

Trakya Bölgesi, Hayrabolu Havzasında Akiferin Kirlenmeye Karşı Duyarlılığının DRASTIC ve DRASTIC-AHP Yöntemleri ile Haritalanması

Orhan ARKOÇ*

Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 39100 Kırklareli

(İlk Gönderim / Received: 18. 01. 2018, Kabul / Accepted: 07. 07. 2018, Online Yayın / Published Online: 18. 07. 2018)

Anahtar Kelimeler
Akifer Duyarlılık Haritası,
Analitik Hiyerarşi Süreci,
DRASTIC Yöntemi,
Hayrabolu Havzası

Özet: Çalışma alanı, Türkiye'nin Trakya bölgesinde Hayrabolu havzasında yer almaktadır. Havzada yeraltı suyu, sulama ve içme suyu ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Bununla beraber havzadaki tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu, yeraltı sularının kirlenmesi açısından tehdit oluşturmaktadır. Bu çalışmada havzadaki kirleticilerin yeraltı sularını etkileme dereceleri ve dolayısıyla akiferi oluşturan birimlerin kirlenmeye karşı duyarlılığı DRASTIC yöntem ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) bir arada kullanılarak belirlenmiştir. DRASTIC yöntemine ek olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile DRASTIC yönteminde kullanılan katsayılar ve ağırlıklar tekrar değerlendirilip akiferin kirlenmeye karşı duyarlılığı tekrar belirlenmiştir. CBS ortamında akiferin kirlenmeye karşı duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Yeraltı sularında gözlenen nitrat konsantrasyonu dağılım değerleri ile CBS ortamında hazırlanan duyarlılık haritaları karşılaştırılmıştır. Oluşturulan duyarlılık haritasına göre havzadaki akifer yüzey alanının % 28,2'sinin kirlenmeye karşı oldukça savunmasız olduğu belirlenmiştir.

Mapping of Aquifer Susceptibility for Contamination via Combination of DRASTIC and DRASTIC-AHP Methods in Hayrabolu Basin, Thrace Region

Keywords:
Aquifer Susceptibility Map,
Analytic Hierarchy Process,
DRASTIC Method,
Hayrabolu Basin

Abstract: The study area is in Hayrabolu Basin in southern Thrace, Turkey. The groundwater in the basin is used both for irrigation and drinking purposes. However, the intensity of agricultural activities in the basin, is a threat in terms of pollution of groundwater. In this study, the degree of influence of pollutants affecting the groundwater in the basin and the susceptibility of the aquifer-forming units to pollution has been determined using a combination of DRASTIC method and geographic information systems (GIS). In addition to the DRASTIC method, the weights and ratings used in the DRASTIC method were re-evaluated with the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the susceptibility of the aquifer forming units to the contamination was re-determined. In this way, a susceptibility map for the aquifer pollution in the basin was prepared. The nitrate concentration distribution values observed in the groundwater were compared with the sensitivity maps prepared in the GIS environment. According to the generated susceptibility map, 28.2% of the surface area of the aquifer in the basin is determined as highly vulnerable to pollution.

*İlgili yazar: orhan.arkoc@klu.edu.tr

1. GİRİŞ

Su, yeryüzündeki canlılar ve dolayısıyla hayatın devamı için vazgeçilmezdir. Özellikle kurak ve yarı kurak iklimin hüküm sürdüğü bölgelerde temel su kaynağını yeraltı suları oluşturmaktadır (Abdullah ve ark., 2016). Bununla beraber dünya üzerindeki tatlı su

kaynakları sınırlı olup yerküredeki tüm su kaynaklarının sadece 25%'i tatlı sudur (Cooley et al., 2014). Ülkemizde içme ve sulama amaçlı kullanılan tatlı su kaynaklarından içme sularının %82 si, sulama sularının ise %76 sı yeraltı sularından karşılanmaktadır (DSİ, 2016). Bu durumdan da anlaşılacağı gibi yeraltı

sularına olan bağımlılık oldukça fazladır. Bununla beraber yapılan araştırmalarda 2030 yılında ülkemizde su kıtlığı olacağı da öngörülmektedir (Şener ve ark., 2009). Dolayısıyla mevcut su kaynaklarımızın su kalitelerinin sürdürülebilir bir şekilde korunarak en iyi şekilde yönetilmeleri gerekmektedir.

Dünyanın farklı yerlerindeki birçok akifer, serbest akifer niteliğinde olup ve yüksek geçirgenliğe sahiptir. Yüzeydeki çeşitli aktiviteler, tarımsal faaliyetler, kentleşme ve iyi arıtılmamış evsel ve sanayi atıklarının deşarjı ile yüzeyden itibaren çeşitli kirleticilerin sızması bu tip akiferleri kirliliğe karşı aşırı duyarlı hale getirmektedir. Bu durum yeraltı sularının nitelik ve nicelik olarak bozulmasına neden olmaktadır (Baalousha, 2006).

Yeraltı sularının korunması ve mekânsal planlama için stratejiler geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda kirlenmeye karşı duyarlılığının araştırılması önemli bir yer tutmaktadır (Foster, 1987). Bu amaçla araştırılan fiziksel çevrenin yeraltı sularını tehdit eden kirleticilere karşı korunması amacıyla bölgelere ayrılabilmesi gereklidir. Yapılan çalışmalarda bazı bölgeler, diğer bölgelere göre kirlenmeye karşı daha duyarlı olarak belirlenmektedir ve dolayısıyla bu bölgeleri gösteren haritalar kirlenmeye karşı potansiyel tehlike altında olan akiferleri göstermektedir.

Bu tip haritaların hazırlanmasında literatürde birçok farklı yaklaşımdan söz edilmiştir. Bu yaklaşımlar temel olarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımı ile görsel olarak haritalanabilir ve doğruluğu sınanabilir yaklaşımlar olan, üst üste bindirme analizi yapan, sayısal indeks temelli

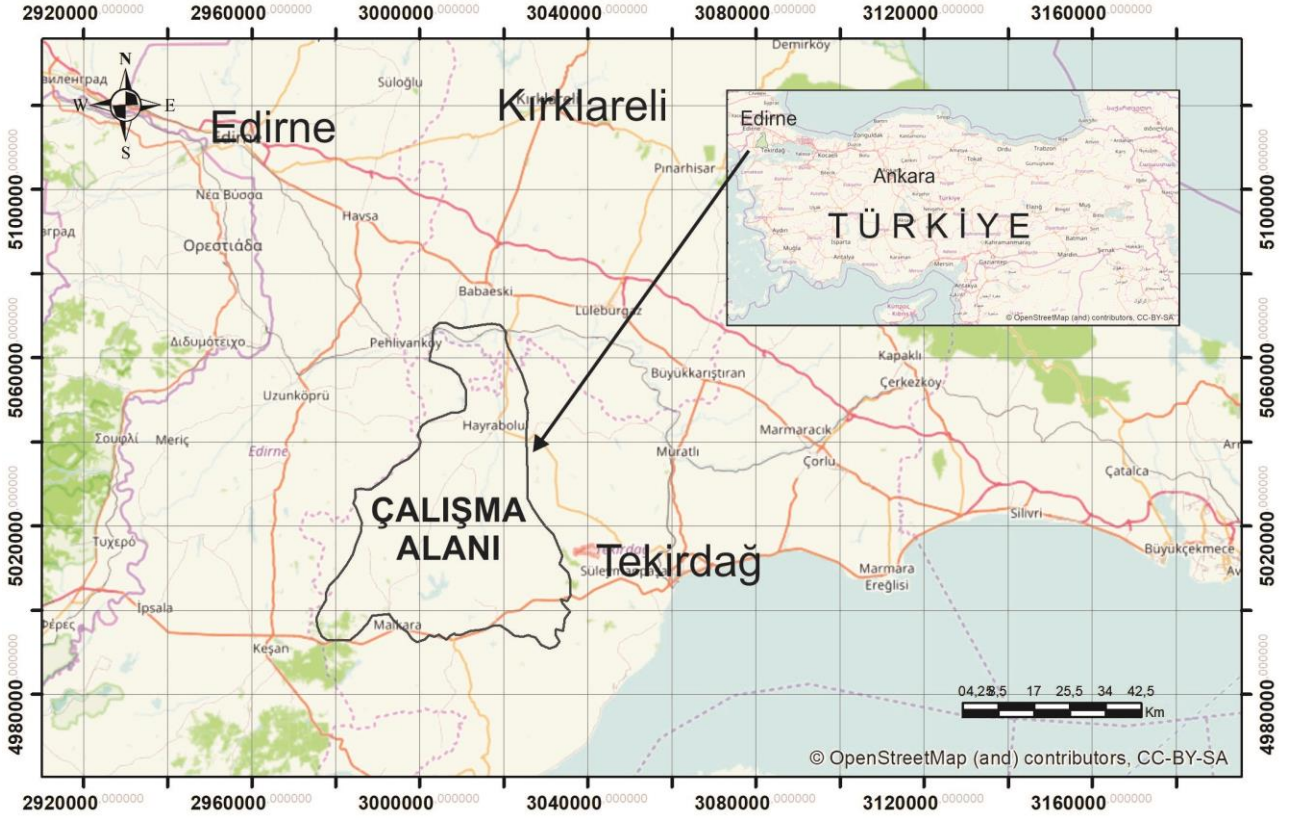
yöntemlerdir. Literatürde kullanılan Akifer duyarlılık analizi yöntemleri arasında; taneli ortamlar için kullanılan DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster, 1987), AVI (Van Stempvoort et al., 1993) ve SINTACS (Civita, 1994) sayılabilirken, karstik ortamlar için ise; RISKE (Merchant, 1994), EPIK (Doerfliger et al., 1999) ve COP (Vias et al., 2006) sayılabilir.

