

I. SU KİRLİLİĞİ

Su kirliliği, insan faaliyetlerinden dolayı suyun fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerinde meydana gelen olumsuz değişim şeklinde tanımlanabilir. Belediyelerin kanalizasyon ve katı atıkları, endüstri ve ticari faaliyetler sonucu oluşan sıvı veya katı atıklar, toksik maddeler, tarımsal gübre ve ilaçlar (pestisitler) ve hayvansal atıklar, su kirliliğine neden olan temel kirletici kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu kirleticilerin bazıları yapıları gereği çok zararlı olmamalarına rağmen su kaynaklarına karıştıktan sonra oluşan biyokimyasal reaksiyonlar sonucunda çok daha zararlı hale gelebilir. Organik atıkların mikroorganizmalar tarafından parçalanmaları sırasında mikroorganizmalar sudaki çözünmüş oksijeni (ÇO) tüketir. Ayrıca, organik atıklardaki besin maddeleri mikroorganizmaların tüketim kapasitelerinin çok üzerinde olması durumunda sucul bitki ve algler popülasyonunda patlama meydana gelir ve bu olay ötrofikasyon olarak adlandırılır. Mikroorganizmalar ve algler sudaki ÇO'ü tüketerek oksijen açığına neden olur. Bu durumda oksijene ihtiyaç duymayan anaerobik mikroorganizmalar organik maddeyi parçalamaya başlar ve oksijene ihtiyaç duyan su canlılarına zararlı olan metan ve hidrojen sülfid gibi gazlar oluşur. Sonuçta, balıklar ve diğer su canlıları ölür, sudaki biyolojik çeşitlilik azalır ve ekolojik denge bozulur.

Kirli sular, içme ve kullanma, rekreasyon, tarım ve endüstriyel faaliyetler için uygun değildir. Kirli sular, içme sularının zehirlenmesine, ötrofikasyon nedeniyle akarsu veya göl ekosistemlerinin bozulmasına, su canlılarının ölmesi sonucu biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve çeşitli çevresel problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Su kirliliği, evsel veya endüstriyel atıkların minimize edilmesiyle azaltılabilir veya önlenir.

A. Su Kirliliği Kaynakları

Su kirliliğine neden olan kaynaklar çeşitli şekillerde gruplandırılabilir. Kapladıkları alana göre bu kaynaklar noktasal ve noktasal olmayan kaynaklar olarak ikiye ayrılır. Kimyasal ve petrol ürünlerinin dökülmesi, otomobil ve tren kazalarında dökülen yağlar ve yakıtlar, yer altı ve yerüstü kimyasal ve petrol tanklarından sızma, septik sistemler, kanalizasyon atıkları, belediye çöplükleri ve hayvansal atıklar noktasal kaynağa örnektir. Atmosferdeki kirli havada bulunan gazların yağışla su kaynaklarına ulaşması, sediment kirlenmesi, tarımsal üretimde kullanılan gübre ve pestisitlerin yüzey akışıyla taşınmaları ve yer altına sızmaları noktasal olmayan kirletici kaynaklarıdır. Noktasal olmayan kaynaklar noktasal kaynaklara oranla daha az görünür, daha geniş alana yayılır ve dolayısıyla yüzey ve yer altı sularını çok daha fazla kirletirler.

Kirlilik kaynakları evsel, ticari, endüstriyel, doğal ve tarım kaynaklı olmak üzere beş ana başlık altında incelenebilir (US EPA, 1993).

Kırsal ve kentsel yerleşim yerlerinden kaynaklanan evsel atıklar, yüzey ve yer altı su kaynaklarını önemli derecede kirletmektedir. Evlerin temizliğinde kullanılan temizleyiciler, dezenfekte maddeleri, metal ve ayakkabı parlaticıları, sabun, deterjan, çamaşır suyu, kuru temizleme sıvıları, duvar ve mobilya bakımında kullanılan boyalar, vernikler, ahşap koruyucular, otomobil atıkları, gres, araba yıkama ve bakımında kullanılan malzemeler, bahçe bakımında kullanılan gübre ve pestisitler, yüzme havuzu bakım kimyasalları, septik sistemlerdeki koliform bakteriler, virüsler, azot, fosfor, ağır metaller, sentetik deterjanlar, boyalar, okullar ve hükümet binalarında kullanılan çözücüler, bina atıkları, parklarda kullanılan gübreler ve böcek öldürücüler ve evsel atık suları arıtma kimyasalları önemli yerleşim yeri kirleticileridir. Kentlerdeki belediye çalışmaları sonucu oluşan yiyecek ve inşaat atıkları ve su arıtma tesislerinden kaynaklanan atıkların toplandığı belediye çöplüklerinde oluşan radyoaktif, toksik ve zararlı atıklar yağmur suyuna karışarak yer altı sularının kirlenmesine neden olmaktadır. Yer altı suyunun çöplüklerden dolayı kirlenme derecesi, çöplüğün yer altı suyunun beslenme alanı üzerinde olmasına, çöplükteki atıkların özelliklerine ve yağmurun miktarına ve şiddetine bağlıdır. Dolayısıyla, çöplük yerinin doğru bir şekilde saptanması yer altı suyu kirliliğini minimize etmek açısından son derece önemlidir. Çöplüğün inşasında kullanılacak malzemenin cinsi de önemlidir. Çöplükten sızan suyun yer altı suyuna karışmasını engellemek veya geciktirmek amacıyla çöplüğün tabanına kaliteli kil tabakası yerleştirilmelidir. Kil tabakasının üzerinde biriken sızıntı suyunu toplamak ve drene etmek için kum veya çakıldan oluşan bir tabaka inşa edilmelidir. Bir yerleşim alanındaki yer altı suyu kaynaklarının kirlenme oranı o yörenin nüfus ve dolayısıyla da yöredeki septik tanklarının yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, toprağın aşırı geçirgen ve sığ olması ve yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olması gibi faktörler de yer altı suyunun septik tanklar yoluyla kirlenmesinde etkili faktörlerdir. Septik tanklarının yer seçimi, planlanması, inşası ve bakımı yer altı suyu kirliliğinin kontrolünde çok önemlidir.

