

Doğrusal olmayan yeraltı suyu akım hızının dinamik iletkenlik değişimi ile tanımlanması

Abdüsselam ALTUNKAYNAK*, Zekai ŞEN

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yeraltı suyu akım hızı (özgül debi), dinamik iletkenlik parametresinin de düşünülmesi ile klasik Darcy Kanunu'nun yeni bir seçeneği olarak tanımlanmıştır. Yeraltı suyu akım hızı, doğrusal olmayan dinamik iletkenlik parametresinin mesafe ile değişimi olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, hidrolik iletkenliğin ve hidrolik eğimin aynı anda değişimleri durumunda yeraltı suyu akım hızının hesaplanmasına imkan tanımaktadır. Başlangıçtaki yeraltı suyu hareketinin hidrolik eğimin belirli bir eşik değerini aşması durumunda oluştuğu matematiksel olarak ispat edilmiştir. Hidrolik eğim sıfırdan farklı olsa bile yeraltı suyu hareketi oluşmayabilir. Yeraltı suyu hareketinin olabilmesi için hidrolik eğimin, eşik değerinden küçük olmaması gerekir.

Anahtar Kelimeler: *Basınçlı akifer, dinamik iletkenlik, doğrusal olmayan akım, eşik hızı.*

Non-linear groundwater flow velocity definition as dynamic transmissivity change

Abstract

Groundwater flow velocity (specific discharge) is defined as a new version of conventional Darcy law by considering dynamic transmissivity concept which is equivalent to the multiplication of piezometric head and hydraulic conductivity. Hence, the groundwater velocity is expressed as a non-linear spatial variation of the dynamic conductivity whereas the conventional Darcy law velocity is a linear function of spatial piezometric variation only with a constant hydraulic conductivity factor. Although, in the conventional calculations, it is possible to take into consideration the spatial hydraulic conductivity changes by finite zonations of conductivity, but still the main cause of groundwater velocity is due to the piezometric head changes. The new definition gives a convenient expression for the simultaneous changes of the hydraulic conductivity and piezometric level in groundwater flow velocity calculations. On the other hand, it is mathematically confirmed that initial groundwater movement takes place only after the exceedence of a certain piezometric gradient threshold value. This is tantamount to saying that even the hydraulic gradient is not equal to zero there may not be groundwater movement which is an absurd conclusion with the conventional definition of groundwater velocity by the Darcy law. The new definition takes into consideration various non-linear flow possibilities in the groundwater studies.

Keywords: *Dynamic transmissivity, confined aquifer, non-linear flow, threshold velocity.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Abdüsselam ALTUNKAYNAK. altunkay@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 46.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Doğrusal olmayan yeraltı suyu akımlarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 09.02.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.03.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Su, evrende sonu olmayan bir şekilde ve farklı yollar izleyerek hidrolojik çevrimi oluşturmak suretiyle hareket eder. Bu noktayı akılda tutarak aşağıdaki soruları sormak önem arz edecektir. Bunlar:

- Hareket eden su, enerjisini nereden alır?
- Hidrolojik döngünün farklı safhalarında oluşan enerji türleri nelerdir?
- Her bir safhadaki baskın enerji türü nedir?
- Döngü boyunca suyun etkisi nelerdir?
- Yeraltı suyunun hareketinde hangi tür enerji rol oynar?
- Jeolojik formasyonlar, topografik ve jeomorfolojik faktörler yeraltı suyu hareketine ne gibi bir etki yapar?
- Enerji, akım ve ortam özelliklerini nasıl ilişkilendirir ve kanunları nelerdir?

Bu sorulara pratik açıklayıcı ve fiziksel anlamda cevap verebilmek için yeraltı suyu hareketinin fiziğini iyi bir şekilde anlamak gerekmektedir. Genel olarak hidrolik eğim, akarsulara yakın yerler ile yoğun pompaja maruz kalan bölgelere yakın yerlerde yüksek çıkmaktadır. Yeraltı suyunun kullanıldığı bölgelerde, vadi tabanında ve geniş ovalarda hidrolik eğim düşüktür (Şen, 1995). Formasyon boyunca piyezometrik seviyenin devamlı olarak azalması (veya artması) halinde bir kum taşı formasyonunda yeraltı suyu hareketi mümkün olur. Bu ise yüzey topografyasının yüksek bölgelerindeki yeraltı suyu beslemesi seviyesinin vadiye göre artmasına neden olacaktır. Bu yüzden akımın yönü piyezometrik seviyenin yüksek olduğu bölgeden, düşük olduğu bölgelere doğrudur. Piyezometrik seviye ile ilgili bir başka soru da jeolojik yapıların piyezometrik yüzeyi etkileyip etkilemediğidir. Eğer jeolojik yapı faylar, çatlaklar, eklemler ve erimiş boşluklardan dolayı süresiz veya yüzeye ait değişikliklerle sürekli ise bunların piyezometrik yüzeye doğrudan etkilerinden bahsetmek mümkün olur. Süresizlik noktalarında hidrolik eğimin değeri teorik olarak çok büyüktür.

