

Yayılı Kirleticilerin Havzalardaki Taşınım Süreçleri: Antibiyotikler, Ağır Metaller ve Besi Maddeleri Üzerine Modelleme Yaklaşımları

Zeynep AKDOĞAN, Arın KÜÇÜKDOĞAN, Başak GÜVEN

Çevre Bilimleri Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, 34342, İstanbul, Turkey

ÖZET

Özellikle tarım ve hayvancılık kaynaklı yayılı kirleticilerin su havzalarındaki davranışlarını tahmin etmeye yönelik modelleme çalışmaları, son yıllarda gittikçe artarak dikkati çekmektedir. Çoğu zaman sadece önlem amaçlı kullanılan antibiyotikler, hayvan yetiştiriciliğinde en yaygın olarak tercih edilen ilaç türlerinden biridir. Antibiyotiklerin kayda değer fraksiyonları hayvan atığında ortaya çıktığı için; tarımsal arazilere hayvan atıklarının gübre olarak uygulanmasını takiben, antibiyotikler gübreden toprağa geçerek toprak kalitesini, aynı zamanda yüzeysel akışla yüzey sularına taşınarak su kalitesini olumsuz etkileyebilmektedirler. Bu durum su temininde önemli rol oynayan havzaların planlanması ve yönetimi için modelleme çalışmalarının geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), mekansal verileri elde etmede sağladığı kolaylık ve çok sayıda farklı türdeki veriyi haritalandırma özelliği ile havza modelleme çalışmalarında başvurulan önemli araçlardan bir tanesi olmuştur. Besi maddelerinin taşınımı ve su kalitesi üzerine etkilerini inceleyen CBS tabanlı modelleme yaklaşımları literatürde bulunmaktadır; ancak benzer çalışmalar ağır metaller ve antibiyotikler için sınırlı sayıdadır. Bu çalışmanın amacı literatürde yer alan, başta antibiyotikler olmak üzere ağır metal ve besin maddeleri gibi önem arz eden kirleticilerin su ortamlarında ve havzalarındaki taşınımındaki modelleme yaklaşımlarını özetlemek ve değerlendirmektir.

Anahtar kelimeler: Antibiyotik, Ağır Metal, Besin Maddesi, Modelleme, Taşınım, Havza

Nonpoint Source Pollutant Transport in Watersheds: Modelling Approaches for Antibiotics, Heavy Metals and Nutrients

ABSTRACT

Modelling studies predicting the fate and transport of non-point-source pollutants, especially from agricultural and pasture lands, have gained increasing attention during the recent years. Veterinary antibiotics are one of the most widely preferred drugs for animal husbandry. Since a considerable fraction of antibiotics is excreted in animal waste; following to application of animal waste as manure on agricultural lands, antibiotics can affect both soil and water quality by leaching from manure to soil, and by being transported to surface waters via runoff, respectively. This necessitates the development of modeling approaches for planning and management of catchments that play a significant role on water supply. Geographical Information Systems (GIS) has become an important methodological tool in catchment modeling, with the facilities to obtain spatial data, and advanced visualization of numerous data types as different map layers. GIS-based modeling approaches concerned with nutrient transport and water quality are encountered in literature; however, similar studies are scarce for heavy metals and antibiotics. The aim of this study is to provide a summary and evaluation of the existing modelling approaches from the literature that are used for modelling the fate and transport of emerging pollutants, particularly antibiotics, heavy metals and nutrients, in watersheds.

Keywords: Antibiotic, Heavy Metal, Nutrient, Modelling, Transport, Watershed

I. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı ile artan gereksinimler neticesinde çevredeki kirletici tipleri ve miktarlarındaki artışlar doğal kaynaklar için yeni riskler oluşturmaktadır. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasalların artışının yanı sıra hayvan atıklarının ve biyosolidlerin toprak katkı maddesi olarak kullanımı neticesinde tarımsal arazilerden azot (N), fosfor (P) ve ağır metaller gibi kirleticilerin yüzey ve yeraltı sularına taşınması konusunun önemi son yıllarda artmıştır [1-3]. Kalıcı organik kirleticilerin çevrede oluşturdukları

olumsuz etkiler uzun yıllardır incelenmekte ve riskleri ortaya konulmaktadır [4-7]. Hayvan yetiştiriciliğinde antibiyotik kullanımı ise, belirtilen kirleticilerin yanı sıra, antibiyotiklerin de yeni bir kirletici grubu olarak su kaynaklarına taşınma riskini ortaya çıkarmıştır.

Taşınım sürecinde kirleticilerin özellikleri ve miktarlarının yanı sıra arazi örtüsü, toprağın yapısı ve topografya önemli faktörleri oluşturmaktadır [8]. Bu faktörlerle birlikte, özellikle yağış miktarına bağlı yüzeysel akış, yayılı kirleticilerin taşınım süreci üzerinde önemli rol oynamaktadır [9-11].

Çevresel modelleme çalışmaları yüzey ve yeraltı sularının davranışlarını ve kirletici maddelerin bu ortamlardaki taşınımını tanımlamak ve yorumlamak açısından önem kazanmıştır. Uzun yıllardır, alternatif kıyı ve havza yönetim planlarının geliştirilmesi ve su kalitesinin artırılması amacıyla analiz araçları ve simülasyon modelleri geliştirilmektedir. Modelleme sayesinde kirlilik kaynakları ve kirleticilerin izledikleri yollar daha kolay tanımlanabilmektedir. Böylece su kaynaklarını korumak amaçlı herhangi bir noktadaki kontaminasyonu hesaplamak suretiyle kirliliği azaltma stratejileri belirlenebilmektedir [12].

Su, toprak ve kirleticiler gibi çevresel modellemedeki tüm temel elemanlar, süreçleri ve dinamikleri kayda değer bir biçimde etkileyen mekansal dağılımlara sahiptirler [13]. Bu kaynakları tanımlama ve yerleştirme ihtiyacı ayrıntılı girdi ve çıktı verilerinden büyük oranda faydalanmayı gerektirir. Ancak mekansal veya coğrafik olarak referans alınmış verilerin bulunması ve kullanılabilir standartta oturtulması modelleme çalışmaları esnasında karşılaşılan başlıca problemlerden bir tanesidir. Son yıllarda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) çevresel modellemede başvurulan önemli araçlardan bir tanesi olmuştur. CBS yayılı kirleticileri tanımlama becerisi ile çevresel modeller için hem mekansal veritabanı hem de bu verilerin analizi için çalışma alanı olarak hizmet etmektedir [14, 15]. CBS teknolojisi coğrafi bilgiyi toplamak, saklamak, işlemek, sunmak ve o bilgiden faydalanmak için tasarlanmış bir bilgi sistemidir [8, 16].

