

SINTACS yöntemi ile karstik ortamlarda yeraltısuyu duyarlılığının belirlenmesi: Altınova akiferi örneği

Determination of groundwater vulnerability in karstic environments by using SINTACS method: Altınova aquifer case study

Aysenur AMİL^{1*}, Ahmet ÇİL², Pınar AVCI³, Ayşe MUHAMMETOĞLU⁴, Naciye Nur ÖZYURT⁵

^{1,3,5}Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
aysenura25@gmail.com, pavci@hacettepe.edu.tr, nozyurt@hacettepe.edu.tr

^{2,4}Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.
ahmetcil07@gmail.com, aysemuh@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.11.2018
Kabul Tarihi/Accepted: 26.02.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.02.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.14265
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Antropojenik etkiler ile yeraltısularının kirlenmesi dünya genelinde yaygın bir problemdir. Tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlarda bilinçsiz kullanılan tarım ilaçları ve gübreler potansiyel kirletici olarak karşımıza çıkmaktadır. Kirliliğin önlenmesi, sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi açısından önemli hedeflerden biridir. Kirleticilerin yeraltısuyundaki bulunurlukları ve bollukları topoğrafik, jeolojik, hidrojeolojik, hidrolojik ve pedolojik çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin kirletici taşınımı üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği duyarlılık yöntemleri ile yeraltısuyunun kirlenmeye karşı alansal duyarlılığı belirlenebilmektedir. Duyarlılık haritalama yaklaşımlarında arazi kullanımı genellikle değerlendirilmemektedir. Oysa beslenme süreçlerini etkilediğinden arazi kullanımı yeraltısuyu duyarlılık haritalamasında önemli bir değişken olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada Antalya Traverten Platosu'nda yer alan Altınova akiferinde SINTACS yöntemi ile yeraltısuyu duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Çalışma alanı karstik traverten ve dar bir alanda konglomera akiferlerinin yüzeylendiği yataya yakın bir bölgedir. Çalışma alanının %23'ünde yaygın olarak örtü altı yetiştiricilik yapılmakta ve sulama suyu yeraltısuyundan karşılanmaktadır. SINTACS hesaplamalarında etkin süzülme ve toprak sönümleme parametreleri değerlendirilirken örtü altı tarım alanları dikkate alınmıştır. Vadoz zon sönümleme kapasitesi ve akifer ortamı parametreleri açısından 2 farklı derecelendirme değeri için hesaplama yapılmış ve SINTACS-I ve SINTACS-II duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında değerlendirmeye eklenen arazi kullanımı ile duyarlılık haritalarında aynı jeolojik birim içinde farklı duyarlılık sınıfları tanımlanmıştır. Oluşturulan SINTACS-I ve SINTACS-II haritalarına göre yüksek ve çok yüksek duyarlılık alanlar sırası ile %85 ve %96 olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında varlığı ortaya koyulan geniş alanlara yayılan yeraltısuyunun yüksek-çok yüksek kirlenme olasılığı tarım kökenli kirleticilerin kullanımının kontrol altına alınmasını gerektirmektedir. Duyarlılık haritaları temel alınarak arazi kullanımı planlamaları yapılmalı ve kimyasal gübre ve ilaç kullanımını sınırlayan iyi tarım uygulamaları hızla uygulamaya alınmalıdır.

Anahtar kelimeler: Duyarlılık haritası, Karst akiferi, SINTACS yöntemi.

Abstract

Groundwater pollution by anthropogenic impacts is a common problem throughout the world. Unconscious use of agrochemicals like pesticides and fertilizers particularly in areas where agricultural production is concentrated, results as potential pollutants. Prevention of pollution is one of the most important targets for sustainable groundwater management. Presence and abundance of contaminants in groundwater depends on a large number of topographical, geological, hydrogeological, hydrological and pedological parameters. The effects of these parameters on pollutant transport are evaluated, the spatial distribution of groundwater to pollution can be determined by using vulnerability methods. Land use, which is not generally evaluated in vulnerability mapping approaches, appears to be an important variable in groundwater vulnerability mapping. In this study, groundwater vulnerability maps are prepared by SINTACS method for Altınova aquifer which is located in Antalya Travertine Plateau. The study area is almost flat and covered by karstic travertine and the narrow conglomerate aquifer. 23% of the study area is widely covered by green houses and irrigation water is supplied from groundwater. In the SINTACS calculations, effective infiltration and unsaturated zone attenuation capacity parameters are taken into consideration. SINTACS-I and SINTACS-II vulnerability maps are calculated for 2 different grading values for the parameters of the effective infiltration and unsaturated zone attenuation. Relevant to the scope of the study, in vulnerability maps which added to the land use evaluation different vulnerability classes are defined within the same geological unit. According to the SINTACS-I and SINTACS-II maps, high and very high vulnerable areas are determined as 85% and 96%, respectively. The possibility of high-very high contamination of groundwater which is exposed to large areas of existence in the study area, requires the control of the use of agricultural origin pollutants. Land use planning should be made on the basis of vulnerability maps and good agricultural practices that limit the use of chemical fertilizers and pesticides should be implemented rapidly.

Keywords: Vulnerability map, Karst aquifer, SINTACS method.

1 Giriş

Altınova akiferi Dünyadaki en büyük tatlı su travertenli olan Antalya Traverten Platosu (ATP) içinde yer almaktadır. ATP sahip olduğu yüksek gözeneklilik ve iletim kabiliyeti ile Antalya

şehri için içme-kullanma suyu ve plato üzerindeki tarım alanları için sulama suyu sağlayan verimli bir karst akiferidir. Bölge için kritik öneme sahip bu tatlı su kaynağı sürekli yaygınlaşan kent yaşamı ve tarım uygulamalarında kullanılan kimyasal ilaç ve gübreler nedeni ile kirlilik tehdidi altındadır.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Altınova akiferinde yeraltısuyuna dayalı tarımın sürdürülebilirliği için noktasal koruma alanlarının dışında, akiferin kirliliği karşı duyarlılığının belirlenmesi önemlidir. Bu çalışmanın amacı, yeraltısuyuna bağımlı örtü altı tarım yapılan Antalya Traverten Plato'su'nda yer alan Altınova akiferinde yeraltısuyu duyarlılık haritasının oluşturulmasıdır.

Duyarlılık haritalama yaklaşımları, yeraltısuyu beslenimini ve akımını temsil edecek parametrelerin kirletici taşınımındaki rolünü belirleyecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak, yöntemler yeraltısuyunun doymun ve doymun olmayan zonda kirleticilerin taşınımı sırasında gerçekleşen reaksiyonları dikkate almamaktadır. Bu nedenle oluşturulan duyarlılık haritalarının kirlilik riski açısından olası en kötü senaryoyu temsil ettiği düşünülebilir. Öte yandan alansal olarak kirliliğe duyarlılık öngörülürken akım-taşınım parametrelerinin genelleştirilerek hesaplamaya katılması noktasal olarak gerçekleşen olası hızlı akım koşullarının (örn. karst akiferleri) ya da çok yavaş akım koşullarında (örn. akitard) kirletici derişimini düşüren yerel jeolojik ortamların varlığını göz ardı etmektedir. Bu nedenle, duyarlılık haritaları oluşturulduktan sonra akiferin farklı noktalarındaki gözlenmiş kirlilik yükleri ile karşılaştırılması, hatta bazı durumlarda duyarlılık modellerinin bu gözlemler kullanılarak kalibre edilmesi gereklidir. Duyarlılık haritalarının çözünürlüğü belirlenirken, akifer hakkındaki verilerin yoğun olduğu, ya da öngörülme istenen duyarlılık alanlarına göre seçim yapılmalıdır.

Farklı akifer türleri ve akım koşullarını temsil edecek şekilde farklı araştırmacılar tarafından duyarlılık haritalama yaklaşımları geliştirilmiştir [1]-[6]. Geliştirilen yöntemler genellikle kullandıkları parametrelerin baş harflerinden oluşan adlarla (örneğin DRASTIC [1], SINTACS [2],[3], COP[4], EPIK [5], ve PI [6]) tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, Altınova akiferi için uluslararası geçerliliği kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılan SINTACS yöntemi [2],[3] uygulanmıştır.

SINTACS yöntemi Khemiri et al. [7] ve Busico et al. [8] tarafından da farklı akifer sistemlerinde yeraltısuyu duyarlılık değerlendirmesinde kullanılmıştır. Khemiri et al. [7] Foussana akiferinde kimyasal gübre kullanımı, aşırı çekim ve evsel kullanım gibi faktörlerden dolayı kirlilik riski altındaki yeraltısuyunu yüksek duyarlılık olarak belirlemişlerdir. Busico et al. [8] antropojenik faaliyetin yoğun olduğu Campanian Ovası'nda SINTACS yöntemi ile yeraltısuyu duyarlılık haritası oluşturmuş ve haritanın doğrulamasını yerinde ölçülen nitrat (NO_3^-) ve sülfat (SO_4^{2-}) derişimleri ile yapmışlardır.

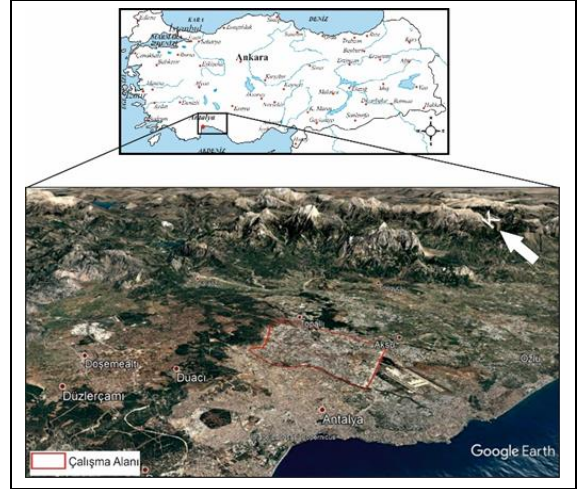
Altınova akiferine SINTACS yönteminin uygulanmasında yöntemce önerilen sınıf aralıkları ve parametre ağırlıkları korunmuştur. Ancak, yöntem parametrelerinin tanımlanmasında çalışma alanına ait jeolojik/hidrojeolojik özellikleri temsil edecek düzenlemeler yapılmıştır. Bu yönde yapılan en belirgin düzenleme, yeraltısuyu beslenimi açısından arazi kullanımının (örtü altı tarım yapılan alanlar) değerlendirmeye alınmış olmasıdır. Bu makalede; ayrıntıları Amil'de [9] verilen Altınova akiferi duyarlılık değerlendirmesinin sonuçları sunulmuştur. Altınova akiferi yeraltısuyu kirlilik risk değerlendirmesi ise Çil [10] tarafından yapılmıştır.