Havaalanları, otomobil tamir dükkanları, limanlar, araba servisleri ve yıkama yerleri, mobilya üretim dükkanları, benzin istasyonları, çamaşırhaneler, sağlık kuruluşları, boya ve fotoğraf dükkanları ve otogarlar kirliliğe neden olan ticari kaynaklardır. Havaalanları ve yollardaki buzları çözmek için kullanılan tuzlar, ahşap koruma ve temizleme kimyasalları, gemi boyaları ve atıkları, araba yıkama yerlerinde kullanılan çözücüler, sabunlar, deterjanlar, çeşitli kimyasallar, kamp yerleri atıkları, kuru temizlemede kullanılan malzemeler, mobilya boyaları, benzin istasyonlarındaki atıklar ve yakıt döküntüleri, çamaşırhanelerde kullanılan deterjanlar ve kumaş boyaları, sağlık kuruluşlarındaki dezenfekte ve radyolojik atıklar yerüstü ve yer altı depolama tanklarından

sızan petrol ürünleri ve kimyasallar ile otogarlarda depolama tanklarından ve taşıt depolarından oluşan yakıt sızıntıları ticari kirleticilerin ayrıntısını oluşturmaktadır.

Endüstriyel kaynaklar malzeme depoları, yerüstü ve yer altı depolama tankları, endüstriyel su arıtma sistemi atıkları, kimyasal depoları, kuyular, asfalt tesisleri, elektrik ve elektronik araçları üretme ve depolama yapıları, metal işleme dükkanları, kağıt fabrikaları, endüstriyel boru hatları ve metal endüstrilerinden oluşmaktadır. Isıtma yakıtları, motorin ve benzin dökülmeleri, septik tanklardaki kaçak sızıntılar, savunma işlemlerinde kullanılan radyoaktif atıklar, kuyulardaki tuzlu sular, asfaltlama çalışmalarında kullanılan petrol ürünleri, elektrik ve elektronik araç üretiminde kullanılan kimyasallar, plastik ve sentetik madde üretiminde kullanılan çözücüler, petrol ürünleri, organik ve inorganik maddeler, boya atıkları, asitler, fenoller, formaldehit ve diğer kimyasallar ve temizleyiciler endüstriyel kaynaklara örnektir.

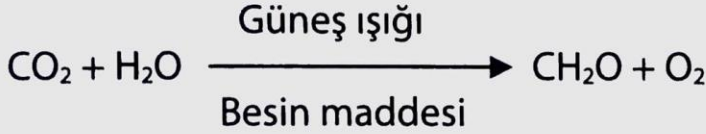
Kayalar ve topraklarda bulunan demir, kalsiyum, magnezyum, mangan gibi mineraller suyun görünümünü ve sertliğini olumsuz etkileyen doğal kirlilik kaynaklarıdır. Arsenik, ağır metaller, klor, flor, sülfat, radionükleitler ve mikroorganizmalar (bakteriler ve virüsler) ise insan sağlığını tehdit eden doğal kirleticilerdir.

Ülkemizde en önemli su kirletici kaynaklarından birisi de tarımsal faaliyetlerdir. Tarım alanlarında üretimi arttırmak için yoğun bir şekilde kullanılan gübreler ve pestisitler, yağmur veya sulama suyu ile taşınarak yüzey ve yer altı su kaynaklarını kirletmektedir. Bazı pestisitler toprakta ve suda ayrışmadan uzun süre kalabilmektedir. Bu durum günümüzde insan ve hayvan sağlığı açısından tehdit olma riskini arttırmaktadır. Tarımsal işletmelerdeki hayvan çiftliklerinden kaynaklanan atıkların yüzey akışıyla yerüstü sularına ve infiltrasyon ile sızarak yer altı sularına karışması da önemli bir sorun oluşturmaktadır. Hayvan beslemede kullanılan yem atıklarındaki azot, fosfor ve klorun taşınması veya yıkanması ve toprağa gömülen ölü hayvanların zamanla ayrışarak su kaynaklarını kirletmesi de önemli bir sorundur. Ayrıca, kırsal alanlarda içme, kullanma, sulama veya drenaj amaçlı inşa edilen kuyuların uygun inşa edilmemeleri durumunda kirlenmiş yüzey veya yer altı suyu kuyuya girerek yer altı suyunu kirletebilmektedir. Ayrıca, toprak işleme veya hasat işlemlerinde kullanılan zirai alet ve makinelerinden oluşan kimyasal atıklar yıkılarak yer altı suyunu kirletebilmektedir.

