



## ARAŞTIRMA MAKALESİ

## Nehir-Akifer Etkileşimlerinin Visual Modflow ile Modellenmesi

## Öne Çıkan Sonuçlar:

- Nehirdeki su yüzeyi eğiminin yeraltı suyuna doğrudan etki ettiği ve nehir ile akifer arasında bir hiporeik akım oluşmasına sebep olduğu görülmüştür.
- Su yüzeyi eğimi sonucunda oluşan yeraltı suyu dağılımı, hızı ve etkileşime giren su hacimleri hesaplanmıştır.
- Nehir-akifer sistemlerinde nehrin su yüzeyi eğiminin artması ya da azalması, akifer ile etkileşime giren su miktarına ve hiporeik akım hacmine önemli derecede etki etmektedir.

## Yazışma yazarı:

Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN,  
meleka@istanbul.edu.tr,  
+902124737070/17918

## Referans:

Boyraz, U., Mohammadi, H., Kazezyılmaz-Alhan, C. M., (2018), Nehir-Akifer Etkileşimlerinin Visual Modflow ile Modellenmesi, Su Kaynakları, 3, (2) 8-13,

Makale Gönderimi : 24 TEMMUZ 2018  
Online Kabul : 2 AĞUSTOS 2018  
Online Basım : 1 EKİM 2018

Uğur Boyraz<sup>1</sup>, Hekmatullah Mohammadi<sup>1</sup>, Cevza Melek Kazezyılmaz-Alhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar-Istanbul, Türkiye.

**Özet** Yeraltı suyu, su kaynaklarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yeraltı suyu kaynaklarının korunmasının ve geliştirilmesinin önemi gün geçtikçe artmakta ve bu bağlamda yapılan çalışmalar önem taşımaktadır. Özellikle yüzey suyu ile yeraltı suyu etkileşimleri, yeraltı suyu hidrolojisinde önemli rol oynadığından; yüzey suları ile yeraltı suları arasında oluşan akış miktarı ve fiziksel mekanizmalar araştırılmalıdır. Bu çalışmada, nehir akifer-sistemindeki etkileşimleri incelemek ve etkileşimlerin yeraltı suyu dağılımına olan etkilerini belirlemek amacıyla sayısal modeller kurulmuştur. Bu modellerin kurulması için Visual Modular Finite Difference Groundwater Flow Model (MODFLOW) programı kullanılmıştır. Eğimli su yüzeyine ve düz planforma sahip bir nehir, akifere sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Bu koşul, nehirlerin, akifer sistemi içerisindeki doğal konumlanması dikkate alınarak belirlenmiştir. Homojen ve izotropik olarak kabul edilen bir akiferde, kararlı ve kararsız akım koşullarında analizler yapılarak, nehir ile akifer arasındaki toplam debi alışverişi hesaplanmıştır. Ayrıca nehir için belirlenen eğimli su yüzeyi koşulunun nehir-akifer etkileşimleri üzerindeki rolünü belirlemek amacıyla farklı su yüzeyine sahip nehirler için hassasiyet analizleri yapılarak, nehir ile akifer arasında etkileşime giren ve akiferde depolanan su hacimleri karşılaştırılmıştır. Bahsedilen koşullarda, nehir-akifer etkileşimlerinin yeraltı suyu dağılımı ve yeraltı suyu akımına olan etkileri ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Nehir-akifer etkileşimleri, Eğimli su yüzeyi, Visual MODFLOW, Yeraltı suyu sayısal modeli.

## Modeling of Stream-Aquifer Interactions With Visual Modflow

**Abstract** Groundwater is one of the most important element of water resources. Therefore, protection of groundwater resources and development of sustainable groundwater management strategies are crucial. Especially surface water and groundwater interactions play an important role in groundwater hydrology. The physical mechanisms and the flow rate between surface water & groundwater should be examined. In this study, numerical models are developed to investigate the stream-aquifer interactions and to determine the effects of interactions on groundwater head distribution. The Visual Modular Finite Difference Groundwater Flow Model (MODFLOW) is used to develop these models. A simple stream with a sloped water surface is defined as boundary condition to the aquifer. Sloped water surface boundary condition is chosen to mimic the natural conditions of the streams in an aquifer system. In a homogeneous and isotropic aquifer, the total flow volume between stream and aquifer is calculated under steady & unsteady flow conditions. In addition, the role of the sloped water surface on the total volume of water exchange is examined. For this purpose, sensitivity analyses are performed and the total water volumes, which represent the surface water/groundwater interactions, are compared for different water surface slopes in streams. Under these conditions, the effect of stream-aquifer interactions on groundwater head distribution and groundwater flow velocity is revealed.

