Yerbilimleri, 22 (2000), 95-107
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Antalya Traverten Platosu toprak zonunun akifere koruyucu örtü olarak doğal arındırma özellikleri

Natural attenuation characteristics of the Antalya Travertine Plateau soil zone as a protective cover for the aquifer

Aylin BAŞAL, Mehmet EKMEKÇİ
Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü, 06532, Beytepe-ANKARA

ÖZ

Vadoz bölge, kirleticinin yeraltısuyuna ulaşmadan önce geçirdiği fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin ve hareketinin tanımlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu süreçlerin önemli bir bölümü vadoz bölgenin en üst kesimini oluşturan toprak bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu çalışma kapsamında, Antalya Traverten Platosu'nda yayılım gösteren toprak örtüsünün filtreleme, iyon değişimi ve geciktirme etkisi özellikleri belirlenmiş ve bu etkiler ortamın jeohidrolojik koşulları ile birlikte toprak örtüsünün koruma işlevi açısından değerlendirilmiştir. Çalışma alanının güneyindeki çöküntü alanlarında traverten içerisinde dolgu malzemesi olarak bulunan, geciktirme etkisinin 300'ün üzerinde olduğu ve vadoz bölge kalınlığının 200-250 m'yi bulduğu topraklar kirleticinin daha uzun süreli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler etkisinde kalmasını sağlamaktadır. Bu tür topraklar, koruyucu örtü işlevleri yüksek topraklar olarak gruplanmıştır. Çalışma alanının orta kesiminde görülen, geciktirme etkileri 100-200 arasında olan topraklar, kalınlıkları fazla olmamasına karşın, bu alanlarda vadoz bölgenin kalın olması nedeniyle orta derecede koruyucu örtü işlevine sahip topraklardır. Koruyucu örtü işlevi düşük olarak sınıflandırılan topraklar ise özellikle şehir merkezine yakın alanlarda görülen, geciktirme etkisi 200'ün altında olmakla birlikte, toprak derinliğinin düşük ve yeraltısuyu seviyesinin sığ olduğu alanlardır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, çalışma alanında yeraltısuyu kalitesinin korunması amacıyla, kirleticinin doygun olmayan bölgedeki hareketi ve bölgede yayılım gösteren toprak örtüsünün fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir arazi kullanım haritası oluşturulması ve buna bağlı olarak kirlilik kaynağı oluşturabilecek faaliyetlerin kontrol altına alınması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Antalya, doğal arındırma, geciktirme etkisi, toprak bölgesi, traverten, vadoz bölge

ABSTRACT

A sound knowledge of the behavior of the vadose zone is essential for a thorough definition of the physical, chemical and biological processes as well as movement of subsurface water that control the fate of the contaminants. These processes take place to a great extent in soil material that forms the upper part of vadose zone. The filtration, ion exchange and retardation factor for soil cover in the Antalya Travertine Plateau were determined and subsequently these factors were evaluated together with other geohydrological properties of the soil in terms of its protective ability.

In the southern part of the study area where the vadose zone thickness is 200 to 250 m, the contaminants are subjected to physical, chemical and biological processes along relatively a longer period within the soil having a retardation factor above 300 in the depressions and secondary openings. This type of soils is classified as high protective cover areas. Soils in middle part of the area with retardation factor between 100-200, despite the low soil thickness are classified as intermediate protective areas owing to high thickness of vadose zone in these areas. Soils especially around Antalya city with retardation factor below 200, low soil thickness and shallow groundwater level are classified as a low protective cover areas.

Based on the results obtained from this study, it was concluded that the landuse map taking in to account the movement of contaminant in vadose zone and physical, chemical and biological properties of soil cover that control the contaminant fate should be prepared for an effective groundwater protection.

***Key Words**: Antalya, natural attenuation, retardation factor, soil zone, travertine, vadose zone*

GİRİŞ

Yeraltısuyu kirliliği ile ilgili olarak yapılan çalışmalar genellikle akiferi kesen kuyularda ve/veya akiferi boşaltan kaynaklarda yapılan gözlemlere dayanmaktadır. Bununla birlikte, alınan örneklerde herhangi bir kirleticiye rastlanmaması veya çeşitli amaçlarla önerilen sınırların altında kirletici belirlenmesi, akiferin "temiz", "kirlenme sürecinde" veya "kirlilik tehdidi altında" olup olmadığının bir göstergesi olamamaktadır.

Yeraltısuyuna katılmadan önce, herhangi bir maddenin (kirleticinin) vadoz bölgedeki hareketi ve bu bölgede bulunduğu süre boyunca geçirdiği fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin tanımlanması, yeraltısuyu kirliliği konusunda ileriye dönük kestirimler yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Gözenekli ortamlarda akım özelliklerine bağlı olarak vadoz bölgede daha etkin arındırma süreçleri görülmektedir. Karstik ortamlarda ise yüksek gözeneklilik ve geçirimlilik gibi özellikler, bu tür ortamlarda kirleticinin hızlı akım koşullarında taşınmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler kirletici üzerinde en az düzeyde etkili olmaktadır. Bu nedenle karstik alanlarda yayılım gösteren toprak örtüsü, kirletici taşınımı açısından önemli işlevlere sahiptir.

Vadoz bölgedeki yüzeyaltısuyu akımı doygun bölgede meydana gelen yeraltısuyu akımından farklı kuvvetler tarafından denetlenmektedir. Bu bölgede su ve kirleticinin advektif hareketi üzerinde etkili olan kuvvet, ortamı oluşturan katı tanelerin yüzeylerinde oluşan gerilimden kaynaklanan negatif basınç yüküdür. Negatif basınç yükü, vadoz bölge profilindeki nem içeriği dağılımına bağlıdır. Nem içeriği yükseldikçe ortamın hidrolik iletkenliği artmakta, dolayısıyla kirletici daha hızlı hareket edebilmektedir. Nem içeriği düşük olan kesimde kirletici daha uzun süre kalmakta, bu nedenle bu kesimlerde kimyasal ve biyolojik dönüşümlerin baskın olduğu arındırma süreçleri daha etkili olmaktadır.

Advektif taşınımın yanısıra, kirletici hareketinde etkili olan diğer bir süreç yayınım (difüzyon) ve dağılım (dispersiyon) olaylarını kapsayan "hidrodinamik dağılım" dır. Çözünmüş maddenin yeraltısuyu içerisindeki taşınımı her zaman aynı hızda gerçekleşmez. Ortamın gözenekliliğine bağlı olarak farklı hızlara sahip ve farklı akım yollarını izleyen taşınımlar gerçekleşir. Kirletici derişiminde akım yollarına bağlı olarak görülen bu farklılıklar "dağılım" olayı ile açıklanmaktadır. Bunun yanında, kirleticinin konuma bağlı olarak farklı derişimlere sahip olması nedeniyle oluşan derişim gradyanı da kirleticinin derişik olduğu noktadan seyreltik olduğu noktaya doğru hareket etmesini sağlar. Bu olay ise, "yayınım" olarak adlandırmakta ve Fick yasaları ile ifade edilmektedir (Fetter, 1993).

