

**KARADUVAR (MERSİN) AKİFERİNİN YERALTI  
SUYU MODELLEMESİ VE PETROL KİRLİLİĞİNİN  
TEMİZLENMESİNE YÖNELİK GEÇİRGEN  
REAKTİF BARIYER YERİ SEÇİMİ**

**CAN AKBULUT**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MERSİN  
EYLÜL – 2009**

**KARADUVAR (MERSİN) AKİFERİNİN YERALTI  
SUYU MODELLEMESİ VE PETROL KİRLİLİĞİNİN  
TEMİZLENMESİNE YÖNELİK GEÇİRGEN  
REAKTİF BARIYER YERİ SEÇİMİ**

**CAN AKBULUT**

**Mersin Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Jeoloji Mühendisliği  
Ana Bilim Dalı**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. CÜNEYT GÜLER**

**MERSİN  
Eylül - 2009**

Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Cüneyt GÜLER

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Zübeyde HATİPOĞLU BAĞCI

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Çetin KANTAR

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun 21 / 01 / 2010 tarih ve 2010-02 / 42 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mahir TURHAN  
Enstitü Müdürü



Not: Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

## ÖZ

Bu çalışmada, Mersin iline bağlı Akdeniz Belediyesi sınırları içindeki Karaduvar kıyı akiferinin yeraltı su seviyesi, hidrolik iletkenliği, yeraltı suyu akış yönü ve hidrolik eğimi saptanmış, yeraltı sularında çeşitli fiziksel parametrelere ait (pH, ÇO, Eh, sıcaklık ve iletkenlik) değerler ölçülmüş ve yeraltı suyuna karıştığı bilinen çeşitli kirlenmelerin (petrol türevleri) konsantrasyonları ve yayılımları belirlenmiş ve bunların temizlenmesine yönelik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bölgede, içme-kullanma, tarımsal sulama ve sanayi için ihtiyaç duyulan suyun tamamına yakını, delta ortamı karakterindeki Karaduvar kıyı akiferinde açılan çeşitli derinliklerdeki kuyulardan sağlanmaktadır. Eylül 2008’de bölgedeki mevcut kuyulardan seçilen toplam 212 kuyuda yerinde (in-situ) fiziksel parametre ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca alınan numunelerde yeraltı suyuna karıştığı bilinen çeşitli petrol türevlerinin (BTEX) cinslerinin ve konsantrasyonlarının tespiti için GC-MS yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımına aktarılarak çeşitli parametrelere ait dağılım haritaları oluşturulmuş ve yorumlamalara gidilmiştir.

Karaduvar kıyı akiferinde Ekim 2006 döneminde yapılan arazi çalışmaları kapsamında mevcut kuyularda su seviye ölçümleri yapılmıştır. Kıyı akiferinin bulunduğu alanlarda hidrolik eğim değerleri 0,0151 ile 0,0021 arasında değişmektedir. Karaduvar kıyı akiferinin doygun hidrolik iletkenlik ( $K_{fs}$ ) değerleri ise  $1,39 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  ve  $8,30 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  arasında değişim göstermektedir. Bunların yanı sıra, bölgedeki yeraltı suyu akımı, MODFLOW matematiksel modeli aracılığıyla benzeştirilmiştir. Bu model kullanılarak, bölgedeki yeraltı suyu kirliliğinin temizlenmesi için “Huni ve Kapı Tipi” bir geçirgen reaktif bariyer tasarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** MODFLOW, yeraltı suyu, petrol kirliliği, geçirgen reaktif bariyer, Karaduvar.

## ABSTRACT

In this study, various hydrogeologic properties of the Karaduvar coastal aquifer (located in the Akdeniz municipality of Mersin) is characterized by in-situ measurements which include ground water levels, hydraulic conductivities, ground water flow directions, hydraulic head gradients and ground water physicochemical parameters (pH, DO, Eh, temperature and electrical conductance). Additionally, concentrations and spatial distributions of various contaminants (petroleum hydrocarbons) that are known to occur in ground water were determined and modeling studies were performed in order to remediate the existing contamination.

In the region, nearly all water demand for drinking, agricultural and industrial purposes is obtained through the water wells drilled on the various depths of the Karaduvar coastal aquifer which is deltaic in character. In September 2008, in a total of 212 ground water wells selected from the existing wells in the region, in-situ measurements of ground water physicochemical parameters were performed. Additionally, collected ground water samples were analyzed by GC-MS method to determine the types and concentrations of various petroleum hydrocarbon derivatives (e.g. BTEX) that are known to occur in the region. The results obtained in this study were visualized using a Geographic Information System (GIS) software and several thematic maps were prepared showing the spatial distribution of various parameters.

In the field study that was conducted on October 2006, ground water level measurements were also made in the existing wells. In the coastal aquifer, observed hydraulic head gradients range between 0.0151 and 0.0021. According to the results obtained from in-situ measurements, saturated hydraulic conductivity ( $K_{fs}$ ) values of the Karaduvar coastal aquifer vary between  $1.39 \times 10^{-4}$  and  $8.30 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ . Besides of field studies, a mathematical ground water flow model of the aquifer was made using the MODFLOW software. Based on the simulation results obtained from MODFLOW model, a "Funnel and Gate Type" permeable reactive barrier design was proposed for remediation of the existing petroleum hydrocarbon pollution.

**Keywords:** MODFLOW, ground water, petroleum pollution, permeable reactive barrier, Karaduvar.

## TEŞEKKÜR

Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmanın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, değerli öneri ve eleştirileriyle beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Cüneyt GÜLER'e,

Çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Zübeyde HATIPOĞLU BAĞCI'ya,

Yardımlarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. Musa ALPASLAN'a,

Arazi çalışmaları ve tez yazımı sırasında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Mehmet Ali KURT'a,

Çalışmalarım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan AİLEME,

Son olarak, BAP-FBE JM(CA) 2007-2YL nolu yüksek lisans tez projesi kapsamında tezime maddi olarak destek sağlayan Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZ</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iv
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI .....	2
1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI.....	2
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b> .....	4
2.1. YERALTI SULARINDA PETROL KİRLİLİĞİ .....	4
2.1.1. Kirletici Maddeler (Hidrokarbonlar).....	5
2.1.1.1. Alifatik hidrokarbonlar.....	6
2.1.1.2. Aromatik hidrokarbonlar.....	6
2.1.2. Kirliliğin Yayılım Mekanizmaları.....	8
2.1.3. Petrol Kirliliğinin Yeraltı Suyu Kimyasına Etkileri.....	9
2.2. YERALTI SUYU AKIM MODELLERİ .....	11
2.2.1. Kavramsal Modelin Oluşturulması .....	12
2.2.2. Grid Tasarımı .....	12
2.2.2.1. Sonlu farklar grid yapısı.....	12
2.2.2.2. Sonlu elemanlar grid yapısı.....	13
2.2.3. Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi .....	14
2.2.4. Akifer Parametrelerinin Modele Aktarılması.....	15
2.2.4.1. Hidrolojik parametrelerin dağılımı.....	15
2.2.4.2. Gözlem kuyuları ve su seviyelerinin modele aktarılması .....	15
2.2.4.3. Modelin kalibrasyonu.....	16
2.3. GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TEKNOLOJİSİ .....	16
2.3.1. Geçirgen Reaktif Bariyer Türleri ve Tasarımı .....	17
2.3.2. Geçirgen Reaktif Bariyerlerin Avantajları ve Dezavantajları .....	20
2.3.3. Geçirgen Reaktif Bariyer Malzemesi ile Kirleticilerin Etkileşimi .....	21
2.4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	22

<b>3. MATERİYAL VE METOT</b> .....	26
3.1. ARAZİ ÇALIŞMALARI .....	26
3.1.1. Yeraltı Suyu Örnekleme .....	26
3.1.2. Yeraltı Suyu Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi .....	27
3.1.3. Yeraltı Su Seviyesi Ölçümleri ve Hidrolik Eğim .....	27
3.1.4. Doygun Hidrolik İletkenlik Ölçümü .....	27
3.2. LABORATUAR ÇALIŞMALARI .....	29
3.2.1. Yeraltı Suyu Örneklerinde Hidrokarbon Analizleri .....	29
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	30
4.1. ÇALIŞMA ALANININ GENEL JEOLJİSİ .....	30
4.1.1. Temel Birimler .....	30
4.1.1.1. Karahamzaşağı formasyonu .....	31
4.1.1.2. Mersin ofiyolitik melanjı .....	31
4.1.2. Tersiyer Birimleri .....	32
4.1.2.1. Gildirli formasyonu .....	32
4.1.2.2. Karaisalı formasyonu .....	35
4.1.2.3. Güveç formasyonu .....	36
4.1.2.4. Kuzgun formasyonu .....	37
4.1.2.5. Handere formasyonu .....	38
4.1.3. Kuvaterner Birimleri .....	40
4.1.3.1. Kalabriyen-Siciliyen birimleri .....	40
4.1.3.2. Tirreniyen-Güncel birimleri .....	43
4.2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL DURUMU .....	46
4.2.1. Konum ve Ulaşım .....	46
4.2.2. Morfoloji .....	47
4.2.3. Nüfus ve Yerleşim .....	48
4.2.4. İklim ve Bitki Örtüsü .....	49
4.3. ÇALIŞMA ALANININ HİDROJEOLJİK ÖZELLİKLERİ .....	50
4.3.1. Akarsular .....	50
4.3.2. Kanallar ve Su Yapıları .....	51
4.3.3. Kuyular .....	51
4.3.4. Doygun Hidrolik İletkenlik Ölçümleri .....	51
4.3.5. Yeraltı Su Seviyesi Ölçümleri ve Hidrolik Eğim .....	53
4.4. YERALTI SULARININ ANALİZLERİ .....	54
4.4.1. Fiziksel Parametreler .....	54



4.4.2. Hidrokarbon Analizleri .....	56
4.5. YERALTI SUYU AKIM MODELİ.....	60
4.5.1. Karaduvar Kıyı Akiferinin PMWIN ile Modellenmesi.....	60
4.5.1.1. Grid tasarımı ve akifer parametreleri .....	61
4.5.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları .....	63
4.5.1.3. Model parametreleri .....	63
4.5.1.4. Modelin kalibrasyonu.....	65
4.6. GEÇİRGEN REAKTİF BARİYER TASARIMI .....	67
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>69</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>83</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	SAYFA
Çizelge 2.1. GRB’lerde kullanılan reaktif malzemeler ve temizlenebilecek kirlenici bileşenler	21
Çizelge 4.1. Kirlenmiş ve temiz kuyulardan alınan yeraltı suyu örneklerinin fiziksel özellikleri .....	55
Çizelge 4.2. Temmuz 2007’de Karaduvar kıyı akiferi’nden alınan su örneklerinde ölçülen BTEX konsantrasyon değerleri. ....	58
Çizelge 4.3. Model sonuçlarından elde edilen 2006 yılına ait su bütçesi değerleri.....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	SAYFA
Şekil 1.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.....	3
Şekil 2.1. Petrol türevlerinin üretim, depolama ve taşıma aşamaları ve kirliliğin yayılımını gösteren şematik çizim.....	5
Şekil 2.2. Hidrokarbonların sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. Benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilen (BTEX) aromatik bileşiklerinin yapısı.....	7
Şekil 2.4. Benzen halkasına birden fazla grup bağlandığında oluşan izomerler....	7
Şekil 2.5. Bir akiferi kapsayan blok merkezli sonlu farklar noktalar ağı.....	13
Şekil 2.6. Bir akiferi kapsayan kafes merkezli sonlu farklar noktalar ağı.....	13
Şekil 2.7. Bir akiferi kapsayan sonlu elemanlar noktalar ağı.....	14
Şekil 2.8. Basitleştirilmiş bir GRB tasarımından görünüm.....	17
Şekil 2.9. Sürekli geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü.....	19
Şekil 2.10. Huni ve kapı tipi geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü .....	19
Şekil 2.11. Keson tipi geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü.....	20
Şekil 3.1. Yeraltı suyu örnekleme noktaları.....	26
Şekil 3.2. Ölçüm kuyusuna yerleştirilmiş Guelph permeametre ve kuyu açmada kullanılan ekipmanlardan (burgu, silindir ve fırça) bir görünüm.....	28
Şekil 4.1. Çalışma alanının genelleştirilmiş dikme kesiti .....	34
Şekil 4.2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin sayısal jeoloji haritası.....	45
Şekil 4.3. Çalışma alanının genel konumu.....	47
Şekil 4.4. Çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü Quickbird uydu görüntüsü ...	49
Şekil 4.5. Mersin ili (1930–2002 yılları arası) ve Tarsus ilçesinin (1988–1997 yılları arası) aylara göre ortalama yağış miktarları ve ortalama hava sıcaklıkları.....	50

Şekil 4.6. Permeabilite ölçümü için seçilen noktaların konumları ve arazide doygun hidrolik iletkenliğin ( $K_{fs}$ ) 2 boyutlu dağılımı. ....	52
Şekil 4.7. Karaduvar kıyı akiferine ait yeraltı suyu seviye haritası (Ekim 2006) ..	54
Şekil 4.8. Çalışma alanından alınan yeraltı suyu örneklerine ait çeşitli fiziksel parametrelerin (EC, ÇO, pH ve Eh) alansal dağılımı.....	56
Şekil 4.9. BTEX bileşenlerine ait analizlerinin doğruluğunu ve geri kazanımları saptamak için hazırlanan 15 ppm'lik BTEX standardının GC-MS yöntemiyle elde edilen kromatogramı. ....	57
Şekil 4.10. Temmuz 2007 döneminde Karaduvar Kıyı Akiferi'nden alınan su örneklerinde ölçülen BTEX konsantrasyonlarının dağılımı.....	59
Şekil 4.11. Karaduvar kıyı akiferi model katmanının yatay yöndeki hidrolik iletkenlik haritası.....	62
Şekil 4.12. Çalışma alanındaki gözlem kuyularının lokasyonları.....	64
Şekil 4.13. Modelin kalibrasyonu sonucu elde edilen kalibrasyon grafiği .....	65
Şekil 4.14. Serbest akifer için kalibre edilmiş yeraltı suyu seviye haritası.....	66
Şekil 4.15. Çalışma alanına uygulanan huni ve kapı tipi bariyerin boyutları .....	67
Şekil 4.16. Bariyer tasarımından sonra oluşan yeraltı suyu seviye haritası.....	68

## 1. GİRİŞ

Mersin ili, hızla büyüyen ve endüstrileşen sahil kentlerimizden biridir. Bu hızlı büyüme ve endüstrileşmeye bağlı olarak içme-kullanma ve sulama suyuna olan talep her geçen gün artmakta, sanayi tesisleri ve tarım faaliyetleri için ihtiyaç duyulan su, çoğunlukla izinsiz olarak açılan sığ veya derin kuyulardan temin edilmektedir. Çeşitli kirlenici kaynaklar nedeniyle oluşan kirlilik yeraltı suyu kalitesini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca uzun yıllardır tarım alanlarında devam eden ilaçlama ve kimyasal gübre kullanımı da yeraltı suyu kalitesini tehdit eden önemli bir etmendir [1].