Son olarak hidrolik eğimin tanımının sadece onun konumsal değişimine değil aynı zamanda ortamın malzeme yapısına da bağlı olduğunu

hatırlatmak gerekir. Başka bir ifadeyle, yeraltı suyu hızı sadece hidrolik eğimin değil aynı zamanda hidrolik iletkenlik katsayısının önemli bir faktörü olan ortamın malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur. Aynı şekilde hidrolik iletkenliğin değişiminden dolayı piyezometrik seviyede de değişiklikler meydana geleceği söylenebilir. Yani hidrolik iletkenlik gradyanlarını tanımlamak da mümkün olabilir.

Bu makalenin amacı, yeraltı suyu hızını akiferin hidrolik iletkenlik ve piyezometrik seviye değişimleri ile ilişkilendirerek Darcy Kanunu'nun dinamik şeklini sunmaktır. Akiferin herhangi bir noktasındaki hidrolik iletkenliğin piyezometrik seviye ile çarpımı hidrolik iletkenlik olarak tanımlanmıştır. Bu makalede yeraltı suyu hızı bir çok anlamlı doğrusal olmayan ve başlangıç eşik şartlarına neden olan dinamik iletkenlik değişimi ile ilişkilendirilmiştir.

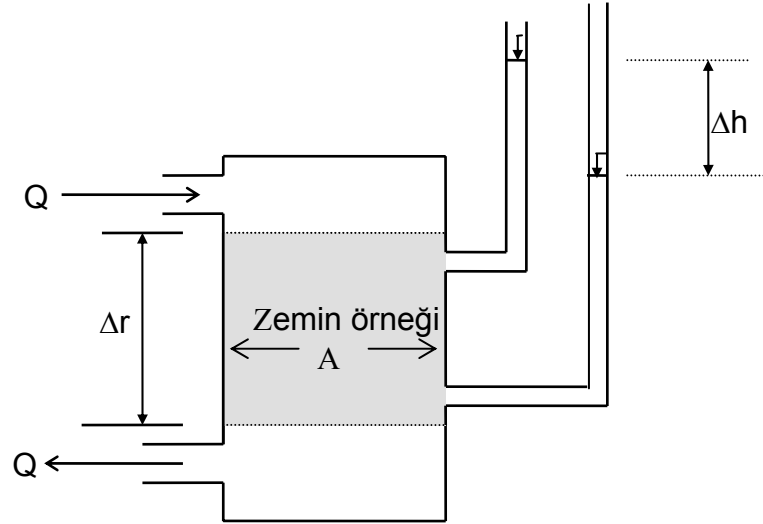
Darcy'nin doğrusal akım kanunu

Darcy (1856) doygun ortamlardaki yeraltı suyu hızını ve akışını incelemek için Şekil 1'de gösterilen deney düzeneğini kurmuştur. Darcy, akifer malzemesinin homojen ve izotrop olduğunu kabul ederek akış doğrultusunda geçen toplam yeraltı suyu debisinin, iki kesit arasındaki hidrolik eğimle doğru orantılı olduğunu deneysel olarak tespit edebilmiş ve yapılan deneysel çalışmalar sonrasında aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k \frac{dh}{dr} \quad (1)$$

Burada Q, hacim olarak A alanına sahip kesite dik geçen suyun debisini, k hidrolik iletkenlik olarak bilinen orantılılık katsayısını, $\frac{dh}{dr}$ ise hidrolik eğimi göstermektedir. Debinin kesit alanına oranı, özgül debiyi ifade eder. Özgül debi hız boyutunda olup, birim alandan geçen debi olarak da tanımlanabilir. Darcy deneyinin amacı hidrolik iletkenlik katsayısının değerini tespit etmektir.

Darcy Kanunu'nun en önemli özelliği yeraltı suyu hızı ile hidrolik eğim arasında doğrusal bir



Şekil 1. Darcy cihazı kısımları

ilişki kurmasıdır. Bu kanun, yeraltı suyu hareketi hesaplamalarında ve öngörülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir yeraltı kuyusunun hemen civarında hidrolik eğim çok büyük olduğundan akım laminer değil türbülanslı haldedir. Aynı durum, akifere kısmen giren kuyulara doğru olan düşey akımın tesiri ile de ortaya çıkar.

Darcy Kanunu'nun geçerlilik koşulları

Darcy Kanunu'na göre pratikte karşılaşılan küçük hızlar için kinetik enerjinin bir önemi yoktur. Kuyu civarında ise yüksek hızların ortaya çıkacağı açıktır. Ortam iri danelerden, çatlaklardan veya karstik boşluklardan meydana geliyorsa yeraltı suyu akım hızı ince daneli ortamlara göre daha kolay tespit edilebilir. Permanan olmayan akımın önemli değişkenleri olan zaman ve sıvı yoğunluğu için açık ifadelerin yokluğu, Darcy Kanunu'nun bir eksikliğidir. Gözenekli ortamda laminer permanan akım için Darcy Kanunu'nun yetersiz olduğu, Laushey ve Popat (1980) tarafından gösterilmiştir.