Üst üste bindirme ve indeks temelli DRASTIC yöntemi, dünyanın farklı bölgelerine farklı araştırmacılar tarafından en yaygın kullanılan yöntemdir (Lobo-Ferreira ve Oliveira, 2004; Secunda et al., 1998; Al-Zabet, 2002; Sener ve Davraz, 2013; Hamza ve ark., 2015; Abiy et al., 2016; Yıldırım ve Güler, 2016; Garewal et al., 2017).

Bu çalışmanın amacı Hayrabolu Havzasında yer alan akifer birimlerinin kirlenmeye karşı duyarlılıklarını DRASTIC ve AHS yöntemleri kullanarak CBS desteği ile belirleyip haritalamaktır.

1.1. Çalışma Alanı

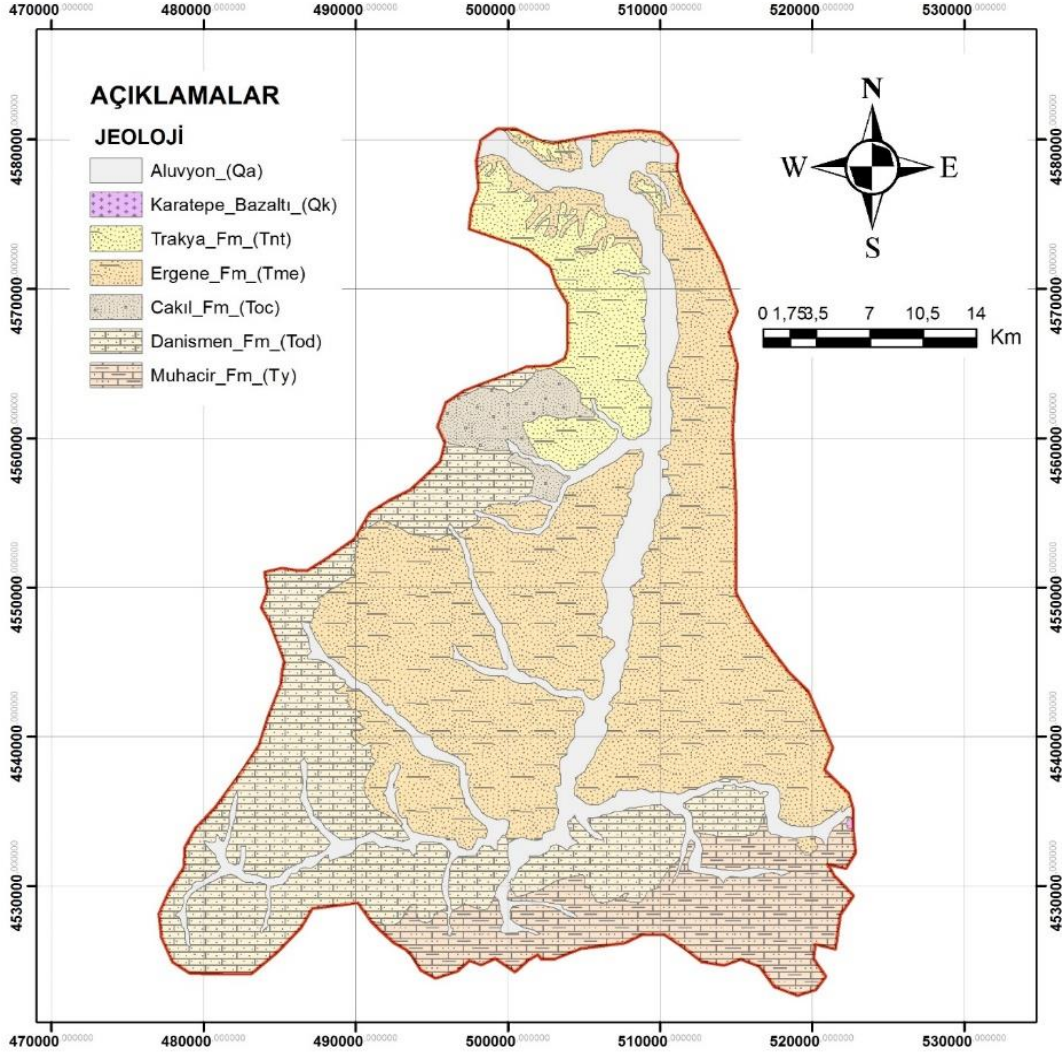
Türkiye'nin Kuzey Batısında Trakya bölgesinde yer alan çalışma alanı 1468 km²'lik alana sahiptir. Hayrabolu Nehrinin yüzey drenaj sahası çalışma alanını oluşturmaktadır. Alanın güneybatısında yer alan Karademir Tepelerinden doğan Hayrabolu Nehri, , yaklaşık güney - kuzey doğrultusunda, ayçiçek, buğday ve arpa gibi tarım ürünleri ekimi yapılan alanlarda 45 km akış göstererek Ergene Nehri ile birleşir. Havzanın batı, doğu ve güney kesimleri dağlık olup, yükseklik 6 m ile 324 m arasında değişir. Bölgede kışlar soğuk ve yağışlı, yazlar ise sıcak ve kuraktır. Ortalama yağış yüksekliği 521 mm'dir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (© OpenStreetMap CC-BY-SA)

Çalışma alanında en altta kilitaşı ve kumtaşı ardalanasından oluşan Muhacir Formasyonu (Ty) yer alır. Aralarında çakilitaşı bantları ve kalın kireçtaşı seviyeleri ile değişik düzeylerde linyit bantları içeren kumtaşlarından oluşan Oligosen yaşlı Danişmen Formasyonu (Tod) Muhacir Formasyonun üzerinde yer alır. Bu birimin üzerine taneleri çeşitli boyda iyi yuvarlanmış çakilitaşı, kumtaşı ve yer yer killerden oluşan Çakıl Formasyonu (Toc) gelir. Miyosen yaşlı Ergene Formasyonu (Tme) kil ve çakıl

merceklili gevşek tutturulmuş kumlardan oluşur ve çalışma sahasında geniş bir alanda gözlenir. Ergene Formasyonu üzerine çakıl, kum, kil ve çamurtaşlarından oluşan Trakya Formasyonu (Tnt) gelir. Koyu gri, siyah renkli sütun bazaltlardan oluşan ve Trakya Formasyonunu kesen Pleyistosen yaşlı Karatepe Bazaltı (Qk) çalışma alanının güney doğusunda küçük bir alanda gözlenir. Hayrabolu Nehri ve kollarında çakıl, kum, silt ve kil boyutlu malzemeler alüvyon (Qa) olarak adlandırılmıştır (Şentürk ve ark., 1998, Umut, 1988) (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma alanı jeoloji haritası (Umut 1998'den değiştirilerek)

Çalışma alanındaki yeraltı suyu, Ergene ve Trakya Formasyonlarını oluşturan çakıl, kum ve silt taneleri arasındaki boşluklarda serbest olarak yer alır. Önceki çalışmalar ve bu çalışmada elde edilen bilgilere göre yeraltı su seviyesi eğimi güney-kuzey yönlüdür. Kuyulardaki su seviyeleri 70 ile 100 m arasında değişmektedir (DSİ, 2002).

