



**Teknik Not
(Technical Note)**

Deniz Suyu Girişimi Problemi ve Çözüm Metotlarının İncelenmesi

Murat KİLİT

Devlet Su İşleri 183. Şube Müdürlüğü, Afyonkarahisar/TÜRKİYE
mkilit@gmail.com

Özet

Dünyadaki kıyı akiferlerinin pek çoğu şehirleşme, endüstrileşme ve tarımsal sulama gibi nedenlerle yapılan aşırı yer altı suyu kullanımı sebebiyle tuzlu su girişimi problemiyle yüz yüzedir. Bilim adamları tarafından kıyı akiferlerindeki tuzlu su girişim problemini çözmek için iki farklı yöntem oluşturulmuştur. Bu yöntemlerden birincisi keskin girişim yüzeyi yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda tatlı su ile tuzlu suyun birbirleriyle karışmaz iki farklı akışkan olduğu, bu iki akışkanın arasında bir ara yüzey bulunduğu kabul edilir. Bu yaklaşımda dispersiyon etkilerinin olmadığı varsayılır. İkinci yöntem ise değişken yoğunluklu akım ve çözelti taşınım yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda tatlı su ile tuzlu suyun karışabilir akışkanlar olduğu, tatlı su - tuzlu su arasında geçiş zonu bulunduğu ve difüzyon ile hidrodinamik dispersiyonun bu akışkanlar üzerinde etkili olduğu kabul edilir. Bu çalışmada, kıyı akiferlerinde oluşan deniz suyu girişim probleminin teorisi araştırılmış, keskin girişim yüzeyi yaklaşımı ile değişken yoğunluklu akım ve çözelti taşınım yaklaşımı irdelenmiştir. Deniz suyu girişimi için değişken yoğunluklu akım ve çözelti taşınım yaklaşımının daha uygun sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz suyu girişimi, keskin girişim yüzeyi yaklaşımı, değişken yoğunluklu akım ve çözelti taşınım yaklaşımı

Seawater Intrusion Problem and Analyzing The Solving Methods

Abstract

There is a saltwater intrusion problem in most of the coastal aquifers in the world, because there is an extreme usage of groundwater for the population, industrialization and agricultural activities. Two different methods are developed by the scientist to solve the saltwater intrusion problem in the coastal aquifers. The first method is sharp interface approach. This approach accepted that the saltwater and freshwater are immiscible fluids and there is an interface between them. At the same time, it is supposed that there is no effects of dispersion in this approach. The second method is variable density fluids and solid transport approach. This approach accepted that the saltwater and fresh water are miscible fluids. And there is a transition zone between them. It is also accepted that diffusion and hydrodynamic dispersion are effective on these fluids. In this paper, seawater intrusion problem in coastal areas is searched. Also, sharp interface approach and variable density fluids and solid transport approach are examined. Finally it is established that variable density fluids and solid transport approach has given a more suitable result for the seawater intrusion.

Keywords: Seawater intrusion, sharp interface approach, variable density fluids and solid transport approach

1. GİRİŞ

Su hayatın başlangıcından itibaren canlıların yaşaması için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Su içme, kullanma, sulama, enerji, balıkçılık, endüstri vb. gibi ihtiyaçların temini için kullanılmaktadır. Dünyanın yüzölçümünün % 75'ini su oluşturmasına rağmen, bunun sadece % 2,5'inin insani ihtiyaçlar için

[Bu makaleye atıf yapmak için](#)

Kilit M., Deniz Suyu Girişimi Problemi ve Çözüm Metotlarının İncelenmesi Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2011, 7(2) 50-61

[How to cite this article](#)

Kilit M., Seawater Intrusion Problem and Analyzing The Solving Methods: Electronic Journal of Construction Technologies, 2011, 7(2) 50-61

kullanılabildiğini ve bu tatlı su kaynaklarının da %30'unun yeraltı sularından temin edildiğini belirtilmiştir [1].

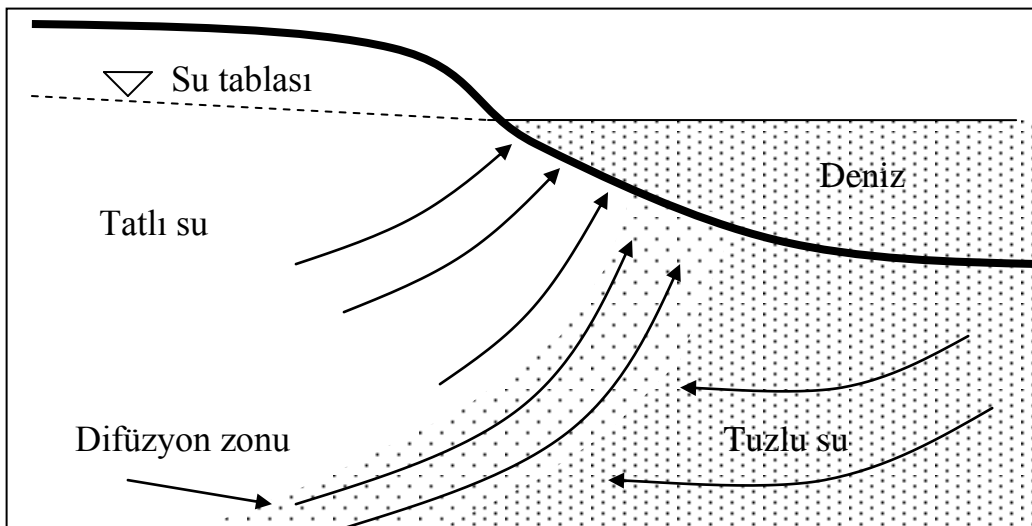
İki boyutlu kirlilik taşınım modellerinin yeraltısuyu sistemlerine ilk uygulamaları deniz suyu girişimi problemleri ile başlamıştır [2]. Yeraltısuyu araştırmacılarının kıyı akiferlerindeki tatlı su ile tuzlu su arasındaki ilişkiyi incelemeleri 1800'lü yıllarda Ghyben-Herzberg yaklaşımıyla başlamıştır. Bilim adamları tarafından kıyı akiferlerindeki tuzlu su girişim problemini çözmek için iki farklı yöntem oluşturulmuştur.