**Keywords:** Stream-aquifer interaction, Sloped water table, Visual MODFLOW, Numerical modeling of groundwater.

## 1. Giriş

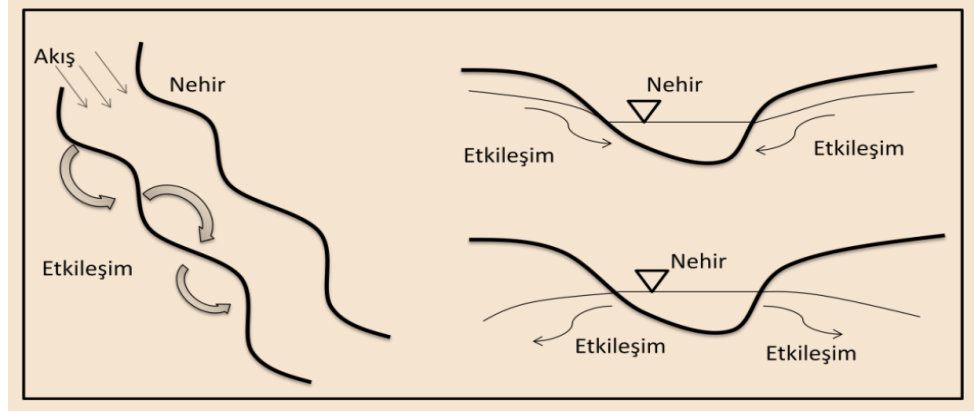
Tüm canlı varlıkların yaşamasının devamı için sürekli olarak suya ihtiyaç vardır. Bu sürekliliğin sağlanabilmesi için sürdürülebilir su yönetimi konularında birçok çalışma yapılmaktadır. Yeraltı suları da sürdürülebilir su temini açısından önem arz etmektedir. Su kaynaklarının yetersizliği ve kalitesi göz önünde bulundurulduğunda ise yenilenebilir bir kaynak olan yeraltı suları ve yeraltı suyu kalitesi ile ilgili çalışmaların önemi her geçen gün artmaktadır (Saravanan vd., 2007). En iyi yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için, kirlilik kaynakları ve su kaynaklarını temizleme yöntemleri araştırılmalıdır (Pang vd., 2017). Endüstriyel atıkların artışı ve su havzalarına bu atıkların dağılması yeraltı suyu kalitesi için bir tehdit unsurudur. Atıkların dağılması, aynı zamanda akışa geçen yağmur sularının da kirlenmesine neden olarak, nehir ve göl gibi yüzeysel akışın ulaştığı su kütlelerini de etkilemektedir (Secunda vd., 1998, Saha ve Alam, 2014, Boyraz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2010). Ayrıca insan faaliyetleri ve iklim değişikliği de, yeraltı sularının ve diğer su kütlelerinin hacimsel değişimini ve kalitesini etkilemektedir (Fuzhon vd., 2011). Çok sıcak iklimlerde yüzey sularının tükenme noktasına geldiği ve insan faaliyetleri sebebiyle yeraltı su seviyesinin çok düştüğü örnekler günümüzde mevcuttur. Tüm bu olumsuz etkilerin önüne geçebilmek üzere birçok modelleme çalışması, sürdürülebilir su yönetimi planlarına dahil edilmektedir. Bu çalışmalarda ilk olarak sistemdeki su miktarının ve sistemler arasındaki hacimsel değişimlerin hesaplanmasına odaklanılmaktadır. Hacimsel değişimlere, kirlilik taşınımı modelleri entegre edilerek modeller daha kapsamlı hale gelmektedir. Yeraltı sularının rezervinin ve kalitesinin modellenmesi için yeraltı suyu şarj/deşarj oranını, beslenme ve boşalma zamanlarını ve yerlerini belirlemek kritik önem taşır (Healy ve Scanlon, 2010). Akiferdeki hacimsel değişim ve depolamaların hesaplanması ile yeraltı suyu kaynaklarının niceliksel değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir (de Vries ve Simmers, 2002). Bu bağlamda birçok matematiksel model kullanılmaktadır. Bu modeller yardımıyla yeraltı suyu davranışı farklı uygulamalar için belirlenebilmekte, sistem içerisindeki su kütlelerinin birbiri ile olan ilişkisi ve etkileşimi ortaya konabilmektedir (Xue, 1986; Boyraz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2014). MODFLOW programı bu amaçla geliştirilen ve yeraltı suyu modellemesi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan sayısal bir modeldir. Aynı zamanda yeraltı suyu kalitesi modelleri ve yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri verimli bir şekilde bu program aracılığıyla çözülebilir (McDonald ve Modular, 1988). Birçok havzada, MODFLOW'un içerisinde bulunan veya entegre edilebilen farklı sayısal yöntemler kullanılarak yeraltı suyu akımı simülasyonu yapılmıştır (Mehl vd., 2006, Cho vd., 2009).

