

Akifer Parametrelerinin Optimizasyon Tabanlı Bir Eğri Çakıştırma Yaklaşımı Kullanılarak Belirlenmesi

M. Tamer AYVAZ¹
Gürhan GÜRARSLAN²

ÖZ

Akifer parametrelerin belirlenmesi yeraltı suyu mühendisliğinde dikkate alınan önemli bir problemdir. Pratikte bu parametreler tip eğri çakıştırma yaklaşımları kullanılarak belirlenmektedir. Ancak bu yaklaşımlar kullanılarak parametre kestirimi yapılması aşamasında grafiksel ve/veya insan kaynaklı hatalar yapılabilmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için bu çalışma kapsamında optimizasyon tabanlı bir eğri çakıştırma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda doğrusal olmayan indirgenmiş gradyan yöntemi (GRG) kullanılarak düşü-zaman ve tip eğriler otomatik bir şekilde çakıştırılacak şekilde akifer parametreleri belirlenmektedir. Geliştirilen yaklaşımın performansı basınçlı ve sızıntılı akifer sistemlerine ait iki örnek çözülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yaklaşımın akifer parametrelerini etkin bir şekilde belirleyebildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Akifer, pompaj testi, tip eğri, optimizasyon.

ABSTRACT

Identification of the Aquifer Parameters by using an Optimization-based Curve Matching Approach

Aquifer parameter estimation is an important problem in groundwater engineering. In practice, these parameters are determined by using the curve matching approaches. However, graphical and/or human-based errors can be made during parameter estimation by using these approaches. To overcome these problems, an optimization based curve matching approach is proposed. In the proposed approach, nonlinear generalized reduced gradient (GRG) method is used to determine the aquifer parameters by automatically superimposing the time-drawdown and type curves. The performance of the proposed approach is evaluated by

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 6 Mart 2019 günü ulaşmıştır. 16 Eylül 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.536342>

1 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli – tayvaz@pamukkale.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-8566-2825>

2 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli – gurarslan@pamukkale.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9796-3334>

solving two examples for confined and leaky-confined aquifers. Identified results indicate that the proposed approach can effectively determine the aquifer parameters.

Keywords: Aquifer, pumping test, type curve, optimization.

1. GİRİŞ

Yeraltı suyu sistemlerinin sürdürülebilir yönetimi dikkate alınması gereken önemli mühendislik problemlerinden biridir. Bu problemin çözümü aşamasında matematiksel tabanlı simülasyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tarz modellerin kullanılabilmesi için modellenen akifer sistemine ait hidrojeolojik parametrelerin alansal dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Bu parametrelere ait dağılımlar genellikle noktasal ölçekte yapılmış olan pompaj testlerinin sonuçlarına bağlı olarak elde edilmektedir. Bu testler genel olarak sahada var olan veya yeni açılmış bir veya birden fazla pompaj kuyusundan çekim yapılması ve bunun neticesinde gerçekleşen yeraltı suyu seviye düşü değerlerinin farklı yerlerde bulunan gözlem kuyularında zamana bağlı olarak kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır. Pratikte, bu testlerin sonucunda elde edilen veriler kullanılarak düşü-zaman grafikleri çizilmekte ve bu grafikler farklı tip eğriler ile çakıştırılarak akifer parametreleri belirlenmektedir. Bu süreç genel olarak kolay gibi görünse de bazı durumlarda grafiksel ve/veya insan kaynaklı hatalardan dolayı doğru olmayan parametre değerleri belirlenebilmektedir. Bu tarz problemler özellikle ölçüm sonuçlarının logaritmik eksenli grafik üzerindeki eğriliğinin az olması gibi durumlarda meydana gelmekte ve çizilen eğriler yanlış şekilde çakıştırılabilmektedir. Bu nedenle akifer hidrojeolojik parametrelerinin sistematik çözüm yaklaşımları kullanılarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde akifer parametrelerinin pompaj test sonuçları kullanılarak belirlenmesine yönelik olarak çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu çözüm yaklaşımlarının en önemlilerinden biri optimizasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşım genel olarak akifer sistemi için pompaj debisi-düşü değeri arasındaki ilişkiye ait matematiksel modelin kurulması ve kurulan bu modelin farklı optimizasyon tekniklerine entegre edilmesine dayanmaktadır [1-2]. Optimizasyon modeli tarafından belirlenen akifer parametreleri için matematiksel model kullanılarak gözlem kuyularının bulunduğu noktalardaki düşü değerleri hesaplanmakta ve hesaplanan bu düşü değerleri ile pompaj testi sonucunda kaydedilen düşü değerleri arasındaki hata minimize edilecek şekilde ilgili parametrelerin değeri belirlenmektedir [3]. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri bu aşamada kullanılacak olan optimizasyon tekniklerinin seçimidir. Literatürde akifer parametrelerinin optimizasyon yaklaşımları kullanılarak çözümü aşamasında deterministik ve sezgisel optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deterministik optimizasyon teknikleri genel olarak global optimum sonuçların bulunmasında oldukça etkin olmasına karşın; akifer parametre belirleme problemlerinin çözümü aşamasında matematiksel çözüm uzayının konveks olmayan yapısından dolayı ancak özel başlangıç çözümlerinin modele verilmesi ile global optimum çözümlere ulaşılabilir [4-5]. Bu nedenle sezgisel optimizasyon tekniklerinin ilgili problemin çözümüne uygulanması yaygınlık kazanmıştır. Literatürde pompaj test sonuçlarından yola çıkarak akifer parametrelerinin belirlenmesinde tavlama benzetimi [1], parçacık sürü optimizasyonu [3] ve genetik algoritma [6-7] gibi sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler genel olarak doğada karşılaşılan süreçlerin matematiksel olarak temsil edilmesine

dayanmakta olup global optimum çözümlerin belirlenmesi aşamasında etkin olarak kullanılmaktadır. Ancak bu tekniklerin hemen hemen tümü kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirildiklerinden problem ile ilgili kısıtların sağlanması ancak tanımlanan ceza fonksiyonlarının modele dahil edilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu durumda hem ilgili yöntemlerin stokastik yapısı hem de ilgili ceza fonksiyonlarının kullanılmasından dolayı sezgisel yöntemler ile çözüme ulaşmak oldukça fazla hesaplama yükü ve neticesinde büyük bilgi-işlem süreleri gerektirmektedir.

Bu çalışma kapsamında pompaj test sonuçları kullanılarak basınçlı ve sızıntılı akifer parametrelerinin belirlenebildiği kullanıcı dostu bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın amacı pompaj test sonuçları kullanılarak oluşturulan düşü-zaman grafikleri ile çizilen tip eğrilerin optimizasyon tabanlı bir çözüm yaklaşımı kullanılarak otomatik olarak çakıştırılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda deterministik tabanlı genel indirgenmiş gradyan (GRG) optimizasyon tekniği kullanılarak düşü-zaman ve tip eğri grafikleri arasında hesaplanan Nash-Sutcliffe (NS) model etkinlik katsayısı değeri maksimize edilecek şekilde çakıştırılmış eğrilerin pozisyonları belirlenebilmektedir. Geliştirilen yaklaşımın en büyük avantajı literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak özel bir başlangıç çözümüne ve yoğun bilgi-işlem sürelerine gerek kalmadan akifer parametrelerinin deterministik tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılarak elde edilebilmesidir. Geliştirilen yaklaşımın performansı literatürde basınçlı ve sızıntılı akiferler için verilmiş olan iki pompaj test verisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen yaklaşım kullanılarak el ile yapılan tip eğri çakıştırma yöntemine göre çok daha doğru, sezgisel optimizasyon tekniklerine göre ise çok daha hızlı bir şekilde akifer parametrelerinin belirlenebildiğini göstermiştir.

2. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

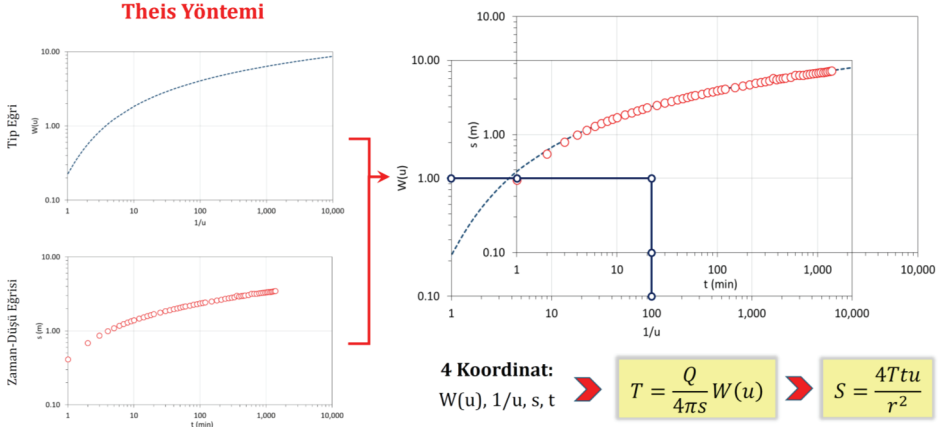
Bu bölümde geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bu kapsamda öncelikle basınçlı ve sızıntılı akiferlerdeki yeraltı suyu akım sürecinin modellenmesinde kullanılan Theis ve Hantush yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve ardından bu modellerin geliştirilen yaklaşıma nasıl entegre edildiğinden bahsedilmiştir.

2.1. Theis Yöntemi

Basınçlı bir akifer sistemine açılmış ve tüm akifer boyunca çekim yapabilen bir pompaj kuyusuna doğru zamanla değişen yeraltı suyu akışı Theis yöntemi kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [8]:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

burada $s(r, t)$, r uzaklığındaki noktada t zaman adımı için ölçülen düşü değerini; Q , test boyunca değeri sabit tutulan pompaj debisini; T , akifer transmissivite katsayısını; u , boyutsuz kuyu parametresini; $W(u)$ ise u parametresine bağlı olarak hesaplanan Theis kuyu fonksiyonunu göstermektedir. Boyutsuz kuyu parametresi ve bu parametrenin değerine bağlı olarak hesaplanan Theis kuyu fonksiyonu aşağıda verilmiştir:



Şekil 1 - Pratikte Theis yöntemi ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin (T, S) belirlenmesi

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3)$$

burada S , akifer depolama katsayısını; t , pompaj başlangıcından itibaren geçen zamanı; y ise integral değişkenini göstermektedir. Denklem (3)'de verilmiş olan kuyu fonksiyonunun değeri aşağıda verilmiş olan seri kullanılarak da hesaplanabilmektedir [9]:

$$W(u) = \ln \frac{0.5615}{u} + \sum_{k=1}^{k=\infty} (-1)^{k+1} \frac{u^k}{k \cdot k!} \quad (4)$$

burada k , toplam sembolü içindeki eleman sırasını ifade eden bir indisi temsil etmektedir. Pratikte Theis yöntemi kapsamında kullanılan tip eğri çakıştırma yöntemi ile akifer parametrelerinin (T, S) nasıl belirleneceği Şekil 1'de gösterilmiştir. Görüleceği gibi pompaj testi sonucunda kaydedilen $s - t$ değerleri yatay ve düşeyde logaritmik eksene sahip grafik kağıdına çizilmektedir. Ardından şeffaf bir kağıt üzerine aynı ölçekte ve aynı boyutta olmak üzere $1/u$ değerlerine karşılık $W(u)$ değerleri (tip eğri) çizilmektedir. Çizilen tip eğri ardından her iki grafik kağıdının eksenleri paralel olacak şekilde $s - t$ grafiği üzerinde ölçüm değerleri ile tip eğri arasında en iyi uyum sağlanacak şekilde kaydırılarak bir eşleşme noktası seçilmektedir. Seçilen bu eşleşme noktası için her iki grafik üzerinden 4 adet koordinat $(W(u), 1/u, s, t)$ okunup Denklem (1) ve (2)'de yerine konularak T ve S değerleri belirlenebilmektedir.

2.1. Hantush Yöntemi

Herhangi bir depolamaya sahip olmayan sızdırmalı geçirimsiz bir katman (akitard) ile üstten sınırlandırılmış basınçlı bir akifer sistemine açılmış ve tüm akifer boyunca çekim yapabilen

bir pompaj kuyusuna doğru zamanla değişen yeraltı suyu akışı Hantush yöntemi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [10]:

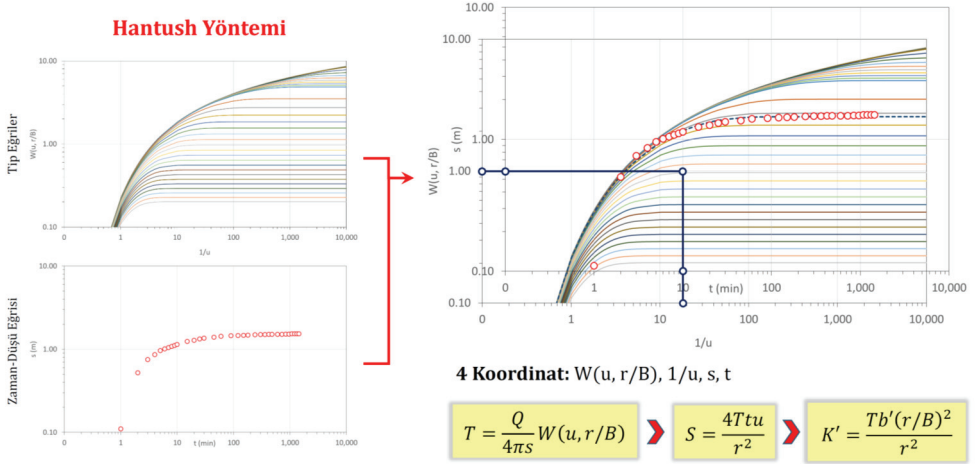
$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad (5)$$

burada B , sızma faktörü; $W(u, r/B)$ ise değeri u ve r/B değerine bağlı olarak değişen kuyu fonksiyonunu göstermektedir. Kuyu fonksiyonu ve sızma faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$W(u, r/B) = \int_u^\infty \frac{e^{-y - \frac{(r/B)^2}{4y}}}{y} dy \quad (6)$$

$$B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}} \quad (7)$$

burada b' ve K' basınçlı akiferi sınırlayan sızdırmalı geçirimsiz katmanın kalınlığını ve hidrolik iletkenliğini göstermektedir. Denklem (6)'da bir integral ile verilen kuyu Hantush fonksiyonu nümerik integrasyon ve seri açılımı dayalı yaklaşımlar [7, 11] kullanılarak hesaplanabilmektedir. Pratikte Hantush yöntemi ile kullanılan sızıntılı akiferlere ait hidrojeolojik parametrelerin nasıl belirlendiği Şekil 2 üzerinde gösterilmiştir. Görüleceği