Atalet kuvvetleri önemli hale geldikçe ve hız farkı oluştuğunda ortaya çıkan hız değeri, Darcy Kanunu ile tahmin edilen değerden farklı çıkmaktadır (Dudgeon ve Yuen 1970). İnce danelerin bulunduğu yerde, yüksek hızlar oyulmalara sebep olmakta, yük kayıpları yükselmekte hızla-

rın artması da türbülansın gelişmesini hızlandırmaktadır. Değişik kaynaklardan elde edilen deneysel verilere göre, Darcy doğrusal kanununun alt ve üst sınırlarının uyuşmadığı görülmektedir (Dudgeon 1964, Kutilek 1969, Slepicka 1961, Swartzendruber 1969, Wilkinson 1956). Diğer taraftan, Basak (1978) bu konuda araştırmacıların çalışmalarını birleştirmek suretiyle, beş bölgenin varlığını belirtmektedir (Şekil 2).

1. **Akımsız bölge:** Yeraltı suyu hareketi ancak belli bir eşik değeri aşıldıktan sonra gerçekleşmektedir. Başka bir deyişle, belirgin bir yeraltı suyu hareketinin başlaması için iki nokta arasındaki hidrolik yük farkı yüzey kuvvetlerini aşacak kadar büyük olmalıdır. Ortam ne kadar ince daneli ise eşik değeri o kadar fazla oluşmaktadır.
2. **Doğrusallık öncesi Darcy tipi olmayan laminer bölge:** Swartzendruber (1969), kil zerrecikleri üzerinde güçlü negatif değişimlerden dolayı katı-sıvı etkileşiminden kaynaklanan yüzey kuvvetleri ve türbülanslı akım bölgesinde doğrusal yani Darcy tipi olmayan akıma sebep olan su moleküllerinin kutupsallık özelliklerine dikkat çekmiştir.
3. **Darcy tipi laminer akım:** Hemen hemen bütün doğal gözenekli ve ince çatlaklı ortamlar bu tür akım için uygundur.

Atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlerinin yanında çok küçükse ve ihmal edilebilirse Darcy Kanunu güvenli bir şekilde kullanılabilir.

4. **Doğrusallık sonrası Darcy tipi olmayan laminar bölge:** Atalet kuvvetlerinde meydana gelen dereceli artışların, doğrusal akımda sapmalar oluşturmamasından dolayı doğrusal akımdan türbülanslı akıma geçiş esnasında ortaya çıkan bölgedir.
5. **Türbülanslı bölge:** Burada türbülanslı akım meydana gelir. Enerjinin bir kısmı atalet kuvvetlerini aşmada kullanılır. Diğer bölgelere nazaran eğimi daha azdır.

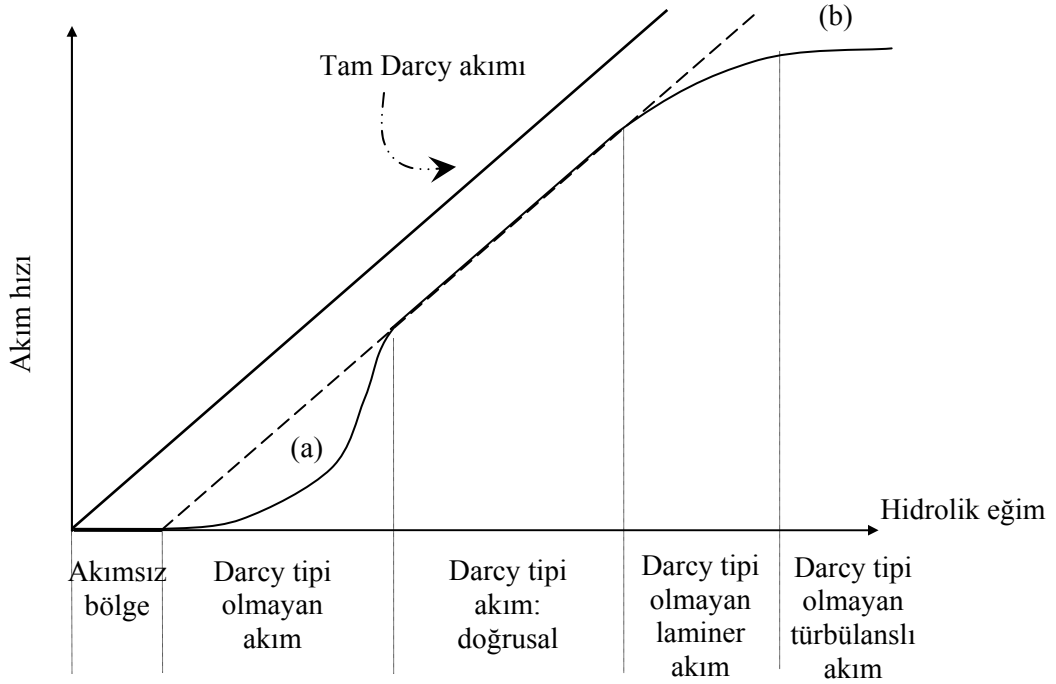
İhtimali, hız-hidrolik eğim ilişkisinin doğrusal olma özelliğini değiştirir. Genelde, küçük çaplı kuyuların yakınlarında hidrolik iletkenliğin artmasına ek olarak, hidrolik eğimin de artmasından dolayı hızlı bir toplanma olur. Bu, Darcy Kanunu'ndan sapmaları göstermektedir. Radyal toplanmadan dolayı kuyuya doğru kesitsel alan azalır ama özgül debi artar. Hidrolik eğim, Darcy Kanunu'nun tahmin ettiğinden daha yüksek bir değere ulaşır. Bu kuyunun yakınlarında akiferin belli bir kısmında doğrusal olmayan akımlar oluşabilir (Şen, 1988). Kritik kuyu yarıçapı, ana kuyunun merkezi ile, Darcy Kanunu'ndan ilk olarak sapmaların başladığı akiferdeki ortak merkezli daire üzerinde bulunan kritik nokta arasındaki radyal mesafe olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, kritik çap ile çevrelenmiş akifer alanında sadece doğrusal olmayan akım etkindir.