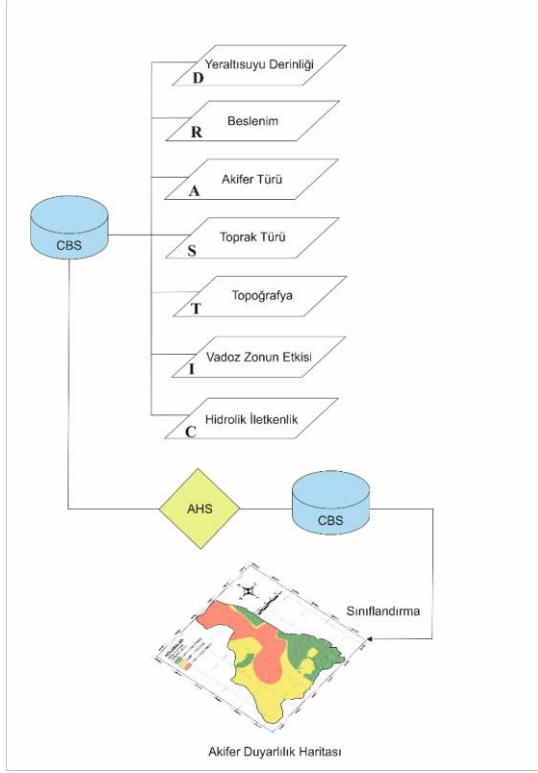
2. MATERYAL VE METOT

Hayrabolu havzasında başlıca geçim kaynağı tarım ve hayvancılıktır. Trakya bölgesi Türkiye Ayçiçek üretiminin % 48'nin, buğday üretiminin ise %11'inin karşılandığı bir bölgedir (www.tuik.gov.tr). Çalışma alanında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ)

tarafından 121,43 km² alan sulanmaktadır. Bununla beraber havzada yer alan kırsal ve kentsel yerleşim yerleri içme suyu ihtiyaçlarını yeraltı suyundan karşılamaktadır. Yoğun tarım faaliyetinin olduğu bölgede kullanılan gübre ve pestisitlerin yeraltı suyuna karışması ihtimali oldukça yüksektir. Bununla beraber hayvansal ve evsel atıkların düzensiz depolanması sonucu oluşabilecek sızıntılar da yeraltı suları için ayrıca tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle havzadaki akiferlerin kirlenmeye karşı duyarlılığının saptanması gerekmektedir.

Bu çalışmada bölgedeki temel kirlenme kaynağının tarımsal faaliyetler olması ve taneli akifer birimlerinin gözlenmesi nedeniyle kirlenmelerin yeraltı sularına karışması

ihtimaline karşı DRASTIC yöntem ile duyarlılık haritası CBS yardımı ile hazırlanmıştır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan yöntemle ait akış diyagramı

Buna ek olarak DRASTIC yöntemdeki her değişkene ait reyting katsayıları AHS ile tekrar belirlenip akifer duyarlılık haritası yeni katsayılar ile CBS ortamında tekrar hazırlanmıştır (Şekil 3).

2.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

Karar alma süreçlerinde insan yargısının etkinliğinin artması, alınan kararın doğruluğunu arttırmaktadır. Aynı karar problemlerinde karar ölçütlerinin önem düzeyi

ve karar seçeneklerinin değerlendirilmesinde her insan farklı karar yargılarına varabilmektedir. Bu tür karar problemlerinin çözümünde AHS daha etkin karar verme imkânı sağlamaktadır. AHS, Saaty (1980) tarafından geliştirilmiş olan ikili karşılaştırma yöntemine dayalı karar alma yöntemlerinden olup çoklu ve zor problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu yöntemde belirlenmek istenen temel karar, belirlenen alt ölçütlerin sağlanması ile alınır. Karar verme işleminde, alt ölçütlerin birbirleri ile karşılaştırılması sonucu elde edilen sonuçlar değerlendirilir (Saaty, 1980).

AHS yönteminin temeli olan ikili karşılaştırmalar için bir ölçek geliştirilmiştir. Bu ölçekte iki ölçüt birbiriyle sözel olarak karşılaştırılır ancak sonuçlar sayısal olarak ifade edilir. Karar ölçütleri ve her bir ölçüte göre karar seçenekleri 1 ile 9 arasında değişen sayılarla ikili karşılaştırmalarla değerlendirilir (Tablo 1) (Saaty, 1980).

AHS yönteminde ikinci adım her bir ölçütün önem derecesini gösteren, öncelik vektörlerinin bulunmasıdır. AHS algoritması aşağıdaki biçimde tanımlanabilir;

Öncelikle $C1, C2, Cn$ kriterleri ve a_{ij}, C_i kriteri ile C_j kriteri arasındaki değerlendirmeyi (1-9 önem ölçeğinde) ifade etmek üzere, $n*n$ boyutundaki A ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Karşılaştırma matrisinde $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ilişkisi ve $a_{ii} = 1$ eşitliği bulunur. Karşılaştırma matrisinin her elemanı, kendi sütun toplamına bölünerek “Normalleştirilmiş Karşılaştırma Matrisi” elde edilir. Daha sonra normalleştirilmiş karşılaştırma matrisinin her satırda satır ortalamaları hesaplanır. Bu ortalama değerleri ölçütlerin görece önemlerini ifade eder (Aydın ve ark., 2009).

Tablo 1. AHS yönteminde ikili karşılaştırmalarda kullanılan değerlerin anlamları (Saaty, 1980)

Sayısal değerler	Açıklama
1	Eşit önemli
3	Daha önemli
5	Kuvvetli derecede önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli
9	Aşırı derecede önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

AHS sonuçlarının geçerli olabilmesi için, A matrisinin tutarlı bir matris olması gerekmektedir. Tutarlı bir A matrisinde, $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ olmak üzere, w_i ağırlıkları (ağırlık vektörü) hesaplanır. Ağırlıklar, normalleştirilmiş karşılaştırma matrisi ile hesaplanan göreceli önem değerleri ile ilk oluşturulmuş olan karşılaştırma matrisinin ilgili sütunun çarpılıp toplanması ile elde edilen vektördür.

A matrisinin oluşturulmasında karar vericinin ölçütler arasında kıyaslama yaparken tutarlı davranıp davranmadığını ölçmek için ‘‘Tutarlılık Oranı’’nın (TO) hesaplanması gerekir. Bu değer 0.1 den küçük olması gerekmektedir. Eğer bu oran 0.1’den büyük ise karar verici ikili karşılaştırmalardaki kararlarını yeniden gözden geçirmelidir (Millet ve Saaty, 2000).

Tutarlılık Oranı hesabı için aşağıdaki formül kullanılır;

$$TO = \frac{T\bar{I}}{R\bar{I}} \dots \dots \dots (2)$$

Burada $T\bar{I}$: Tutarlılık İndeksi, $R\bar{I}$: Rastgelelik İndeksini ifade eder. Tutarlılık İndeksi ise aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır;

$$T\bar{I} = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1} \dots \dots \dots (3)$$

Burada λ_{maks} , karar matrisinin en büyük özvektörü olup matristen hesaplanabilmektedir. ‘n’ değeri ise matrisin derecesini ifade etmektedir. Formülde yer alan Rasgelelik

İndeks değeri ise aşağıda verilen tablo 2 den okunmaktadır.

Tablo 2. AHS yönteminde kullanılan matris boyutu ile ilgili Rastsal Tutarlılık İndeksi (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0	0	0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4
I			8	9	2	4	2	1	5	9

n: matris boyutu Rİ: Rastgelelik indeksi

Bu çalışmada DRASTIC yöntemi için kullanılan 7 adet değişken incelendiğinden matrisin Rİ değeri 1,32’dir. Bu çalışma için yapılan hesaplamalarda TO değeri 0.03 olarak hesaplanmıştır.