2 Çalışma alanı

2.1 Coğrafi konum

Türkiye'nin güneybatısında yer alan Antalya ili, güneyinde Akdeniz ve kuzeyinde denize paralel Toros dağları ile çevrilidir.

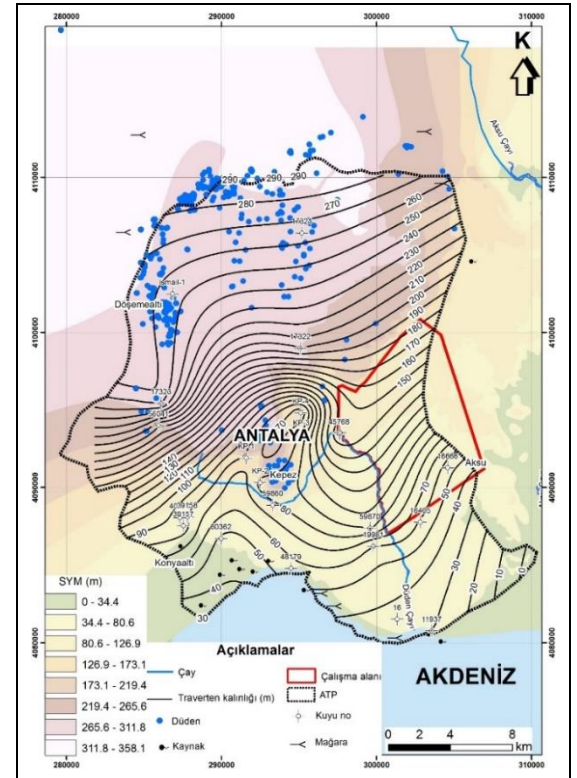
Çalışmanın yapıldığı Altınova bölgesi ise, Antalya il merkezinin doğusunda yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı konum haritası.

Figure 1. Location map of study area.

Kuzeyde yükseklikleri 2500-3000 m'yi aşan Toroslar dağları, batıda Teke yöresinde geniş platolar ve havzalar yer almaktadır. ATP; doğuda Aksu vadisi, batıda Boğaçay ve Beydağları, güneyde Akdeniz ve kuzeyde Toros Dağları ile çevrili olup yaklaşık 630 km²'lik alana yayılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. ATP karst yapıları ve traverten kalınlık haritası.

Figure 2. Karst features and travertine thickness map of ATP.

ATP 3 basamak halinde oluşmuştur. Döşemealtı ovası olarak adlandırılan üst plato ile kent merkezi ve yerleşim alanlarını üzerinde bulunduran Varsak veya Düden ovası olarak da adlandırılan alt plato karada görülmektedir. Döşemealtı platosu (üst plato) 250-300 m kotları arasında iken, alt plato

40-150 m yüksekliğindedir [11]. Travertenlerin yayılımı 40 m'lik bir falezle Akdeniz'de sona ererken [12], üçüncü bir platonun deniz seviyesi altında sahil çizgisinin 2.5-3 km güneyinde devam ettiği ve 150 m'lik bir düşümle sona erdiği yapılan jeofizik ölçümleri ile belirlenmiştir [13]. Travertenden oluşan ATP'nda; travertenin çözünmesi ile mağara, düden, kaynak gibi farklı karst morfolojisi yapıları oluşmuştur (Şekil 2). Çalışma alanını oluşturan Altınova bölgesi ise alt platoda yer almakta olup, yükseltisi 42.8-154.2 m arasında değişmektedir. Çalışma alanının kuzey sınırı üst plato, batı sınırı Düden çayı, doğu sınırı Aksu çayı vadisi ve güney sınırı ise havaalanı bölgesi sınırından oluşmaktadır. ATP içinde bu bölge yoğun tarımsal faaliyet nedeni ile çalışma alanı olarak seçilmiştir.

2.2 Arazi kullanımı

ATP'de arazi kullanımının belirlenmesi için Corine 2006 [14] arazi sınıflandırma haritalarından yararlanılmıştır. ATP için oluşturulan arazi kullanım haritası 4 ana gruba ayrılmış olup bunlar; şehir yapıları, tarım alanları, doğal alanlar (orman, mera) ve su yapılarıdır. Corine 2006 [14] arazi sınıflandırmasına göre tarım alanları sürekli sulanan alanlar (sera), meyve bahçeleri, sulanmayan alanlar gibi alt başlıklara ayrılmıştır. 2006 yılı arazi kullanımı verilerine göre ATP ağırlıklı olarak tarım alanları ve doğal alanlardan oluşmaktadır. Çalışma alanı ise Corine 2006 [14] arazi sınıflandırmasına göre tarım alanından oluşmakta olup 2006 yılı verilerine göre sera alanları ayrıca tanımlanmamıştır. Bu durum çalışma alanında örtü altı tarım uygulamasının bu dönemden sonra yaygınlaştığını göstermektedir.

Altınova, 1981 yılına ait hava fotoğraflarında makilerle kaplı kayalık bir bölge iken, 1983-1986 yılları arasında değişmeye başlayıp 2005 yılından itibaren, tarım alanlarının, örtü altı tarım alanına (sera) dönüşmesi, yerleşimin artması, endüstri ve sanayinin gelişmesi ile belirgin bir değişim göstermiştir [15].

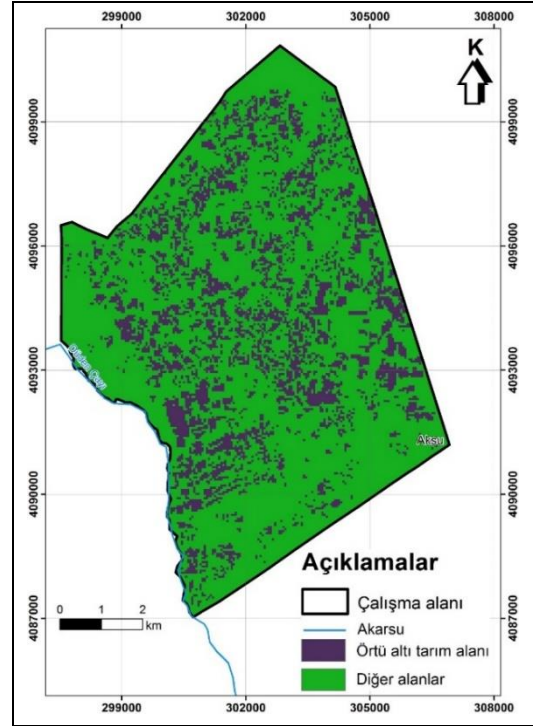
Çalışma alanında Google Earth görüntüsü üzerinden sayısallaştırma yoluyla örtü altı tarım alanları (sera) belirlenmiştir. Toplam çalışma alanı yaklaşık 72.8 km² iken, bu alan içerisinde örtü altı tarım alanı 17.4 km²'lik alan kaplamaktadır (Şekil 3). Çalışma alanında bulunan seralarda sebze-meyve ve kesme çiçek yetiştirilmekte olup, bitkilerin ihtiyaç duyduğu sulama suyu yeraltısuyundan karşılanmaktadır. Örtü altı tarım alanlarında üretim yıl boyunca devam ettiğinden, yeraltısuyu kullanımı da süreklilik göstermektedir. Seralarda sulama suyu fazlasını toplayan drenaj sistemi bulunmamaktadır. Çalışma alanında sera alanlarına düşen yağış traverten akiferin sahip olduğu yüksek süzülme özelliğinden dolayı sera çevresinden yeraltına süzülmemektedir.

2.3 Jeoloji

Çalışma alanının jeolojik özellikleri Şenel'den [16] yararlanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanında üç jeolojik birim yüzeylemektedir. Bunlar; Kurşunlu Formasyonu (Plk), Belkis Konglomerası (Qb) Antalya travertenidir (Qa) (Şekil 4).

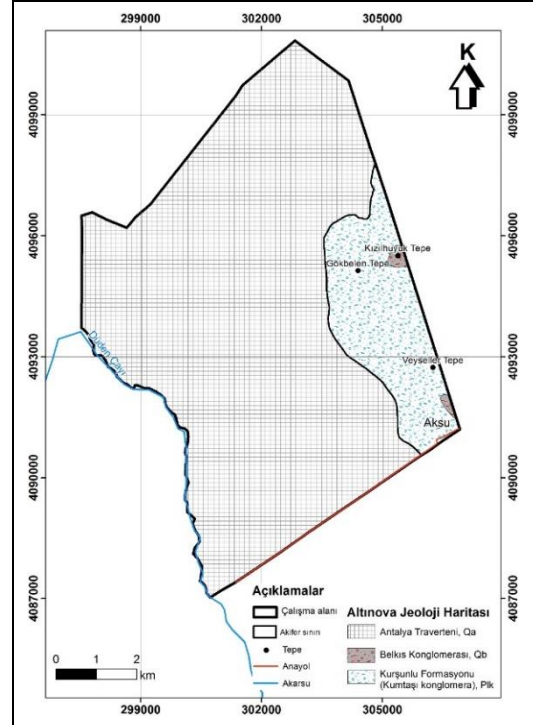
Çalışma alanının doğusunda ve yaklaşık %14.9'luk bir kısmını kapsayan Kurşunlu Formasyonu, konglomera, kumtaşı ve çamurtaşlarından oluşur. İnce-orta katmanlı, kızıl, kızıl-kahve, gri ve yeşil renkte konglomeralardan oluşan birim alttan Yenimahalle Formasyonu ile uyumlu, üstten Antalya traverteni tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür. Üst Pliyosen yaşlı olan Kurşunlu Formasyonu yaklaşık 150 m kalınlığındadır [16] ve

içerisindeki konglomera seviyeleri akifer özelliği göstermektedir.



Şekil 3. Çalışma alanında örtü altı tarım yapılan alanlar.

Figure 3. Greenhouse covered areas of study area.



Şekil 4. Çalışma alanı jeoloji haritası.

Figure 4. Geological map of the study area.

Çalışma alanının yaklaşık %0.4'ünü kapsayan Belkis Konglomerası, polijenik konglomeralardan oluşmaktadır. Genelde küresel, iyi yuvarlak çakıllı, belirsiz ve çapraz tabakalanmalı, kum ve çakıl destekli olan birimin kalınlığı 0 ile

20 m arasında değişmektedir. Belkıs Konglomasının çökelim yaşı Pleyistosen olarak öngörülmektedir [16].