Doğrusal olmayan yeraltı suyu akımı kanunları

Darcy Kanunu'na göre düşünülen yeraltı suyu akımları önemli bir atalet etkisine sahip değildir. Bunun sonucu olarak da, hız-hidrolik eğim ilişkisinde yakınsaklık, ıraksaklık ve kıvrımlı akış yolları herhangi bir karmaşıklığa sebep olmaz. Bununla birlikte kuyu çevresinde atalet etkilerinin artması ve türbülanslı akım ortaya çıkması

Akım ve akifer özelliklerine ait veriler verildiğinde kritik yarıçapın tahmini, sabit pompaj debisi Q ile kritik yarıçaptaki r_c , akifer debisinin eşitlenmesi ile elde edilebilir. Permanan durum göz önüne alındığında,

$$Q = 2\pi r_c m q_c \quad (2)$$



Şekil 2. Darcy tipi doğrusal akımların geçerlilik bölgesi (Basak, 1978)

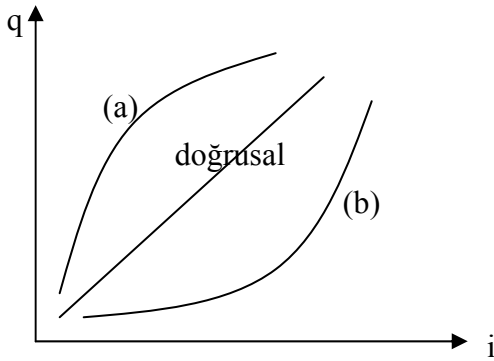
olur. Burada m akifer kalınlığını ve q_c de kritik özgül debiyi göstermektedir. Özgül debi akiferde, hidrolik iletkenliğin fonksiyonu olan yeraltı suyu hızına bağlıdır.

Yeraltı suyu akımında $\left(Re = \frac{q \cdot d}{\nu}\right)$ Reynolds sayısını da hesaba katarak aşağıdaki ifade elde edilebilir (Albertson vd., 1960):

$$r_c = \frac{\left(\frac{Q}{m}\right) d}{2\pi \nu (Re)_c} \quad (3)$$

Burada $(Re)_c$ kritik Reynolds sayısı, (Q/m) oranı akiferin özgül debisi ve ν de suyun kinematik viskozitesi olarak tanımlanır. Bir akiferde dane çapı d ve akiferin kalınlığı m sabit terimlerdir. Buradan, debinin doğrudan hidrolik iletkenliğin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir. Kuyu etrafında hidrolik iletkenliğin değişmesi kritik çapı da artırabilir.

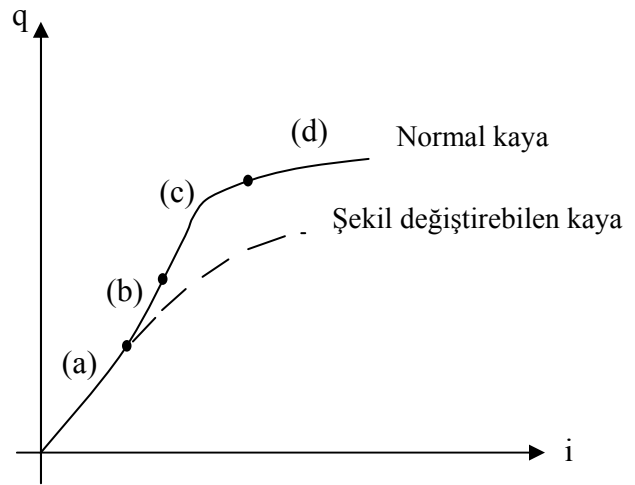
Daha önce de bahsedildiği gibi, Darcy Kanunu yeraltı suyu akım problemlerinin tümüne uygulanamaz. Ya türbülanslı akıma yol açan akım özelliklerinden, ya da çatlaklı ve karstik boşluklu ortamlar gibi akiferi oluşturan malzemeden dolayı doğrusal akımdan sapmalar meydana gelir. Düşük özgül debilerde doğrusal kanun geçerli olduğu halde özellikle yüksek hızlarda, doğrusal ilişkiden büyük sapmalar gözlenir. Bu sapmalar, Şekil 3'te gösterildiği gibi (a) ve (b) eğrileri tarzında olabilir.