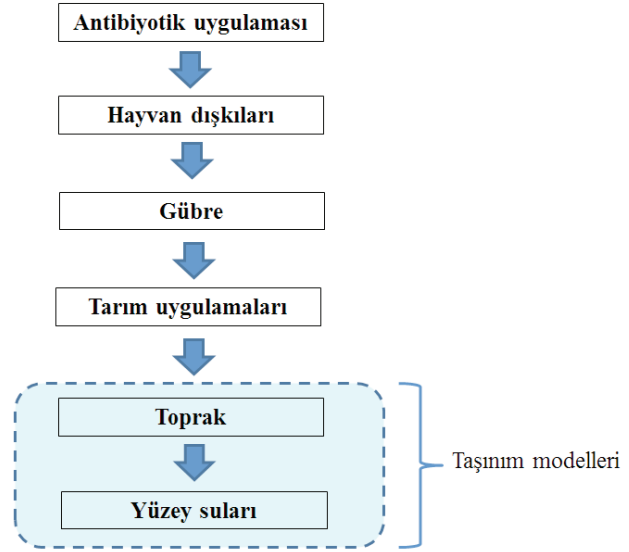
Bu çalışma kapsamında başta antibiyotikler olmak üzere, ağır metaller ve besi maddeleri gibi kirletici grupların havzalarda yüzeysel akışla taşınımını tahmin etmek için kullanılan çoğu CBS tabanlı modelleme yaklaşımları araştırılıp derlenmiştir. Havza yönetimine dair bütünleşik modelleme yaklaşımlarının gelecekte daha da önem kazanacağı beklenmektedir. Bu çalışmanın, ülkemizde halihazırda sınırlı sayıda çalışılmış olan, özellikle konvansiyonel olmayan kirletici taşınımına yönelik havza modelleme çalışması yapacak olan araştırmacılara model ve yöntem seçimi konusunda rehberlik edeceği düşünülmektedir.

II. KİRLETİCİLERİN HAVZALARDAKİ TAŞINIMI

2.1. Kirletici Türleri ve Çevresel Etkileri

Antibiyotikler insan ve hayvanlardaki hastalıkların tedavilerinde kullanımlarının yanı sıra besin amaçlı yetiştirilen hayvanların büyümelerinin desteklenmesi ve hastalıklara karşı korunmasında da kullanılırlar. Hayvan yetiştiriciliğinde antibiyotiklerin düzenli kullanımları neticesinde hayvan dışkıında bu kirleticilerin bulunma olasılığı artar. Dışkının gübre olarak kullanımı gerek toprak, gerekse yüzey ve yeraltı suları için bir kirlilik kaynağı

oluşturur. Antibiyotik uygulanmasından yüzey sularına taşınımına kadar geçen süreç Şekil 1’ de özetlenmiştir. Yüzeysel suların belirtilen bu dolaylı yol ile kirlenmesindeki en önemli neden çoğu antibiyotiğin organizmadan atıldıktan sonra stabil olarak atık içinde kalmasıdır [17]. Ayrıca, hayvan dışkısının kullanımdan önce arazide depolanma işlemi de gerek toprak gerekse yeraltı suyu için kirlilik kaynağı olabilmektedir [18].



Şekil 1. Antibiyotik uygulanmasından toprak ve yüzey sularında birikimine uzanan süreç (Kumar ve diğ. [6]’den adapte edilmiştir).

Antibiyotiklerin suda, atıksuda, toprakta ve çamurda kirletici olarak saptanması ve bu matrikslerde giderimlerini konu alan çalışmalar son yıllarda bilimsel literatürde önem kazanmıştır [19-24]. Düşük konsantrasyonlardaki antibiyotiklerin mikroorganizmalarda direnç gelişimine neden olduğu uzun yıllardır bilinmektedir. Çeşitli kaynaklardan çevreye yayılan antibiyotiklerin konsantrasyonlarına bağlı olarak toksik etkilere neden olmalarının yanı sıra dirençli mikroorganizma kirliliği oluşturma potansiyelleri [25] bu kirliliğin önemini artırmaktadır.

Antibiyotiklerin yanı sıra, organik madde, besi maddeleri ve ağır metallerin de belirli miktarların üzerinde olması su kalitesini düşürmekte ve çevresel riskler oluşturmaktadır. Yüzeysel akış ya da infiltrasyon süreci ile tatlı sulara karışan besinler (karbon, azot ve fosfor) ötrofikasyona neden olarak su kalitesinde ciddi bir bozulmaya neden olurlar. Birçok yüzey suyunda fosfor (P), ötrofikasyon problemini sınırlayıcı besin olarak kabul edilmektedir [26]. Bunun yanında organik karbon, suda ya da toprakta bulunan organik maddelerin ürünü olup bağlayıcı özelliklerinden

dolayı metallerin ve organik bileşiklerin taşınmasında, jeokimyasal reaksiyonlarında ve biyoyararlanımlarında önemli rol oynamaktadır [27]. Yapılan çalışmalara göre çözülmüş organik maddelerin ve pestisitlerin katı organik maddeler üzerinde tutunmaları için rekabet içinde oldukları, dolayısıyla çözülmüş organik karbonların (ÇOK) pestisitlerin adsorpsiyonuna etkisi olduğu kanıtlanmıştır [28]. Organik kirleticilerle birlikte ağır metaller de göller ve havzalardaki kirleticilerin başında gelmektedirler. Normal koşullarda doğada eser miktarda bulunan bu kirleticilerin biyobirikime olan eğilimleri ve kalıcılıkları yüzünden yüksek konsantrasyonlara ulaşip organizmalar üzerinde toksik etki yaptıkları bilinmektedir [29].

2. 2. Kirletici taşınımına etki eden faktörler

Kirletici maddelerin taşınım süreçleri, yüzey ve yer altı sularına olan çevresel etkilerini değerlendirmek açısından önemlidir; çünkü çevre kirlenmesini kontrol etme ve su yönetimi uygulamalarını geliştirmede kirleticilerin taşınırılık ve bozulma süreçlerinin anlaşılmasını mümkün kılmaktadırlar [30].