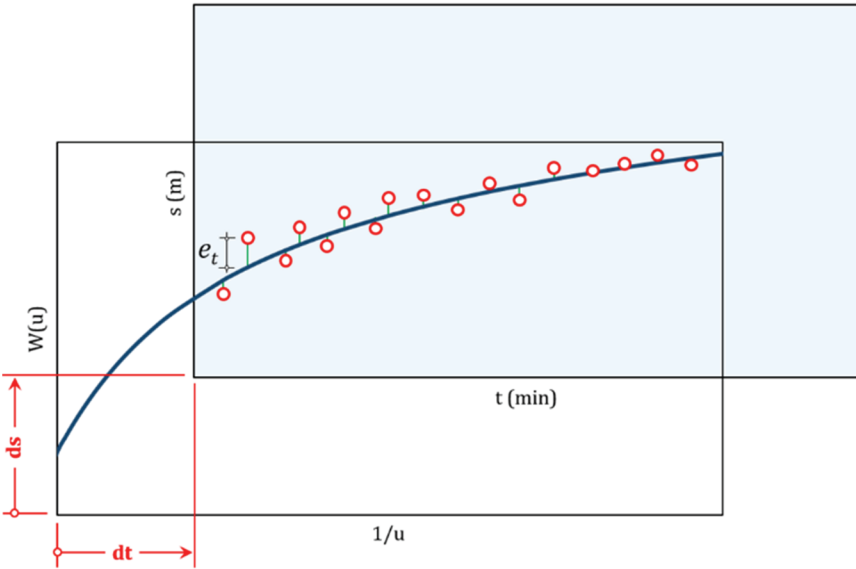
Şekil 2 - Pratikte Hantush yöntemi ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin (T, S, K') belirlenmesi

gibi, Theis modelinden farklı olarak Hantush modelinde tip eğri tek bir eğri yerine bir eğri ailesi ile temsil edilmektedir. Bu eğri ailesinin en yukarısında bulunan eğri ise Theis yönteminde kullanılan tip eğri olmaktadır. Bu noktada tip eğri çakıştırma süreci ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin belirlenebilmesi için öncelikle pompaj testi sonucunda kaydedilen $s - t$ değerleri yatay ve düşeyde logaritmik eksene sahip grafik kağıdına çizilmektedir. Ardından farklı u ve r/B değerleri için $W(u, r/B)$ değerleri aynı boyutlu ve

aynı ölçekli şeffaf bir grafik kağıdına çizilmektedir. Çizilen bu tip eğri ailesi ardından yatay ve düşey eksenler paralel olacak şekilde $s - t$ grafiği üzerinde yatayda ve farklı r/B eğrilerini de dikkate alacak şekilde düşeyde hareket ettirilerek en iyi uyum sağlanmasına çalışılmaktadır. Ardından her iki grafiğe ait eksenlerden toplamda 4 adet koordinat okunmakta ve bu koordinatlar Denklem (2), (5) ve (7)'de yerine konularak akifer sistemine ait hidrojeolojik parametreler (T, S, K') belirlenebilmektedir.

2.3. Optimizasyon Tabanlı Tip Eğri Çakıştırma Yaklaşımı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi akifer hidrojeolojik parametrelerinin tip eğri çakıştırma yöntemi ile belirlenmesi aşamasında grafiksel ve/veya kişisel hatalar yapılabilmektedir. Özellikle gözlem kuyularının pompaj kuyusuna yakın olduğu durumlarda $s - t$ grafiği üzerindeki eğrilik düşük olacağından belirlenen parametre değerleri yanlış olabilmektedir. Bunun yanında özellikle sızıntılı akiferlerde tip eğri bir eğri ailesi ile temsil edildiğinden dolayı doğru eğrinin el ile belirlenmesi zor olabilmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında hem basınçlı akiferlerde hem de sızıntılı akiferlerde tip eğri çakıştırma sürecini sistematik bir şekilde yapabilecek optimizasyon tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşıma ait kavramsal model Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. Görüleceği gibi ilk olarak $s - t$ ve $W(u) - 1/u$ (sızıntılı akiferler için $W(u, r/B) - 1/u$) grafikleri çizilerek eksenleri tam olarak çakışacak şekilde kavramsal olarak üst üste yerleştirilmektedir. Ardından s değerleri ile $W(u)$ değerleri arasındaki hata (Şekil 3 üzerinde gösterilen e_t değerlerinin toplamı) minimum olacak şekilde $s - t$ grafiği $W(u) - 1/u$ grafiği üzerinde hareket ettirilmiştir.



Şekil 3 - Önerilen yaklaşıma ait kavramsal model

Akifer parametrelerinin Şekil 3’de verilen tarzda bir yaklaşımla belirlenmesine yönelik olarak ulaşılabilen tek çalışma Cleveland [12] tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında tip eğri ve pompaj testi sonuçları elektronik tablolama platformu üzerinde çizdirilmiş ve bunların birbirine göre konumu iki parametre kullanılarak değiştirilmiştir. Bu parametre değerleri ise deneme-yanılma ile belirlenerek klasik olarak yapılan eğri çakıştırma işlemi otomatik hale getirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise Cleveland [12]’den farklı olarak bu süreç tamamen sistematik olarak bir optimizasyon süreci ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda yatay ve düşey yönde meydana gelen bu hareket tanımlanmış olan dt ve ds değerlerinin optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılması ile otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda optimizasyon modelinde amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe (NS) model etkinlik katsayısı kullanılmış olup düşü ve kuyu fonksiyonu değerleri arasında hesaplanan bu fonksiyonun maksimizasyonu amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşıma ait amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$NS = \max \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s^*(t_i) - W(t_i^*))^2}{\sum_{i=1}^n (s^*(t_i) - \bar{s}^*)^2} \right) \quad (8)$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \log(t_i^*) &= \log(t_i) + \log(dt) \\ &\downarrow \\ t_i^* &= t_i \times dt \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \log(s^*(t_i)) &= \log(s(t_i)) + \log(ds) \\ &\downarrow \\ s^*(t_i) &= s(t_i) \times ds \end{aligned} \quad (10)$$