Tutarlılık Oranının istenilen değerler arasında olması sağlandıktan sonra karar seçenekleri öncelik sıralamasını geliştirmek amacıyla öncelik matrisi oluşturulur. Her bir karar seçeneği için öncelik, bu ölçütlere göre karar seçeneğinin önceliğinin ölçütün önceliğiyle çarpılması ve çarpım sonuçlarının toplanması ile elde edilir.

Daha sonra, her bir parametre kendi içerisinde tekrar değerlendirilerek ikinci bir reyting değerleri bulunmuştur (Tablo 4,5,6,7,8,9,10). DRASTIC Yöntem içerisinde ve haritaların hazırlanmasında kullanılan reyting katsayıları her bir parametrenin kendisine ait reyting değeri ile yine kendi içerisinde yapılan değerlendirme sonucunda elde edilen reyting değerlerinin çarpımı sonucunda elde edilmiştir (Tablo 11).

Bu çalışmada kullanılan DRASTIC yöntem içerisindeki 7 ayrı değişken için hazırlanan ikili karşılaştırma matrisi ve her değişkenin reyting katsayıları Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. DRASTIC değişkenlerine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve AHS Reyting Katsayıları

	D	R	A	S	T	I	C	AHS-RK
D	1	1/3	1/3	1/6	1/7	1/2	1/5	0.374
R	3	1	½	1/3	1/5	½	1/3	0.139
A	3	2	1	1/3	1/3	1/3	½	0.104
S	6	3	3	1	½	1/5	½	0.051
T	7	5	3	2	1	1/6	½	0.040
I	2	2	3	5	6	1	1/3	0.223
C	5	3	2	2	3	3	1	0.070

D: Yeraltısuyu derinliği R:BeslenimA: Akifer türü S: Toprak türü T: Topoğrafya I: Vadoz zon etkisi C:Hidrolik iletkenlik AHS-RK: AHS reyting katsayısı

Lambda $\frac{T_i}{R_i}$ $\frac{T_i}{R_i}$
7,241626423 0,040271071 0,030508387

Bu işlemten sonra, her bir değişken (D, R, A, S, T, I, C) kendi içerisinde tekrar değerlendirilerek ikincil reyting değerleri bulunmuştur (Tablo 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11).

DRASTIC-AHS yöntemine göre hazırlanan haritalarda kullanılan reyting katsayıları ise tablo 4 de verilmiştir.

Tablo 4. DRASTIC ve DRASTIC-AHS yöntemlerinde kullanılan ağırlık ve reyting değerleri

DRASTIC değişkenleri	Sınıf/özellik	DRASTIC			DRASTIC-AHS		
		Ağırlık	Reyting	Toplam ağırlık	Ağırlık	Reyting	Toplam ağırlık
Yeraltısuyu derinliği (m) <i>D</i>	0 – 10	5	10	50	0.374	0.306	0,114
	11-20		7	35		0.173	0,065
	21-30		5	25		0.105	0,039
	31-40		3	15		0.079	0,030
	> 40		1	5		0.052	0,019
Beslenim (mm/yıl) <i>R</i>	495-530	4	3	12	0.139	0,046	0,006
	531-595		5	20		0,073	0,010
	596-670		7	28		0,095	0,013
	>671		9	36		0,167	0,023
Akifer ortam <i>A</i>	Bazalt	3	9	27	0.104	0,078	0,008
	Kum ve çakıl		8	24		0,097	0,010
	Killi ve çakıllı kum		6	18		0,173	0,018
	Silt ve kil		3	9		0,366	0,038
	İnce yada yok	2	10	20	0.051	0,333	0,017
Toprak örtüsü, <i>S</i>	Kum		9	18		0,072	0,004
	Kumlu toprak		6	12		0,102	0,005
	Siltli toprak		4	8		0,167	0,009
	Killi toprak		3	6		0,040	0,114
	0-4	1	10	10	0.040	0,042	0,065
Topoğrafya, <i>T</i> (yüzde eğim)	4-7		9	9		0,058	0,039
	7-10		5	5		0,096	0,030
	10-15		3	3		0,163	0,019
	15-20		2	2		0,355	0,006
	Vadoz zon etkisi, <i>I</i>	Kil-Çakıl	5	5	25	0.223	0.150
Kum-Çakıl			6	30		0.059	0,013
Kum-Çakıl			8	40		0,089	0,023
Bazalt			9	45		0,274	0,008
Hidrolik iletkenlik (m/s) <i>C</i>	$10^{-3} - 10^{-4}$	3	10	30	0.070	0.033	0,010
	$10^{-4} - 10^{-5}$		8	24		0,202	0,018
	$10^{-5} - 10^{-6}$		6	18		0,090	0,038
	$10^{-6} - 10^{-7}$		4	12		0,149	0,017

Tablo 5. Yeraltısuyu derinliği parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reytting Katsayıları

	>40m	30-40m	20-30m	20-10m	0-10m	AHS-RK
>40m	1	1/2	1/3	1/3	1/5	0,052
30-40m	2	1	1/2	1/3	1/3	0,079
20-30m	3	2	1	1/2	1/3	0,105
20-10m	4	3	2	1	1/2	0,173
0-10m	5	4	3	2	1	0,306

Lambda CI CI/RI
3,731191663 -0,54480139 -0,412728325

Tablo 6. Yeraltısuyu Beslenimi parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reytting Katsayıları

	495-530mm	530-565mm	565-600mm	600-695mm	>600mm	AHS-RK
660-650mm	1	1/2	1/3	1/3	1/5	0,046
670-660mm	3	1	1/2	1/3	1/3	0,073
680-670mm	5	3	1	1/2	1/3	0,095
690-680mm	7	5	3	1	1/2	0,167
>690mm	9	7	5	3	1	0,334

Lambda: 4,677565413 CI: -0,387072431 CI/RI: -0,29323669

Tablo 7. Akifer türü parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reytting Katsayıları

	Kum ve çakıl	Killi ve çakıllı Kum	Silt ve kil	Bazalt	AHP
Kum ve çakıl	1	1/2	1/3	1/3	0,062
Killi ve çakıllı Kum	3	1	1/2	1/3	0,078
Silt ve kil	5	3	1	1/2	0,138
Bazalt	9	5	3	1	0,293

Lambda CI CI/RI
2,934059101 -0,677656816 -0,513376376

Tablo 8. Toprak türü parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reytting Katsayıları

	Killi toprak	Kum	Kumlu toprak	Siltli toprak	Çıplak Kayalık	AHS-RK
Killi toprak	1	1/2	1/3	1/3	1/5	0,040
Kum	7	1	1/2	1/3	1/3	0,072
Kumlu toprak	5	7	1	1/2	1/3	0,102
Siltli toprak	3	5	7	1	1/2	0,167
Çıplak kayalık	9	3	5	7	1	0,333

Lambda CI CI/RI
6,179755217 -0,136707464 -0,10356626

Tablo 9. Topoğrafya parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reyting Katsayıları

	0-2	2-6	6-12	12-18	>18	AHS-RK
0-2	1	1/3	1/4	1/6	1/7	0,042
2-6	2	1	1/3	1/4	1/6	0,058
6-12	3	2	1	1/3	1/4	0,096
12-18	4	3	2	1	1/3	0,163
>18	5	4	3	2	1	0,355

Lambda: 3,217370389 CI: -0,630438269 CI/RI: -0,477604749

Tablo 10. Vadoz zon etkisi parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reyting Katsayıları

	Kum ve çakıl	Killi ve çakıllı kum	Kil ve çakıl	Bazalt	AHS-RK
Kum ve çakıl	1	1/2	1/3	1/4	0,059
Killi ve çakıllı kum	2	1	1/2	1/3	0,089
Kil ve çakıl	3	2	1	1/2	0,150
Bazalt	4	3	2	1	0,274

Lambda CI CI/RI
2,308276796 -0,781953867 -0,592389293

Tablo 11. Hidrolik iletkenlik parametresine ait ikili karşılaştırmalar matrisi ve Reyting Katsayıları

	10 ⁻³ -10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷	>10 ⁻⁷	AHS-RK
10 ⁻³ -10 ⁻⁴	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0,033
10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵	2	1	1/2	1/3	4	0,202
10 ⁻⁵ -10 ⁻⁶	3	2	1	1/2	1/3	0,090
10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷	4	3	2	1	1/2	0,149
>10 ⁻⁷	5	4	3	2	1	0,240

