

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DURAĞAN YERALTI SUYU AKIM ŞARTLARINDA BESLENME
KUYULARININ HİDROLİK HESAPLAMA YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Fatih DEMİR**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Hidrolik ve Su Kaynakları

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DURAĞAN YERALTI SUYU AKIM ŞARTLARINDA BESLENME
KUYULARININ HİDROLİK HESAPLAMA YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Fatih DEMİR
501091518**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zekai ŞEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Y. Doç. Dr. Ali UYUMAZ (İTÜ)
Y. Doç. Dr. Ayhan GAZİOĞLU (YTÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında, çok değerli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, her türlü sorunumda desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Zekai Şen'e,

Çalışmama katkıda bulunan arkadaşlarıma ve özellikle değerli destekleri için Olgay Şen ve Fatih Yeşil'e teşekkürlerimi sunarım.

Madden ve manen beni her zaman destekleyen aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Mehmet Fatih DEMİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Konusu	1
1.1.1 Genel	1
1.1.2 Yeraltı suyu	2
1.1.2.1 Akiferler	5
1.1.2.2 Kuyular.....	7
Büyük çaplı kuyular	8
Küçük çaplı kuyular	9
Kuyu nüfuz derinliği	10
1.1.2.3 Durağan akım	12
1.1.2.4 Durağan olmayan akım	13
1.1.2.5 Sanki durağan akım.....	14
1.1.3 Yapay yeraltı suyu beslenmesi.....	14
1.1.4 Yapay beslenmenin faydaları.....	15
1.2 Çalışmanın Amacı	18
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	19
3. YÖNTEM.....	25
3.1 Kütlenin Korunumu İlkesi (Süreklilik Denklemi)	25
3.2 Doğrusal Darcy Kanunu	25
3.2.1 Darcy Kanunu'nun geçerlilik aralığı.....	27
3.3 Kabuller	29
3.3.1 Akifer kabulleri	29
3.3.2 Yeraltı suyu akım kabulleri.....	30
3.3.3 Dupuit-Forchheimer kabulleri.....	31
3.3.4 Kuyu kabulleri.....	32
3.4 Limit Şartları	32
3.4.1 Başlangıç şartları.....	33
3.4.2 Sınır şartları.....	33
3.4.2.1 Geçirimsiz sınırlar.....	33
3.4.2.2 Kuyu-akifer sürekliliği.....	34
3.4.2.3 Sınırsız yaygınlık şartı.....	34
4. ÇÖZÜM	37
4.1 Basınçlı Akiferler	37

4.1.1 Sürekli beslenme	37
4.1.2 Süreksiz beslenme	39
4.2 Basıncsız Akiferler	44
4.2.1 Sürekli beslenme	44
4.2.2 Süreksiz beslenme	46
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....	51
KAYNAKLAR.....	59

KISALTMALAR

BKAY	: Basit Kesirlere Ayırma Yöntemi
BKYK	: Beslenme Konisi Yayılma Katsayısı
KCDD	: Kuyu Cıdarı Dengesi Denklemi
SKBD	: Standart Kuyu Beslenme Düşümü
SBTY	: Standart Beslenme Tesir Yarıçapı

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yeraltı suları ve kaynakları.	3
Şekil 1.2 : Çeşitli kayaçlar ve bu kayaçların gözeneklilikleri.	4
Şekil 1.3 : Kaya kürenin değişik kısımları.....	5
Şekil 1.4 : Basınçsız (Serbest) akifer.....	6
Şekil 1.5 : Basınçlı akifer.....	7
Şekil 1.6 : Sızdırmalı akifer.....	7
Şekil 1.7 : Keson (geniş çaplı) kuyu.....	9
Şekil 1.8 : Tam nüfuz eden kuyu.....	11
Şekil 1.9 : Kısmi nüfuz eden kuyu.....	11
Şekil 1.10 : Hiç nüfuz etmeyen kuyu.	12
Şekil 1.11 : Kıyı bölgelerinde tatlı – tuzlu su girişi ve yapay beslenme ile önlenmesi.	16
Şekil 1.12 : Sığ bir yeraltı mağarasının göçmesi ile oluşan geniş bir karstik çöküntü.	17
Şekil 3.1 : Darcy cihazı.....	26
Şekil 3.2 : Darcy doğrusal akım geçerlilik bölgesi.....	28
Şekil 4.1 : Basınçlı akiferde sürekli beslenme.....	38
Şekil 4.2 : Basınçlı akiferde süreksiz beslenme.....	39
Şekil 4.3 : Düşüm – Tesir mesafesi değişimi.	40
Şekil 4.4 : Basınçsız akiferde sürekli beslenme.....	45
Şekil 4.5 : Basınçsız akiferde süreksiz beslenme.	46
Şekil 5.1 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.....	52
Şekil 5.2 : Basınçlı akiferde $C=30$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.....	52
Şekil 5.3 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.2$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.....	53
Şekil 5.5 : Basınçsız akiferde $C=30$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – SBTY grafiği..	54
Şekil 5.6 : Basınçsız akiferde $C=10$, $b=0.2$, $m/H_0=10$ için SKBD – SBTY grafiği..	54
Şekil 5.7 : Basınçsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=100$ için SKBD – SBTY grafiği.	55
Şekil 5.8 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği.....	55
Şekil 5.9 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.2$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği.....	56
Şekil 5.10 : Basınçlı akiferde $C=20$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği...	56
Şekil 5.11 : Basınçsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.	56
Şekil 5.12 : Basınçsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=100$ için SKBD – Zaman grafiği.	57
Şekil 5.13 : Basınçsız akiferde $C=20$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.	57
Şekil 5.14 : Basınçsız akiferde $C=10$, $b=0.2$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.	57

DURAĞAN YERALTI SUYU AKIM ŞARTLARINDA BESLENME KUYULARININ HİDROLİK HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

ÖZET

Dünya nüfusu hızla artmakta ve bu artış daha fazla su ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Diğer taraftan dünyadaki kullanılabilir su kaynakları sınırlıdır. Sınırlı olan bu kaynaklar özellikle de yüzeysel olanlar günden güne artan kirlenmelere maruz kalmaktadırlar. Bu durumun neticesi olarak yüzeysel sulara alternatif veya arta kalan talebi karşılayacak diğer su kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kaynaklar içinde diğerlerine göre faydası en fazla olanı yeraltı sularıdır. Bununla beraber yağış rejimlerinin ve arazi kullanım şekillerinin değişmesi sebebiyle yeraltı sularının doğal beslenmesi azalmaktadır. Yağışların daha şiddetli ve kısa süreli olması, bitki örtüsü ile kaplı veya çıplak zeminlerin yerlerini değişik yapıların alması sızma miktarını düşürmektedir. Doğal sızma miktarında bu şekilde azalmaların olması kaçınılmazdır. Bu durumda sızmada meydana gelen azalmayı telafi etmek veya yeraltı suyunu daha da zenginleştirmek ancak insan müdahalesi ile yani yapay yöntemlerle mümkündür. Yapay yöntemler yüzeysel ve yüzey altı olmak üzere iki kısımdır. Bu çalışmada yüzey altı yöntemlerden biri olan beslenme kuyuları kullanılarak, yeraltı suyunun yapay beslenmesi farklı bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışmada dairesel kesitli ve tam nüfuz eden beslenme kuyuları kullanılmıştır. Basınçlı ve basınçsız akiferlerde sürekli ve süreksiz beslenme durumları için durağan akım şartlarında analitik çözüm aranmıştır. Doğrusal Darcy Kanunu ve Kütlenin Korunumu İlkesi (Süreklilik Denklemi) kullanılarak, belirli kabuller ve sınır şartlarında hesaplamalar yapılmıştır. Sonuç olarak akiferlerdeki her iki durum için boyutsuz birer eşitlik elde edilmiştir. Bulunan denklemler için MATLAB programında kod hazırlanmış ve eşitlikteki parametrelerin değer aralıkları girilerek her bir akifer için standart beslenme düşümü-tesir yarıçapı ve standart beslenme düşümü-zaman grafikleri çıkarılmıştır. Bu grafikler yardımı ile basınçlı ve basınçsız akiferlerin yapay beslenmesi kıyaslanmış ve bir takım sonuçlar elde edilmiştir.

HYDRAULIC CALCULATION METHODS OF RECHARGE WELLS AT STEADY STATE GROUNDWATER FLOW CONDITIONS

SUMMARY

The world population increases sharply and this increment brings the need for much more water with itself. On the other hand, usable water resources on the earth are limited. These limited sources, especially the surface ones are exposed to day by day increasing pollutions. As a consequence of this situation, other sources are required instead of surface sources or supplying the remaining demand. Among these resources most useful ones are groundwater resources. Nevertheless, due to the change in rainfall regime and land use patterns natural recharge of them decreases. More intensive and shorter rainfalls, different type of places taking place of the bare or with vegetation covered grounds decreases the amount of infiltration. It is inevitable that this type of decline occurs in the amount of natural infiltration. In this situation it is just possible by human efforts, namely artificially, to compensate this reduction or to enrich the ground water. There are two types of artificial methods such as surface and subsurface. In this study artificial recharge of ground waters was investigated in a different approach, by using recharge wells which is one of the subsurface methods. Circular cross section and fully penetrating recharge wells were used in the work. In confined and unconfined aquifers, for continuous and discontinuous recharge conditions at steady state flow conditions analytical solutions were searched. By using the Linear Darcy Law and the principle of conservation of Mass (Continuity Equation), within some assumptions and limit conditions calculations were done. As a result, for both two cases in aquifers dimensionless single equations were obtained. By using obtained equations for each aquifer standard recharge decline vs. radius of influence and standard recharge decline vs. time graphics were plotted using MATLAB, by giving suitable intervals for the parameters given in those equations. By means of these plots artificial recharge of the confined and unconfined aquifers were compared and some results were obtained.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu

1.1.1 Genel

Hayatın doğuş yeri olan su, canlıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli en temel doğal kaynakların başında gelmektedir. Bu özelliği ile su, hayatın varlığı ve devamı için vazgeçilmez bir doğal kaynaktır. Bunun yanında yerküreye dışarıdan yeni su gelmediği gibi, dışarıya giden su da bulunmamaktadır. Dolayısıyla dünyadaki suyun toplamı hiç değişmemektedir. Buradan da dünyamızdaki suyun sınırlı bir doğal kaynak olduğu anlaşılır. Buna karşın bu suyun hali ve yeri sürekli değişir. Su sıcaklık ve basınca bağlı olarak maddenin her üç halini kolayca alır ve dünyada bu üç halde hep birlikte ama değişik yerlerde bulunur. Suyun gaz hali olan buhar genellikle hava nemi olarak, katı hali kar ve buz olarak ve sıvı hali de tatlı veya tuzlu sular olarak bulunur. Dünyanın su arzı $1.46 * 10^9 \text{ km}^3$ gibi büyük bir miktardadır (Dirik, 2007). Bu miktarın % 97,2'sini okyanuslardaki tuzlu sular oluşturur. Geriye kalan % 2,8 oranında bulunan tatlı suların % 2,14'ü buzullar, % 0,61'i yeraltı suları, % 0,005'i zemin nemi, % 0,009'u yüzey suları, % 0,001'i ise atmosferdeki su buharıdır (Demir, 2008).

Bir taraftan su kaynakları kısıtlıyken diğer taraftan insan nüfusunda zamanla bir büyüme meydana gelmiş ve bu büyümenin ivmesi özellikle son yüzyılda artmıştır. Günümüzde bu nüfus artışına paralel olarak kentsel, tarımsal, teknolojik büyümeler ve turizm, sanayi alanlarında da gelişmeler olmuştur. Tüm bu büyüme ve gelişmeler sebebiyle içme, kullanma, sulama, sanayi ve enerji için gerekli su ihtiyacı hızlı bir şekilde artmıştır. Suya olan gereksinim artmasına karşın küresel ısınma ve çevre kirliliği nedeniyle kullanılabilir su kaynaklarının azalması suyu daha da stratejik bir kaynak haline getirmiştir. Bundan dolayı mevcut su kaynaklarının daha dikkatli kullanılması, korunması ve geliştirilmesi konusundaki çalışmalar önem kazanmakta ve gün geçtikçe artmaktadır.

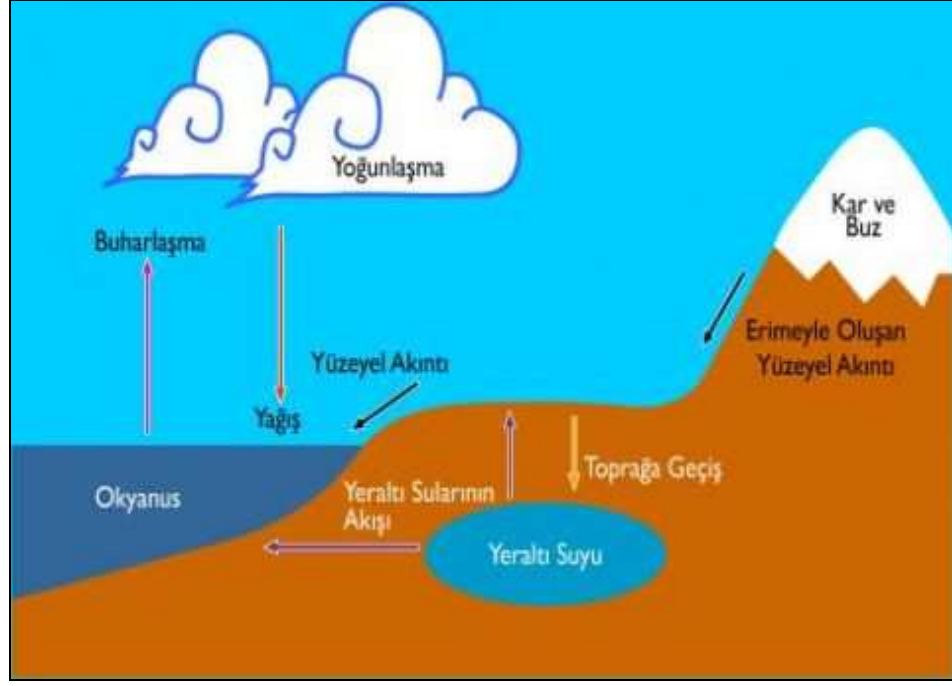
Su kaynaklarının korunması ve geliştirilmesi konusundaki çalışmalar hem yüzeysel sular, hem de yeraltı suları için yapılmaktadır. Yüzeysel su kaynakları, her geçen gün artan bir hızla evsel, tarımsal ve özellikle endüstriyel atıklar ile kirlenmektedir. Bu kirlenmeler halk sağlığını tehdit eder, ekolojik dengeyi bozar ve kirlenen suların ekonomik değeri azalır. Bu da yüzeysel su kaynaklarının kullanılabilirliği için gerekli arıtma masraflarını artırmaktadır. Buna karşın yeraltı suları yüzeysel kirlenmelere karşı muhafazalı olduğundan korunması ve geliştirilmesi yüzeysel su kaynaklarına göre daha az maliyetlidir, dolayısıyla daha ekonomiktir.

1.1.2 Yeraltı suyu

Yer altı suyu, yağış olarak yeryüzüne düşen ya da yeryüzünde bulunan suların, yerçekimi etkisiyle yeraltına sızıp, orada geçirimsiz bir tabaka üzerinde birikmesiyle oluşur. Yeraltı suları, su kaynakları arasında ayrıcalığı olan en önemli ve en zengin doğal kaynaklardır. Yüzey sularının yetersiz kaldığı durumlarda tatlı su elde edebilmek için, yeraltı sularının kullanımı oldukça fazladır. Bunlar her yerde gerekli derinliğe kuyular vasıtası ile inilmek suretiyle bulunabilirler ve sıcaklıkları yaz ve kış aylarında fazla değişmez. Yeraltı suyunun bir başka özelliği de bunların değişik jeolojik kayalardan geçerken erittikleri mineraller sayesinde içimlerinin tabii olarak çok uygun olmasıdır. Ayrıca yeraltı suları buharlaşmadan korundukları için kayıpları azdır. Bu bakımdan kurak bölgelerde yüzey biriktirme hazneleri yerine yüzey altı yani gömülü biriktirme haznelerinin (baraj) kullanılması ile yeraltı suyunun zenginleştirilmesi yoluna gidilir (Şen, 2003).

Yer altı suyunun oluşabilmesi için beslenme ve depolanma koşullarının uygun olması gerekir. Yeraltı suyunun beslenmesini, yağış miktarı, yağışın şekli, sıcaklık ve buharlaşma, arazinin geçirimsizlik derecesi, bitki örtüsü belirler. Bol yağışlı ve zemini geçirimli taşlardan oluşan alanlar yer altı suyu bakımından zengindirler. Az yağış alan, eğimi fazla ve geçirimsiz zeminlerde ise, yer altı suyunun oluşumu zordur. Yağışlar, akarsular, göller, eriyen kar ve buz suları yer altı sularını besleyen kaynaklardır. Yeraltı suları ve bu suların kaynakları Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Url - 1).

Yer altı suyunun depolanmasını ise içinde hareket ettiği kaya küre belirler. Kaya küre değişik jeolojik kayalardan meydana gelen, bazıları boşluksuz diğerleri ise boşluk ve katı kısımları olan ortamlardır.

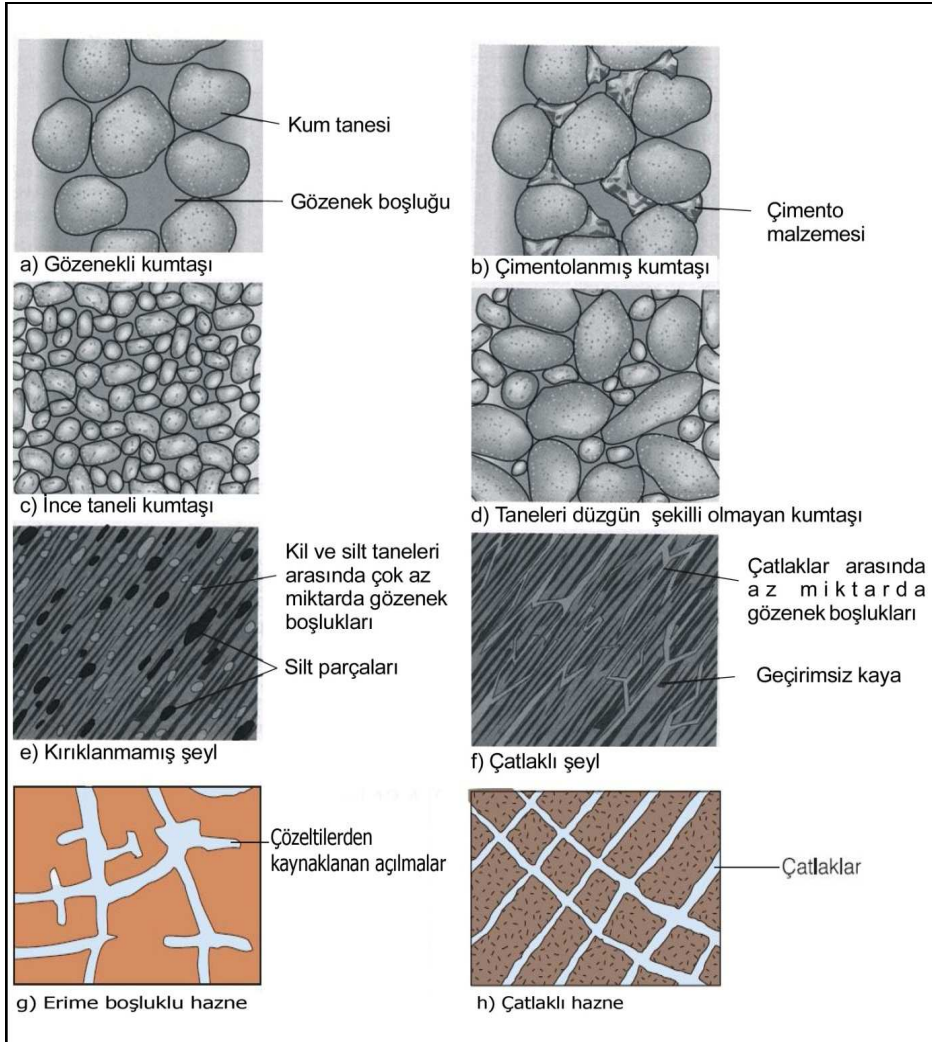


Şekil 1.1 : Yeraltı suları ve kaynakları.

Yer altı suyunun depolanmasını ise içinde hareket ettiği kaya küre belirler. Kaya küre değişik jeolojik kayalardan meydana gelen, bazıları boşluksuz diğerleri ise boşluk ve katı kısımları olan ortamlardır. Talep olduğu zaman çekilebilecek su ihtiva eden kayaların hepsinde boşluklar bulunmaktadır. Sadece boşluklu ortamlar yeraltı suyunun depolanmasına müsaade eder. Kaya kürede su, gaz veya petrol ihtiva eden jeolojik tabakalarda birbirinden ayrı olarak boşluk ve daneler bir arada bulunur. Bu bakımdan kaya küreyi birbirini tamamlayan ve ayrı olan iki kısımdan meydana geliyor diye düşünebiliriz. Bunlardan boşlukların bulunduğu ortama hazne (rezervuar), dolu olan daneli kısımlara hazne olmayan (non-rezervuar) adı verilir. Hazne olmayan boşluksuz kayaların bünyelerinde akışkan bulunmaz. Tortul (sediment) tabakalarla, kumtaşı, kireçtaşı, kil gibi kayaların hazne özellikleri olmasına karşılık püskürük kayaların hazne olmama özellikleri vardır.

Bir tabakanın hazne özelliğine sahip olması, içindeki akışkanı kolaylıkla salıvereceği anlamına gelmez. Eğer akışkanı kolayca bırakmıyor ise, bu tür jeolojik tabakalara "geçirimsiz" aksi taktirde ise "geçirimli" sıfatı verilir. Bunun anlamı hazne özelliği olan bir ortamın su depoladığı ancak depoladığı suyu ekonomik ve yeterli olarak dışarıya salıvermeyeceği durumunun da söz konusu olduğudur. Mesela, kil hazne özelliğine sahiptir ama önemli sayılabilecek miktarda suyu salıvermez. Diğer taraftan bazı geçirgen olan haznelerin içlerinde yeraltı suyu bulundurmaz. Buna en

güzel misal şeyl tabakalarıdır. Şekil 1.2’de bazı kayaçlar ve bunların boşluk durumları gösterilmiştir.