Kirleticilerin yüzeyel akışla taşınımını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Yağış havzalardaki yüzeyel akış oluşumuna etki eden en önemli değişkendir [31]; dolayısıyla, farklı yağış miktarlarının kirletici maddelerin yüzeyel akışla taşınımını üzerine etkisi büyüktür [32-34]. Shigaki ve diğ. [33]' nin çalışmalarına göre farklı miktarlardaki yağış ve sudaki çözünürlüklerine göre ayrılan farklı fosfor kaynakları, fosforun yüzeyel akışla taşınımını etkilemektedir. Yazarların yürüttüğü yağış simülasyon çalışmasına göre, yağış miktarının artmasıyla az çözünür fosfor kaynaklarının yüzeyel akışında partikül olarak bulunan toplam fosfor (TP) oranı da artmaktadır. Toprak türü ve özellikleri de, kirletici maddelerin yüzeyel akış ve infiltrasyonla taşınımını etkileyen önemli unsurlardan biridir. Walton ve diğ. [35] alan ölçekli arazilere ve toprak örneklerine izleyici madde ile yağış simülasyonu uygulayarak iki farklı deney yürütmüşlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre yüzeyel akıştaki çözünen madde miktarının toprak çeşidi ve yapısına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterdiği bulunmuştur. Önceki çalışmalarda toprağın pH'sının, organik karbon miktarının ve kil yüzdesinin topraktaki ağır metallerin, besi maddelerinin ve antibiyotiklerin adsorpsiyonunu etkilediği belirlenmiştir [5, 36-38]. Su kalitesini etkileyen önemli faktörlerden bir diğeri de arazi kullanımı ve örtüsündeki değişimlerdir. Tarımsal faaliyetlerin yayılı kirliliğin oluşumunda baskın bir rol oynadığı kabul edilmektedir [39]. Literatürdeki çalışmalar kentleşme ile su kalitesi arasında yakın bir ilişki olduğunu göstermiş, artan kentleşmenin arazilerdeki geçirimsiz yüzey yüzdesini önemli ölçüde arttırarak yüzeyel akış oluşumuna ve kirleticilerin

bu yolla taşınmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir [40-43]. ABD Çevre Koruma Ajansı [44] kentsel yüzeyel akışı kritik yayılı kaynak kirliliği olarak tanımlamıştır. Kırsal alan ve tarım faaliyetlerinin yoğun olduğu havzalarda karşılaşılan sediment, besi maddesi, pestisit, organik madde gibi kirleticilere ve ağır metal gibi toksik maddelere kentsel alan yüzey akışında da rastlanmaktadır [45]. Bölgenin coğrafi özellikleri dikkate alınması gereken bir diğere unsurdur. Casalí ve diğ. [46]'nin tarımsal havzalardaki yüzeyel akışı ve su kalitesini tanımlamak amacıyla yürüttükleri çalışmada toprak, iklim ve arazi kullanımı açısından benzer özellikler gösteren iki havza izlenerek akış üretimi, nitrat (NO_3^-) ve fosfat (PO_4^{3-}) salınımındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. Farklı bitki örtüsünün, morfolojik ve topografik özelliklerin yüzeyel akışa ve su kalitesine etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatürde antibiyotiklerin yüzeyel akışla taşınımını inceleyen benzer çalışmalar mevcuttur nispeten sınırlıdır. Örneğin, Blackwell ve diğ. [47] arazi çalışmalarıyla kumlu ve killi topraktaki gübrelerden kaynaklanan tetrasiklin, sülfonamid ve makrolid grubu antibiyotiklerin yüzeyel akışla taşınımını araştırmışlardır. Gübre yönetimi uygulamalarından başka arazi ve iklim koşullarının da yüzey akışıyla kirletici kütle kaybında rol oynadığı görülmüştür. Söz konusu faktörlere ek olarak, kirletici maddelerin nitelikleri de taşınım süreci üzerinde önemli rol oynamaktadır. Örneğin, Kay ve diğ. [48] antibiyotiklerin yüzeyel akışla taşınımını değerlendirmek amacıyla tarıma uygun toprak örneklerine gübreleme ve sulama yaparak bazı pilot çalışmalar yürütmüşlerdir. Bazı antibiyotik türlerinin daha düşük organik karbon-su dağılım katsayısına (K_{oc}) sahip olmaları sonucu, akış suyu numunelerindeki miktarı diğerlerine göre fazla bulunmuştur. Bir diğere çalışmada, Kim ve diğ. [18] antibiyotiklerin değişik fizikokimyasal özelliklerinin taşınımını üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yağış simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Sorpsiyon ve kalıcılık özelliklerinin su ve sediment fazındaki antibiyotiklerin yüzey akış davranışlarına etki ettiği tespit edilmiştir.

III. YAYILI KİRLETİCİLER İÇİN HAVZA MODELLEME ÇALIŞMALARI

Modellerin birçoğu, tanımladıkları hidrolojik süreçler ve amaçları bakımından birbirinden farklılık gösterirler. Örneğin, yüzeyel akış ile kirlenme ya da kirleticilerin yer altı suyuna sızmaları farklı modelleme çalışmaları ile simüle edilebilir [49]. Matematiksel modeller 'analitik' ve 'sayısal' olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Analitik modellemede, az sayıda girdi verisi mevcuttur. Başlangıç ve sınır koşullarının, akış koşullarının, gözenekli ortamın ve ayrıca simüle edilen

kirleticilerin fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal süreçlerinin sadeleştirilmesi amacıyla daha fazla sayıda varsayım yapılır. Bu sebeple analitik modeller kullanımı ve hesaplanması kolay modellerdir. Öte yandan sayısal modeller daha karmaşık kirletici taşınım süreçlerini açıklayabilirler [50]; ancak daha fazla veriye gereksinim duyulması ve sınırlı sayıda girdi verisi bulunması matematiksel modellerin çalışmasını aksatabilmektedir [51].

Havza ölçekli su kalite modellemesi ağırlıklı olarak matematiksel bilgisayar modellerini içermektedir. Yağış-akış modelleme aşırı yağış sonucunda toprak içinde ve yüzeyindeki akışın modellenmesidir ve havza modelinin temel bileşenlerinden birini oluşturur. Hidrolojik model yağmur suyunun yüzeysel akışa dönüşümünü kontrol eden fiziksel süreci tanımlarken, taşınım modeli (hidrodinamik model) havzadaki kirlilik yükleri ve su kalitesini belirlemektedir [52]. Hidrolojik modelleme çalışmaları yapılırken, su kalitesi, suyun eşit olmayan dağılımı, ve mekansal ve zamansal faktörler göz önünde bulundurulurak akış miktarı ile birlikte düşünülmelidir. Bu sebeple problemin çözümü için gerekli uygun mekansal ve zamansal, aynı zamanda hidrolojik ve hidrodinamik bileşenleri içeren gerçekçi modelleri kullanmak önem teşkil etmektedir [53]. Yayılı kaynak kirliliği için sıklıkla kullanılan modeller ve kullanım alanları Tablo 1’de verilmiştir:

Literatürde değişik modelleme yaklaşımları ile organik

kirleticiler, besi maddeleri, metaller ve pestisitler için taşınım süreçleri çalışılmıştır. Birçok modelleme çalışmasında tarım havzalarının hidrolojisi ve havzalardaki sediment, organik karbon ve besi maddesi yükleri matematiksel modellerle belirlenmiştir [66-68]. Mevcut modellerin performans ve uygunluklarının değerlendirilmesi amacıyla da birçok çalışma yapılmıştır [69-71]. Oeurng ve diğ. [68] tarihi akış ve meteoroloji verilerini kullanarak güneybatı Fransa’daki havza hidrolojisi ve bununla ilişkili organik karbon salınımını değerlendirmek amacıyla SWAT modeli kullanmışlardır. Model yüzeysel akışın yıllık ortalama yağışa oranını tahmin etmiş ve yıllık yüzeysel akış ile organik karbon salınımı arasında ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir. Alan veya havza ölçekli bilgisayar modelleri çoğu zaman gübredeki fosforun yüzeysel akışa doğrudan geçişini belirleyemedikleri için, Vadas ve diğ. [2] yağmur sırasında gübreki fosfor (P) salınımını ve yüzeysel akıştaki çözünmüş fosfor konsantrasyonunu belirlemek amacıyla kolay bir model geliştirmişlerdir. Yazarlara göre bu model, tarım alanlarındaki fosfor salınımlarının tahminini geliştirmek adına, daha karmaşık P taşınım modelleri içine dâhil edilebilmektedir. Bir başka çalışmada PO_4^{-3} madenciliğinden kaynaklanan kirliliği kontrol etmek amacıyla, yüzeysel akışı ve filtrelerde hapsolmuş sedimenti belirlemek için sayısal modeller kullanılmış ve bitkisel filtrelerin verimliliği başarıyla modellenmiştir [72].