Nehir-akifer sistemleri doğada en sık rastlanan yüzey suyu-yeraltı suyu sistemlerinden birisidir. Bu sebeple bu sistemlerde, yeraltı suyu davranışı ve yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşim mekanizmalarının belirlenmesi için yapılan çalışmalar, pratikteki uygulamalar için oldukça gereklidir. Nehirlerin akiferlerle olan etkileşimi ve ilişkisini incelemek üzere farklı bölgelerde MODFLOW programı yardımıyla birçok uygulama çalışması yapılmıştır (Safavi ve Bahreini 2009, Kania vd. 2006). Buna ek olarak nehir-akifer sisteminin davranışını belirlemek üzere farklı yaklaşımlar ile çalışmalar yapılmış; bu sistem içerisinde meydana gelen etkileşimler analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenmiş ve birçok parametrenin etkisi ortaya konulmuştur (Boyraz ve Kazezyılmaz-Alhan, 2011, 2014, 2017).

Literatüre katkıda bulunmak amacıyla bu çalışmada, nehir-akifer sistemindeki yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri modellenmiştir. Kurulan modeller ile akifer içerisindeki su hacminin değişimi ve nehir ile yeraltı suyu arasındaki beslenme-boşalma ilişkisi incelenmiştir. Sayısal modeller, Visual MODFLOW programı kullanılarak oluşturulmuştur. Ele alınan modellerde, nehirdeki su yüzeyi sabit eğimli olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, su yüzeyi eğimli bir nehir ile akifer arasındaki su alışverişi, hacimsel olarak belirlenmiştir. Kararlı ve kararsız akım durumlarında, akiferdeki depolama miktarı ve nehir ile akifer arasındaki su alışverişini temsil eden etkileşim hacmindeki değişimler ortaya konulmuştur. Ek olarak, su yüzeyi eğimindeki değişimin etkileşim hacmi üzerindeki etkileri parametrik analizler ile araştırılmıştır.

## 2. Nehir-Akifer Etkileşimleri

Nehir-akifer etkileşimleri ile ilgili ilk çalışmalar akiferde açılan bir kuyudan çekilen sabit bir debi neticesinde akifer ile nehir arasında oluşan akımı incelemek üzere yapılmıştır (Theis, 1941). Ardından günümüze kadar yapılan çalışmalar ile pompa tarafından çekilen bir debi olmasa dahi nehir ile yeraltı suları arasında sürekli bir akım olduğu ve bu akımın nehir yatağının özellikleri, nehrin şekli, eğimi, akım özellikleri ve akifer özellikleri gibi birçok parametreden etkilendiği anlaşılmıştır. Bazı durumlarda nehirde akifere geçen su bir süre akiferde ilerledikten sonra tekrar nehre dönebilir. Bu şekilde oluşan etkileşim akımına hiporeik akım denir ve nehir-akifer sistemlerinde çok sık görülür. Bahsedilen etkileşimler neticesinde yüzey suları yeraltı suyunu besleyebilir veya yeraltı suyundan beslenebilirler. Bu besleme davranışı, her iki formasyonun da su miktarına önemli ölçüde etki eder. Ayrıca bu hacimsel su giriş çıkışı sırasında akım ile birlikte birçok kirlilik maddesi de taşınabilir. Bu sebeple bu hacimsel değişimlerin incelenmesi ve belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Şekil 1'de nehir ile akifer arasındaki oluşması muhtemel etkileşim mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Nehirde yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri (Boyras, 2011).

### 3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında nehirdeki farklı su yüzeyi eğimlerinin etkileşime giren su hacmine olan etkisini gözlemlemek üzere nehir-akifer modelleri kurulmuş; kararlı ve kararsız akım koşulları için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Analizleri yapmak üzere Visual MODFLOW programı kullanılmıştır. Boyutları x doğrultusunda 100 m, y doğrultusunda 80 m olan homojen ve izotropik bir akifer kullanılmıştır. Nehir y=0 doğrultusu boyunca sisteme yerleştirilmiştir. Akiferin hidrolik iletkenliği 0.1 cm/s olarak belirlenmiştir. İki farklı su yüzeyi eğimi için sistem çalıştırılmış ve nehir yatağındaki su yüzeyi profilinin, nehir-akifer arasındaki etkileşim hacmindeki değişimi üzerindeki etkileri incelenmiş; ek olarak kararlı ve kararsız durumlardaki davranışı irdelenmiştir.