Lambda CI CI/RI
5,061908854 -0,323015191 -0,244708478

2.2.DRASTIC Yöntemi

DRASTIC, indeks ve üst üste bindirme ile analiz yapan bir yöntemdir (Aller et al., 1987). DRASTIC kelimesinin baş harfleri İngilizce karşılıkları ile tanımlanmış yedi hidrojeolojik öğeyi simgeler. Bunlar, **D**: Yeraltı suyu Derinliği (Depth to groundwater), **R**: Beslenme (Recharge), **A**: Akifer Ortam (Aquifer media), **S**: Toprak Örtüsü (Soil Media), **T**: Topoğrafya (Topography) **I**: Vadoz zon etkisi (Impact of vadose zone), **C**: Akiferin hidrolik geçirgenliği (Hydraulic conductivity of the aquifer). Bu değişkenler 5 ile 1 arasında değişen ağırlıklara sahiptir (5 en üst düzeyde önemli, 1 en alt düzeyde önemli). Yine bu

değişkenlerin her biri yine kendi içinde farklı sınıflara ayrılır ve bu sınıflar 10 ile 1 arasında reyting değerlerine sahiptir (10 kirlenmeye en fazla duyarlı, 1 kirlenmeye en az duyarlı). Bu değişkenler aşağıdaki formüle yerleştirilerek DRASTIC indeks (DI) hesaplanır. Yüksek DRASTIC indeks değerleri yüksek kirlenme riskini gösterir.

$$\text{DRASTIC index (DI)} = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w) \quad (1)$$

Burada;

D_r:Yeraltı suyu derinliği reyting değeri

D_w:Yeraltı suyu derinliği ağırlık değeri

Rr: Beslenme miktarı için atanmış reyting değeri

Rw: Beslenme miktarı için verilmiş ağırlık değeri

Ar: Akifer ortam için atanmış reyting değeri

Aw: Akifer ortam için verilmiş ağırlık değeri

Sr: Toprak örtüsü için atanmış reyting değeri

Sw: Toprak örtüsü için verilmiş ağırlık değeri

Tr: Eğim için atanmış reyting değeri

Tw: Eğim için verilmiş ağırlık değeri

Ir: Vadoz zonun etkisi için atanmış reyting değeri

Iw: Vadoz zonun etkisi için verilmiş ağırlık değeri

Cr: Hidrolik iletkenlik için atanmış reyting değeri

Cw: Hidrolik iletkenlik için verilmiş ağırlık değeri.

Tablo 4'te DRASTIC yöntemine ait ağırlıklar ve reyting değerleri verilmiştir. Kullanılan değerler Aller et al., 1987 den alınmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. DRASTIC Yönteminin Uygulanması

DRASTIC yönteminde akifer duyarlılığının saptaması için yedi hidrojeolojik parametre göz önüne alınır. Bu parametreler; Yeraltı suyu Derinliği, Beslenme, Akifer Ortam, Toprak Örtüsü, Topoğrafya, Vadoz zon etkisi ve Akiferin hidrolik geçirgenliğidir. DRASTIC yönteminde kullanılmış olan verilerin elde edildiği kaynaklar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 12. DRASTIC yönteminde kullanılan verilerin elde edildiği kaynaklar

Veri türü	Kaynak
Hidrojeolojik veri	Devlet Su İşleri
Jeoloji haritası	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Toprak haritası	Çevre ve Orman Bakanlığı
Topoğrafya verisi	ASTER GDEM uydu fotoğrafları
Örnekleme kuyuları	Devlet Su İşleri, İl Özel İdaresi
Hidrolik iletkenlik	Devlet Su İşleri
Jeolojik kesit	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Nitrat ölçümleri	Ergene Havzası Çevre Düzeni Planı(2005)

DRASTIC yöntemde kullanılan 7 veri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1.1. Yeraltı suyu derinliği, D

Yeraltı su seviyesinin derinliği arttıkça kirleticilerin yeraltı suyuna karışmak için izlediği yol uzar ve bu nedenle akiferin ortamın kirleticinin etkisinin azaltma kapasitesi de artmış olur (Aller et al., 1987). Çalışma alanındaki yeraltı su seviyesinin belirlenmesinde 16 adet kuyu verisi kullanılmıştır. Bu veriler Devlet Su İşleri (DSİ) ve İl Özel İdaresinden elde edilmiştir. Çalışma alanındaki yeraltı su seviyesinin haritalanması için ArcGIS yazılımı, jeostatistiksel analiz uzantısı içindeki Kriging interpolasyon metodu kullanılmıştır. Daha sonra bu harita raster haritaya dönüştürülmüştür. Yeraltı suyu derinliği, kirleticilerin yeraltı suyuna karışmadan önce akifer içinde kat edeceği mesafeyi belirlediği için büyük önem taşımaktadır. Çalışma alanındaki yeraltı suyu seviyesi 5 sınıfa ayrılıp haritalanmıştır. Yeraltı suyu derinliği 0 ile 60 m arasında değişirken, 1 ile 10 arasında reyting değerine sahiptir (Şekil 4a).

3.1.2. Beslenme, R

Bir yeraltı suyu havzasında beslenme doymamış bölgeden yeraltı suyuna süzülen su miktarı olarak tanımlanır (Al-Zabet, 2002). Havzaya düşen yağışın % 20'lik miktarının akifere süzülerek yeraltı sularını beslediği kabul edilmektedir (Balusha, 2006, Dumlu ve ark., 2006). Çalışma alanındaki temel beslenme kaynağı yağıştır. Sulama suyu ile beslenme mevsimsel olup kısıtlıdır. Bu nedenle Hayrabolu ve Tekirdağ Meteoroloji İstasyonları yıllık yağış verilerine göre yeraltı suyu beslenme haritası ArcGIS yazılımı kullanılarak mesafe ile ters ağırlıklı interpolasyon metodu yardımı ile hazırlanmıştır (Şekil 4b).

3.1.3. Akifer ortam, A

Akifer ortam haritasının hazırlanmasında ve DRASTIC yöntemine göre sınıflandırılmasında çalışma alanındaki su kuyularına ait loglar ile Umut 1988 tarafından hazırlanan jeoloji haritasından yararlanılmıştır. Bu şekilde dört farklı hidrojeolojik birim çalışma alanında ayırtlanmıştır. Bu birimler, kirlenmeye karşı en duyarlı ortam olan kum ve çakıl ar dalanmasından oluşan alüvyon, ve çalışma alanının büyük kısmında gözlenen killi kum ve çakıl çökelleridir. Çalışma alanının güney batısında ise düşük geçirimliğe sahip, siltli ve killi birim yer alırken, son olarak bazalt intrüzyonu çalışma alanının güney doğusunda dar bir alanda gözlenmektedir. Akifer ortam haritası Şekil 4c'de verilmiştir.

3.1.4. Toprak örtüsü tipi, S

Toprak örtüsü tipi, akiferin kirlenmesine neden olan kirleticilerin beslenme ile süzülme oranını dolayısı ile kirleticilerin düşey olarak vadoz zonda ilerleme kabiliyetini kontrol eder (Lee, 2003). Çalışma alanının toprak örtüsü haritasının hazırlanmasında Ergene Havzası Çevre Düzeni Planı (EHCDP, 2005) paftalarında yer alan basılı haritadan yararlanılmıştır. Bu harita ArcGIS ortamında sayısallaştırılmıştır. Bu amaçla çalışma alanındaki toprak örtüsü, siltli toprak, kum, kumlu toprak, killi toprak ve çıplak kayalık olarak 5 sınıfa ayrılmıştır. (Şekil 4d).