Çalışma alanında bir gübre fabrikası, bir çok akaryakıt ve LPG depolama-dolum tesisleri, ATAŞ Rafinerisi, faaliyeti durdurulmuş bir termik santral, fabrikalar, tarım alanları ve yerleşim yerleri yer almaktadır. Son yıllarda, özellikle yerel basında ve ulusal medyada konu edilen ve bölgedeki petrokimya tesislerinden kaynaklandığı tahmin edilen petrol sızıntıları, verimli akiferlerin bulunduğu Mersin-Tarsus arasındaki Karaduvar mahallesini olumsuz bir şekilde etkilemiş ve meydana gelen bu kirlilik bölge halkının da yoğun protestosuna neden olmuştur. Buna rağmen, bölgedeki bu olumsuz durumu gidermek ve oluşan çevre felaketinin zararlarını azaltmak için yerel yönetimler tarafından her hangi bir çalışma yapılmamıştır [1]. Gelecekte, bölgedeki artan su ihtiyacının ağırlıklı olarak yeraltı sularından karşılanacağı düşünülürse bu sınırlı kaynağın bilinçli kullanımı ve kirlilikten korunması büyük önem arz etmektedir.

Yeraltı sularının kalitesinin ve kirliliğinin belirlenerek, gerekli iyileştirme tedbirlerinin alınabilmesi için çalışma alanının jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir [2]. Kirlenicilerin yeraltı sularındaki yayılımının belirlenmesi ve gelecekteki davranışlarının tahmin edilebilmesi için geliştirilen matematiksel modeller, çalışma alanına ait elde edilen veriler yardımıyla; kirlenici davranışının, yeraltı suyu kirliliğinin boyutlarının ve zamana bağlı olarak yayılımının belirlenmesinde oldukça etkilidirler. Kirlenicilerin temizlenmesine yönelik geliştirilen yöntemler arasında 1990'lı yıllardan itibaren

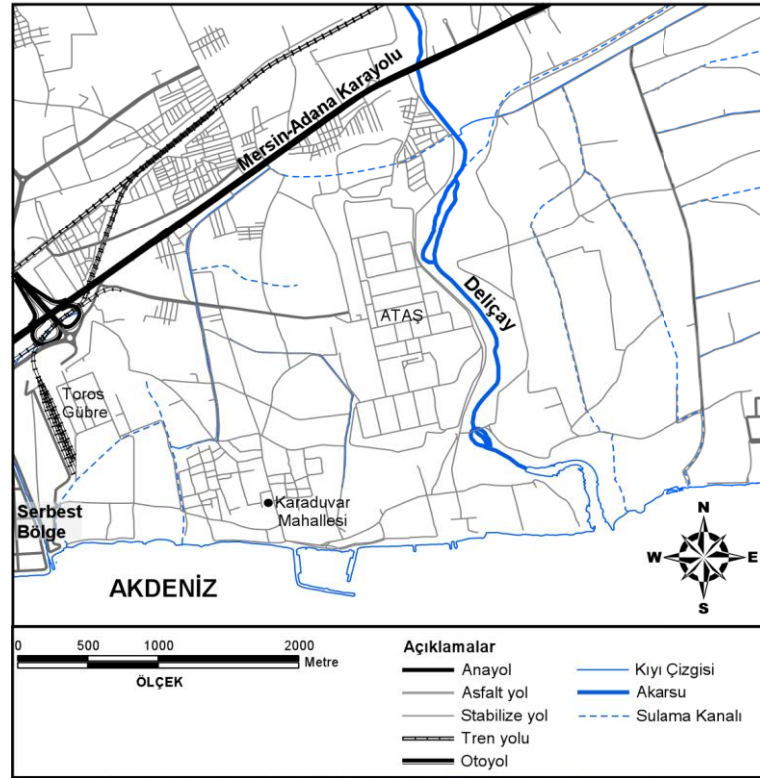
popüler bir temizleme yöntemi olan geçirgen reaktif bariyerler bulunmaktadır. Bunlar hızlı ve ucuz bir şekilde dizayn edilebilirler ve yüzeyde gerçekleştirilecek olan faaliyetleri daha az etkilemektedirler.

### 1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın amacı, Mersin iline bağlı Akdeniz Belediyesi sınırları içindeki Karaduvar kıyı akiferinin hidrojeolojik özelliklerinin (yeraltı su seviyesi, hidrolik iletkenliği, akış yönü ve hidrolik eğiminin) saptanması, yeraltı suyu fiziksel parametrelerin (pH, ÇO, Eh, sıcaklık ve iletkenlik) ölçümü ve yeraltı suyuna karıştığı bilinen çeşitli kirleticilerin (petrol türevleri) konsantrasyonlarının ve yayılımlarının belirlenip, bu kirleticilerin temizlenebilmeleri için uygun iyileştirme tekniklerinin belirlenmesidir. Bu amaçla elde edilen veriler Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) veritabanına girilerek yeraltı sularında ölçülen fiziksel parametrelere ait dağılım haritaları oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen veriler matematiksel modele aktarılarak yeraltı suyu akım modeli oluşturulması planlanmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında, kirlenmiş yeraltı suyunu temizlemek için, yeraltı suyu kirliliğine neden olan kirleticilerin reaktif malzeme kullanılarak temizlenmesi esasına dayanan uygun geçirgen reaktif bariyer (Permeable Reactive Barrier) tasarımı yapılmıştır.

### 1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Çalışma alanı, 1/25,000 ölçekli O33-a3 paftasının güney kesiminde yer almaktadır. Çalışma alanının doğusunda Deliçay, batısında Mersin Serbest Bölgesi, kuzeyinde Mersin-Adana devlet yolu (D400), güneyinde ise Akdeniz bulunmaktadır. Çalışma alanı yaklaşık 10 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsar (Şekil 1.1). Bu alan; Mersin iline bağlı Akdeniz Belediyesi sınırları dahilinde olup, Karaduvar mahallesini tamamen içine almaktadır.



Şekil 1.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası [1].

Gelecekte, bölgedeki artan su ihtiyacının ağırlıklı olarak yeraltı sularından karşılanacağı düşünülürse bu sınırlı kaynağın bilinçli kullanımı ve kirlilikten korunması da büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma sonucunda, bölgedeki yeraltı suyu kalitesini kötü yönde etkileyen kaynaklar ortaya konmuştur. Ayrıca, bu çalışma kapsamında bölgede petrol türevleri tarafından kirlenmiş olan yeraltı suyunun temizlenmesine yönelik “Huni ve Kapı Tipi” reaktif bariyer tasarımı yapılmış ve matematiksel olarak modellenmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

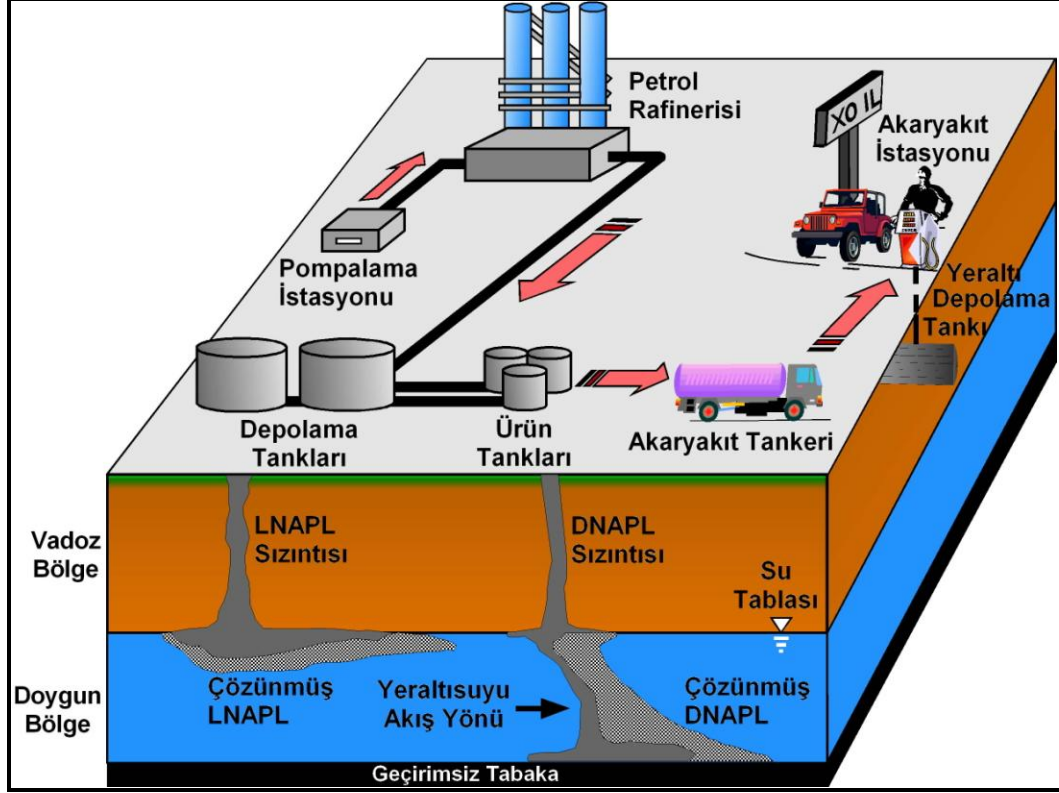
### 2.1. YERALTI SULARINDA PETROL KİRLİLİĞİ

Petrol türevleri yada yaygın olarak kullanılan adıyla akaryakıt (benzin, motorin, fuel-oil, gazyağı vb.) petrolün rafinerilerde damıtılması sonucu elde edilen çeşitli hidrokarbon bileşiklerinin karışımından oluşmaktadır [3]. Genellikle boru hatları vasıtasıyla taşınan bu ürünler belirli bir süre yeraltı veya yerüstü depolama tanklarında depolandıktan sonra akaryakıt istasyonlarına tankerler vasıtasıyla dağıtılmaktadırlar (Şekil 2.1). Akaryakıtların, depolanması veya taşınması sırasında oluşabilecek olan çeşitli sızıntı veya kaza sonucu çevreye yayılması, yeraltı suyunun NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids; Susuz Faz Sıvılar) adı verilen birçok hidrokarbon bileşiği tarafından kirlenmesine neden olmaktadır [3]. NAPL'lar tek bir çeşit hidrokarbondan oluşabildiği gibi, yüzlerce değişik hidrokarbon çeşidinden oluşan kompleks karışımlar şeklinde de olabilmektedirler. NAPL'lar suya göre olan yoğunluklarına göre hafif veya ağır NAPL'lar olmak üzere iki genel sınıfa ayrılırlar. Bunlardan hafif NAPL'lar (LNAPL) sudan daha az yoğun, ağır NAPL'lar (DNAPL) ise sudan daha yoğundur [4]. Yeraltı ortamına oluşacak bir sızıntı sonucu, LNAPL'lar sudan daha hafif olduklarından su tablası üzerinde yeraltı suyu akımı boyunca taşınırken, DNAPL'lar sudan daha ağır olduklarından akifer tabanına doğru hareket ederek orada birikirler (Şekil 2.1).