Çalışma alanının yaklaşık %84.7'sini kaplayan Antalya travertenleri, masif veya kalın tabakalı, kahve renkli, yer yer ince-orta katmanlı, sık erime boşluklu, sık ya da süngerimsi dokudadır [16]. Yer yer 200 m kalınlığa ulaşan travertenin, alt platoda kalınlığı 40-150 m'dir. Antalya travertenleri ofiyolitik melanj karakterindeki Antalya naplarının ve Pliyosen yaşlı Kurşunlu Formasyonunun üzerine uyumsuz olarak gelmektedir [17]. Travertenleri oluşturan kaynak boşalım debilerine göre traverten [16], oluşum yerine göre kalın katmanlı masif travertenler, traverten havuzunda çökelmiş ince kırıntılı akmataşı şeklindeki travertenler, traverten havuzunun kenarında sarkıt-dikit yapılarında gözlenen travertenler ve kalsit çamuru olarak farklı özelliklere sahiptir [17]. ATP traverten kalınlığı haritası (Şekil 2) DSİ [11] ve Özüz'te [13] ayrıntıları sunulan kuyulara ait litoloji loglarından itibaren topo to raster enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur [9].

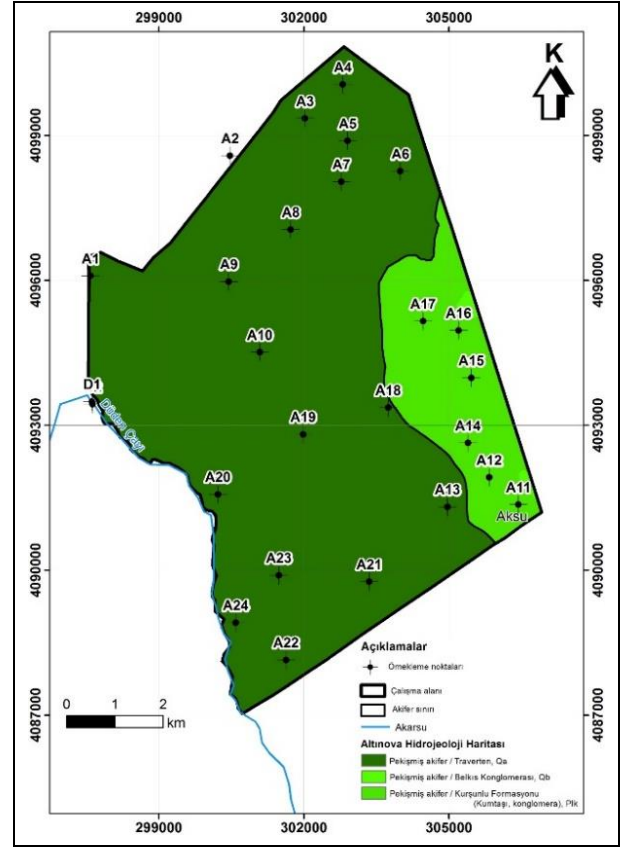
2.4 Hidroloji

Altınova bölgesinde yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı olan tipik Akdeniz iklimi görülmektedir [15]. Çalışma alanının yağış ve sıcaklık gibi iklim özelliklerini belirlemek için alana yakın konumda bulunan Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) Antalya Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu'nun (OMGI) 1970-2015 yıllarına ait sıcaklık ve yağış verilerinden yararlanılmıştır. Çalışma alanı için ortalama yağış değeri hesaplanırken 2008 yılına ait yağış verisinde eksiklik olduğundan ihmal edilmiştir. Buna göre; ortalama sıcaklık 18.5 °C, yıllık ortalama yağış 1106.1 mm ve Turc Yöntemi [18] ile hesaplanan yıllık gerçek buharlaşma-terleme miktarı 771.2 mm'dir. Çalışma alanı içinde yüzeysel akış gösteren herhangi bir akarsu bulunmayıp, alanın güneybatı sınırında Düden çayı ve doğu sınırında Aksu çayı bulunmaktadır. Traverten platosunun doğusundan geçen Aksu çayının travertenin hidrolojik bütçesine bir etkisi bulunmamaktadır [13].

Çalışma alanında bulunan Düdenbaşı kaynağı ise traverten taban topografyasının yükseldiği 89 m kotundan boşalmaktadır. Antalya ilinin 9 km doğusunda bulunan kaynak Düden şelalesinin tabanında bulunmakta olup debisi ortalama 10 m³/s'dir [17]. Çalışma alanında bulunan ve işletme amacıyla açılmış olan Düdenbaşı şelalesi içindeki 45768 No.lu kuyu (Şekil 5, kuyu kodu;D1) traverten içinde açılmış olup, 150 m derinliktedir. Ayrıca, ekonominin tarıma dayalı olduğu Altınova bölgesinde çok sayıda şahıs kuyusu (Şekil 5, kuyu Kodu; A) bulunmaktadır. Bu kuyulardan alanı temsil edecek şekilde seçilen 24 tanesinde 2015 yılı Kasım ayı ve 2016 yılı Şubat, Mayıs ve Eylül aylarında yeraltı suyu kotu ölçülmüştür. Buna göre, çalışma alanında yeraltı suyu kotu yıl içinde, birkaç metre düzeyinde salınım gerçekleştirmektedir.

2.5 Hidrojeoloji

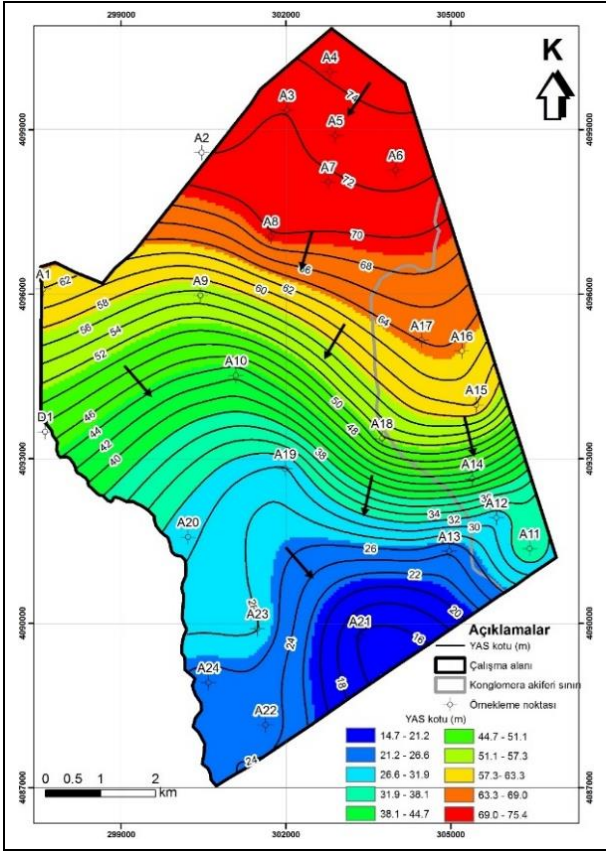
Çalışma alanında yüzeylenen jeolojik birimlerin tamamı akifer özelliğine olup, hidrojeolojik özelliklerine göre iki farklı akifer tanımlaması yapılmıştır. Bunlar, Antalya travertenini (Qa) temsil eden traverten akiferi ve Kurşunlu formasyonu (Plk) ile Belkıs konglomasını (Qb) temsil eden konglomera akiferidir (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışma alanı hidrojeoloji haritası.

Figure 5. Hydrogeological map of the study area.

ATP'yi oluşturan traverten oluşum ortamına göre litolojisi yanal ve düşey yönde farklılık göstereceğinden ATP'de açılmış kuyuların hidrojeolojik özellikleri farklı olabilmektedir. Karstlaşmanın oldukça yaygın olduğu traverten akiferi hidrojeoloji haritasında (Şekil 5) gözenekliliği dikkate alınarak koyu yeşil renkte boyanmıştır. ATP'yi oluşturan traverten hipojenik karstlaşma sonucu oluşmuş Kırkgöz Karst Sisteminin çökelim ürünüdür [19]. Traverten, karbonatça zengin yeraltı suyundan itibaren çökelim sonucu oluştuğundan oluşumu sırasında birincil gözenekliliğin geliştiği bir jeolojik malzemedir. Oluşumu sonrasında ise çözünme sonucunda karstlaşma dolayısıyla ikincil gözeneklilik oluşmaktadır. Çalışma kapsamında traverten akiferinin hidrolik iletkenlik değeri (k) literatür verisine dayanarak 864 mm/gün (10⁻⁵ m/s) olarak kabul edilmiştir [18]. Çalışmada travertenin taban kotunun deniz seviyesinin 40 m altına indiği belirlenmiştir [21]. Traverten akiferinden alınan farklı örneklerde gözeneklilik değeri %2-22 arasında hesaplanmıştır [22]. DSİ tarafından açılan işletme kuyularının tamamı traverten akiferi içinde olduğundan çalışma kapsamında konglomera akiferi olarak adlandırılan akiferin hidrojeolojik özellikleri ile ilgili literatür verisine ulaşılamamıştır. Konglomera akiferi pekişmiş yapıda olduğundan gözeneklilik ve hidrolik iletkenlikleri dikkate alınarak hidrojeoloji haritasında açık yeşil renkte gösterilmiştir (Şekil 5). Çalışma kapsamında konglomera akiferinin hidrolik iletkenlik değeri (k) literatür verisine dayanarak 86.4 mm/gün (10⁻⁶ m/s), etkin gözenekliliği ise (n_e) %20 olarak kabul edilmiştir [20]. Altınova akiferinde yeraltı suyu kotu dağılımının belirlenmesi için 2015 yılı Kasım ayına ait yeraltı suyu kotu değerleri kullanılarak yeraltı suyu kotu haritası topo to raster enterpolasyon yöntemi ile oluşturulmuştur (Şekil 6).



Şekil 6. Altınova akiferi yeraltısuyu kotu haritası(2015-Kasım).

Figure 6. Groundwater head distribution map of Altınova aquifer (November 2015)

Akiferde yeraltısuyu kotu 14-75 m arasında değişmektedir. Çalışma alanının batı sınırını oluşturan Düdençay'ındaki su kotu yaklaşık 70 m iken D1 kuyusundaki yeraltısı kotununun 45 m olması, traverten akiferinden çaya yeraltısuyu akışı olmadığını göstermektedir. Ovada yeraltısuyu akım yönü çalışma alanının doğu sınırında kuzeydoğudan güneybatıya doğru ve batı sınırında ise kuzeybatıdan Akdeniz'e doğrudur. Altınova akiferinin jeolojik, hidrolojik ve hidrojeolojik verilerinin derlenmesiyle oluşturulan genelleştirilmiş hidrojeolojik kesiti Şekil 7'de sunulmuştur.