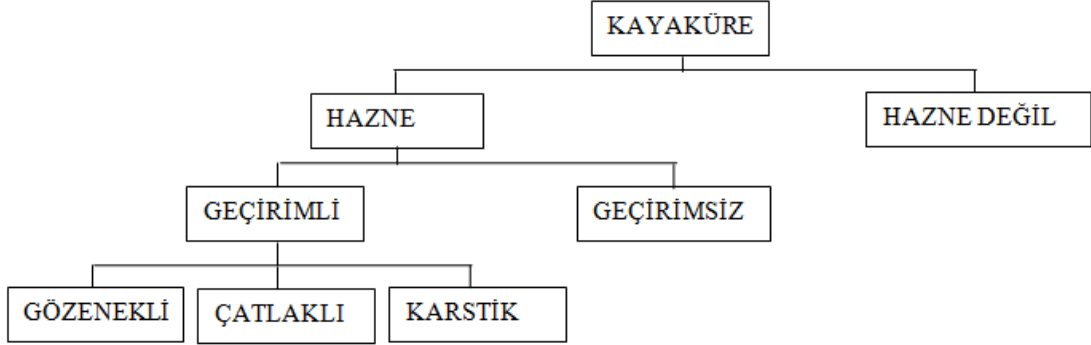


Şekil 1.2 : Çeşitli kayaçlar ve bu kayaçların gözeneklilikleri.

İçlerindeki boşlukların meydana gelme mekanizmalarına göre hazneler gözenekli (poroz), çatlaklı ve erime boşluklu yani karstik olmak üzere genelde üç kısma ayrılır (Şen, 2003). Şekil 1.3’de yukarıda sözü edilen kaya ortamının kısımları gösterilmiştir.

Hazne ortamlarının en yaygın ve önemli olanı ayrık veya çimentolaşmış duruma gelmiş olan daneli tortul (sedimenter) kayaçlardır. Bu ortamlar gelişi güzel biçim ve şekilleri olan sayısız boşlukların birbiri ile irtibat halinde olmasının sonucunda meydana gelmiştir. Buradaki boşluklar, danelerin rastgele yerleşimleri sonucunda aralarında oluşan boşluklardan ibarettir. Boşlukların birbiri ile irtibatlı olmasının sonucunda değişik en kesitli rastgele boyutlarda doğal kanalcıklar ortaya çıkar. İşte

yeraltı suyu bu irtibatlı kanalcıkların içinde bulunur ve hareketini sağlar. Bu şekildeki kanalların değişik doğrultularda, biçimlerde ve büyüklüklerde bulunması ile jeolojik ortamda suyun kolayca toplanarak hareket edebileceği bir kanallar şebekesi ortaya çıkar ki, işte bu ortama gözenekli ortam denir.



Şekil 1.3 : Kaya kürenin değişik kısımları.

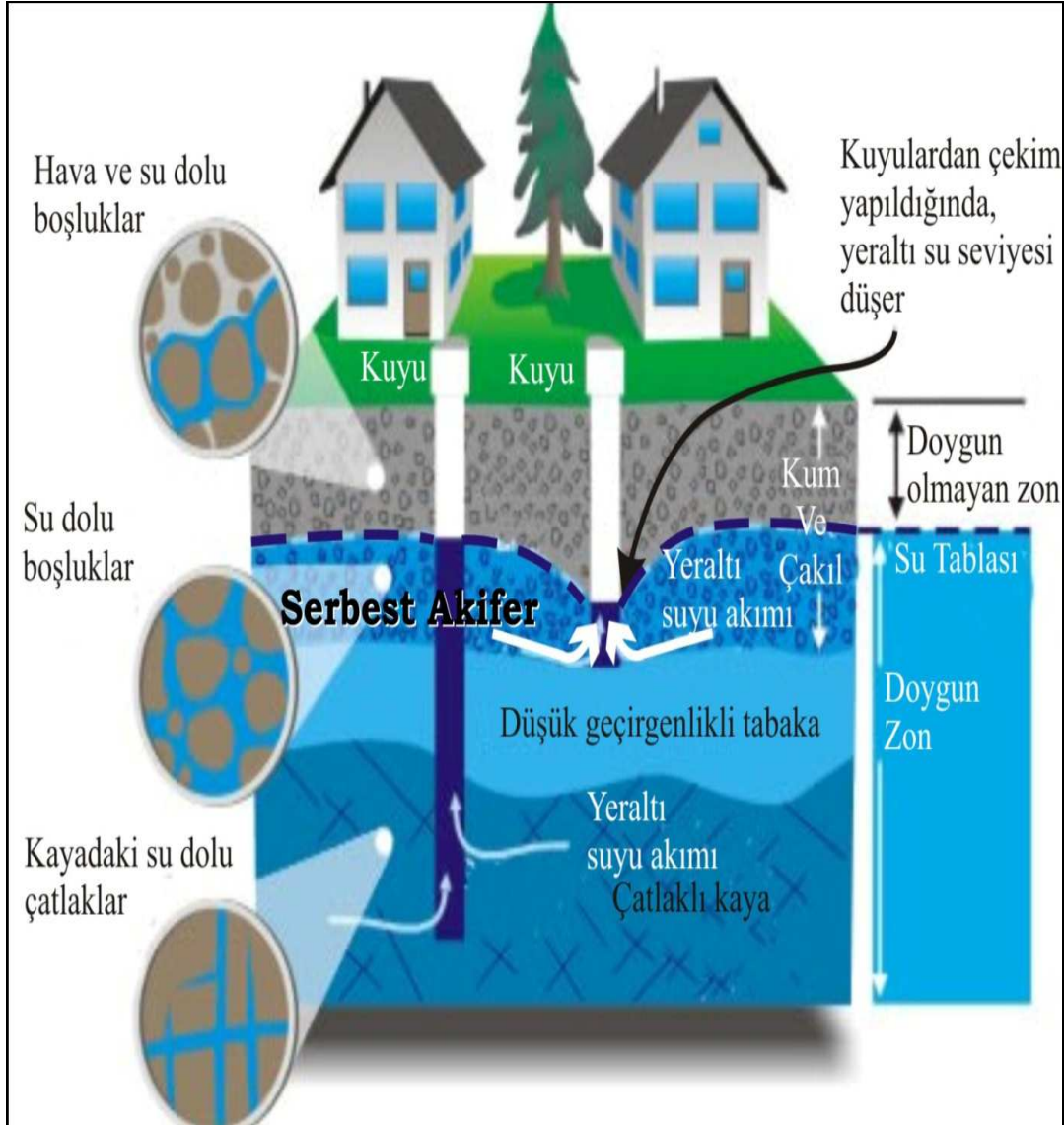
Gözenekli ortamı teşkil eden danelerin çapları ne kadar küçük olursa kanalcıkların boyutları o kadar daha düzgün olur. Bu kanallarda hareket etmek isteyen su molekülünün her noktada karşılaştığı bir mukavemet bulunur. İşte bu mukavemetler yani sürtünme ve molekülün hareketine engel olmaları suyun bu ortamlarda hareketini güçleştirir. Burada aslında mukavemet kelimesinden yeraltı suyu akışının güçlüğü anlaşılır. Diğer taraftan, kaba taneli olan ortamlarda yeraltı su daha az mukavemet ile karşılaşır ama kanalcıkların büyük boyutlu olması sonucunda su hareketi daha serbest ve gelişigüzel salınımlı olacaktır. Buna göre kaba daneli gözenekli ortamlarda suyun akışı daha kolaydır. Ortamdaki dane büyüklüğünün çok küçük olması durumunda yeraltı suyu akışının zorlaşması, dane çapı küçük ve büyük olanlardan daha fazladır (Şen, 2003).

1.1.2.1 Akiferler

Yeraltı suyunu tutan ve ileten kayaç ortamına akifer (aquifer) denir. İçlerine suyun serbestçe girebileceği veya hareket edebileceği boyutta ve miktarda birbirleriyle bağlantılı boşluk içeren kayaçlardan oluşmuş geçirimli kesimlerdir. Diğer bir ifade ile akiferler, ekonomik olarak önemli miktarda su depolayabilen (yüksek geçirimlilikli - permeabilite) ve bu suyu yeterince hızlı taşıyabilen (iletken) jeolojik birimlerdir (Somay, 2005). Akiferler jeolojik, hidrolojik ve meteorolojik bakımdan,

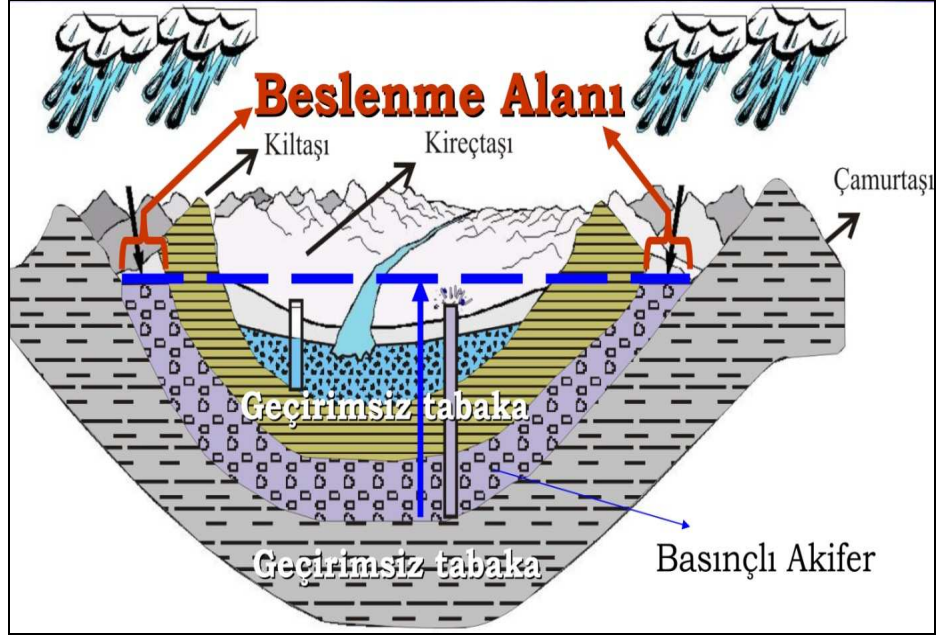
basıncısız (serbest), basınçlı ve sızdırmalı (yarı basınçlı) akifer olmak üzere üç guruba ayrılırlar.

Bir akiferin jeolojik açıdan basınçsız akifer olması için, altta bir geçirimsiz tabaka ve bu tabakanın üstünde geçirimli bir tabaka olmalıdır. Hidrolojik açıdan, doğrudan beslenen akiferler basınçsız akiferdir. Meteorolojik açıdan ise havayla teması olan akiferler basınçsız akiferlerdir (bak Şekil 1.4).



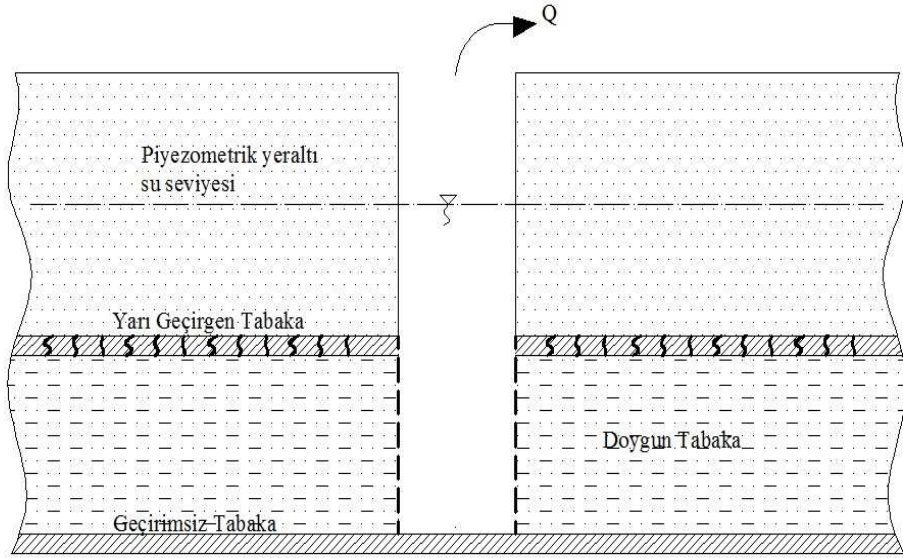
Şekil 1.4 : Basıncısız (Serbest) akifer.

Basınçlı akiferler jeolojik açıdan, iki geçirimsiz tabaka arasında bir geçirimli tabaka olan akiferlerdir. Eğer akifer doğrudan beslenmiyorsa hidrolojik açıdan basınçlı akiferdir. Meteorolojik açıdan, havayla teması olmayan akiferler basınçlı akifer olarak isimlendirilir. (bak Şekil 1.5).



Şekil 1.5 : Basınçlı akifer.

Bir akiferin jeolojik açıdan sızdırmalı akifer olması için, altta bir geçirimsiz tabaka ortada suya doymun tabaka ve üstte depolaması olmayan çatlaklı tabakadan oluşması gerekir (Şekil 1.6). Üstteki çatlaklı tabaka çift yönlü sızdırma özelliğine sahiptir.



Şekil 1.6 : Sızdırmalı akifer.

1.1.2.2 Kuyular

Ev, tarım veya endüstri kullanımlarının bir akiferden düşey kazılar veya sondajlar vasıtası ile su çekilmesine yarayan yapılara su kuyusu adı verilir. Kuyular arzun

derinliklerinde bulunan doygun tabakalardan en iyi biçimde su çekmek için tasarlanır ve kazılır. Bunların geometrik şekil ve boyutlarının seçimi arazinin litolojisine, topografyasına, bölge iklimine, yağış ve beslenme özelliklerine yüzey altı jeolojik bileşimine ve istenilen talebe bağlı olarak seçilir.

Kuyulardan su çekimini kolayca yapmak için kuyu plan, tasarım, sondaj ve işletimi sırasında kuyu enkesitinin şekli önemlidir. Gerek debi gerekse akifer parametrelerinin arazi ölçümlerinden sağlıklı bir biçimde hesaplanabilmeleri için akımın geometrik özelliklerinin basit olması istenir. Akım ipçikleri ve eşpotansiyel çizgilerinin düzgün olması kuyularında en kesitlerinin düzgün olması ile yakından alakalıdır.

İdeal bir kuyu en kesiti aşağıda sayılan faydaları dolayısı ile dairesel olarak seçilirse hesaplamalarda ve analitik modellerin yeraltı suyu için geliştirilmesinde kolaylıklar sağlar. Bunlar:

(a) Yeraltı suyu basıncı her hangi bir yatay düzlem üzerinde kuyu cidarına üniform olarak radyal biçimde dağılıdır. Bunun sonucu olarak da, kuyu cidarına teğet basınç bileşenleri yoktur. Böylece, basınç radyal üniform dağılımlıdır. Bunun kuyu kılıf ve cidarına sıkıştırma kuvvetinin tesir ettiğini gösterir. Her şeyden önce, düktıl olan jeolojik tabaka malzemesi sıkıştırma kuvvetlerine kayma kuvvetlerinden daha mukavemetlidir. Bunun sonucu dairesel en kesitli kuyuların cidarlarında çökmeler en aza indirgenir. Bu durum özellikle çimentolaşmamış gevşek kayalar için daha da geçerlidir.

(b) Tüm diğer en kesit şekilleri arasında dairesel şekilli olanların çevre uzunlukları en az olanıdır. Bu sondaj esnasında sondaj başlığı ile kuyu cidarı arasındaki sürtünme kayıplarının en az olmasına işaret eder. Ayrıca, kuyunun kılıf ve filtrelerle kaplanması da ekonomik olur. Aslında, sondaj tekniklerinin hepsi dairesel kuyu en kesitleri ortaya koyar. Diğer kesitlerle derin sondaj yapmak imkânsızdır.

(c) Dairesel olan kuyu cidarı bir eşpotansiyel eğrisi ve buna dik olan akım çizgileri ise radyal doğrular şeklindedir. Bunun anlamı akifer malzemesinin homojen ve izotrop olması durumunda, akım şebekesinin tamamen düzgün ve belirgin olacağıdır (Şen, 2003).

Büyük çaplı kuyular

Keson kuyu adı da verilen bu büyük çaplı kuyular çok eski devirlerden beri yeraltı suyunun elde edilmesi için sıkça kullanıla gelmiştir. Yeraltı suyu yüzeyinin

yeryüzüne yakın olması durumunda kolayca, hatta el ile açılabilen bu kuyular daha ziyade su talebi az olan küçük yerlere hizmet için açılır. Bu kuyular genel olarak, dairesel en kesitlidir. Başka düzgün şekillerde ve kare ile dikdörtgen kesitlerde de olmasına pratikte çok rastlanır. Pratikte yeraltı suyu yüzeyi ile yeryüzü arasındaki mesafe 1 m ile 30 m arasında değişen yerlerde keson kuyuların açılması uygun olur. Bu kuyular akifer geçirgenliğinin çok az veya az olması durumlarında kısa zamanda kuyudaki hazneden biraz fazlaca su çekebilmek için kullanılırlar. Bu bakımdan keson kuyular düşük geçirgenlikli, gevrek ve gevşek jeolojik tabakalarda, buzul ve alüvyon birikimi olan yerlerde sıkı kuyu şeklinde açılmaya müsaittir.

Elle kazıldıkları için bu kuyulara el kazımı kuyuları da denilir. Bu kuyuların çapları en azından 1 m olmalıdır ki, bir insan kuyu içine girerek rahatça çalışabilsin (bak Şekil 1.7). Kuyu çapının büyük olması, kuyuda beliren hacimde birikecek depolanmış ve çekilmeye hazır su miktarının da büyük olmasına sebep olur. Bu kuyuların pratikte gözlenmiş olan en derin hallerinde bile derinlik en fazla 50 - 60 m civarındadır. Bunlar genellikle gevşek olan jeolojik tabakalarda açılır ve yeraltı suyu seviyesinin salınımlarına göre derinliği değişir (Şen, 2003).



Şekil 1.7 : Keson (geniş çaplı) kuyu.

Küçük çaplı kuyular

Gelişen endüstriye paralel olarak suya olan talep o kadar artmıştır ki keson kuyularla alınan yeraltı suları bu talepleri karşılayamaz hale gelmiştir. Gelişen teknoloji kazma kuyular yerine çok derinlere inebilen su, petrol, doğal gaz ve maden elde edilmesi için, sondaj kuyularının vurulmasını mümkün kılmıştır. Böylece sondaj kuyuları diye

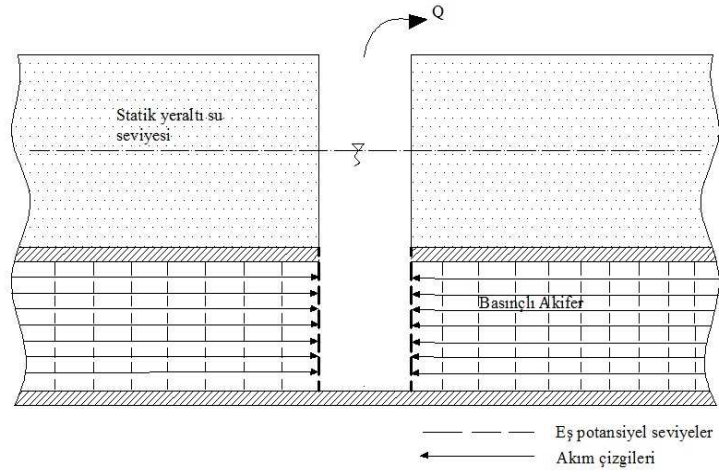
bir başka seçenek ortaya çıkmıştır. Bugün pratikte en fazla kullanılan kuyular bunlardır. Bunlar küçük çaplı ve değişmeyen biçimde daima daire kesitlidir. Çapları genellikle 32 cm (12 inç) civarında derinlikleri ise 2000 m'ye kadar varabilir. Bu sebeple çok katlı olan akiferlerden değişik derinliklerde yeraltı suyunun çekilmesi mümkün olmaktadır. Çapları küçük olduğundan kuyu haznesi hacmi ihmal edilecek kadar küçüktür. Az miktarda bile su çekilse kuyuda büyük düşümler ortaya çıktığından akiferle kuyu arasında aniden beliren önemli hidrolik yük farkı dolayısı ile akiferin kuyudaki düşüme cevabı da aniden olur. Bunun sonucunda keson kuyulardaki gibi bir gecikme zamanı yok denilecek kadar azdır. İşte bu noktalar küçük çaplı kuyuların analitik çözümlemelerinin yapılarak yeraltı suyu modellerinin kurulması için gerekli matematik çalışmaların oldukça kolay olmasına meydan verir (Şen, 2003).

Kuyu nüfuz derinliği

Akifer ile kuyunun ortak oldukları doygun tabakadaki uzunluğa kuyunun nüfuz etme derinliği adı verilir. Bu derinliğin tespiti yeraltı suyu haznesinin litolojik yani jeolojik tabakalaşma durumuna bağlıdır. Çekilebilecek debi miktarı da doğrudan bu nüfuz derinliğine bağlıdır. O arttıkça debi miktarı da artar. Ayrıca, düşey bir kuyu kesitinde akım ve eşpotansiyel çizgilerinin şekilleri de bu nüfuz etme derinliğine bağlı olarak değişir.

Bir akiferden en fazla debinin çekilebilmesi için kuyunun akifer doygun tabakasının tümü boyunca tabandaki geçirimsiz tabakaya kadar uzanması gereklidir. İşte bu durumda kuyulara tam nüfuz eden kuyular adı verilir (Şekil 1.8). Basıncı akiferlerde tam nüfuz eden kuyular halinde yeraltı suyu akımı radyal ve iki boyutlu olur: Bu durumda yeraltı suyu hesaplamaları oldukça kolaydır. Bir düşey kesitte akım çizgileri yatay bunlara dik eşpotansiyel çizgileri ise düşey olur. Yatay akım halinde akiferde hidrolik geçirgenlikleri farklı tabakalar bile olsa düşey hidrolik geçirgenliğin yeraltı suyu akımı hesaplamalarında rolü yoktur. Tam nüfuz eden kuyular halinde bu bakımdan en basit akım ağı geometrisi olur.