Şekil 3. Gözenekli ortamda beklenen doğrusal ve doğrusal olmayan piyezometrik eğim-özgül debi ilişkisi

Darcy de (1856) deneysel çalışmalarının bir çoğunda, özgül debi ile hidrolik eğim arasında doğrusal bir ilişki olmadığını gözlemlemiştir. Ortalama zamanda, yaklaşık olarak 0.1 m/s'lik bir değere sahip özgül debi cinsinden bir üst limitin olduğu kanısına varmıştır. Hidrolik parametrelerdeki herhangi bir artış, akiferin bütününde doğrusal olmayan bir akıma sebep olacaktır. Örneğin, iri daneli, gözenekli ve çatlaklı ortamda yüksek hidrolik iletkenlikten dolayı yeraltı suyu hızı türbülanslı olabilir (Givan, 1934; Engelund, 1953 ve Basak 1977). Çatlaklı ortamda özgül debi ile hidrolik iletkenlik arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin olduğu Louis (1969), Snow (1968) ve Maini (1971) tarafından belirtilmektedir. Bu doğrusal olmama durumu, kinetik enerji etkileri, doğrusal olmayan basınçlı akım kanunları, sızdırmalar ve çatlakların artması gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Louis ve Maini (1970) hidrolik eğim ile debi arasındaki ilişkiyi Şekil 4'teki gibi bulmuştur. Bu ilişki normal kaya için 4 farklı bölümden meydana gelmektedir. Bunlar;

- Darcy Kanunu'nun geçerli olduğu yer laminer akım bölgesidir,
- Türbülans etkisinin görüldüğü bölge,
- Kılcal çatlakların genişlemesi ile türbülansın dengelendiği bölge,
- Kılcal çatlakların tam anlamıyla genişlemesi durumunda son üç bölgede doğrusal olmayan akım kanunları geçerlidir.



Şekil 4. Çatlaklı ortamda doğrusal olmayan kanunlar

Darcy Kanunu'nun geçerlilik sınırını saptamak için hem deneysel hem de teorik bir çok çalışma yapılmıştır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

- Darcy Kanunu'nun geçerli olmadığı üst limitlerin ortaya çıkmasından sonra başlangıç terimlerinin önemli hale geldiği zamanlarda Navier-Stokes denklemlerinin kullanımı uygundur,
- Türbülans başlangıcı ile doğrusal akımların geçerli olmadığı durumlarının görülmesi, kılcal tüplerde yapılan analogi ile gösterilmiştir,
- Slepicka (1961) tarafından yapılan boyutsuzluk analizleri ile doğrusal akımın geçerliliği reddedilmektedir,
- İstatistiksel modellerin uygulanması ile gözenekli ortamdaki su akımı gelişigüzel yürüme (random walk) yaklaşımı ile modellenilebilir. Basitleştirilmiş yöntem, Darcy Kanunu'na denk olan doğrusal ifadenin türetilmesine izin vermiştir. Aksi takdirde Darcy akımından sapmalar gözlenmiştir (Scheidegger, 1954).

Hidrolik iletkenlik değişimli akım

Önceki kısımda açıklanan ifadelerle benzer olarak, yeraltı suyu akım denklemleri olan akiferin hidrolik iletkenliğinin de konumla değiştiği kabulü ile Denklem (1)'deki Darcy Kanunu'nun

$$V = \frac{d(kh)}{dr} \quad (4)$$

şeklinde yazılmasına imkan verir. Burada k , hidrolik iletkenlik mesafe ile değiştiğinden diferansiyelin içine alınmıştır. Parantez içindeki ifade dinamik iletkenlik sayısı olarak tanımlanır. Buna göre yeraltı suyu akım hızı genel halde dinamik iletkenlik katsayısının mesafe ile değişimi olarak tanımlanır. Bu yeni hız formülasyonu ile akiferde hidrolik iletkenliğin ve piyezometre seviyesinin mesafe ile değişimleri göz önüne alınabilir. Böyle bir tanım klasik doğrusal Darcy Kanunu'nu doğrusal olmayan yeraltı suyu kanununa dönüştürür. Denklem 4'ü'ne göre türetilirse,