#### 3.1. Visual MODFLOW (Modular three dimensional finite difference groundwater flow model)

Visual MODFLOW programı yeraltı suyu akımını sayısal yöntemler kullanarak, 3 boyutlu olarak modelleyebilen bir programdır. Yeraltı suyu akışını tanımlayan diferansiyel denklemleri sonlu farklar yaklaşımıyla çözümler. Yeraltı suyu akışının yanı sıra yeraltı suyu içindeki kirletici madde taşınımını, yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerini, kuyu modelleri ve çalışma sahalarındaki yeraltı suyu dinamiklerini de modelleyebilir. Program birbirine entegre olarak çalışabilen birçok modülden oluşmaktadır. Bu çalışma çerçevesinde yeraltı suyu akımı denklemini çözmek üzere MODFLOW 2005 modülü kullanılmıştır. Nehrin oluşturduğu sınır koşulu ise, yeraltı suyu akımına, sabit veya lineer olarak değişebilen su seviyesini sınır koşulu olarak entegre eden Constant Head Boundary (CHB) modülü ile tanımlanmıştır. Bu paket yardımıyla lineer olarak değişen su seviyeleri tanımlanmış ve nehirdeki su yüzeyine istenilen eğim verilmiştir. Sayısal çözümleyici olarak kararlı akım analizleri için WHS çözümleyicisi ve kararsız akım analizleri için Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) çözümleyicisi kullanılmıştır.

Yeraltı suyu denklemi, akifer içerisinde belirlenen doygun bir kontrol hacmine giren ve çıkan akışların Darcy Kanunu ile ifade edilerek kütle korunumu denkleminde uygulanması ile elde edilir. 3 boyutlu yeraltı suyu akımı aşağıda verilmiş olan kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Burada  $h$  yeraltı su seviyesi (L),  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  ve  $K_{zz}$  sırasıyla zeminin  $x$ ,  $y$ ,  $z$  doğrultularındaki hidrolik iletkenliği (L/T),  $S_s$  zeminin özgül depolama miktarı (1/L) ve  $W$  sistemin hacimsel su kazancı ya da kaybını ifade eden kaynak/kuyu terimidir (1/T). MODFLOW 2005 modülü, modellerde tanımlanan yüzey sularını ya da yeraltı suyuna kaynak/kuyu etkisi yapan diğer etkileri bu denklem içerisindeki  $W$  terimi yardımıyla çözümler. Visual MODFLOW, nehir, göl ya da bataklık gibi yeraltı suyuna sınır koşulu oluşturan yüzey suları ile yeraltı suyu arasındaki etkileşim debisini ise her iki formasyon arasında Darcy denklemini uygulayarak hesaplar (Prudic, 1989):

$$Q_e = -K_{yatak} \frac{\partial h}{\partial z} \times A \quad (2)$$

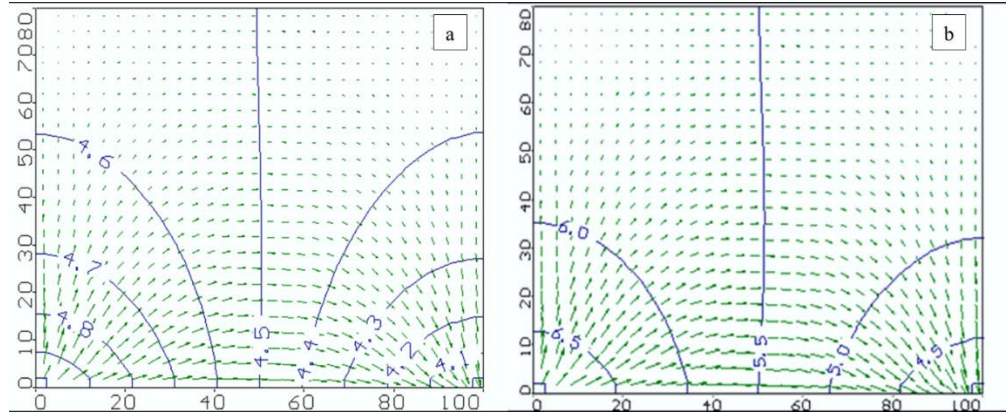
Bu denklemde  $Q_e$  etkileşim debisi (L<sup>3</sup>/T),  $K_{yatak}$  nehir yatağının hidrolik iletkenliği (L/T),  $A$  etkileşimin gerçekleştiği yüzey alanıdır (L<sup>2</sup>). Bu denklem nehir-akifer etkileşimleri için özelleştirildiğinde, nehir boyunca belirli bir mesafede gerçekleşen etkileşimlerin nehrin genişliği boyunca akifere geçiş yaptığı kabul edilerek etkileşimin gerçekleştiği yüzey alanı belirlenir.