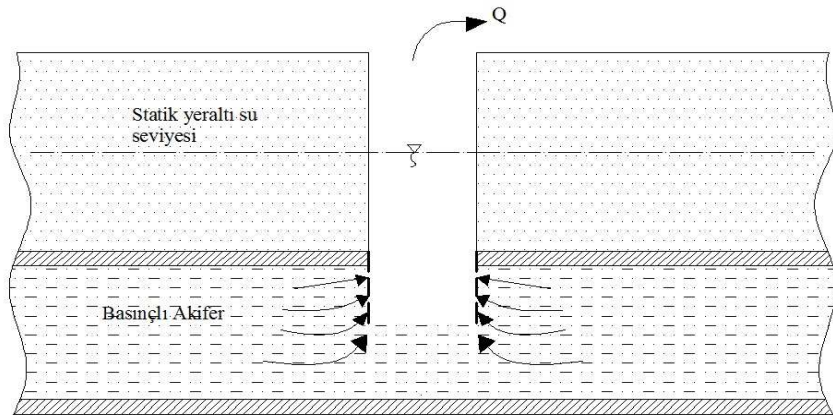
Bir düşey kesitte akım çizgileri yatay bunlara dik eşpotansiyel çizgileri ise düşey olur. Yatay akım halinde akiferde hidrolik geçirgenlikleri farklı tabakalar bile olsa düşey hidrolik geçirgenliğin yeraltı suyu akımı hesaplamalarında rolü yoktur. Tam nüfuz eden kuyular halinde bu bakımdan en basit akım ağı geometrisi olur.



Şekil 1.8 : Tam nüfuz eden kuyu.

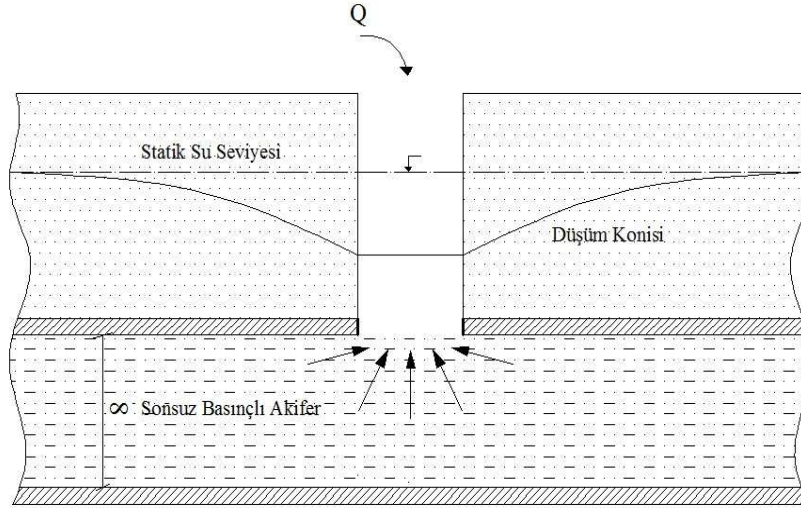
Kısmi nüfuz eden kuyuların alt uçları akiferin üst geçirimsiz veya yeraltı suyu tablası ile alttaki temel geçirimsiz tabaka arasında bir yerdedir (bak Şekil 1.9). Bu durumlar akifer kalınlığının fazla olduğu yerlerde, su talebinin karşılanması ile kuyunun derinliğinin daha da arttırılmadan durdurulması durumlarında ortaya çıkar.

Kısmi nüfuz eden kuyularda akım çizgileri kuyu tabanına yakın yerlerde düşey olmaya zorlanır. Bunun sonucunda tabandan kalkın bir su molekülünün kuyuya girmesi için tam nüfuz eden kuyulardan daha fazla yol kat etmesi gereklidir. Kuyu civarında üç boyutlu dönel bir akım şebekesi meydana gelir. Kuyudan belirli bir mesafe sonra akiferdeki yeraltı suyu akımı yatay hale gelir. Alüvyonlu akiferlerde açılan el kazması kuyuların hemen hepsi kısmi nüfuz eden türdendir. Kısmi nüfuz eden kuyular tam nüfuz eden kuyulardan daha ekonomik olmalarına karşılık, akım şebekelerinin daha karmaşık olması sonucu, analitik hesaplamaları zordur. Mesela, akifer iletkenliği kısmi nüfuz eden kuyular civarındaki akifer kısımları için tariflenmiş değildir.



Şekil 1.9 : Kısmi nüfuz eden kuyu.

Nüfuz etmeyen kuyular inşalarının kolay ve çok ekonomik olması dolayısı ile basınçlı akiferlerde hiç nüfuz etmeyen ve kavite kuyuları da denilen kuyular yapılır (bak Şekil 1.10). Bunlar basınçsız akiferin üstteki geçirimsiz tabakasının delinmesi sonucunda, doygun tabakanın en üst yüzeyinde kuyu tabanında meydana gelen bir kavitasyon vasıtası ile tabandan gelen yeraltı suyunun kuyu hacmi içinde basınç vasıtası ile tabii olarak yükselmesi sonunda ortaya çıkan kuyu haznesinden yeraltı suyunun çekilmesine yarar (Şen, 2003).



Şekil 1.10 : Hiç nüfuz etmeyen kuyu.

1.1.2.3 Durağan akım

Bir yerde yeraltı suyu hızının yönü, seviyesi ve doğrultusu zamanla değişmiyor ise buna durağan akım adı verilir ve bu durumda akım ile eş-potansiyel çizgilerinin durumu bir süre zamanla değişmez. Bu durumda yeraltı suyu seviyesi de zamanla değişmez. Değişmezliğin zaman süresi duruma göre az veya çok olabilir. Akım şebekesinin sabit kalması yeraltı suyu hidrolik eğiminin de sabit kaldığını gösterir. Doygun bölge kalınlığı da bu durumda aynı kalır. Bunun sonucunda her hangi bir en kesitte, hidrolik eğim, en kesit alanı ve hızlar zamanla değişmez ve böylece debi de sabittir. İki ardışık kesit alınıp bunlarında durağan şartlar altında olduğu düşünülürse, bir kesitteki debinin diğerine eşit olduğu sonucu çıkar. Bir farklılığın olması durumunda, ya yeraltı suyunun depolama hacminde artış veya azalış şeklinde değişiklik olur. Buradan durağan akım halinde çok önemli bir sonuç olarak giriş debisinin çıkış debisine eşit olduğu anlaşılır. Bu durum, yeraltı haznesinden çekilen miktar kadar sürekli bir girdinin olması ile mümkündür. Bunun ötesinde, durağan akım halinde yeraltı suyu seviyesinde de değişiklik olmaz. Tabiatta bu durumları

gözlemek oldukça zordur. Ancak bazı durumlarda misal olarak, dairesel bir adanın etrafını su sarmış olması durumunda, adada açılan bir kuyudan çekilen debi kadar suyun, civardan yeraltı suyu haznesine girmesi ile bir denge tesis edilmiş olur. İşte bu durumda giren debi çıkana eşittir ve akım durağandır. Bir sızdırmalı yeraltı suyu haznesine geçirgen olan üstteki tabakadan asıl suyun çekildiği alttaki doygun tabakaya sürekli olarak sızması ve sızma debisinin çekilen debiye eşit olması durumunda da durağan akım ortaya çıkar. Başka bir durum olarak, üst taraftan beslenebilen bir yeraltı suyu haznesine yağış veya yüzey akışlarından sızan suların ilavesi ile öyle bir denge durumu elde edilebilir ki çekilen su kadar hazneye sızan su olur. İşte bu denge durumundaki yeraltı suyuna durağan yeraltı suyu akımı adı verilir. Yukarıdaki misallerden anlaşılacağı üzere, bir hazneye giren ve çıkan su miktarlarının aynı olması halinde durağan yeraltı suyu durumu ortaya çıkar. Böyle bir durumun tabiatta bulunması oldukça zordur.

Fizik olarak, durağan yeraltı suyu akımı ya durağan olmayan akımdan önce veya onun sonrasında meydana gelir. Başlangıçta durağan yeraltı suyu akımına sahip olan akiferlerde pompanın çalışmaya başlaması ile önce durağan olmayan daha sonra da sanki-durağan akıma dönüşür. Matematik bakımdan durağan veya sanki-durağan olan akımlarla yeraltı suyu problemlerinin çözülmesi nispeten daha kolaydır (Şen, 2003).

1.1.2.4 Durağan olmayan akım

Yukarıda söylenen durağan akım durumunun aksi olan bu akım durumu aşağıdaki şartlar altında ortaya çıkar.

- (a) Bir akım şebekesinde akım çizgilerinin veya eşpotansiyel çizgilerinin birinin veya ikisinin zamanla değişmesi durumunda,
- (b) Değişik en kesitlerdeki debilerin birbirine eşit olmaması durumunda,
- (c) Yukarıdaki şartların her ikisi de özgül debi yani yeraltı suyu hızının büyüklük ve/ya doğrultusunun zamanla değişmesi,
- (d) Yeraltı suyu seviyesi salınımlarının bulunması,
- (e) Her zaman dışarıdan sürekli beslenme olmaz ama olsa bile bu çekilen suyu dengelemeyebilir,

(f) Durağan olmayan akım halinde depolama miktarlarında değişimler olur. Sadece yeraltı suyunun harekette olması akımın durağan olmadığını göstermez ayrıca depolama da göz önünde tutulmalıdır (Şen, 2003).

1.1.2.5 Sanki durağan akım

Yukarıda söylendiği üzere tabiatta durağan olan yeraltı suyu akımına rastlamak pek mümkün değildir. Bunun için yeraltı suyu literatüründe durağan akıma çok yakın durum arz eden bir akım türüne sanki-durağan akım adı verilir. Pratik bakımdan bazı durağan olmayan yeraltı suyu akımları durağana çok yakın olduklarından, yani değişimlerin nerede ise ihmal edilebilecek kadar küçük olması halinde buna sanki-durağan akım adı verilir. Sanki-durağan akım halindeki hesaplamalar durağan akım haline eşdeğer olduğu için, sanki-durağan akım durumu hesaplamalarda basitlikler getirir. Arazi şartlarında böyle bir durumun ortaya çıkması için uzun süre yeraltı suyu çekimine devam etmek gereklidir (Şen, 2003).

1.1.3 Yapay yeraltı suyu beslenmesi

Yeraltı suları bir taraftan yüzeysel suların sürekliliğini sağlarken, diğer taraftan da ihtiyaç duyulduğunda kuyular vasıtası ile ulaşılacak doğal su deposu görevi görürler. Bu özellikleri ve daha önce belirtilen faydaları göz önüne alındığında, yeraltı suları özellikle kurak veya yarı kurak iklim kuşağında bulunan ve hızla gelişmekte olan ülkeler için oldukça önemlidir. İklimleri gereği zaten az yağış alan bu bölgelerde yağış rejiminin değişmesiyle yeraltı suyunun doğal beslenmesi azalmaktadır. Beslenmedeki bu azalmanın bir sebebi yağış şiddetinin artması yani aynı miktardaki yağışın daha kısa sürede meydana gelmesi, dolayısıyla normal zamanda zemine sızacak suyun sızma meydana gelmeden akışa geçmesidir. Beslenmenin azalmasındaki diğer önemli bir sebep bu ülkelerdeki hızlı gelişmeye paralel olarak arazi kullanımının değişmesidir. Gelişmeyle birlikte çıplak veya bitki örtüsü ile kaplı olan alanlar yerlerini beton kütleleri, yol kaplamaları ve benzeri malzemelerle örtülü alanlara bırakmaktadır. Arazi kullanımındaki bu değişimden dolayı yağışla meydana gelen su kütlesi zemine sızmadan akışa geçer, dolayısıyla yeraltı suyunun doğal sızma ile beslenmesi engellenir. Beslenmenin azalmasındaki bir diğer faktör ise kentleşmeye bağlı olarak artan alt yapı tesisleridir (Dixit ve Upadhyay, 2005). Bu tesislerle doğal sızmanın meydana geldiği alanlarda

süreksizlikler oluşmaktadır. Süreksizliğin bulunduğu bu alanlarda sızma doğrultusunda değişimler olmakta ve bu durumun doğal sonucu olarak da yeraltı suyunun beslenmesi olumsuz etkilenmektedir.

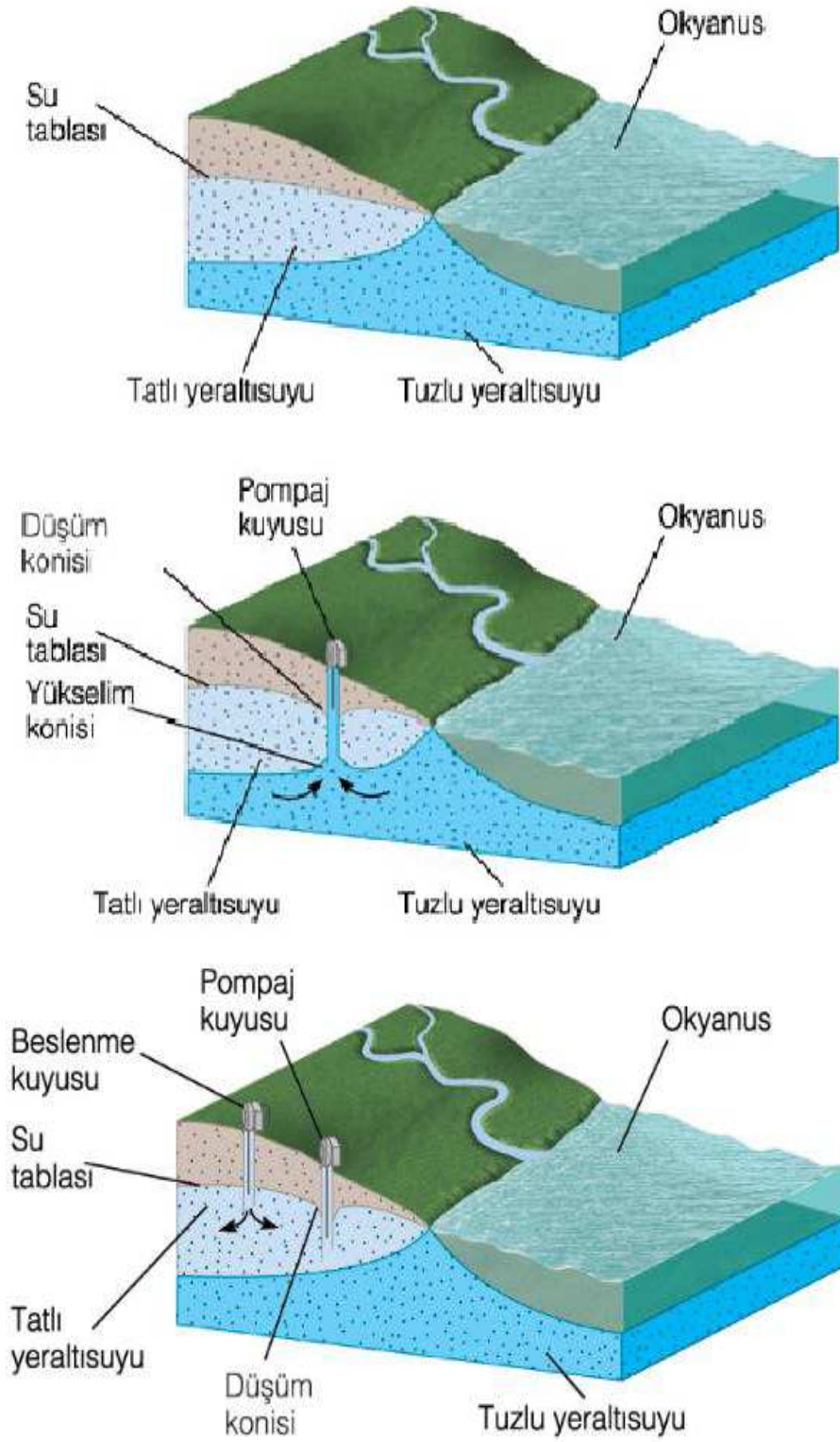
Yeraltı sularının korunması ve geliştirilmesi konusunda yapılan araştırmalar daha çok doğal sızmada meydana gelen azalmayı telafi etmek üzerinedir. Şiddetli yağışla ortaya çıkan suların daha az sızarak akışa geçmesi veya normal şiddetteki bir yağışla oluşan suların arazi kullanımının değişiminden dolayı sızmadan akışa geçmesi kaçınılmazdır. Bundan dolayı sızmada meydana gelen bu kayıpları telafi etmek insan müdahalesi ile yani yapay yöntemlerle mümkündür. Bu yöntemlerden biri ve belki de en önemlisi yapay yeraltı suyu besleme çalışmalarıdır. Bu çalışmalarda yürütülen temel mantık yağışlı zamanlarda akışa geçen suyun çeşitli yollarla yönlendirilerek, kurak zamanlarda kuyulardan su çekimi ile oluşan veya artan depolama hacmini beslemesidir. Böylece, yağışlı mevsimlerde yeraltı suyu depolanması artırılıp, kurak mevsimlerde bu suyun kullanılması amaçlanmaktadır (Peksezer, 2010).

Akışa geçen suyun yeraltına yönlendirilmesinde yüzeysel ve yüzey altı olmak üzere iki farklı yöntem izlenmektedir. Yayılma yöntemi de denilen yüzeysel sistemlerde suyun, uygun arazilerde inşa edilen kanal, hendek ve benzeri yapılara yönlendirilerek yeraltına sızması sağlanır. Yüzey altı yöntemlerde ise suyun, beslenme kuyularına, beslenme shaftlarına veya enjeksiyon kuyularına yönlendirilerek yeraltına sızması sağlanır. Yüzey altı yöntemler, yüzeysel yöntemlere göre zemin üzerinde çok az yer kapladıkları için daha faydalıdır. Bu iki yöntemin dışında, havza yönetiminin geliştirilmesi yoluyla (teraslama, sedde inşası, vb.) da sızma miktarı artırılabilir (Kumar ve Aiyagari, 1997).

1.1.4 Yapay beslenmenin faydaları

Yeraltı suyunun yapay olarak beslenmesinin birçok faydası vardır. Bu besleme ile yüzey sularının sürekliliğine katkıda bulunulur. Bunun yanında yüzeysel suların yetersiz olduğu yerlerde içme, kullanma, sulama ve endüstriyel ihtiyacı karşılamada takviye su kaynakları sağlanmış olur. Yapay beslemenin bir diğer faydası ise yeraltından kontrolsüz su çekimlerinin yapıldığı bölgelerde, bu çekimlerle oluşan su boşluklarının sıkışarak azalmasının engellenmesidir. Kıyı bölgelerindeki yerleşim alanlarında kuyulardan aşırı su çekimi sonucu deniz suyu Şekil 1.11’de de görüldüğü gibi akifer içine ilerler ve tatlı suyun yerini kullanımı arzu edilmeyen tuzlu su alır

(Dirik, 2007). Yapay beslemenin bir başka faydası da kıyı bölgelerinde istenmeyen bir durum olan tatlı – tuzlu su girişiminin yapılan besleme çalışması ile önlenmesidir.



Şekil 1.11 : Kıyı bölgelerinde tatlı – tuzlu su girişimi ve yapay beslenme ile önlenmesi.

Ayrıca karbondioksit içeren sular, yeraltındaki kireçtaşlarında hareketleri sırasında, karbonat minerallerini eritirler. Bu eritme zamanla giderek artarsa, kireçtaşları içinde birbirleri ile ilişkili büyük boşluklar oluşabilir. Yüzeye yakın olan bu tür boşluklar Şekil 1.12’de de görüldüğü gibi çökerek hasar meydana getirebilirler (Dirik, 2007). Yapay besleme ile bu tür boşlukların oluşması ve dolayısıyla sebep olabilecek olumsuzluklar da engellenmiş olur.



Şekil 1.12 : Sığ bir yeraltı mağarasının göçmesi ile oluşan geniş bir karstik çöküntü.

Yapay beslenmede akışa geçen suyun bir kısmı yeraltına yönlendirildiğinden olası taşkınlar ve bunların sebep olacağı zararlar önlenmiş olur. Ayrıca bu yöntem sayesinde yeni baraj veya diğer su biriktirme yapılarına gereksinim azalır. Böylece normalde su biriktirme yapıları yapılacak yerlerdeki yerel ekosistem korunmuş olur. Diğer taraftan yeraltı suları buharlaşmaya karşı muhafazalıyken, bu yapılarda biriktirilen sularda buharlaşmadan dolayı büyük kayıplar meydana gelmektedir. Dolayısıyla yağışla oluşan suların yeraltına yönlendirilmesi ile bu kayıplar da önlenmiş olur. Yine bu yapılaşmanın önlenmesi sayesinde bu bölgelerdeki arazi kayıplarının, dolayısıyla tarımsal faaliyetlerin zarar görmesi engellenerek ekonomik kayıpların önüne geçilmiş olunur.