$$V = k \frac{dh}{dr} + h \frac{dk}{dr} \quad (5)$$

hız ifadesi elde edilir. Burada ilk terim, klasik Darcy kanunu'na karşılık gelirken ilave olarak gelen ikinci terim ise hidrolik iletkenliğin değişiminden dolayı ortaya çıkan akımın yeraltı suyu hızına olan katkısını gösterir. Bu ifade en genel halde hem hidrolik iletkenlik hem de hidrolik yükün değişmesi durumunu yansıtmaktadır. Klasik Darcy Kanunu'nun Denklem (5)'in özel durumu olduğu söylenebilir. Yani hidrolik iletkenliğin $k(r) = k_c = \text{sabit}$ olması durumunda Denklem (5), Denklem (1)'e indirgenmiş olur.

Dinamik iletkenlik ve yeraltı suyu hızı

Analitik ve pratik olarak yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yeraltı suyu akım hızının hidrolik eğim ile doğrusal olarak değiştiği ve ortamın hidrolik iletkenliğinin değişmediği kabulüne dayanmaktadır (Denklem 1). Bu ifade, değişimin sadece piyezometrik eğime bağlı olduğunu göstermektedir. Halbuki, doğada hidrolik iletkenlikteki yersel değişimler, yeraltı suyu hızının değişimine de sebep olmaktadır. Bu makalede, Darcy Kanunu hem piyezometrik seviye hem de hidrolik iletkenlikteki değişimleri içerecek şekilde ele alınmıştır. Bu amaçla T_D dinamik iletkenlik sayısını tanımlamak uygun görülmektedir. Bu k hidrolik iletkenlik ile h piyezometrik yükünün çarpımı olarak tanımlanmıştır.

$$T_D = k h \quad (6)$$

Tüm yeraltı suyu çalışmalarında klasik olarak, statik denilebilecek iletkenlik katsayısı ise benzer olarak,

$$T = k_c m \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, m sabit akifer kalınlığını göstermektedir.

Genel olarak yeraltı suyu hızı Denklem 4'te de gösterildiği üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V = \frac{d(kh)}{dr}$$

Bu şekildeki bir hız tanımı, $k = k(r)$ olarak ele alındığından doğrusal olmayan bir hareketi

temsil eder. Bu sebepten Denklem (5)'a doğrusal olmayan Darcy Kanunu'dur denilebilir. Eğer k sabit kabul edilirse Klasik Darcy Kanunu elde edilir.

$$V = k \frac{dh}{dr} \quad (8)$$

Yeraltı suyu hareketi için hidrolik eğim sıfırdan büyük olmak zorundadır.

$$\frac{dh}{dr} > 0 \quad (9)$$

Bu ise, hidrolik eğimin eşik değerinin sıfır olduğunu ifade eder. Eşitsizliğin her iki tarafı radyal mesafe artımı dr ile çarpıldığında, $dh > 0$ olur. H , başlangıç piyezometre seviyesinden herhangi bir h yüküne kadar entegre edildiği zaman, $h - H < 0$ veya

$$\frac{h}{H} < 1 \quad (10)$$

elde edilir. Yeraltı suyu hareketi için gerekli eşik değeri, $h = H$ olduğu zamandır. Buradan, eşik değeri hidrolik iletkenlik gibi herhangi bir akifer özelliğinden bağımsızdır sonucu çıkarılabilir. Bununla birlikte, daha sonra açıklanacağı gibi doğrusal olmayan yeraltı suyu akımında eşik değeri akifer özelliğinden bağımsız değildir. Denklem (4)'ün açık ifadesi daha önce Denklem (5)'te verilmiştir.

Denklem (5)'den anlaşılacağı gibi, piyezometrik seviyenin yatay olması ($dh/dr = 0$) durumunda dahi hidrolik iletkenlik farkından dolayı yeraltı suyu hareketi olacaktır. Bu durumda hız ifadesi, matematiksel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V = h \frac{dk}{dr} \quad (11)$$

Aslında yeraltı suyu hareketi, Denklem (8) ve Denklem (11)'de ifade edilen iki durum arasında veya ikisinin süperpozisyonu ile meydana gelir. Yeraltı suyu akımının ortaya çıkması için, $V > 0$ olmalıdır. Buna göre, Denklem (5) aşağıdaki şekle dönüşür:

$$k \frac{dh}{dr} + h \frac{dk}{dr} > 0 \quad (12)$$

başka bir şekilde bu ifade

$$\frac{dh}{dr} > -\left(\frac{h}{k}\right) \frac{dk}{dr} \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Bu şekilde yeraltı suyu hareketi için eşik değeri, akifer özelliğinin bir fonksiyonu olan hidrolik iletkenlikle ifade edilen eşitsizliğin sağ tarafındaki terime eşittir. Hidrolik iletkenlik sabit iken ($k = \text{sabit}$) Denklem (13), Denklem (9)'a dönüşür.