### 4. Bulgular

Farklı su yüzeyi eğimlerini modelleyebilmek üzere uzunluğu 100 m olan ve akifere sınır koşul oluşturan nehir boyunca su derinliği lineer olarak değişen iki model kurulmuştur. Birinci modelde,

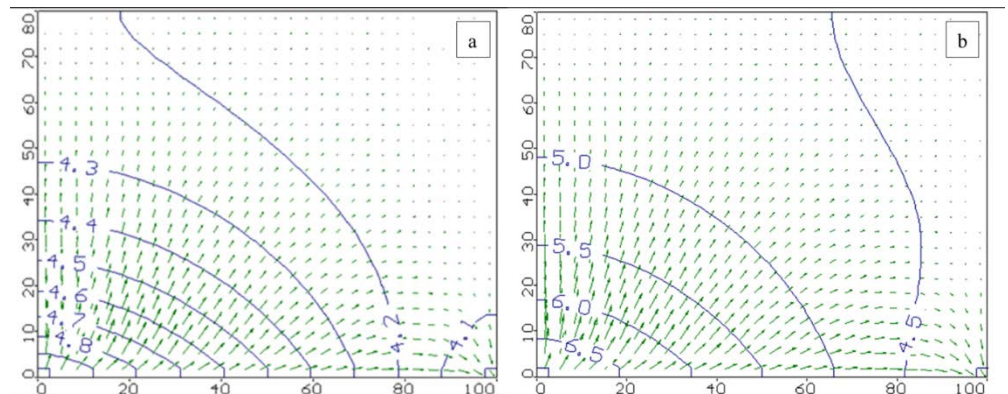
nehirdeki su seviyesi 5 m'den 4 m'ye doğru azalmakta ve su yüzeyi eğimi %1 değerinde olmaktadır. İkinci modelde ise su seviyesi 7 m'den başlayarak 4 m'ye doğru azalmakta ve su yüzeyi eğimi % 3 değerinde olmaktadır. Her iki modelde de akiferdeki başlangıç hidrolik yük koşulu nehirdeki en düşük su seviyesine eşitlenerek 4 m olarak kabul edilmiştir.

Kararlı akım analizleri kapsamında, nehir-akifer modeli zamandan bağımsız olarak irdelenmiş ve yeraltı suyu dağılımları ile etkileşime giren su hacimleri değerlendirilmiştir. Kararlı akım analizleri sonucunda elde edilen yeraltı suyu dağılımları Şekil 2'de görülmektedir. Şekilde yeraltı suyu hidrolik yük dağılımının nehirdeki maksimum hidrolik yük ile nehirdeki minimum yük arasında değiştiği ve bu değişim sonucu eş hidrolik yük eğrilerinin plan üzerinde  $x=50$  m doğrusuna göre simetrik bir dağılıma yaklaştığı görülmektedir. Probleme tanımlanan Neumann sınır koşulları ve eğimli su yüzeyi sonucu oluşan bu davranış, akiferin beslenme ve boşalma sınırlarını anlamakta da yardımcı olmaktadır. Nehrin bulunduğu  $y=0$  doğrusu boyunca  $x=0$  m noktasından başlamak üzere ilk 50 m uzunluk boyunca nehirden akifere doğru bir akım oluşurken, sonraki 50 m uzunluk boyunca yeraltı suyunun nehre doğru aktığı anlaşılmaktadır. Yeraltı suyu eş hidrolik yük eğrileri arasındaki mesafeler nehir sınır koşuluna doğru daha küçük olurken, Neumann sınırlarına doğru bu mesafe artmaktadır.  $y=80$  m sınırında bu mesafeler beslenme sınırından uzaklaştığından maksimum değerine ulaşmıştır. Bu mesafelerin fazla olması, hidrolik yükün uzun mesafede değişmesi anlamına gelmektedir. Darcy prensibine göre bu durum değerlendirildiğinde yeraltı suyu akımının bu noktalarda çok yavaş olduğu anlaşılmaktadır. Beslenme sınırına yaklaştıkça ise eş hidrolik yük eğrilerinin mesafesinin azalması bu noktada yeraltı suyu akımının hızının artmasına ve maksimum değerine tam sınırdan ulaşmasına neden olmaktadır. Küçük eğimli modelde (Şekil 2 (a)) yeraltı suyu hızının maksimum değeri 0.011 m/s olurken, büyük eğimli modelde (Şekil 2 (b)) bu değer 0.035 m/s olarak elde edilmiştir.