1.2 Çalışmanın Amacı

Yapay yeraltı suyu beslenmesi çalışmaları yüzeysel ve yüzey altı olmak üzere iki yöntemle yapılmaktadır. Bu iki yöntemle ele alınan problemler ya sayısal (nümerik) ya da analitik olarak çözülür. Dünya genelinde bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla sayısal çözümlerin ve bu çözüm yöntemlerini içeren paket programların kullanıldığı görülmektedir. Analitik çözümlerin kullanıldığı araştırmalar ise sayısal çözümlü olanlara göre oldukça azdır. Ülkemizde ise yapay beslenme ile ilgili araştırmalar az olduğu gibi yapılan bu çalışmalarda analitik çözüm yöntemi neredeyse hiç kullanılmamıştır. Bu çalışmanın amacı yeraltı suyunun yapay beslenmesini basınçlı ve basınçsız akiferler için farklı bir yaklaşımla inceleyerek hem literatürdeki eksikliğin giderilmesine katkıda bulunmak hem de bu problemin çözümüne yönelik farklı bir bakış açısı sunmaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

İnsanlar daha ilk zamanlarda bile yeryüzü çukurluklarında birikmiş durağan veya akarsu halinde hareketli su kaynaklarına ilave olarak, artan talebin karşılanamayacağı kurak zamanlarda, sulak zamanların su fazlasını depolayarak gelecekte kullanmak için değişik yaklaşımlar düşünmüşlerdir. Bunlardan ilk ve basit olanı, bir yerleşim alanının yakınında büyük ve derin çukurlukların açılarak yağan yağmur sularının buralarda toplanması ile sarnıç denilen yüzeysel su biriktirme hazneleridir. Burada biriktirilen suyun bir taraftan doğrudan, diğer taraftan ise yeraltı su kaynaklarını sızma ile besleyerek dolaylı kullanılması söz konusudur (Şen, 2003).

Al-Assa'd ve Abdulla, 2010 yılında yaptıkları çalışmada, Ürdün'ün Mucip havzasında basınçsız akifer için durağan ve durağan olmayan akım şartlarında, beslenme kuyuları ile yapılan yapay beslenmenin yeraltı su seviyesinde meydana getirdiği değişimi incelemişlerdir. Bu araştırmada hidrolojik, jeolojik ve akifer parametrelerine ait fiziksel veriler MODFLOW V5 (PM5) programında kullanılarak farklı senaryolar altında analizler yapılmış, değişik beslenme oranlarına ait sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar bir biri ile karşılaştırılmıştır.

Voudouris ve diğ. (2006), Yunanistan'ın Patras bölgesini pilot proje alanı olarak seçmişler ve bu bölgede basınçlı akifer için, derin beslenme kuyuları vasıtası ile yapılan yapay beslenmenin yeraltı su seviyesi üzerindeki etkisini gözlemlemişlerdir. Bu gözlemlerden elde ettikleri verileri MODFLOW programında kullanarak yeraltı suyu akım modeli kurmuşlar, modelin verdiği sonuçlar ile gözlemlerinin uyumlu olduğunu ve yer altı su seviyesinde fark edilebilir bir değişimin meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Hsieh ve diğ. (2010), Tayvan'ın Pingtung ovasında basınçsız akiferin durağan akım şartlarında, yüzeysel beslenme kanalları ile beslenmesini çalışmanın amacına uygun olan yerlere açılan gözlem kuyuları yardımı ile incelemişlerdir. Elde ettikleri verileri TOUGH2 sayısal simülasyon yazılımında kullanarak analizler yapmışlar, analiz sonuçları ile gözlemlerden elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır.

Tizro ve diğ., 2010 yılında yaptıkları çalışmada, İran'ın batı kesiminde yeralan Bahar havzasındaki basınçsız akiferde durağan ve durağan olmayan akım şartlarında yapay beslenmenin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada beslenme yöntemlerinden yüzeysel su bentleri ve beslenme kuyuları birlikte kullanılmış, beslenmenin akifer içindeki tesir mesafesi ve buraları ne kadar etkilediği MODFLOW programında üç boyutlu akım modeli kurularak çeşitli senaryolar altında incelenmiştir.

Abu-Taleb (1999), Ürdün'ün Madoneh ve Butum vadilerinde basınçsız akifer için durağan akım şartlarında, yüzeysel su kanalları vasıtası ile yapılan yapay beslenmenin yer altı su seviyesine etkisini incelemiştir. Yapılan bu araştırmada kütlenin korunumu ilkesi (süreklilik denklemi) kullanılarak analitik çözümler elde edilmiş ve eldeki veriler bu çözümlerde kullanılarak zemin türleri farklı olan bu iki vadideki yeraltı su seviyesi değişimi karşılaştırılmıştır.

Khepar ve diğ., 2000 yılında yaptıkları çalışmada, Hindistan'ın Punjab bölgesinde bulunan Rohti drenaj sisteminde basınçsız akifer için yüzeysel su kanalları ile gerçekleştirilen yapay beslenmeyi incelemişlerdir. Bu çalışmada kütlenin korunumu ilkesi, Manning denklemi ve Newton-Raphson iterasyon prosedürü kullanılarak bir model kurulmuştur. Kurulan bu model için FORTRAN 77 programında kod hazırlanarak yeraltı suyunun hangi kanal sisteminde daha fazla zenginleştiği araştırılmıştır.

Peksezer, 2010 yılında yaptığı çalışmada, Türkiye'nin batısında yer alan K.Menderes havzasına bağlı Eğri Dere alt havzasında, durağan olmayan akım şartlarında beslenme havuzlarını kullanarak yapay beslenme potansiyelini araştırmıştır. Çalışmasında iki boyutlu yeraltı suyu modeli SEEP/W programını kullanarak farklı senaryolar için analizler yapmıştır. Analizler sonucunda yeraltı suyu depolanmasında belirgin bir artışın olduğunu belirtmiştir. Ayrıca bu çalışmada yapay yeraltı suyu beslenimini güçlendirmek için beslenim havuzlarına ek olarak modele yeraltı barajı da eklenmiş ve simülasyonlar tekrar edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, yeraltı su seviyesindeki artış miktarının baraj inşası için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Chenini ve Mammou (2010), Tunus'un batı kesiminde yer alan Maknassy havzasında çoklu akiferde yapay beslenmenin yeraltı su seviyesine etkisini incelemişlerdir. Bu araştırmada beslenme alanının tespitinde ARCVIEW programı kullanılmış, yapay beslenmenin yeraltı su seviyesine etkisi ise MODFLOW-2001 programı ile çeşitli senaryolar altında analiz edilmiştir.

Mariolakos ve diğ., 2001 yılında yaptıkları çalışmada, Yunanistan'ın Farsala bölgesinde karstik akiferde yeraltı suyunun yapay beslenmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada akifer karstik akifer olduğundan, önceki çalışmalardan farklı olarak yapay beslenme, beslenme kuyuları veya yüzeysel kanallarla değil de beslenme tünelleri vasıtası ile yapılmıştır. Beslenme tünelleri ile alınan suyun yapay yeraltı barajlarına ulaştırılarak yeraltı suyunun zenginleştirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmanın neticesinde beslenme tünellerinin, sistemde olması öngörülen yapıların boyutları ve diğer özellikleri belirtilmiştir.

Bouwer, 2002 yılında yaptığı çalışmada, yapay beslenmenin yeraltı suyuna etkisini değişik açılardan incelemiştir. Çalışmasında yüzeysel ve yüzey altı beslenme yöntemlerini bu yöntemler uygulandığında karşılaşılabilecek sorunlarla birlikte ele almıştır. Ayrıca yeraltı su seviyesinin yapay beslenmeye etkisi ve atık suların yapay beslenme ile yeniden kullanılabilir hale getirilmesi de bu araştırmada irdelenmiştir.

Cachero ve diğ. (2001), güneydoğu ve doğu İberia ve Balearic adasında kıyı akiferlerinin akarsular üzerine belirli aralıklarla inşa edilen bentler vasıtası ile yapay beslenimini ve bu beslenmenin yeraltı su seviyesine etkisini araştırmışlardır. Araştırma neticesinde yeraltı su seviyesinde dikkate değer bir artışın gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Moghimi, 2006 yılında yaptığı çalışmada, İran'ın Hashtgerd ovasında basınçsız derin akifer için yapay beslenmenin yeraltı suyuna etkisini incelemiştir. Çalışmasında akifer boyutlarını Housman yöntemini kullanarak belirlemiştir. Yer altı su seviyesinde yapay beslenmenin etkiyle meydana gelen değişimi ise Hantush ve Todd yöntemini kullanarak analiz etmiştir.

Aish ve Smedt, 2005 yılında yaptıkları çalışmada, İran'ın Gaza bölgesinde basınçsız akifer için yapılan yapay beslenme ile meydana gelen beslenme düşüm konisini araştırmışlardır. Bu çalışmada yapay beslenme ile oluşan düşüm konisinin boyutlarının belirlenmesinde analitik ve sayısal (nümerik) modeller birlikte kullanılmış, her iki modeleden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kaledhonkar ve diğ. (2003), Hindistan'ın Haryana bölgesinde basınçlı ve basınçsız akifer için durağan akım şartlarında beslenme kuyuları vasıtası ile yapılan yapay beslenmenin yer altı suyuna etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada yapay beslenme için en uygun alan elektriksel yer direnci ölçme tekniği kullanılarak tespit edilmiştir.

Belirlenen alana inşa edilen kuyular vasıtası ile yapay beslenme gerçekleştirilmiş, gözlem kuyuları yardımı ile yeraltı su seviyesi kontrol edilmiştir. Araştırma neticesinde her bir kuyudan yapılan beslenme debisi, beslenme tesir yarıçapı belirtilmiş ve kuyular arası mesafe için öneride bulunulmuştur.

Flint ve Ellet, 2004 yılında yaptıkları çalışmada, güney Kaliforniya'nın San Gorgino Pass bölgelerinde basınçsız akiferde doymun olmayan bölgenin, yüzeysel yayılma yöntemi ile yapılan yapay beslenmeye etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında arazi ölçümlerinden ve laboratuvarında numune tetkiklerinden elde ettikleri verileri TOUGH2 programında kullanarak farklı senaryolar için analizler yapmışlar, analiz sonuçlarını değerlendirerek doymun olmayan bölgelerin yapay beslenme alanlarının seçiminde önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir.

Mohammedjema, 2006 yılında yaptığı çalışmada, Kenya'nı Naivasha bölgesinde basınçlı ve basınçsız akifer için durağan akım şartlarında derin ve sığ kuyular vasıtası ile yapılan yapay beslenmeyi farklı açılardan incelemiştir. Çalışmasında farklı senaryolar için uygun yapay beslenme alanı belirlenmesini, su kalite kontrolünü ve bu işlemlerin maliyet hesabını ele almıştır.

Sayana ve diğ. (2010), Hindistan'ın Avana bölgesinde üniversite kampüs alanını pilot proje alanı seçerek, muson yağmuru döneminde yağmur hasadı yöntemiyle elde ettikleri suyun biriktirme havuzları ve beslenme kuyuları ile yapay beslenmede kullanılmasını ve bu durumun yer altı suyu üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada yeraltı suyunun değişimi gözlem kuyuları ile takip edilmiş, ayrıca MODFLOW V 4.1 programı ile akım analizi yapılmıştır. Gözlemler ile program çıktılarının uyumlu olduğu ve yapay beslenmenin etkisi ile yer altı su seviyesinde önemli bir artışın meydana geldiği belirtilmiştir.

Kumar ve diğ., 2008 yılında yaptıkları çalışmada, Hindistan'ın Bakhar havzasında yapay beslenmeyi sağlayacak yağmur hasadı için en uygun alanı araştırmışlardır. Bu çalışmada coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama (UA) yöntemleri kullanılmış, sonuç olarak havza yağmur hasadına uygunluğuna göre sınıflandırılmıştır.

Raju ve diğ., 2006 yılında yaptıkları çalışmada, Hindistan'ın Swarnamukhi nehri havzasında muson yağmuru sezonunda yağmur hasadı yöntemi ile elde edilen suyun yapay beslenmede kullanılmasını incelemiştir.

Araştırmalarında yağmur hasadından elde edilen suyun beslenme kuyuları vasıtası ile yeraltı barajlarında depolanması amaçlanmış ve bu doğrultuda tasarımları çalışmada verilen dört adet yeraltı barajına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Majumdar ve diğ. (2009), Hindistan'ın Maharashtra eyaletinde çoklu akiferde durağan ve durağan olmayan akım şartlarında beslenme kuyuları ve sızdırma havuzları vasıtası ile yapılan yapay beslenmenin yer altı suyunda meydana getirdiği değişimi araştırmışlardır. Bu alışmada MODFLOW programı ile farklı senaryolar altında akım analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre beslenme kuyuları ve sızdırma havuzları ile yapılan yapay beslenmenin yer altı suyuna etkisi karşılaştırılmıştır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada yeraltı suyunun yapay beslenmesi problemi, bir takım kabuller ve sınır şartları altında Kütlenin Korunumu İlkesi (Süreklilik Denklemi) ve Doğrusal Darcy Kanunu'nun birlikte kullanılması ile çözülmüştür.

3.1 Kütlenin Korunumu İlkesi (Süreklilik Denklemi)

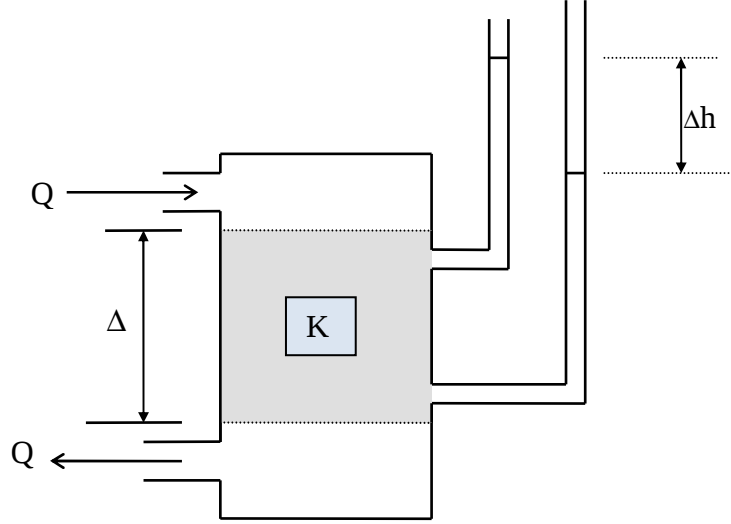
Süreklilik denklemi, sonsuz küçük bir kontrol hacminin içerisinde geçen akışkanın yoktan var olmaması ve vardan yok olmaması temel ilkesine (kütlenin korunumu) dayanır. Bu ilkeye göre birim zamanda kontrol hacmi içerisine giren akışkanın kütlesi, birim zamanda kontrol hacminden çıkan akışkanın kütlesine eşit olmalıdır (Avcı, 2000).

3.2 Doğrusal Darcy Kanunu

Gözenekli ortamın en önemli özelliği yeraltı suyu hareketinin, yeraltı suyu haznesi geometrik ve hidrolik özelliklerine göre bir devamlılık ve süreklilik içinde devam etmesidir. Bunun için değişik temel akım kanunları vardır. Ancak, bunlar arasında özellikle gözenekli ortam için kullanılan en yaygın olanı hazne hidrolik özelliklerini, akımın özelliklerine bağlayan doğrusal Darcy kanunudur.

Darcy (1856) tarafında kumlardan yapılmış ortamda ve laboratuvar şartlarında yeraltı suyu akımı incelenmiştir. Onun laboratuvar düzeneğinde basit bir silindir haznenin içine, iki kesit arasına iyice yerleştirilmiş kum ortamda su hareketindeki basınç farkını, yani hidrolik yük kayıplarını ölçmek için belirli aralıkta iki piezometre konulmuştur (bak Şekil 3.1). Silindir içindeki kum ortamdan Q debisinin geçmesi ile meydana gelecek yük kaybı, Δh , olsun. Yapılan bu deneyden gaye kum ortamın geçirgenlik katsayısının, K , tespit edilmesidir.

Bu deney düzeneğinde sadece kontrol edilebilen akım debisidir. Bunun değişik değerleri için ortaya çıkan Δh yük kaybı ölçülür. Darcy aynı kum numunesi için debinin yük kayıpları ile doğru, numune uzunluğu, ΔL , ile ise ters orantılı olduğunu çıkarmıştır. Tarif olarak akımın hızı, debinin en kesit alanına bölümü olarak bulunur.



Şekil 3.1: Darcy cihazı.

Bu deney düzeneğinde sadece kontrol edilebilen akım debisidir. Bunun değişik değerleri için ortaya çıkan Δh yük kaybı ölçülür. Darcy aynı kum numunesi için debinin yük kayıpları ile doğru, numune uzunluğu, ΔL , ile ise ters orantılı olduğunu çıkarmıştır. Tarif olarak akımın hızı, debinin en kesit alanına bölümü olarak bulunur. Darcy deneysel olarak K orantılılık katsayısı olmak üzere

$$Q = K A \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (3.1)$$

elde etmiştir. Darcy değişik deneyler için bulduğu sonuçların aritmetik ortalamasını alarak bu denklemi ileriye sürmüştür. Bu denklemin her iki tarafını en kesit alanı A 'ya bölerek ve hidrolik eğimi de $i = \Delta h / \Delta L$ olarak tarif ederek, özgül debi,

$$q = K i \quad (3.2)$$

bulunur. Burada K 'ye hidrolik geçirgenlik katsayısı adı verilir. Buradan q ile i arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu anlaşılır. Denklem (3.2)'deki hidrolik eğim eldeki yeraltı suyu deney düzeneği göz önünde tutularak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$q = K \frac{h_2 - h_1}{\Delta L} \quad (3.3)$$

Burada h_1 ve h_2 belirli bir referans noktasından itibaren ölçülen hidrolik yük değerlerini, ve ΔL de bunlar arasındaki yatay mesafeyi gösterir. Aynı Darcy kanunu durağan ve durağan olmayan yeraltı suyu akımları için sırası ile

$$q = K \frac{dh}{dL} \quad (3.4)$$

ve

$$q = K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (3.5)$$

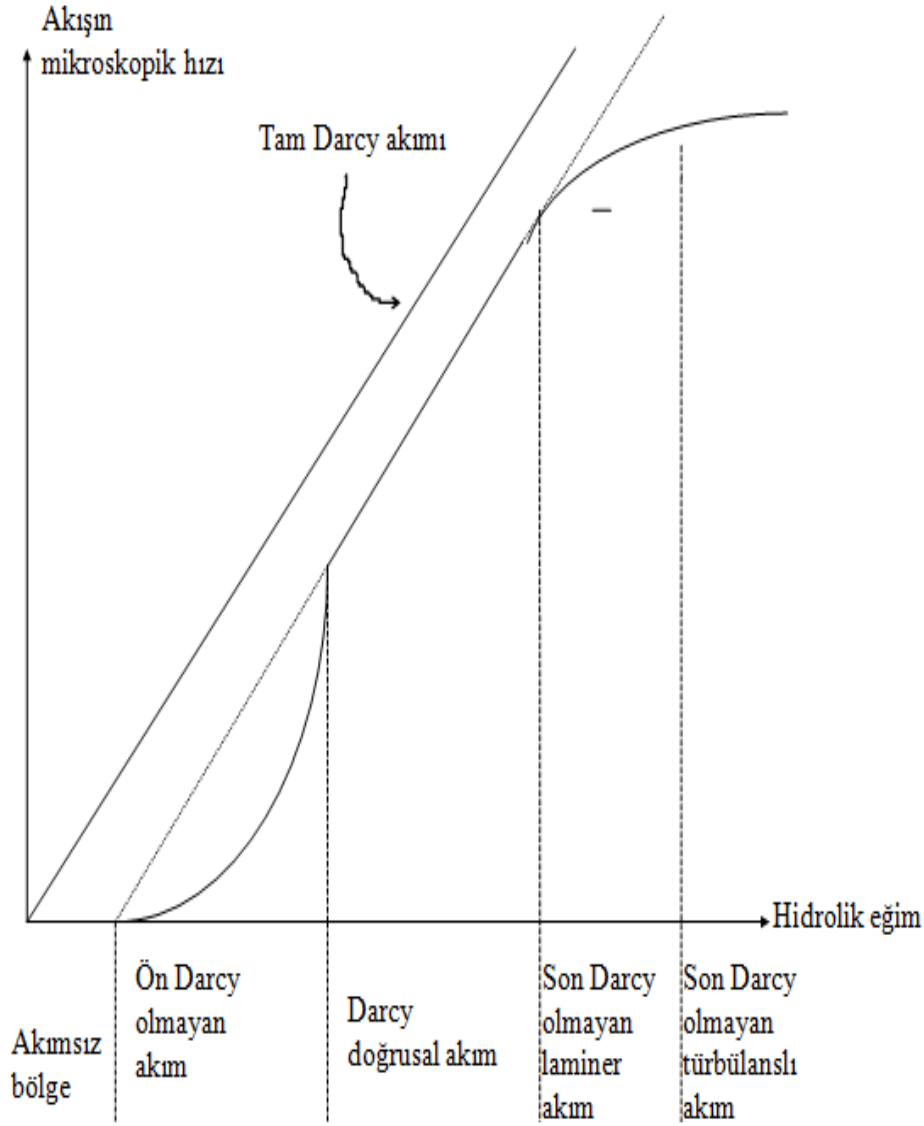
şeklinde yazılır. Denklem (3.4)'de dh/dL , terimi hidrolik yükün sadece mesafe ile değiştiğini gösterir. Durağan olmayan akım durumunda ise hidrolik yük, mesafe ve zamanla değişir (Şen, 2003).

3.2.1 Darcy Kanunu'nun geçerlilik aralığı

Darcy kanunu yeraltı suyunun kinetik enerjisini ihmal eder ama kuyu civarında uzun süre su çekilmesi durumunda artan hızlar dolayısı ile meydana gelebilecek olan türbülanslı akım dolayısı ile kinetik enerji önem kazanır. Diğer taraftan, gözenekli ortamın iri daneli, çatlaklı veya karstik ortam olması durumlarında da boşluklardan yeraltı suyu kolayca hareket edebileceği için akım hızında artışlar olur. Darcy tarafından sunulan bu basit kanunun bir başka mahzuru da, durağan olmayan yeraltı suyu hareketi sırasında önem kazanan su yoğunluğu ve zamanla hidrolik yük değişimlerinin göz önünde tutulmamış olmasıdır. Bu bakımdan, Darcy kanununun durağan olmayan akımlar için yaklaşık olarak geçerli olduğu anlaşılar. Laushey ve Popat (1968) tarafından gösterildiği üzere, Darcy kanunu durağan ve sadece gözenekli ortam için geçerlidir. Gözenekli ortamında iri daneli olmaması gereklidir. Darcy kanununun durağan olmayan yeraltı suyu akımlarına da uygulama bakımından genelleştirilmesi daha karmaşık olabilecek yeraltı suyu akım problemlerinin anlaşılmasına yarar. Yüksek hızlarda türbülans çevrileri (ediler) meydana gelerek akımın doğrusal (lineer) ve tabakalı akımlı (laminer) olmasını engeller. Hızın daha da artması sonucunda yeraltı suyu hareketi önce kuyu civarından başlayarak ve daha sonra buradan dışarıya doğru genişleyerek türbülanslı akımlar meydana gelir.