B. Biyolojik Ayrışma

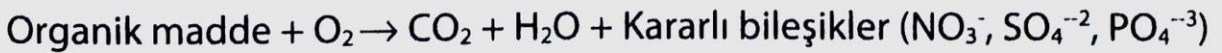
Biyolojik ayrışma, organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından daha küçük bileşiklere dönüştürülmesi şeklinde tanımlanabilir. Mikroorganizmalar, organik maddeleri metabolik veya enzimatik işlemlerle değişik bile-

şiklere dönüştürür. Bu işlem sonucunda karbondioksit ve metan gazları oluşur. Kirleticilerin, sudaki oksijen konsantrasyonunu nasıl etkilediklerini daha iyi anlayabilmek için, organik atıkların biyolojik ayrışmalarını bilmek gerekir. Bitkiler, inorganik maddeleri ve güneş ışığını kullanarak aşağıdaki eşitlikte görülen yüksek enerjili molekülleri meydana getirirler. Hayvanlar bu molekülleri sindirirken açığa çıkan enerjiyi kullanır.

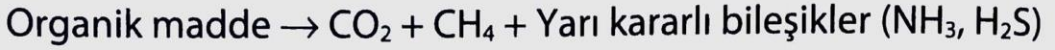


Sindirim sonucunda oluşan kararlı bileşikler, bakteriler, mantarlar, böcekler, kurtlar ve diğer organizmalar tarafından besin maddesi olarak kullanılır ve bu aşamadan sonra söz konusu maddeler daha yavaş ayrışır. Organik maddelerin hepsi sonuçta ayrışmakla birlikte bazıları diğerlerine oranla daha hızlı ayrışmaktadır. Bazı organizmaların artıkları, diğer organizmalar tarafından besin maddesi olarak tüketilmektedir. Birkaç ayrışma aşamasından sonra oluşan çok düşük enerjili bileşikler, ancak bitkiler tarafından kullanılarak yüksek enerjili bileşikler inşa edilir ve bu zincir bu şekilde devam etmektedir. Sudaki yüksek enerjili organik maddelerin organizmalar tarafından ayrıştırılması sonucu su kirliliği problemleri ortaya çıkmaktadır (Vesilind, 1975).

Biyolojik ayrışma, serbest oksijen (aerobik) veya bağlı oksijen (anaerobik) ortamlarında olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Serbest oksijen ortamındaki ayrışmada, mikroorganizmalar suda serbest haldeki çözülmüş oksijeni kullanarak organik maddeleri ayrıştırmaktadır. Aerobik bakteri, oksijeni kullanarak organik maddeleri daha küçük bileşenlere ayrıştırır ve sonuçta kararlı ve düşük enerjili karbondioksit, su, nitrat, sülfat ve fosfat gibi ürünler oluşur. Aerobik ayrışma devam ettiği sürece, organik maddeler çevresel açıdan bir problem oluşturmamaktadır. Çünkü reaksiyon sonucu oluşan son ürünler su kirliliğine neden olmamaktadır. Su kaynağına aşırı miktarda organik madde yüklendiği zaman, mikroorganizmalar çoğalarak bu organik maddeyi parçalamak için sudaki çözülmüş oksijen miktarını diğer su canlıları için gerekli olan sınır değerinin altına düşürerek onların ölmesine neden olur. Bu durumda, ortamdaki aerobik canlıların yerini anaerobik canlılar alır ve organik maddeyi ayrıştırma işlemini anaerobik mikroorganizmalar sürdürür. Depolama tanklarındaki ve petrol sızıntısından kaynaklanan kirliliği gidermek amacıyla yer altı suyuna oksijen verilmesi yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Böylece, aerobik ayrışma hızlandırılarak kirleticinin zararlı etkisi azaltılmış veya yok edilmiş olur. Aerobik ayrışma aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:



Bağlı oksijen ortamındaki ayrışmada, mikroorganizmalar ayrıştırma işlemini suda çözülmüş serbest oksijenin olmadığı fakat oksijenin sudaki bileşiklere bağlı olduğu ortamda gerçekleştirir. Bazı anaerobik bakteriler nitrat, sülfat, demir, manganez ve karbondioksiti kullanarak organik maddeleri daha küçük bileşenlere ayrıştırır ve son ürün olarak karbondioksit ve metan gazı oluşur. Anaerobik ayrışmanın temel eşitliği:

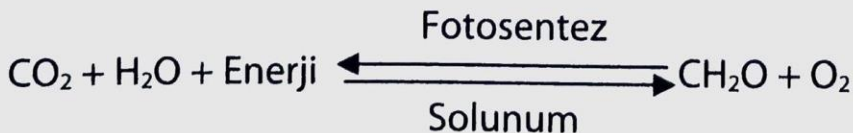


Anaerobik ayrışmada reaksiyon sonucu oluşan bileşiklerin çoğu metan gazı (CH₄) gibi fiziksel olarak kararlı olmasına karşı biyolojik olarak ayrışabilirler. Anaerobik ayrışma iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada organik madde organik aside dönüşürken, ikinci aşamada organik asit CH₄ ve CO₂'ye dönüşmektedir. Anaerobik ayrışmanın olduğu ortamlarda balık ve diğer su canlılarının yaşaması imkansızdır. Anaerobik ayrışmanın aerobik ayrışmaya oranla daha az enerji gerektirmesi, kirli suların anaerobik yöntemle ayrıştırılmasının önemini arttırmaktadır.