Tablo 1. Yayılı kaynak kirliliği için kullanılan modeller ve özellikleri.

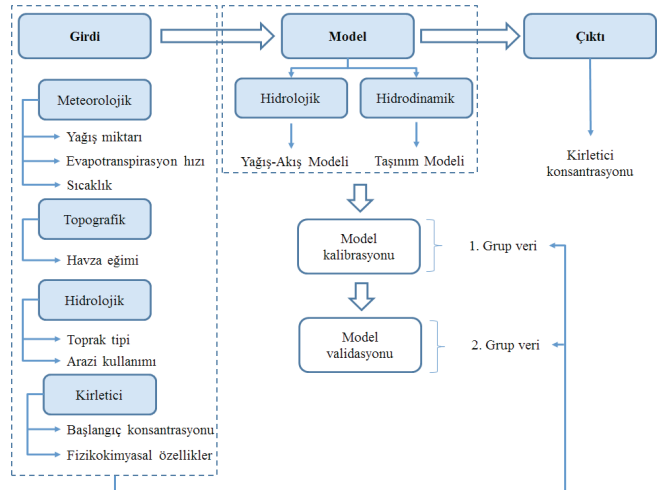
Model	Modellenen Hidrolojik Süreçler	Modellenen Değişkenler	Arazi Kullanımı	Kaynak
ANSWERS (Aerial, Nonpoint Source, Watershed Environmental Response Simulation)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment ve besi maddesi yükleri	Tarım	[54]
ACTMO (Agricultural Chemical Transport Model)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarım	[55]
AGNPS (Agricultural Nonpoint Source)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment ve besi maddesi yükleri	Tarım	[56]
ARM (Agricultural Runoff Management)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarım	[57]
CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)	Yüzeysel akış	Yüzey sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarım	[58]
GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)	Yeraltı suyu	Yeraltı sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarım	[59]
PRZM (Pesticide Root Zone Model)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Vadoz zonda pestisit ve N türlerinin taşınımı	Tarım	[60]
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarım	[61]
HSPF (Hydrologic Simulation Program-FORTRAN)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment, pestisit ve besi maddesi yükleri	Tarımsal ve kentsel	[62]
KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Sediment taşınımı	Tarımsal ve kentsel	[63]
STORM (Storage Treatment Overflow Runoff Model)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment ve besi maddesi yükleri	Kentsel	[64]
SWMM (Storm Water Management Model)	Yüzeysel akış Yeraltı suyu	Yüzey sularında sediment ve besi maddesi yükleri	Kentsel	[65]

Ağır metallerin taşınım davranışları çözülmüş organik maddeler ile yakından ilişkilidir. Sonuç olarak taşınım modellerinin doğruluğu için çözülmüş organik maddelerle kompleks oluşturma hususu da dikkate alınmalıdır [73-75]. Örneğin, Schmitt ve diğ. [76] tarafından metal iyonlarının doğal organik maddeler ve katı fazlarla olan etkileşim kinetikleri hesaba katılarak bir model geliştirilmiştir. Çalışmada, kolon deneyleri ile ayrışma-hız sabitleri belirlenerek, doğal organik maddelerle kompleks oluşturan metal iyonlarının (Al^{3+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) taşınımı araştırılmış ve belirlenen ayrışma-hız sabitleri metal-organik madde komplekslerinin kolonlardaki hareketini tayin edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Yuan ve diğ. [32] kentsel bir havzadaki ağır metal yüklerini belirlemek amacıyla, bölgedeki yağış miktarı ile çözülmüş ve partikül fazdaki sedimentte bulunan metal formlarını dikkate alarak bir ön model oluşturmuşlardır. Ayrıca, Visser ve diğ. [34] tarafından Hollanda'da yürütülen bir çalışmada gelecekteki iklim değişiminin havza hidrolojisi ve ağır metal (Cd ve Zn) yükleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada gelecek iklim senaryolarını içeren 100 yıllık zaman serisi yağış verileri kullanılmıştır. Direkt olarak antibiyotik taşınımı modelleri kısıtlı olsa da, antibiyotikler ile pestisitlerin topraktaki davranışları arasındaki benzerlik, pestisitler için geliştirilen bazı modellerin antibiyotiklere uygulanabilirliğini göstermektedir. Kay ve diğ. [48] FOCUS (Pestisit Taşınım Modelleri ve Kullanımlarının Koordinasyonu Forumu) tarafından tavsiye edilen PRZM, PELMO ve GLEAMS gibi modellerin antibiyotikler için de kullanılabilirliğini saptamışlardır. Huber ve diğ. [4] Almanya'da pestisitlerin tarımsal arazilerden yüzeysel sulara akışı için bir taşınım modeli geliştirmişlerdir. Pestisitlerin arazilerden yüzeysel akışla salınımını hesap edebilmek için pestisit uygulama oranlarıyla birlikte iklim, toprak ve arazi kullanımı ile ilgili çeşitli mekansal veriyi kullanmışlardır. Bunun bir sonucu olarak pestisitlerin akışla taşınım riskini belirlemek için akış-duyarlılık haritaları oluşturmuşlardır. Fakat pestisitlerin araziye özgü koşullar altında taşınım davranışları ile ilgili güvenilir bilgi eksikliği çalışmada bir kısıtlayıcı faktör olarak görülmüştür. Branger ve diğ. [49] toprak drenaj arazisinde pestisit taşınımını simüle edebilmek için PESTDRAIN adında bir model geliştirmişlerdir. Bu model tarımsal su yönetimi için gelecek vadeden bir araç olarak pestisitlerin yüzeysel akış ve drenaj akış hızlarını hem mekansal hem de zamansal değişim gösteren pestisit konsantrasyonlarını dikkate alarak hesaplamaktadır. Literatürde yer alan yüzeysel akışla pestisitlerin taşınımını ele alan modellerin antibiyotikler için uygulanabilirliğini araştırmak, gerekirse

bu modelleri antibiyotiklere uygulanabilir hale getirmek için modifiye etmek gelecek araştırma alanları içinde yer alabilir.