$$t_i \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n] \quad (11)$$

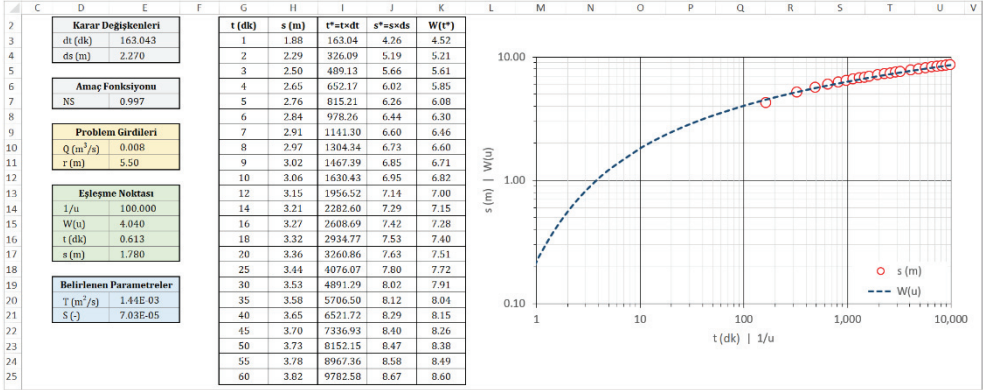
burada n , pompaj testinde ölçümlerin alındığı zaman adımı sayısını; ds , düşü değerleri üzerine eklenen düşey ötelenme miktarını; dt , zaman değerleri üzerine eklenen yatay ötelenme miktarını; t_i , i nolu adım için pompajın başladığı andan itibaren ölçülen zamanı ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); t_i^* , dt değeri kullanılarak yatay yönde ötelenmiş zaman değerini; $s(t_i)$, t_i nolu zaman adımında ölçülen düşü değerini; $s^*(t_i)$, ds değeri kullanılarak düşey yönde ötelenmiş düşü değerini; $W(t_i^*)$; t_i^* değeri için hesaplanmış Theis kuyu fonksiyonu değerini (sızıntılı akifer için $W(t_i^*, r/B)$ şeklinde kullanılan Hantush kuyu fonksiyonu değerini) ve \bar{s}^* ise $s^*(t_i)$ değerlerinin ortalamasını göstermektedir.

Denklem (8)-(11)’den görüleceği gibi, eğri çakıştırma işlemi esnasında pompaj testi sonucu belirlenen düşü değerleri ile tip eğri üzerinde bulunan kuyu fonksiyonu değerleri aynı amaç fonksiyonu içerisinde işleme alınmaktadır. Bu kapsamda çakıştırılan eğrilerin birbirine paralel olan eksenleri aynı davranışı gösterdiğinden $1/u$ değerleri t_i^* değerlerine karşılık gelmektedir. Bunun sonucu olarak Şekil 3’de verilen kavramsal modeldeki gibi iki grafik üst

üste konularak öteleme yapılmamakta; bunun yerine aynı t_i^* değerlerine karşılık gelen $s^*(t_i)$ ve $W(t_i^*)$ arasındaki ilişki dikkate alınarak model etkinliği (NS) hesaplanmaktadır. Bu aşamada Şekil 3 üzerinde belirtilen yatay ve düşey ötelenme miktarları (dt ve ds) ilgili grafik eksenleri logaritmik ölçekte olduğu için Denklem (9) ve (10)'da belirtildiği şekilde toplama yerine logaritma dönüşümü ile çarpım işlemi olacak şekilde hesaplamalara dahil edilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus Denklem (8)-(11) arasında verilen amaç fonksiyonu ve kısıtların sürekli yapıda olduğudur. Ayrıca matematiksel açıdan çok karmaşık amaç fonksiyonu ve kısıtlara sahip olmadığından dolayı özellikle deterministik tabanlı optimizasyon teknikleri ile ilgili problemin çözümü mümkün olabilmektedir.

Önerilen yaklaşımla ilgili problem formülasyonunun tanımlanmasının ardından ilgili problemin GRG optimizasyon tekniği kullanılarak çözümü aşamasına geçilmiştir. GRG ilk olarak Lasdon ve diğ. [13] tarafından geliştirilmiş ve çok değişkenli ve kısıtlı doğrusal olmayan problemleri çözebilen bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknik ile amaç fonksiyonunun yanında verilen eşitsizlik kısıtları, pozitif tanımlanmış geçici değişkenler eklenerek eşitlik kısıtları haline dönüştürülmektedir. Bu aşamadan sonra amaç fonksiyonu ve dönüştürülmüş eşitlik kısıtları birinci mertebeden Taylor serisine açılarak amaç ve kısıt fonksiyonlarının belirlenen nokta için minimizasyonu sağlanabilmektedir. Bu işlemin yapılması aşamasında indirgenmiş gradyan yaklaşımı kullanılarak karar değişkenleri vektörü bağımlı ve bağımsız değişkenler haline dönüştürülerek gerekli eliminasyonların yapılmasının ardından ilgili problem çözülebilmektedir [13]. GRG, özellikle sürekli yapıda ve matematiksel çözüm uzayının konveks yapıda olduğu optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça etkin bir yöntem olup pek çok farklı optimizasyon probleminin çözümüne uygulanabilmektedir. GRG optimizasyon tekniği pratikte kullanılan elektronik tablolar programlarının (Excel®, Lotus®, Quattro Pro®, vb.) çoğunda bulunan Çözücü (Solver) eklentisinde de doğrusal olmayan optimizasyon motoru olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında da geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının uygulaması Excel® elektronik tablolar platformu üzerinde Çözücü eklentisi kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda Denklem (8)-(11) arasında verilen optimizasyon probleminin Excel® üzerinde modellenmiş hali Şekil 4'de verilmiş olup gerekli işlem adımları ise aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

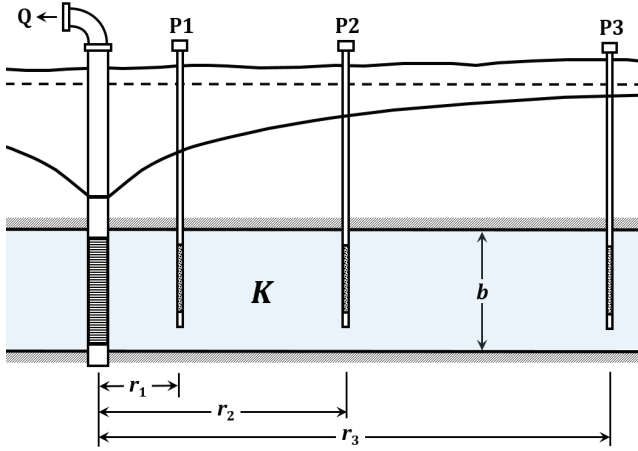
- Problemlerle alakalı girdiler E10:E11 hücrelerine, pompaj testi sonucunda kayıt altına alınan zaman-düşü değerleri G3:H25 hücrelerine girilmektedir.
- Optimizasyon modelinde kullanılacak karar değişkenleri E3:E4 hücrelerine, amaç fonksiyonu olarak kullanılacak NS değeri ise E7 hücresine girilmektedir.
- Denklem (9) ve (10) kapsamında belirlenecek t_i^* ve $s^*(t_i)$ değerleri ($i = 1,2,3,\dots,23$) belirlenen karar değişkeni değerleri için I3:J25 hücrelerinde hesaplanmaktadır.
- Hesaplanan t_i^* değerleri için Theis kuyu fonksiyonu $W(t_i^*)$ değerleri ise K3:K25 hücrelerinde hesaplanmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli husus basınçlı ve sızıntılı akiferlerde kuyu fonksiyonu değerinin nasıl hesaplanacağıdır. Bu çalışma kapsamında basınçlı akiferler için Denklem (4)'de verilen k değerinin üst limiti 100 olacak şekilde Theis kuyu fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır.