Bu yöntemlerden birincisi keskin girişim yüzeyi yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda tatlı su ile tuzlu suyun birbirleriyle karışmaz iki farklı akışkan olduğu, bu iki akışkanın arasında bir ara yüzey bulunduğu kabul edilir. Bu yaklaşımda dispersiyon etkilerinin olmadığı varsayılır.

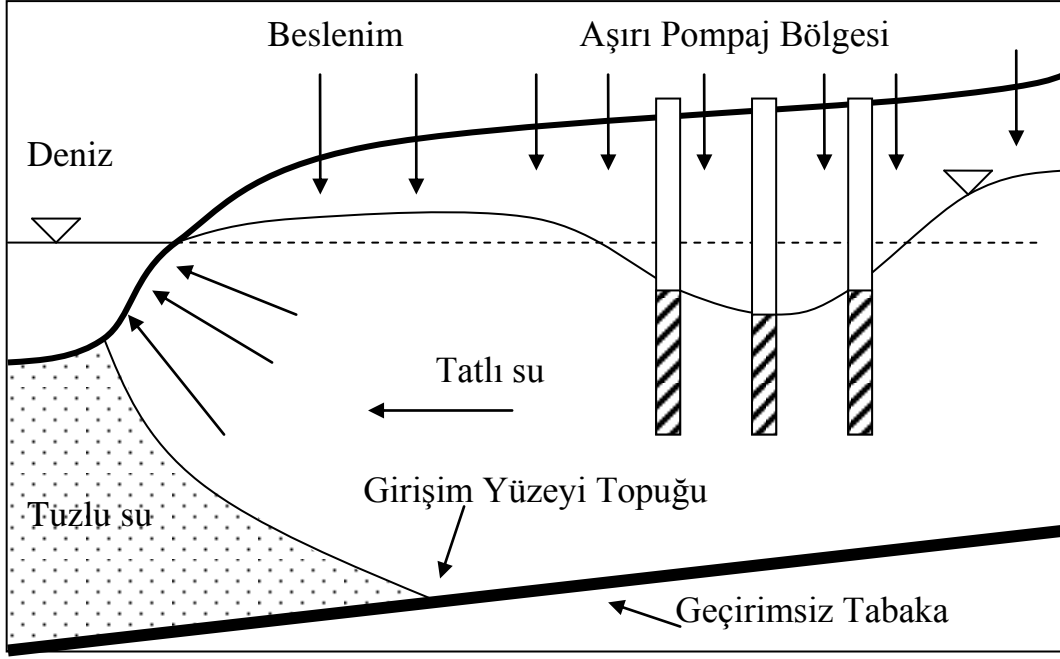
İkinci yöntem ise değişken yoğunluklu akım ve çözeltili taşınım yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda tatlı su ile tuzlu suyun karışabilir akışkanlar olduğu, tatlı su - tuzlu su arasında geçiş zonu bulunduğu ve difüzyon ile hidrodinamik dispersiyonun bu akışkanlar üzerinde etkili olduğu kabul edilir. Deniz kıyısındaki tatlı su ile tuzlu su bölgeleri arasında akiferin kalınlığı ile kıyaslandığında nispeten ince ve keskin bir girişim yüzeyi oluşur, fakat daha sonra hidrodinamik dispersiyon etkisiyle bu iki akışkan arasında geçiş zonu meydana gelir. Geçiş zonu tuzlu su yüzünde su yoğunluğu deniz suyuna eşit iken geçiş zonu diğer yüzeyine doğru yoğunluk giderek azalır ve sonuçta tatlı su yoğunluğuna ulaşır.

2. DENİZ SUYU GİRİŞİMİNİN FİZİKSEL İFADESİ

Yağmur ve kar sularının deniz kenarında bulunan geçirimli zemin tabakasına sızması sonucunda oldukça büyük tatlı su kütlesi meydana gelir. Geçirimli zemin tabakasında bulunan bu büyük tatlı su kütlesi hem yerçekiminin etkisi ile hem de akiferin tabakalanma yönünün deniz istikametinde olması sebebiyle denize doğru hareket etmeye başlar. Tuzlu suyun tatlı sudan daha yoğun olması nedeniyle akiferin dibine çökme eğilimi vardır. İki akışkan arasında difüzyon ve dispersiyon etkileri sebebiyle karışım zonu oluşur [3]. Bu karışım zonunda, bir miktar tatlı su ile tuzlu suyun karışması ve denize doğru hareket etmesi tuzlu suyun karışım zonuna doğru akmasına neden olur (Şekil 1). Bu karışım zonu yukarısında, tatlı su, karışım zonu ile su tablası arasında oluşan pencereden denize deşarj olur [4].



Şekil 1. Tatlı su ve tuzlu su bölgeleri ile difüzyon bölgesi [3].



Şekil 2. Aşırı pompaja maruz serbest yüzeyli akifer enkesiti [5].

Deniz kenarındaki akiferde açılan kuyulardan aşırı su çekimi yapıldığında, Şekil 2’de görüldüğü üzere tatlı su miktarındaki azalmaya bağlı olarak tatlı su tablasında alçalma meydana gelir. Tatlı su ile tuzlusu arasında mevcut dengenin bozulması sonucunda yeni denge kurulana kadar girişim yüzeyi karaya doğru ilerler. Bu ilerlemeye deniz suyu girişimi adı verilir. Deniz suyu girişiminde akiferin porozite değeri, beslenme miktarı, yeraltı su seviyesi, denizin tuzluluk miktarı, kuyulardan pompalanan debi, kuyuların su çektiği derinlikler, akiferin hidrojeolojik yapısı ve kalınlığının önemli etkileri bulunmaktadır.