3 SINTACS yöntemi

SINTACS yöntemi, İtalyan hidrojeologlar tarafından İtalya ve çevresinde farklı ortamlarda uygulanabilmesi amacı ile DRASTIC yönteminin [1] farklı hidrojeolojik ortamlar (karstik, çatlaklı sızıntılı vb.) ve farklı kirleticiler için farklı ağırlık katsayıları ile uyarlanmış halidir [2]. SINTACS yönteminde duyarlılık üzerinde etkili yedi parametre tanımlanmış ve her parametre büyüklüklerine göre sınıflandırılmıştır [3]. Sınıflar için tanımlanmış dereceler (r) ile her bir parametre için belirlenmiş ağırlık katsayısının (w) çarpımı sonucunda noktasal duyarlılık indeksi hesaplanır. SINTACS indekslerinin hesaplaması eşitlik 1'de verilmiştir [3]. Duyarlılık indekslerinden oluşturulan harita ise SINTACS duyarlılık haritası olarak adlandırılmaktadır.

$$(I_{SINTACS}) = S_r \cdot S_w + I_r \cdot I_w + N_r \cdot N_w + T_r \cdot T_w + A_r \cdot A_w + C_r \cdot C_w + S_r \cdot S_w \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

$I_{SINTACS}$: SINTACS İndeksi,

S_r : Yeraltısuyu derinliği için derecelendirme değeri,

S_w : Yeraltısuyu derinliği için ağırlık katsayısı,

I_r : Etkin süzülme için derecelendirme değeri,

I_w : Etkin süzülme için ağırlık katsayısı,

N_r : Vadoz zonun sönümleme kapasitesi için derecelendirme değeri,

N_w : Vadoz zonun sönümleme kapasitesi için ağırlık katsayısı,

T_r : Toprak sönümleme kapasitesi için derecelendirme değeri,

T_w : Toprak sönümleme kapasitesi için ağırlık katsayısı,

A_r : Akifer ortamı için derecelendirme değeri,

A_w : Akifer ortamı için ağırlık katsayısı,

C_r : Hidrolik iletkenlik katsayısı için derecelendirme değeri,

C_w : Hidrolik iletkenlik değeri için ağırlık katsayısı,

S_r : Eğim için derecelendirme değeri,

S_w : Eğim için ağırlık katsayısı olarak verilmiştir.

SINTACS yönteminde farklı ağırlıklar ile tanımlanan farklı hidrojeolojik ortamlar ve kirleticiler için belirlenen ağırlık katsayıları [3] Tablo 1'de toplu olarak verilmiştir. Altınova akiferi için SINTACS yönteminin "Karstik" hidrojeolojik ortam tanımlaması ve bu tanımlama ile ilişkili ağırlıklar kullanılmıştır.

Tablo 1. SINTACS yöntemi için hidrojeolojik koşullar ve ağırlık katsayıları [3].

Table 1. Hydrogeological conditions and weight coefficients for SINTACS method [3].

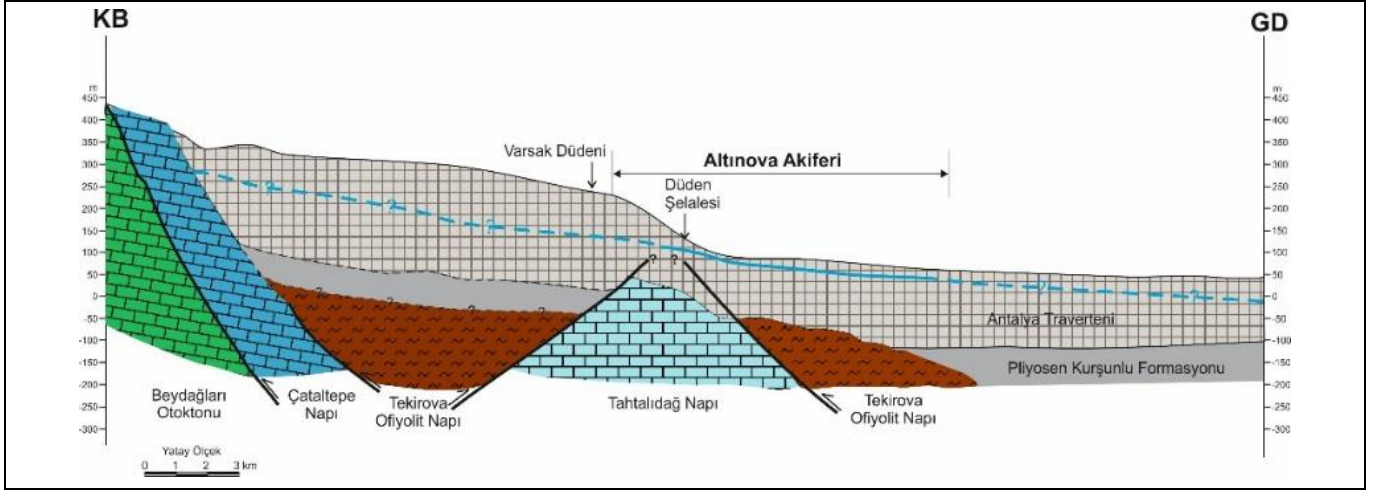
Parametre	Normal	Yoğun kirletici	Sızıntılı	Karstik	Çatlaklı	Nitrat
S	5	5	4	2	3	5
I	4	5	4	5	3	5
N	5	4	4	1	3	4
T	3	5	2	3	4	5
A	3	3	5	5	4	2
C	3	2	5	5	5	2
S	3	2	2	5	4	3

SINTACS yöntemi duyarlılık haritası, ArcGIS yazılımı kullanılarak 50*50 m çözünürlükte raster olarak üretilmiş, yöntemin ihtiyaç duyduğu verilerin tamamı (yeraltısuyu derinliği, alansal yağış, eğim vb.) CBS ortamına aktarılmıştır. Alansal olarak ifade edilebilen veriler (örn. jeolojik birimler, alansal yağış, arazi kullanımı vb.) poligonlar ile tanımlanmış ve haritalanmıştır. Noktasal veriler (yeraltısuyu seviyesi) "topo to raster" topoğrafya enterpolasyon yöntemi ile alansal olarak dağıtılmıştır.

3.1 Yeraltısuyu derinliği (S)

Yeraltısuyu derinliği, kirleticinin su tablasına ulaşmadan önce düşey yönde hareket ettiği akifer kalınlığını, diğer bir deyişle vadoz zon kalınlığını temsil eder. SINTACS yönteminde 10 farklı yeraltısuyu derinliği sınıfı için derecelendirme değeri tanımlanmıştır [3] (Tablo 2). Artan yeraltısuyu derinliğine bağlı olarak derecelendirme değeri azalmaktadır. Benzer şekilde, yeraltısuyu tablasının yüzeyden derinliği arttıkça vadoz zondaki taşınım sırasında kirletici zamana ve mekana bağlı olarak bozunmaya uğrayabileceğinden, suya derinlik arttıkça kirletici etkisi ve kirlenme potansiyeli azalmaktadır.

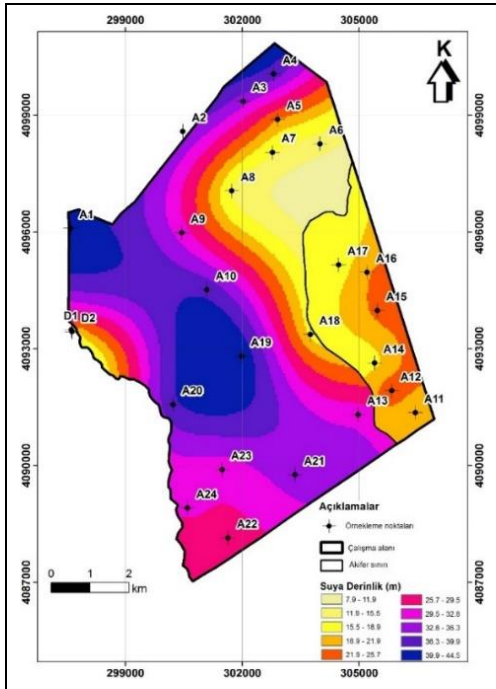
SINTACS yönteminde yeraltısuyu derinliği (S) parametresi belirlenirken 2015 yılı Kasım ayında yapılan yeraltısuyu seviye ölçümleri kullanılarak alansal dağılım yapılmıştır. Bu dönem kurak dönem YAS kotu koşullarını temsil etmesi nedeniyle seçilmiştir. Dağılım haritası Şekil 8'de, derecelendirme haritası ise Şekil 9'da sunulmuştur.



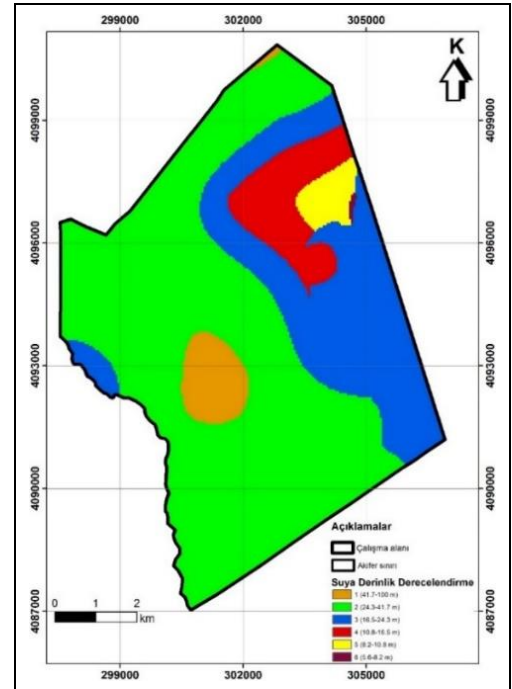
Şekil 7: Altınova akiferinin genelleştirilmiş hidrojeolojik kesiti.
Figure 7. Generalized hydrogeological section of Altınova aquifer.

Tablo 2: Yeraltısuyu derinliği ve derecelendirme değeri [3].
Table 2. Depth to groundwater and scores [3].

Yeraltısuyu derinlik sınıfları (m)	Derecelendirme
0-1.3	10
1.3-2.6	9
2.6-3.9	8
3.9-5.6	7
5.6-8.2	6
8.2-10.8	5
10.8-16.5	4
16.5-24.3	3
24.3-41.7	2
41.7-100	1



Şekil 8. Yeraltısuyu derinlik dağılım haritası (2015-Kasım).
Figure 8. Depth to groundwater distribution map (November 2015)



Şekil 9. Yeraltısuyu derinlik (S) derecelendirme haritası.
Figure 9. Depth to groundwater (S) score map.

3.2 Etkin süzülme (I)

Etkin süzülme, DRASTIC yöntemindeki [1] net beslenme (mm/yıl) parametresinin bu yöntemdeki karşılığıdır. SINTACS yönteminde sınıf aralıkları ve sınıf sayısı artırılarak daha yüksek beslenme koşullarının duyarlılık üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. SINTACS yöntemi için net beslenme sınıfları ve derecelendirme değerleri [3] Tablo 3'te verilmiştir. Süzülme arttıkça kirliliğe duyarlılık bir noktaya kadar artarken çok yüksek (>350 mm/yıl) süzülme değerleri için kirleticinin seyreleceği öngörülerek yöntemin derecelendirme değerlerine bu olası etki yansıtılmıştır.