3.1 Modelleme Aşamasında Veri Gereksinimleri

Havza ölçekli modelleme çalışmalarda karşılaşılan en önemli problemlerden biri, havzayı ya da alt birimlerini temsil edebilecek çeşitli türdeki ve sayıdaki güvenilir veri teminidir. Veri tipleri çok çeşitli olabilmekte birlikte, havzalardaki yüzey akışı ve buna bağlı kirletici taşınım süreçlerinin en yalın bir biçimde modellenmesi, asgari sayıdaki birtakım verinin teminine dayanmaktadır. Model girdisi olarak kullanılması gereken asgari/temel veri gereksinimlerini ve modelleme prosedürünü Şekil-2'deki biçimde özetlemek mümkündür. Modellerin farklı süreçlerini tanımlayan giriş verilerini çeşitlendirmenin daha gerçekçi model çıktıları sağlayacağı yaygın bir düşüncedir. Ancak modellemeye dahil edilen her bir yeni sürecin, dolayısıyla artan parametre sayısının, parametrik etkileşimler sebebiyle model belirsizliğini artırabileceği de göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husustur.



Şekil 2. Havza modellerinde ihtiyaç duyulan temel veriler ve modelleme prosedürü.

Aynı türdeki girdi verilerinin niceliği ise modelin mekansal dağılımı ile ilgilidir. Havza bazlı modelleme çalışmaları mekansal olarak tam dağılımlı, yarı dağılımlı ve parçalı model olarak sınıflandırılmaktadır. Bir modelin tam dağılımlı olması modelde kullanılan değişken ve parametrelerin havzanın farklı karakterlerdeki alt elementlerini (alt havza) tanımlayabilecek şekilde mekansal dağılımına dayanır. Tam dağılımlı modellerde parametreler modellenen alt havzaların her biri için farklı değerler alırken, parçalı

modeller daha geniş alanlar için tek bir parametre değerinin kullanılabilirliğini varsayar. Orta ve büyük ölçekli havza modellerinde yaklaşım yaygın olarak yarı dağılımlı veya tam dağılımlı modellemedir.

Veri temininde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir başka husus ise toplanacak verilerin modelin kalibrasyon ve validasyonuna imkan verecek şekilde iki kategori altında sınıflandırılabilir olmasıdır. Bu sınıflandırma, veri kümesini içinde ekstrem değerler bulundurmayacak şekilde, zamana veya mekana bağlı ikiye bölme tekniği uygulanarak gerçekleştirilebilir.

1.2. CBS Tabanlı Modelleme Teknikleri

CBS tabanlı çok değişkenli istatistiksel analizler ve taşınım modelleri; kirleticileri ve onların topraktaki ve havzadaki mekânsal dağılımlarını tanımlamayı daha kolay hale getirmektedir. Zamansal değişkenli simülasyonlarla bağlantılı mekansal veri analizleri çalışmalarının örnekleri literatürde bulunmaktadır [8, 77, 78]. CBS ile bütünleşik havza modellemeyi içeren birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genellikle noktasal kaynaklı olmayan tarımsal kirlilik modellerini (AGNPS) ve besi maddesi taşınımını içermektedirler. Huang ve Hong [79], orta büyüklükteki bir havzada yaygın olan N ve P kirliliğini simüle etmek için karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda CBS tabanlı deneysel modelin gelecekteki çalışmaları destekleyecek ön tasarım aracı olarak kullanım avantajına sahip olduğu anlaşılmıştır. Öte yandan AGNPS detaylı emisyon değerlendirmesi ve plan geliştirme konularında avantaja sahiptir. Bir başka çalışmada CBS tabanlı bir arazi kullanım/razi örtüsü-besi maddesi-bağlanım-modeli ve uzaktan algılama analiz araçları, bir havza içerisindeki N kirliliğine katkıda bulunan bölgeleri belirlemek için geliştirilmiştir [39]. Strager ve diğ. [80] CBS'den faydalanarak karar almayı ve su kaynaklarının yönetimini desteklemek için havza analizleri gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri yüzeysel akış modeli; numune alma noktalarındaki optimum su kalitesini, belirli bir alanda bütün akarsular için akış tahminini, akış su kalitesini ve kirletici yükü tahminini içermektedir.

Tarım havzalarında besi maddelerinin taşınımına yönelik çalışmalara sıklıkla rastlanırken, ağır metalleri ve antibiyotikleri içeren CBS tabanlı havza modellemesi çalışmaları kısıtlı sayıdadır. Bhaduri ve diğ. [45] L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) (Uzun Vadeli Hidrolojik Etki Değerlendirmesi) modeli ile CBS'yi bir arada kullanarak kentsel/geçirimsiz bölgelerin ve arazi kullanımındaki değişimlerin havzalardaki yıllık

yüzeysel akışa ve yayılı kirliliğin oluşumuna etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, arazi kullanımlarındaki değişim sonucu yıllık besi maddesi ve bakır (Cu), kurşun (Pb), çinko (Zn) gibi ağır metal yüklerinde farklılıkların oluştuğu tespit edilmiştir. Başka çalışmalarda ise ağır metallerin nehir ağzı ve deniz sedimentlerinde CBS haritalama tekniğine dayalı mekansal değişimleri incelenmiş [81, 82] ve istatistiksel analizler topraktaki ağır metal kaynaklarını tanımlamak için CBS ile bütünleştirilmiştir [77]. Ng ve diğ. [83] üç boyutlu, hidrodinamik sediment ve ağır metal taşınım modeli ile birlikte CBS tabanlı ara yüz modülü uygulamışlardır. Bu model hem mekânsal hem de zamansal içerikte ilişkilerin tanımlanmasını ve hidrodinamik kirletici taşınım simülasyonunun değişimlerinin gözlenmesini güçlendirmektedir. Böylece kıyı bölgelerinin su kalite planlaması ve yönetimine katkıda bulunmaktadır.

CBS uygulaması ile ilişkilendirilmiş modeller havza ve daha geniş bölgesel ölçeklerde pestisitler için de çalışılmıştır. Örneğin, Schriever ve Liess [51], Avrupa'da CBS ile bütünleşmiş akış modelini kullanarak tarımsal arazilerden yüzey sularına pestisit akışının ekolojik riskini haritalamışlardır. Pestisit kullanımının yanı sıra yağış, topografya, arazi kullanımı ve toprak özellikleri gibi çevresel karakteristikler de girdi verileri olarak kullanılmıştır. Böylece pestisitlerin akış potansiyeli matematiksel modellemeye dayandırılarak hesaplanmıştır. Ayrıca pestisit uygulama oranı (kg ha^{-1}), tarıma elverişli arazi (km^2), toprak organik karbon yüzdesi (%), eğim (%), toprak yapısı (tınlı veya kumlu) ve maksimum yağış miktarı (mm) gibi verileri ayrı haritalara işlemişlerdir. Sonrasında pestisitlerin akış potansiyeli veri haritaları aracılığıyla, pestisitlerin taşınım davranışının da değerlendirilmesiyle bir haritada sisteminde gösterilmiştir.