3. DENİZ SUYU GİRİŞİMİNİN MATEMATİKSEL İFADESİ

Yeraltısuyu sisteminde tatlı su ve tuzlu suyun hareketlerinin matematiksel ifadesi iki farklı yaklaşımla analiz edilmiştir. Bunlar, keskin girişim yüzeyi yaklaşımı ve değişken yoğunluklu çözelti taşınım modeli yaklaşımıdır.

3.1. Keskin Girişim Yüzeyi Yaklaşımı

Tatlı su ile tuzlu su karışabilir akışkanlar olmasına ve bundan dolayı hidrodinamik dispersiyon etkisiyle bu akışkanların arasında geçiş zonu oluşmasına rağmen akiferin kalınlığı ve büyüklüğü ile kıyaslandığı zaman bu geçiş zonunun kalınlığı oldukça küçüktür [5]. Bu durumda, tatlı su ile tuzlu su sistemlerinin karışmayan iki akışkandan meydana geldiği kabul edilir. Bu yaklaşım keskin girişim yüzeyi yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır ve büyük ölçekteki alansal problemlerde oldukça kullanışlı bir metottur.

Keskin girişim yüzeyi yaklaşımı girişim yüzeyinin şekli ve davranışını, tatlı su ile tuzlu su bölgeleri içerisindeki hidrolik yük dağılımını açıklar. Bazı keskin girişim yüzeyi modellerinde, tuzlu su akımı sebebiyle dinamik etkilerin ihmal edildiği ve tatlı su bölgesindeki hidrolik yüklerdeki değişimlerin tuzlu su tarafından hemen dengelendiği kabul edilir. Bu metoda Ghyben-Herzberg yaklaşımı adı verilir. Bu yaklaşımla tatlı su hidrolik yük değerlerinden girişim yüzeyinin yüksekliği elde edilebilir.

Tatlı su ve tuzlu su akışkanlarının akım probleminin matematiksel ifadesini bulmak için bu iki akışkanın keskin girişim yüzeyi ile birbirinden ayrıldığı ve suyun sıkışmadığı kabul edilirse iki bölgede hidrolik yükseklik aşağıdaki gibi tanımlanabilir [5].

$$\phi_f = z + \frac{p}{\gamma_f} \quad (\text{Tatlı su bölgesinde}), \quad \phi_s = z + \frac{p}{\gamma_s} \quad (\text{Tuzlu su bölgesinde}) \quad (1)$$

Bu denklemde ϕ_f ve ϕ_s sırasıyla tatlı su ve tuzlu su bölgelerindeki hidrolik yükleri; γ_f ve γ_s sırasıyla tatlı su ve tuzlu suyun birim hacim ağırlığını; z , referans düzlemine göre yüksekliği; p , basıncı ifade etmektedir.

Şekil 3’de R_1 ve R_2 sırası ile tatlı su ve tuzlu su için iki alt bölgeyi temsil etmektedir. Tatlı su bölgesi ile tuzlu su bölgesindeki akımların süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

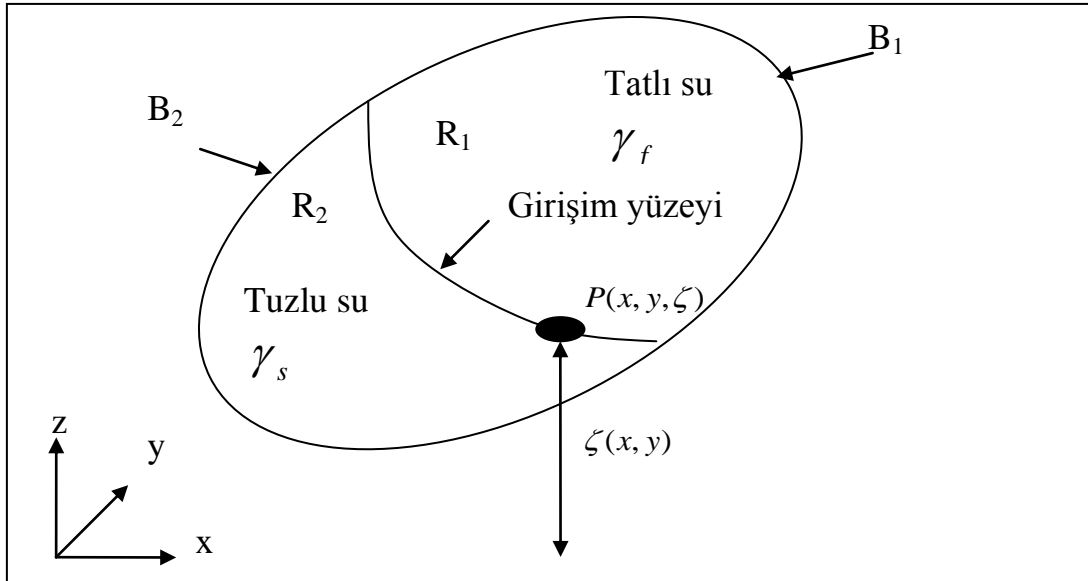
$$R_1 \text{ için } \Rightarrow \nabla(K_f \cdot \nabla \phi_f) = S_o \frac{\partial \phi_f}{\partial t}, \quad R_2 \text{ için } \Rightarrow \nabla(K_s \cdot \nabla \phi_s) = S_o \frac{\partial \phi_s}{\partial t} \quad (2)$$

Bu denklemde K_f , K_s , sırasıyla tatlı su ile tuzlu suyun hidrolik iletkenlik değerlerini; t , zamanı; S_o , özgül depo katsayısını ifade eder.

Burada;

$$K_f = \frac{k\gamma_f}{\mu_f} \text{ ve } K_s = \frac{k\gamma_s}{\mu_s} \text{ olmaktadır.} \quad (3)$$

Bu denklemde μ_f , μ_s , sırasıyla tatlı su ile tuzlu suyun dinamik viskozitelerini; k = özgül permeabilite değerini temsil eder (Bear, 1979).



Şekil 3. Tatlı su ile tuzlu su bölgeleri ve keskin girişim yüzeyinin şekli [5].