Şekil 4 - Önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çıkıştırma yaklaşımının elektronik tablolaama programı üzerinde modellenmesi

- Sızıntılı akifer sistemleri için ise Denklem (6)'da verilen integral MATLAB ortamında nümerik olarak farklı u ve r/B değerleri için çözülmüş ve bir Hantush kuyu fonksiyonu tablosu oluşturulmuştur. Ardından çözüm aşamasında belirlenen u ve r/B değerleri için ilgili kuyu fonksiyonunun tabloda yer almayan ara değerleri çift yönlü doğrusal interpolasyon kullanılarak belirlenmiştir. Bununla beraber ilgili kuyu fonksiyonu değeri literatürde yer alan seri açılımına dayalı yaklaşımlar kullanılarak ta hesaplanabilmektedir [7, 11].
- Bu aşamanın ardından Çözücü eklentisinde maksimize edilecek amaç fonksiyonu olarak E7, karar değişkenleri olarak ise E3:E4 hücreleri seçilerek GRG optimizasyon tekniği ile ilgili problemin çözümü yapılmaktadır.
- Optimizasyon işleminin tamamlanması ve GRG ile optimum çözümün bulunmasının ardından tip eğri üzerinde bir eşleşme noktası seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında eşleşme noktası olarak $1/u = 100$ ve buna karşılık gelen kuyu fonksiyonu değeri $W(u) = 4.040$ seçilmiştir. Seçilen bu değerler E14:E15 hücrelerinde belirtilmektedir. Eşleşme noktasının sonuçlar üzerinde bir etkisi bulunmadığı için bu nokta dışında başka bir eşleşme noktası da seçilebilmektedir.
- Bu eşleşme noktalarına karşılık gelen zaman-düşü değerleri ise model tarafından otomatik olarak belirlenmekte ve E16:E17 hücrelerinde verilmektedir.
- Belirlenen bu dört değerın basınçlı akiferler için Denklem (1) ve (2)'de yerine konulmasıyla akifer hidrojeolojik parametreleri belirlenebilmektedir.

Sonuç olarak geliştirilen yaklaşım kapsamında karar değişkeni olarak basınçlı akifer sistemlerinde dt ve ds , sızıntılı akifer sistemlerinde ise dt , ds ve r/B alınmış ve NS değeri GRG optimizasyon tekniği ile maksimize edilecek şekilde ilgili problemin çözümü yapılmaktadır.



Şekil 5 - Uygulama 1 kapsamında kullanılan akifer enkesiti

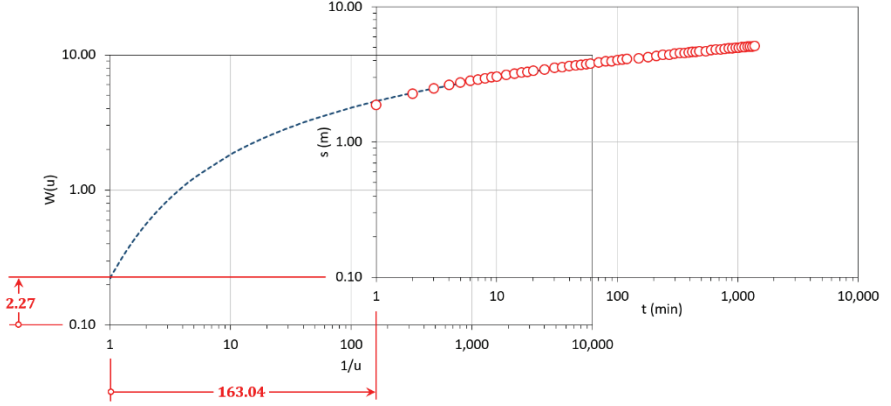
3. SAYISAL UYGULAMALAR

Geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının performansı Kresic [9]'de verilen ve basınçlı ve sızıntılı akiferlerde yapılan iki pompaj test verisi üzerinde test edilmiştir. Her iki uygulama için elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla belirlenen parametre değerleri ve bilgi-işlem yükleri bakımından karşılaştırılmıştır.

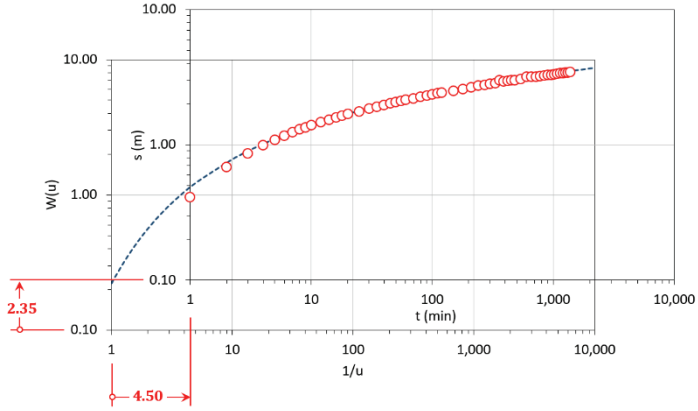
3.1. Uygulama 1: Basınçlı Akifer

Bu uygulama kapsamında dikkate alınan basınçlı akifer modeli Şekil 5'de verilmiştir. Görüleceği gibi, basınçlı akifer sisteminde bir pompaj kuyusu ve üç adet piyezometre bulunmaktadır. Bu piyezometrelerin pompaj kuyusuna olan mesafeleri sırasıyla $r_1 = 5.5$ m, $r_2 = 40.5$ m, ve $r_3 = 118$ m olarak verilmiştir. Akiferin verilen enkesit boyunca yatay olduğu ve kalınlığının sabit $b = 18$ m olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda akifer sistemine ait T ve S değerlerini belirlemek üzere $Q = 0.008$ m³/s alınarak 24 saatlik bir pompaj testi yapılmış ve P1, P2 ve P3 nolu piyezometrelerde gözlenen düşü miktarları kaydedilmiştir. Her bir piyezometre için kaydedilen düşü değerleri Ek A'da verilmiştir. Her bir piyezometre için kaydedilmiş zaman-düşü değerleri kullanılarak geliştirilen yaklaşım çalıştırılmış ve Şekil 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Görüleceği gibi, yatay ve düşey yönde en büyük öteleme P1 piyezometresinde gözlenmiştir. Bunun nedeni P1'in pompaj kuyusuna en yakın piyezometre olması ve bunun neticesinde de $s-t$ grafiğindeki en düşük eğriliğin bu piyezometre için gözlenmiş olduğudur. Elde edilen bu sonuçlar için belirlenen T ve S değerleri Kresic [9] ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından bulunan sonuçlarla Çizelge 1'de karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de verilen sonuçlardan Kresic [9] kapsamında ilgili parametreler eğrilerin el ile çakıştırılması sonucu elde edilmiştir. Buna karşın Ayvaz ve Gürarlan [2] kapsamında ise ilgili parametreler akifer sistemi için pompaj debisi-düşü değeri arasındaki ilişkiye ait yaklaşık analitik modelin sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniğine entegre edilmesiyle belirlenmiştir.