Kirletici yeraltısuyuna ulaşmadan önce vadoz bölgeyi katetmektedir. Kirleticinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle değişim ve dönüşümünün büyük bölümü vadoz bölgenin en üst kesimini oluşturan toprak bölgesinde gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak, kirleticinin bu bölgedeki hareketinin incelenmesi de büyük önem taşımaktadır. Kirletici derişimine etki eden başlıca fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin daha çok vadoz bölgede meydana gelmesine karşın Türkiye'de bugüne kadar yeraltısuyu kirliliğine yönelik çalışmalar doygun bölge için yapılmıştır. Bu çalışmada, Antalya Traverten Platosu'nda karstik bölgelere özgü yüksek gözeneklilik ve geçirimlilik gibi özellikler taşıyan vadoz bölge üzerinde yayılım gösteren toprak örtüsünün kirletici taşınımı açısından etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda Antalya Traverten Platosu toprak örtüsünün arındırma kapasitesini belirleyen faktörlerden filtreleme, iyon değişimi ve geciktirme etkisi belirlenerek bu etkiler ortamın hidrojeolojik koşulları ile birlikte toprak örtüsünün koruma işlevi açısından değerlendirilmiştir.

İNCELEME ALANININ TANITIMI

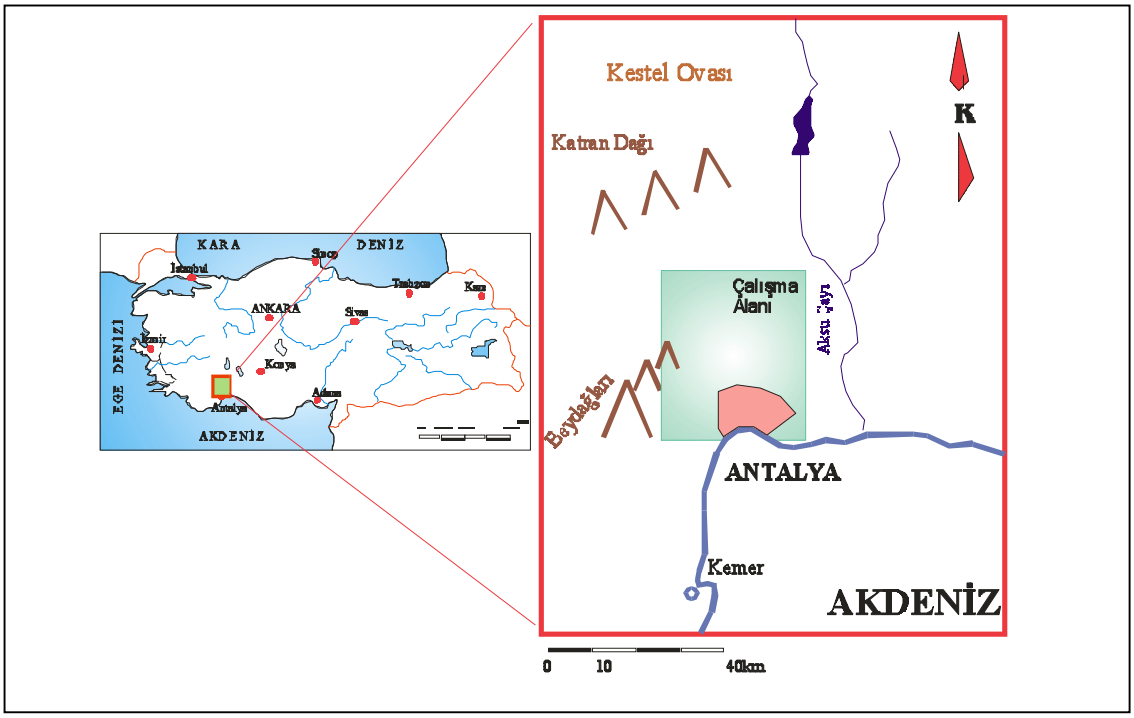
İnceleme alanını oluşturan traverten platosu Antalya ili sınırları içinde yeralmakta, doğuda Aksu vadisi, kuzeyde Torosların güney etekleri, batıda yine Torosların Beydağları serisi ve güneyde Antalya körfezi ile sınırlanan yaklaşık 614 km^2'lik bir alana yayılmaktadır (Şekil 1). Çalışma alanında atıksu sisteminin bulunmaması nedeniyle katı atık alanları, fosseptik çukurlar ve sanayi atıklarının toplandıkları alanlar noktasal, tarımsal alanlarda uygulanan gübreler ve tarım ilaçları ise alansal kirletici kaynaklarını oluştur-maktadır. Dolayısıyla Antalya Traverten Platosu'nda yeraltısuyu kirliliğine neden olabilecek kaynakların arazinin kullanım şekliyle doğrudan bağlantılı olduğu belirlenmiştir.

Antalya Traverten Platosu'nda toprak oluşumunda laterizasyonun egemen olduğu görülmektedir. İnceleme alanını da kapsayan bölgede tarımsal ve coğrafi amaçlı çalışmalar sırasında tanımlanan toprak sınıflamaları dikkate alınarak, bu alandaki toprak türleri ve dağılımları belirlenmiştir. Arazi çalışmalarında, farklı tür ve yayılıma sahip toprakları temsil edecek şekilde 92 toprak örneği alınmıştır. Bu kapsamda özellikle Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü (1993) tarafından hazırlanan toprak haritalarından yararlanılmıştır (Şekil 2).

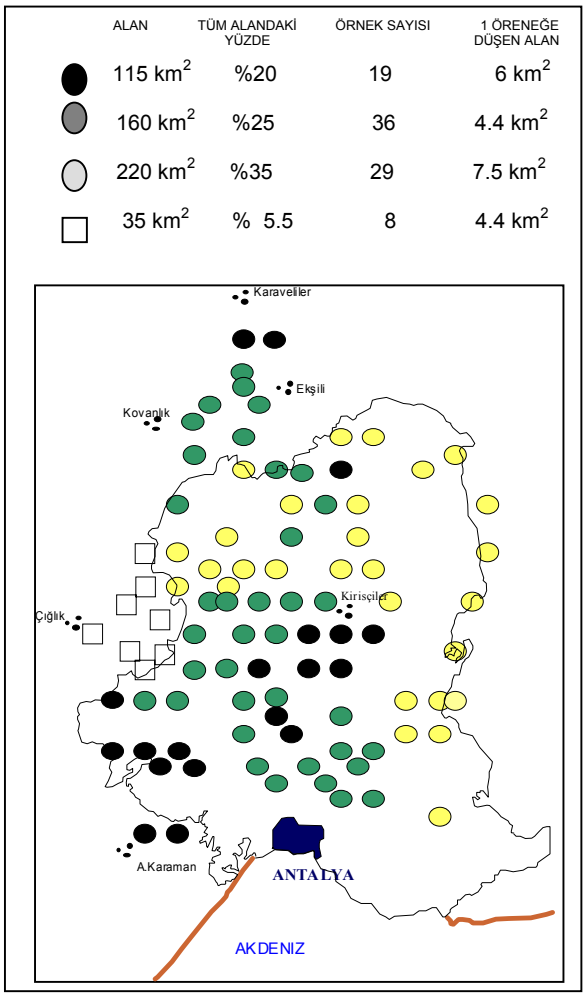
ANTALYA TRAVERTEN PLATOSU TOPRAK ÖRTÜSÜNÜN FİLTRELEME ÖZELLİKLERİ

Yeraltısuyu kirliliğine neden olan kirleticilerin bir kısmı çözünmüş halde bulunurken, bir kısmı da asılı katı tanecikler halinde bulunurlar. Farklı büyüklüklere sahip organik ve inorganik kirleticiler yanında, özellikle mikrobiyal (bakteri ve virüs) kirleticiler de suda asılı halde taşınırlar. Toprak örtüsünün asılı halde taşınan bu kirleticiler için bir filtre işlevi gösterebilmesi, toprağı oluşturan malzemenin yapısal özelliklerine bağlıdır.