Petrol kirliliğine uğramış akiferlerde NAPL'lar vadoz zonda dört farklı fazda bulunurlar: 1) taneler arası boşluklarda uçucu (buhar) fazda, 2) akiferi oluşturan malzemeye absorbe olarak, 3) suda çözülmüş olarak ve 4) saf sıvı NAPL fazda (serbest faz) [3, 5- 9]. Bu dört fazdan insan sağlığı açısından en tehlikeli olanı yeraltı suyunda çözülmüş olarak bulunan NAPL'lardır. Özellikle, içme suyu ihtiyacının yeraltı sularından karşılandığı bölgelerde oluşan NAPL kirlilikleri insan sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bunlar arasında, BTEX (benzen, tolüen, etilbenzen ve orto-meta-para ksilenler) olarak adlandırılan bazı benzin bileşenleri, NAPL'lar içerisinde insan ve çevre sağlığı açısından en tehlikelileridir [3]. İnsan sağlığı açısından tehlikeli kabul edilen sınırların [10] 400 ile 180.000 katı suda



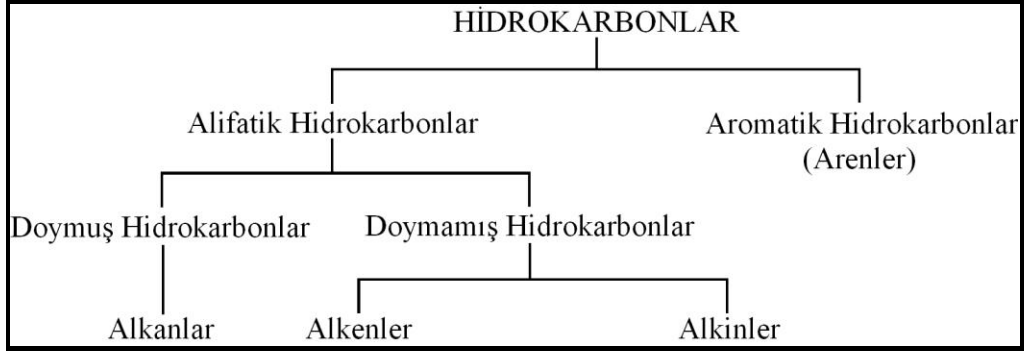
çözünürlüğe sahip olan bu aromatik bileşikler insanlarda yüksek derecede kanserojen etkiye sahiptir.



Şekil 2.1. Petrol türevlerinin üretim, depolama ve taşıma aşamaları ve kirliliğin yayılımını gösteren şematik çizim [3].

### 2.1.1. Kirlenici Maddeler (Hidrokarbonlar)

Günlük yaşamda sıkça kullandığımız hidrokarbonlar organik bileşiklerin en basit üyeleridir (Şekil 2.2). Karbon atomları arasında tekli bağ içeren hidrokarbonlar doymuş olup alkan adını alır. Karbon atomları arasında ikili bağ içerenler doymamış olup alkenleri, üçlü bağ içerenler ise alkinleri oluşturur. Diğer bir hidrokarbon sınıfı ise aromatik hidrokarbonlardır (arenler) ve yalnız C ve H elementlerini içeren organik bileşiklerden oluşurlar.



Şekil 2.2. Hidrokarbonların sınıflandırılması.

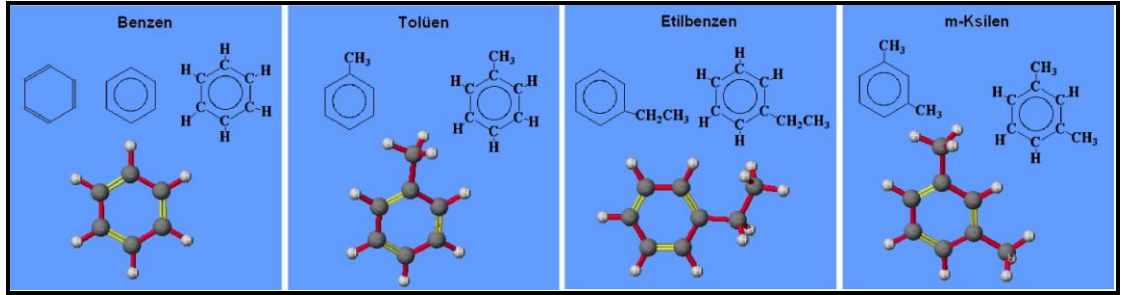
#### 2.1.1.1. Alifatik hidrokarbonlar

Alkanlar (Parafinik hidrokarbonlar),  $C_nH_{2n+2}$  formülü ile bilinen parafin serisi halka yapısına sahip olmayan düz veya dallanmış zincir yapısındadır. Karbon atomlarının ardı ardına tek kovalent bağlarla bağlı olması ve diğer bağların hidrojenle doyurulmuş olmasından dolayı doymuş hidrokarbon grubu olarak ta bilinmektedir. Metan ( $CH_4$ ) en basit hidrokarbondur. Doymuş hidrokarbonlardan beş veya daha fazla karbon atomu içerenleri suda çözünmeyen bileşiklerdir. Alkenler (Olefin serisi),  $C_nH_{2n}$  formülüne sahip hidrokarbonlardır. Doymamış yapıya sahip olduklarından petrolden kolaylıkla ayrılabilirler. Olefin bileşikleri, karbon bağları arasında bir çift bağ içerirler. Bileşikler özellikle etilen, propilen ve butilen, büyük miktarda petrolün parçalanması ve pirolizi esnasında oluşmaktadır.

#### 2.1.1.2. Aromatik hidrokarbonlar

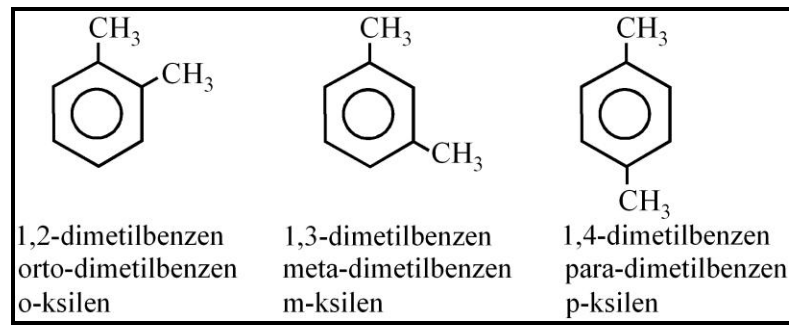
Aromatik hidrokarbonlar, organik asitler yardımı ile oksitlenmeye çok yatkındırlar ve genellikle polar değillerdir. Suda çok az çözünürler; ancak hekzan, dietil eter ve karbon tetraklorid gibi organik çözücülerle çözünebilirler [11]. Aromatik bileşikler,  $\pi$  orbitallerinin üst üste gelmesinden dolayı stabil halka yapıları ile tanımlanır. Aromatik hidrokarbonlar katalizörlerin varlığında elektrostatik yer değiştirme reaksiyonlarından çabuk etkilenirler. Bunların dışında yoğunlaşmış aromatikler olarak bilinen poliaromatik, polisiklik veya polinükleer hidrokarbonlar, yoğunlaşmış halka yapılarında, aromatik halkalardaki karbon atomlarını diğer

halkalarla paylaşmaktadır. Serinin en basit hidrokarbonu 6 karbon atomundan oluşan benzendir ( $C_6H_6$ ). Aromatik hidrokarbonlar benzenin türevleri olarak kabul edilir ve benzen de alkenler ve alkinler gibi doymamış ve çok kararlı bir bileşiktir. Benzen halkasına tek veya birden fazla grup bağlandığında oluşan bileşikler değişik isimler alırlar. Bunlardan en önemlileri tolüen, etilbenzen ve orto-meta-para ksilenlerdir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilen (BTEX) aromatik bileşiklerinin yapısı.

Benzen halkasına birden fazla grup bağlandığında üç tane izomer söz konusu olur (Şekil 2.4). Bağlanan grupların yeri ve sayısı belirtilerek adlandırılır. Grupların bağlandığı C'ların numaraları yerine orto (o-), meta (m-) ve para (p-) ön ekleri de kullanılabilir.



Şekil 2.4. Benzen halkasına birden fazla grup bağlandığında oluşan izomerler.

### 2.1.2. Kirliliğin Yayılım Mekanizmaları

Yeraltı ortamında kirleticilerin taşınımı ve yayılımı başlıca adveksiyon ve dispersiyon mekanizmalarıyla olmaktadır. Bunlardan adveksiyon, kirleticici partikül veya moleküllerinin yeraltı suyu akımı ile birlikte fiziksel olarak sürüklenmeleri, dispersiyon ise, kirleticici partikül veya moleküllerinin akım sistemi içinde görünür karışımı ve saçılımıdır [12]. Maddelerin akım yönüne paralel yönde saçılımları boyuna dispersiyon, buna dik yöndeki saçılımları ise enine dispersiyon olarak adlandırılır [5, 12].

Dispersiyon, taneler arası boşluk büyüklüklerinin farklılıklarından, boşluklarda gelişen farklı hız profillerinin ortaya çıkmasından ve akım yönünün katı taneler tarafından değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Dispersiyon prosesi başlıca iki bileşenden oluşur: 1) mekanik dispersiyon ve 2) moleküler difüzyon [5]. Bunlardan mekanik dispersiyon (karışım); taneler arasında bulunan boşluk ortamındaki hız değişimlerinden kaynaklanır. Moleküler difüzyon ise; yeraltı suyunun yönü ve miktarından bağımsız olarak kirleticici konsantrasyonlarının değişimine neden olur [5]. Suda çözülmüş bir maddenin moleküler difüzyonu Fick yasasında ifade edildiği gibi iyonların yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru göç etme eğilimleridir [5, 12].

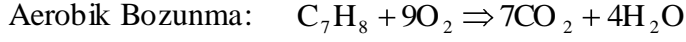
Yeraltı suyu kirliliği araştırmalarında yeraltı suyu akım hızı, mekanik dispersiyon bileşenini baskın bileşen haline getirir. Bu nedenle moleküler difüzyon bileşeni ihmal edilir. Hidrodinamik dispersiyon ise moleküler difüzyon ve mekanik dispersiyonun etkisinin toplamıdır. Adveksiyon, moleküler difüzyon ve mekanik dispersiyon, konservatif kirleticilerin hidrodinamik dispersiyonlarını etkileyen en önemli proseslerdir. Dispersiyonu etkileyen diğer faktörler; akifer heterojenitesi, hidrolik iletkenlik, akiferin yağışlardan beslenmesi, yeraltı suyu akımı sınır koşullarıdır. Bu faktörler kirleticici dispersiyonunun artmasını sağlar ve yeraltı suyu hızının değişimine yol açar. Bunun sonucunda kirleticiler akiferin büyük bir kısmına yayılabilir.

### 2.1.3. Petrol Kirliliğinin Yeraltı Suyu Kimyasına Etkileri

Akaryakıtların önemli bileşenlerinden olan benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilen izomerleri (kısaca BTEX) gibi monoaromatik kirleticiler yeraltı sularının kirlenmesine neden olan yaygın kirleticilerdir [13-16]. Ancak, abiyotik ve biyotik süreçler (adveksiyon, dispersiyon, adsorpsiyon, buharlaşma ve aerobik/anaerobik biyodegradasyon) bu türden organik kirleticilerin hareketliliğini önemli ölçüde kontrol etmekte ve kirleticinin yayılımını sınırlayıcı yada konsantrasyonunu azaltıcı yönde etki etmektedirler [17-20]. Aerobik ve anaerobik bakteriyel faaliyetler sonucu gelişen çeşitli reaksiyonlar, özellikle antropojenik faaliyetler sonucu petrol kirliliğine maruz kalan bölgelerde, akifer ve yeraltı suyu jeokimyası üzerinde önemli değişimlere sebep olmaktadır. Aerobik koşullarda benzen biyodegradasyonu değişkendir. Her ne kadar benzen, denitrifikasyon, Fe indirgenmesi, sülfat indirgenmesi ve metanojenik koşullarda ayrışabilir gibi görünse de, yapılan çalışmalar benzenin hidrofobik alkil fonksiyonel grubu içermemesi nedeniyle, daha duraylı olduğunu ve yavaş degradasyona uğradığını göstermektedir [16, 21]. Petrol türevleri ile kirlenen bölgelerde, biyodegradasyon süresi, yeraltı sularındaki elektron alıcıları konsantrasyonuna ve besinlere bağlıdır. Aerobik koşullarda bakteriler enerji üretmek için, hidrokarbonları elektron verici olarak, çözülmüş oksijeni ( $\text{O}_2$ ) ise elektron alıcı olarak kullanmaktadırlar. Bu yüzden, petrol bileşenleri tarafından kirlenilen akiferlerde  $\text{O}_2$  konsantrasyonları hızla azalma eğilimindedir [15, 22]. Kirlenen ortamda, oksijenin tükenmesiyle birlikte oluşan anoksik koşullar, anaerobik bakteriyel popülasyonların gelişmesinde önemli bir rol oynar. Anaerobik biyodegradasyon sırasında kullanılan önemli elektron alıcılar ise sırasıyla; nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), mangan (Mn(IV)), demir (Fe(III)) ve sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )'tir [15, 22]. Ortamdaki oksijen tamamen tükenince metanojeniz başlamaktadır. Bu aşamada karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) elektron kaynağı olarak kullanılmakta ve metan ( $\text{CH}_4$ ) açığa çıkmaktadır [22]. Burada bütün petrol türevlerine ait reaksiyonları yazmak mümkün olmadığından sadece tolüen'in ( $\text{C}_7\text{H}_8$ ) bozunma reaksiyonları verilmiştir.

Bu reaksiyonlardan aerobik bozunma reaksiyonları; yeraltı suyunda bulunan oksijenin, organik maddenin parçalanması sırasında tüketilerek karbondioksit açığa

çıkmasına neden olmaktadır. Bu da dolaylı olarak yeraltı suyu pH değerlerinin düşmesine neden olmaktadır [1].



İkinci reaksiyon ise; genellikle tarımsal faaliyetler nedeniyle akifer genelinde gözlenen yüksek nitrat ( $NO_3^-$ ) değerlerinin, petrol kirliliği gözlenen bölgelerde düşmesine hatta sifıra yakın değerler almasına neden olan denitrifikasyon reaksiyonlarıdır [1].