Günümüzde, kentsel çevre kirliliği de yerel ve genel otoriteleri kirlilik konularına özen göstermeye zorlamıştır. Bir çalışmada, Prag kentsel alanlarında sadece su ve toprak kirlilikleri değil aynı zamanda hava ve gürültü kirliliklerinin de mekansal analizleri yapılarak modellendiğine rastlanılmıştır. Bütün girdiler modelleme araçlarıyla genişletilmiş CBS ile bütünleştirilmiştir. Bunun bir sonucu olarak da daha karmaşık yapıdaki çevresel analizlerin yapılmasıyla kent planlamasının karar alma süreçleri desteklenmiştir [84].

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bilimsel literatürde su havzalarının korunması ve yönetimlerinin planlanmasına yönelik pek çok modelleme çalışması yapılmış ve yeni modelleme teknikleri

geliştirilmiştir. CBS, çalışma alanına ait mekansal verileri sağlaması ve pek çok veri tipini çeşitli katmanlar aracılığı ile haritalandırması açısından yayılı kaynak kirliliğinin tanımlanmasında ve modellenmesinde sıklıkla başvurulan araçlardan bir tanesi olmuştur. Bu bağlamda, kirletici maddelerin yüzeysel akışla taşınımını inceleyen CBS destekli bütünleşik havza modelleme yaklaşımlarına oldukça fazla rastlanmaktadır.

Sediment, N, P ve pestisitlerin tarım havzalarında yüzeysel akışla taşınımını inceleyen pek çok model geliştirilmiş (Tablo-1) ve mevcut modeller bir çok çalışmada söz konusu kirletici grupları için kullanılmıştır. Kentsel havzalardaki su kalitesini gözlemek amacıyla ağır metallerin bu havzalardaki taşınımının ve kirlilik yüklerinin modellenmesi farklı çalışmalara konu olmuştur [40, 45]. Diğer yandan, ağır metallerin ve antibiyotiklerin tarım havzalarındaki taşınımını inceleyen CBS tabanlı modelleme çalışmaları kısıtlı sayıdadır; ancak antibiyotiklerin taşınım hareketleri pestisitlerle benzerlik gösterdiği için PRZM, PELMO ve GLEAMS gibi modellerin antibiyotikler için de kullanılabilmesi saptanmıştır [48]. İleriki çalışmalar bu kirleticilerin su havzalarında oluşturacağı risklere odaklanmalı ve mekansal ve zamansal veriler hassas bir şekilde dikkate alınarak modelleme teknikleri geliştirilmelidir.

Ülkemizde hala tam olarak oluşturulmuş ve uygulamaya konulmuş bir ulusal coğrafi veritabanı altyapısı mevcut değildir. Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi Projesi, 1996 yılında kabul edilmiş ve eylem planı olarak 28.07.2006 tarihli Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Plan, ulusal düzeyde teknolojik gelişmelere ve INSPIRE Direktifine uygun olarak Coğrafi Bilgi Sistemi altyapısı kurulmasını ve kamu kurum ve kuruluşlarının sorumlusu oldukları coğrafi bilgileri ortak altyapı üzerinden kullanıcılara sunmaları amacıyla bir web portalı oluşturulmasını amaçlamaktadır [85]. Coğrafi veri standartlarının belirlenmesi ve standardize edilmiş verilerin ilgili kurumların ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde kullanıcılara sunulması, özellikle havza modelleme alanında çalışan araştırmacıların veri temini sürecinde harcadıkları zaman ve imkanları araştırmaya yöneltebilme olanağını sunacaktır. Bu durumun ise havza bazlı uygulanan yayılı kirletici modelleme çalışmalarına hız ve doğruluk kazandırması beklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 12Y00P2 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir. BAP birimine bu destekten ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C. ve Chambers, B.J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Total Environ.*, 311, 205–219.
- [2] Vadas, P.A., Owens, L.B. ve Sharpley, A.N. (2008). An empirical model for dissolved phosphorus in runoff from surface-applied fertilizers. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 127, 59–65.
- [3] Brennan, R.B., Fenton, O., Grant, J. ve Healy, M.G. (2011). Impact of chemical amendment of dairy cattle slurry on phosphorus, suspended sediment and metal loss to runoff from a grassland soil. *Sci. Total Environ.*, 409, 5111-5118.
- [4] Huber, A., Bach, M. ve Frede, H.G. (1998). Modelling pesticide losses with surface runoff in Germany. *Sci. Total Environ.*, 223, 177-91.
- [5] Montforts, M.H.M.M. (1999). Environmental Risk Assessment for Veterinary Medicinal Products Part 1. Other than GMO-containing and Immunological Products First Update, Report 601300, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Hollanda.
- [6] Kumar, K., Gupta, S.C., Chander, Y. ve Singh A.K. (2005). Antibiotic use in agriculture and its impact on the terrestrial environment. *Adv. Agron.*, 87, 1-53.
- [7] Park, S.J. (2007). Hazard assessment of major veterinary antibiotics in aquatic ecosystem using microbe, macroinvertebrates and fish. Yüksek Lisans Tezi, Seoul National University, Güney Kore.
- [8] Lenzi, M.A. ve Di Luzio, M. (1997). Surface runoff, soil erosion and water quality modeling in the Alpone catchment using AGNPS integrated with a Geographic Information System. *Eur. J. Agron.*, 6, 1-14.
- [9] Parry, R. (1998). Agricultural phosphorus and water quality: A US Environmental Protection Agency perspective. *J. Environ. Qual.*, 27, 258–260.
- [10] Lal, R., Miller, F.P. ve Logan, T.J. (1998). Are intensive agricultural practices environmentally and ethically sound? *J. Agr. Environ. Ethic.*, 1, 193–210.
- [11] Delpla, I., Baurès, E., Jung, A.V. ve Thomas, O. (2011). Impacts of rainfall events on runoff water quality in an agricultural environment in temperate areas. *Sci. Total Environ.*, 409, 1683–1688.
- [12] Blenkinsop, S., Fowler, H.J., Dubusi, I.G., Nolan, B.T. ve Hollis, J.M. (2008). Developing climatic scenarios for pesticide fate modeling in Europe. *Environ. Pollut.*, 154, 219-231.