Askıdaki kirletici boyu ile gözenek boyu arasındaki ilişki, ortamın filtreleme kapasitesini belirlemektedir. Bu nedenle, çakıl boyu malzemenin hakim olduğu ortamlarda gözenek



Şekil 1. Çalışma alanına ait bulduru haritası
Figure 1. Location map of the study area



Şekil 2. Örnekleme noktalarının çalışma alanında dağılımı

Figure 2. Areal distribution of sampling points in the study area

çapından çok daha küçük olan 0.2-5 µm boyutlu bakteri ve 0.02-0.25 µm boyutlu virüslere karşı etkili bir filtre görevi görememektedir. Farklı tane boylarının değişik dizilimlerde oluşturacağı gözenek çapları Çizelge 1'de verilmiştir. Ortamın gözenek çapından büyük olan askıdaki kirletici tanecikler toprak malzeme tarafından tutulacak ve yeraltısuyuna ulaşamayacaklardır.

Çizelge 1'den de görüldüğü gibi, gözenek çapı tane dizilimi ile yakından ilişkilidir. Üniform yapıya sahip olduğu varsayılan oktahedral dizilimli taneler arasındaki gözeneklerin çapı, tetrahedral dizilimde oluşan gözenek çapından daha küçük olmaktadır. Bu hesaplamalar dikkate alındığında, kil içeriği %90'ı geçen bir malzeme ancak bakteri boyundaki taneleri tutabilmekte, virüs boyundaki tanecikler için etkili bir filtre görevi yapamamaktadır. Diğer bir ifadeyle, bakteriler için filtrelenme, ancak kil boyu tanelerden oluşan malzemeler tarafından sağlanabilmektedir (Başal ve Ekmekçi, 1999). Doğal ortamlarda, heterojen bir tane boyu dağılımına sahip çökeller, bakteri taşınımına belirli ölçülerde olanak verebilmektedir. Pekdeğer and Matthes (1986)'e göre %10'dan büyük miktarlarda kum içeren kil-silt tane boyutundaki malzemeler, bakteri boyutuna sahip tanecikleri etkili bir şekilde filtreleyememektedir.

Yapılan tane boyu dağılım analizleri, inceleme alanının kuzeyinde yer alan kolüvyal topraklarda kil-silt boyu tane içeriğinin %60'ı geçmediğini, diğer toprak örneklerinde ise kil-silt boyu tane içeriğinin %50'nin altında olduğunu göstermiştir (Erdoğan, 1999). Antalya Traverten Platosu'nda görülen toprakların tamamında kum tane boyutunda malzeme ağırlıktadır. İnce kum boyu malzemeler için gözenek çapı oktahedral dizilimde 25-83 µm, tetrahedral dizilimde 14-45 µm olacaktır. Bu değerlerin katı kirleticilerin tane çapından çok büyük olması ortamın filtreleme etkisinin zayıf olduğunu göstermektedir.

Bölgede uzun yıllardır atıksu sisteminin bulunmaması nedeniyle atık sular yüksek geçirgenliğe sahip traverten zemine verilmekte, bu şekilde mikrobiyal kirleticiler yeraltısuyu sistemine katılmaktadır. İnceleme alanında yeraltısuyuna yönelik yapılan ölçümlerde evsel atık sulardan kaynaklanan bakteriyolojik kirliliğin mevcut olduğu görülmüştür. Özellikle Antalya kenti ve yerleşim alanlarına yakın bölgelerde daha yüksek kirlilik görülmektedir. En düşük bakteriyolojik kirlenme kentten en uzak konumda bulunan Kırkgözler kaynağında gözlenmiştir (Tiryakioğlu vd, 1998). Bu açıdan değerlendirildiğinde, traverten üzerinde mikrobiyal kirletici kaynağından gelebilecek kirleticinin toprak zonunda ve ikincil açıklıklardaki toprak malzemelerde filtrelenme olasılığının çok düşük olduğu görülmektedir. Özellikle katı mikrobiyal kirleticilere karşı çalışma alanındaki topraklar etkili bir filtreleme ve yeraltısuyu için koruyucu örtü işlevi göremeyecektir.

Çizelge 1. Farklı tane boyu ve dizilimlerine bağlı gözenek çapları (Başal, 1999)
Table 1. Pore diameters due to different grain size and sorting (Başal, 1999)

Tane Boyu		(mm)	Gözenek Çapı (μm)	
			Oktahedral dizilim	Tetrahedral dizilim
Kil		0.002	< 0.84	< 0.45
Silt		0.06	0.84 - 25	0.45 - 14
	ince	0.2	25 - 83	14 - 45
Kum	orta	0.6	83 - $2.5\ 10^2$	45 - $1.35\ 10^2$
	iri	2	$2.5\ 10^2$ - $8.3\ 10^2$	$1.35\ 10^2$ - $0.45\ 10^3$
	ince	6	$8.3\ 10^2$ - $2.5\ 10^3$	$0.45\ 10^3$ - $1.35\ 10^3$
Çakıl	orta	20	$2.5\ 10^3$ - $8.3\ 10^3$	$1.35\ 10^3$ - $4.5\ 10^3$
	iri	60	$8.3\ 10^3$ - $25\ 10^3$	$4.5\ 10^3$ - $13.5\ 10^3$

ANTALYA TRAVERTEN PLATOSU TOPRAK ÖRTÜSÜNÜN KATYON DEĞİŞTİRME KAPASİTESİ

Litolojik birimlerde yeraltısuyu hareketi ile taşınan maddeler fiziksel tutulmanın (filtrelenme) yanısıra, yüzeye tutulma (adsorption) ve soğrulma (absorption) gibi süreçlerden de etkilenirler. Yüzeye tutulma, elektrostatik kuvvetler ve/veya kristal örgüsündeki hatalar nedeniyle taşınan maddenin (kirleticinin) katı yüzeye tutulması olayı olarak tanımlanmaktadır (Fetter, 1993).

Kil tanecikleri ve organik maddelerin yüzeyleri elektriksel bir yüke sahiptir. Kil mineralleri içindeki yer değiştirmeler, bağların kopması veya organik maddeden proton (H^+) kaybı, bu tanecik yüzeylerinin negatif yüklü olmasına neden olur. Diğer bir ifadeyle, tanecikler atomik yapılarında elektron fazlası bulundurmaktadırlar. Zıt yüklü iyonlar arasında kovalent bağdan daha zayıf elektrostatik bir bağ oluşur. Bu nedenle, bir katyonun diğer bir katyonla veya bir anyonun diğer bir anyonla yer değiştirmesine olanak verir.

Değişebilir iyonların toprakta tutulması yeraltısuyu kirliliği açısından büyük bir önem taşımaktadır. Katyon değiştirme kapasitesi, CEC, birim ağırlıktaki bir malzemenin katyon tutma miktarını ifade etmektedir. Genellikle 100 gram kuru malzeme tarafından tutulan meq cinsinden madde miktarı (meq/100 gr) şeklinde ifade edilir. Bu süreç toprağın doğal arındırma kapasitesi içinde en önemli rolü oynamaktadır. Benzer şekilde pozitif yüklü yüzeylere sahip demir, alüminyum, mangan oksitleri ve kırık köşeli kil mineralleri anyon değişim süreçlerinde önemli rol oynarlar.