Tablo 3: Etkin süzülme ve derecelendirme değeri [3].

Table 3. Effective infiltration and scores [3].

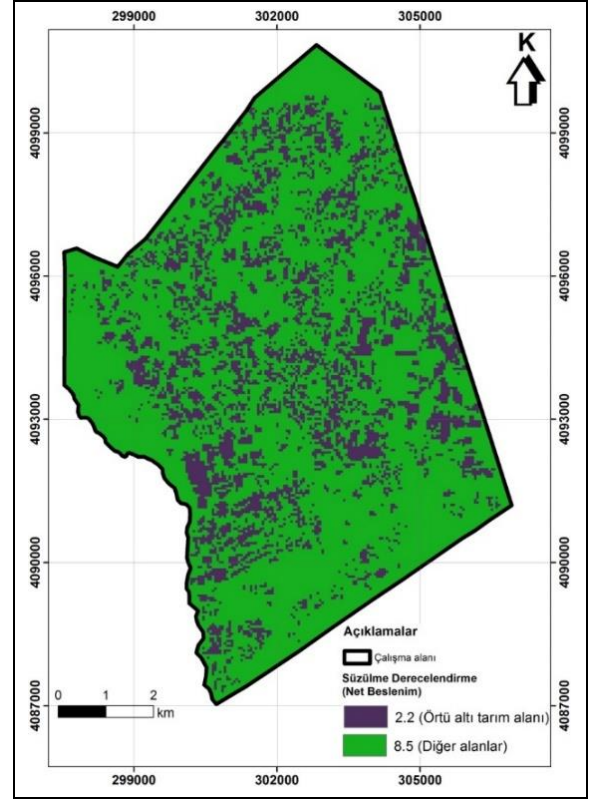
Etkin süzülme sınıfları (mm/yıl)	Derecelendirme
0-50	1-2.2
50-100	2.2-4.5
100-150	4.5-6.6
150-200	6.6-8.1
200-250	8.1-9.2
250-300	9.2
300-350	9.2-8
350-400	8-6
400-450	6-4.8
>450	4.8-4.5

Çalışma alanında örtü altı tarım alanları dışındaki alanlar için net beslenimin yüzeyel akış gerçekleşmediği için etkin süzülme eşit olduğu kabul edilmiştir. Yağış gözlemlerinden gerçek buharlaşma-terleme değeri çıkarılarak alan için net beslenme hesaplanmıştır. Etkin süzülme/Net beslenme hesabı için 1970-2015 yılları arasındaki yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Turc yöntemi [18] ile hesaplanan uzun yıllar ortalama buharlaşma-terleme değeri 771.2 mm, yıllık ortalama yağış ise 1106.1 mm'dir. Altınova akiferinde 1970-2015 yılları verilerine göre ortalama net beslenme ortalama yağış ve buharlaşma-terleme farkından 334.9 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanının %24'ü örtü altı tarım alanı ile kaplı olup, bu alanlarda etkin süzülme sulama suyu fazlası ile gerçekleşmektedir. Altınova akiferinde, örtü altı tarım yapılan alanlarda ağırlıklı olarak sebze ve kesme çiçek yetiştiriciliği yapılmaktadır. DSİ verilerine göre bitki sulama suyu ihtiyacı sebze için 282 mm, çiçek için 235 mm'dir. Çalışma alanında, bu türlerin alansal dağılımı net olarak bilinmediğinden, seraların yarısında sebze, geri kalanında ise kesme çiçek üretildiği kabul edilmiştir. Ortalama sulama suyu ihtiyacı olan 258.5 mm'nin sulama verimi %80 olarak kabul edildiğinde, seralarda sulama suyu fazlası 50 mm/yıl olarak belirlenmiştir. SINTACS yönteminde önerilen değerlere göre derecelendirme değeri örtü altı tarım alanında etkin süzülme >50 mm/yıl olduğu için 2.2; diğer alanlarda etkin süzülme 334.9 mm/yıl olduğu için 8.5 olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Şekil 10'da çalışma alanı için ön görülen değerlerle oluşturulan etkin süzülme derecelendirme haritası gösterilmektedir.

3.3 Vadoz zonun sönümlenme kapasitesi (N)

Vadoz zon, kirleticilerin yeraltısuyuna ulaşmasında "ikinci savunma (koruma) hattı" olarak nitelendirilir. Vadoz zonun sönümlenme kapasitesi jeolojik birimin hidrojeolojik özelliklerine (mineral içeriği, tane boyu, karst gelişimi, kırık-çatlak gelişimi) bağlıdır [3]. Tablo 4'te vadoz zonun litolojik tanımlanmasına göre vadoz zonun sönümlenme kapasitesi sınıfları ve derecelendirme değeri gösterilmektedir.

SINTACS yönteminde N parametresi belirlenirken çalışma alanının jeolojik yapısı göz önünde bulundurularak, Tablo 4'te verilen derecelendirme değerleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, aralık olarak verilen derecelendirme değerlerinin alt ve üst sınırları kullanılarak çalışma alanı için en düşük ve en yüksek derecelendirme değerleri, ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 10: Etkin süzülme (I) derecelendirme haritası.

Figure 10. Effective infiltration (I) score map.

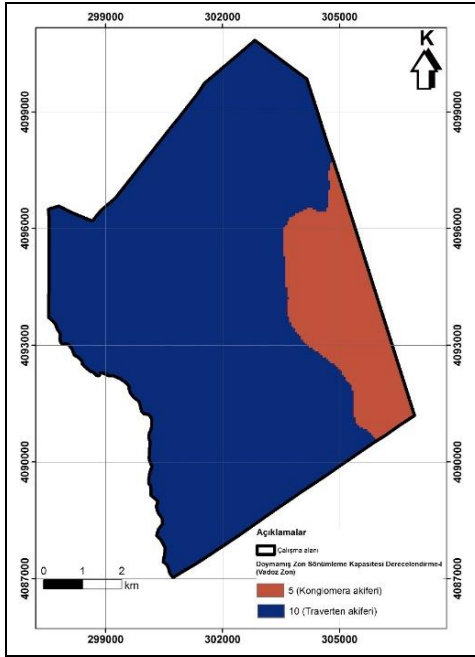
Tablo 4: Vadoz zonun sönümlenme kapasitesi derecelendirme değeri [3].

Table 4. Unsaturated zone attenuation capacity scores [3].

Litolojik tanımlamaya göre vadoz zon	Derecelendirme
Çatlaklı Metamorfik Kayaç	2-6
Volkanik Kayaçlar	2-5
Kil, Silt, Turf	1-2
Orta taneli Moren	2-4
İri taneli Moren	4-6
Marn, Kiltası	1-2
Çatlaklı Volkanik Kayaç	5-10
Türbiditik istif	2-5
Çatlaklı Plütonik Kayaç	3-5
Kumtaşı, Konglomera	5-8
Karışık Kum	4-7
Orta taneli alüvyon	3-6
Çatlaklı Dolomit	2-5
Kırıklı Kireçtaşı	4-9
Karstik Kireçtaşı	8-10
İri taneli Alüvyon	6-9

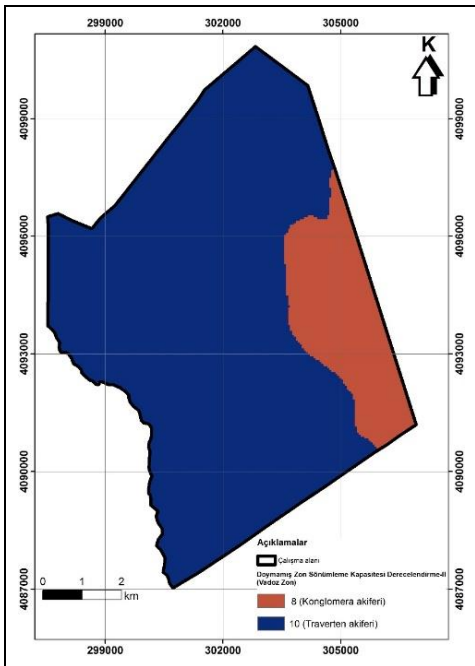
Her iki hesaplamada da yoğun karstlaşmanın geliştiği bilinen traverten akiferi için derecelendirme değeri 10 olarak kullanılmıştır. Ancak, konglomera akiferi için alt ve üst derecelendirme değerleri kullanılarak I. ve II. Duruma göre hesaplamalar yapılmıştır. Konglomera akiferi için en düşük derecelendirme değeri olan 5'in kullanıldığı hesaplama I. Durum için derecelendirme haritasında (Şekil 11)

sunulmuştur. Konglomera akiferi için en yüksek derecelendirme değeri olan 8'in kullanıldığı hesaplama ise II. Durum için derecelendirme haritasında verilmiştir (Şekil 12).



Şekil 11. I. Durum için oluşturulan vadoz zon sönümleme kapasitesi derecelendirme haritası.

Figure 11. Unsaturated zone attenuation capacity score map for Case I.



Şekil 12. II. Durum için oluşturulan vadoz zon sönümleme kapasitesi derecelendirme haritası.

Figure 12. Unsaturated zone attenuation capacity score map for Case II.

3.4 Toprak Sönümleme Kapasitesi (T)

Toprak, vadoz zonunun üst bölümünde yer alan organik maddece zengin jeolojik birimin bozunma ürünüdür. Beslenimi

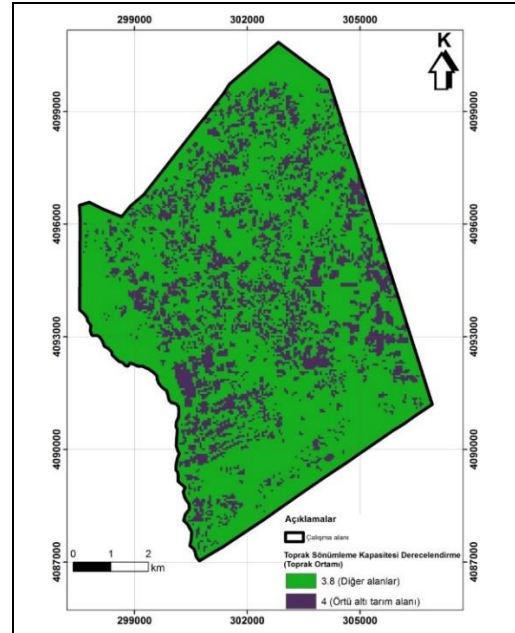
oluşturan yağış ve kirletici ilk önce toprak tabakası ile temas etmektedir. Toprak bünyesinde gerçekleşen fiziksel, kimyasal ve biyolojik faaliyetlerden dolayı yeraltı suyu duyarlılığında kirleticilerin karşılaştığı "birinci savunma hattı"dır [3]. Tablo 5'te toprak sönümleme kapasitesi ve derecelendirme değeri toprak türü tanımlamasına göre gösterilmiştir.