R_1 ve R_2 için aynı S_o özgül depo katsayısı kabul edilerek öncelikle R_1 içerisindeki ϕ_f ve R_2 içerisindeki ϕ_s için başlangıç koşulları belirlenmelidir.

Serbest yüzey durumunda, girişim yüzeyinin yeri problem çözülene kadar bilinemez. Girişim yüzeyinin yeri ve şekli aşağıdaki formda yazılabilir [5].

$$F(x,y,z,t)=0 \quad (4)$$

Girişim yüzeyini oluşturan noktaların yüksekliği $\zeta = \zeta(x, y, t)$, F denkleminde yerine konulursa,

$$z = \zeta(x, y, t) \text{ veya } F \equiv z - \zeta(x, y, t) = 0 \quad (5)$$

Girişim yüzeyinin üzerindeki $P(x, y, \zeta)$ noktasındaki basınç her iki taraftan yaklaşıldığı zaman aynıdır. Bu nedenle ϕ_f ve ϕ_s tanımlarından

$$\begin{aligned} \gamma_f(\phi_f - \zeta) &= \gamma_s(\phi_s - \zeta) & \text{veya} \\ \zeta(x, y, t) &= \phi_s \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_f} - \phi_f \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} = \phi_s(1 + \delta) - \phi_f \delta; \quad \delta = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \end{aligned} \quad (6)$$

olarak bulunur. Yukarıdaki denklemde δ = tatlı su birim hacim ağırlığının, tuzlu su ile tatlı su birim hacim ağırlıklarının farklarına oranıdır [5].

Öncelikle $\phi_f = \phi_f(x, y, z, t)$ ve $\phi_s = \phi_s(x, y, z, t)$ dağılımı bilinmelidir. F(x,y,z,t) için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$F \equiv z - \phi_s(1 + \delta) + \phi_f \delta = 0 \quad (7)$$

Girişim yüzeyinin sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

- F üzerinde $(q_n)_f = (q_n)_s$; her iki taraf aynı özgül deşarjı yapar.
- F üzerinde $\gamma_f(\phi_f - \zeta) = \gamma_s(\phi_s - \zeta)$; her iki tarafın basıncı aynıdır.

Girişim yüzeyi hareketsiz sabit bir yüzey olduğu için zamana göre türevi alınırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} &\equiv \frac{\partial F}{\partial t} + V_f \nabla F = 0 & ; & \quad nV_f = -K_f \nabla \phi_f \\ \frac{\partial F}{\partial t} + V_s \nabla F &= 0 & ; & \quad nV_s = -K_s \nabla \phi_s \end{aligned} \quad (8)$$

Bu denklemlerde n, poroziteyi; V_f ve V_s sırasıyla tatlı su ile tuzlu suyun ortalama hızlarını göstermektedir. Denklem (7) ve denklem (8) birleştirilerek aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$n\delta \frac{\partial \phi_f}{\partial t} - n(1 + \delta) \frac{\partial \phi_s}{\partial t} - K_f [\nabla z - (1 + \delta) \nabla \phi_s + \delta \nabla \phi_f] \nabla \phi_f = 0 \quad (9)$$

$$n\delta \frac{\partial \phi_f}{\partial t} - n(1 + \delta) \frac{\partial \phi_s}{\partial t} - K_s [\nabla z - (1 + \delta) \nabla \phi_s + \delta \nabla \phi_f] \nabla \phi_s = 0 \quad (10)$$

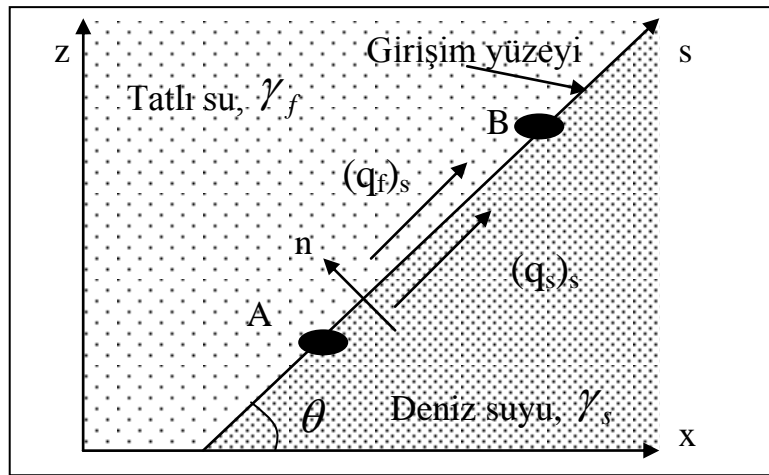
Böylece girişim yüzeyi üzerindeki sınır koşulları ϕ_f ve ϕ_s için non-linear kısmi diferansiyel denklem şeklinde belirlenir. Bu denklem bu haliyle çözülemez bu nedenle basitleştirmelere gidilmelidir.

Hareketsiz girişim yüzeyi üzerinde bulunan bir noktanın eğiminin belirlenmesi amacıyla Şekil 4'de gösterilen; düşey xz düzleminde ve içerisinde iki boyutlu akım bulunan akiferin AB uzunluğunda girişim yüzeyi gözükmemektedir. İki bölgedeki girişim yüzeyine teğet özgül deşarjın (darcy hızı) bileşenleri şu şekildedir.

$$(q_f)_s = -\frac{k\gamma_f}{\mu_f} \frac{\partial \phi_f}{\partial s} = -\frac{k}{\mu_f} \left(\frac{\partial p}{\partial s} + \gamma_f \frac{\partial z}{\partial s} \right) \quad (11)$$

$$(q_s)_s = -\frac{k\gamma_s}{\mu_s} \frac{\partial \phi_s}{\partial s} = -\frac{k}{\mu_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} + \gamma_s \frac{\partial z}{\partial s} \right) \quad (12)$$

bu denklemlerde özgül permeabilite k sabit kabul edilmiştir.