Toprağın tutma kapasitesi kil içeriğine, organik madde miktarına, topraktaki kil minerallerinin türüne ve oksit veya hidroksit içeriğine bağlıdır. Bu özelliklerinden yararlanılarak, % kil içeriği ve organik madde miktarı (organic C) bilinen malzemelerin katyon değiştirme kapasitesi hesaplanabilmektedir. CEC için, % kil içeriği ve organik madde miktarına bağlı olarak verilen ampirik eşitlik;

$$CEC(meq/100gr)=0.7(\%\ kil)+3.5(\%\ organik\ C) \quad (1)$$

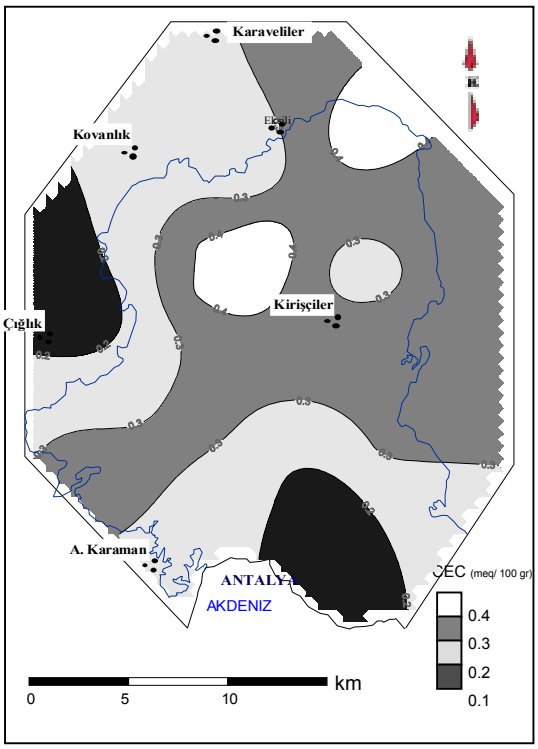
şeklinde ifade edilmektedir (Apello ve Postma, 1994).

Çalışma alanından toplanan toprak örneklerinin organik madde içeriklerinin belirlenmesinde, organik karbonun yakılması yöntemi (Standart no: D2974) kullanılmıştır (ASTM, 1998). Deney, 2 mm'nin altında tane boyuna sahip malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yönteme göre hazırlanan örneklerden 10'ar gram toprak alınmış, belirli ağırlıklara sahip olan seramik fincanlarda, 105°C sıcaklıkta etüvde 24 saat bekletilerek kurutulduktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Nemi alınan örnekler daha önce 600°C'ye kadar ısıtılmış fırına koyularak 20 dakika süre ile yakma işlemi yapılmıştır. Örneklerin yakma işlemi öncesi ve sonrasında belirlenen ağırlıkları kullanılarak organik madde içerikleri hesaplanmıştır.

Antalya Traverten Platosu topraklarında CEC değerleri, çalışma alanından alınan 92 örnek için tane boyu analizleri ile belirlenen %kil boyu malzeme içerikleri ve organik madde içeriklerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, Antalya Traverten Platosu topraklarında CEC

değerlerinin 0.10-0.47 meq/100 gr arasında değiştiği görülmektedir.

İnceleme alanının kuzeybatı ve güney sınırlarına yakın bölgelerde yüzey akışı ile gelen kırıntılı (klastik) malzemenin kil boyu malzeme içeriğinin yüksek olmasına karşın, CEC değerinin düşük oluşu, organik maddenin CEC üzerinde büyük ölçüde baskın olduğunu göstermektedir. İnceleme alanının orta kesiminde traverten üzerindeki topraklarda ise CEC değerleri 0.30-0.40 ve 0.40 meq/100gr arasında değişmektedir. En düşük CEC değerleri ise herhangi bir insan etkinliğinin bulunmadığı, tamamen travertenin çözünme kalıntısı lateritik topraklarda ve organik maddece en fakir, sel yatağı konumunda olan alüvyon yelpazesini temsil eden ve yıllık sellenmeden etkilenen topraklarda görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Katyon değiştirme kapasitesi değerlerinin çalışma alanında dağılımı

Figure 3. Areal distribution of cation exchange capacity in the study area

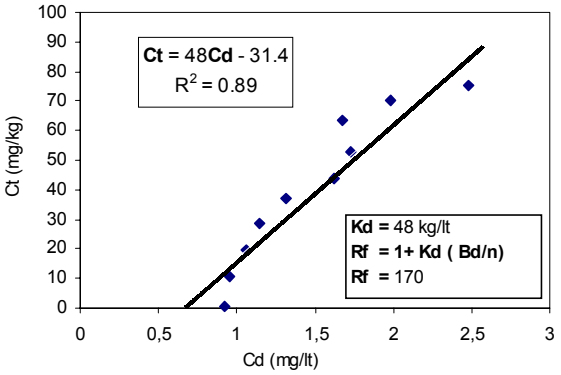
ANTALYA TRAVERTEN PLATOSU TOPRAK ÖRTÜSÜNÜN ORTOFOSFAT (o-PO_4) İÇİN GECİKTİRME ETKİSİ

Yeraltısuyunda çözünmüş halde bulunan, ortamı oluşturan katı tanelerin ve ortamdaki organik maddelerin yüzeylerinde tutulabilen kirletici, kimyasal tepkimeler sonucunda çökelebilmekte, yükseltgenme-indirgenme tepkimelerine katılabilmekte ve abiyotik veya biyotik bozunmaya uğrayarak çözeltiden ayrılabilmektedirler. Bütün bu tutulma süreçleri sonucunda, bazı kirleticiler taşınımı sağlayan yeraltısuyunun akış hızından çok daha yavaş bir hızla hareket etmektedirler. Bu etkiye "geciktirme etkisi" adı verilmektedir (Fetter, 1993).

Traverten akiferi tehdit eden kirletici kaynakları başlıca evsel ve tarımsal kökenli kaynaklardır. Bu tür kaynaklardan gelebilecek en önemli kirletici olan o-PO_4 iyonu kullanılarak Antalya Traverten Platosu'ndan alınan 92 örnek arasında farklı toprak gruplarını temsil eden 13 örneğin geciktirme etkisi (R_f) hesaplanmıştır. Sözkonusu deneyler için Fetter (1993) tarafından önerilen fosfat iyonu için gerçekleştirilen tutulma deneyleri uygulanmıştır. Önce toprak örneklerinin 2 mm'den ince tanelerden oluşan kısımları ayrılarak havada kurutulmuştur. Her örnekten alınan 100 gram toprak 10 gr'lık kısımlara bölünmüş, farklı derişimlere sahip 6 setten oluşan fosfat çözeltilerinin (Na_2HPO_4) bulunduğu beherlere konmuştur. Toprak örnekleri çözelti içerisinde ve oda sıcaklığında 4 gün süreyle karıştırılarak çözelti ile katı tanecikler arasındaki fosfat dengesinin oluşması sağlanmıştır. Denge durumunda çözeltideki ortofosfat içeriği (Cd), spektrofotometrik yöntemlerle (Standart no: 4500P-C) belirlenmiştir. Hesaplamalar laboratuvarda yapılan deney sonuçlarının doğrusal izoterm modeli üzerinde değerlendirilmesi ile elde edilen dağılım katsayısı (Kd) değerlerinin Eşitlik 2'de kullanılmasıyla yapılmıştır. Şekil 4'te inceleme alanından alınan toprak örnekleri üzerinde yapılan izoterm deneylerinin değerlendirilmesine bir örnek verilmiştir.

$$R_f = 1 + (B_d / n) * K_d \qquad (2)$$

burada,
R_f : geciktirme faktörü
B_d : birim hacim ağırlık (gr/cm^3)
n : etkin gözeneklilik
K_d : izoterm deneylerinden elde edilen dağılım katsayısı (l/kg) değerlerini ifade etmektedir (Fetter, 1993).