Darcy tarafından sunulan bu basit kanunun bir başka mahzuru da, durağan olmayan yeraltı suyu hareketi sırasında önem kazanan su yoğunluğu ve zamanla hidrolik yük değişimlerinin göz önünde tutulmamış olmasıdır. Bu bakımdan, Darcy kanununun durağan olmayan akımlar için yaklaşık olarak geçerli olduğu anlaşılar. Darcy kanunu durağan ve sadece gözenekli ortam için geçerlidir.

Değişik araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde (Dudgeon, 1964; Kutilek, 1969; Slepicka, 1961; Swartzendruber, 1962 and Wilkinson, 1956) Darcy kanununun geçerli olmadığı bir alt birde üst sınır bulunduğu anlaşılmıştır. Basak (1978), Şekil 3.2'de gösterildiği üzere daha önceki tüm araştırmacıların sonuçlarından yararlanarak akımı beş alt kısma bölmüştür.



Şekil 3.2 : Darcy doğrusal akım geçerlilik bölgesi.

(a) Akım olmayan kısım: Yeraltı suyu akımı belirli bir alt sınır hidrolik eğiminin aşılması durumunda meydana gelir. Bir başka deyişle, yeraltı suyunun harekete geçebilmesi için iki nokta arasındaki hidrolik yük farkından dolayı meydana gelen hidrolik eğimin yüzey kuvvetlerine karşı koyacak seviyede olması gereklidir. Gözenekli ortamın danelerinin inceliği arttıkça, bu alt sınırın da değeri artar.

(b) Darcy olmayan laminar akım öncesi: Swartzendruber(1962) sıvı-katı arasındaki yüzeyel kuvvetlerin killerde bulunan eksi yükler sebebi ile arttığını ve su moleküllerinin diopol özelliği dolayısı doğrusal olmayan yani Darcy olmayan akım türlerinin görülmeye başladığını söylemiştir.

(c) Darcy laminar akımı: Nerede ise tüm gözenekli ve ince daneli ortamlarda Darcy akımı geçerliliğini korur. Başlangıç kuvvetlerinin bu durumda viskoz kuvvetlere göre ihmal edilebileceği görülür. Bu kısımda Darcy kanunu güvenilirlikle kullanılabilir.

(d) Darcy olmayan laminar akım sonrası: Bu kısımda laminar akımdan türbülanslı akıma geçişler başladığından atalet kuvvetlerinde de artışlar görülür. İşte bu atalet kuvvetleri akımın doğrusallıktan yani Darcy durumundan olan sapışları gösterir.

(e) Türbülanslı kısım: Burada türbülanslı akımın başlaması ile önemli miktarda enerji, atalet kuvvetlerini yenmek üzere harcanarak kayıplar meydana gelir. Diğer bölgelere kıyasla bu kısımdaki eğimde azdır (Şen, 2003).

3.3 Kabuller

Arazide yapılan akifer sınaması ölçümlerinden yararlanarak, akifer parametrelerinin tespit edilmesi için gerek durağan gerekse durağan olmayan akımlar için değişik modeller bulunmaktadır. Bu model ve çözümlerin hepsi bir takım akifer malzemesi, geometrik şekli ve akım durumları ile ilgili olarak yapılan kabullerle mümkündür. Bu bakımdan elde edilen her formülün geçerlilik sınırları kabulleri düşünerek beklenmelidir.

Süreklilik ve temel yeraltı suyu akımı kanunları ile birtakım kabulleri de göz önünde tutarak matematik çözümler elde edilebilir. Kabuller ne kadar fazla ve sınırlayıcı olursa, elde edilen modelin geçerliliği de o derece az olur. Kabulleri ihmal etmek mümkün değildir, ama bunların sayılarını azaltacak biçimde arazi çalışmaları yapılabilir. Matematik çözümler elde etmek için yapılan kabuller aslında incelenen olayın fiziğindeki bazı gerçekleri inkâr etmektir. Bunların yapılması, fizik bakımından geçerli ve tutarlı modellerin elde edilmesi için gereklidir.

Yapılan kabulleri akifer, kuyu ve yeraltı suyu akımı ile ilgili diye üç ana gruba ayırmak mümkündür. Bunların açıklaması aşağıda verilmiştir (Şen, 2003).

3.3.1 Akifer kabulleri

Akifer jeolojisi ve geometrisi basitleştirilerek çözümün matematik bakımdan olabilir hale dönüştürülmesi için yapılır. Bu konuda dört esas kabul vardır.

(a) Daha önce açıklandığı üzere akifer malzemesi tektür (homojen yani noktadan bağımsız) ve tekyön (izotrop yani yönden bağımsız)'dür. Bunun anlamı akiferin bir tabakadan müteşekkil, alansal olarak fazla uzanımlı ve tek türden jeolojik kayaç içerdiği ve çatlak, fay gibi süreksizliklerin bulunmadığıdır. Tektür ve tekyönlülük fizik anlamları eşpotansiyel eğrilerinin akım çizgilerine dik olmasıdır. Tektür ve

tekyön oluş laboratuvar için alınacak numune sayısının ve akiferde kuyu etrafında yapılacak ölçmelerin az olması anlamına da gelir.

(b) Akifer alansal olarak çok yaygın, kalınlık olarak üniform ve yatay tabakalı kabul edilir. Yataylık basınçlı ve basınçsız akiferler için birbirinden farklıdır. Basınçlı bir akiferde alt ve üstte bulunan geçirimsiz tabakaların yatay olması gereklidir. Piezometre seviye eğiminin yatay olmasının bu konuda bir katkısı yoktur. Düşüm konisi içindeki akifer kalınlığının üniform olması, dört doğrultuda yapılan ölçümlerle tespit edilebilir. Eğer, değişim eğimi % 5'den daha küçük ise, akiferin yatay olduğuna karar verilir. Akiferin yatay olması için her iki geçirimsiz tabakanın ayrı ayrı eğimlerinin % 5'den az olması gereklidir. Yatay akiferlerde kuyuların akifere tamamen girmesi halinde yeraltı suyu akımı da yatay olur.

(c) Akifer malzemesinin ince daneli olması ve böylece gözenekli bir ortam teşkil ettiğinin düşünülmesi,

(d) Akifer parametreleri zaman ve konumdan bağımsız oldukları kabulü de yapılır. Bu durum küçük ölçeklerde doğrudur ama büyük ölçeklerde yaklaşık olarak geçerli olabilir (Şen, 2003).

3.3.2 Yeraltı suyu akım kabulleri

Burada yeraltı suyu hızı, debisi, hidrolik geçirgenliği ve akım kanunları ile ilgili kabuller bulunur. Bunlar:

(a) Yeraltı suyu akımı durağan veya sanki-durağandır. Tam anlamı ile durağanlık ancak akiferden çekilen debi kadar bir yerden akifere debi girmesi ile ilgilidir. Düşüm sadece mesafe ile değişir ve bu bakımdan durağan akımlı yeraltı suyu çözümlerinde kısmi diferansiyel denklem bulunmaz ve hepsi adi diferansiyel denklem şeklindedir.

(b) Yeraltı suyu akımının laminar ve Darcy kanununun geçerli olduğu kabul edilir. Fizik olarak, yeraltı suyu akımında kinetik enerjinin önemli olmadığı anlamına gelir. Çünkü hızlar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Aynı zamanda özgül debi de küçüktür. Akıma etki eden kuvvetler sadece sürtünme ve viskoz kaynaklı olanlardır.

(c) Kuyudan çekilen suyun debisi sabittir (Şen, 2003).

3.3.3 Dupuit-Forchheimer kabulleri

Basınçlı akiferlerde yeraltı suyu hareketinin incelenmesi alt ve üstte geçirimsiz tabakaların bulunması sonucunda akım alanının geometrisinin değişmeyecek biçimde belli olması bakımından serbest yüzeyli akiferlerden daha kolaydır. Serbest yüzeyli akiferlerdeki modelleme ve çözümlerin zorluğu zaman ve konumla değişken olan yeraltı suyu yüzeyinin değişimindendir. Zamanla olan yeraltı suyu yüzeyi yani piezometrik yüzey değişimleri sonucunda, sadece doymuş tabaka kalınlığının değişimi değil, kuyu civarında düşümün fazla olması dolayısı ile akım eş potansiyel çizgilerinin de düşey olmaması söz konusudur. Bu sebeple yeraltı suyu hızı her noktada yatay olmayıp özellikle kuyu civarında yatayla önemli derecede eğim yapar. Akım alanı içinde hidrolik eğim noktadan noktaya değişir. Bu eğim değişiklikleri yeraltı suyunun sayısal çözümlerinin bulunmasında güçlükler sebeptir. İşte bu güçlükleri bertaraf etmek için önce Dupuit (1863) daha sonrada geliştirilmiş olarak Forchheimer (1930) tarafından verilen aşağıdaki kabuller yapılır. Bunlar:

- (a) Suyun her nokta ve her doğrultuda fizik özellikleri aynıdır,
- (b) Akım çizgileri yataydır ve buna göre de eşpotansiyel çizgileri düşeydir. Bunun anlamı, akımın her noktasında yatay yeraltı suyu hızı ve aynı düşeyde üniform hız dağılımının olduğudur,
- (c) Bir düşeyin her noktasındaki hidrolik eğim onun yüzeyindeki eğime eşittir. Yeraltı suyu hızı su tablasının eğiminin tanjantı ile değilde sinüsü ile orantılıdır. Su tablası yakınında bile hız yatay ve üniformdur,
- (d) Kepiler saçak bölge ihmal edilebilecek kadar küçüktür,
- (e) Thiem basınçsız akiferlerde, akifer iletkenliğinin sabit olduğu varsayımını yapmıştır. Ancak, bunun için doymuş kalınlık değişimleri, doymuş kalınlık yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olmalıdır,
- (f) Akifer malzemesi ve su sıkışabilir değildir.

Bu kabuller akifer içinde düşey yeraltı suyu hızı bileşeninin bulunmadığını gösterir. Aslında, Dupuit-Forchheimer kabulleri basınçsız akiferlerde üç boyutlu olan yeraltı suyu akımını iki boyuta indirgenerek çözümlerin daha kolay yapılmasını temin eder (Şen, 2003).

3.3.4 Kuyu kabulleri

Kuyulara doğru olan yeraltı suyu akımının incelenebilmesi için aşağıdaki kabullerin yapılmasında yarar vardır.

(a) Kuyu kesitinin dairesel olduğu varsayılır. Böylece, akiferden kuyuya giren su, sanki bir silindirin yanal yüzey alanından giriyormuş gibi hesaplanır. Ayrıca yeraltı suyu akımı radyal olarak meydana gelir.

(b) Kuyu çapı çok küçüktür. Bunun anlamı yazılacak olan süreklilik denkleminde kuyu içinde bulunan su hacminin katkısının ihmal edilecek kadar az olmasını temin etmektir. Ayrıca bu akifer sınamasının başından sonuna kadar kuyudan çekilen sabit debinin, sadece akifer haznesinden geldiğine işaret eder. Ayrıca, akiferin aniden su çekilmesine cevap vermesini temin eder. Halbuki geniş çaplı kuyularda böyle bir ani cevap vermek söz konusu değildir.

(c) Kuyu akifer doygun bölgesini tepeden tabana kadar tam olarak nüfuz eder. Bu kabul yeraltı suyu hareketinin yatay olmasına yardımcı olur.

(d) Kuyu kayıplarının bulunmadığı kabulü yapılır. Buna göre akifer içindeki en büyük düşüm aynı zamanda kuyu içindeki en büyük düşüme eşittir. Bunun anlamı düşüm konisinin kuyu cidarlarında fazlaca hidrolik eğime sahip olduğudur (Şen, 2003).

3.4 Limit Şartları

Yukarıdaki kabullerin ışığı altında verilen bir yeraltı suyu probleminin çözümüne başlanabilir ama bunlara ilave olarak başlangıç ve sınır şartlarının da incelenen probleme göre belirlenmesi gereklidir. Bu şartlarında bilinmesi ile incelenen bir yeraltı problemlerine uygun çözüm getirilebilir. Aksi taktirde çözümler genel kalır. Yapılan uygun ve son çözüm bu şartların doğruluğuna ve geçerliliğine bağlıdır. Eldeki jeolojik, hidrolojik ve jeofizik bilgilerden yararlanarak bu şartların belirlenmesi ile probleme yaklaşık çözümlerde bulunabilir. Bu arada çözüm için uğraşan kişinin daha önceden olan kişisel tecrübesi de işe yarar. Değişik sınır ve başlangıç şartları, değişik çözümlere sebep olduğundan, incelenen problemin bu şartlarının sağlıklı bir biçimde belirlenmesi gereklidir (Şen, 2003).

3.4.1 Başlangıç şartları

Bu şartlar yeraltı suyu yüzeyi veya piyezometrik yüzeyin sabit veya değişken durumlarını belirtir. Mesela, durağan bir yeraltı suyu probleminde başlangıç şartları şunlardır.

$$q(x,y,z,0) = C_1 \quad (3.6)$$

$$s(x,y,z,0) = C_2 \quad (3.7)$$

veya

$$i(x,y,z,0) = C_3 \quad (3.8)$$

burada $q(x,y,z,0)$, $s(x,y,z,0)$ ve $i(x,y,z,0)$ sırası ile özgül debi, düşüm ve hidrolik eğimdir. Bunların uzay (x,y,z) ve zaman t , ($t = 0$) konumlarındaki değerlerini gösterir. C_1 , C_2 ve C_3 sabitleri eldeki problemin fizik şartlarına bağlıdır. Birçok yeraltı suyu probleminin durağan akım çözümünde bu kitapta bu sabitlerin hepsi sıfır olarak alınacaktır (Şen, 2003).

3.4.2 Sınır şartları

Bunlar belirli verilmiş bir zamanda yeraltı suyu akımının jeoloji ve hidroloji ile ilgili uzay özelliklerini gösterir. Bunlar arasında olabilecek jeolojik kompozisyon değişimleri ve sınırlarının belirlenmesi, jeolojik yapılar, beslenme ve besleme durumları gelir.

3.4.2.1 Geçirimsiz sınırlar

Geçirimsiz olan bir sınırdaki her hangi eşpotansiyel sabit potansiyel denir. Bu sınıra dik akım yoktur ve böylece bu doğrultuda özgül debi sıfırdır. Bunun anlamı, Darcy kanununa göre hidrolik eğiminde sıfır olacağıdır. Bunun matematik olarak ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$i(x,y,z,t) = \frac{\partial h(x,y,z,t)}{\partial n} = 0 \quad (3.9)$$

Burada n , (x,y,z) noktasında geçirimsiz sınıra dik olan normal doğrultuyu gösterir. Buna misal olarak basınçsız akiferlerin alt ve üst geçirimsiz tabaka sınırları, geçirimsiz sınırlar, merccekler ve üzerinde sızma olmayan serbest yüzeyli akifer piyezometre yüzeyi verilebilir (Şen, 2003).

3.4.2.2 Kuyu-akifer sürekliliği

Bir kuyu için düşünülen süreklilik denklemi durumunda, kuyudan çekilen debi, Q ile akiferden kuyuya gelen debi Q_a , arasındaki farkın, kuyu haznesinden çekilecek debiye eşit olması gerekir. Ancak, çok küçük çaplı kuyularda, kuyu haznesinden çekilebilecek suyun miktarı ihmal edilebilir. Bunun anlamı, çekilen su debisinin kuyuya gelen akifer debisine eşit olmasıdır. Bunun matematik ifadesi

$$Q = \lim_{r \rightarrow 0} [2\pi m r q(r, t)] \quad (3.10)$$

olur. Burada, $q(r, t)$ özgül debiyi, m akifer kalınlığını ve r ise radyal mesafeyi gösterir. Diğer taraftan kuyu çapının büyük olması durumunda, kuyu haznesinden gelecek suyun da göz önünde tutulması ile

$$Q = \lim_{r \rightarrow r_w} [2\pi m r q(r, t)] - \frac{ds_w(t)}{dt} \quad (3.11)$$

olur. Bu denklemin sağ tarafındaki ikinci terim kuyu haznesinin etkisini gösterir. Burada, $s_w(t)$, t anında kuyudaki düşümdür. Pratikte, küçük r_w değerleri ve/ya büyük zamanlarda sanki-durağan akımın meydana gelmesi ile bu sifıra yaklaşır ve böylece Denklem (3.11) geniş çaplı kuyular için bile geçerli olur.

Diğer bir süreklilik şartı, akiferdeki kuyu cidarında meydana gelen en büyük düşümün $s(r_w, t)$, kuyu içindeki düşüme eşit olmasıdır.

$$s_w(t) = s(r_w, t) \quad (3.12)$$

Kuyu-akifer arasındaki bu sürekliliklerin her zaman geçerli olduğu kabul edilir (Şen, 2003).

3.4.2.3 Sınırsız yaygınlık şartı

Tabiattaki akiferlerin hemen hepsi sonlu yaygınlıkta yani sınırlı olmasına karşılık, matematik modelleme için akiferlerin sınırsızca yaygın olduğu kabulü yapılır. Pratikte, birkaç kilometre yaygınlığı olan akiferlerin sınırsızca yaygın olduğu düşünülür. Ayrıca, sınırlı yaygın olan akiferde eğer kuyu çekim debisi az ise, düşüm konisinin tesir alanı akiferin bu yaygınlığı içinde kaldığı müddetçe, akifer yine sınırsızca yaygınmış gibi algılanabilir. Sınırsızca yaygın akiferlerde kuyudan olan büyük mesafelerde, düşüm miktarı sifıra eşittir. Bu bir başka sınır şartı olarak aşağıdaki matematik denklem ile ifade edilebilir.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [s(r,t)] = 0 \quad (3.13)$$

Burada $s(r,t)$ düşüm konisi içinde r radyal mesafedeki bir noktada t zamanında bulunan düşüm miktarını gösterir (Şen, 2003).

4. ÇÖZÜM

4.1 Basınçlı Akiferler

4.1.1 Sürekli beslenme

Akiferin basınçlı olması akifer kalınlığında yani suyun kuyudan akifere geçtiği yükseklikte zamanla bir değişim olmayacağı anlamına gelir. Beslenmenin sürekli olması durumu ise kuyudaki başlangıç su yüksekliğinin zamanla değişmeyip sabit kalacağını ifade eder. Şekil 4.1’de bir basınçlı akifere ait olan beslenmenin şekli gerekli olacak notasyonlarla birlikte gösterilmiştir.

Burada;

$Q_1(Q)$: Silindirik hacimden çıkan debi,

$Q_2(Q)$: Silindirik hacimden akifere giren debi,

A: Suyun geçtiği silindirik yüzeyli kesitin alanı,

V: Yeraltı suyu akım hızı,

K: Akifer hidrolik geçirgenlik katsayısı,

T: Akifer hidrolik iletkenlik katsayısı,

i: Hidrolik eğim,

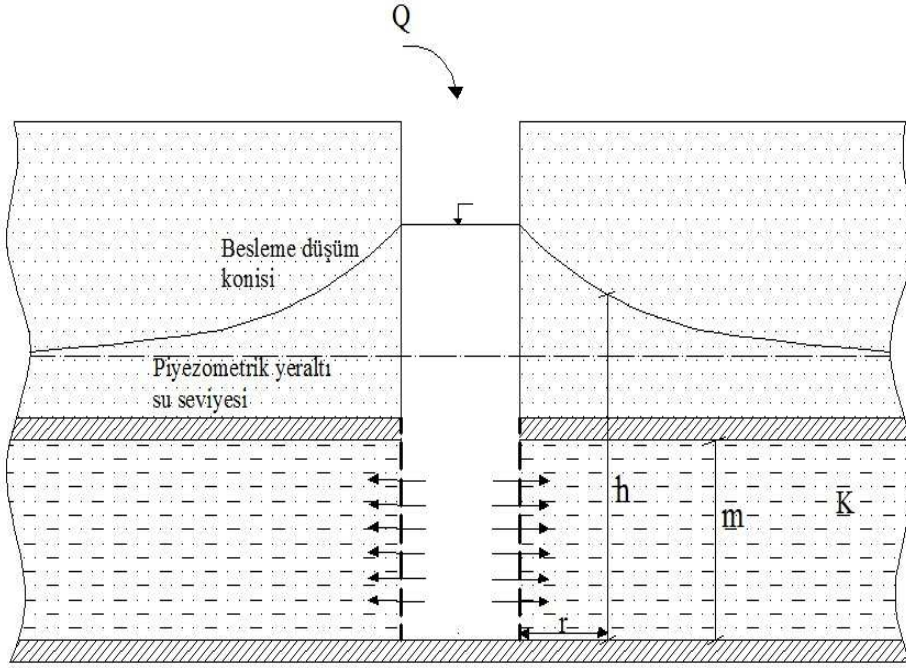
r: Silindirik kesitin yarıçapı,

m: Akifer kalınlığı,

h: Piyezometrik yeraltı su seviyesi,

q: Özgül debi.

Basınçlı akiferde, dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olduğu durumda, silindirik bir hacmin cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu hacimden cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır. Buna göre akifer içindeki r yarıçaplı silindirik yüzeyli kesitten çıkan debi aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır. Buna göre akifer içindeki r yarıçaplı silindirik yüzeyli kesitten çıkan debi aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.



Şekil 4.1 : Basınçlı akiferde sürekli beslenme.

Basınçlı akiferde, dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olduğu durumda, silindirik bir hacmin cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu hacimden cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır. Buna göre akifer içindeki r yarıçaplı silindirik yüzeyli kesitten çıkan debi aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.

$$Q_1 = Q_2 = Q \rightarrow Q = A V \rightarrow \frac{Q}{A} = V \quad (4.1)$$

Darcy'nin doğrusal akım kanununa göre, debinin kesit alanına oranı hız boyutundaki özgül debiyi verir.

$$\frac{Q}{A} = K i = q = V \rightarrow Q = A K i \rightarrow i = \frac{dh}{dr} \rightarrow Q = A K \frac{dh}{dr} \quad (4.2)$$

Diğer taraftan silindirik yüzeyin geometrisinden alan

$$A = 2 \pi r m \rightarrow Q = 2 \pi r m K \frac{dh}{dr} \quad (4.3)$$

elde edilir.