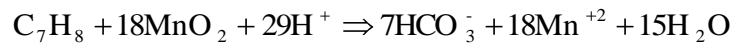


Denitrifikasyon reaksiyonları sonucu; petrol kirliliği gözlenen bölgelerde nitrat değerleri düşerken, bikarbonat değerleri artmakta ve azot gazı çıkışı meydana gelmektedir. Benzer bir durum sülfat ( $SO_4^{2-}$ ) için de söz konusudur. Sülfat'ın indirgenme reaksiyonları sonucu; petrol kirliliği gözlenen bölgelerde sülfat değerleri düşerken, bikarbonat değerleri artmakta ve kükürt gazları ( $H_2S$ ) açığa çıkmaktadır [1].



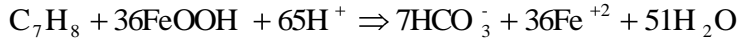
Petrol kirliliği görülen bölgelerde meydana gelen önemli reaksiyonlardan biri de +4 değerlikli mangan'ın indirgenerek +2 değerlikli mangan'a dönüşmesidir. Bu durum yeraltı suyunda önemli miktarlarda Mn artışına sebep olur. Ancak, kirlilik kaynağından uzaklaştıkça bu reaksiyon tersine dönmeye başlar ve belirli bir mesafeden sonra yüksek mangan konsantrasyonları göreceli olarak azalarak normal değerlerine ulaşır. Bu reaksiyonlar sonucu yeraltı suyundaki Mn ve bikarbonat ( $HCO_3^-$ ) konsantrasyonları önemli ölçüde artmaktadır [1].

Mangan'ın (Mn(IV)) İndirgenmesi:



Petrol kirliliği görülen bölgelerde meydana gelen diğer bir indirgenme reaksiyonu ise +3 değerlikli demir'in indirgenerek +2 değerlikli demir'e dönüşmesidir. Bu durum yeraltı suyunda önemli miktarlarda Fe artışına sebep olur. Ancak, kirlilik kaynağından uzaklaştıkça bu reaksiyon tersine dönmeye başlar ve belirli bir mesafeden sonra yüksek demir konsantrasyonları göreceli olarak azalarak normal değerlerine ulaşır. Bu reaksiyonlar sonucu yeraltı suyundaki Fe ve bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) konsantrasyonları önemli ölçüde artmaktadır [1].

Demir'in (Fe(III)) İndirgenmesi:



Son olarak, organik maddenin (örneğin tolüen) bozunması sonucu metan oluşumu söz konusudur. Bu reaksiyon sonucu önemli miktarlarda karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ve metan ( $\text{CH}_4$ ) gazları açığa çıkmaktadır [1].



## 2.2. YERALTI SUYU AKIM MODELLERİ

Modeller, bir projenin planlanmasına hizmet veren, gerçek-karmaşık sistemlerin etki-tepki davranışlarını benzeştiren (simüle eden) araçlardır [5]. Bir bölgeye ait yeraltı suyu benzeşim modeli oluşturulmasının amacı uzun süreli yeraltı suyu yönetim stratejileri geliştirebilmektir [23]. Geliştirilmiş olan yeraltı suyu modelleri akım ve taşınım modelleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Oluşturulan tüm modeller yeraltı suyu akım modeli ile başlarlar. Modele başlanmadan önce akiferin fiziksel konfigürasyonu (akiferin yeri, kalınlığı, yüzey su kütleleri ve akarsuların lokasyonları ve tüm akiferin sınır şartları), akiferin önemli hidrolik özellikleri (geçirgenlik, depolama katsayısı, akiferler ile yüzey su kütleleri arasındaki hidrolik bağlantı) bilinmelidir [12]. Kullanılacak olan model programı akiferdeki hidrolik yük ve konsantrasyon değerlerini zamana ve konuma bağlı olarak hesaplamakta kullanılır.

### 2.2.1. Kavramsal Modelin Oluşturulması

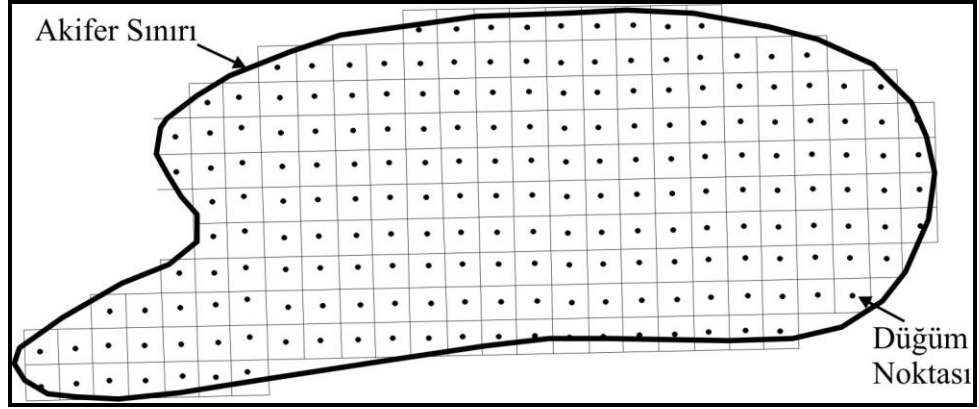
Kavramsal model, model uygulamasının özel hedefleri ile ilgili ifadelerden ve bu hedeflerin nasıl başarılacağını açıklayan hipotezlerden oluşur. Gerçekçi ve kabul edilebilir bir kavramsal modelin formülasyonu bir model uygulamasındaki en önemli adımdır. Bir yeraltı suyu akım modelinde akiferin sahip olduğu akımların yönü, miktarı, hızı gibi hidrodinamik özelliklerin tespit edilmesi oldukça güçtür. Bunun için geliştirilecek olan modelden elde edilecek veriler ışığında bu kaynakların doğru yönetilebilmesi için de bir bütün olarak ele alınan (beslenim, boşalım, suyun kalitesi, vb.) parametreler bir araya getirilerek kavramsal modeller oluşturulmaktadır. Başarılı bir kavramsal model, akiferin iyi yönetilebilmesinin temelini oluşturur [24].

### 2.2.2. Grid Tasarımı

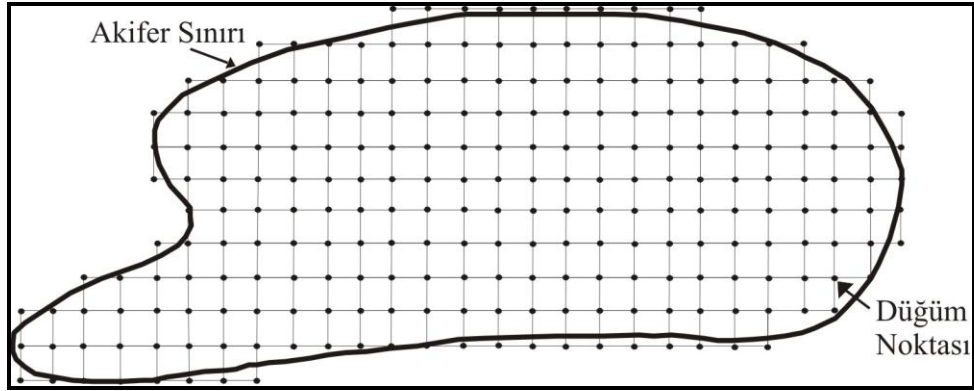
#### 2.2.2.1. Sonlu farklar grid yapısı

Sonlu farklar (finite difference) grid yapısı, sistemin hücelere bölümlendirilmesiyle oluşturulur. Her bir hücrenin merkezi bir düğüm noktası (nod) oluştururken hücreler birbirlerinden grid çizgileriyle ayrılırlar. Her bir hücre için sistemi ifade eden diferansiyel denklemler geliştirilir. Sayısal yöntemler, zamansal ve mekansal bir ayrımı gerektirmektedir. Sonlu farklar yönteminde diferansiyel bölümler fark bölümleri ile yer değiştirir ve akifer dörtgen ađ ile bölümlenir. Burada başlıca 2 çeşit ađ söz konusudur. Bunlar blok merkezli ađ ve kafes merkezli ağdır. Şekil 2.5.'de blok merkezli sonlu farklar noktalar ağını, Şekil 2.6'da kafes merkezli sonlu farklar noktalar ağını gösteren Şematik görünümeler sunulmuştur.





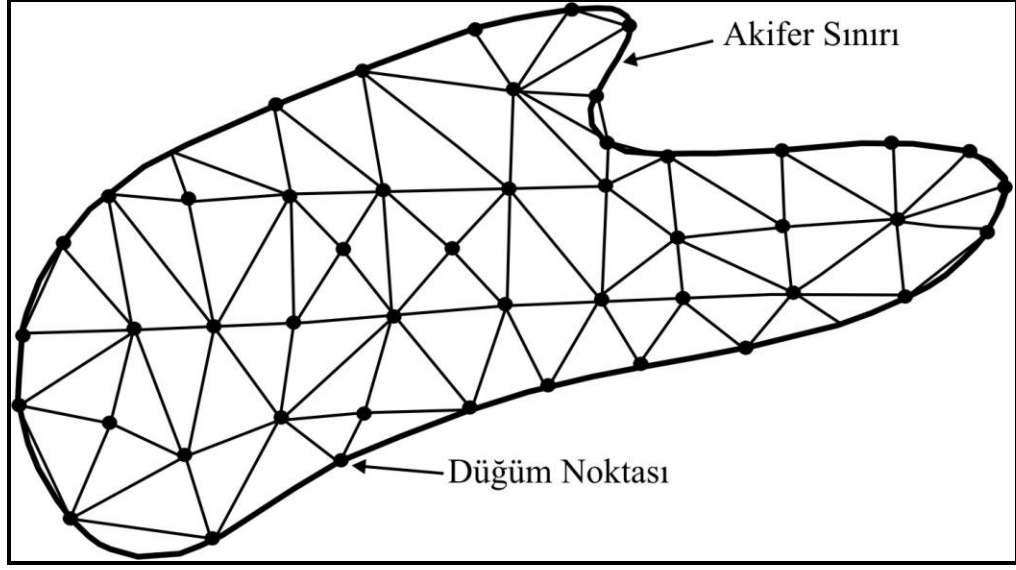
Şekil 2.5. Bir akiferi kapsayan blok merkezli sonlu farklar noktalar ağı [12].



Şekil 2.6. Bir akiferi kapsayan kafes merkezli sonlu farklar noktalar ağı [12].

#### 2.2.2.2. Sonlu elemanlar grid yapısı

Sonlu elemanlar (finite elements) grid yapısını oluştururken heterojenite etkisini gidermek için sistem elementlere ayrılır ve bunlar genelde üçgenlerden oluşur. Her element üç düğüm noktası (nod) ile tanımlanır. Sonlu elemanlar yönteminin sonlu farklar yönteminden farkı, çözümlerin integrallere dayandırılmalarıdır [5,12]. Şekil 2.7.'de sonlu elemanlar noktalar ağını gösteren şematik bir görünüm sunulmuştur.



Şekil 2.7. Bir akiferi kapsayan sonlu elemanlar noktalar ağı [12].

### 2.2.3. Başlangıç ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Yeraltı suyu akım modellerinde IBOUND düzeni olarak isimlendirilen sınır şartlarının girilmesi gerekmektedir. IBOUND düzeninde her bir model ve modeldeki her bir hücrenin modelde sabit yük, aktif veya aktif olmayan hücre olduğunu belirten kodları içinde bulunduran bir matris vardır. IBOUND düzeninde aktif hücreler pozitif (+) bir değer, sabit seviyeli hücreler negatif (-) bir değer, akışın olmadığı inaktif hücreler ise sıfır (0) değeri ile tanımlanmaktadır [2]. Yeraltı suyu akım modelleri, yeraltı suyu sistemini z yönünde katmanlar halinde modellemektedirler. Yeraltı suyu akım modellerinden MODFLOW'da 4 temel katman tipi mevcuttur. Bunlar:

- Tip 0: Bu katman tipi, tüm simülasyon zamanı için her bir hücrenin transmisibilitesinin sabit kaldığı basınçlı akiferin simülasyonunda kullanılır.
- Tip 1: Bu katman tipi, sadece en üstteki ilk katman için geçerlidir ve serbest akifer için uygulanır. Tabakanın transmisibilitesi, simülasyon boyunca akiferin doymuş kalınlığına bağlı olarak değişim gösterir [25].
- Tip 2: Bu tip katman, serbest yüzeyli ve basınçlı akifer tipinde olan akiferler için kullanılır. Ancak, simülasyon periyodu boyunca sabit olan

transmisibilitenin tekrar hesaplanması gerekli değildir, bu yüzden tabaka kalınlığının büyük bir kısmının doymuş olduğu varsayılır.

- Tip 3: Bu tip bir katman, basınçlı-basınçsız akifer geçişleri içinde kullanılır. Her tekrarlama da kullanılan hidrolik iletkenlik ve yeni doymuş kalınlık tarafından tekrar hesaplanan değişen transmisibiliteye sahiptir [2].