Şekil 4. Girişim yüzeyindeki dinamik denge durumu [5].

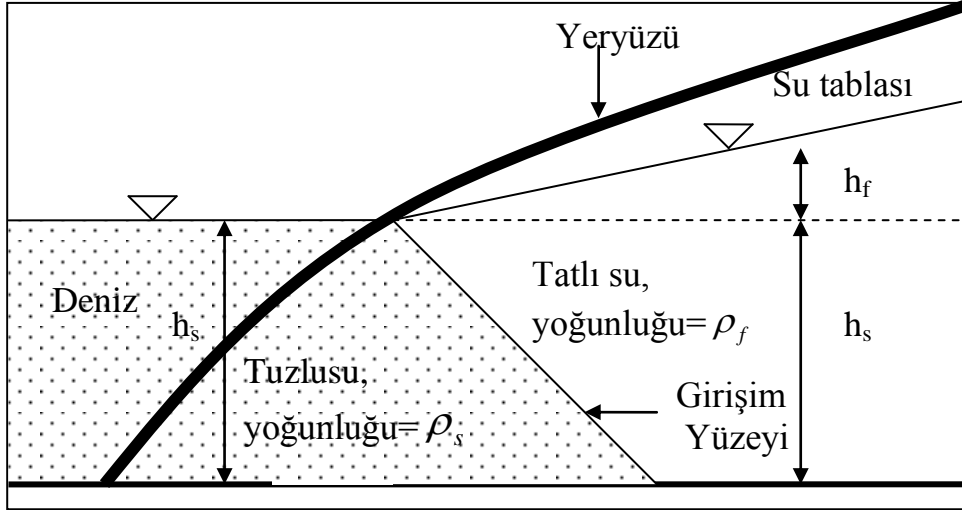
Bütün denklemlerden $\frac{\partial p}{\partial s}$ 'i yok edilirse,

$$\sin \theta = \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{(q_f)_s \mu_f - (q_s)_s \mu_s}{k(\gamma_s - \gamma_f)} \quad (13)$$

θ değeri, x eksenine ile girişim yüzeyi arasındaki açıdır. Denizin statik olduğu kabul edildiği için $q_s = 0$ değerini alır. Kıyıya yaklaştıkça q_f 'in artması, denklem 13'e göre θ açısının artmasına neden olur.

3.2. Ghyben-Herzberg Yaklaşımı

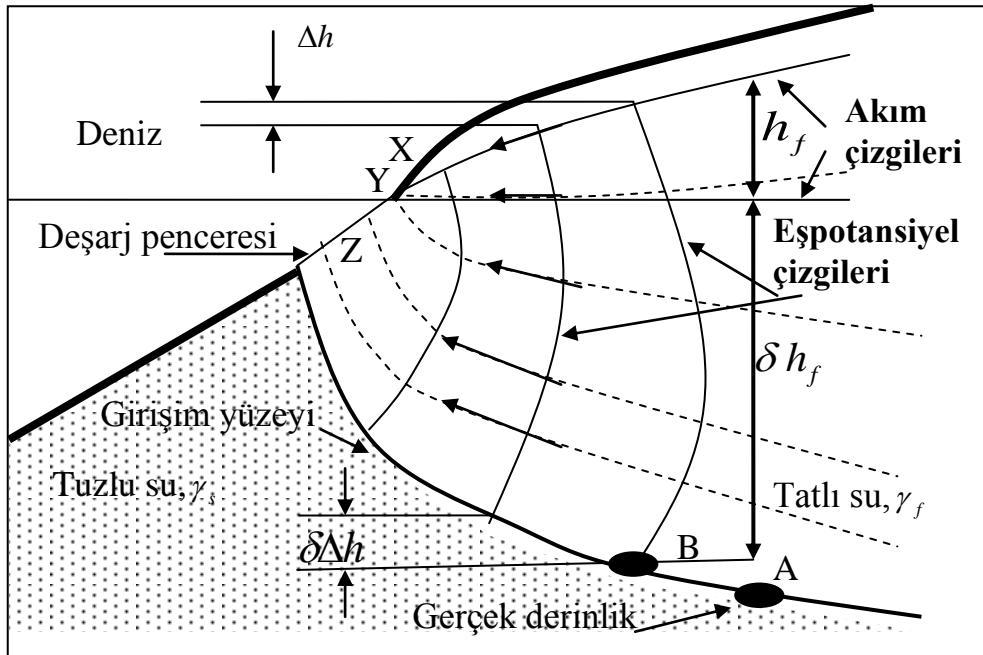
Ghyben ve Herzberg modeline göre tatlı su ile tuzlu su arasındaki girişim yüzeyinin şekli ve yeri iki akışkanın yoğunluk farkına bağlıdır. Şekil 5'de idealize edilmiş bir serbest yüzeyli kıyı akiferinin içerisindeki girişim yüzeyi gösterilmiştir. Ghyben ve Herzberg tatlı su bölgesinde bir hidrostatik basınç dağılımı ve statik denge olduğunu kabul etmiş, deniz suyunun hareketsiz olduğunu düşünmüştür. Hidrostatik denge kabulüne göre tuzlu su yüksekliği ile tatlı su yüksekliği arasındaki ilişki denklem 14'de ifade edilir:



Şekil 5. Ghyben-Herzberg girişim yüzeyi modeli [5].

$$h_s = \left[\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \right] h_f \equiv \delta h_f; \delta = \left[\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \right]; \gamma = \rho g \quad (14)$$

Denklem 14'e göre $\gamma_s = 10,05525 \text{ kN/m}^3$ ve $\gamma_f = 9,81 \text{ kN/m}^3$ değerleri yerine konulması durumunda, $\delta = 40$ ve $h_s = 40h_f$ olur. Bu eşitlikte h_f tatlı suyun piyezometrik yüksekliği, h_s deniz seviyesi altındaki girişim yüzeyinin derinliğidir. Denklem 14'e göre denizden herhangi bir mesafede, deniz seviyesi altındaki keskin girişim yüzeyinin derinliği, deniz seviyesi üzerindeki tatlı su tablası yüksekliğinin 40 katı kadardır. Başka bir ifadeyle, başlangıçta dengede olan sistemde tatlı su yüksekliği bir metre azaltılır ise sistem denge durumuna ulaşana dek girişim yüzeyi kırk metre yükselir. Deniz kıyısına yaklaştıkça yatay akımlar ihmal edilemeyeceği için aslında bu kabul geçersizdir. Şekil 5'de tatlı sudan denize akım geçişi yoktur. Hâlbuki gerçek durum Şekil 6'da görülen gerçek akım koşullarıdır.