Varsayımlı uygulamalar

Doğrusal iletkenlik değişimi

Yeraltı suyu hareketini, Denklem (13)'teki gibi değerlendirmek için hidrolik iletkenliğin mesafeye göre değişiminin bilinmesi gereklidir. Bunun için hidrolik iletkenliğin doğrusal olarak değiştiği durumda hipotetik model şu şekilde tanımlanabilir:

$$k(r) = k_c - \alpha r \quad (14)$$

Burada k_c , kuyu cidarındaki sabit hidrolik iletkenliği, α ise T^{-1} boyutunda olup azalma oranını gösteren ters faktördür. Böylece, Denklem (12) yukarıdaki ifade de hesaba katılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$(k_c - \alpha r) \frac{dh}{dr} - \alpha h > 0$$

Bu ifade daha sade hale getirilirse,

$$\frac{dh}{h} - \frac{\alpha}{k_c - \alpha r} dr > 0 \quad (15)$$

şeklini alır. İlave olarak $r \rightarrow R$ için $h \rightarrow H$ sınır şartı da göz önünde bulundurularak entegre edilirse,

$$\int_h^H \frac{dh}{h} - \int_r^R \frac{\alpha}{k_c - \alpha r} dr > 0$$

elde edilir. Gerekli matematik işlemlerin yapılması sonucunda aşağıdaki çözüme ulaşılır.

$$\frac{h}{H} < \frac{k_c - \alpha R}{k_c - \alpha r} \quad (16)$$

Bunun biraz daha düzenlenmesi ile,

$$\frac{h}{H} < \frac{(1 - \frac{\alpha}{k_c} R)}{(1 - \frac{\alpha}{k_c} r)} \quad (17)$$

elde edilir. Burada

$$f = \frac{\alpha}{k_c} \quad (18)$$

tanımlaması yapılırsa ve buna da ters mesafe faktörü denilirse, bu faktörün kullanılması ile boyutsuz doğrusal radyal mesafe, γ_r ve tesir mesafesi, γ_R

$$\gamma_r = f r \quad (19)$$

ve

$$\gamma_R = f R \quad (20)$$

tanımları yapılarak, denklem daha sade hale getirilirse,

$$\frac{h}{H} < \frac{(1 - \gamma_R)}{(1 - \gamma_r)} \quad (21)$$

bulunur. Burada f ters mesafe faktörü olarak adlandırılabilir ve boyutu L^{-1} 'dir. Bu faktör sıfır ile sonsuz arasında değerler alabilir. Sabit hidrolik iletkenlik için $f = 0$ olur ve böylece, Denklem (21), Denklem (15)'e dönüşür. Diğer yandan, Denklem (21)'den yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin $\frac{(1 - \gamma_R)}{(1 - \gamma_r)}$ hiperbolik bir fonksiyon

olacağı anlaşılır ve akiferde doğrusal olmayan bir akımın meydana geleceği anlamını taşır.

Üstel iletkenlik değişimi

Hidrolik iletkenliğin diğer bir hipotetik ifadesi, üstel azalış şeklinde olabilir:

$$k(r) = k_c e^{-\beta r} \quad (22)$$

Burada k_c , kuyu cidarındaki sabit hidrolik iletkenliği, β ise azalma oranını gösteren bir sabittir ve L^{-1} boyutunda olup ters mesafe faktörü olarak adlandırılır. Denklem (22) Denklem (12) ile birlikte kullanılırsa aşağıdaki ifade

$$\frac{dh}{h} - \beta dr > 0 \quad (23)$$

elde edilir. Bu ifade entegre edilirse ve $r \rightarrow R$ için $h \rightarrow H$ sınır şartı da göz önünde bulundurularak

$$\int_h^H \frac{dh}{h} - \beta \int_r^R dr > 0$$

aşağıdaki çözüme ulaşılır.

$$\frac{h}{H} < e^{-\beta(R-r)} \quad (24)$$

Denklem daha sade hale getirilirse,

$$\frac{h}{H} < e^{-\beta R + \beta r} \quad (25)$$

elde edilir. Burada,

$$u_r = \beta r \quad (26)$$

$$u_R = \beta R \quad (27)$$

u_r : Boyutsuz üstel radyal mesafe

u_R : Boyutsuz üstel tesir mesafesi tanımları yapılarak denklem daha sade hale dönüştürülürse,

$$\frac{h}{H} < e^{u_r - u_R} \quad (28)$$

şeklini alır. Bu ifade, $\beta = 0$ için Denklem 10'daki Darcy yeraltı suyu akımına dönüşür.

Denklem 28, yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin aynı zamanda hidrolik iletkenliğe de bağlı olduğunu göstermektedir. Bunun yanında yeraltı suyu hareketi için eşik değerinin, $e^{u_r - u_R}$ üstel bir fonksiyon olacağı anlaşılır ve akiferde doğrusal olmayan bir akımın meydana geleceği anlamını taşır.