Tablo 5. Toprak sönümleme kapasitesi ve derecelendirme değeri [3].

Table 5. Soil/overburden attenuation capacity and scores [3].

Toprak türü tanımlamasına göre toprak sönümleme kapasitesi sınıfları	Derecelendirme
Kil, Çamur, Siltli Kil	1-2
Killi Tın	2-3
Siltli, Killi Tın	3-4
Siltli Tın	3.5-4.2
Tın	4-5
Kumlu, Killi Tın	4.5-5.2
Kumlu Tın	5.6-6
Kumlu Kil	6.2-7
Turbo	7.4-8.2
Kumlu	8-8.4
Temiz Kum	8.8-9.5
Temiz Çakıl	9.6-10
İnce veya Yok	9.8-10

Çalışma alanında toprak türü parametresi derecelendirme değerleri belirlenirken örtü altı tarım alanları ve diğer alanlar ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Yöntemin önerdiği toprak türü tanımlamalarına göre (Tablo 5) örtü altı tarım yapılan alanlar "siltli killi tın" tanımlamasına karşılık gelen 4 derecelendirme değeri, diğer alanlar ise "siltli-tın" tanımlamasına karşılık gelen 3.8 derecelendirme değeri ile haritalanmıştır (Şekil 13).



Şekil 13. Toprak sönümleme kapasitesi derecelendirme haritası.

Figure 13. Soil/overburden attenuation capacity score map.

3.5 Akifer Ortamı (A)

Akifer, yeraltı suyu depolayan ve yeraltı suyu işletmesi için yeterli miktarda suyu iletebilen jeolojik malzeme ya da birimdir [23]. Jeolojik birimlerin gözeneklilikleri akiferlerin su depolayabilme kabiliyetini tanımlar. Birincil gözeneklilik,

kayacın oluşumu ya da jeolojik malzemenin depolanması sırasında oluşan boşluk hacmini tanımlarken; ikincil gözeneklilik kayaç oluşumu sonrasında gerçekleşen kırık-çatlak ve çözünme boşlukları sonucunda oluşur. Gözenekliliği yüksek jeolojik malzemelerin yeraltı suyu iletimlilikleri akiferin verimini, dolayısıyla su ve kirlenici taşıma kabiliyetini tanımlamaktadır. Yüksek gözeneklilik ve iletimliliğe sahip akiferler kirlenmeye karşı daha hassastır. Tablo 6'da litolojik tanımlamaya göre akifer ortamı sınıfları ve derecelendirme değeri [3] sunulmuştur.

Tablo 6. Akifer ortamı ve derecelendirme değeri [3].

Table 6. Hydrogeological characteristics of aquifer and scores [3].

Litolojik tanımlamaya göre akifer ortamı	Derecelendirme
Çatlaklı Metamorfik Kayaç	2-5
Volkanik Kayaçlar	4-8
Kil, Silt, Turf	1-3
Orta taneli Moren	4-6
İri taneli Moren	6-8
Marn, Kiltası	1-3
Çatlaklı Volkanik Kayaç	8-10
Türbiditik istif	5-8
Çatlaklı Plütonik Kayaç	2-4
Kumtaşı, Konglomera	4-9
Karışık Kum	7-9
Orta taneli alüvyon	6-8
Çatlaklı Dolomit	4-7
Kırıklı Kireçtaşı	6-9
Karstik Kireçtaşı	9-10
İri taneli Alüvyon	8-9

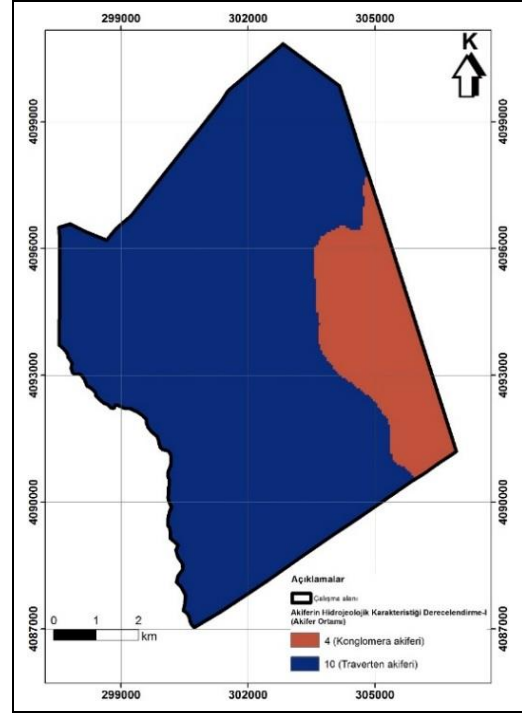
Bu çalışmada, aralık olarak verilen derecelendirme değerlerinin alt ve üst sınırları kullanılarak çalışma alanı için en düşük ve en yüksek derecelendirme değerleri için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır. Her iki hesaplamada da yoğun karstlaşmanın geliştiği bilenen traverten akiferi için derecelendirme değeri 10 olarak kullanılmıştır. Ancak, konglomera akiferi için alt ve üst derecelendirme değerleri kullanılarak I. ve II. Duruma göre hesaplamalar yapılmıştır. Bu alt ve üst derecelendirme değerleri için oluşturulan haritalar SINTACS-I ve SINTACS-II olarak adlandırılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Konglomera akiferi için en düşük derecelendirme değeri olan 4'ün kullanıldığı I. Durum için derecelendirme haritası Şekil 14'te sunulmuştur. Konglomera akiferi için en yüksek derecelendirme değeri olan 9'un kullanıldığı II. Durum için derecelendirme haritası ise Şekil 15'te verilmiştir.

3.6 Hidrolik iletkenlik (C)

Hidrolik iletkenlik, akiferin akifer ortamının özelliklerine bağlı olarak yeraltı suyunu iletebilme kabiliyeti olup, genellikle L/T boyutunda tanımlanır. Hidrolik iletkenliğin yüksek olduğu akiferlerde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmediği kabul edildiğinde kirlenme potansiyeli de artacaktır. Tablo 7'de hidrolik iletkenlik sınıfları ve derecelendirme değeri [3] gösterilmektedir.

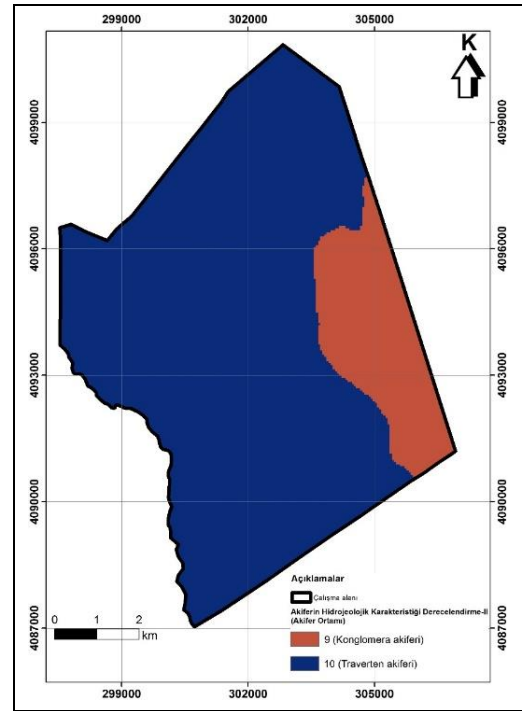
Çalışma alanında jeolojik birimler için hidrolik iletkenlik değeri literatürden alınmıştır. Traverten akiferinin hidrolik iletkenliği DSİ tarafından [3] 864 mm/gün (10^{-5} m/s) olarak belirlenmiştir. Konglomera akiferi ise, iyi boylanmış kum-çakıl olarak tanımlanıp, Fetter'e [18] göre 86.4 mm/gün (10^{-6} m/s) olarak kabul edilmiştir. Çalışma alanında hidrolik iletkenlik değeri traverten için 10^{-5} m/s, konglomera için 10^{-6} m/s olarak tanımlanarak, Tablo 7'den sırasıyla 5 ve 3 derecelendirme

değerleri seçilmiştir. Oluşturulan derecelendirme haritası Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 14. I. Durum için oluşturulan akifer ortamı derecelendirme haritası.

Figure 14. Hydrogeological characteristics of aquifer score map for Case I.



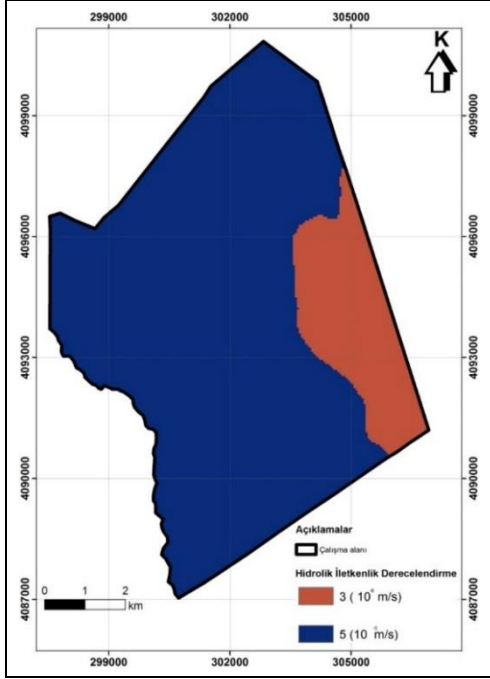
Şekil 15. II. Durum için oluşturulan akifer ortamı derecelendirme haritası.

Figure 15. Hydrogeological characteristics of aquifer score map for Case II.

Tablo 7. Hidrolik iletkenlik ve derecelendirme değeri [3].

Tablo 7. Hydraulic conductivity and scores [3].

Hidrolik İletkenlik (m/s)	Derecelendirme
10^{-10} - 10^{-9}	1
10^{-9} - 10^{-8}	1-1.2
10^{-8} - 10^{-7}	1.2-2
10^{-7} - 10^{-6}	2-3
10^{-6} - 10^{-5}	3-5
10^{-5} - 10^{-4}	5-7
10^{-4} - 10^{-3}	7-8.9
10^{-3} - 10^{-2}	8.9-9.9
10^{-2} - 10^{-1}	9.9-10



Şekil 16. Hidrolik iletkenlik derecelendirme haritası.

Figure 16. Hydraulic conductivity score map.

