hydrology*, RH No. 4, Sweden, Norrköping. 1992.
- [76] Tong R, Parajka J, Salentinig A, Pfeil I, Komma J, Széles B, ... Blöschl G. "The value of ASCAT soil moisture and MODIS snow cover data for calibrating a conceptual hydrologic model". *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1389-1410. 2021.
- [77] Nash JE, Sutcliffe JV. "River flow forecasting through conceptual models, Part 1—a discussion of principles". *J Hydrol* 10:282–290. 1970.
- [78] Gupta HV, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF. "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling". *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. 2009.
- [79] Karaboga D, Akay B. "A modified artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems". *Applied soft computing*, 11(3), 3021-3031. 2011.
- [80] Yang XS. "A new metaheuristic bat-inspired algorithm". *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, 65-74. 2010.
- [81] Mullen K, Ardia D, Gil DL, Windover D, Cline J. "DEoptim: An R package for global optimization by differential evolution". *Journal of Statistical Software*, 40(6), 1-26. 2011.
- [82] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE. November 1995.
- [83] Mirjalili S. "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems". *Knowledge-based systems*, 96, 120-133. 2016.
- [84] Wagener T, Wheeler H, Gupta HV. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. World Scientific. 2004.
- [85] Hastings WK. "Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications". 1970.
- [86] Stein M. "Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling". *Technometrics*, 29(2), 143-151. 1987.
- [87] Özgül N. "Toroşlar'ın bazı temel jeoloji özellikleri". *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 19, 65-78. 1976.
- [88] Blumenthal MM. "Seydişehir-Beyşehir Hinterlandındaki Toros Dağlarının Jeolojisi". *Maden Tetkik Arama Enstitüsü Yayını*, Seri D, No 2, p 242. 1947.
- [89] Çallı SS. "Pınarbaşı karst kaynağının (Seydişehir, Konya) hidrograf-kemograf analizleriyle incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye. 2017.
- [90] MTA. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 1/100.000 ölçekli N28 Konya paftası jeoloji haritası*. 1993.
- [91] Çelik M. "Karstik kaynakların ani boşalım ölçümleri ile kaynak sularının değerlendirilmesi, Susuz kaynakları, Seydişehir, Türkiye". Tübitak 1002, Proje no: 114Y709, Ankara, Türkiye. 2017.
- [92] Çelik M, Çallı SS, Arslan Ş, Karakaş ZS, Çelik M. "Pınarbaşı karst kaynağı beslenme-boşalım ilişkilerinin hidrokimyasal ve mineralojik incelemesi". Ankara Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü, Proje no: 16B0443007, Ankara, Türkiye. 2018.
- [93] Çallı SS. "Susuz karst kaynaklarının (Seydişehir, Konya) beslenme alanının belirlenmesi". TÜBİTAK 1002 hızlı destek projesi. Proje No: 120Y300. Ankara, Türkiye. 2021.
- [94] Çallı SS, Çelik M. "Pınarbaşı kaynağı boşalımının (Seydişehir-Konya) çekilme eğrisi analizleriyle incelenmesi". *Ulusal Hidroloji ve Su Kaynakları Sempozyumu*, Hidro 2018, Ankara, Türkiye. 2018.
- [95] Malik P. "Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mountains, Slovakia". *Environmental geology*, 51, 707-711. 2007.
- [96] MGM. *Türkiye Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü MEVBİS sistemi*. www.mevbis.mgm.gov.tr/son erişim 2020.
- [97] Thornthwaite CW. "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical review*, 38(1), 55-94. 1948.
- [98] Busetto L, Ranghetti L. "MODISstsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series". *Computers & geosciences*, 97, 40-48. 2016.
- [99] Guinot V, Savéan M, Jourde H, Neppel L. "Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function". *Hydrological Processes*, 29(22), 4756-4778. 2015.
- [100] Beven K, Binley A. "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction". *Hydrological processes*, 6(3), 279-298. 1992.

- [101] Hall DK, Riggs GA. "Accuracy assessment of the MODIS snow products". *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(12), 1534-1547. 2007.
- [102] Parajka J, Blöschl G. "Spatio-temporal combination of MODIS images–potential for snow cover mapping". *Water resources research*, 44(3). 2008.
- [103] Tong R, Parajka J, Komma J, Blöschl G. "Mapping snow cover from daily Collection 6 MODIS products over Austria". *Journal of Hydrology*, 590, 125548. 2020.
- [104] Cinkus G, Wunsch A, Mazzilli N, Liesch T, Chen Z, Ravbar N, ... Jourde H. Comparison of artificial neural networks and reservoir models for simulating karst spring discharge on five test sites in the Alpine and Mediterranean regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(10), 1961-1985. 2022
- [105] Çelik M, Çallı SS, Altın S, Çallı KÖ. Reducing climate impacts on karst groundwater resources by constructing a cave dam. A case study from Central Taurus Karst, Türkiye. *Journal of Hydrology*, 636, 131245. 2024.

Düzenlenmemiş Sürüm - Uncorrected Version

Düzenlenmemis Sürüm - Uncorrected Version