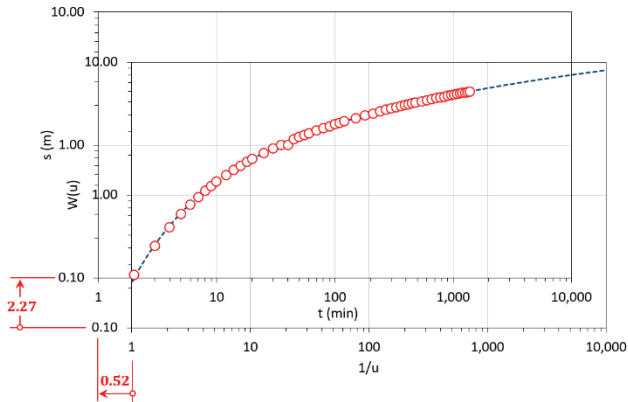
P1



P2



P3



Şekil 6 - Uygulama 1 kapsamında geliştirilen yaklaşım kullanılarak karşılaştırılan eğriler ve belirlenen dt ve ds değerleri

Çizelge 1 - Uygulama 1 için her bir piyezometrede belirlenen T ve S değerleri

	P1		P2		P3	
	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)
Kresic [9]	119.23	8.70	130.46	4.70	129.60	5.20
Ayvaz ve Gürarslan [2]	127.87	5.69	129.60	4.81	129.60	5.10
Önerilen yaklaşım	124.70	7.02	129.01	4.85	130.44	4.97

Çizelge 2 - Uygulama 1 için her bir piyezometrede belirlenen NS değerleri ve iterasyon sayıları

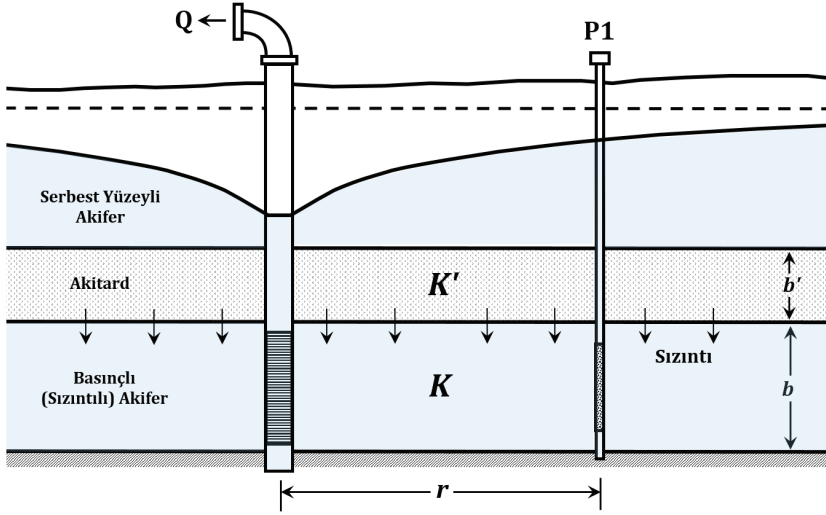
	NS			İterasyon sayısı		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Kresic [9]*	0.9861	0.9992	0.9998	-	-	-
Ayvaz ve Gürarslan [2]	0.9987	0.9993	0.9998	1494	6378	9196
Önerilen yaklaşım	0.9977	0.9993	0.9998	24	14	7

* Belirtilen NS değerleri Çizelge 1’de verilen değerlerin geliştirilen yaklaşımda yerine konulmasıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 1’den görüleceği gibi, P2 ve P3 piyezometreleri için geliştirilen model tarafından belirlenen T ve S değerleri ile literatürde belirlenen değerler iyi uyum içindedir. Buna karşın P1 için elde edilen sonuçlarda ufak farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılığın temel nedeni daha önceden belirtilen P1’in pompaj kuyusuna en yakın kuyu olmasıdır. Bu nedenden dolayı özellikle el ile çakıştırma yönteminde elde edilen sonuçların grafik üzerindeki eğriliğinin az olmasından dolayı parametrelerin belirlenmesindeki doğruluk derecesi düşmektedir. Belirlenen bu parametre değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları Çizelge 2’de verilmiştir. Görüleceği gibi, önerilen yaklaşım kullanılarak belirlenen amaç fonksiyonu değeri her üç piyezometre için 0.99’un üzerindedir. Benzer sonuçlar Kresic [9] ile Ayvaz ve Gürarslan [2] kapsamında da elde edilmiş olup en düşük performans el ile çakıştırma sonucu P1 nolu piyezometrede gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar gerekli iterasyon sayıları bakımından karşılaştırıldığında ise önerilen yaklaşımın Ayvaz ve Gürarslan [2] kapsamında kullanılan sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniğine oranla çok çok daha az iterasyon gerektirdiği açıkça görülmektedir. Bunun sonucu olarak önerilen yaklaşım ile çok daha kısa bilgi işlem sürelerinde optimum değerlere ulaşılabilir.

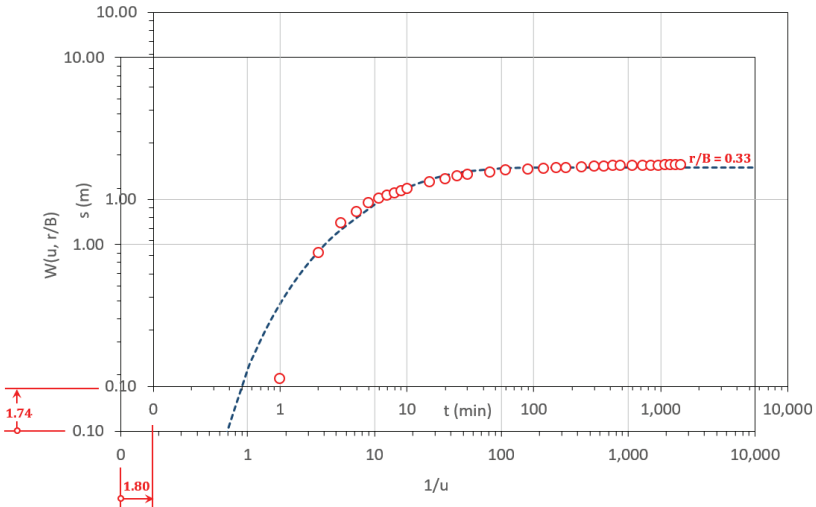
3.2. Uygulama 2: Sızıntılı Akifer

Bu uygulama kapsamında dikkate alınan sızıntılı akifer modeli Şekil 7’de verilmiştir. Görüleceği gibi akifer sistemi en yukarıda serbest yüzeyle en aşağıda ise basınçlı bir akiferden oluşmaktadır. Bu iki akiferin arasında sızdırmalı geçirimsiz bir katman bulunmaktadır. Modelde 24 saat boyunca $Q = 0.012 \text{ m}^3/s$ ile çekim yapılan bir adet pompaj kuyusu ve düşü değerlerinin kaydedildiği ve kuyudan uzaklığı $r = 128 \text{ m}$ olan bir adet piyezometre bulunmaktadır. Yapılan bu test kapsamında elde edilen veriler Ek B’de verilmiştir.