Şekil 6. Deniz kenarındaki akımın ve girişim yüzeyinin gerçek şekli [5].

Şekil 6'da kıyı şeridinde, Y noktasında tatlı su yüksekliği sıfırdır. Denklem 14'e göre tatlı su yüksekliği sıfır olduğu için tuzlu su derinliğide sıfır olmalıdır. Bununla birlikte akiferin YZ deşarj penceresinden denize tatlı su çıkışı olmaktadır. Bu durum Ghyben-Herzberg yaklaşımının gerçeği tam olarak yansıtmadığını göstermektedir. A noktası girişim yüzeyi üzerindeki bir noktayı göstermektedir. B noktası ise $\theta_f = h_f$ eşitliğinin sağlandığı tatlı su eş potansiyeli ile girişim yüzeyinin kesim noktası üzerindeki bir noktadır. B noktası δh_f kadar derinliktedir ve bu derinlik h_f 'e karşılık gelen girişim yüzeyi için Ghyben Herzberg tarafından tahmin edilen derinliktir. Gerçek derinlik ise A noktasının derinliğidir.

Eğer Denklem 6'daki $\phi_s = 0$ sabit kabul edilirse (deniz suyu hareketsizdir), Denklem 14'deki Ghyben Herzberg yaklaşımı ile Denklem 6'daki kesin çözüm arasındaki h_f ve ϕ_f arasındaki farktan kaynaklanan uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Ghyben-Herzberg metodu ile hesaplanan derinlik gerçek derinlikten daha az olmaktadır.

3.3. Değişken Yoğunluklu Akım ve Çözünmüş Madde Taşınım Yaklaşımı

İki farklı akışkanın bulunduğu akifer içerisinde genellikle sonlu kalınlığa sahip bir dispersiyon zonu oluşur. Bu tip akiferin yönetim çalışmalarında bu dispersiyon zonunun yerinin ve kalınlığının bilinmesi önem arz etmektedir [6]. Bazı durumlarda tuzlu su hareketi iki parçalı diferansiyel denklem biçiminde formüle edilebilir. İlk denklem değişken yoğunluklu akışkanların (tatlı su ve tuzlu suların karışımı gibi) akımını açıklar iken, ikinci denklem çözünmüş madde taşınımını ifade eder.

Üç boyutlu akım denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \Omega c e_j \right] \right] = S \frac{\partial \phi}{\partial t} + n \Omega \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho}{\rho_f} Q \quad (15)$$

Burada; $i, j, k = 1, 2, 3$ sayılarını ifade eden indislerdir, K_{ij} hidrolik iletkenlik tensörünü; ϕ tatlı su hidrolik yükünü; x_j kartezyen koordinatlarını; Ω yoğunluk eşlenme katsayısını; c çözelti konsantrasyonunu; e_j yerçekimi kuvvetinin birim vektör bileşenini; S özgül depolama katsayısını; t zamanı; n poroziteyi; Q akiferin birim hacmine giren veya çıkan (beslenim veya kuyu çekimi) debi değerini; ρ, ρ_f sırasıyla karışık (tatlı su ve tuzlu su) akışkanın yoğunlunu ve tatlı su yoğunluğunu göstermektedir.

Tatlı suyun konsantrasyonu referans yoğunlukta sıfır olarak kabul edilir. Koordinat eksen takımlarında X_1 x eksenini, X_2 y eksenini, X_3 z eksenini belirtmektedir. X_2 koordinat ekseninin düşey doğrultuda yukarı yönlü olduğu kabul edilirse, yerçekimi birim vektör e_1 ve e_3 sıfır değerini, e_2 ise bir değerini alır. Yoğunluk eşlenme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$\Omega = \frac{\varepsilon}{c_s} \quad (16)$$

ε yoğunluk farklarının oranı da aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (17)$$

Burada; c_s maksimum yoğunluğa (ρ_s) karşılık gelen çözünmüş madde konsantrasyonunu göstermektedir.

Karışan akışkanların yoğunluğu, ρ , Denklem 18'de gösterildiği gibi konsantrasyonun bir doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$\rho = \rho_f \left[1 + \varepsilon \frac{c}{c_s} \right] \quad (18)$$

Kıyı akiferlerinde dispersif tuzlu su hareketini açıklayan advektif dispersif çözelti taşınımı Denklem 19'daki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] - q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = n \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*) \quad (19)$$

Burada; D_{ij} hidrodinamik dispersiyon (yayılm) tensörünü; q_i darcy hızını; c^* sisteme katılan veya sistemden çıkan akışkanın çözelti konsantrasyonunu ifade eder. Darcy hızı Denklem 20'den hesaplanabilir.

$$q_i = -K_{fij} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \Omega c e_j \right] \quad (20)$$

Burada; K_{fij} , referans akışkanın (tatlı su) hidrolik iletkenlik değerini ifade etmektedir.