3.1.5. Topoğrafya (eğim), T

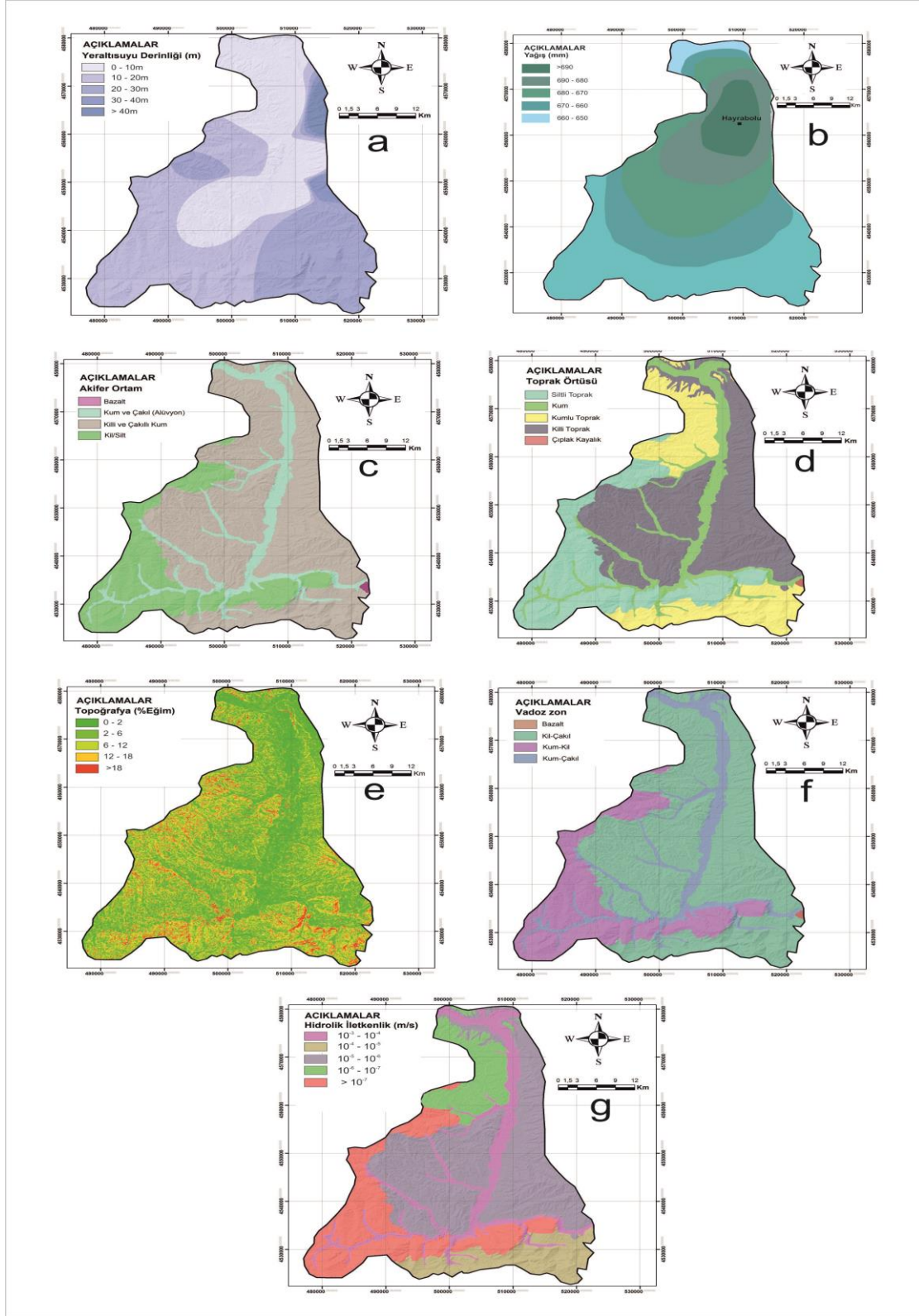
Çalışma alanının topoğrafik haritası ASTER uydusundan elde edilen çalışma alanına ait fotoğraftan elde edilmiştir. Bu işlem için uydu fotoğrafı MapInfo yazılımı kullanılarak, 10 m eş yükselti eğrisi aralıklı sayısal yükseklik modeline çevrilmiştir. Sayısal yükseklik modeli ArcGIS yazılımında mekânsal analiz, eğim aracı ile % eğim haritasına dönüştürülmüştür (Şekil 4e). Şekil 4e'de verilen haritada çalışma alanında eğim % 0 ile 18 ve üzeri arasında değişmektedir. Çalışma alanının % 62'sinde eğim % 0-6 arasındayken, % 28'inde eğim % 6-18 arasında değişmektedir.

3.1.6. Vadoz bölgenin etkisi, I

Yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan kısmen doymuş ya da doymamış bölge vadoz bölge olarak adlandırılır. Vadoz bölge, akifere düşen yağışın süzülerek yeraltı suyuna karışmasında önemli rol oynamaktadır. Vadoz bölgenin haritalanmasında DSİ den elde edilen su kuyuları logları ve bölge jeoloji haritasından (Umut, 1988) faydalanılmıştır (Şekil 2). Çalışma alanının büyük kesimi kil ve çakıl birimleri gözlenirken, güney batı kesiminde kumlu ve killi birimler gözlenmektedir. Vadoz bölge haritası Şekil 4f'de verilmiştir.

3.1.7. Hidrolik iletkenlik, C

Akifer içindeki doymuş bölgedeki yeraltı suyu hareketi hidrolik iletkenlik tarafından kontrol edilmektedir.



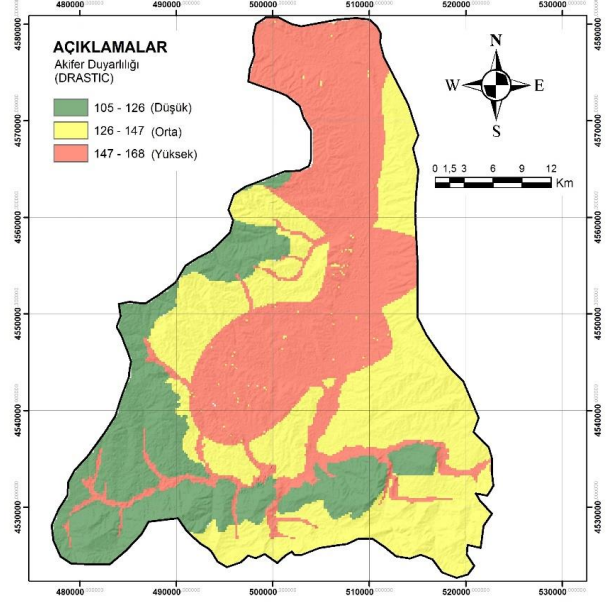
Şekil 4. Çalışma alanı (a)yeraltı suyu yüzeyden derinlik haritası, (b) yağış haritası, (c) akifer ortam haritası, (d) toprak örtüsü haritası, (e) eğim haritası, (f) vadoz zon haritası, (g) hidrolik iletkenlik haritası

Kirleticilerin yeraltı suyuna erişimi de hidrolik iletkenlik ile ilgilidir. Çalışma alanındaki hidrolik iletkenlik değerlerinin tespiti için DSİ tarafından yapılan akifer testleri sonuçlarından yararlanılmıştır. Kuyuların olmadığı kesimlerde ise literatürde jeolojik birimler için verilen hidrolik iletkenlik değerleri kullanılmıştır (Dumlu ve ark., 2006). Bu şekilde çalışma alanında 5 farklı sınıfta 10^{-3} ile 10^{-7} m/s arasında değişen hidrolik iletkenlik değerleri haritalanmıştır (Şekil 4f).