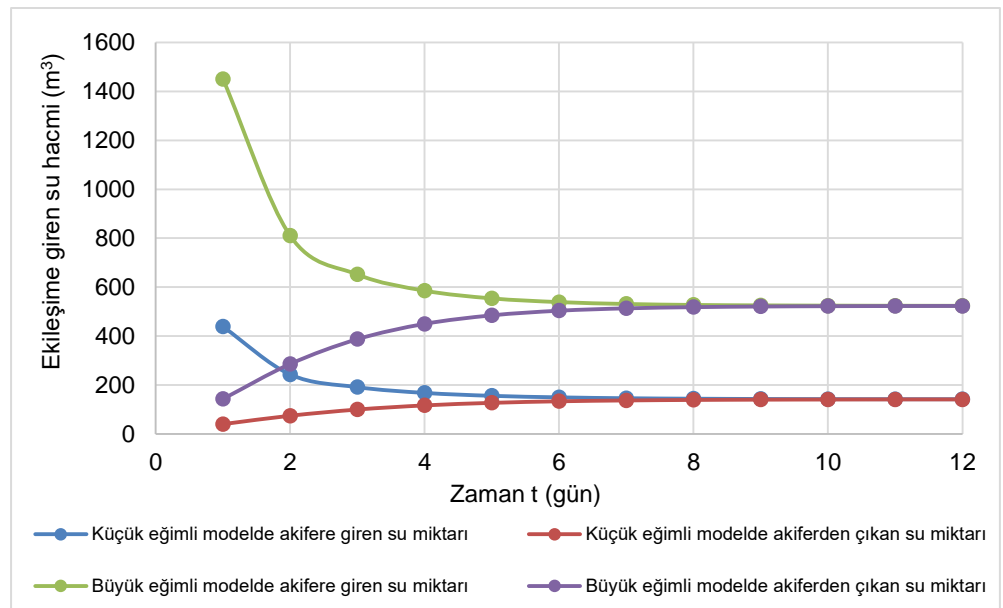
Şekil 2. Kararlı akım analizi sonucu elde edilen yeraltı suyu dağılımı ve hız vektörleri: (a) küçük eğimli model, (b) büyük eğimli model.

Kararsız akım analizlerinde ise yeraltı suyu dağılımındaki değişim ve nehir-akifer sistemindeki debi alış-verişi zamana bağlı olarak elde edilmiştir. 15 günlük bir analiz yapılmış ve birinci günün sonunda elde edilen yeraltı suyu dağılımları Şekil 3'de sunulmuştur. Bu şekil üzerinde yeraltı suyu akımının ilk zamanlarda daha hızlı bir değişim içerisinde olduğu ve akiferin yoğun olarak nehirden beslendiği anlaşılmaktadır. Kararlı akım grafikleri ile karşılaştırıldığında ise kararlı akıma doğru yaklaştıkça akımın yavaşladığı ve akiferin nehri beslediği sınırın uzayarak akiferi beslediği sınır uzunluğuna yaklaştığı görülmektedir. Analiz sonuçlarında %1 eğime sahip olan nehirdeki akımın maksimum hızı birinci günde nehirden akifere doğru 0,017 m/s olurken, %3 eğime sahip modelde bu değer nehirden akifere doğru 0,047 m/s değerine çıkmıştır. Bu durum nehirdeki su yüzeyi eğiminin artmasının, yeraltı suyu dağılımı üzerinde etki sahibi olduğunu göstermektedir. Eğim artışı ilk dakikalardaki etkileşim hızını da arttırmıştır.

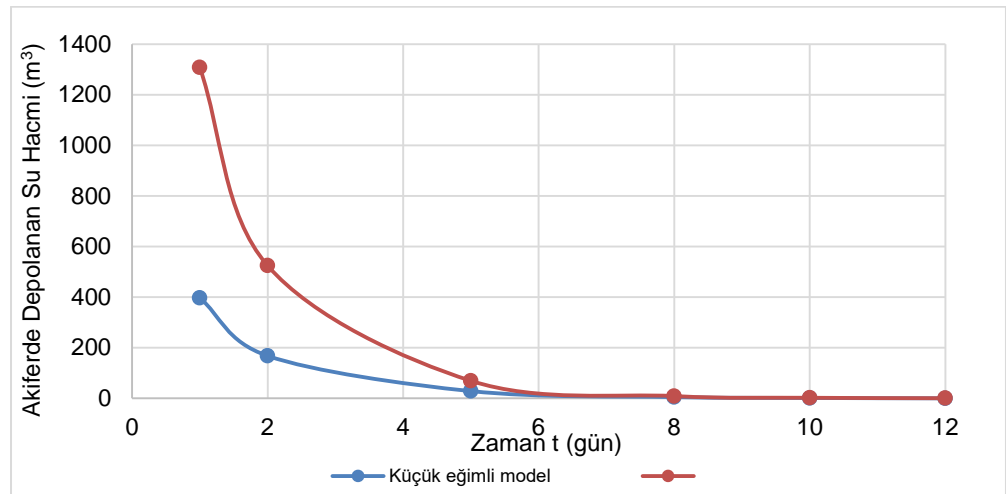


Şekil 3. Kararsız akım analizi sonucu ilk gün sonunda elde edilen yeraltı suyu dağılımı ve hız vektörleri: (a) küçük eğimli model, (b) büyük eğimli model.