#### 2.2.4. Akifer Parametrelerinin Modele Aktarılması

##### 2.2.4.1. Hidrolojik parametrelerin dağılımı

Akiferin karakteristik özelliklerinden olan hidrolik iletkenlik (K) değerlerinin alansal değişiminin saptanması yeraltı suyu kirlilik problemlerinin çözümünde ve yeraltı suyu akışının değerlendirilmesinde oldukça önemlidir [26-28]. Ayrıca yeraltı suyunda gözlenen kirliliğin analizi aşamasında ve planlanacak olan iyileştirme yöntemlerinin etkin ve yeterli oluşunda önemli bir rol oynamaktadır [29]. Yapılan çalışmalarda modele aktarılması gereken diğer parametreler ise, yağış-akış-buharlaşma değerleri kullanılarak beslenme miktarı, göl seviyesi ve kaynak seviyeleridir.

##### 2.2.4.2. Gözlem kuyuları ve su seviyelerinin modele aktarılması

Bir bölgenin yeraltı suyu akım modelinin oluşturulabilmesi için gözlem yapılan kuyuların ve kuyulardan yapılan su seviye ölçümlerinin de modele aktarılması, elde edilen değerlerin hidrolojik parametrelerle bir kombinasyon içinde değerlendirilmeleri gerekmektedir. Ayrıca, su seviyesi ölçümleri sonucunda, yeraltı suyuna ait hidrolik eğim değerlerinden, yeraltı suyu akış yönü ve hızları hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Eğer çalışılan bölgede bir kaynak varsa kaynağın bulunduğu hücrelerdeki hidrolik seviyenin kaynak yüksekliğinden daha büyük olması durumunda yeraltı suyu kaynağa doğru boşalır ve bu boşalım kaynak suyu olarak modelden dışarı çıkar. Bu durumda kaynak boşalımı varmış gibi modellenir. Hidrolik seviye kaynağın yüksekliğine eşit yada daha düşük olduğu zaman kaynaktaki boşalım sıfır olur. Akiferdeki hidrolik seviye dikkate alınmaksızın

kaynaktan beslenme daima sıfır olur ve kaynak kuruymuş gibi modellenir [2]. Yapılan çalışmalarda modele girilen akifer parametrelerinin kendi aralarında tutarlı olabilmeleri için belirli bir yıla ait değerlerin seçilmesi gerekmektedir [2].

#### 2.2.4.3. Modelin kalibrasyonu

Modellerin kalibrasyonu, kuyuların bulunduğu hücrelerde gözlenen yeraltı su seviyeleri ile model tarafından hesaplanan yeraltı su seviyelerinin karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Gözlenen ve hesaplanan yeraltı su seviyeleri arasındaki yaklaşımları sağlayabilmek için kalibrasyon parametresi olarak genellikle yatay ve dikey hidrolik iletkenlik değerleri kullanılmaktadır [2, 30, 31].

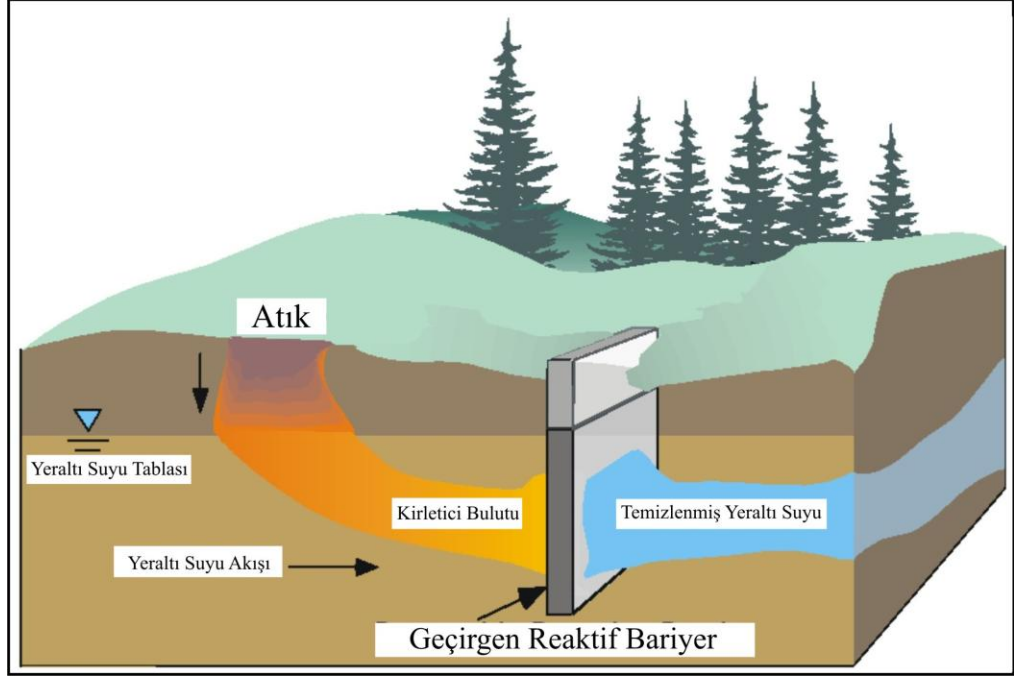
### 2.3. GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TEKNOLOJİSİ

Geçirgen reaktif bariyer (permeable reactive barrier; GRB), kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesine yönelik inşa edilen bir duvardan (zondan) ibaret olan bir yerde (in situ) iyileştirme yöntemidir. İnşa edilen duvar geçirgen olup, yeraltı suyuna karışmış olan kirleticileri bariyer içine konulan reaktif malzemeler sayesinde tutar, böylece duvarın diğer tarafına temizlenmiş olan yeraltı suyu akar [32-37].

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi geçirgen reaktif bariyerler kirlenmiş yeraltı sularının akış yönüne dik olarak inşa edilirler. Kirleticinin hareketi, reaktif malzemeler (kirleticiyi tutan veya indirgeyen malzemeler) ile fiziksel, kimyasal yada biyolojik yollarla engellenirken yeraltı suyunun akışına izin verilir.

GRB’ler akiferin ve bariyerin homojen ve izotrop olduğu varsayılarak dizayn edilir [39]. Bariyerler, kirlenmiş yeraltı suyunun akış yönünde, uzun, dar çukurlar veya hendekler açılarak inşa edilirler. Başarılı bir şekilde çukur açmak için biyopolimer karışımı sulu çimento kullanılmalıdır [40]. Çukur veya hendek, bölgede görülen kirletici kimyasalları temizleyebilecek olan reaktif malzemeler ile doldurulur. GRB’ye konulan reaktif malzemeler seçilirken yeraltı suyu ve insanlar açısından zararlı olup olmayacağı araştırılmalıdır. Reaktif malzemeler, suyun bariyer

içerisinden rahatlıkla geçebilmesi ve akabilmesi için kum ile karıştırılabilir. Bazı yerlerde reaktif bariyer duvarı, kirlenmiş yeraltı suyunu duvarın reaktif kısmına yönlendiren huninin bir parçasıdır. Doldurulmuş olan çukur veya hendek, toprak ile örtüldüğü için reaktif bariyerin varlığı yüzeyde diğer faaliyetler için herhangi bir engel oluşturmaz [40].



Şekil 2.8. Basitleştirilmiş bir GRB tasarımından görünüm [38].

### 2.3.1. Geçirgen Reaktif Bariyer Türleri ve Tasarımı

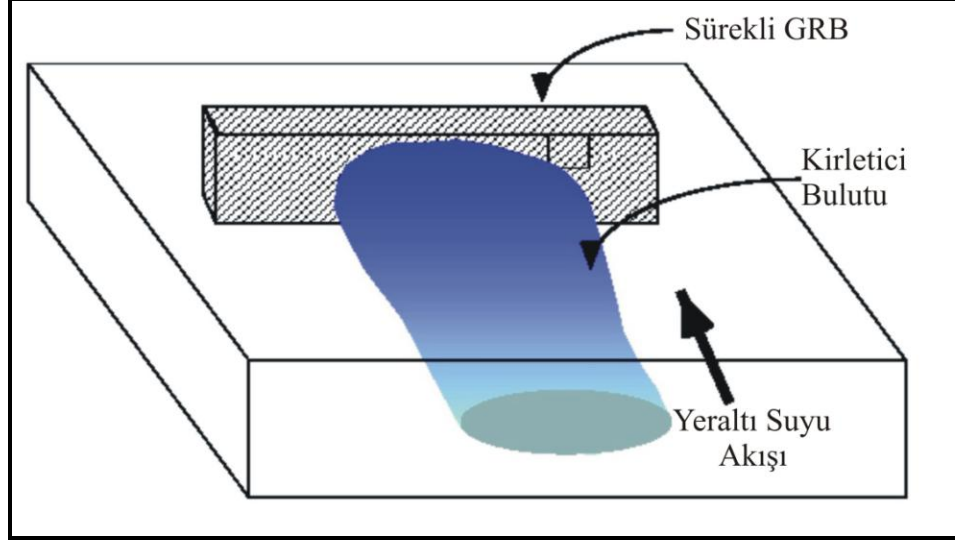
GRB'lerin popüler bir temizleme yöntemi haline gelmesinin sebepleri; hızlı ve ucuz bir şekilde dizayn edilebilmeleri ve yüzeyde gerçekleştirilecek olan faaliyetleri daha az etkilemeleridir. Kirlenmiş olan yeraltı suyunun GRB ile başarılı bir şekilde temizlenebilmesi için çalışma alanının GRB tasarımına uygun olup olmadığı, reaksiyon hızları, yarılanma süreleri, bariyerin biçimi, boyutu, ömrü ve gözlem stratejisi önemlidir [41]. GRB'nin o bölgedeki kirliliği temizleyebilecek olan iyileştirme tekniği olduğuna yapılan fizibilite çalışmalarıyla karar verildikten sonra öncelikle o bölgeyi karakterize edebilecek verilerin toplanması gerekmektedir. Bu verilerin içinde, akifer ve yeraltı suyunun özellikleri, yeraltı suyunun jeokimyasal

bileşimi ve bölgenin hidrojeolojisi olmalıdır. Kavramsal model veya bilgisayar ortamında oluşturulacak olan yeraltı suyu akım modelinden elde edilen verilerle bölgenin hidrojeolojik özellikleri saptanabilir. Bu aşamadan sonra reaktif malzemenin reaktivitesi, stabil oluşu, maliyeti, hidrolik performansı ve çevreye olan uyumu göz önüne alınır ve kolon testleri ile malzeme ile etkileşim içinde olan kirleticinin reaksiyon hızının veya yarılanma süresinin tespit edilmesi gerekmektedir [42]. Çünkü, buradan elde edilen verilere göre reaktif hücrenin kalınlığı belirlenir. Bariyerin lokasyonu, biçimi ve boyutu bölgenin hidrojeolojik karakteristiklerine bağlı olarak belirlenir. Bir gözlem stratejisi geliştirmek için ise gözlem kuyularının açılması, örnek alımı ve örneklerin analizi gerekmektedir [43, 44].

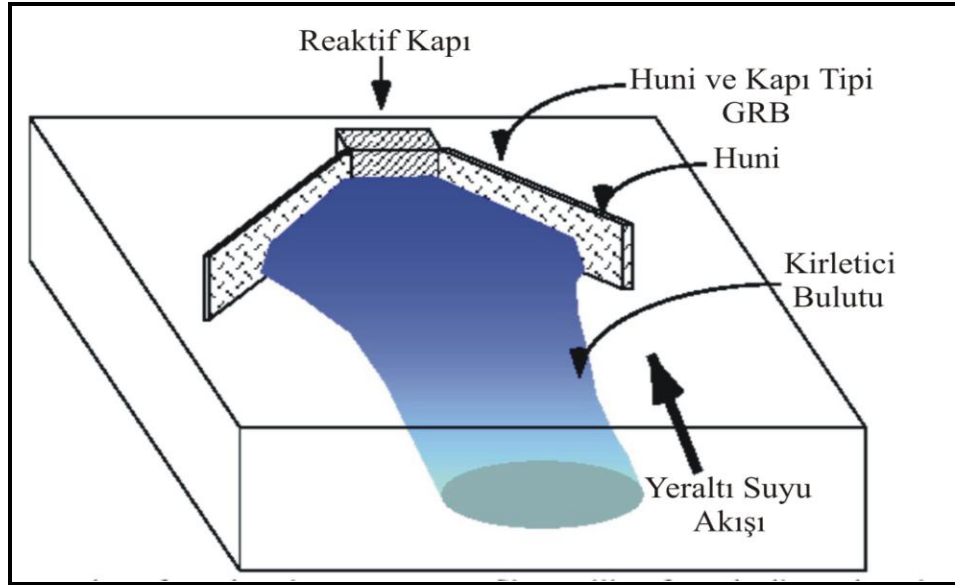
GRB dizayn edilirken yeraltı suyu akış hızı ve kirlenici konsantrasyonu göz önünde bulundurulmalıdır. GRB'nin, yeraltı suyu akışını engellememesi için, GRB hidrolik iletkenliğinin akifer hidrolik iletkenliğinden yaklaşık 10 kat daha yüksek olması gerekir [44]. Kirlenmiş yeraltı suyunun bariyerle temizlenmesinde pompalamaya ihtiyaç olmadığından bariyerler, diğer yöntemlere göre daha ucuz ve hızlı temizleme sağlayabilirler. Günümüzde kullanılan geçirgen reaktif bariyer tasarımları Şekil 2.9., 2.10., 2.11.'de görülmektedir.