Sonuçlar

Bu makalede, yeraltı suyu akım hızının dinamik iletkenlik parametresinin mesafe ile değişimi incelenmiştir. Dinamik iletkenlik parametresi, hidrolik iletkenlik ile hidrolik yükün çarpımı olarak tanımlanır. Yeraltı suyu akım hızının bu tanımında, hidrolik iletkenlik parametresi sabit olarak alındığında genel ifade klasik Darcy Kanunu'na indirgenir. Dinamik iletkenlik parametresinin mesafeyle değişimi olarak tanımlanan yeraltı suyu hızı iki bileşenden oluşmaktadır. Birinci bileşende hidrolik iletkenliğin sabit, hidrolik yükün değişken olduğu ve ikinci bileşen de ise hidrolik yükün sabit, hidrolik iletkenliğin değişken olduğu durum söz konusudur. Bu yeni tanımın birinci terimi klasik Darcy Kanunu'na karşılık gelmektedir. Pratikte yeraltı suyu hızının tanımı, dinamik iletkenlik tanımına uyum göstermektedir. Bu tanımdan da anlaşıldığı gibi, başlangıçtaki yeraltı suyu akım şartı için eşik değerinin sayısal bir değeri mevcuttur. Ek olarak dinamik iletkenlik parametresi ile doğrusal olmayan yeraltı suyu akımı ihtiva etmektedir. Başka bir ifadeyle, klasik Darcy Kanunu'nun doğrusal olmayan şekli araştırılmıştır. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda akiferin hidrolik değerlendirmelerinde yeraltı suyu akım hızında hidrolik iletkenlik değişkenliğinin göz önünde bulundurulması umut edilir.

Kaynaklar

- Albertson, M.L., Barton, J.R., ve Simom, D.B., (1960). Fluid mechanics for engineers, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Basak, P., (1977). Non-penetrating well in a semi-infinite medium with non-linear flow, *Journal of Hydrology*, **33**, 375-382.
- Basak, P., (1978). Analytical solutions for two-regime well flow problems, *Journal of Hydrology*, **38**, 147-159.

- Darcy, H., (1856). Les Fontaines Publique de la Ville de Dijon, Victor Dalmond, Paris, France.
- Dudgeon, C.R., (1964). Flow of water through coarse granular materials, Water Research Lab., University of New South Wales, Report No.76, 109.
- Dudgeon, C.R., ve Yuen, C.N., (1970). Non-Darcy flow in the vicinity of wells, Proceedings of Groundwater Symposium, The University of New South Wales, Australia, 13-27.
- Engelund, F., (1953). On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sands, *Bulletin of The Technical. Universiyt of Denmark*, Copenhagen, No.4.
- Kutilek, M., (1969). Non-Darcian flow of water in soils (Laminar Region).1st IASH Symp. Fundamentals, Israel (Publ. by Elsevier, 1972), 327-340.
- Givan, C. V. (1934). Flow of water through granular materials-Initial experiments with lead-shot, Amer. Geophys. Union, 15th Annual meeting, 572-579.
- Laushey, L.M. ve Popat, Y., (1980). Darcy's law during unsteady flow. International Association Science Hydraulics, General Assembly of Bern, Ground Water, 284-299.
- Louis, C., (1969). A Study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Rock Mechanics Research Publication. No.10, Imperial College of Science and Technology, Univ. of London.
- Louis, C. ve Maini, Y.N., (1970). Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock. Proc. 2nd Congress of International Society of Rock Mechanics., Belgrade, 1-32.
- Maini, Y.N., (1971). In situ hydraulic parameters in jointed rock. their measurement and interpretation. Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology, Univ. London.
- Olsen, H.W. (1969). Simultaneous fluxes of liquid and charge in saturated kaolinite, Soil Science Society America Proceedings, 33, 334-338.
- Scheidegger, A.E., (1954). Statistical hydrodynamics in porous media. *Journal of Applied Physics*, **25**, 8.
- Slepicka, F., (1961). The laws of filtration and limits of their validity, International. Association Hydraulic Research Proceedings 9th Convention, 383-394.
- Snow, D., (1968). Rock fracture spacings, openings and porosities, *Journal of Soil Mechanics. and Foundation Division*, ASCE, **94**, 1, 73-91.

- Şen, Z.,(1988). Type curves for two-regime well flow. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**, 12, 1461-1489.
- Şen, Z., (1995). Applied hydrogeology for scientists and engineers, CRC Lewis Publishers, Bato Racon, New York, 465.
- Swartzendruber, D., (1969). The applicability of Darcy's law, Soil Science Society America Proceedings, 32.
- Taylor,S.A., ve Cary J.W. (1964) Linear equations for the simultaneous flow of matter and energy in a continuous soil system. Soil Science Society America Proceedings, 28, 167-172.
- Wilkinson, J.K., (1956). The flow of water through rock fill and its application to the design of dams, Proceedings 2nd Australia.-New Zealand Conference on SMEE, 141.