- [13] Rao, M.N., Waits, D.A. ve Neilsen, M.L. (2000). A GIS-based modeling approach for implementation of sustainable farm management practices. *Environ. Model. Softw.*, 15, 745–753.
- [14] Maidment, D.R. (1993). Environmental modeling within GIS. *Proceedings of the Second International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental modeling*, Breckridge, Colorado, USA, 2 Eylül.
- [15] Ragan, R.M. ve Kosicki, A.J. (1993). An operational GIS to support statewide hydrologic and nonpoint pollution modeling. *Proceedings, International Symposium of Engineering Hydrology*, San Francisco, USA, 26–30 Temmuz, ASCE.
- [16] Fedra, K. (1999). Urban environmental management: monitoring, GIS, and modeling. *Comput. Environ. Urban Syst.*, 23, 443-457.
- [17] Lertpaitoonpan, W., Ong, S.K. ve Moorman, T.B. (2009). Effect of organic carbon and pH on soil sorption of sulfamethazine. *Chemosphere*, 76, 558–64.
- [18] Kim, S.C., Davis, J.G., Truman, C.C., Ascough, J.C. ve Carlson, K. (2010). Simulated rainfall study for transport of veterinary antibiotics – Mass balance analysis. *J. Hazard. Mater.*, 175, 836–43.
- [19] Cengiz, M., Balcıoğlu, I., Oruc, H.H. ve Cengiz, T.G. (2010). Evaluation of the interaction between soil and antibiotics. *J. Environ. Sci. Health B.*, 45, 183-189.
- [20] Cengiz, M., Balcıoğlu, I., ve Oruç, H.H. (2010). Detection of oxytetracycline and chlorotetracycline residues in agricultural fields in Turkey. *J. Biol. Environ. Sci.*, 4(10), 23-27.
- [21] Uslu, M.O. ve Balcıoğlu, I. (2009). Comparison of the ozonation and fenton process performances for the treatment of antibiotic containing manure. *Sci. Total Environ.*, 407(11), 3450-3458.
- [22] Uslu, M.O. ve Balcıoğlu, I. (2009). Simultaneous removal of oxytetracycline and sulfamethazine antibacterials from animal waste by chemical oxidation processes. *J. Agr. Food Chem.*, 57(23), 11284-11291.
- [23] Yalap, K.S. ve Balcıoğlu, I. (2009). Effects of inorganic anions and humic on the photocatalytic and ozone oxidation of oxytetracycline in aqueous solution. *J. Adv. Oxid. Technol.*, 12(1), 1-10.
- [24] Karıcı, A. ve Balcıoğlu, I. (2009). Investigation of the tetracycline, sulfonamide, and fluoroquinolone antimicrobial compounds in animal manure and agricultural soils in Turkey. *Sci. Total Environ.*, 407, 4652–4664.
- [25] Sarmah, A.K., Meyer, M.T. ve Boxall, A.B.A. (2006). A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, 65, 725–59.
- [26] Rekolainen, S., Mitikka, S., Vuorenmaa, J. ve Johansson, M. (2005). Rapid decline of dissolved nitrogen in Finnish lakes. *J. Hydrol.*, 304, 94–102.
- [27] Buckingham, S., Tipping, E. ve Taylor, J.H. (2008). Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in UK topsoils. *Sci. Total Environ.*, 407, 460 - 470.
- [28] Spark, K.M. ve Swift, R.S. (2002). Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption. *Sci. Total Environ.*, 298, 147–61.
- [29] Ikem, A. ve Adisa, S. (2011). Runoff effect on eutrophic lake water quality and heavy metal distribution in recent littoral sediment. *Chemosphere*, 82, 259–267.
- [30] Joyce, B.A., Wallender, W.W. ve Mailapalli, D.R. (2010). Application of pesticide transport model for simulating diazinon runoff in California’s Central Valley. *J. Hydrol.*, 395, 79–90.
- [31] Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 14, 446–460.
- [32] Yuan, Y., Hall K. ve Oldham, C. (2001). A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment. *Sci. Total Environ.*, 266, 299-307.
- [33] Shigaki, F., Sharpley, A. ve Prochnow, L.I. (2007). Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. *Sci. Total Environ.*, 373, 334–343.
- [34] Visser, A., Kroes, J., van Vliet, M.T.H., Blenkinsop, S., Fowler, H.J. ve Broers, H. P. (2012). Climate change impacts on the leaching of a heavy metal contamination in a small lowland catchment. *J. Contam. Hydrol.*, 127, 47–64.
- [35] Walton, R.S., Volker, R.E., Bristow, K.L. ve Smettem, K.R.J. (2000). Experimental examination of solute transport by surface runoff from low-angle slopes. *J. Hydrol.*, 233, 19-36.
- [36] Baes, C.F. ve Sharp, R.D. (1983). A proposal for estimation of soil leaching and leaching constants for use in assessment models. *J. Environ. Qual.*, 12, 17-28.
- [37] Sharpley, A.N. (1983). Effect of soil properties on the kinetics of phosphorus desorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 462-467.

- [38] Sauve, S., Hendershot, W. ve Allen, H.E. (2000). Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 1125-1131.
- [39] Basnyat, P., Teeter, L.D., Lockaby, B.G. ve Flynn, K.M. (2000). The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems. *For. Ecol. Manage.*, 128, 65-73.
- [40] Tsihrintzis, V.A. ve Hamid, R. (1998). Runoff Quality Prediction from Small Urban Catchments Using SWMM. *Hydrol. Process.*, 12, 311-329.
- [41] Temprano, J., Arango, O., Cagiao, J., Suárez, J. ve Tejero, I. (2006). Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Wat. SA*, 32, 54-63.
- [42] Ouyang, W., Guo, B., Hao, F., Huang, H., Li, J. ve Gong, Y. (2012). Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing. *J. Environ. Manage.*, 113, 467-473.
- [43] Liu, A., Egodawatta, P., Guan, Y. ve Goonetilleke, A. (2013). Influence of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. *Sci. Total Environ.*, 444, 255-262.
- [44] US Environmental Protection Agency (US EPA) (1983). Results of the Nationwide Urban Runoff Program, Report WH-554, Water Planning Division, Washington DC, USA.
- [45] Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B. ve Grove, M. (2000). Assessing catchment scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model. *Environ. Manage.*, 26, 643-658.
- [46] Casali, J., Gastesi, R., Álvarez-Mozos, J.A., De Santisteban, L.M., Del Valle de Lersundi, J., Giménez, R., Larrañaga, A., Goñi, M., Agirre, U., Campo, M.A., López, J.J. ve Donézar, M. (2008). Runoff, erosion, and water quality of agricultural catchments in central Navarre (Spain). *Agric. Water Manage.*, 95, 1111 - 1128.
- [47] Blackwell, P.A., Kay, P. ve Boxall, A.B.A. (2007). The dissipation and transport of veterinary antibiotics in a sandy loam soil. *Chemosphere*, 67, 292-299.
- [48] Kay, P., Blackwell, P.A. ve Boxall, A.B.A. (2005). Transport of veterinary antibiotics in overland flow following the application of slurry to arable land. *Chemosphere*, 59, 951-959.
- [49] Branger, F., Tournebize, J., Carluer, N., Kao, C., Braud, I. ve Vauclin, M. (2009). A simplified modelling approach for pesticide transport in a tile-drained field: The PESTDRAIN model. *Agric. Water Manage.*, 96, 415-28.
- [50] Chu, X. ve Marino, M.A. (2007). IPTM-CS: A windows-based integrated pesticide transport model for a canopiesoil system. *Environ. Model. Softw.*, 22, 1316-1327.
- [51] Schriever, C.A. ve Liess, M. (2007). Mapping ecological risk of agricultural pesticide runoff. *Sci. Total Environ.*, 384, 264-279.
- [52] Setegn, S.G., Srinivasan, R., Dargahi, B. ve Melesse, A.M. (2009). Spatial delineation of soil vulnerability in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrol. Process.*, 23, 3738-3750.
- [53] Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environ. Modell. Softw.*, 16, 195-231.
- [54] Beasley, D.B. ve Huggins, L.F. (1981). ANSWERS Users' Manual, EPA-905/9-82-001, US EPA, Chicago, Illinois, USA.
- [55] Frere, M.H., Onstad, C.A. ve Holtan, N.H. (1975). ACTMO - An Agricultural Chemical Transport Model, Report ARS-H-3, Agricultural Research Service, USDA, Washington DC, USA.
- [56] Young, R.A. (1986). Agricultural nonpoint source pollution model: A watershed analysis tool. Conservation Report 35, Agricultural Research Service, USDA, Morris, Minnesota, USA.
- [57] Donigan, A.S. ve Davis, H.H. (1978). Agricultural Runoff Management (ARM): Users Manual, Report EPA-600/3-78-080, US EPA, Athens, Georgia, USA.
- [58] Knisel, W.G. (1980). CREAMS: A Fieldscale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Conservation Report 26, Science and Education Administration, USDA, Washington DC, USA.
- [59] Leonard, R.A., Knisel, W.G. ve Still, D.A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *T. ASAE*, 30, 1403-1418.
- [60] Suárez, L.A. (2005). PRZM-3, A Model for Predicting Pesticide and Nitrogen Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones: User's Manual for Release 3.12.2, Report EPA/600/R-05/111, EPA, Washington, USA.
- [61] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. ve Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *J. Am. Water*