Şekil 4. Doğrusal izoterm modeli uygulaması örneği
Figure 4. An example for application of lineer isoterm model

Taşınımın en hızlı olacağı koşulu sağlaması nedeniyle Eşitlik 2'de görülen etkin gözeneklilik değeri %100 nem içeriğine karşılık olarak kullanılmıştır. Bu şekilde bulunan geciktirme güvenli tarafta kalınacak şekilde yorumlanmıştır.Çalışma alanındaki toprak malzemelerinde fosfat iyonuna ait Kd ve Rf değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre Antalya Traverten Platosu toprakları için dağılım katsayıları 23-136.7 l/kg, geciktirme faktörü değerleri 48.87-387.74 arasında değişmektedir. Geciktirme faktörünün en yüksek değeri aldığı 60 numaralı örnek inceleme alanının güneyinde, ormanlık alan içerisinden alınmıştır. Bu örnekte kil boyu malzeme yüzdesi düşük (%6.83), silt-kum boyu malzeme içeriği ise yüksektir. Aynı şekilde, geciktirme etkisinin en düşük değeri aldığı, çalışma alanının kuzeyinde bataklık alüvyonu özelliğindeki topraklardan alınan 17 numaralı örnekte kil boyu malzeme içeriği düşük (%9.5), kum boyu malzeme ağırlıklıdır. Gözeneklilik ve organik madde içeriği açısından da benzer özellikler gösteren bu iki toprağın geciktirme etkileri arasındaki fark tutma kapasitelerini gösteren dağılım katsayıları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Dağılım katsayısı en düşük

Çizelge 2. İnceleme alanındaki torakların dağılım katsayısı ve geciktirme faktörü değerleri
Table 2. Retardation factor and distribution coefficient values of the soils in the study area

Örnek No	Bd (gr/cm^3)	Kd (l/kg)	n (%)	Rf
3	2.028	51.767	48.90	215.690
16	2.079	44.440	50.97	182.265
17	1.007	24.680	51.92	**48.867**
23	1.649	23.009	36.22	105.754
26	1.057	111.770	37.95	312.307
50	1.031	72.371	29.14	257.055
60	1.457	136.700	51.50	**387.742**
62	1.598	53.752	52.85	163.527
67	1.363	48.019	38.63	170.428
74	1.084	54.305	41.13	144.123
79	1.206	40.593	39.27	125.663
81	1.430	69.008	43.15	229.694
89	1.041	79.596	46.06	180.895

olan 23 numaralı örneğin geciktirme etkisinin ortalamaya yakın bir değer alması Eşitlik 2 dikkate alındığında, gözeneklilik oranının düşük olmasına bağlanmaktadır. Çalışma alanında yayılım gösteren toprakların fosfat iyonu için sahip odukları geciktirme etkisinin alansal yayılımı Şekil 5'de görülmektedir.

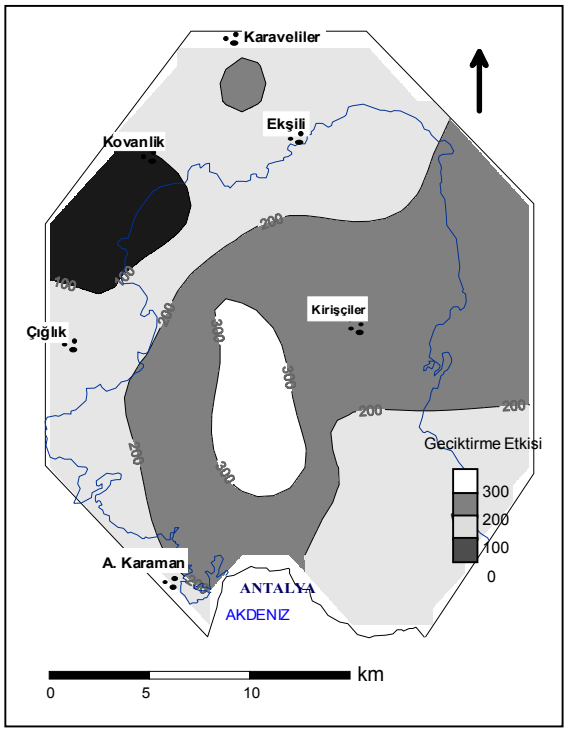
Toprağın sahip olduğu geciktirme faktörü değeri, kirleticinin yeraltısuyunda taşınımı sırasında yavaşlamasına neden olur. Akış yolu boyunda toprağın kirletici hızı üzerinde yaptığı yavaşlatma etkisi;

$$Vci = Vx / Rf \qquad (3)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Burada,

Vci : kirletici hızı (m/s)
Vx : suyun ortalama akış hızı (m/s)
Rf : geciktirme faktörü
değerlerini temsil etmektedir.

Buna göre, örneğin Rf değerinin en yüksek olduğu 60 numaralı toprak örneği için yapılan hesaplamalar Eşitlik 3'de yerine konulduğunda, Vci, 0.003 m/s bulunmaktadır. Bu sonuç, bu



Şekil 5. Geciktirme faktörü değerlerinin çalışma alanında dağılımı

Figure 5. Areal distribution of retardation factor values in the study area

tür toprağın kirleticiyi yeraltısuyu akış hızına oranla yaklaşık 387 kat yavaşlatacağını göstermektedir. Bir başka deyişle, 1 m/gün gibi bir hıza sahip olan yüzeyaltısuyunun 1 m'lik bir toprak kalınlığını geçmesi için gereken süre 1 gün iken, kirletici bu mesafeyi yaklaşık 1 yılda (387 gün) alacaktır.

Rf değerinin en düşük olduğu 17 nolu örnek için ise, aynı durumda kirletici hızı (Vci), 0.021 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu durumda kirleticinin 1 m'lik mesafeyi geçmesi için gereken süre yaklaşık 48 gün olacaktır. Çalışma alanında hesaplanan Rf değerleri için ortalama değer 194 bulunmuştur. Benzer hesaplamalar ortalamaya en yakın değere sahip olan 16 numaralı örnek için yapıldığında, kirleticinin 1m'lik mesafeyi alacağı süre yaklaşık 182 gün olacaktır.

ANTALYA TRAVERTEN PLATOSU TOPRAKLARININ KORUYUCU ÖRTÜ OLARAK İŞLEVİ

Kirleticinin özellikle kimyasal ve biyolojik süreçlerle değişim ve dönüşümü vadoz bölgenin en üst kesimini oluşturan toprak zonunda gerçekleşmektedir. Değişimlere neden olan etkenlerin başında organik madde içeriği gelmektedir. Toprak zonu genellikle, vadoz bölgenin organik maddece en zengin kesimini oluşturmaktadır. Karstik alanlarda, vadoz bölgenin göreli olarak kalın olmasına karşın, ikincil açıklıkların yaygın olması nedeni ile süzülme daha hızlı bir şekilde meydana gelmektedir.