3.7 Eğim (S)

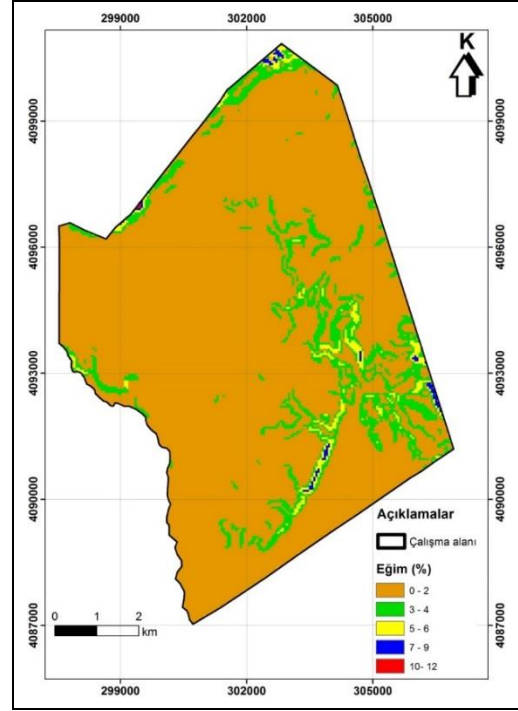
Eğim, çalışma alanındaki topoğrafik kot farklılıklarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Eğimi yüksek yüzeylerde yüzeysel akış hızla gerçekleşeceğinden yeraltına süzülme azalmaktadır. Eğimin düşük olduğu alanlarda, yüzeysel akış çok yavaş gerçekleşeceğinden, uygun akifer ortamlarının varlığı durumunda, yeraltına süzülme artacaktır. Yüzeysel kirlenmelerin yeraltına taşınımı düşük eğimli bölgelerde daha hızlı gerçekleşmektedir. Yöntemce [3] tanımlanan eğim sınıfları ve derecelendirme değeri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Eğim sınıfları ve derecelendirme değeri [3].

Tablo 8. Slope classes and scores [3].

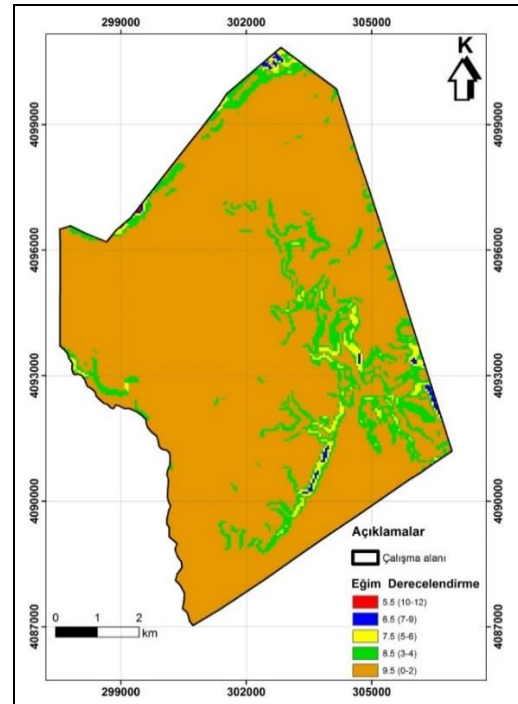
Eğim sınıfları (%)	Derecelendirme
0-2	9.5
3-4	8.5
5-6	7.5
7-9	6.5
10-12	5.5
13-15	4.5
16-18	3.5
19-21	2.5
22-25	1.5
26-30	1

Çalışma alanı için; Sayısal Yükseklik Modelinden (Şekil 2), ArcGIS programının eğim modülü kullanılarak 50*50 m çözünürlüklü eğim haritası üretilmiştir (Şekil 17). Çalışma alanında topografik eğim genel olarak oldukça düşüktür (<%3), ancak çalışma alanı sınırlarını oluşturan akarsu yatağı altı ve traverten üst plato sınırında eğim yer yer %9'a çıkmaktadır. Çalışma alanı için önerilen eğim sınıflarına karşılık gelen derecelendirme (Tablo 8) haritası Şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 17. Eğim haritası.

Figure 17. Slope map.



Şekil 18. Eğim derecelendirme haritası.

Figure 18. Slope score map.

4 SINTACS yöntemi yeraltı suyu duyarlılık haritası

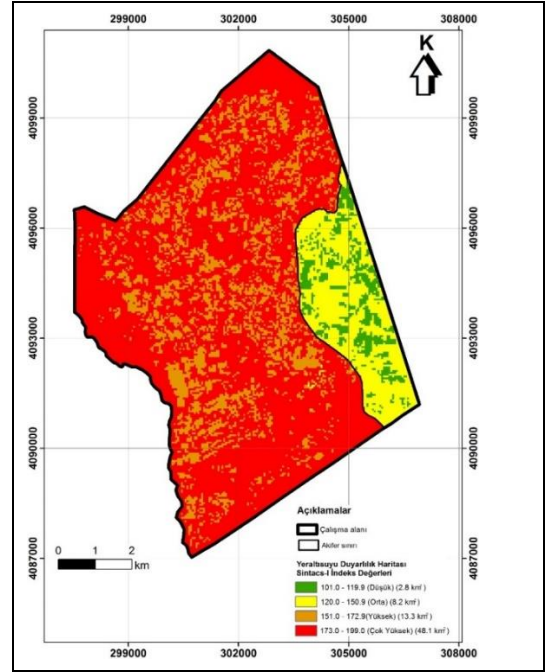
SINTACS yönteminin tüm parametreleri için belirlenen derecelendirme haritalarının ilgili ağırlık katsayıları ile çarpımı ve toplamlarından oluşan indeks (Eşitlik 1) haritası ArcGIS programında "raster calculator" hesaplama modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplama kullanılan tüm parametrelerin dereceleri ve ağırlık katsayıları Tablo 9'da toplu olarak verilmiştir.

Tablo 9. SINTACS yöntemi uygulamasında kullanılan tüm parametre dereceleri ve ağırlık katsayıları.

Table 9. List of parameters, used scores and weight for SINTACS method application.

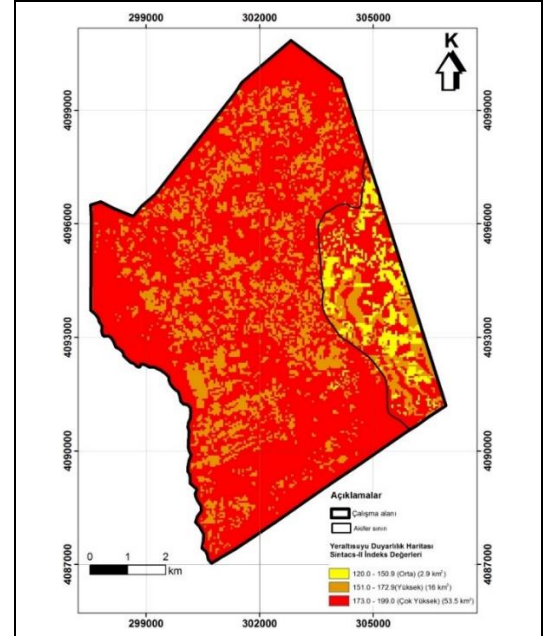
Parametre	Açıklama/Değer	Derecelendirme SINTACS-I	Derecelendirme SINTACS-II	Ağırlık Katsayısı
Yeraltı suyu Derinliği (S)	5.6-8.2	6	6	2
	8.2-10.8	5	5	
	10.8-16.5	4	4	
	16.5-24.3	3	3	
	24.3-41.7	2	2	
	41.7-100	1	1	
Etkin Süzülme (I)	Örtü altı tarım alanı <50	2.2	2.2	5
	Diğer alanlar 300-350	8.5	8.5	
Vadoz zonun sönümleme kapasitesi (N)	Konglomera akiferi	5	8	1
	Traverten akiferi	10	10	
Toprak sönümleme kapasitesi (T)	Diğer alanlar	3.8	3.8	3
	Örtü altı tarım alanı	4	4	
Akifer ortamı (A)	Konglomera akiferi	4	9	5
	Traverten akiferi	10	10	
Hidrolik iletkenlik (C)	Konglomera akiferi	3	3	5
	Traverten akiferi	4	4	
Eğim (S)	0-2	9.5	9.5	5
	3-4	8.5	8.5	
	5-6	7.5	7.5	
	7-9	6.5	6.5	
	10-12	5.5	5.5	

Farklı derecelendirme değerleri kullanılarak oluşturulan 2 farklı duruma ait SINTACS duyarlılık haritaları Şekil 19 ve Şekil 20'de sunulmuştur. Oluşturulan duyarlılık haritalarına göre çalışma alanı düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlılık olarak belirlenmiştir. Düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlılık alanların tüm çalışma alanı içindeki büyüklükleri I. ve II. Durum için sırası ile %4, %11, %18 ve %67 ve %0, %4, %22 ve %74 olarak belirlenmiştir. SINTACS yönteminin I. ve II. Durumları için sırası ile çalışma alanının %85 ve %96'sı yeraltı suyu kirliliği açısından yüksek-çok yüksek duyarlılığa sahiptir. Örtü altı tarım yapılan alanlar etkin süzülmenin daha az gerçekleşmesi sonucunda düşük-orta duyarlılık olarak belirlenmiştir.



Şekil 19. SINTACS-I yeraltı suyu duyarlılık haritası (Kasım 2015).

Figure 19. SINTACS-I groundwater vulnerability map (November 2015)



Şekil 20. SINTACS-II yeraltı suyu duyarlılık haritası (Kasım 2015).

Figure 20. SINTACS-II groundwater vulnerability map (November 2015)

5 Sonuçlar ve öneriler

SINTACS yönteminde [3] duyarlılık indeks değerleri için sınıf tanımlaması yapılmadığından alan için hesaplanan 101-199 indeks değerleri 4 sınıfa ayrılmıştır. Bu nedenle çalışmada belirlenen sınıflar ve bu sınıfları oluşturan indeks değerleri bu çalışmaya özgüdür. Oluşturulan duyarlılık haritalarına (Şekil

19 ve Şekil 20) göre çalışma alanı düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlılıkları olarak belirlenmiştir. Düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlılıkları alanların tüm çalışma alanı içindeki büyüklükleri I. ve II. Durum için sırası ile %4, %11, %18 ve %67 ve %0, %4, %22 ve %74 olarak belirlenmiştir. SINTACS yöntemine I. ve II. Durumları için sırası ile göre çalışma alanının % 85 ve % 96'sı 'ü yeraltısuyu kirliliği açısından yüksek-çok yüksek duyarlılığa sahiptir. Örtü altı tarım yapılan alanlar etkin süzülmenin daha az gerçekleşmesi sonucunda düşük-orta duyarlılıkları olarak belirlenmiştir. SINTACS yönteminin yüksek değer aralığına kullanıldığı SINTACS-II haritasında düşük duyarlılık sınıfı tanımlanamamıştır.

Tablo 10'da yöntemin duyarlılık sınıflarının alanları verilmiştir. Toplam çalışma alanı 72.8 km² olup SINTACS yönteminden I. ve II. Durumlar için sırasıyla 61.4 ve 69.5 km²'lik alanlar yüksek-çok yüksek duyarlılıkları olarak tanımlanmıştır.