C. Göl Kirliliği

Işık ve sıcaklığın göl kirlenmesine etkisi akarsulara etkisinden daha fazla olduğu için bu iki parametrenin göl kirlenmesi ile ilgili çalışmalarda mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Işık, fotosentez olayında enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Göl sularının sıcaklığı derinlik ve mevsime bağlı olarak değişir. Genel olarak sıcaklık, derinlikle azalmasına karşı kış mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir artış göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla yüzeye yakın olan su kütlesi ısınır, fakat su ısıyı iyi iletmediği ve ısınan suyun daha hafif olması nedeniyle yüzeye yakın kısım ile onun altındaki kısım arasında bir sıcaklık farkı meydana gelir. Bu olaya termal tabakalaşma adı verilir. Bu tabakalaşma sırasında su sirkülasyonu sadece yüzeye yakın yerlerde olduğu için biyolojik ve kimyasal reaksiyonların büyük bir kısmı da bu tabakada meydana gelmektedir. Havalarda soğumasıyla yüzeye yakın olan su kütlesi soğur ve ağırlaşan su kütlesi aşağıya doğru hareket eder ve bu sirkülasyon devam eder gider.

Göllerde, biyolojik yaşamın devamlılığını sağlayan muhteşem bir biyokimyasal reaksiyon dengesi vardır. Akarsularla göllere taşınan azot, fosfor ve karbonlu bileşikler, alg adı verilen mikroskobik canlılar tarafından güneş ışığı yardımıyla sindirilerek daha yüksek enerjili moleküller meydana gelir. Bir göldeki fotosentetik faaliyetler şu şekilde ifade edilebilir:



Göller, gerek akarsuların getirdiği ve gerekse doğrudan göle boşaltılan kullanılmış sulardan kaynaklanan çok miktarda azot, fosfor ve karbon bileşiklerini içermektedir. Göllerdeki bu bileşikler besin maddesi olarak kullanan alglerin hızla çoğalması sonucu ötrofikasyon olarak adlandırılan olay meydana gelmektedir (Smith ve ark., 1999; Raike ve ark., 2003). Alglerin zooplanktonlar, zooplanktonların da balıklar tarafından besin maddesi olarak kullanılmaları sonucu oluşan atıklar, bakteriler tarafından kullanılarak alglerin ihtiyacı olan CO₂ üretilir. Ötrofikasyonun artmasına neden olan besin maddelerinin kaynakları değişmekle birlikte kanalizasyon sularındaki yiyecek atıkları, sentetik deterjanlar ve tarımsal gübrelerdeki azot ve fosfor önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca, endüstriyel atık sularındaki değişik maddeler ötrofikasyonu hızlandırmaktadır. Ötrofikasyonun aşırı artması, birim hacim sudaki alg sayısının artarak oksijen miktarının azalmasına ve göldeki balık ve diğer canlıların ölmesine neden olmaktadır. Bu durum, gölün biyolojik dengesinin bozularak göl suyunun kullanılamaz hale gelmesine yol açmaktadır. Ötrofikasyon, özellikle su hareketinin olmadığı veya çok az olduğu göller, havuzlar veya çok yavaş akan nehirlerde meydana gelmektedir.

Organizma çeşitliliği, sayısı ve bitki yoğunluğundaki artış, suyun renk değiştirmesi, oksijenin derinlikle değişim göstermesi ve çözünmüş azot ve fosfor konsantrasyonundaki artış, bir göldeki en önemli ötrofikasyon belirteleridir. Bir gölün birim hacmindeki alg sayısı, o gölün kirliliği veya göldeki azot, fosfor ve karbonun miktarı ile doğru orantılıdır. Bir gölde bu üç elementten birinin olmaması alglerin oluşumunu engellemektedir. Bir gölün ötrofik olup olmadığının saptanmasında en çok kullanılan parametre, o gölün alt tabakasındaki oksijen konsantrasyonundaki değişimdir.

Göller, kirlenme durumlarına göre üç sınıfa ayrılabilir. **Oligotrofik göller**; derin, berrak mavi, oksijen gölün derinliklerine dağılmış ve gölde yıl boyunca oksijen mevcuttur. Bu göller besin açısından fazla zengin olmadıkları için alg patlaması fazla değildir. **Ötrofik göller**; askıda ve çökelmiş olarak çok miktarda organik madde içerdikleri için alg patlaması olabilir. Bu nedenle bazı dönemlerde çözünmüş oksijen hiç olmayabilir. **Mezotrofik göller**; bu iki sınıf arasında yer almaktadır. Yeni oluşan veya oluşturulan göller başlangıçta oligotrofik sınıfta yer alırken doğal ve insan faaliyetlerinin etkisiyle zamanla ötrofik sınıfa kayabilir ve sonuçta kullanılamaz hale gelebilir (Uslu ve Türkman, 1987).

Göllere sürekli besin maddesi ve sediment taşındığı zaman bu ortamlarda biyokimyasal faaliyetler aralıksız devam eder. Bunun sonucu ötrofikasyon hızlanır ve göl zamanla sığlaşarak kaybolabilir. Gölleri bu olumsuz gelişmelere karşı korumanın değişik yolları vardır. Bunlardan birincisi ve belki de en önemlisi, akarsulara ve dolayısıyla da göllere karışan besin maddelerinin azaltılmasıdır. Özellikle kanalizasyon ve fabrika atıkları ile belediye

çöplükleri gibi noktasal kaynaklardan deşarj yoluyla oluşan yüklemeleri kontrol etmek, bunların göle karıştıktan sonraki arıtımından çok daha kolay ve daha az maliyetlidir. Bazı algisit ve herbisitler kısa vadede alglerin geçici olarak çoğalmalarını engellemelerine karşı uzun vadede su canlılarına zararlı olabilirler. Teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlemesine karşı ekolojik dengenin bozulması, çevre kirliliği ve su kalitesi gibi insan sağlığını doğrudan ilgilendiren konularda ciddi problemlerle karşılaşılması, insanların bu konularda yeterince bilinçli olmadıklarını göstermektedir.