Şekil 7 - Uygulama 2 kapsamında kullanılan akifer enkesiti

Şekil 7'den görüleceği gibi kuyudan çekim yapılması sonucu aşağıya doğru oluşan akış gradyanından dolayı serbest yüzeyli akifer bünyesinde bulunan yeraltı suyu sızdırmalı geçirimsiz katman üzerinden basınçlı akifere doğru hareket etmektedir. Yapılan pompaj testi sonucunda kayıt altına alınmış zaman ve düşü değerleri kullanılarak geliştirilen yaklaşımın çalıştırılması sonucunda elde edilen sonuç Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8 - Uygulama 2 kapsamında geliştirilen yaklaşım kullanılarak çakıştırılan eğriler ve belirlenen dt , ds ve r/B değerleri

Çizelge 3 - Uygulama 2 için belirlenen parametreler, NS değerleri ve iterasyon sayıları

	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	B (m)	r/B	NS	İterasyon sayısı
Kresic [9]*	257.47	1.09	640.00	0.20	0.0698	-
Ayvaz ve Gürarlan [2]	160.48	1.25	460.03	0.28	0.9792	9076
Önerilen yaklaşım	143.30	1.35	387.52	0.33	0.9787	20

* Belirtilen NS değerleri parametre değerlerinin geliştirilen yaklaşımda yerine konulmasıyla hesaplanmıştır

Şekil 8'den görüleceği gibi basınçlı akiferde incelenen durumdan farklı olarak bu uygulama kapsamında dt ve ds 'in yanında r/B de karar değişkeni olarak alınmış ve optimizasyon modeli tarafından belirlenen r/B değeri için çift yönlü doğrusal interpolasyon ile kuyu fonksiyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu çözüm için geliştirilen yaklaşım tarafından belirlenen hidrojeolojik parametre değerleri, amaç fonksiyonu değerleri ve çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları detaylı olarak Çizelge 3'de karşılaştırılmıştır. Görüleceği gibi, farklı eğrilerden oluşan sistemde geliştirilen yaklaşım en iyi eşleşmeyi $r/B = 0.33$ eğrisi üzerinde bulmuştur. Buna karşın Ayvaz ve Gürarlan [2] ve Kresic [9] kapsamında en iyi eşleşme sırasıyla $r/B = 0.28$ ve $r/B = 0.20$ eğrileri üzerinde bulunmuştur. Bu değerler birbirinden farklı olduğu için sonuç olarak hesaplanan sızma faktörü B değerleri de farklı çıkmaktadır. B değerlerindeki farklılıktan dolayı hesaplanan T ve S değerleri birbirinden farklı çıkmaktadır. Genel anlamda önerilen optimizasyon tabanlı yaklaşım ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından belirlenen değerler birbirinden çok uzak olmasa da Kresic [9] tarafından el ile eğri çakıştırma yöntemi ile belirlenen parametre değerlerinde farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 3'de elde edilen sonuçlar amaç fonksiyonu değerleri bakımından karşılaştırıldığında ise önerilen yaklaşım ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından belirlenen NS değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buna karşın Kresic [9] tarafından el ile yapılan eğri çakıştırma işlemi sonucunda belirlenen NS değerinin oldukça düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuç sistematik bir çözüm yaklaşımı kullanılarak parametre kestirimi yapmanın belirlenen parametre değerleri üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Son olarak elde edilen sonuçların çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları bakımından karşılaştırılması sonucu önerilen yaklaşımın Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından kullanılan armoni araştırması optimizasyon tekniğine göre çok daha az bilgi işlem yükü gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

4. TARTIŞMA

Yukarıda elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi, önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı kullanılarak basınçlı ve sızıntılı akifer sistemlerine ait hidrojeolojik parametreler etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu bölümde önerilen yaklaşımın literatürde farklı çözüm teknikleri kullanılarak geliştirilmiş olan diğer yaklaşımlara göre avantaj ve dezavantajları tartışılacaktır.

Önerilen yaklaşım kapsamında basınçlı ve sızıntılı akifer sistemleri için yeraltısuyu akım süreci sırasıyla Theis ve Hantush yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Theis yöntemi kapsamında kuyu fonksiyonu Denklem (4) ile verilen serinin açılması suretiyle

hesaplanmıştır. Buna karşın Hantush yöntemi kapsamında ilgili kuyu fonksiyonu değerinin hesaplanabilmesi için Denklem (6)'da verilen integral faklı girdi değerleri için MATLAB ortamında nümerik olarak çözümlenerek tablo haline getirilmiştir. Tabloda yer almayan ara girdi değerleri için ilgili kuyu fonksiyonu değeri ise çift yönlü doğrusal interpolasyon kullanılarak belirlenmiştir. Bu işlem oldukça kolay olmakla beraber MATLAB ortamında hesaplama ve interpolasyon süreçlerini gerektirdiğinden dolayı bazı kullanıcılar tarafından karmaşık olarak değerlendirilebilmektedir. Bu kapsamda Hantush kuyu fonksiyonunun hesaplanması aşamasında bu işlemleri takip etmek yerine literatürde verilen seri açılımına dayalı çözüm yaklaşımları da [6-7, 11] kullanılabilir. Bu kapsamda Theis yönteminde olduğu gibi verilen girdi değerleri için Hantush kuyu fonksiyonu değeri doğrudan hesaplanabilir.

Literatürde pompaj test sonuçlarına göre akifer parametrelerinin optimizasyon teknikleri kullanılarak belirlendiği pek çok çalışma bulunmaktadır [1-3,6-7]. Bu çalışmaların dayandığı temel nokta Theis ve Hantush yöntemleri için seri açılımına dayalı yaklaşık analitik modeller kullanılarak hesaplanan düşü değerleri ile pompaj testi sonucunda ölçülen düşü değerleri arasındaki hata minimize edilecek şekilde akifer parametrelerinin belirlenmesidir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus yeraltı suyu ile alakalı optimizasyon problemlerine ait matematiksel çözüm uzayının konveks olmayan bir yapıya sahip olduğudur [5,14]. Bu tarz problemlerde elde edilen sonuçlar büyük oranda başlangıç çözümüne bağlı olmakta ve iyi bir başlangıç çözümü sunulmadıkça deterministik optimizasyon teknikleri ile global optimum çözüme ulaşılamamaktadır [7]. Bir diğer önemli husus ise seri açılımıyla hesaplanan kuyu fonksiyonu değerinin bazı parametre değerleri için tanımsız olabilmesi ve bunun sonucu olarak çözümde süreksizlikler oluşabilmesidir. Belirtilen bu iki problemin önüne geçebilmek için farklı başlangıç çözümleri kullanılarak optimizasyon sürecinin tekrarlanması ve her bir tekrar aşamasında karar değişkenleri için tanımlanan alt ve üst sınır değerlerine ait aralıkların daraltılması yoluna gidilmektedir [7]. Ancak, bu durumda bile elde edilen çözümün global optimum olma garantisi bulunmamaktadır. Bu nedenle seri açılımına dayalı yaklaşık analitik modeller ile problemin çözülebildiği ve sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir [1-3,6]. Sezgisel optimizasyon tekniklerinin deterministik yöntemlere göre en büyük avantajı herhangi bir özel başlangıç çözümüne gerek kalmadan konveks olmayan matematiksel çözüm uzayına sahip problemler için global optimumya yakın çözümlerin elde edilebilmesidir. Ancak bu teknikler genel olarak kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olduklarından dolayı problemin kurulumu aşamasında sağlanması istenen kısıtlar ancak ceza fonksiyonu yaklaşımı gibi yaklaşımlar kullanılarak çözüme dahil edilebilmektedir. Bu tarz entegrasyonlar ise sonuçların çok daha uzun bilgi-işlem sürelerinde elde edilmesine neden olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilmiş olan optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımında yukarıda belirtilmiş olan zorluklar meydana gelmemekte olup problemin çözümü başlangıç değerlerinden bağımsız olarak deterministik tabanlı GRG optimizasyon tekniği ile yapılabilmektedir. Önerilen yaklaşımla akifer parametre kestirim probleminde ait konveks olmayan yapıdaki matematiksel çözüm uzayı probleme ait karar değişkenlerinin grafiklere ait yatay ve düşey öteleme miktarları oluştuğu için konveks bir yapıya dönüşmektedir. Bu sayede başlangıç değerlerinden bağımsız olarak global optimum çözümler deterministik tabanlı GRG optimizasyon tekniği ile kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Bu kapsamda önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının yukarıda belirtilen sezgisel optimizasyon tekniklerine dayanan çözüm yaklaşımlarına göre bir diğer