3.2. Akiferin kirlenmeye karşı hassasiyetinin belirlenmesi

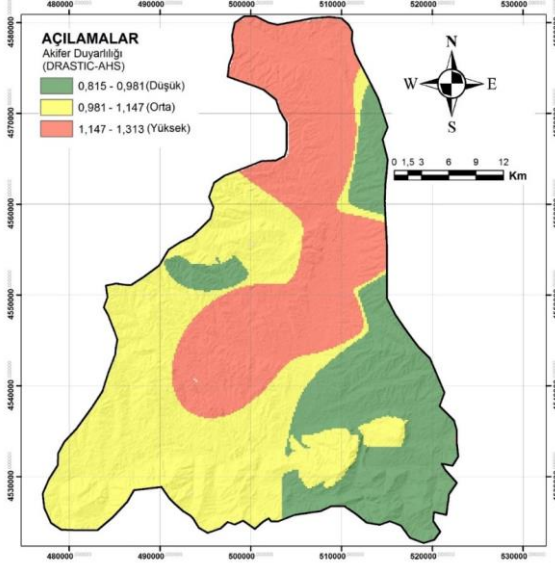
Çalışma alanındaki akiferin kirlenmeye karşı hassasiyetinin belirlenmesi için yukarıda değinilen 7 değişkene ait veriler ile hazırlanan haritalar, 1 nolu denklemde verilen formüle göre Tablo 4’te verilen reyting ve ağırlıklara göre ArcGIS ortamında örtüştürülerek çalışma alanındaki akifere ait kirlenmeye karşı hassasiyet haritası hazırlanmıştır (Şekil 5). Hazırlanan haritada akifer, düşük (105-126), orta (126-147) ve yüksek hassasiyetli (147-168) olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. Sınıflamada kullanılan kategori aralıklarını seçmek için çeşitli çalışmalarda çeşitli uygulamalar kullanılmıştır (Rahman 2008; Lee 2003; Al-Adamat et al., 2003; Baalousha 2006). Bu çalışmada, kullanılan verileri mutlak olmayıp, oransal olarak gruplara dağıtarak farklı harita desenleri üreten bir kuantil sınıflandırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, bu tür sınıflandırma çalışması için uygun bir yöntemdir. Eğer kategori aralıkları rasgele belirlenirse, araştırmacılar tarafından güvenilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olmamaktadır (Sener ve ark., 2009).

Klasik DRASTIC yönteminde akifer hassasiyeti değerlendirilmesinde kullanılan yedi değişkene ait reyting değerleri 1 ile 10 arasında değişmektedir. Araştırmacılar bölgenin hidrojeolojik özelliklerine göre bu yedi değişkene 1 ile 10 arasında reyting değerleri vermektedir. Ancak bu tip değerlendirmede farklı araştırmacılar tarafından verilen reyting değerleri farklı olabilmektedir. Bu durumun



Şekil 5. Çalışma alanı DRASTIC duyarlılık haritası

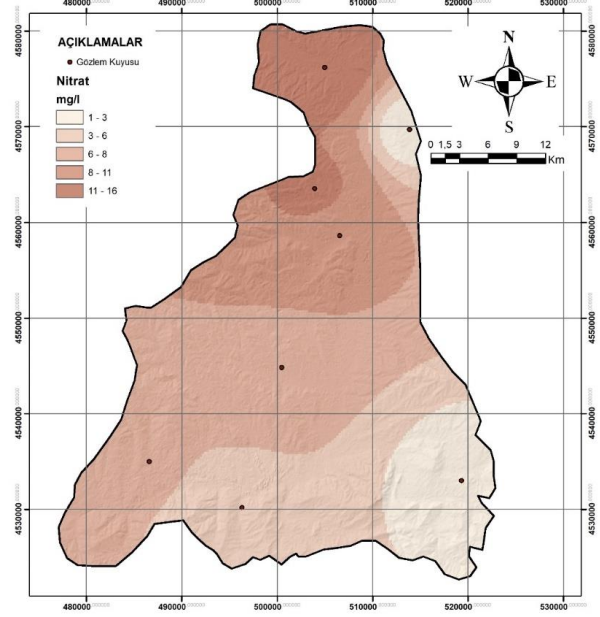
yarattığı belirsizliği kaldırmak için reyting değerleri AHS yöntemi ile tekrar belirlenmiştir. AHS ile oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri ile akifer hassasiyetini belirlemede kullanılan yedi değişken birbirlerine göre önem derecesine göre karşılaştırılmıştır. Bu şekilde yapılan yeni hesaplama ile DRASTIC-AHS akifer duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Hazırlanan yeni akifer duyarlılık haritası düşük (0.815-0.981), orta (0.981-1.147) ve yüksek hassasiyetli (1.147-1.313) olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır (Şekil 6). Bu haritaya göre çalışma alanının doğu kesimleri düşük hassasiyete sahipken, orta ve batı kesimleri yüksek hassasiyete sahiptir. Çalışma alanının hidrolik iletkenliği yüksek, topografik eğimin düşük ve kum boyutlu tane içeriği fazla olan bölümünde DRASTIC değerlerinin yüksek olduğu gözlenmektedir. Bununla beraber düşük hidrolik iletkenliği olan yüksek eğimli kesimlerde DRASTIC değerleri düşük olmaktadır. Trakya Formasyonu yüksek hidrolik iletkenlik değeri ile DRASTIC değerlerini arttırırken, Danişmen Formasyonu killi içeriği ve düşük hidrolik iletkenliği ile DRASTIC değerlerini azaltıcı etkide bulunmaktadır.



Şekil 6. Çalışma alanı DRASTIC-AHS duyarlılık haritası

3.3. Akifer kirlenmeye karşı duyarlılık haritasının doğrulanması

İnsan sağlığı açısından içme sularında izin verilen maksimum nitrat konsantrasyonu değeri 50 mg/l'dir (TSE, 2005; WHO, 2008). Bununla beraber yeraltı sularında gözlenen 10 mg/l üzerindeki nitrat konsantrasyonu değerleri bu suların dışarıdan kirletildiğini gösterir. Yeraltı sularındaki nitratın kaynağı temel olarak tarımda kullanılan gübrelerin ve hayvansal atıkların sızıntı ile yeraltı suyuna karışmasıdır. Çalışma alanındaki yeraltı sularında gözlenen nitrat konsantrasyonu değerleri 1 ile 16 mg/l arasında değişmektedir (EHCDP, 2005). Bu değerlerin mekânsal dağılımı ArcGIS yazılımı kullanılarak mesafe ile ters ağırlıklı interpolasyon metodu ile haritalanmıştır (Şekil 7). Bu analizlere dayanarak, nitrat konsantrasyonunun yüksek olduğu alanların DRASTIC çıktılarıyla ilişkilendirilebileceği sonucuna varılmıştır (Şekil 11). Kirlenmeye karşı düşük duyarlılığı olan bölgelerin, çalışma alanının güneybatısında yer alan yerleşim alanlarından uzak ve tarımsal alanların az olduğu kesimler olduğu gözlenmiştir. Çalışma alanındaki nitrat değerleri yeraltı su tablası eğimi ve tarımsal alanların yoğunluğuna bağlı olarak güneyden kuzeye doğru artmaktadır.



Şekil 7. Çalışma alanı yeraltı suları nitrat konsantrasyonu dağılımının Kriging metodu ile hazırlanmış haritası

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ergene Havzasının güneyinde yer alan Hayrabolu alt havzasında akifer duyarlılık haritasının oluşturulmasında CBS tabanlı DRASTIC yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde çalışılan bölgeye ait 7 hidrojeolojik parametre araştırmacılar tarafından 1 ile 10 arasında değerlendirilmektedir. Ancak bu şekilde yapılan değerlendirmelerde farklı araştırmacılar farklı değerlendirmelerde bulunabilmektedirler. Bu durumu aşmak için bazı araştırmacılar DRASTIC yöntemini ek parametreler koyarak ya da yeni ağırlık ve reyting değerleri vererek yeniden düzenlemişlerdir. Değerlendirmede yaşanan bu farklılığın giderilmesi amacıyla DRASTIC yönteminde kullanılan reyting değerleri AHS yöntemi ile tekrar belirlenmiştir. Bu şekilde oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri ile 7 parametrenin birbirine göre önem derecelerine bağlı olarak yeni reyting değerleri belirlenmiştir.

Bu 7 hidrojeolojik değişken yardımı ile hazırlanan haritalar CBS ortamında üst üste bindirilerek çalışma alanındaki akifer için

kirlenmeye karşı duyarlılık haritası oluşturulmuştur. DRASTIC yöntemine göre hazırlanan haritaya göre çalışma alanının duyarlılık indeksi 105 ile 168 arasında değişirken, DRASTIC-AHS yöntemi ile hazırlanan haritaya göre bu değerler 0.815 ile 1.313 arasında değişmektedir. Elde edilen bu değerler kuantil sınıflandırma yöntemi kullanılarak üç sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar sırasıyla; düşük (0,815–0,981), orta (0,981–1,147) ve yüksek (0,147–1-313) olarak belirlenmiştir.