D. Akarsu Kirliliği

Dünya üzerindeki suyun % 97'sinden fazlası okyanuslarda ve denizlerde, geriye kalan % 3'ünün de çoğu kutuplarda buzul olarak bulunmaktadır. Atmosfer, akarsular, göller ve yer altı suları kullanılabilir suyun % 1'inden daha azını oluşturmaktadır. Bu su kaynakları, insanoğlunun ihtiyacını karşılamak durumundadır (Brady ve Weil, 2002). Kullanılabilir su ihtiyacındaki artışın dünya nüfusundaki artışın iki katı olduğu bildirilmektedir. Bu durum, akarsuların kirlenmeye karşı korunmaları gerektiğini açık bir şekilde göstermektedir.

Akarsu kirliliğinin ana kaynağı kanalizasyon, besin artıkları ve tarımsal alanlardaki sızıntılarda bulunan organik maddeler oluşturmaktadır. Ayrıca, kirli havada sülfür dioksit ve azot oksit gibi petrol ürünlerinin yanması sonucu oluşan kirlenmeler, yağmur suyu ile reaksiyona girerek sülfürik ve nitrik asitleri oluştururlar. Bu asitler, topraktaki alüminyum ve ağır metallerle reaksiyona girerek bitki ve hayvanlara zararlı bileşikler meydana getirirler. Alüminyum, akarsu ve göllere taşındığı zaman küçük su canlıları ve balıkları öldürmektedir. Tarım alanlarında kullanılan gübreler ve pestisitler, sıvı hayvan gübresi, hayvansal atıklar ve diğer atıkların akarsulara ulaşmaları sonucunda sudaki azot ve fosfor konsantrasyonu önemli derecede artmaktadır. İçme suyunda yüksek miktarlarda bulunan azotun, insan sağlığını tehdit ettiği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Maticic, 1999; Binkley ve ark., 1999). Avrupa standartlarına göre içme suyundaki azot konsantrasyonu 50 mg/l'den fazla olmamalıdır. Bakteriler, algler ve diğer bazı mikroorganizmalar bu organik maddeleri besin maddesi ve suda çözünmüş oksijeni (ÇO) de enerji kaynağı olarak kullanmak suretiyle hızlı bir şekilde ürerler. Bakteriler, ölen algleri yiyerek hızlı bir şekilde çoğalırlar ve diğer canlılar için gerekli olan ÇO'ü tüketerek onların ölümüne neden olur. Bir akarsudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu, su yüzeyindeki havalanma, makrofitler ve fitoplanktonun asimilasyonu, biyokimyasal ayrışma için oksijen kullanımı, bitkisel ve hayvansal canlıların solunumu gibi faktörlere bağlıdır. Akarsulardaki oksijen dengesini olumsuz etkileyen en önemli unsur, organik maddeler ve azotlu bileşiklerin biyokimyasal ayrışımı sırasında oksijenin tüketilmesidir. Normalde ÇO akarsularda bol miktarda bulunmasına karşın, seviyesindeki küçük düşüş akarsularda yaşayan canlılar

üzerinde zararlı etkilere sahip olabilmektedir. Akarsuların kirlenmesi sonucu suyun rengi ve kokusu değişir, suda yaşayan bitkiler ve hayvanlar ölür, mikro-organizmalar ürer, bu suları içen insanlar ve hayvanlar hastalanır veya ölebilir.

Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan kimyasal atıklarda bulunan kurşun, bakır, çinko, kadmiyum ve cıva gibi ağır metallerin akarsulara bırakılması sonucu balık ve diğer suda yaşayan canlılar hemen ölmektedir. Petrol ürünlerinin yavaş akan nehirlere dökülmesi sonucu suya oksijen girişi engellenmekte ve canlıların ölümüne neden olmaktadır. Bu canlıların ölmesi akarsuların ekolojik dengelerinin bozulmasına ve sonuçta suların kirlenmesine yol açmaktadır. Endüstriyel faaliyetlerde soğutma amacıyla akarsulardan alınan soğuk suyun tekrar sıcak su olarak akarsuya bırakılması sonucu suyun sıcaklığı artmakta, oksijen seviyesi düşmekte ve dolayısıyla doğal özellikleri bozulmaktadır.

E. Yer altı Suyu Kirliliği

Yer altı suyu kirlenmesi temel olarak plansız kentleşme, şehirleşme ve yer altı suyunun kontrolsüz bir şekilde tüketilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. yer altı sularının yüzey sularına oranla daha az kirlenme ihtimaline sahip olması onların önemli bir içme suyu kaynağı olarak korunma gerekliliğini daha da arttırmaktadır. Bununla birlikte, yer altı suyu kirlendiği zaman kirlenen suyun arıtılması çok zaman almakta ve pahalı olmaktadır. Dolayısıyla, yer altı sularının kirlenmeden önce korunmasına yönelik önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır.