avantajı ise çok daha kısa bilgi-işlem sürelerinde sonuca ulaşabilmesidir. Öyle ki, bu çalışma kapsamında incelenen iki uygulama Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniği ile çözülmüştür ve Uygulama 1'in çözümü her bir piyezometre için sırasıyla 1494, 6378 ve 9196 iterasyonda tamamlanmıştır (Çizelge 2). Uygulama 1'in önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı ile çözümü ise her bir piyezometre için sırasıyla 24, 14 ve 7 iterasyonda tamamlanmıştır. Benzer şekilde Uygulama 2'nin çözümü Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından 9076 iterasyonda yapılabilirken aynı işlem önerilen yaklaşımla 20 iterasyonda tamamlanabilmektedir (Çizelge 2). Elde edilen bu sonuçlar önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının literatürde verilen diğer yaklaşımlarla rekabet edebilecek bir yaklaşım olduğu sonucunu doğurmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında akifer hidrojeolojik parametrelerinin otomatik olarak belirlenebildiği optimizasyona dayalı bir tip eğri çakıştırma yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın en büyük avantajı sistematik ve kolay bir yaklaşım kullanılarak akifer hidrojeolojik parametrelerinin belirlenebilmesidir. Ayrıca pompaj test sonuçlarına bağlı olarak parametre kestirimi yapılan simülasyon-optimizasyon modellerine göre en büyük avantajı deterministik bir çözüm yaklaşımı kullanılarak optimum çözüme literatürdeki çalışmalardan çok daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Geliştirilen yaklaşımın performansı basınçlı ve sızıntılı akifer sistemleri için yapılmış iki pompaj test verisi kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde verilenle sonuçlarla doğruluk ve yakınsama performansları bakımından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen yaklaşım kullanılarak akifer hidrojeolojik parametrelerinin etkin bir şekilde ve literatürde verilen diğer optimizasyon tabanlı yaklaşımlardan çok daha hızlı bir şekilde belirlenebileceğini göstermiş ve önerilen yaklaşımın pompaj test sonuçlarına kolaylıkla uygulanabileceğini göstermiştir.

Bilgilendirme

Bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımına ait Excel® dosyası makale yazarları ile e-posta aracılığı ile iletişime geçilmesi halinde ücretsiz olarak temin edilebilecektir.

Kaynaklar

- [1] Huang, Y. C., Yeh, H. D., Lin, Y. C., A computer method based on simulated annealing to identify aquifer parameters using pumping-test data. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 32, 235–249, 2008.
- [2] Ayvaz, M. T., Gurarlan, G., Identification of the aquifer parameters from pumping test data by using a hybrid optimization approach. 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018), Palermo, Italy, Jul 1-6, 2018.
- [3] Sahin, A. U., A particle swarm optimization assessment for the determination of non-darcian flow parameters in a confined aquifer. *Water Resour. Manag.*, 32, 751–767, 2008.

- [4] Sun, N.Z., *Inverse Problems in Groundwater Modeling*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1994.
- [5] Willis, R., Yeh, W. W. G., *Groundwater System Planning and Management*. Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [6] Samuel, M. P., Jha, M. K., Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129, 348–359, 2003.
- [7] Brown, C. J., Using Solver to Estimate Aquifer Parameters for Non-Leaky and Leaky Unsteady Confined Aquifer Tests. *Environmental and Engineering Geoscience*, 19, 253-263, 2013.
- [8] Theis, C. V., The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophys. Union*, 16, 519, 1935.
- [9] Kresic, N., *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*, 1st ed. CRC Press, New York, 1997.
- [10] Hantush, M. S., Jacob, C. E., Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geophys. Union* 36, 95–100, 1955.
- [11] Veling, E. J. M., Maas, C., Hantush well function revisited. *Journal of Hydrology*, 393, 381–388, 2010.
- [12] Cleveland, T. G., Type-Curve Matching using a Computer Spreadsheet, *Groundwater*, 34(3), 554-562, 1996.
- [13] Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., Ratner, M., Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Trans.on Math. Software*, 4(1), 34–49, 1978.
- [14] McKinney, D.C., Lin, M.-D., Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resources Research*, 30(6), 1897–1906, 1994.
- [15] Ayvaz, M. T., Gurarslan, G., An optimization based curve matching approach for identifying the hydrogeological parameters of the confined and leaky-confined aquifers. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018-5848, 2018.

Ek A - Uygulama 1’de kullanılan test verileri

Zaman (dk)	s(m)			Zaman (dk)	s(m)		
	P1	P2	P3		P1	P2	P3
1	1.875	0.412	0.041	120	4.115	2.437	1.507
2	2.288	0.684	0.105	150	4.175	2.513	1.593
3	2.495	0.862	0.175	180	4.254	2.59	1.667
4	2.651	0.992	0.241	210	4.319	2.655	1.731
5	2.757	1.092	0.302	240	4.408	2.73	1.792
6	2.839	1.172	0.357	270	4.429	2.765	1.839
7	2.906	1.24	0.407	300	4.498	2.824	1.887
8	2.965	1.298	0.451	330	4.537	2.862	1.926
9	3.016	1.348	0.492	360	4.574	2.989	1.963
10	3.06	1.394	0.53	390	4.607	2.931	1.996
12	3.146	1.471	0.594	420	4.637	2.961	2.027
14	3.212	1.535	0.65	450	4.666	2.989	2.056
16	3.267	1.592	0.7	480	4.692	3.016	2.083
18	3.316	1.641	0.745	540	4.718	3.054	2.128
20	3.36	1.686	0.786	600	4.791	3.177	2.178
25	3.436	1.771	0.87	660	4.822	3.181	2.217
30	3.534	1.854	0.94	720	4.861	3.188	2.253
35	3.579	1.913	1.002	780	4.894	3.22	2.285
40	3.651	1.974	1.005	840	4.924	3.25	2.315
45	3.702	2.024	1.104	900	4.952	3.277	2.343
50	3.73	2.064	1.147	960	4.977	3.303	2.37
55	3.782	2.108	1.186	1020	5.002	3.328	2.394
60	3.821	2.145	1.222	1080	5.024	3.351	2.418
70	3.868	2.202	1.283	1140	5.046	3.372	2.44
80	3.945	2.268	1.338	1200	5.066	3.393	2.461
90	3.975	2.309	1.387	1260	5.085	3.412	2.481
100	4.036	2.361	1.431	1320	5.105	3.434	2.501
110	4.076	2.401	1.471	1380	5.124	3.453	2.52

Ek B - Uygulama 2’de kullanılan test verileri

Zaman (dk)	s(m)	Zaman (dk)	s(m)	Zaman (dk)	s(m)
1	0.11	20	1.28	360	1.5
2	0.52	25	1.33	420	1.51
3	0.75	30	1.36	480	1.51
4	0.86	45	1.39	600	1.51
5	0.96	60	1.43	720	1.51
6	1.01	90	1.45	840	1.52
7	1.05	120	1.46	960	1.52
8	1.08	150	1.47	1080	1.53
9	1.11	180	1.48	1200	1.53
10	1.14	240	1.49	1320	1.53
15	1.24	300	1.5	1440	1.53