DRASTIC-AHS yönteminden elde edilen akifer kirlenmeye karşı duyarlılık haritası, koruma ve kirlilik önleme açısından yüksek önceliğe sahip konumları göstermektedir. DRASTIC-AHS yöntemi ile elde edilen sonuçlar, akifer koruma ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. Bu sonuçlar aynı zamanda, yeraltı suları kaynaklarını yönetmekle görevli yerel makamlar için zaman ve ekonomik olmak açısından önemli bir fayda sağlamaktadır. Çalışma alanındaki akiferin % 28,2 sinin kirlenmeye karşı yüksek duyarlı olduğu bu yöntemle tespit edilmiş olup, öncelikli olarak bu kesimlerde önlem alınmalıdır.

DRASTIC-AHS yöntemi ile hazırlanan haritaların doğrulanması amacıyla yeraltı sularındaki nitrat konsantrasyonu değerleri kullanılmıştır. Bu amaçla yapılan değerlendirmede, yüksek nitrat konsantrasyonlarının, kirlenmeye karşı yüksek duyarlı akifer ortamına karşılık geldiğini göstermektedir. Çalışma alanının orta ve kuzey kesimleri ile alüvyon akifer yüksek hassasiyete sahipken batı kesimleri düşük hassasiyete sahiptir ve nitrat konsantrasyonları kuzeye doğru yeraltı su tablası eğimi ile uyumlu olarak artmaktadır. Bu durum, elde edilen sonuçların gerçekçi olduğunu ve sahadaki gerçek durumu temsil ettiğini gösterir.

Yapılan bu çalışmada Hayrabolu Nehrinin aktığı alüvyon akiferin yüksek risk altında olduğu görülmüştür. Bölgedeki yeraltı suyu tarımsal sulama dışında içme suyu kaynağı

olarak da kullanıldığı için akiferin korunmasına yönelik önlem alınması gerekmektedir. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirilerek diğer havzalar için de benzer çalışmaların yapılması uygun olacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Abdullah, T. O., Ali, S. S., Al-Ansari, N. A. (2016). Groundwater Assessment of Halabja Saidadiq Basin, Kurdistan region, NE of Iraq Using vulnerability Mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 1-16.
- Abiy, A. Z., Melesse, A. M., Behabtu, Y. M., Abebe, B. (2016). Groundwater Vulnerability Analysis of the Tana Sub-basin: An Application of DRASTIC Index Method. *Landscape Dynamics, Soils and Hydrological Processes in Varied Climates*. Springer International Publishing, Geneva, 839.
- Al-Adamat RAN, Foster IDL, Baban SMJ (2003). Groundwater Vulnerability and Risk Mapping for the Basaltic Aquifer of the Azraq Basin of Jordan Using GIS, Remote Sensing and DRASTIC. *Applied Geography* 23:303–324.
- Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.H. Hackett G. (1987). DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwaters Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. USEPA Report 600/2- 87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Oklahoma, USA.
- Al-Zabet T. (2002). Evaluation of Aquifer Vulnerability to Contamination Potential Using the DRASTIC Method. *Environmental Geology*, 43, 203– 208.
- EHCDP (2005). Ergene Havzası Çevre Düzeni Planı Proje Grubu, Plan Hükümleri Raporu, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Arkoc, O. (2014). Heavy Metal Concentrations of Groundwater in the East of Ergene Basin, Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 93, 429-437.
- Aydin, Ö., Öznehir, S., Akcalı, E.(2009). Ankara için Optimal Hastane Yeri Seçiminin Analitik Hiyerarşi Süreci ile Modellenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(2),69-86.
- Baalousha H. (2006). Vulnerability Assessment for the Gaza Strip, Palestine Using DRASTIC. *Environmental Geology*, 50,405–414.
- Brindha, K., Elango, L. (2015). Cross Comparison of Five Popular Groundwater Pollution

- Vulnerability Index Approaches. *Journal of Hydrology*, 524, 597-613.
- Civita M. (1994). Contamination Vulnerability Mapping of the Aquifer: Theory and Practice. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*, Pitagora, Italy, 325.
- Cooley, H., Ajami, N., Ha, M. L., Srinivasan, V., Morrison, J., Donnelly, K., Christian-Smith, J. (2014). Global Water Governance in the Twenty-First Century. In *The world's Water*. (editor: P. H. Gleick) Island Press, Washington, DC, 211-253.
- Doerfliger N., Jeannin P.Y. Zwahlen F. (1999). Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-Attribute Approach and GIS Tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39(2):165–176.
- DSİ (2002). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ergene Havzası Hidrojeoloji Raporu, Edirne.
- DSİ (2016). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 2016 Yılı Faaliyet Raporu, Ankara.
- Dumlu, O., Bozkurtoğlu, E., Yalçın, H. T. (2006). Yeraltısuyu Jeolojisi ve Hidroliği. Literatür Yayıncılık. Ankara, 255.
- Foster S. (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In: *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants* (editors: Van Duijvenbooden and Van Waegeningh), Organization for Applied Scientific Research , Hauge, Netherlands, 69–86.
- Garewal, S. K., Vasudeo, A. D., Landge, V. S., Ghare, A. D. (2017). A GIS-Based Modified DRASTIC (ANP) Method for Assessment of Groundwater Vulnerability: A Case Study of Nagpur City, India. *Water Quality Research Journal*, 1-8.
- National Research Council (1993). *Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. National Academies Press. Washington, 210.
- Hamza, S. M., Ahsan, A., Imteaz, M. A., Rahman, A., Mohammad, T. A., Ghazali, A. H. (2015). Accomplishment and Subjectivity of GIS-based DRASTIC Groundwater Vulnerability Assessment Method: A Review. *Environmental Earth Sciences*, 73(7), 3063-3076.
- Lee, S. (2003). Evaluation of Waste Disposal Site Using the DRASTIC System in Southern Korea. *Environmental Geology*, 44:654–664.
- Lobo-Ferreira, J. P., Oliveira, M. M. (2004). DRASTIC Groundwater Vulnerability Mapping of Portugal. *Geofísica Internacional*, 43(4), 541-550.
- Merchant, J. W. (1994). GIS-Based Groundwater Pollution Hazard Assessment: a Critical Review of the DRASTIC Model. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 60(9), 1117-1128.
- Millet, I., Saaty, T. L. (2000). On The Relativity of Relative Measures—Accommodating Both Rank Preservation and Rank Reversals in the AHP. *European Journal of Operational Research*, 121(1), 205-212.
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC Model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography* 28:32–53.
- Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill Book Company, New York. 287.
- Secunda, S., Collin, M. L., Melloul, A. J. (1998). Groundwater Vulnerability Assessment Using a Composite Model Combining DRASTIC with Extensive Agricultural Land Use in Israel's Sharon Region. *Journal of Environmental Management*, 54(1), 39-57.
- Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A. (2009). DRASTIC ve Analitik Hiyerarşi Süreci Yöntemlerinin Entegrasyonu ile Akifer Duyarlılık Haritalarının Hazırlanması: Senirkent-Uluborlu Havzası (Isparta) Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 48-59.
- Sener, E., Davraz, A., (2013) Assessment of Groundwater Vulnerability Based on a Modified DRASTIC Model, GIS and an Analytic Hierarchy Process (AHP) Method: the Case of Egirdir Lake Basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, 21(3), 701-714.
- Şentürk, K., Sümengen, M., Terlemez, İ., Karaköse, C. (1998). 1/100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Bandırma D4 paftası, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü, Ankara. <http://www.tuik.gov.tr> (21.05.2017).
- Umut, M. (1988) 1/100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Kırklareli-C4, Kırklareli –C5 paftaları, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü, Ankara.
- Van Stempvoort D., Ewert L., Wassenaar L. (1993). Aquifer Vulnerability Index (AVI): a GIS Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18:25–37.

Vias J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I., Jimenez, P. (2006). Proposed Method for Groundwater Vulnerability Mapping in Carbonate (Karstic) Aquifers: the COP Method. Application in Two Pilot Sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 14:912–925.

Wang, J., He, J., Chen, H. (2012). Assessment of Groundwater Contamination Risk Using Hazard

Quantification, a Modified DRASTIC Model and Groundwater Value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, 432, 216-226.

Yıldırım, Ü., Güler, C. (2016). Identification of Suitable Future Municipal Solid Waste Disposal Sites for the Metropolitan Mersin (SE Turkey) Using AHP and GIS Techniques. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 1-16.