GRB tasarımları, 1) sürekli reaktif bariyerler, 2) huni ve kapı tipi bariyerler ve 3) keson tipteki bariyerlerdir. Sürekli reaktif bariyerler dizayn açısından GRB'lerin en basit türüdür. Yeraltı suyu akışına dik olarak inşaa edilen bariyerde kirlenici reaktif zon boyunca taşınır ve GRB boyunca yatay akar. Bariyerin kirlenici bulutunu (plume) temizlemesi reaktif zonun genişliğine bağlı olduğu için sürekli reaktif bariyer tasarımı pahalı bir yöntemdir. Huni ve kapı tipi bariyerler hem geçirgen bir kapı (gate) hem de geçirgen olmayan bir huni (funnel) kısımlarından ibarettir. Huni, yeraltı suyunu kapıya doğru yönlendirerek kirlenici bulutunun büyük bir kısmının erken zamanda tutulmasını sağlar. Huni ve kapı tipi bariyerlerde kapının genişlik ve kalınlığının az olması daha az reaktif malzeme kullanılacağını göstermektedir ve neredeyse tüm reaktif zonun kirleniciye maruz kalması bu tasarımın çok ekonomik olmasını sağlar. Keson tipteki bariyerler ise düşük hidrolik

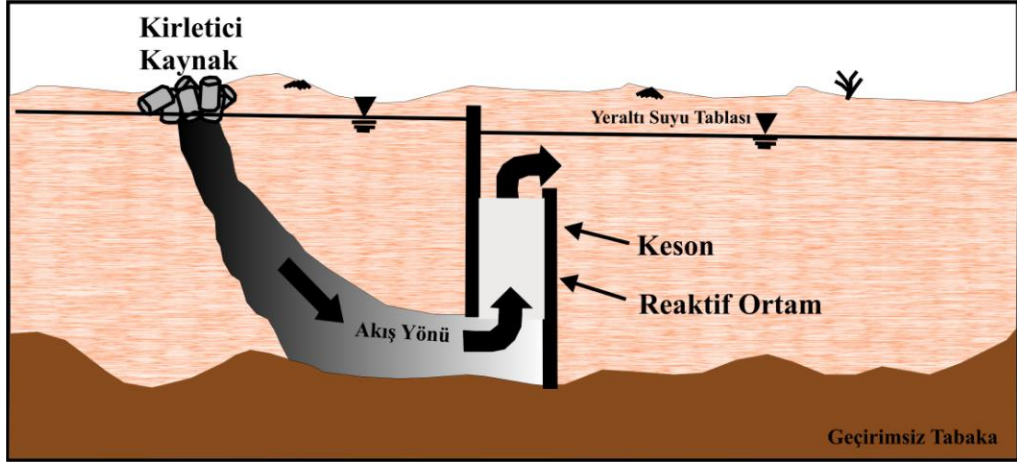
iletkenliğe sahip olan huninin üst kısmında, düşey boru yada kuyu şeklinde inşa edilen bir reaktif zondan oluşan bariyerlerdir [39,42, 45].



Şekil 2.9. Sürekli geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü [38].



Şekil 2.10. Huni ve kapı tipi geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü [38].



Şekil 2.11. Keson tipi geçirgen reaktif bariyer örneğinin şematik görünümü [39].

### 2.3.2. Geçirgen Reaktif Bariyerlerin Avantajları ve Dezavantajları

Organik ve inorganik kirlenmelerle kirlenen yeraltı sularının temizlenmesine yönelik dizayn edilen geçirgen reaktif bariyerler, kirlenme kaynağı tespit edilemese bile kirliliği azaltabilir veya temizleyebilirler. Kirlenmelerin reaktif zon boyunca akışını yeraltı suyu sağladığı için enerji gereksinimi yok denecek kadar azdır. Sadece reaktif malzemenin periyodik olarak (örneğin 10 yılda bir) yenilenmesi gerekebilir [46]. Sıfır değerlikli metaller, genellikle demir ( $Fe^0$ ), GRB'lerde reaktif malzeme olarak yaygın kullanılır. Sıfır değerlikli demir içeren GRB'ler, yeraltı suyundaki klorlu etilen bileşenlerinin (PCE, TCE, DCE ve vinil klorür) konsantrasyonlarını ppb (milyarda bir birim) düzeyine kadar azaltabilmektedir. Bunun yanı sıra, ticari derecede rol oynayan demir metali, halojen bileşenleri azaltmak için kullanılabilir ideal bir reaktif malzemedir. Ayrıca GRB'ler diğer iyileştirme tekniklerine göre yerleştirildikten sonra daha az işlem ve bakım gerektiren bir temizleme yöntemidir [47, 48].

GRB'ler, kirlenmiş yeraltı sularının temizlenmesi için iyi bir araçtır; ancak, bunlarında belli sınırları ve dezavantajları vardır. Son zamanlarda yapılan çalışmalardan iyimser sonuçlar elde edilse de her yeni teknolojiye olduğu gibi, demirin reaktivitesi ve dayanıklılığı konusunda kullanılabilir uzun vadeli veri eksikliği vardır [48-50]. Aynı zamanda, indirgenme reaksiyonlarının yan ürünleri,



insan sağlığı açısından zararlı bazı halojenli bileşiklerdir. Örneğin, PCE (tetrakloretilen) indirgenmesinin iki yan ürünü, aslında zehir olan dikloretilen (DCE) ve kloretilendir. Aynı zamanda PCE, TCE ve DCE'nin indirgenmesindeki ürün vinil klorid olup bu da başlangıç bileşenlerinin hepsinden daha zehirlidir [51, 52]. Eğer bariyerde kirleticinin kalma süresi çok kısaysa yada demirde ařırđ çökme oluşur ve reaktifliği azalırsa, indirgenme reaksiyonları tamamlanamaz [47, 53, 54]. GRB'lerin diğer bir dezavantajđ ise, yapımlarında kullanılan inşa metotlarının 30 metreden daha fazla derinliklerin kazımı için ekonomik olmamasıdır [41, 55].

### 2.3.3. Geçirgen Reaktif Bariyer Malzemesi ile Kirleticilerin Etkileşimi

GRB'ler farklı mekanizmalarla gerçekleşen çeşitli kirlilikleri temizleyebilen tasarımlardır. Çizelge 2.1'de kullanılabilecek olan malzemeler ve temizlenebilecek olan kirleticilerin bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. GRB'lerde kullanılan reaktif malzemeler ve temizlenebilecek kirletici bileşenler [37]

<b>Temizleme yöntemi</b>	<b>Reaktif malzemeler</b>	<b>Temizlenebilecek bileşenler</b>
Organik bileşiklerin indirgenerek klorsuzlaştırılması	Sıfır değerlikli demir	Klorlu eten, Etan, Metan ve Propan, Klorlu pestisit, Freon, Nitrobenzen
Metallerin indirgenmesi	Sıfır değerlikli demir, Ferrik oksit	Cr, U, As, Tc, Pb, Cd, Mo, Hg, P, Se, Ni
Sorpsiyon ve iyon değişimi	Sıfır değerlikli demir, Granüle aktive edilmiş karbon, Apatit	Klorlu bazı zcler, BTEX, Sr-90, Tc-99, U, Mo
pH kontrolü	Kireçtaşı, Sıfır değerlikli demir	Cr, Mo, U
Yerinde redoks manipülasyonu	Hidroslfit, Kalsiyum poli sülfit	Cr, Klorlu eten
Biyoremediasyon ile iyileştirme	Serbest oksijen bileşenleri, Serbest hidrojen bileşenleri, Karbonhidrat, Laktat, Sıfır değerlikli demir, Gübre, Turba, Asetat	Klorlu eten, Etan, Nitrat, Sülfat, Perklorat, Cr, MTBE, Poliaromatik Hidrokarbonlar

Fe<sup>0</sup>'in okside olmaya yatkın oluşu, indirgenme mekanizması sonucunda degradasyona uğramaya yatkın olan kirleticilerle (organik-halojen hidrokarbonlar ve bazı metaller) elektron değişimi yapabilmesi, kirlenmiş olan bir bölgede reaktif malzeme olarak Fe<sup>0</sup>'in kullanımını cazip hale getirmektedir [50]. Diğer yandan, oksitlenen Fe<sup>0</sup>, katı formda FeO(OH) yada Fe(OH)<sub>3</sub> bileşiklerinin oluşumuna sebep olabilmektedir [50, 56]. Ayrıca, Ca ve Mg elementlerinin karbonat ve hidroksit olarak bariyer içerisinde çökelmeleri sonucu yeraltı suyunun bariyer içinden geçişi zorlaşabilir ve dolayısıyla temizlenme gerçekleşemez [50, 56]. Buna ek olarak, yeraltı sularında bulunan nitrat, demir yüzeyindeki reaksiyon hızlarına negatif etki edebilir.

#### 2.4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Şenol ve ark. [57], tüm eski çalışmaları değerlendirmiş ve O33-a3 paftasını da içine alan çalışma alanında da yaygın olarak görülen Kuvaterner yaşlı jeolojik birimleri (delta çökelleri) ayrıntılı olarak incelemiştir.

Demirel [58], Kazanlı kıyı akiferinde meydana gelen deniz suyu girişiminin tarihsel gelişimini (1984 ile 2000 yılları arasındaki dönem) irdelemiş ve su kimyası parametrelerinin zaman içinde değişimini çeşitli grafik yöntemler kullanarak ortaya koymuştur.

Hatipoğlu [59], Mersin ile Tarsus arasındaki alanda kıyı ve yamaç akiferlerinin hidrojeokimyasını incelemiş ve çeşitli kimyasal parametrelerin dağılımını yansıtan haritalar oluşturmuştur.

Güler ve ark. [1], Karaduvar Mahallesi ve civarında, TÜBİTAK projesi kapsamında yaptıkları çalışmada, bölgede bulunan delta çökellerinin mineralojisini incelemişler, yeraltı ve yerüstü sularının hidrojeokimyasına yönelik çalışmalar yapmışlar ve bölgede bulunan endüstriyel ve tarımsal kökenli kirletici kaynakları ortaya koyarak elde ettikleri sonuçları CBS'ye aktararak bir veri tabanı oluşturmuşlardır.

Cheon ve ark. [60], çalışma alanına benzer bir alanda (Kore) petrol depolama tanklarında meydana gelen sızıntının yeraltı suyuna etkisini araştırmış ve kirliliğin zaman içinde değişimini göstermiştir.

Al-Kharabsheh [61], Ürdün'deki Azraq havzasında yaptığı çalışmada şehirleşmenin su kaynakları üzerine olan etkisini araştırabilmek için yeraltı suyu akım modeli olan MODFLOW'u kullanmıştır.

Kim ve ark. [62], yeraltı suyu kimyasını etkileyen karmaşık faktörleri hidrojeokimyasal modeller kullanarak açıklamış ve her bir faktörün su kimyası açısından önemini vurgulamıştır.

Atilla [63], Afyon ovasındaki kirlenmenin soğuk su akiferindeki hidrolik yükün azalmasına bağlı olarak altta yer alan sıcak su akiferinden yukarıya doğru gerçekleşen su ve kütle taşınımından kaynaklandığı şeklinde hipotez geliştirmiştir. MF2K-GWT matematiksel modeli ile soğuk su akiferindeki su ve kütle taşınımı benzeştirilmiş, modelden elde edilen verilerle hipotezi doğrulamıştır.

Öz [64], petrol sahasındaki kuyulardan basılan atık tuzlu suyu temizlemek amacıyla, önce akiferin akış hızının ve su yükü değerlerinin akifer boyunca nasıl değiştiğini tahmin edebilmek amacıyla bir paket program olan MOC'u kullanmış, sonra da kirliliğin yayılımını engelleyebilmek için hidrodinamik izolasyon tekniğini kullanmıştır.

Acar [65], Misli (Gölcük) bölgesindeki yeraltı suyunun akışını simüle edebilmek için MODFLOW matematiksel modelini kullanmıştır.

Ersoy ve Gültekin [66], Gümüşhacıköy (Amasya) akiferine ait yeraltı suyu akım modelini Coğrafi Bilgi Sistemi programları ile uyumlu olarak çalışan Argus ONE programında oluşturmuştur.

Shaki ve Adeloye [23], Libya'nın güney batısında bulunan Murzuq havzasında geliştirilen Irawan sulama projesi kapsamında yeraltı suyu akım modelini oluşturmuşlardır.

Bartzas ve ark. [67], yeraltı suyunun asidik sızıntı ile kirlendiği bölgelerde uygulanacak olan bariyerde reaktif malzeme olarak  $Fe^0$  kullanılmasının ne gibi bir etkisinin olduğuna dair bir laboratuvar çalışması yapmıştır.

Lee ve ark. [68], kirliliğin TCE ve PCE'den kaynaklandığı bölgelerde alternatif teknoloji olarak emülsiyon tabanlı iyileştirme tekniğini araştırmışlardır. Homojenizasyon oranının emülsiyonun hazırlanmasında önemli bir parametre olduğunu ve homojenizasyon zamanında ki artış emülsiyon partiküllerinin küçük bir kısmı ile emülsiyon stabilitesi artışına sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Simon ve ark. [69], kirlilik uranyumdan kaynaklandığı zaman reaktif malzeme olarak Fe kullanıldığında bariyerin performansının nasıl değiştiği ve çökelen/adsorbe olan uranyum konsantrasyonları üzerine bir çalışma yapmışlardır.

VanStone ve ark. [70], Wyoming (ABD)'de TCE'le kirlenmiş yeraltı suyunun temizlenmesi için uygulanan GRB'nin performansının değerlendirilmesi için karbon izotop analizini kullanmışlardır.