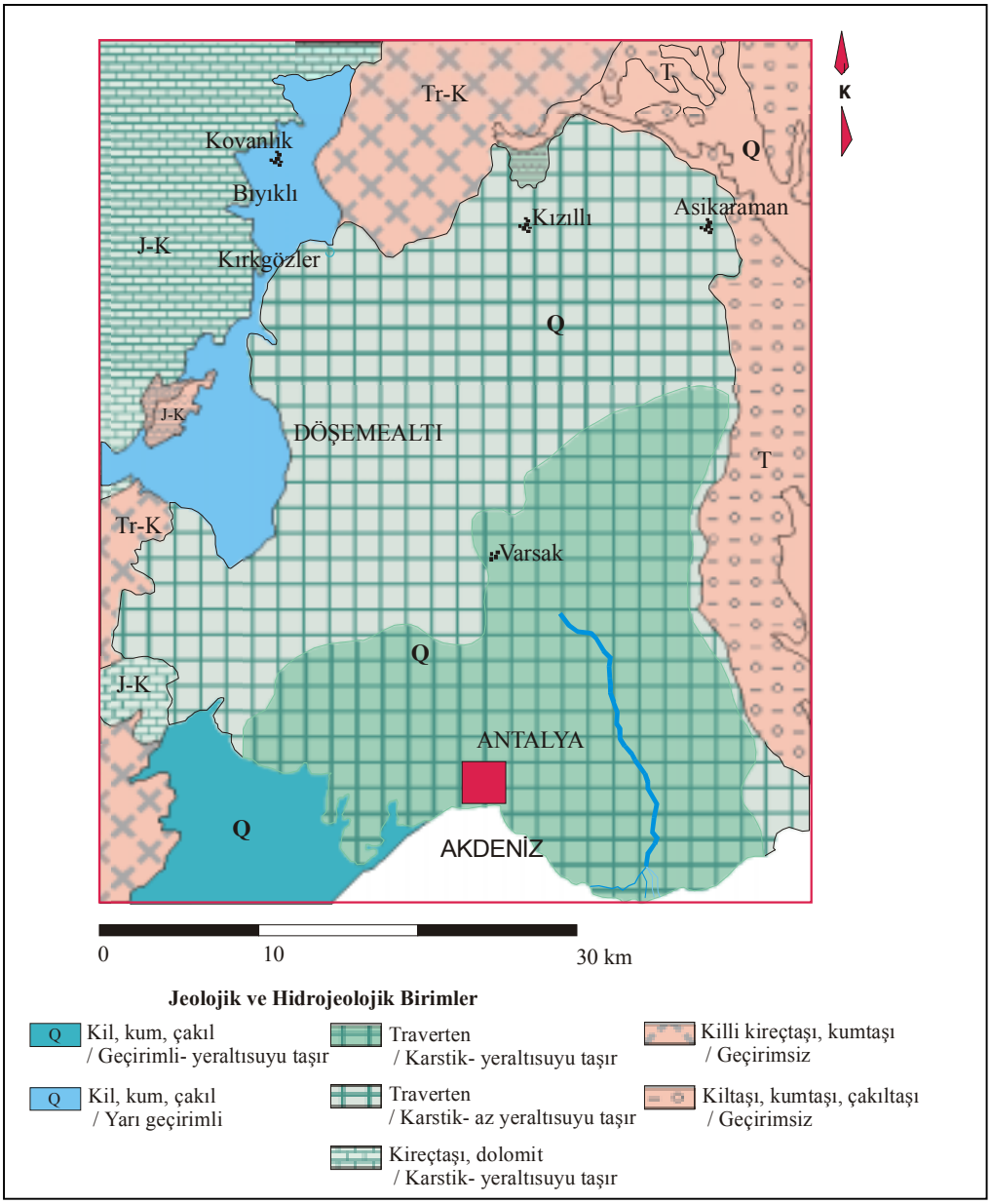
Yüksek gözeneklilik ve geçirgenlik, herhangi bir maddenin bir ortamda kalma süresini kısaltmakta, dolayısıyla madde derişiminin çeşitli süreçlerle değişme süreci önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, vadoz bölgenin kalınlığının fazla olmasına karşın taşınan madde üzerindeki etkisi azdır. Diğer taraftan, ince taneli ve geçirimliliği daha düşük olan malzemelerden oluşan toprak örtüsü daha sığ olmasına rağmen, taşınan maddenin derişimi üzerindeki etkisi daha fazla olabilmektedir (Singer ve Munns,1991). Bu nedenle doğal arındırma kapasitesi yüksek olan toprak örtüsünün kalınlığı özellikle önem taşımaktadır. Toprak örtüsünün kalın olduğu alanlarda kirletici bu bölgeyi daha uzun zamanda katetmekte ve toprak daha etkin bir arındırma gösterebilmektedir.

Antalya Traverten Platosu'nda vadoz bölge kalınlığı özellikle beslenme alanına doğru (akışyukarı kesim) artmakta ve 150 m'ye kadar ulaşabilmektedir. Beslenme alanında yeralan üst platoda genel olarak yerel akımın mevcut olması nedeniyle, Döşemealtı ve Kızıllı'da DSİ tarafından açılan kuyularda yüzeyden 275 m'ye kadar inilmesine rağmen, yeraltısuyuna ulaşılamamıştır. Bu durum üst platoda travertenlerin akifer özelliğinde olmayıp, alt platoya su ileten ve beslenmede önemli rol oynayan bir özelliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, beslenme alanı olarak üst platodaki herhangi bir etkinlik yeraltısuyu kirliliği açısından dikkatle değerlendirilmelidir. Ancak kirleticinin yeraltı-suyuna ulaşma süresi dikkate alındığında,

akifer özelliği taşıyan alt platoda yeraltısuyunun kirlenme riski daha yüksektir. Alt traverten platosunda açılan kuyuların çoğundan yeraltısuyu alınabilmektedir (DSİ, 1985a). Bu platoda yaygın akımın hakim olması yeraltısu-yuna her yerde ulaşılmasını sağlamaktadır (Şekil 6).

ANTALYA TRAVERTEN PLATOSU TOPRAKLARININ KORUYUCU ÖRTÜ İŞLEVLERİNE BAĞLI ALANSAL DAĞILIMLARI

Bu çalışmalarda elde edilen veriler, Antalya Traverten Platosu'nda yayılım gösteren toprak örtüsünün yeraltısuyu kirliliğine karşı arındırma etkisi açısından değerlen-dirilmiştir. Ancak, farklı tür ve kalınlıklarda yayılım gösteren toprak örtüsünün yeraltısuyu için sahip olduğu



Şekil 6. Çalışma alanının basitleştirilmiş jeoloji haritası (DSİ, 1985b)
Figure 6. Simplified hydrogeological map of the study area (DSİ, 1985b)

koruma etkisi inceleme alanı içerisinde değişim göstermektedir.