Şekil 4, her iki analiz sonucunda nehirden akifere doğru ve akiferden nehre doğru oluşan akımların toplam hacimlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5 ise bu modellerde akiferde depolanan su hacminin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Nehirdeki su yüzeyi eğiminin % 1 olduğu modelde ilk gün sonunda etkileşimler sonucu nehirden akifere giren su hacmi  $438.3 \text{ m}^3$  olup, akiferden nehre doğru  $39.8 \text{ m}^3$  su hacmi giriş yapmıştır. Eğimin %3 değerine arttığı ikinci modelde ise nehirden akifere geçen su hacmi  $1450.8 \text{ m}^3$  olarak hesaplanmış, akiferden nehre doğru ise  $142.7 \text{ m}^3$  hacme sahip su nehre geri dönmüştür. Eğimde meydana gelen % 2 oranındaki artış, nehirden akifere geçen su hacmini yaklaşık olarak 3.3 kat arttırmıştır. Denge durumunda yani kararlı akım halinde etkileşim miktarı her iki yönde eşit olmaktadır. Birinci modelde denge hacmi  $141 \text{ m}^3$  olurken, ikinci modelde  $523 \text{ m}^3$  değerine yükselmiştir. Bu dengeye ulaşma sürelerini belirlemek üzere; akiferde depolanan su hacminin sıfıra yaklaştığı nokta belirlenmelidir. Bu süreyi belirlemek için ise nehirden akifere doğru giren su hacmi akiferden nehre doğru giren su hacmine oranlanmıştır. Bu oranın 1 olması akiferde depolanan su miktarının sıfır olduğu anlamına gelmektedir. Bu oran, eğimin yüksek olduğu modelde 10. günde kararlı akıma ulaşıldığını, eğimin düşük olduğu modelde ise 12. günde kararlı akıma ulaşıldığını göstermektedir. Bu sonuçlardan ikinci modelde, akiferde etkileşime giren ve depolanan su hacimlerinin daha fazla olmasına rağmen daha hızlı bir şekilde beslenerek daha erken kararlı hale ulaştığı anlaşılmaktadır. Akiferde depolanan su hacimleri ve denge durumları incelendiğinde, birinci modelin birinci gününde  $397.5 \text{ m}^3$  hacminde su akiferde depolanırken, eğimin arttığı ikinci modelde bu değer  $1307.8 \text{ m}^3$  değerine yükselerek, 10. güne doğru sıfıra ulaşmaktadır. Bu da akiferin tamamen beslendiğini ve giriş çıkış hacimlerinin oranı ile belirlenen kararlı akım süresini de doğrulamaktadır.



Şekil 4. Etkileşime giren su hacimleri.



Şekil 5. Akiferde depolanan su hacimleri.

## 5. Sonuç

Yapılan bu çalışma sonucunda nehir-akifer sistemleri ve bu sistemde nehir ve akifer arasındaki su alış-verişini temsil eden etkileşim hacimleri, büyük eğimli ve küçük eğimli su yüzeyine sahip nehirler için incelenmiştir. Bu amaçla Visual MODFLOW programı kullanılarak, kararlı ve kararsız akım