Tablo 10. Yeraltısuyu duyarlılık sınıflarına karşılık tanımlanan alanlar.

Table 10. Areal extends of groundwater vulnerability classes.

Yöntem	Duyarlılık sınıfı (alan, km ²)			
	Düşük	Orta	Yüksek	Çok Yüksek
SINTACS-I	2.8	8.2	13.3	48.1
SINTACS-II	-	2.9	16.0	53.5

Duyarlılık haritalama yaklaşımlarının uygulanmasında farklı parametreler kullanılmakta ya da aynı parametreler farklı bir ağırlık katsayısı ile sonuca etki etmektedir. Dolayısıyla duyarlılık haritalama yaklaşımları tasarımları nedeni ile farklı duyarlılık bölgelerinin tanımlanmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada arazi kullanımını dikkate alan yöntem parametre modifikasyonu (tarım alanı-örtü altı tarım alanı) uygulanmıştır. Bu modifikasyon; çalışmaya arazi kullanımı nedeniyle farklılaşan net beslenim/etkin süzülme, toprak türü (arazi kullanımı) parametrelerinin tanımlanmasıyla eklenmiştir. Yapılan bu modifikasyon ile kirlenici kaynağı olarak tanımlanan kimyasal besin ve gübrelerle örtü altı tarım alanlarından yeraltısuyuna ulaşacak kirlenici derişiminin azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca örtü altı tarım alanlarına düşen yağış kirlenici yükü taşımadan çalışma alanının geri kalanından yeraltısına sızmaktadır.

Bu çalışmada yöntemine ait sadece 2 parametrenin farklı olarak kullanılmasının duyarlılık tanımlamalarını ve kapsadığı alanları %10 oranında değiştirebildiği gösterilmiştir. Yapılan değerlendirme, SINTACS yönteminin parametre derecelendirmelerine ne denli hassas olduğunu ortaya koymuştur. Yöntemin su kaynaklarının korunması açısından kullanıldığı durumlarda ise yönetim politikalarını etkileyecek farklılıklar oluşacaktır. Bu nedenle parametrelerin sınıf tanımlamalarının doğru yapılması oldukça önem taşımaktadır.

DRASTIC yönteminin karst akiferleri için özelleştirilmiş versiyonu olan SINTACS yönteminin Altınova akiferinin yeraltısuyu duyarlılığının belirlenmesinde kullanılabilecek bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

Yöntemler geliştirildikleri akifer ortamlarını temsil ettiklerinden, yöntemlerin modifiye edilmeden kullanılması hatalı değerlendirmelere neden olabilmektedir. Hangi yöntemin çalışılan akifer için temsil edici olduğunun belirlenebilmesinin tek yolu gözlenen kirlilik göstergeleri ile yapılan doğrulamadır. Doğrulama için, noktasal olarak gözlenen kirlenicilerden çok akiferin tümünde gözlenen

ve/veya derişimleri yeraltısuyu akım yolu boyunca anlamlı (genellikle artan) olarak değişen kirlilik göstergeleri kullanılmalıdır.

Su kaynakları için yönetim aracı olarak kullanılabilecek bu yaklaşımın traverten akiferini temsil eden akım/taşınım özellikleri için modifiye edilerek ATP akiferi için kullanılabilmesi mümkündür. Yeraltısuyu kalite gözlemlerinin sürekli yapılmaya başlanmış olması ile birlikte oluşturulacak akifere özel duyarlılık yaklaşımlarının kalibrasyon ve doğrulamalarının da yerinde yapılan kirlilik gözlemleri ile kontrol edilmesi mümkün olacaktır.

6 Conclusions and suggestions

There is no class definition for vulnerability index values in the SINTACS method [3], 101-199 index values calculated for the study area are divided into 4 classes. Therefore, the classes determined and index values formed these classes are specific for this study. According to the created vulnerability maps (Figure 19 and Figure 20), the study area was determined as low, medium, high and very high vulnerable. The extends of low, medium, high and very high vulnerable areas within the entire study area for Case I and II, it was determined as 4%, 11%, 18% and 67% and 0%, 4%, 22% and 74%, respectively. According to SINTACS method, 85% and 96% of the study area, respectively, have high-very high sensitivity in terms of groundwater pollution for Case I and II. Greenhouse covered areas have been determined as low-medium sensitive as a result of lower effective infiltration. In the SINTACS-II map, where the high value range of the SINTACS method is used, the low vulnerable class could not be defined.

The areal extends of vulnerability classes of the method are given in Table 10. The total study area is 72.8 km², and the areas of 61.4 and 69.5 km², respectively, are defined as high-very high sensitivity for Case I and II.

Table 10. Areal extends of groundwater vulnerability classes.

Method	Vulnerability classes (area, km ²)			
	Low	Medium	High	Very High
SINTACS-I	2.8	8.2	13.3	48.1
SINTACS-II	-	2.9	16.0	53.5

Different parameters are used in the application of vulnerability mapping approaches, or same parameters affect the result with a different weight coefficient. Therefore, vulnerability mapping approaches cause different vulnerable regions definition due to their design.

In this study, land use parameter modification (agricultural area-greenhouse covered area) has been applied. This modification; Net recharge / effective infiltration, which differs due to land use, was added to the study by defining soil type (land use) parameters. With this modification, it is thought that the concentration of contaminants that will reach the groundwater from greenhouse covered areas as chemical nutrients and fertilizers which are defined as the source of pollutants are decreased. In addition, the precipitation on the greenhouse has percolating underground from the rest of the working area without carrying the pollutant load.

In this study, it was shown that using only 2 parameters of the method differently can change the vulnerability definitions and covered areas by 10%. The evaluation revealed how sensitive the SINTACS method is to parameter scores. In cases where the method is used for water resources protection, there will be

differences that will affect the management policies. For this reason, it is very important to make the correct class definitions of the parameters.

SINTACS method, which is the customized version of DRASTIC method for karst aquifers, is thought to could be used to determine the groundwater vulnerability of the Altınova aquifer.

Since these methods represent the aquifer environments in which they were developed, the use of the methods without modification may cause wrong evaluations. The only way to determine representative method for study area is through verification with observed pollution indicators. For verification, rather than pointwise observed pollutants, pollution indicators that are observed in all aquifers and/or pollutant concentrations change significantly (usually increased) along the groundwater flow path should be used.

This approach could use as a tool for water resources management which will be modified by travertine aquifer flow / transport properties that represent the ATP aquifer. With starting continuous groundwater quality observations, the calibration and verification of the special vulnerability approaches of the aquifer will also be possible to checked with in-situ pollution observations.

7 Teşekkür

Bu çalışmaya Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje no: FHD-2015-8936 ve FYL-2018-17095) ve TÜBİTAK tarafından (Proje No: 114Y696) finansal destek sağlanmıştır. Yazarlar katkılarından dolayı DSİ Antalya XIII. Bölge Müdürlüğü Yeraltı Suları ve Jeoteknik Hizmetler Şube Müdürlüğü çalışanlarına ve Altınova sera sahiplerine teşekkürlerini sunarlar.

8 Kaynaklar

- [1] Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty RJ, Hackett G. "DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings". United States Environmental Protection Agency EPA, Ohio, USA, EPA-600/2-87-035, 1987.
- [2] Polemio M, Casarano D, Limoni PP. "Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy)". *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9, 1461-1470, 2009.
- [3] Civita MV. "The Combined approach when assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination". *Journal of Water Resource and Protection*, 2(1), 14-28, 2010.
- [4] Vias JM, Andreo B, Perles MJ, Carrasco F, Vadillo I, Jimenez P. *Preliminar proposal of a method for vulnerability mapping in carbonate aquifers*. Editors: Carrasco F, Duran JJ, Andreo B. Karst and Environment, 75-83, Malaga, Spain, Fundacion Cueva de Nerja, 2002.
- [5] Doerfliger N, Jeannin PY, Zwahlen F. "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, 1999.
- [6] Goldscheider N, Klute, Sturm S, Hötzl H. "The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers". *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 46(3), 157-166, 2000.
- [7] Khemiri S, Khnissi A, Alaya MB, Saidi S, Zargouni F. "Using GIS for the comparison of intrinsic parametric methods assessment of groundwater vulnerability to pollution in scenarios of semi arid climate. The case of Foussana groundwater in the central of Tunisia". *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 835-845, 2013.
- [8] Busico G, Kazakis N, Colombani, Mastrociccio M, Voudouris K, Tedesco D. "A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk assessment in highly anthropized regions based on NO₃⁻ and SO₄²⁻ concentrations". *Science of the Total Environment* 609, 1512-1523, 2017.
- [9] Amil A. Altınova Akiferinin (Antalya) Kirliliğe Duyarlılığının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [10] Çil A. Tarımsal Karstik Bölgeler için Yeraltı Suyu Kirlilik Riski Değerlendirmesi: Antalya-Altınova Bölgesi Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2017.
- [11] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ "Antalya-Kırkgöz Kaynakları ve Traverten Platosu Karst Hidrojeolojik Etüt Raporu". Antalya, Türkiye, 305, 1985.
- [12] Başal A. Antalya Traverten Platosu Toprak Zonunun Hidrojeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1999.
- [13] Özüş AS. Antalya Traverten Platosunun Jeolojik, Hidrojeolojik, Hidrojeolojik ve Hidrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 1992.
- [14] European Environment Agency. "Corine Land Cover 2006 Raster Data". <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-raster> (11.10.2018).
- [15] Sönmez NK, Sarı M, Ersoy E. "Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak sürdürülebilir arazi yöntemi ve toprak koruma planının oluşturulması: Antalya-Altınova örneği". *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), 11-22, 2007.
- [16] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). "1/100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi No:11 Isparta N-25 Paftası". Ankara, Türkiye, 21, 1997.
- [17] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ "Antalya Kırkgözlere Projesi (Antalya Kenti Su Kaynakları Koruma Alanları) Ön İnceleme Raporu". Antalya, Türkiye, 46, 2005.
- [18] Turc L. "Le bilan d'eau des sols; relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement". *Annales Agronomiques*, 5, 491-569, 1954.
- [19] Bayari CS, Özyurt NN, Klimchouck A, Törk K, Nazik L. "Evidence of hypogenic karst development in the Taurus Mountain Range, Turkey". *Deep Karst 2016*, Calsbad-New Mexico, 11-14 April 2016.
- [20] Fetter CW. *Applied Hydrogeology*. 4th ed. New Jersey, USA, Pearson, 2001.
- [21] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ. "Batı Antalya Bölgesi Hidrojeolojik Etüt Raporu". Antalya, Türkiye, 24, 2006.
- [22] Akçal AN. Antalya İli Travertenlerinin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2011.
- [23] Freeze RA, Cherry JA. *Groundwater*, 1st Ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1979.