Akifer içi ortamın noktadan bağımsız (homojen) olması durumunda Denklem (4.3)'teki $m K$ çarpımı T akifer iletkenlik katsayısını verir. Buna göre önceki denklem yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$Q = 2 \pi r T \frac{dh}{dr} \quad (4.4)$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{2\pi T}{Q} dh \rightarrow \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi T}{Q} \int_{h_1}^{h_2} dh \rightarrow \ln(r_2 - r_1) = \frac{2\pi T}{Q} (h_2 - h_1) \quad (4.5)$$

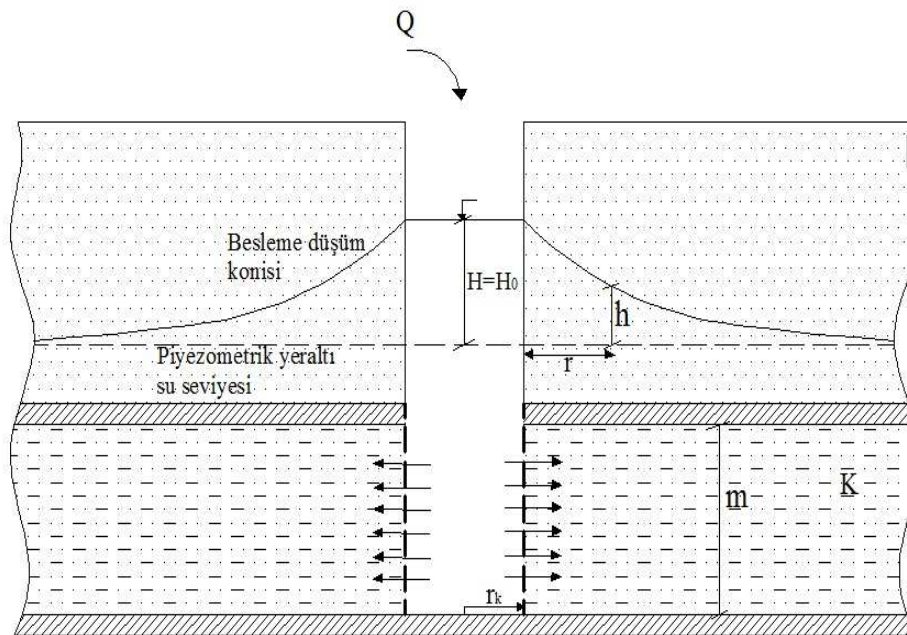
Denklem (4.5)'te δ de β yalnız bırakılacak olursa

$$Q = \frac{2\pi T(h_2 - h_1)}{\ln(r_2 - r_1)} \quad (4.6)$$

elde edilir.

4.1.2 Süreksiz beslenme

Beslenmenin sürekli olmaması durumunda kuyudan akifere geçen su miktarı karşılanamadığı için kuyudaki başlangıç su yüksekliği zamanla değişir (bak Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Basınçlı akiferde süreksiz beslenme.

Basınçlı akiferde dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olmadığı durumda, silindirik şekilli kuyu cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu kuyudan cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır. Buna göre kuyunun silindirik yüzeyli kesitinden çıkan debi cidardaki dengeye göre aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.

Kuyu tarafından giren miktar (Q_1) = Akifer tarafından çıkan miktar (Q_2) olup

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow \pi r_k^2 \frac{dH}{dt} = 2 \pi r_k m K \frac{dh}{dr} \quad (4.7)$$

Burada;

r_k : Kuyu yarıçapı,

t : Zaman.

Denklem (4.7) gerekli sadeleştirmelerden sonra aynı değişken ve türevleri bir tarafa toplanarak düzenlenirse elde edilecek ifade şu şekilde olur.

$$\frac{dh}{dr} = \frac{r_k}{2 m K} \frac{dH}{dt} \quad (4.8)$$

Beslenmenin sürekli olduğu kısımda da belirtildiği üzere akifer içi ortamın noktadan bağımsız (homojen) olması durumunda $m K$ çarpımı T akifer hidrolik iletkenlik katsayısını verir. Bu durumda Denklem (4.8)'in yeniden düzenlenmesi ile

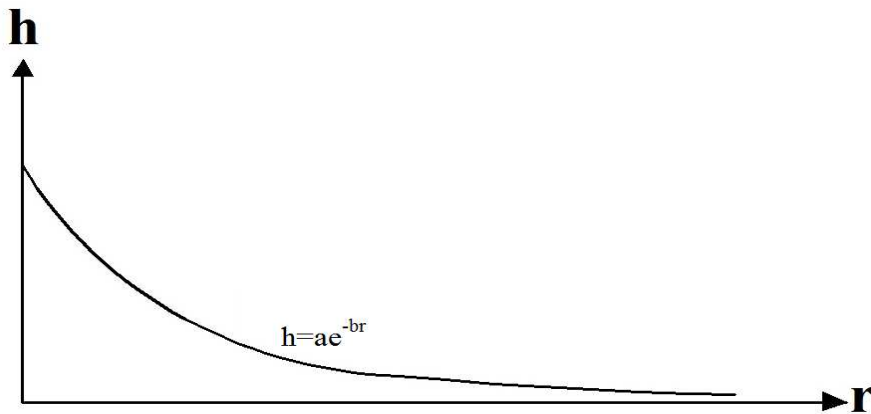
$$\frac{dh}{dr} = \frac{r_k}{2 T} \frac{dH}{dt} \quad (4.9)$$

elde edilir.

Akifer içerisinde doğal bir şekilde oluşan beslenme düşümü – tesir yarıçapı eğrisinin, genel denklemi

$$h = a e^{-br} \quad (4.10)$$

olarak bilinen üssel (exponansiyel) eğriye (Şekil 4.3'teki gibi) uyduğu varsayıp basitleştirme yolu ile çözüme devam edilirse, sırası ile aşağıda belirtilen adımlar takip edilerek sonuca varılır.



Şekil 4.3 : Düşüm – Tesir mesafesi değişimi.

Denklem (4.10)'daki a çarpanı eğrinin başlangıç koşullarının, $r=0$ için $h=H$, dolayısı ile başlangıç noktasının $(H,0)$ bilinmesinin de yardımıyla hesaplanır. Bunun için önce a eşitlikte yalnız bırakılır, ardından da $(H,0)$ noktası denklemde yerine konularak a değeri bulunur.

$$a = \frac{h}{e^{-br}} \rightarrow a = h e^{br} \quad r = 0 \rightarrow a = H_1 \rightarrow a = H \quad (4.11)$$

Bu parametre Denklem (4.10)'da yerine yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$h = H e^{-br} \quad (4.12)$$

Elde edilen son eşitliğin Denklem (4.9)'un çözümünde kullanılabilmesi için r'ye göre türevi alınır.

$$\frac{dh}{dr} = -b H e^{-br} \quad (4.13)$$

Denklem (4.9) ve (4.13)'deki $\frac{dh}{dr}$ oranlarına karşılık gelen değerler yerine koyma yöntemi ile eşitlenirse,

$$\frac{dh}{dr} = \frac{r_k}{2T} \frac{dH}{dt} = -b H e^{-br} \quad (4.14)$$

elde edilir.

Aynı değişken ve türevleri bir tarafa toplanarak düzenlenirse,

$$\frac{dH}{H} = -\frac{2bT}{r_k} e^{-br} dt \quad (4.15)$$

bulunur.

Sonraki adım olarak Denklem (4.15)'de kuyu içindeki su yüksekliğinin değerine karşılık gelen H hesaplanır. Bunun için öncelikle eşitlikte $r = 0$ durumuna bakılır, çünkü sadece $r = 0$ değeri kuyu içi değişimi, geriye kalan tüm r değerleri akifer içi yani r değerine karşılık gelen mesafedeki değişimi gösterir. Dolayısıyla kuyu içindeki değişimin r'ye göre incelenebilmesi r'nin ancak 0 değeri ile mümkündür.

Denklem (4.15)'de $r = 0$ değeri yerine yazılırsa kuyu cidarı dengesi olarak da isimlendirilen ifade

$$\frac{dH}{H} = -\frac{2bT}{r_k} dt \quad (4.16)$$

elde edilir.

Denklem (4.16)'nın integrali alınarak

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{H} = \int_0^t -\frac{2bT}{r_k} dt \quad (4.17)$$

sonucuna varılır.

T, b ve r_k tanımları gereği sabit olduklarından integral dışına alınır.

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{H} = -\frac{2bT}{r_k} \int_0^t dt \quad (4.18)$$

İntegrali alınan eşitlikte sınır değerler yerlerine yazılırsa,

$$\ln(H - H_0) = -\frac{2bT}{r_k} (t - 0) \rightarrow \ln\left(\frac{H}{H_0}\right) = -\frac{2bT}{r_k} t \quad (4.19)$$

elde edilir.

Bu denklemde her iki tarafın üsseli (exponansiyeli) alınır ve gerekli matematiksel düzenlemeler yapılırsa, çözümü aranılan H değeri elde edilir.

$$\frac{H}{H_0} = e^{-\frac{2bT}{r_k} t} \rightarrow H = H_0 \times e^{-\frac{2bT}{r_k} t} \quad (4.20)$$

Denklem (4.20) ile elde edilen H Denklem (4.12)'de yerine yazılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$h = H_0 e^{-\frac{2bT}{r_k} t} e^{-br} \quad (4.21)$$

Son denklemde değerleri sabit olan T ve r_k 'nın oranına C denilir ve gerekli matematiksel düzenlemeler yapılırsa boyutsuz bir eşitlik bulunur.

$$h = H_0 e^{-2bCt} e^{-br} \rightarrow h = H_0 e^{-b(2Ct+r)} \rightarrow \frac{h}{H_0} = e^{-b(2Ct+r)} \quad (4.22)$$

Buradaki h/H_0 oranının değeri h ve H_0 'ın tanımları gereği, H_0 kuyudaki başlangıç su seviyesi olduğundan, $t = 0$ anında $h = H_0$ olur ve bu durumda oran 1'e eşit olur. Beslenme sürekli olmadığı ve kuyudan akifere su geçişi olduğu için zamanla $h = 0$ olur ve bu durumda da oran sıfıra eşit olur. Böylece oranın 0 ile 1 arasında değiştiği anlaşılır. Burada bu oran standart kuyu beslenme düşümü (SKBD) olarak adlandırılmıştır.

$$0 \leq \frac{h}{H_0} = e^{-b(2Ct+r)} \leq 1 \quad (4.23)$$

Denklem (4.22) incelendiğinde C, t ve r değerlerinin çeşitli ölçümler sonucunda bulunabileceği görülmektedir. C akifer hidrolik iletkenlik katsayısı olan T'nin kuyu yarıçapı olan r_k 'ya oranıydı. T ve r_k değerleri arazi ölçümü neticesinde elde edilebilir. Standart beslenme yarıçapı olan r de yine arazide, kuyudan ölçüm yapılacak noktaya kadar olan mesafenin belirlenmesi ile bulunabilir. Denklemde t beslenmenin başlangıcından ölçüm yapılan zamana kadar geçen süreyi belirttiğinden, bu değer de

ölçülebilmektedir. Bu durumda denklemde bilinmeyen parametre olarak sadece b değeri kalmaktadır.

Denklem (4.22)'de b değerini hesaplamak için her iki tarafın logaritması alınır,

$$\frac{h}{H_0} = e^{-b(2Ct+r)} \rightarrow \text{Ln}\left(\frac{h}{H_0}\right) = -b(2Ct+r) \quad (4.24)$$

elde edilir.

Eşitliğin sol kısmı Z gibi herhangi bir değere eşitlenip denklemin son halinde r'ye göre türev alınır,

$$\overbrace{\text{Ln}\left(\frac{h}{H_0}\right)}^Z = -b(2Ct+r) \rightarrow Z = -2bCt - br \rightarrow dz = -b dr \quad (4.25)$$

bulunur.

Son eşitlikte b yalnız bırakılır ve Z değeri de yerine yazılırsa, b'nin standart kuyu beslenme düşümü (SKBD), (h/H_0) , – standart beslenme tesir yarıçapı (SBTY), (r), eğrisinin eğimine eşit olduğu görülmektedir.

$$b = -\frac{dz}{dr} = -\frac{d\left(\text{Ln}\left|\frac{h}{H_0}\right|\right)}{dr} \quad (4.26)$$

Denklem (4.24)'te b yalnız bırakılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$b = -\frac{\text{Ln}\left|\frac{h}{H_0}\right|}{2Ct+r} \quad (4.27)$$

Elde edilen denklem incelenirse, aynı kuyu içi başlangıç su yüksekliği (H_0) için b'nin zaman (t) ve tesir yarıçapı ile (r) ile değişiminin C katsayısına yani akifer hidrolik iletkenlik katsayısının (T) kuyu yarıçapına (r_k) oranına bağlı olduğu görülür. Buradan da anlaşılabacağı üzere b'nin standart kuyu beslenme düşümü (h/H_0) – standart beslenme tesir yarıçapı (r) eğrisinin eğimini belirlemesi, T/r_k oranına bağlıdır. Yukarıdaki eşitliklerde b ile ifade edilen bu parametre $(h/H_0) - (r)$ eğrisinin eğimini (yayılmasını) belirlemesinden esinlenerek beslenme konisi yayılma katsayısı (BKYK) olarak isimlendirilmiştir.

Ayrıca Denklem (4.22)'de boyut analizi yapılırsa b parametresinin boyutunun 1/L mertebesinde olduğu görülür.

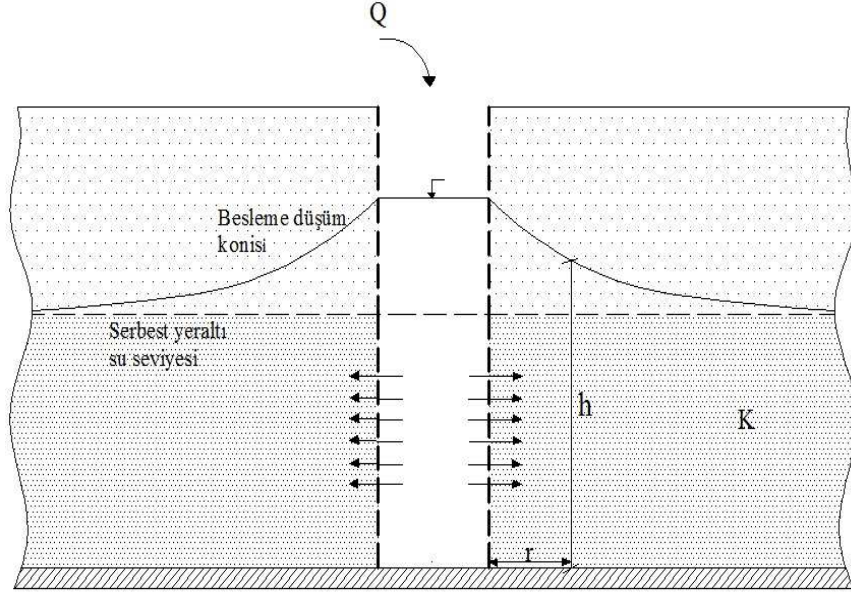
$$\frac{[L]}{[L]} = b \frac{\left(\frac{\overbrace{[L]^m}^C \overbrace{[L]^K}^K}{\underbrace{[L]}_{I_k}} \right) [T] + [L]}{[L]} \rightarrow b = \frac{1}{[L]} = [L]^{-1} \quad (4.28)$$

4.2 Basıncsız Akiferler

4.2.1 Sürekli beslenme

Akiferin basıncsız olması akifer kalınlığının yani kuyudan akifere su geçecek kısmın zamanla değişeceğini belirtir. Beslenmenin sürekli olması ise bir önceki bölümde de belirtildiği gibi kuyudan akifere geçen su miktarı karşılandığından, kuyu içi başlangıç su yüksekliğinin zamanla değişmeyip sabit kalacağı anlamına gelir. Basıncsız akiferde dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olduğu durumda, silindirik bir hacmin cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu hacimden cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır. Burada yapılacak olan hesaplamanın basınçlı akiferde yapılandan en önemli farkı hesaplamada göz önünde bulundurulanan akifer kalınlığının sabit olmayıp yeraltı su seviyesine bağlı olarak değişmesidir. Sürekli beslenme durumunda basıncsız bir akifere ait çizim ve gerekli notasyonlar Şekil 4.4 'te gösterilmiştir.

Akiferin basıncsız olması akifer kalınlığının yani kuyudan akifere su geçecek kısmın zamanla değişeceğini belirtir. Beslenmenin sürekli olması ise bir önceki bölümde de belirtildiği gibi kuyudan akifere geçen su miktarı karşılandığından, kuyu içi başlangıç su yüksekliğinin zamanla değişmeyip sabit kalacağı anlamına gelir. Basıncsız akiferde dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olduğu durumda, silindirik bir hacmin cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu hacimden cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır. Buna göre r yarıçaplı silindirik yüzeyli kesitten çıkan debi aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.



Şekil 4.4 : Basıncsız akiferde sürekli beslenme.

Buna göre r yarıçaplı silindirik yüzeyli kesitten çıkan debi aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.

$$\left. \begin{aligned} A &= 2\pi r h \\ V &= K i \\ i &= \frac{dh}{dr} \end{aligned} \right\} Q = \underbrace{2\pi r h}_A \underbrace{K \frac{dh}{dr}}_V \quad (4.29)$$

Denklem (4.29)'da aynı değişken ve türevleri bir tarafa toplanırsa,

$$\frac{dr}{r} = \frac{2\pi K}{Q} h dh \quad (4.30)$$

elde edilir.

Bu eşitliğin integrali alınacak olursa önce sabitler integral dışına taşınır. Ardından sınır değerler yerlerine konularak integral alma işlemi tamamlanır.

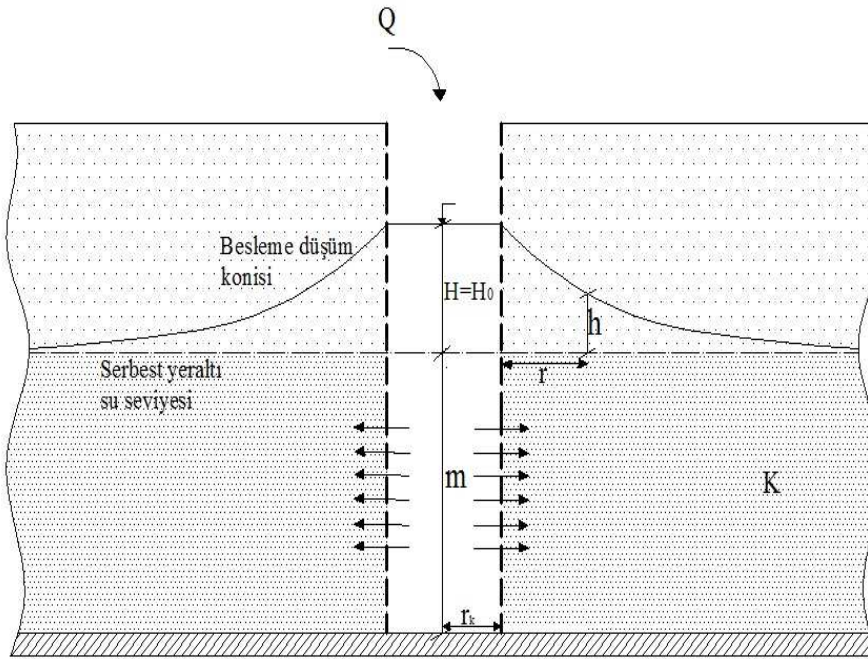
$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi K}{Q} \int_{h_1}^{h_2} h dh \rightarrow \ln(r_2 - r_1) = \frac{2\pi K}{Q} (h_2^2 - h_1^2) \quad (4.31)$$

Son eşitlikte Q yalnız bırakılırsa çözümü aranılan debi değeri elde edilir.

$$Q = \frac{2\pi K(h_2^2 - h_1^2)}{\ln(r_2 - r_1)} \quad (4.32)$$

4.2.2 Süreksiz beslenme

Beslenmenin sürekli olmadığı durumunda bir önceki bölümde de belirtildiği gibi beslenme devam etmediğinden kuyudan akifere geçen su miktarı karşılanamaz. Bu durumun doğal sonucu olarak kuyudaki başlangıç su yüksekliği zamanla değişir (bak Şekil 4.5). Basıncsız akiferde dengeli akım şartlarındaki beslenmenin sürekli olmadığı durumda, silindirik şekilli kuyu cidarında süreklilik denklemi (kütlenin korunumu ilkesi) yazılacak olursa, ilgili denklem gereği bu kuyudan cidara giren debi ile cidardan akifere geçen debi eşit olmalıdır.



Şekil 4.5 : Basıncsız akiferde süreksiz beslenme.

Buna göre kuyunun silindirik yüzeyli kesitinden çıkan debi cidardaki dengeye göre aşağıda görüldüğü şekilde hesaplanır.

Kuyu tarafından giren miktar (Q_1) = Akifer tarafından çıkan miktar (Q_2)

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow \pi \times r_k^2 \frac{dH}{dt} = 2 \pi r_k (m + H) K \frac{dh}{dr} \quad (4.33)$$

Yazılan eşitlikte yapılacak sadeleştirmelerden sonra aynı değişken ve türevleri bir tarafa toplanacak şekilde bir matematiksel düzenleme yapılırsa,

$$\frac{dh}{dr} = \frac{r_k}{2K(m+H)} \frac{dH}{dt} \quad (4.34)$$

elde edilir.

Denklem (4.34)'ün çözümüne kısım 4.1'de Denklem (4.9) için önerilen akifer içinde oluşan beslenme düşümü – tesir yarıçapı eğrisinin, ifadesi $h = a e^{-br}$ olarak bilinen

üssel (exponansiyel) eğriye uyduğu varsayımı ile devam edilirse aşağıda açıklanacak eşitlikler elde edilir.