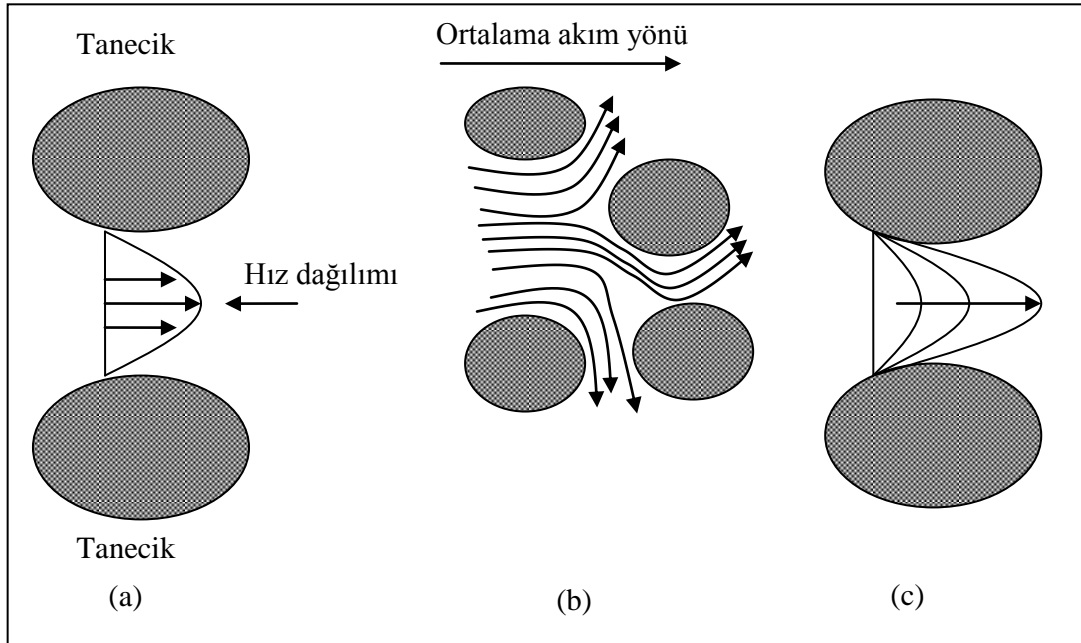
“Taşınım mekanizmasının bileşenlerini; adveksiyon (ilerleme), dispersiyon (difüzyon dâhil olmak üzere) ve kimyasal reaksiyonlar olduğunu ifade etmiştir. Çözelti ile akifer yapısı arasındaki kimyasal reaksiyonlar, akifer ile çözelti arasında tepkime olmaması durumunda ihmal edilebileceğini belirtmiştir” [7].

Denklem 19'un sol tarafındaki ilk terim dispersiyon (yayılm) nedeniyle konsantrasyondaki değişimi ifade eder. Denklem 19'un sol tarafındaki ikinci terim ise adveksiyon (yayılm) taşınım etkisini ifade eder. Adveksiyon, hidrolik yük farkı sonucunda oluşan hareketi tanımlamaktadır. Dispersiyon yoğunluğa bağlı tuzlu su akımını ifade eder. [2], dispersiyonu, bir birinden bağımsız boşluklardaki mikroskobik hız değişimleri ile moleküler difüzyonun sebep olduğu dağılım ve karışım olarak tanımlamıştır. Birçok arazi probleminde, akifer içerisindeki büyük ölçekteki heterojenlik nedeniyle dispersiyon ile kıyaslandığında bu etkiler ihmal edilebilir (Şekil 7). Adveksiyon etkisi zayıf olduğu zaman, moleküler difüzyona nazaran mekanik dispersiyon ihmal edilebilir. Moleküler difüzyon düşük hızlara sahip sistemlerde önem arz eder. Advektif–dispersif yaklaşımda, dispersiyon iki farklı yol kullanılarak ele alınabilir. Bunlar sabit dispersiyon katsayısı yaklaşımı ile hıza bağlı dispersiyon katsayısı yaklaşımıdır

Sabit dispersiyon katsayısı yaklaşımı dispersiyon tensörünün D hızdan bağımsız olduğunu ve dispersiyonun Denklem 19'da sabit olarak alınması gerektiğini kabul eder [8]. Hıza bağlı dispersiyon yaklaşımında, dispersiyon katsayısı yeraltısuyu hızı ve akiferin yapısı ile ilişkilidir. Scheidegger'in denkleminde göre

$$D_{ij} = d_{ijmn} \frac{q_m q_n}{|v|} \quad (21)$$

Burada; d_{ijmn} akiferin dispersiyon sabitini; q_m ve q_n , m ve n doğrultusundaki hız bileşenlerini; v hız büyüklüğü ifade eder [6].



Şekil 7. Mekanik dispersiyon etkisiyle yayılma (a,b) ve moleküler difüzyon (c) [6].

İzotropik akifer için, dispersivite tensörü, boyuna (α_L) ve enine (α_T) dispersivite olarak iki sabit şeklinde tanımlanabilir. Bu iki dispersivite, boyuna d_L ve enine d_T dispersiyon katsayıları ile ilişkilidir. Dispersiyon katsayıları Denklem 22'de ve Denklem 23'de verilmiştir.

$$d_L = \alpha_L v \quad (22)$$

$$d_T = \alpha_T v \quad (23)$$

Boyuna ve enine dispersiyon katsayıları doğrusaldır. Boyuna dispersiyon katsayısı terimi, d_L , akışkanın lokal akım yönü boyunca ileri veya geri doğrultuda yayılmasına neden olur. Enine dispersiyon terimi d_T , akışkanın lokal akım doğrultusuna dik yönde yayılmasına sebep olur. İzotrop akifer içerisindeki iki boyutlu akım için dispersiyon katsayılarının bileşenlerini [7] aşağıdaki gibi açıklamıştır;

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$D_{xx} = \frac{1}{v^2} [d_L q_x^2 + d_T q_y^2] \quad (25)$$

$$D_{yy} = \frac{1}{v^2} [d_T q_x^2 + d_L q_y^2] \quad (26)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{1}{v^2} [d_L - d_T] q_x q_y \quad (27)$$