- Resour. Assoc., 34, 73–89.
- [62] Johanson, R.C., Imhoff, J.C., Kittle, J.L. ve Donigian, A.S. (1984). Hydrologic Simulation Program-FORTRAN (HSPF): User's Manual for Release 8.0, Report EPA-600/3-84-066, US EPA, Athens, Georgia, USA.
- [63] Woolhiser, D.A., Smith, R.E. ve Goodrich, D.C. (1990). KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual, Report ARS-77. Agricultural Research Service, USDA, Minnesota, USA.
- [64] US Army Corps of Engineers (USACE) (1977). Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model "STORM": Users' Manual, Report CPD-7, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.
- [65] Huber, W.C. ve Dickinson, R.E. (1988). Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual, Report EPA 600/3-88/001a, Environmental Research Laboratory, US EPA, Georgia, USA.
- [66] Varanou, E., Gkouvatsou, E., Baltas, E. ve Mimikou, M. (2002). Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of Soil and Water Assessment Tool Model. *J. Hydrol. Eng.*, 7, 228–244.
- [67] Baginska, B., Milne-Home, W. ve Cornish, P.S. (2003). Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST. *Environ. Model. Softw.*, 18, 801–808.
- [68] Oeurng, C., Sauvage, S. ve Pérez, J.M.S. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *J. Hydrol.*, 401, 145-153.
- [69] Haregeweyn, N. ve Yohannes, F. (2003). Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho Catchment, Western Hararghe, Ethiopia. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 99, 201–212.
- [70] Shamshad, A., Leow, C.S., Ramlah, A., Wan Hussin, W.M.A. ve Sanusi, S.A.M. (2008). Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 10, 239–252.
- [71] Xie, H. ve Lian, Y. (2013). Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *J. Hydrol.*, 481, 119–131.
- [72] Kuo, Y.M. ve Carpena, M.R. (2009). Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filter strips to control runoff pollution from phosphate mining areas. *J. Hydrol.*, 378, 343–354.
- [73] Weng, L.P., Temminghoff, E.J.M., Lofts, S., Tipping, E. ve Van Riemsdijk, W.H. (2002). Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 4804–4810.
- [74] Tipping, E., Rieuwerts, J., Pan, G., Ashmore, M.R., Lofts, S., Hill, M.T.R., Farago, M.E. ve Thornton, I. (2003). The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales. *Environ. Pollut.*, 125, 213–225.
- [75] Michel, K., Roose, M. ve Ludwig, B. (2007). Comparison of different approaches for modeling heavy metal transport in acidic soils. *Geoderma*, 140, 207–214.
- [76] Schmitt D., Saravia F., Frimmel F.H. ve Schuessler W. (2003). NOM-facilitated transport of metal ions in aquifers: importance of complex-dissociation kinetics and colloid formation. *Water Res.*, 37, 3541–50.
- [77] Facchinelli, A., Sacchi, E. ve Mallen, L. (2001). Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environ. Pollut.*, 114, 313-324.
- [78] Zhang, C. (2006). Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environ. Pollut.*, 142, 501-511.
- [79] Huang, J. ve Hong, H. (2010). Comparative study of two models to simulate diffuse nitrogen and phosphorus pollution in a medium-sized catchment, southeast China. *Estuar. Coast Shelf S.*, 86, 387–394.
- [80] Strager, M.P., Fletcher, J.J., Strager, J.M., Yuill, C.B., Eli, R.N., Petty, J.T. ve Lamont, S.J. (2010). Catchment analysis with GIS: The catchment characterization and modeling system software application. *Comput. Geosci.*, 36, 970–976.
- [81] Zhou, F., Guo, H. ve Hao, Z. (2007). Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GIS-based chemometric approach. *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 1372–1384.
- [82] Delgado, J., Nieto, J.M. ve Boski, T. (2010). Analysis of the spatial variation of heavy metals in the Guadiana Estuary sediments (SW Iberian Peninsula) based on GIS-mapping techniques. *Estuar. Coast Shelf S.*, 88, 71- 83.
- [83] Ng, S.M.Y. , Wai, O.W.H., Shueng Li, Y., Lin Li, Z.

- ve Jiang, Y. (2009). Integration of a GIS and a complex three-dimensional hydrodynamic, sediment and heavy metal transport numerical model. *Adv. Eng. Softw.*, 40, 391–401.
- [84] Matějčák, L., Engst, P. ve Jaour Z. (2006). A GIS-based approach to spatio-temporal analysis of environmental pollution in urban areas: a case study of Prague's environment extended by LIDAR data. *Ecol. Model.*, 199, 261-77.
- [85] Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) Projesi, <http://www.tkgm.gov.tr/tr/icerik/turkiye-ulusal-cografı-bilgi-sistemi-tucbs-projesi> (Şubat 2015)