İnceleme alanında, genellikle ince kum-silt boyu gevşek malzemenin doygun hidrolik iletkenliklerinin 10^{-5}-10^{-7} m/s düzeyinde olduğu gözönüne alındığında, toprak örtüsünün yarıgeçirgen bir özelliğe sahip olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak kirlenme tehdidi oluşturacak herhangi bir faaliyetin, etkisini toprak örtüsünün filtreleme, tutma, geciktirme gibi süreçlerin yanısıra toprak kalınlığı ve yayılımı ile yeraltısuyu seviyesinin derinliğine bağlı olarak farklı şekillerde göstereceği anlaşılmaktadır. Antalya Traverten Platosu'nda vadoz bölgenin beslenme alanında 150 m'ye varan kalınlıkta olması, diğer taraftan doğal nem içeriğinin kurak dönemde %10'u aşmaması, düşey yönde su akışını etkilemektedir. Yağışlı dönemlerde ise yağış şiddeti-sızma kapasitesi ilişkisine göre, göllenmenin meydana geldiği ancak, ıslanma cephesinin hızlı ilerleyememesi nedeniyle süzülme miktarının yüksek olmadığı, Erdoğan (1999) tarafından ortaya konmuştur. Bununla birlikte, katı veya sıvı atık depolama alanı gibi yüzeyde oluşturulacak bir kirlenme kaynağı, ortamın doygun hale geçmesinden hemen sonra etkisini büyük ölçüde gösterecektir.

Karstik ortam özelliği gösteren Antalya Traverten Platosu'nda, vadoz bölgenin kalın; yeraltısuyu seviyesinin derin olmasına karşın, yüzeysuyunu hızlı bir şekilde yeraltına iletebilecek ikincil açıklıkların bir kısmı toprak malzeme ile dolu durumdadır. Bu nedenle, karstik ortamlara özgü düşük doğal arındırma kapasitesinin bu kesimlerde beklenenden daha yüksek olabileceği görülmüştür. Ancak, akifer özelliği taşıyan ve inceleme alanının güneyini oluşturan kesimlerde vadoz bölgenin görece daha ince olması, akiferin kirlenmeye karşı daha yüksek risk altında olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler sonucunda traverten akiferin üzerinde değişik kalınlıklarda ve türlerde yayılım gösteren toprak örtüsünün tane boyu dağılımına bağlı olarak katı kirletici maddeleri filtreleme özelliğinin zayıf olduğu belirlenmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, traverten üzerinde mikrobiyal kirletici kaynağından gelebilecek kirleticinin yeraltısuyuna ulaşabileceği görülmektedir.

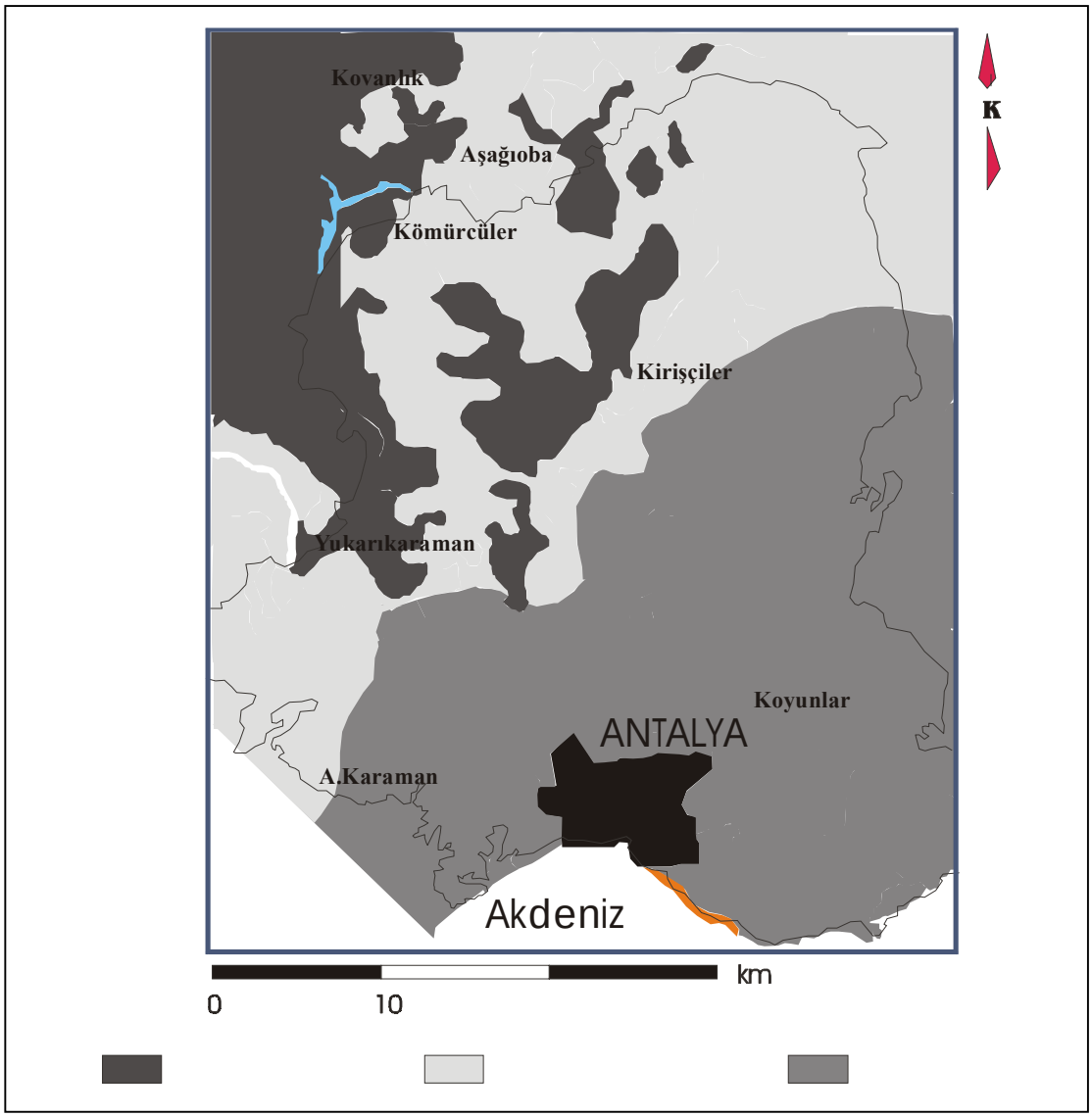
Diğer taraftan, toprak kalınlığı ve yeraltısuyu seviyesine uzaklık gibi etkenlerle birlikte toprağın gerek katyon değiştirme kapasitesi, gerekse izotermler yardımıyla hesaplanan evsel kaynaklı kirleticiler için geciktirme etkisi dikkate alındığında, toprak örtüsünün genel olarak orta ve yüksek derecelerde koruyucu örtü işlevine sahip olacağı belirlenmiştir. Bu yaklaşımla, Antalya Traverten Platosu toprakları, yeraltısuyu seviyesine uzaklık, toprak örtüsü kalınlığı ve geciktirme etkisi dikkate alınarak kirleticilere karşı koruyucu örtü işlevleri açısından aşağıda tanımlanan üç gruba ayrılmıştır.