Genel denklemi bilinen bu üssel eğrinin, çözümü üzerinde çalışılan ve başlangıç şartları bilinen probleme uyarlanarak özel denkleminin çözümü kısım 4.1’de sırası ile 4.11, 4.12 denklemleri yardımıyla bulunmuştur. Özel denklemi elde edilen eğrinin Denklem (4.34)’ün çözümünde kullanılabilmesi için bu eşitliğin tesir yarıçapına göre türev halinin bulunması gerekir. Bu da yine kısım 4.1’de Denklem (4.13) ile hesaplanmış ve $\frac{dh}{dr} = -bHe^{-br}$ sonucu elde edilmiştir. Bulunan bu dh/dr oranı

Denklem (4.34)’te yerine yazılarak

$$\frac{dh}{dr} = \frac{r_k}{2K(m+H)} \frac{dH}{dt} = -bHe^{-br} \quad (4.35)$$

elde edilir.

Son eşitlik aynı değişken ve türevleri bir tarafa toplanarak düzenlenirse,

$$\frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{2bKe^{-br} dt}{r_k} \quad (4.36)$$

sonucuna varılır.

Sonraki adım olarak bu denklemde kuyu içindeki su yüksekliğinin değerine karşılık gelen H hesaplanır. Bunun için öncelikle eşitlikte $r = 0$ durumuna bakılır, çünkü kuyu içindeki değişimin r ’ye göre incelenebilmesi r ’nin ancak 0 değeri ile mümkündür. Bu durum sadece $r = 0$ değerinin kuyu içi değişimi, geriye kalan tüm r değerlerinin akifer içi yani r değerine karşılık gelen mesafedeki değişimi göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Denklem (4.36)’da $r = 0$ değeri yerine yazılırsa, kuyu cidarı dengesinin ifadesi olarak

$$\frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{2bK dt}{r_k} \quad (4.37)$$

elde edilir.

Kuyu cidarı dengesi denkleminde (KCDD) sabit değerler olan b , K ve r_k integral dışında olacak şekilde eşitliğin integrali alınırsa,

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{2bK}{r_k} \int_0^t dt \quad (4.38)$$

denklemine ulaşılır.

Çözümüne denklemin sol tarafından başlanacak olursa, eşitliğin bu kısmının basit kesirlere ayırma yöntemi (BKAY) ile integralinin alınabileceği görülür. Bu yöntem ile çözüme devam edilirse sırası ile aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{1}{(m+H)H} dH \rightarrow \frac{1}{(m+H)H} = \frac{A}{(m+H)} + \frac{B}{H} \quad (4.39)$$

Bu ifadedeki A ve B birer sabit katsayılarıdır. Eşitliğin sol tarafında paydalar eşitlenerek denklemin çözümüne devam edilir.

$$\frac{1}{(m+H)H} = \frac{AH}{(m+H)H} + \frac{B(m+H)}{(m+H)H} = \frac{AH+B(m+H)}{(m+H)H} \quad (4.40)$$

Denklemden paydalar eşit olduğundan paylar da eşit olmalıdır.

$$AH+Bm+BH=1 \rightarrow H(A+B)+Bm=1 \quad (4.41)$$

$$\left. \begin{array}{l} Bm=1 \rightarrow B=\frac{1}{m} \\ A+B=0 \end{array} \right\} A+\frac{1}{m}=0 \rightarrow A=-\frac{1}{m} \quad (4.42)$$

Değerleri bulunan A ve B katsayıları Denklem (4.39)'da yerlerine yazılarak integral işlemine devam edilirse,

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)H} = \int_{H_0}^H -\frac{1}{m} \frac{dH}{(m+H)} + \int_{H_0}^H \frac{1}{m} \frac{dH}{H} \quad (4.43)$$

bulunur.

Sabit değerler integral dışına alınarak çözüme devam edilirse sırası ile aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{1}{m} \int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)} + \frac{1}{m} \int_{H_0}^H \frac{dH}{H} \quad (4.44)$$

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{1}{m} \ln(m+H) \Big|_{H_0}^H + \frac{1}{m} \ln(H) \Big|_{H_0}^H \quad (4.45)$$

Son eşitlikte sağ taraf -1/m parantezine alınıp gerekli matematiksel düzenlemeler yapılırsa,

$$\int_{H_0}^H \frac{dH}{(m+H)H} = -\frac{1}{m} \left[\ln(m+H) \Big|_{H_0}^H - \ln(H) \Big|_{H_0}^H \right] = -\frac{1}{m} \ln \left(\frac{m+H}{H} \right) \Big|_{H_0}^H \quad (4.46)$$

elde edilir.

Bu aşamada çözümü aranan ve sol tarafının çözümü son eşitlikle bulunan Denklem (4.38)'e dönülerek, sağ tarafının da integrali alınır ve sınır değerler yerlerine yazılırsa sırası ile aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$-\frac{1}{m} \text{Ln} \left(\frac{m+H}{H} \right) \Big|_{H_0}^H = -\frac{2bK}{r_k} \int_0^t dt = -\frac{2bK}{r_k} t \Big|_0^t \quad (4.47)$$

$$-\frac{1}{m} \left[\text{Ln} \left(\frac{m+H}{H} \right) - \text{Ln} \left(\frac{m+H_0}{H_0} \right) \right] = -\frac{2bK}{r_k} t \quad (4.48)$$

Denklem (4.48)'de gerekli matematiksel düzenlemeler yapılarak

$$\text{Ln} \frac{\left(\frac{m+H}{H} \right)}{\left(\frac{m+H_0}{H_0} \right)} = \frac{2bKm}{r_k} t \quad (4.49)$$

sonucu elde edilir.

Denklem (4.49)'da her iki tarafın üsseli (exponansiyeli) alınır ve gerekli matematiksel düzenlemeler yapılsa çözümü aranan H değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\frac{m+H}{H}}{\frac{m+H_0}{H_0}} = e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \rightarrow \frac{m+H}{H} = \frac{m+H_0}{H_0} e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \quad (4.50)$$

$$\frac{m}{H} + 1 = \left(\frac{m+H_0}{H_0} \right) e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \rightarrow \frac{m}{H} = \left[\left(\frac{m+H_0}{H_0} \right) e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \right] - 1 \quad (4.51)$$

$$H = \frac{m}{\left[\left(\frac{m+H_0}{H_0} \right) e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \right] - 1} \quad (4.52)$$

Son eşitlik ile elde edilen ve kuyudaki su seviyesini ifade eden H değeri, kısım 4.1'deki 4.12 numaralı denklemde yerine yazılırsa, akiferdeki su seviyesinin değişimine karşılık gelen h değeri elde edilir.

$$h = \frac{m}{\left[\left(\frac{m+H_0}{H_0} \right) e^{\frac{2bKm}{r_k} t} \right] - 1} e^{-br} \quad (4.53)$$

Akifer içi ortamın noktadan bağımsız (homojen) ve yönden bağımsız (izotrop) olması durumunda son denklemdeki $m \times K$ çarpımı T_0 akifer hidrolik iletkenlik katsayısını verir. Burada akifer hidrolik iletkenlik katsayısının T_0 ile gösterilmesi hesapta göz önünde bulundurulmuş akifer kalınlığının yeraltı su seviyesine bağlı olarak zamanla değişmesinden kaynaklanmaktadır. Buna göre eşitlik yeniden düzenlenirse,

$$h = \frac{m}{\left[\left(\frac{m + H_0}{H_0} \right) e^{\frac{2bT_0}{r_k} t} \right] - 1} e^{-br} \quad (4.54)$$

elde edilir.

Son denklemde değerleri sabit olan T ve r_k 'nın oranına C denilir ve eşitliğin her iki tarafı kuyu içi başlangıç su seviyesine eşit olan H_0 değerine bölünerek gerekli matematiksel düzenlemeler yapılırsa, boyutsuz bir eşitlik olan,

$$\frac{h}{H_0} = \frac{\frac{m}{H_0}}{\left[\left(\frac{m}{H_0} + 1 \right) e^{2bCt} \right] - 1} e^{-br} \quad (4.55)$$

ifadesi elde edilir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Kısım 4.1.2’de basınçlı akiferde süreksiz beslenme durumu için boyutsuz bir eşitlik olarak elde edilen Denklem (4.22) ve kısım 4.2.2’de basınçsız akifer için boyutsuz olarak elde edilen Denklem (4.55)’e ait grafikler, bu eşitliklerdeki parametrelere değer aralıkları verilerek MATLAB programında hazırlanan kodlar yardımı ile çizdirilmiştir. Grafikler elde edilirken parametreler için belirlenen değer aralıkları aşağıda belirtilmiştir.

$$10 < C < 100 \text{ m/gün}$$

$$0 < b < 3 \text{ m}^{-1}$$

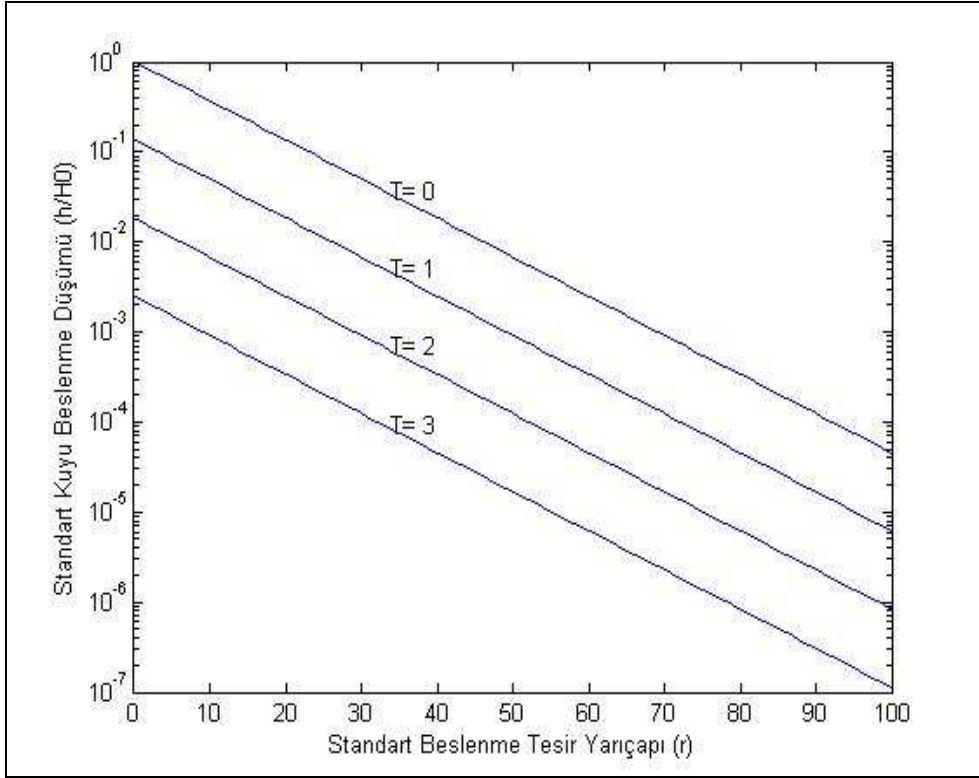
$$0 < t < 3 \text{ gün}$$

$$0 < r < 100 \text{ m}$$

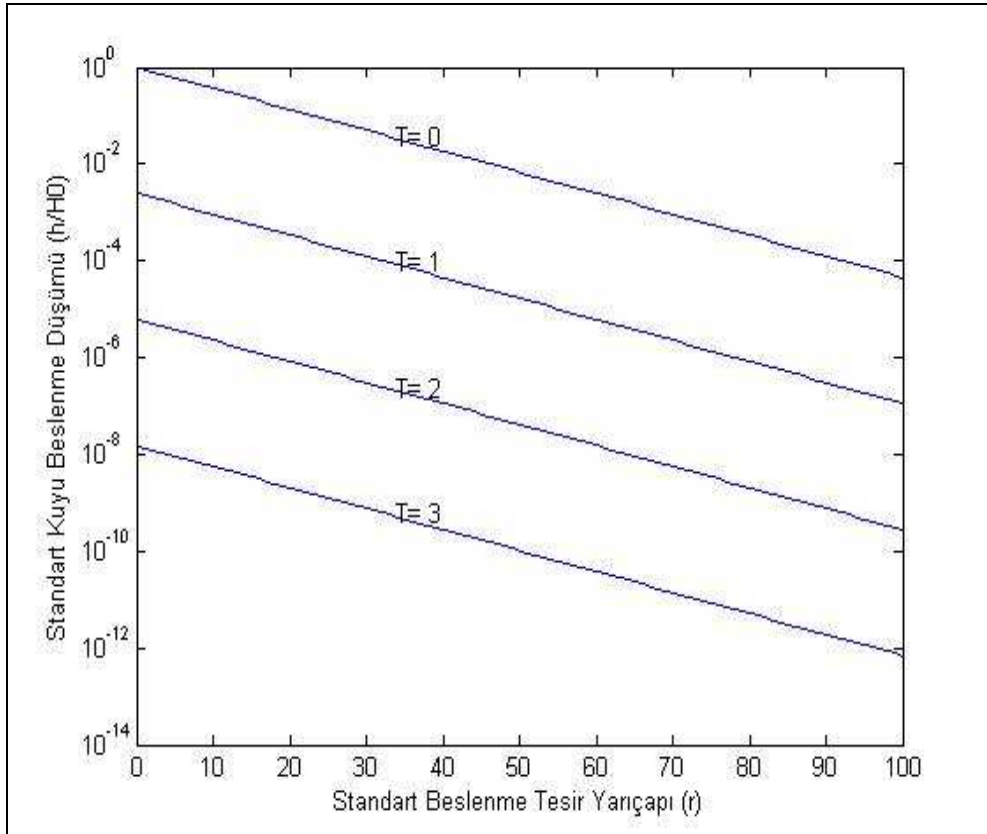
$$10 < m/H_0 < 100$$

Denklem (4.22)’de $C=10 \text{ m/gün}$, $b=0.1 \text{ m}^{-1}$, t ve r parametreleri için de yukarıda belirtilen değer aralıkları alınarak standart kuyu beslenme düşümü (SKBD), (h/H_0) , – standart beslenme tesir yarıçapı (SBTY), (r) , grafiği çizdirilecek olunursa Şekil 5.1 elde edilir. C parametresinin eşitlikteki etkisini incelemek için b parametresi sabit tutularak C ’nin değeri 30 m/gün alınır Şekil 5.2’de görülen grafik elde edilir. Aynı şekilde b parametresinin etkisini incelemek için C sabit tutulup $b=0.2 \text{ m}^{-1}$ alınır Şekil 5.3 elde edilir.

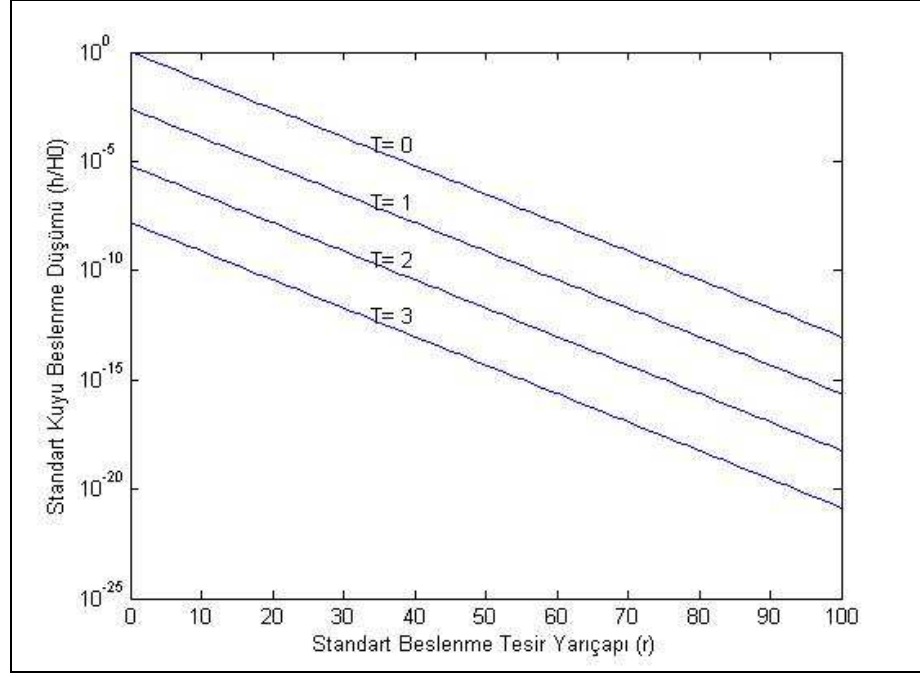
Denklem (4.22)’de $C=10 \text{ m/gün}$, $b=0.1 \text{ m}^{-1}$, t ve r parametreleri için de yukarıda belirtilen değer aralıkları alınarak standart kuyu beslenme düşümü (SKBD), (h/H_0) , – standart beslenme tesir yarıçapı (SBTY), (r) , grafiği çizdirilecek olunursa Şekil 5.1 elde edilir. C parametresinin eşitlikteki etkisini incelemek için b parametresi sabit tutularak C ’nin değeri 30 m/gün alınır Şekil 5.2’de görülen grafik elde edilir. Aynı şekilde b parametresinin etkisini incelemek için C sabit tutulup $b=0.2 \text{ m}^{-1}$ alınır Şekil 5.3 elde edilir.



Şekil 5.1 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.

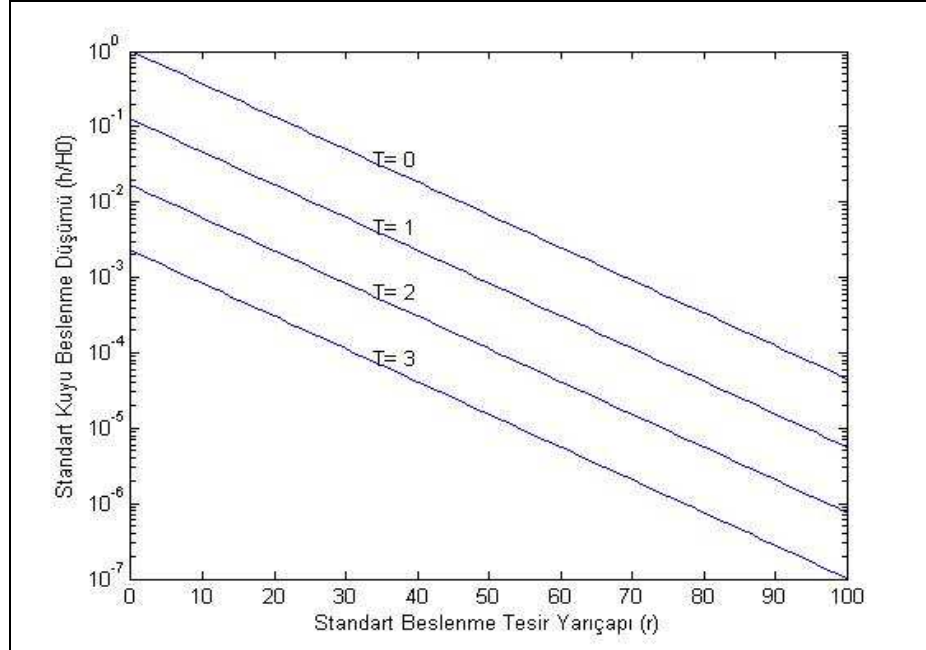


Şekil 5.2 : Basınçlı akiferde $C=30$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.



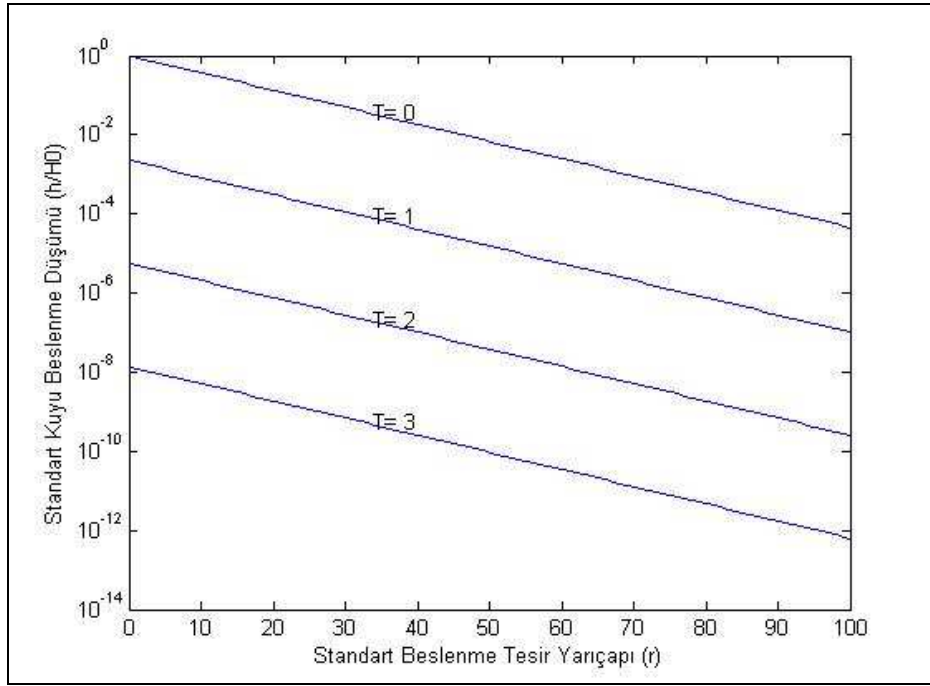
Şekil 5.3 : Basıncılı akiferde $C=10$, $b=0.2$ değerleri için SKBD – SBTY grafiği.

Denklem (4.55)'de $C=10$ m/gün, $b=0.1$ m⁻¹, $m/H_0=10$, t ve r parametreleri için de yukarıda belirtilen değer aralıkları alınarak standart kuyu beslenme düşümü (SKBD), (h/H_0) , – standart beslenme tesir yarıçapı (SBTY), (r) , grafiği çizdirilecek olunursa Şekil 5.4 elde edilir.