Yüzey sularında olduğu gibi yer altı sularının kirlenmesine noktasal ve noktasal olmayan kaynaklar neden olmaktadır. Arıtma sistemleri ve endüstriyel faaliyetlerden deşarj olan atıklar, belediye çöplükleri, petrol ürünleri ve kimyasalları depolama tanklarından ve septik tanklardan oluşan sızıntılar noktasal kaynakları oluşturmaktadır. Noktasal olmayan kaynaklar çok daha geniş alanlara yayıldığı ve fazla miktarda kirletici yüzey ve yer altı sularına karıştığı için kontrol edilmeleri çok daha zordur. Sediment kirliliği, atmosfer kaynaklı kirlilikler (hava kirliliği) ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan gübre ve pestisit kirlenmeleri noktasal olmayan kaynağa örnektir.

Yeryüzündeki su veya kimyasallar yer altı suyuna ulaşmadan önce doymamış bölgeyi geçmek zorundadır. Bu nedenle bu bölgedeki olayların mekanizmasının iyi anlaşılması yer altı sularının kirlenmeye karşı korunmalarında etkin bir yoldur. Kapiler kuvvetler ve toprağın doğrusal olmayan (nonlinear) hidrolik özellikleri yüzünden doymamış ortamdaki su akışı ve kimyasal taşıma mekanizması doymuş ortamdakine kıyasla çok daha karmaşıktır. Doymamış bölgede toprak gözeneginin (boşlukların) bir kısmı su diğer kısmı da hava ile doldurulur ve su toprak tarafından eksi basınçta tutulur. yer altı su

yüzeyinin hemen üstündeki kısım ise su ile doymuş olduğundan su kapiler kuvvetlerin etkisiyle tutulmaktadır. Yer altı su yüzeyinin üzerindeki doymamış ortamda su, toprak tanecikleri yüzeyinde bir film şeridi gibi sıkı bir şekilde adsorbe edilerek kapiler kuvvet etkisiyle tutulur (Bedient ve ark., 2001).

Yakın zamana kadar doymamış bölgedeki toprağın homojen bir yapıya sahip olduğu düşünülerek toprak yüzeyine ulaşan su ve kimyasalın bu bölgede üniform olarak hareket ettiği varsayılmıştır. Ancak yapılan araştırmalarda, su ve kimyasalın toprak matrisini kullanmadan topraktaki daha az dirence sahip olan çatlaklar, çürümüş bitki kökleri, toprak canlılarının oluşturduğu delikler ve doğal açıklıkları tercih ederek yer altı suyuna beklenenden çok daha kısa sürede ulaştığı saptanmıştır (Hill ve Parlange, 1972; Kung, 1990; Beven ve Germann, 1982; Quisenberry ve ark., 1994). Tercihli akış olarak adlandırılan bu akış tipinde su ve kimyasal hareketi heterojen bir dağılım gösterdiği için, üniform ortamlardaki su akışı ve kimyasal taşınımının modellemesinde kullanılan Richards ve convection-dispersion eşitlikleri bu akış tipinde doğru sonuçlar vermemektedir (Paniconi ve Wood, 1993). Su ile toprak yüzeyine uygulanan bir kimyasalın doymamış bölgedeki hareketi tercihli akışın büyüklüğüne bağlıdır. Tercihli akışın büyüklüğü ise toprağın tekstürü, yapısı, nem içeriği, hacim ağırlığı, doymuş hidrolik iletkenlik, organik madde içeriği ve yer altı suyuna olan mesafe gibi çeşitli toprak özelliklerine bağlıdır (Jury, 1986). Kumlu topraklarda su hareketi daha kolay olduğu için, kimyasalın toprak tarafından tutulması veya adsorbe edilmesi ağır bünyeli killi topraklara oranla daha azdır. Bu nedenle, hafif bünyeli toprakların olduğu bölgelerde yer altı suyunun kirlenme ihtimali daha yüksektir (Quisenberry ve ark., 1993). Toprak bünyesi, toprak yapısını doğrudan etkilediği için, ağır bünyeli topraklarda gerilme ve çekme sonucu oluşan çatlaklar yoluyla kimyasallar yer altı suyuna beklenenden çok daha kısa sürede ulaşır (Flury ve ark., 1994). Doymuş hidrolik iletkenliğin yüksek olması kimyasal taşınımını hızlandırarak yer altı suyuna karışmasına neden olmaktadır.

Gübre ve pestisitlerin yer altı suyuna sızmasını minimuma indirmek için uygun zaman ve miktarda uygulanması gerekir. Toprağın organik madde içeriği toprağın su tutma ve kimyasal maddeleri adsorbe etme kapasitelerini arttırmaktadır. Böylece, toprağa organik maddenin verilmesi kimyasalın yıkanma yoluyla yer altı suyuna karışması azaltılmış olur. Toprak yüzeyi ile yer altı suyu arasındaki toprak filtre vazifesi gördüğü için bu ikisi arasındaki mesafe önemlidir. Bu ikisi arasındaki mesafenin az olması daha az adsorpsiyon ve ayrışmanın sonucu daha fazla yer altı suyuna sızma demektir. yer altı suyunun yüzeye yakın olduğu durumda gübre ve pestisit az veya aralıklarla uygulanmalı veya hiç uygulanmamalıdır. Yer altı suyuna kadar olan mesafedeki toprağın jeolojik yapısı da önemlidir. Örneğin, buradaki çakıl veya kum tabakası yer altına sızacak kimyasala karşı fazla bir koruma oluşturmamaktadır, fakat kil

tabakası birçok kimyasala karşı etkili bir filtre görevi görebilir. Kirleticilerin ulaştığı yüzeyin fazla eğimli olması yüzey akışını arttıracığı için yer altı suyuna olan sızmayı azaltmaktadır.