Kastanek ve ark. [71] yaptıkları çalışmayı çeşitli zararlı halojen organik maddeler tarafından kirletilmiş yeraltı suyu ve atığın de-kontaminasyonu için iki metodun uygulanması ve araştırılması amacıyla yapmışlardır. İndirgen dehalojenizasyon ve aktif radikaller tarafından organik maddelerin dekompozizasyonu çalışılmıştır.

Rabideau ve ark. [72], New York (ABD)'de yeraltı suyundan stronsiyumun uzaklaştırılması için dizayn edilecek olan GRB'de reaktif malzeme olarak zeolit kullanılabilirliğine dair bir laboratuvar çalışması yapmışlardır.

Wang ve ark. [73], yeraltı suyuna karıştığı tahmin edilen hidrokarbon ve diğer organik bileşenleri karakterize edebilmek için GC–MS, GC–FID, SPME ve HS (headspace) GC–MS tekniklerini içeren çoklu analitik teknikleri kullanmışlardır.

Farhadian ve ark. [15], yerinde yapılan biyoremediasyon tekniklerinin monoaromatik bileşenlerce kirlenen yeraltı sularının temizlenmesinde kullanılabileceğine dair bir çalışma yapmışlar ve anaerobik biyoremediasyonun BTEX gibi monoaromatik kirleticilerle kirlenen yeraltı sularında uygulanmasının daha basit ve ekonomik olduğunu sonucuna varmışlardır.

Miles ve ark. [6], LNAPL ile kirlenmiş olan yeraltı sularında kirleticinin kaynaktan itibaren olan yayılımı önemli olduğu için, kirlenmiş olan bölgede kirliliğin yayılımı ile LNAPL'ın yanal genişliği arasında ilişki kurabilmek için üç boyutlu çok fazlı akış ile taşınımın modellenmesi yaklaşımını uygulamışlardır.

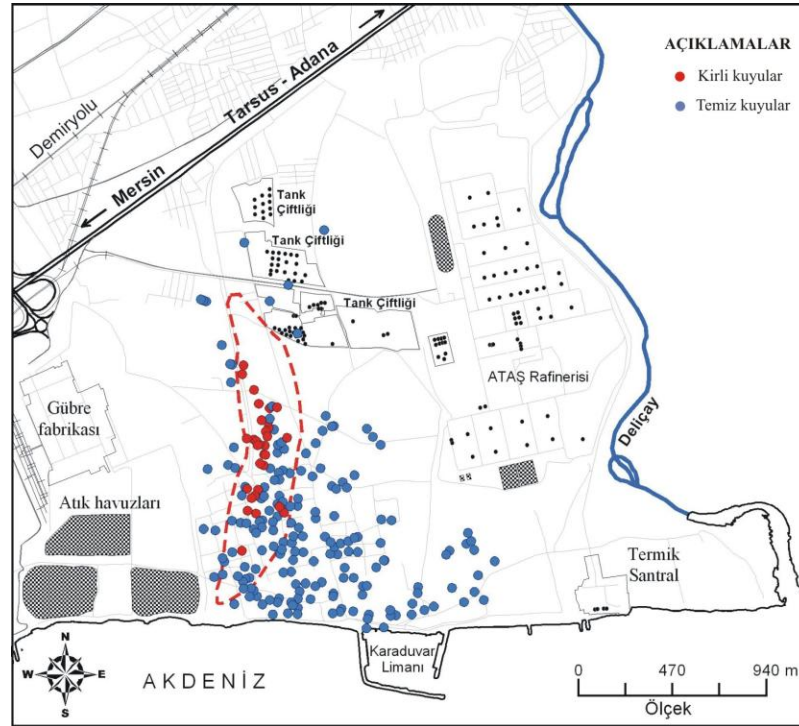
Kim ve Çorapçioğlu [74], yeraltı depolama tanklarından dökülen yada sızan LNAPL'in hareketini ve bölgesel yayılımını gözlemek için iki boyutlu taşınım modeli geliştirmişlerdir.

### 3. MATERİYAL VE METOT

#### 3.1. ARAZİ ÇALIŞMALARI

##### 3.1.1. Yeraltı Suyu Örnekleme

Çeşitli petrol türevleri tarafından kirlendiği bilinen Karaduvar kıyı akiferinde meydana gelen değişimleri izlemek amacıyla Eylül 2008’de bölgedeki mevcut sığ kuyulardan seçilen toplam 212 kuyuda yerinde (in situ) çeşitli fiziksel parametrelere (çözülmüş oksijen, pH, Eh, elektrik iletkenlik) ait ölçümler yapılmıştır (Şekil 3.1). Örnekleme şişelerinden kaynaklanabilecek kirliliklerin önüne geçmek ve kirliliği en aza indirmek amacıyla örnek şişeleri laboratuvarda saf su ile seyreltilmiş %5’lik hidroklorik asitte (HCl) 24 saat bekletildikten sonra saf su kullanılarak yıkanmış ve arazide her örnekleme noktasında alınacak olan su örneği ile üç defa çalkalanmıştır. Alınan su örneklerinin arazi şartlarını karakterize etmesi açısından, örnekleme kuyu hacminin üç katı kadar miktarda su pompalandıktan sonra yapılmıştır.



Şekil 3.1. Yeraltı suyu örnekleme noktaları.

### 3.1.2. Yeraltı Suyu Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi

Çalışma alanındaki örnekleme noktalarından alınan su numunelerinde arazide indirgenme-yükseltgenme potansiyeli (Eh), pH, sıcaklık, çözülmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu, oksijen doygunluğu (%), tuzluluk ve elektriksel iletkenlik ölçümleri çeşitli portatif elektrotlar kullanılarak yerinde yapılmıştır. Adı geçen fiziksel parametreler, WTW Multi 340i/SET (Wissenschaftlich–Technische Werkstätten, Almanya) marka portatif multi parametre cihazı kullanılarak arazide ölçülmüştür. Kullanılan çeşitli portatif elektrotlara ait özellikler ise şöyledir:

- TetraCon 325 grafit elektrik iletkenlik elektrodu (hassasiyet  $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ ),
- Sentix 41-3 cam pH elektrodu (hassasiyet 0,01) ve Platin Eh elektrodu (hassasiyet 1 mV),
- Cellox 325 çözülmüş oksijen ( $\text{O}_2$ ) elektrodu (hassasiyet  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ ).

### 3.1.3. Yeraltı Su Seviyesi Ölçümleri ve Hidrolik Eğim

Yapılan arazi çalışmalarıyla akiferin sınırları belirlenmiş ve bu çalışmanın tamamlanmasını takiben arazideki kuyuların dağılımı ve lokasyonları GPS teknolojisi kullanılarak saptanmıştır. Kıyı akiferinde Ekim 2006'da ve Ağustos 2007'de yapılan arazi çalışmaları kapsamında Devlet Su İşleri, Köy Hizmetleri ve şahıs kuyularında su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Su seviye ölçümleri için yüksek hassasiyete sahip (milimetrik bölümlü) Akım marka (Akım Elektronik, Adana) kuyumetre (150 m'lik) kullanılmıştır. Her bir kuyuya ait yeraltı su seviyesinin (deniz seviyesine göre) hesabı o noktadaki topografik yükseklik değerlerinden kuyuda ölçülen su seviyesi-yeryüzeyi arasındaki mesafenin çıkarılmasıyla elde edilmiştir [1].

### 3.1.4. Doygun Hidrolik İletkenlik Ölçümü

Karaduvar bölgesinde bulunan delta çökellerine ait hidrolik özellikler 2800KI model Guelph permeametre (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) yardımıyla yerinde (in situ) saptanmıştır. Sabit seviyeli bir permeametre olan bu alet ilk olarak Reynolds ve ark. [75] ve Reynolds ve Elrick [76, 77] tarafından

geliştirilmiştir. Guelph permeametre basit anlamda; yerde açılan küçük çaplı silindirik bir çukur (kuyu) içine yerleştirilen ve iç içe geçmiş iki saydam tüpten oluşan bir Mariotte şişesidir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Ölçüm kuyusuna yerleştirilmiş Guelph permeametre ve kuyu açmada kullanılan ekipmanlardan (burgu, silindir ve fırça) bir görünüm [1].

Bu alet, toprak yüzeyinden 15 ile 75 cm arasında değişen derinliklerde arazide doymuş hidrolik iletkenliğin ( $K_{fs}$ ) hızlı (15 dakika–2 saat arasında) ve basit bir şekilde saptanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada;  $K_{fs}$  değerlerini hesaplamak için Reynolds ve Elrick [76] tarafından önerilen teorik yaklaşım kullanılmıştır. Bu yöntem basit anlamda, yarıçapı  $a$  (cm) olan düşey ve silindirik bir kuyuda önceden belirlenen iki farklı sabit su yüksekliğinde ( $H_1$  ve  $H_2$ ) yarı dengeli akışın tahmini esasına dayanmaktadır. Burada, kuyu dibinden sırasıyla  $H_1$  ve  $H_2$  cm su yüksekliklerinde yapılan iki ölçüm sonucunda iki farklı dengeli akış hızı ( $Q_s$ ) elde edilir ve  $K_{fs}$  değerlerini hesaplamak için kullanılır.



Bu çalışmada,  $K_{fs}$  ölçümlerinin yapıldığı kuyuların derinlikleri ~35 cm ve yarıçapları 6 cm olarak seçilmiştir. Kuyuları istenilen ölçülerde açmak için, özel olarak tasarlanmış el burgusu (hand auger) kullanılmıştır.  $H_1$  ve  $H_2$  su yükseklikleri ise kuyu dibinden itibaren sırasıyla 5 cm ve 10 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Ölçümlere başlamadan önce, kuyu açımı sırasında kuyu çeperinde oluşan sıvanma tabakasını gidermek için özel bir fırça kullanılmıştır. Eğer bu sıvanma tabakası giderilmezse, kuyu çeperinden suyun toprağa geçişini engelleyerek ölçümlerin yanlış sonuçlar vermesine neden olabilmektedir [1].

### 3.2. LABORATUAR ÇALIŞMALARI

#### 3.2.1. Yeraltı Suyu Örneklerinde Hidrokarbon Analizleri

Suda çözülmüş olarak bulunan hidrokarbonların yada petrol türevlerinin analizinin yapılabilmesi için araziden alınan su örneklerinden bu fazların ekstrakte edilmesi gerekmektedir [1]. Petrol türevlerinin ekstraksiyonu yüksek geri kazanım (recovery) oranlarına sahip (>%85) katı faz ekstraksiyon (SPE – Solid Phase Extraction) kartuşları kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, arazide 1 L'lik amber şişelere (koyu renkli) alınan su numunelerinin 500 mL'lik kısmı SPE kartuşlardan otomatik pipetle ölçülerek geçirilmiştir [1]. Ekstraksiyon işlemi için 12'li Soxhlet düzeneği kullanılmış olup emme pompasına uygulanan emme basıncı yaklaşık olarak -5 mm Hg civarında sabit tutulmuştur. Ekstraksiyonu Mersin Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Çevre Jeokimyası Laboratuvarında yapılan örneklerin BTEX petrol türevlerinin (Benzen, Tolüen, Etilbenzen, orto-meta-para Ksilenler) analizleri Temmuz 2007'de Mersin Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Laboratuvarı'nda bulunan Agilent 6890 N marka Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) cihazı kullanılarak yapılmıştır [1]. BTEX bileşenlerinin ekstraksiyonu sırasında Mottaleb ve ark. [78] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. ÇALIŞMA ALANININ GENEL JEOLJİSİ

Bölge, farklı ortam koşullarını yansıtan ve birbirleriyle tektonik dokanıklı birden çok kaya birimi topluluğunu kapsamaktadır. Neojen kayalar altında bulunan birimler “Temel Birimler”, Neojen kayalar bu temel üzerinde diskordans olarak bulunduğu için, post-tektonik özellik taşıdığından ve genellikle ofiyolitleri örttüğünden dolayı “Tersiyer Birimleri” başlığı altında ayrı bölüm olarak tanımlanmıştır. Kuvaterner’de oluşan jeolojik ve morfolojik birimler ise “Kuvaterner Birimleri” başlığı altında tanımlanmıştır. Yapılan tanımlamalarda ve adlandırmalarda ŞENOL ve ark. [57] tarafından yapılan çalışmaya sadık kalınmıştır.

Mersin O33 paftası Toros dağ oluşum kuşağının Ecemiş Fayı güneydoğu kesiminde yer alır ve kuşağın belirgin jeolojik özelliklerini taşır. Genellikle kuzeybatı bölümlerdeki derin vadi içlerinde görülen Mersin Ofiyolitik Melanjı ve Paleozoyik yaşlı Karahamzauşağı Formasyonu üzerine Neojen birimleri diskordan olarak gelir. Çalışılan bölgenin hemen hemen tamamını oluşturan Kuvaterner Birimleri çalışma bölgesinin güney bölümlerinde yaygın olarak görülür. İnceleme alanı, Paleozoyik yaşta metamorfikleri, Üst Kretase yaşta bölgeye yerleşen ofiyolitik melanjı, Oligosen-Miyosen-Pliyosen zamanında karasal ortam, geçiş ortamı ve denizel ortam çökellerini, Kuvaterner yaşlı karasal ortam, geçiş ortamı çökelleri ile morfolojik birimleri kapsar. Şekil 4.1’de inceleme alanının kaya-stratigrafik birimlerinin genelleştirilmiş dikme kesiti görülmektedir.