Sabit dispersiyon katsayı çözümü ile hıza bağlı dispersiyon katsayı çözümü kıyaslandığında, başlangıçta hızlar yüksek olduğu zaman iki çözüm birbirine benzer sonuçlar verirken, tuzlu su yoğunluğu arttıkça, hıza bağlı dispersiyon katsayısı daha doğru sonuç verir. Denklem 15 ve Denklem 19, eşitliklerin ϕ , q ve c genel değerlerine göre birleştirilebilir. Akifer içerisindeki tuz dağılımını elde etmek için akım denklemi ile dispersiyon denklemini belirli bir değere yakınsayınca kadar iterasyon metoduyla hesaplamak gerekir. Dispersif taşınım simülasyonlarında karşılaşılan en önemli problem dispersivite değerlerinin tam olarak belirlenememesidir. Dispersivite ölçümündeki zorluklar ile onun fiziksel tanımlamalarındaki belirsizlikler, hem boyuna hem de enine dispersivite modelin kalibrasyonu boyunca bilinmeyen parametre olarak ele alınmalarına sebep olur. Literatürde, dispersivite değişimlerinin büyüklüğü simülasyonu gerçekleştirilmiş alanların büyüklüğüne bağlıdır. Genellikle, enine dispersivite değeri boyuna dispersivite değerinin 1/10 ile 3/10 arasında değer alır [9].

4. SONUÇLAR

Su hayatın başlangıcından itibaren canlıların yaşaması için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Eski çağlardan beri kıyı bölgeleri; bereketli topraklara sahip olması, tarım ve hayvancılığın yapılması, deniz yolunun kullanılması ile ülkeler arasındaki ticari ve ekonomik faaliyetlerin yoğun olarak yürütülmesi nedenlerinden dolayı cazibe merkezleri haline gelmiştir. Dünya nüfusunun yaklaşık %16'sının günümüzde temiz su bulma sıkıntısı çektiğini belirtmekte, eğer ciddi önlemler alınmaz ise 2025 yılında dünya nüfusunun % 40'ının temiz su bulma sıkıntısı çekeceğini tahmin edilmektedir. Nüfus yoğunluğundaki artış, tarımdaki gelişmeler ve ekonomik faaliyetlere bağlı olarak bu alanlarda içme-kullanma ve tarım amaçlı kullanımlar için yeraltısuyu kıtlığı gibi sorunların önemi anlaşılmıştır.

Bu çalışmada deniz suyu girişiminin mekanizması incelenmiş, tatlı su ile tuzlu suyun davranışı belirlenmiş ve formüle edilmiştir. Deniz suyu girişim probleminin çözümünde kullanılan keskin girişim yüzeyi yaklaşımı incelenmiştir. Bu yaklaşım, girişim yüzeyinin kalınlığının tuzlusu akiferine oranla oldukça küçük olduğu deneysel olarak tespit edilebilen bölgelerde nispeten doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Hesaplamalar karmaşık değildir ve bilgisayara ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yaklaşım hesaplamalarda ve kabullerde bazı kolaylıklar sağlaması nedeniyle avantajlara sahip olsa da yapılan kabul de çıkış penceresi olmaması, tatlı su ile tuzlu suyun dinamik etkileri ve dispersiyon özelliklerini göz ardı etmesi nedeniyle çözümde doğru sonuçlar vermeyebilmektedir.

İncelenen ikinci yöntem ise değişken yoğunluklu akım ve çözelti taşınım yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda tatlı su ile tuzlu suyun karışabilir akışkanlar olduğu, tatlı su - tuzlu su arasında geçiş zonu bulunduğu ve difüzyon ile hidrodinamik dispersiyonun bu akışkanlar üzerinde etkili olduğu kabul edilir. Bu yaklaşımın çözümü zor ve zahmetli olduğu için bilgisayar gerekmektedir. Akifer çok tabakalı ve geniş bölgeye yayılıyorsa bilgisayar hesaplamaları saatlerce sürebilmektedir. Bilgisayar simülasyon sonuçları gerçeğe oldukça yakındır.

Bu çalışmada elde edilen denklemler, tuzlusu girişimi simülasyonu yapan bilgisayar programlarının kullandığı temel denklemlerdir. Tuzlusu girişimi mekanizmasının anlaşılması için araştırmacının bu denklemlere hakim olması gerekmektedir. Bilgisayar sonuçlarını irdelerken bu denklemler araştırmacıya yol gösterir. Bilgisayara girilen verilerin ve sonuçların incelenmesinde denklemlerin bilinmesi kullanıcıyı olası hesap hatalarından kaçınmasını sağlar.

5. KAYNAKLAR

1. Shiklomanov, I. A. & Sokolov, A. A. 1983. Methodological basis of world water balance investigation and computation. In: New Approaches in Water Balance Computations. IAHS Publ. no. 148, 77-90.
2. Anderson, M.P., 1976. Unsteady Groundwater Flow Beneath Strip Oceanic Islands, Water Resources Research. 12 (4), 640–644.
3. Cooper, H.H. Jr., 1959. A Hypothesis Concerning the Dynamic Balance of Fresh Water and Salt Water in a Coastal Aquifer. Journal of Geophysics Research, 64 (4), 461-467.
4. Hubbert, M.K., 1940. The Theory of Groundwater Motion. Journal of Geology, 48, 785-944.
5. Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater. New York, McGraw-Hill, 569 p. USA.
6. Emekli, N., 1993. Numerical Simulation of Saltwater Intrusion in Erzin Groundwater Basin Hatay Turkey. Middle East Technical University, PhD Thesis, 166p, Ankara.
7. Konikow, L. F., 1977. Modelling Chloride Movement in the Alluvial Aquifer at the Rocky Mountain Arsenal Colorado. Geological Survey Water-Supply Paper, No 2044.
8. Reilly, T. E., Goodman, A.S., 1987. Analysis of Saltwater Upconing beneath a Pumping Well. Journal of Hydrology, 89, 169–204.
9. Kilit M. 2010 “Kıyı Akiferlerinde Tuzlu Su Girişiminin Modellenmesi ve Yeraltısuyu Kullanımı Optimizasyonuna Yönelik Muhtemel Senaryolar: Tunus Cote Orientale Akiferi Uygulaması” Süleyman Demirel Üniversitesi, Doktora Tezi, Sayfa 153, Isparta.