Bir kimyasalın yer altı suyuna ulaşarak onu kirletmesi, o kimyasalın özelliklerine ve insanların faaliyetlerine bağlıdır. Toprak nemi ile temas eden kimyasal, özelliğine göre toprak suyunda çözünebilir, toprak tarafından adsorbe edilebilir, buharlaşabilir veya ayrışabilir. Çözünürlük, bir kimyasalın suda çözünerek askı maddesi haline gelme yeteneğini ifade eder. Çözünürlüğü yüksek bir kimyasalın toprak suyunda çözüldükten sonra su ile hareket ederek yer altı suyuna karışma ihtimali daha yüksektir. Adsorpsiyon, bir kimyasalın toprak parçacıkları veya organik madde yüzeyinde tutulma kapasitesini ifade etmektedir. Toprak yüzeyinde sıkı bir şekilde tutulan bir kimyasalın yıkanma ile yer altı suyuna karışma ihtimali düşüktür. Buharlaşma, bir kimyasalın buhar haline gelerek atmosfere karışması olayıdır. Yüksek derecede buharlaşma kapasitesine sahip bir kimyasal suda çözünmeden önce atmosfere karışabilir. Ayrışma, toprak veya sudaki organik maddenin biyokimyasal olaylar sonucu daha küçük ve düşük enerjili maddeler haline dönüşmesi olayıdır.

Yavaş ayrışan bir kimyasalın yıkanma ile yer altı suyuna karışma ihtimali daha yüksektir. Yoğun katı fazlı sıvılar (dense nonaqueous phase liquids, DNAPLs) olarak bilinen kirleticiler çok problemlidir. Bunlar, kuru temizleme, ahşap koruma, asfaltlama çalışmaları ve otomobil üretim ve tamiri gibi alanlarda kullanılan kimyasallardır. Bu maddeler sudan daha ağır oldukları için yer altı suyuna daha kolay ulaşır ve çökerler. Dolayısıyla petrol ürünlerine göre kontrol edilmeleri daha zordur. İnsanlar tarafından tarımsal üretimi arttırmak için kullanılan gübre ve pestisitlerin uygulanma şekilleri ve miktarları da bu maddelerin yer altı suyuna karışmasını etkileyebilir. Yüzeyde akan suya karışma ihtimali düşük ve yer altı suyuna sızma eğilimi daha az olan pestisitler kullanılarak yer altı suları kirlenmeye karşı korunabilir. Şiddetli bir yağış veya sulama öncesi uygulanan kimyasallar yer altı suyuna sızabileceğinden kimyasalın uygulama zamanı önemlidir.

Zararlı bir kirletici kaynağından yer altı suyuna karışan kirleticilerin temel taşınım işlemleri; su ile taşınım (advection), difüzyon (diffusion), dispersiyon (dispersion), adsorpsiyon (adsorption), biyolojik ayrışma (biodegradation) ve kimyasal reaksiyondur (Bedient ve ark., 2001). Su ile taşınımında kirleticiler, gözenekli ortamda akış halindeki su ile aynı hızda hareket eder ve aşağıdaki taşınım eşitliğiyle ifade edilir:

$$F_x = v_x nC = \left(K \frac{1}{n} \frac{dh}{dL} \right) nC$$

Eşitlikte F_x tek boyutlu kirlenici akışını, v_x ortalama doğrusal akış hızını ($L T^{-1}$), n etkili gözenekliliği, C kirlenici konsantrasyonunu ($M L^{-3}$), K hidrolik iletkenliği ($L T^{-1}$) ve dh/dL hidrolik eğimi ifade etmektedir.

Difüzyon yoluyla taşınımında kirleniciler, yüksek konsantrasyonlu alanlardan düşük konsantrasyonlu alanlara doğru hareket eder. Akış hızının yüksek olduğu durumlarda su ile taşınım kirlenici taşınımında etkili olmasına karşı, akış hızının düşük veya hiç olmadığı durumlarda difüzyon yoluyla taşınım daha önemlidir. Yer altı suyunda difüzyon yoluyla tek boyutlu kirlenici taşınımı Fick difüzyon kanunu ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f_x = -D_d \frac{dC}{dx}$$

Eşitlikte f_x kirlenici akışını ($M L^{-2}T^{-1}$), D_d difüzyon katsayısını (L^2T^{-1}) ve dC/dx konsantrasyonun mesafe ile değişimini ifade etmektedir. Difüzyon katsayısının değeri $25^\circ C$ sıcaklıkta 1×10^{-9} ile $2 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ arasında değişmektedir. Yer altı suyunun akış hızı yüksek olduğunda dispersiyon etkili olmakta ve difüzyon katsayısının yerini ondan daha büyük olan dispersiyon katsayısı almaktadır. Dispersiyon, gözenekli ortamda akış hızlarındaki farklılıklardan kaynaklanan karışım işlemidir. Su ile üniform olarak taşınmakta olan kirleniciler, taşınma hızlarındaki alansal farklılıklardan dolayı yayılırlar ve konsantrasyonlarında seyrelme meydana gelir. Gözenekli ortamda bir akış kanalı yüzeyindeki sürtünme, kanaldan kanala değişen akış hızı ve akış yolu uzunlukları akış hızındaki heterojenliğe neden olmaktadır.