durumları için analizler yapılarak farklı eğimlerdeki nehir-akifer arasında su alışverişi, hızı, su dağılımı ve akımı gibi parametreler hesaplanmıştır. Analiz sonuçları nehirdeki su yüzeyi eğiminin yeraltı suyuna doğrudan etki ettiğini ve nehir ile akifer arasında bir hiporeik akım oluşmasına sebep olduğunu göstermiştir. Oluşan bu hiporeik akımın kararlı durum analizlerinde denge halinde olduğu görülmüş ve yeraltı suyu dağılımının simetrik olduğu gözlenmiştir. Ancak kararsız akım halinde hiporeik akım hacminin büyük bir kısmını nehirden akifere geçen su hacmi oluşturmuştur. Ayrıca nehir ile akifer arasındaki beslenme ve boşalma bölgeleri de gündün güne değişiklik göstermiştir. Nehirdeki su yüzeyi eğiminin hiporeik akım hacmi üzerindeki etkilerini gözlemek için yapılan analizlerde ise eğimdeki küçük değişimlerin hiporeik akım hacmini büyük oranlarda değiştirdiği görülmüştür. Eğimdeki % 2'lik artış, nehirden akifere geçen su hacmini kararsız akım analizinin ilk gününde yaklaşık 3 katına çıkarmıştır. Kararlı akım durumunda eğimin % 2 artması nehir ile akifer arasındaki denge hacmini 3.7 katına çıkarmıştır. Bu sonuçlar, nehir-akifer sistemlerinde su yüzeyi eğiminde geçici veya kalıcı değişikliklerin etkileşim miktarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Su kalitesine yönelik değişimlerde de bu davranışın önemli bir rol oynayacağı açıktır. Bu çalışmanın, yeraltı suyu miktarı ve kalitesi üzerine yapılacak model ve saha çalışmalarına yardımcı olacağı ve önemli bir öngörü oluşturacağı düşünülmektedir.

### 6. Kaynaklar

- Boyraz, U. (2010) Yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerini içeren kavramsal bir nehir akifer modeli [A conceptual stream-aquifer system incorporating surface water-ground water interactions], Master Thesis, Istanbul University, Turkey.
- Boyraz, U., Kazezyılmaz Alhan, C. M. (2011), Hidrolojik Modellemede Yüzey Suyu-Yeraltı Suyu Etkileşimlerinin Önemi, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011, İstanbul, Türkiye, ss.649-660.
- Boyraz, U., Kazezyılmaz Alhan, C.M. (2014), An Investigation On The Effect Of Geometric Shape Of Streams On Stream/Ground Water Interactions And Ground Water Flow, Hydrology Research, 45, ss.575-588.
- Boyraz U., Kazezyılmaz Alhan C.M. (2017), Solutions for groundwater flow with sloping stream boundary: analytical, numerical and experimental models, Hydrology Research, vol.in press, ss.1-12.
- Cho, J., Barone, V. A., Mostaghimi, S. (2009), Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed, Agricultural Water Management, 96(1), ss.1-11.
- De Vries, J.J., Simmers, I. (2002), Groundwater recharge, an overview of processes and challenges, Hydrogeol. J., 10 (1), 5-17. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>.
- Fuzhong, Z., Yani, W., Hui, Q., Xuedi, Z. (2011), Numerical Simulation of the Groundwater in Bulang River-Red Stone Bridge Water Source, ss.141.
- Healy, R.W., Scanlon, B.R. (2010), Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511780745>. 245 pp.
- Kania, J., Haladus, A., Witczak, S. (2006), On modelling of ground and surface water interactions, Groundwater and Ecosystems, 70, ss.183-194.
- Mehl, S., Hill, M.C., Leake, S.A. (2006), Comparison of local grid refinement methods for Modflow, Groundwater, 44(6), ss.792-796
- McDonald, M. G. Modular, A. W.(1988), Three-dimensional Finite-difference Groundwater Flow Model , Techniques of water resources investigation of U. S. Geological Survey, book6 CH. AL.
- Pang, L., Robson, B., Farkas, K., McGill, ., Varsani, A., Gillot, L., Li, J., Abraham, P. (2017), Tracking effluent discharges in undisturbed stony soil and alluvial gravel aquifer using synthetic DNA tracers, ss.144-145
- Prudic, D.E. (1989) Documentation of A Computer Program To Simulate Stream-Aquifer Relations Using A Modular, Finite-Difference, Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open file report 88-729.
- Safavi, H. R., Bahreini G. R. (2009), Conjunctive simulation of surface water and ground water resources under uncertainty, Iranian Journal Of Science And Technology Transaction B-Engineering, 33(B1), ss.79-94.
- Saha, D., Alam, F. (2014), Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC and pesti-cide DRASTIC models in intense agriculture area of the Gangetic Plains, India. Environ. Monit. Assess. 186 (12),8741-8763. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-014-4041-x>.)
- Saravanan, R., Balamurugan, R., Karthikeyan, M.S., Rajkumar, R., Anuthaman, N.G., Gopalakrishnan A.N. (2011), Groundwater modeling and demarcation of groundwater protection zones for Tirupur Basin e A case study, ss.197-198.
- Theis, C.V. (1941), The effect of a well on the flow of a nearby stream, Transactions-American Geophysical Union:,22, ss.734-738.
- Secunda, S., Collin, M.L., Melloul, A.J. (1998), Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. J. Environ. Manag, 54 (1), ss.39-57. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.1998.0221>.
- Xue, Y. Q. (1986), the Principle of Groundwater Dynamics ,in Chinese, the Geological Publishing House, Beijing.