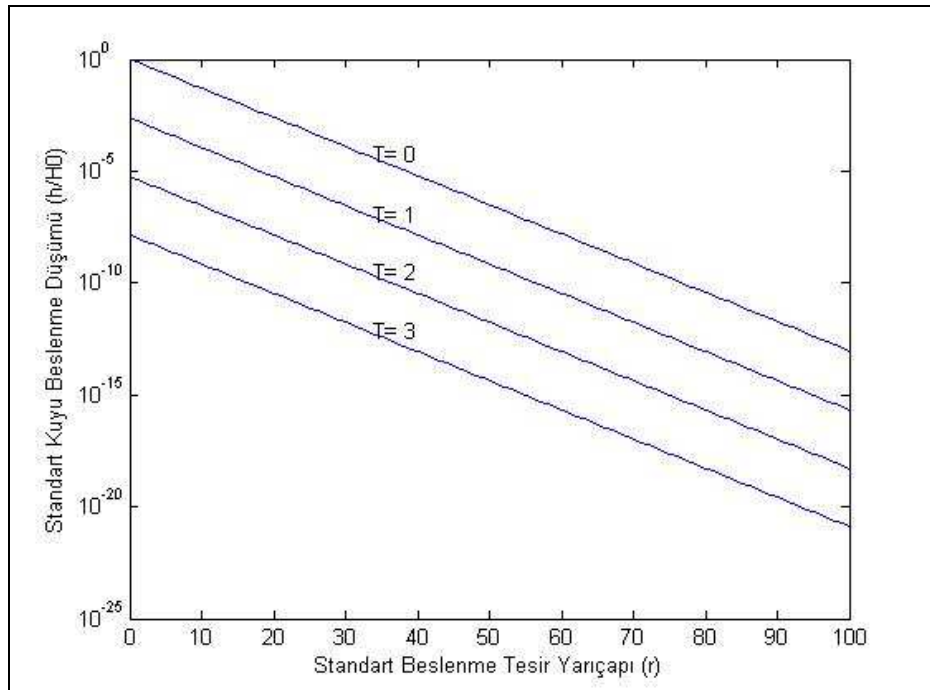
Şekil 5.4 : Basıncısız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – SBTY grafiği.

C parametresinin eşitlikteki etkisini incelemek için b ve m/H_0 değerleri sabit tutularak C'nin değeri 30 m/gün alınırsa Şekil 5.5'de görülen grafik elde edilir.



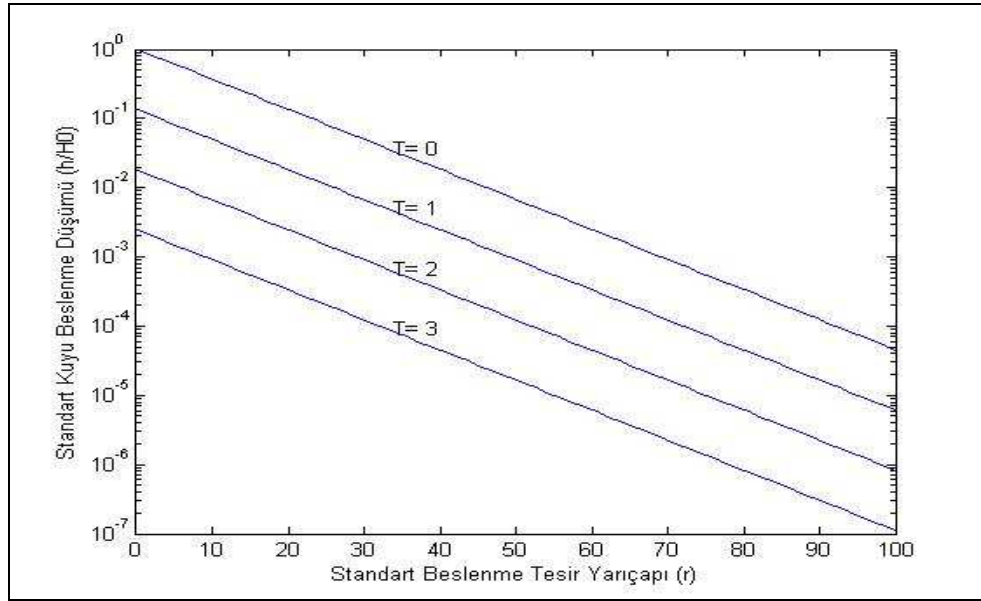
Şekil 5.5 : Basıncsız akiferde $C=30$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – SBTY grafiği.

Eşitlikte b parametresinin etkisini incelemek için C ve m/H_0 değerleri sabit tutularak b değeri 0.2 m^{-1} alınırsa Şekil 5.6 elde edilir.



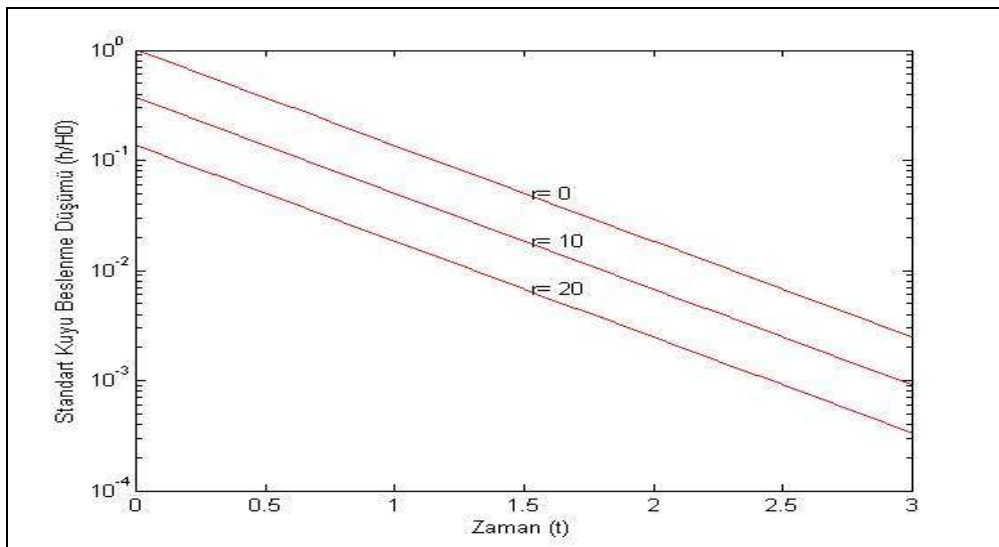
Şekil 5.6 : Basıncsız akiferde $C=10$, $b=0.2$, $m/H_0=10$ için SKBD – SBTY grafiği.

Denklem (4.55)'de m/H_0 oranının etkisini belirlemek için C ve b değerleri sabit tutularak m/H_0 değeri 100 alınır Şekil 5.7 elde edilir.

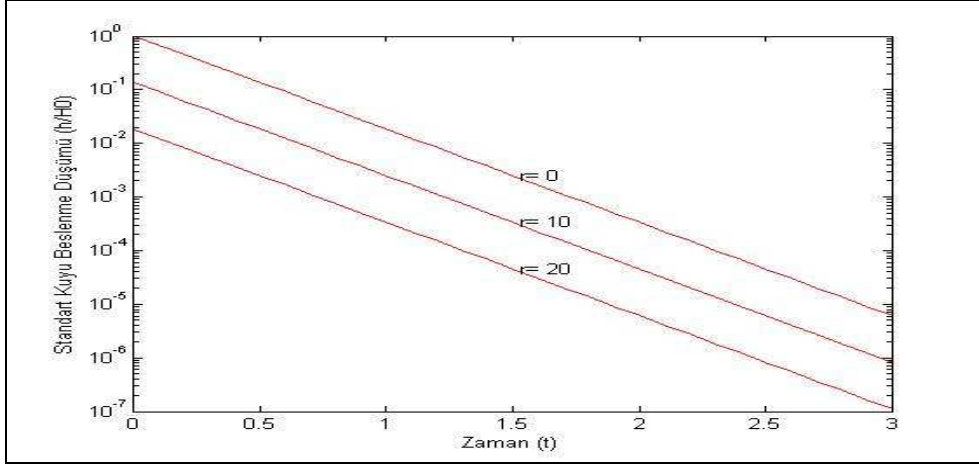


Şekil 5.7 : Basıncsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=100$ için SKBD – SBTY grafiği.

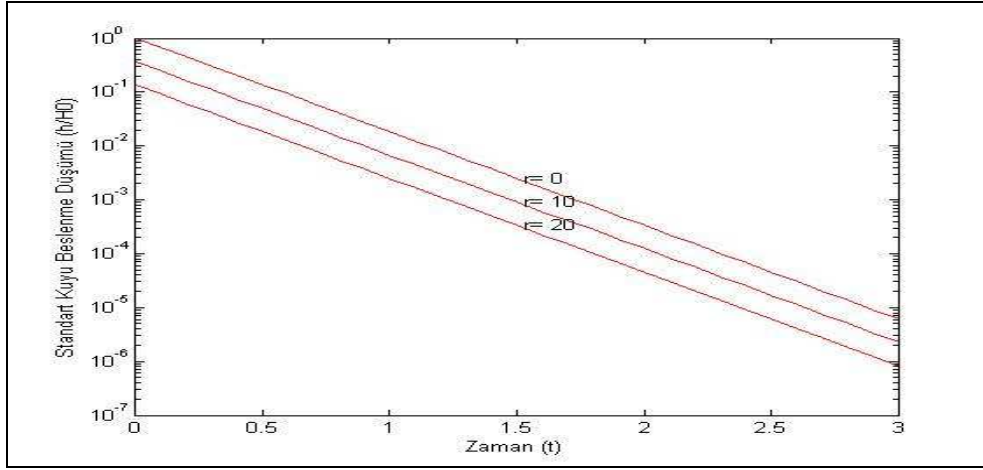
Ayrıca Denklem (4.22) ve Denklem (4.55)'in SKBD-Zaman (t) grafiği, uygulama alanındaki pratikliği de göz önünde tutularak, aynı değer aralıklarında yukarıdaki adımlar tekrar edilmek suretiyle çizdirilirse aşağıdaki sunulan şekiller elde edilir (bak Şekil 5.8-5.14). Bu grafikler yardımı ile hem kuyuda hem de kuyudan belirli bir mesafe uzaklıkta bulunan noktalarda zamanla meydana gelecek düşümler gözlemlenebilir.



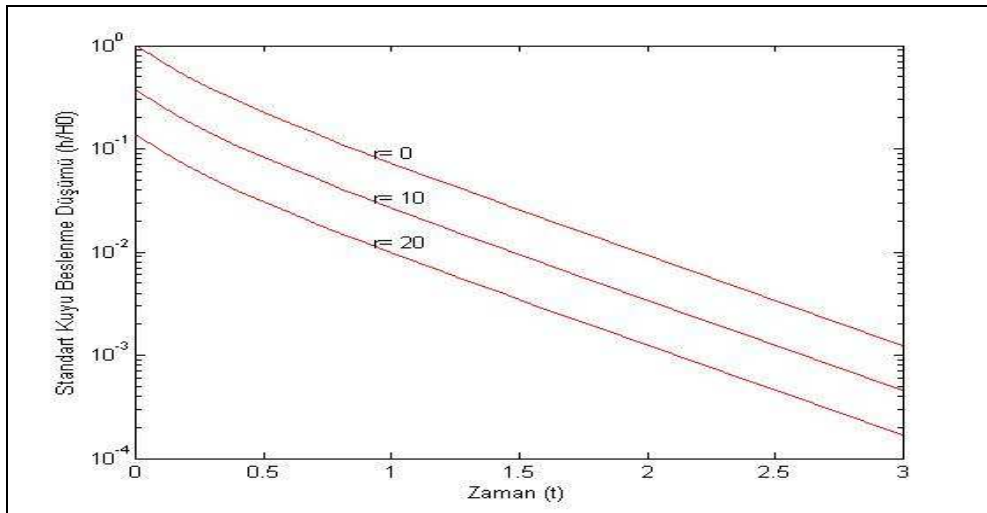
Şekil 5.8 : Basıncılı akiferde $C=10$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği.



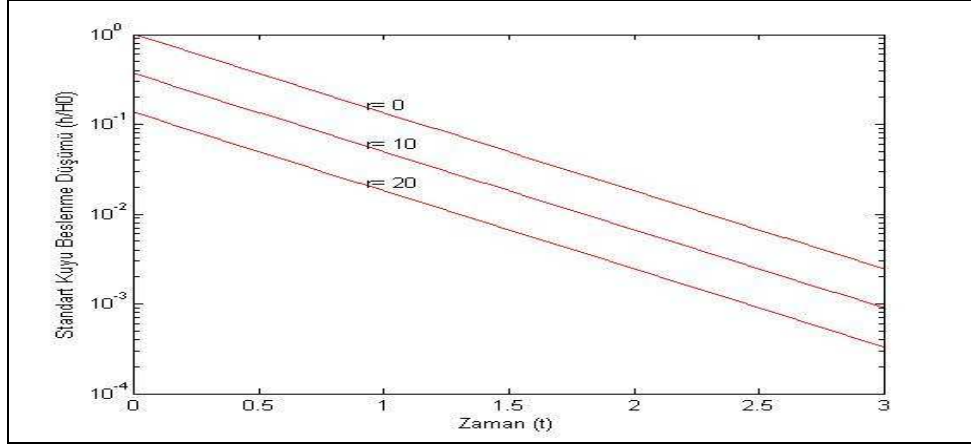
Şekil 5.9 : Basınçlı akiferde $C=10$, $b=0.2$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği.



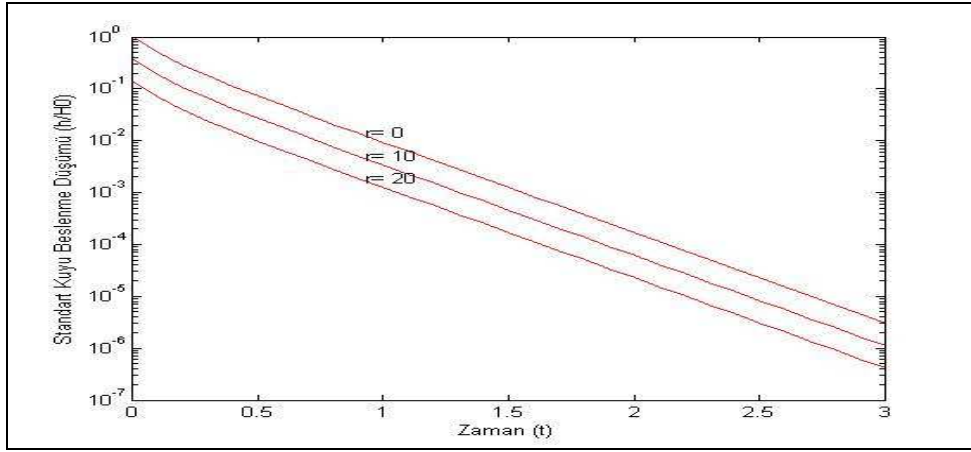
Şekil 5.10 : Basınçlı akiferde $C=20$, $b=0.1$ değerleri için SKBD – Zaman grafiği.



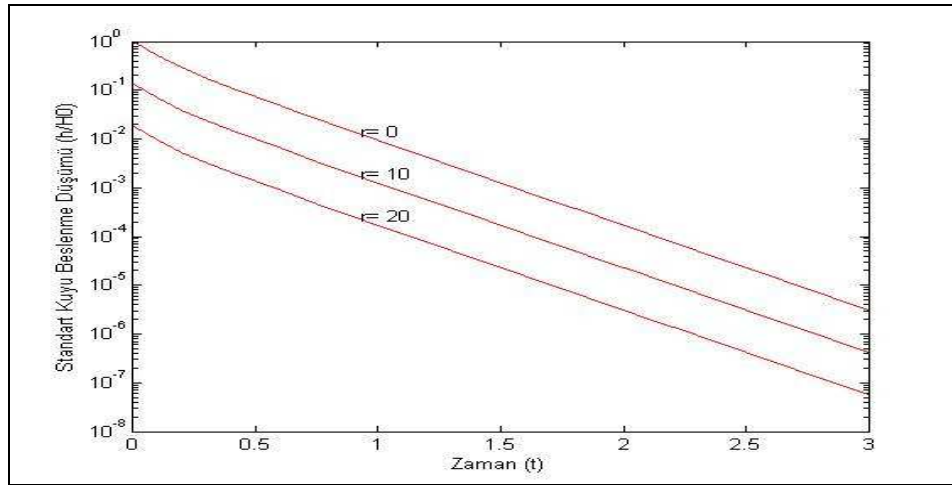
Şekil 5.11 : Basınsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.



Şekil 5.12 : Basıncsız akiferde $C=10$, $b=0.1$, $m/H_0=100$ için SKBD – Zaman grafiği.



Şekil 5.13 : Basıncsız akiferde $C=20$, $b=0.1$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.



Şekil 5.14 : Basıncsız akiferde $C=10$, $b=0.2$, $m/H_0=10$ için SKBD – Zaman grafiği.

KAYNAKLAR

- Abu-Taleb, M. F.**, 1999: The use of infiltration field tests for groundwater artificial recharge, *Environmental Geology*, **37** (1-2), 64-71.
- Aish, A., De Smedt, F.**, 2005: Modeling of a groundwater mound resulting from artificial recharge in the Gaza Strip, Palestine, Faculty of Applied Sciences, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- Al-Assa'd, T. A., Abdulla, F. A.**, 2010: Artificial groundwater recharge to a semi-arid basin: case study of Mujib aquifer, Jordan, *Environ Earth Sci*, **60**, 845-859.
- Avcı, İ.**, 2000: İleri akışkanlar mekaniği, Ders Notu, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı, İstanbul, Türkiye.
- Bouwer, H.**, 2002: Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, *Hydrogeology Journal*, **10**, 121-142.
- Cachero, J. L. A., Gomez, J. A., Diaz, J. M.**, 2001: Artificial recharge as a technique to alleviate the overexploitation of small aquifers located on the Spanish Mediterranean Coast, Project of CICYT, HID 96-1326.
- Chenini, I., Mammou, A. B.**, 2010: Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling, *Computers & Geosciences*, **36**, 801-817.
- Demir, S.**, 2008: Isparta ve yakın çevresi yeraltı sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal incelenmesi ve içme suyu kalitesinin izlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Dirik, K.**, 2007: Su döngüsü ve yeraltı suyu (Hydrologic cycle and groundwater), Ders Notu, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.
- Dixit, A., Upadhyay, M.**, 2005: Augmenting groundwater in Kathmandu Valley: Challenges and possibilities, Nepal Water Conservation Foundation Kathmandu, Nepal.
- Flint, A. L., Ellett, K. M.**, 2004: The role of the unsaturated zone in artificial recharge at San Geronio Pass, California, *Vadose Zone Journal*, **3**, 763-774.
- Hsieh, H. H., Lee, C. H., Ting, C. S., Chen, J. W.**, 2010: Infiltration mechanism simulation of artificial groundwater recharge: a case study at Pingtung Plain, Taiwan, *Environ Earth Sci*, **60**, 1353-1360.

- Kaledhonkar, M. J., Singh, O. P., Ambast, S.K., Tyagi, N. K., Tyagi, K. C.,** 2003: Artificial Groundwater Recharge through Recharge Tube Wells: Case Study, *IE (I) Journal-AG*, 28-32.
- Khepar, S. D., Yadav, A. K., Sondhi, S. K., Sherring, A.,** 2000: Modelling surplus canal water releases for artificial recharge of groundwater through surface drainage systems, *Irrig Sci*, **19**, 95-100.
- Kumar, M. G., Agarwal, A. K., Bali, R.,** 2008: Delineation of potential sites for water harvesting structures using Remote Sensing and GIS, *J. Indian Soc. Remote Sens.*, **36**, 323-334.
- Kumar, N. N., Aiyagari, N.,** 1997: Artificial recharge of groundwater, Lecture Note, Civil Engineering Department, Virginia Technical University.
- Majumdar, P. K., Ram, S., Rao, P. R.,** 2009: Artificial recharge in multiaquifers of a mountainous watershed, *Journal of Hydrologic Engineering*, **14**, 215-222.
- Mariolakos, I., Fountoulis, I., Spyridonos, E., Mariolakos, D., Andreadakis, E.,** 2001: Artificial recharge of the underground karstic aquifer of Farsala Area (Thessaly, Central Greece), 10th Biennial Symposium on the Artificial Recharge of Groundwater, Tucson, AZ.
- Moghim, H.,** 2006: The artificial recharge of Hashtgerd Plain (NW of Iran), 5th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development, Venice, Italy.
- Mohammedjemal, A.,** 2006: Assesment of artificial graoundwater recharge using greenhouses runoff, Thesis of Master of Science., International Institute For Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands.
- Peksezer, A.,** 2010: Artificial recharge of groundwater in The Küçük Menderes River Basin, Thesis of Master of Science, Geological Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Raju, N. J., Reddy, T. V. K., Munirathnam, P.,** 2006: Subsurface dams to harvest rainwater— a case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India, *Hydrogeology Journal*, **14**, 526-531.
- Sayana, V. B. M., Arunbabu, H., Kumar, L. M., Ravichandran, S., Karunakaran, K.,** 2010: Groundwater responses to artificial recharge of rainwater in Chennai, India: a case study in an educational institution campus, *Indian Journal of Science and Technology*, **3**, 124-130.
- Somay, A. M.,** 2005: Yerküre ve su, Ders Notu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.
- Şen, Z.,** 2003: Yeraltı suyu (Hidrojeoloji), Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Tizro, A. T., Voudouris, K. S., Akbari, K.,** 2010: Simulation of a groundwater artificial recharge in a semi-arid region of Iran, *Irrigation And Drainage*.
- Url-1** <<http://cografyalise.blogcu.com/yeralti-sulari-ve-kaynaklar/3874563>>, alındığı tarih 15.02.2011.

Voudouris, K., Diamantopoulou, P., Giannatos, G., Zannis, P., 2006:
Groundwater recharge via deep boreholes in the Patras Industrial Area
aquifer system (NW Peloponnesus, Greece), *Bull Eng Geol Env*, **65**,
297-308.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mehmet Fatih DEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi: Mersin, 1985
Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2004 - 2009