Koruyucu Örtü İşlevi Yüksek Alanlar

İnceleme alanında güneydeki çöküntü alanlarında, traverten içerisinde dolgu malzemesi olarak bulunan toprakların koruyucu örtü işlevlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Üst platonun güneyinde ve beslenme alanı sınırı içerisinde yayılım göstermeleri, bu tür toprakların koruyucu örtü işlevlerinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu alanlarda vadoz bölge kalınlığının 200-250 m'yi bulan değerlere ulaşması nedeniyle kirletici bu bölgede daha uzun süreli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler etkisinde kalmaktadır. Ayrıca karstik özellikteki ikincil boşluklarda görülen toprak malzeme arındırma özelliğini daha yüksek derinliklerde de gösterebilmektedir. Geciktirme etkisi 300'ün üzerinde olan bu tür topraklar yeraltısuyuna ulaşmadan önce kirletici derişiminin azalması yönünde büyük ölçüde etkili olmaktadır (Şekil 7).

Koruyucu Örtü İşlevi Orta Dereceli Alanlar

İnceleme alanının orta kesimlerinde traverten sınırı içerisinde görülen Kırmızı Akdeniz Toprakları, traverten alanın kuzeyinde görülen kolüvyal topraklar ve Kırkgöz kaynağı çevresinde yeralan alüvyal topraklar orta düzeyde koruyucu örtü işlevine sahip alanlar olarak gruplandırılmıştır. Yapılan gruplamada en geniş alansal dağılıma sahip olan bu tür toprakların sürekli bir kirlilik kaynağına karşı sahip olacakları arındırma etkilerinin sınırlı olacağı belirlenmiştir.



Şekil 7. Çalışma alanında toprakların koruyucu örtü işlevlerine göre gruplandırılması
Figure 7. Discrimination of soils in the study area according to their function as protective cover

Kırmızı Akdeniz Toprakları ve kuzeyden gelen birikintilerin oluşturduğu kolüvyal topraklar, geciktirme etkisi (100-200) ve toprak kalınlığı açısından ortalama değerlere sahip olmalarına karşın, beslenme alanının üzerinde yer almaları ve vadoz bölgenin bu kesimde daha kalın olması kirletici etkilere karşı orta seviyede risk taşımalarını sağlamaktadır (bkz. Şekil 7).

Kırkgöz kaynağının bulunduğu alanda yayılım gösteren alüvyal topraklar düşük geciktirme etkisine (Rf <200) sahip olmalarına karşın, bu alanda toprak derinliği fazla ve vadoz bölge kalındır. Bu alanda kirleticilerin derinde bulunan yeraltısuyu için risk oluşturma olasılıkları daha düşüktür. Bununla birlikte, toprakta tutulan kirletici yüzeysuyu ile yıkanarak düdenler yoluyla yeraltısuyuna ulaşabilmektedir.

Özellikle alüvyal alanlar üzerinde yaygın olarak sürdürülen tarımsal faaliyetlerden kaynaklanabilecek kirliliğe karşı toprağın doğal arındırması etkili olmakla birlikte, yüksek miktarlarda uygulanacak gübreleme ve ilaçlama çalışmaları yeraltısuyu için uzun vadede tehlike oluşturabilecektir.

Koruyucu Örtü İşlevi Düşük Alanlar

İnceleme alanının güneyinde ve travertenle kaplı alanın kuzeydoğu sınırlarında görülen Kırmızı Akdeniz Topraklarının yayılım gösterdiği alanlar, düşük koruyucu örtü işlevine sahip alanlar olarak değerlendirilmiştir. Bu bölgede meydana gelecek bir kirlilik kaynağına karşı yeraltısuyu doğrudan risk altındadır.

İnceleme alanının güneyinde, özellikle şehir merkezine yakın alanlarda toprağın geciktirme etkisinin 200'ün altında olmasının yanısıra toprak derinliği çok düşük ve yeraltısuyu seviyesi daha sığdır. Bu alanda vadoz bölgenin kalınlığı 50 m'ye kadar düşmektedir. Ayrıca bu alanın Antalya kent merkezine yakın olması da, bu tür toprakların evsel kirlilik riski altında bulunduğunu göstermektedir (bkz. Şekil 7).

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Antalya Traverten Platosu'nda görülen hızlı kentleşme ve atıksu sisteminin bulunmamasına karşın, yeraltısuyu kirliliği henüz beklenen düzeye erişmemiş olup, sınırların altındadır. Bu belirleme, travertenlerin üzerinde ve vadoz bölgede bulunan toprak malzemenin kirletici etkilere karşı sahip olduğu doğal arındırma kapasitesine bağlıdır.

Yeraltısuyu kalitesinin korunmasına yönelik çalışmaların planlanmasında, toprak örtüsünün sahip olduğu arındırma kapasitesi ve mevcut kirletici kaynakların dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Yapılan çalışmada Antalya Traverten Platosu üzerinde yayılım gösteren toprakların koruyucu örtü işlevlerine bağlı alansal dağılımları, toprak kalınlığı, yeraltısuyu seviyesine uzaklık ve fosfat iyonu için belirlenen geciktirme etkisi dikkate alınarak hazırlanmıştır. İnceleme alanında yeraltısuyu kalitesinin korunması amacıyla, kirleticinin vadoz bölgedeki hareketi ve bölgede yayılım gösteren toprak örtüsünün fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir arazi kullanım haritası hazırlanması ve buna bağlı olarak kirlilik kaynağı oluşturabilecek faaliyetlerin kontrol altına alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Appelo, C.A.J., and Postma, D., 1994. Geochemistry groundwater and pollution, A.A. Balkema, 536 p.

ASTM, 1998. Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock. Vice-President Publications, Section 4, 711 s.

Başal, A., 1999. Antalya Traverten Platosu toprak zonunun hidrojeokimyasal özelliklerinin incelenmesi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi, Ankara, 79 s. (yayımlanmamış).

Başal, A. ve Ekmekçi M., 1999. Antalya Traverten Platosu toprak örtüsünün yeraltısuyu kirliliği açısından değerlendirilmesi, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiriler Kitabı, Ankara, 87- 95 s.

DSİ, 1985a. Antalya-Kırkgöz kaynakları ve Traverten Platosu karst hidrojeolojik etüd raporu. DSİ Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuyu Dairesi Başkanlığı, Ankara, 131 s.

DSİ, 1985b. Batı Toroslar karst alanının hidrojeoloji haritası. DSİ-UNDP Projesi, TUR/ 77/015, Ankara.

Erdoğan, S. 1999. Antalya Traverten Platosu toprak örtüsünün jeohidrolojik özelliklerinin alansal değişimi. Hacettepe Üniversitsi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Mühendislik Tezi, Ankara, 81 s. (yayımlanmamış).

Fetter, C.W., 1993. Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall, New Jersey, 452 p.

Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1993. Antalya İli Arazi Varlığı. TOKB Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 76 s.

Pekdeğer, A. and Matthess, G. 1986. Factors of Bacteria & Virus Transport in Groundwater, in Impact of Agricultural Activities on Groundwater (eds: Vrba J. and Romijn E.) , IAH, V.5, 313-332 s.

Singer, M.J. and Munns, D.N., 1991. Soils an Introduction. McMillan Publishing Company, New York, 473p.

Tiryakioğlu, O., Muhammetoğlu, A. ve Muhammetoğlu H., 1998, Antalya'da yeraltısuyu kalitesinin yönetimi, Türkiye'nin kıyı ve Deniz Alanları II. Ulusal Konferansı, Türkiye Kıyıları 98 Konferansı Bildiriler Kitabı, ODTÜ, Ankara, 583-593 s.