Adsorpsiyon, bir gaz veya sıvı molekülü veya taneciğinin katı veya sıvı bir tanecik yüzeyine tutunması olayıdır. Topraktaki bir kimyasal molekül veya iyonun toprak tanecikleri tarafından tutunması bu olayın özel bir halidir. Topraktaki adsorpsiyonun boyutu, toprak tanecikleri yüzeyindeki enerjiye bağlıdır. Toprak yüzeyindeki atomların diğer kimyasal iyonlarla doyurulma derecesi onların adsorpsiyon kapasitelerini direkt olarak etkilemektedir. Halihazırda kirleniciler ile doymuş bir toprağın adsorpsiyon kapasitesi düşüktür. Adsorpsiyon, genellikle izoterm (isotherm) ile tanımlanır ve izoterm, tutucu yüzey (adsorbent, yani toprak tanecikleri) üzerindeki iyon konsantrasyonu (adsorbate)'nin bir fonksiyonudur. Freundlich and Langmuir en çok kullanılan iki adsorpsiyon izoterm'dir. Biyolojik ayrışma, ortamdaki (su veya toprak) organik madde veya kirlenicilerin diğer canlı organizmalar tarafından parçalanarak ayrıştırılması olayıdır. Mikrobiyel organizmalar, kirlenicileri metabolik veya enzimatik işlemlerle başka bileşiklere dönüştürürler. Genellikle biyolojik ayrışmanın son ürünü karbondioksit veya metan'dır. Bu ayrışma olayı, oksijenin ortamda "serbest" veya "bağlı" olarak bulunduğu durumlarda gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyon, kimyasal bir madde veya maddelerin diğer farklı bir kimyasal madde veya maddelere dönüştürülmesi işlemidir. Bu dönü-

şüm sırasında moleküller arasındaki kimyasal bağlar kırılarak yeni maddelerin oluşması sağlanır.

II. SU KİRLİLİĞİ KONTROLÜ

Dünya nüfusunun hızla artması, suya olan ihtiyacın giderek artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu ihtiyacın karşılandığı su kaynakları sınırlıdır. Buna ek olarak, artan endüstriyel ve ticari faaliyetler sonucu oluşan katı veya sıvı atıklar mevcut su kalitesinin bozulmasını hızlandırmaktadır. Dolayısıyla, mevcut suyun miktar ve kalite olarak korunması veya kontrol edilmesinin önemi her geçen gün daha da artmaktadır.

İnsanların üretim ve tüketim faaliyetlerinin her aşamasında atıklar oluşmaktadır. Bu atıklar atmosfer, su ve toprak ortamlarını kirleterek ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Kanalizasyon veya fabrika atıklarının çıkış ağızlarına inşa edilen atıksu arıtma tesisleriyle noktasal kirletici kaynakların kontrol edilmeleri kolay olmasına karşın, tarım arazilerinden yüzey akış yoluyla taşınan gübre ve pestisitlerin oluşturduğu noktasal olmayan kirletici kaynakların kontrol edilmeleri oldukça zordur. Bu kaynaklar geniş alanları kapladıkları için, atıksu arıtma sistemleri gibi teknolojik önlemlerle kontrol edilmeleri de neredeyse mümkün değildir. Bu nedenle tarımsal faaliyetlerde gübre ve pestisitlerin uygulama zamanı ve miktarlarının doğru saptanarak kontrol altına alınmaları daha etkin ve ucuz bir yoldur.

Yüzey ve yer altı sularının kalitesi, yörenin nüfus yoğunluğuna, endüstriyel ve ticari faaliyetlere, arazi kullanım durumuna, ekolojik ve hidrolojik yapı ile su kirliliği kontrolü konusunda alınacak tedbirlere bağlıdır. Atıksularda bulunan mikroorganizmalar (patojenler ve virüsler), organik maddeler, nütrientler (azot ve fosfor), ağır metaller (kurşun, krom ve kadmiyum), inorganik tuzlar, askıda katı maddeler (bitki artıkları, humus ve doğal gübreler) ve organik kimyasalların (herbisit, pestisit ve yağlar) su kaynaklarına karışması sonucu oluşan olumsuz çevre koşulları (toksik ve oksijensiz ortam) su ve toprak canlılarının ölmesine ve dolayısıyla ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca, doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi ve yanlış tarımsal uygulamalar erozyon ve sediment taşınımını arttırarak su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Bu maddelerin su kaynaklarına karışmasını önlemek veya minimuma indirmek, su kirliliği kontrolünün ilk ve en önemli aşamasıdır. Su kirliliği kontrolünde, problemlerin bilimsel ve teknolojik boyutu kadar ekonomik boyut da önemlidir. Eldeki kısıtlı kaynakların optimum bir şekilde kullanılmaları ile su kaynaklarının korunma ve iyileştirilmesi için kanalizasyon ve atıksu arıtma tesislerinin inşası belirli bir yatırımı gerektirmektedir.

Yerel yönetimlerin su kirliliği kontrol bölümleri, yıllık olarak su kalitesini izler, analiz eder ve sonuçları bir rapor halinde yayınlar. Buna ek olarak, akar-