#### 4.1.1. Temel Birimler

Çalışma bölgesinde temel birim olarak, Ziyaret Dağı ve çevresinde görülen ve otokton kaya olarak bilinen Permo-Karbonifer yaşlı Karahamzauşağı Formasyonu’na ait metamorfik kireçtaşı ve şistler ile bölgeye Üst Kretase zamanında sürüklenerek gelen Mersin Ofiyolitik Melanjı bulunmaktadır [57].

#### 4.1.1.1. Karahamzauşağı formasyonu

Stratigrafik olarak en altta bulunan Karahamzauşağı Formasyonu mermer, şist ve kuvarsit gibi kaya birimlerinden oluşmuştur. Formasyonun adı Ünlügenç [79]'ten alınmıştır. Karahamzauşağı Formasyonu sığ-derin denizde çökelmiş ve daha sonra metamorfizmaya uğramış, başlıca metamorfik kireçtaşları, mermer, şist ve kuvarsit gibi kayalardan oluşmaktadır. Tabakalanma düzenli olup 45°-60° ile güneydoğuya eğimlidir.

Metamorfik kireçtaşları koyu gri, kül renkli, sert, orta-ince katmanlı, yer yer laminalı, H<sub>2</sub>S kokulu, çoğunlukla mikrokristaller halinde kalsitten oluşmuş, az miktarda muskovit, kuvars, plajiyoklas ve demirce zengin opak mineraller içermektedir. Mermerler beyaz, kirli beyaz, gri renklerde, orta-ince katmanlı metamorfik kireçtaşları içinde devamsız katmanlar ve merccekler halinde görülür. Şistler siyah-gri renkli, ince taneli kuvars, muskovit, serizit ve plajiyoklastan oluşup yönlenme göstermektedir. Demirce zengin opak mineraller ve eser halde zirkon içermektedir. Kuvarsitler beyaz ve kirli beyaz renklerde, kayacın tamamı ufak ve birbirleriyle girik, kenetlenmiş kuvars kristallerinden oluşmaktadır. Eser olarak mika ve opak mineraller içermektedir. Karahamzauşağı Formasyonu, Kuzgun Formasyonu tarafından diskordan olarak örtülmüştür. Formasyonun alt dokanağı yüzeylemediğinden kalınlığı tam olarak bilinmemekle beraber arazi gözlemlerine göre 500 m'nin üzerindedir [57]. Karahamzauşağı Formasyonu metamorfizma etkisiyle ilksel kaya türü ve stratigrafi özelliklerini önemli ölçüde yitirmiştir. Ancak büyük olasılıkla laminalı ince tabakalı yapı gösteren kristallenmiş kireçtaşı birimi ve laminalı şist arakatlı kuvarsitlerin bulunuşu formasyonun derin-sığ deniz ortamında çökeldiğini göstermektedir.

#### 4.1.1.2. Mersin ofiyolitik melanjı

Ofiyolitik birimler genellikle Mersin'in kuzeyinde yer alan derin vadiler içinde görülmektedir. Ofiyolitik melanj içinde ofiyolitik kayalardan gabro, harzburjit, verlit, dünit, klinopiroksenit, verzolit, diyabaz, radyolarit ve derin deniz

sedimanlarının yanı sıra ofiyolitlerin yerleşimi esnasında havzaya düşen Permiyen, Jura, Kretase yaşlardaki yabancı kayaç bloklarını içermektedir. Çalışma alanındaki ofiyolitlerde genellikle serpantinleşme hakimdir. Bölgede çalışan çeşitli araştırmacılar tarafından ofiyolitik birimin bölgeye yerleşim yaşının Üst Kretase olduğu vurgulanmıştır [57]. Çalışma bölgesinde ofiyolitik melanj üzerine Oligosen-Miyosen yaşlı Gildirli Formasyonu diskordan olarak gelmektedir. Gildirli Formasyonu'nun oluşmadığı yerlerde ofiyolitik melanj veya birim içindeki Jura-Kretase yaşlı kireçtaşı blokları üzerine Alt-Orta Miyosen yaşlı Karaisalı Formasyonu doğrudan diskordan olarak oturmaktadır.

#### 4.1.2. Tersiyer Birimleri

Tersiyer birimleri birbirleriyle yanal ve dikey geçişli olup, Oligo-Miyosen yaşlı Gildirli Formasyonu, Alt-Orta Miyosen yaşlı Karaisalı Formasyonu ve Güvenç Formasyonu, Orta-Üst Miyosen yaşlı Kuzgun Formasyonu ve Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Handere Formasyonu olarak ayrılanmıştır [57].

##### 4.1.2.1. Gildirli formasyonu

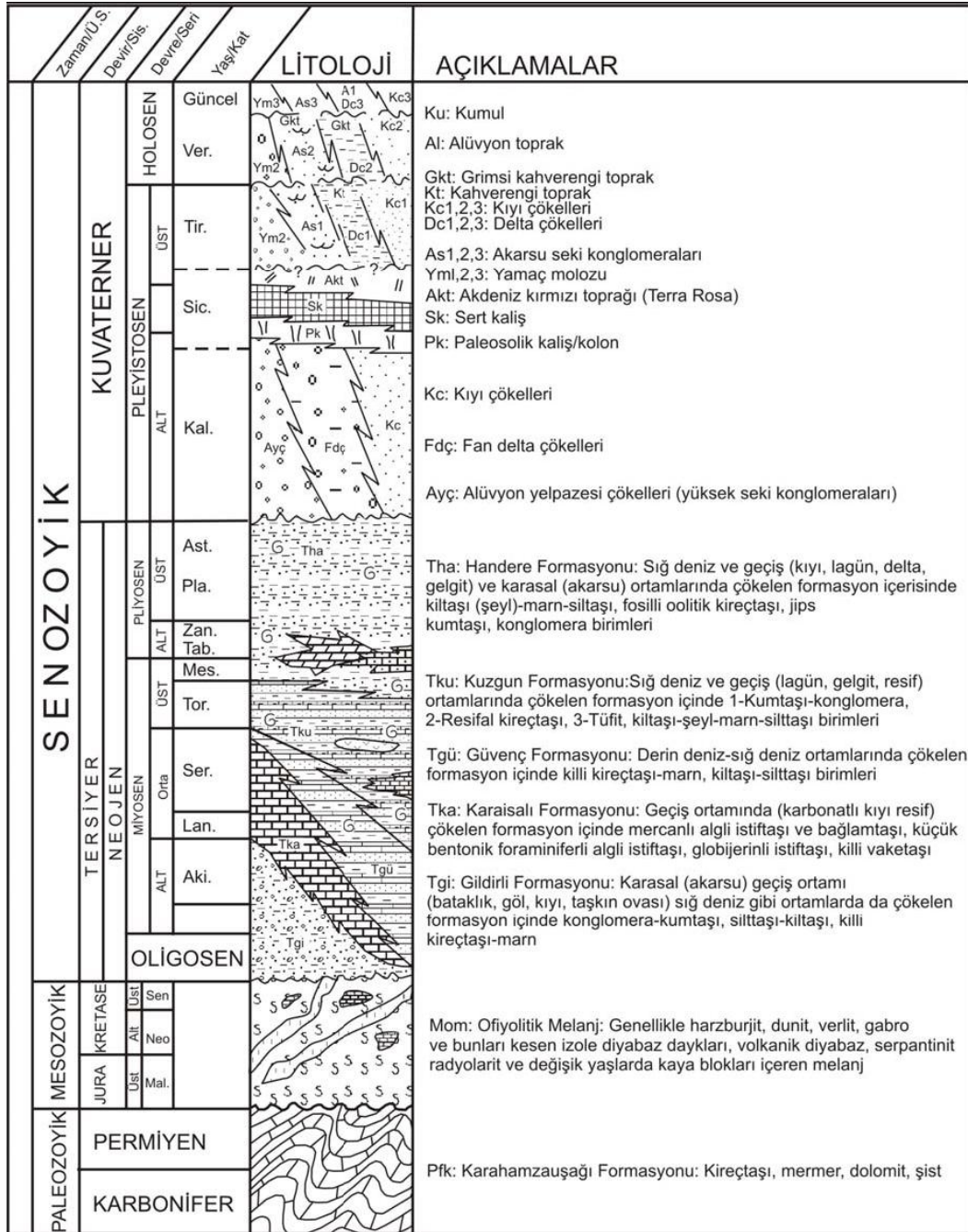
Gildirli Formasyonu, başlıca konglomera-kumtaşı, silttaşı-kiltaşı ve killi kireçtaşı-marn gibi belirgin üç kaya biriminden oluşmuştur [57]. Bunlar birbirleri ile girik ve ardanmalı olmakla beraber, konglomera-kumtaşı birimi formasyonun alt bölümlerinde, silttaşı-kiltaşı birimi orta bölümlerinde ve killi kireçtaşı-marn birimi de üst bölümlerde egemendir. Schmidt [80] tarafından Adana havzasında isimlendirilen formasyonun tip kesit yerini inceleme alanı dışında N34-a1 paftası içerisinde bulunan Gildirli Köyü oluşturmaktadır. Çalışma sahasına en yakın tip kesit yeri O33-a1 paftasında Kerimler Köyü'nün 500 m doğusunda Gümüşçe Çayı vadisi içi Dalakdere ölçülü stratigrafik kesiti olarak verilebilir.

Konglomera-kumtaşı birimi, 0,5-1,0 m kalınlıkta ve 10-300 m uzunlukta, genellikle mercek ve kama şekilli konglomera ve kumtaşı katmanlarından oluşmuştur. Pembemsi, kırmızımsı, yeşilimsi, beyazımsı, siyahımsı renklerin hakim

olduğu konglomera-kumtaşı biriminin kırıntıları genellikle değişik renklerde kristalize kireçtaşı-mermer, ofiyolitik birimler, çört ve kuvarsit gibi Miyosen öncesi kayalardan türemiştir. Kırıntılar genellikle köşeli-yuvarlak ve uzuncadır. Kil matriksli ve karbonat çimento ile sıkı-çok sıkı tutturulmuştur. Karaisalı Formasyonu altında ve taban konglomerası şeklinde olan bölümlerde kırıntılar iyi yuvarlak ve kısmen yassıdır. Çoğunlukla kötü boylanmalı olan konglomera-kumtaşı birimi, kısmen dereceli, yer yer büyük ölçekli çapraz katmanlı çakıl ve kum barlı, hemen hemen tüm katmanın tabanı aşındırmalıdır. Karaisalı Formasyonu altına gelen ve taban konglomerası özellikleri gösteren bölümler iyi boylanmıştır [57].

Silttaşı-kiltaşı birimi 2-50 cm kalınlıkta, onlarca metre yanal yayımlı silttaşı ve kiltası katmanlarından oluşmuştur. Hemen hemen herbir konglomera-kumtaşı birimi üst bölümlere doğru, göreceli olarak silttaşı-kiltaşı birimine geçmektedir [57]. Akarsuyun aşındırma özelliklerinden dolayı bu birim çoğunlukla değişik boyutlarda kama ve mercekler şeklinde görülür. Gri, yeşil, siyah renklerde silttaşı ve kiltası katmanlarından oluşan bu birim bazı bölümlerinde çakıl ve kum kırıntıları içerir. Bazı seviyelerde katmanlar arasında küçük boyutlu kumtaşı mercekleri ve kamaları görülür. Özellikle birinci birim ile girik ve geçişli olduğu bölümlerde bitki kalıntılı ve ince katmanlar halinde linyit oluşumludur.

Killi kireçtaşı-marn birimi 0,5-100 cm kalınlıkta, yüzlerce metre yanal uzanımlı killi kireçtaşı ve marn katmanlarından oluşur. Birim beyaz, açık gri, bej renklerde, genellikle sert, bazı bölümlerde yumuşak, yer yer kum ve çakıl serpintilidir [57]. Bu birim, üzerine gelen Karaisalı Formasyonu ile düşey geçişlidir. Gildirli Formasyonu, oturduğu birimler üzerine diskordan olarak gelmektedir. Bölgede Gildirli Formasyonu'nun kalınlığı oturduğu paleotopoğrafyanın özelliklerine bağlı olarak çok değişken olup, 1-175 m arasında değişmektedir. Formasyon, genellikle Karaisalı Formasyonu içinde açılmış ve Miyosen öncesi birimlere kadar aşındırılmış vadi tabanlarında görölmektedir [57].



Şekil 4.1. Çalışma alanının genelleştirilmiş dikme kesiti [57, 59].

Yukarıda değinilen birimlerin fasiyes özellikleri gözönüne alındığında Gildirli Formasyonu'nu oluşturan konglomera-kumtaşı birimlerinin akarsu, silttaşı-kiltası, killi kireçtaşı ve marn birimlerinin taşkın ovası, göl, sığ deniz, lagün gibi ortam ve alt ortamlarda çökdikleri söylenebilir. Bu birimlerin ardalanmalı ve

geçişli olması ortamın duraysız (küçük boyutlarda alçalan ve yükselen) olduğu, altlarda kaba kırıntılıların, üst bölümlerde killi kireçtaşı-marn birimlerinin egemen olması ise duraysızlığın yanı sıra transgresyonda hüküm sürdüğünü göstermektedir [57].

#### 4.1.2.2. Karaisalı formasyonu

Karaisalı Formasyonu genellikle beyaz, açık gri, bej renklerde, yer yer bol algli, mercanlı, gastropod ve lamelli kavkılı, killi, yumrulu, erime boşluklu, yer yer iyi katmanlı resifal kireçtaşlarından oluşmuştur. Formasyona Schmidt [80] Karaisalı Kalkeri adını vermiş, daha sonra Görür [81, 82], Yetiş ve Demirkol [83] Karaisalı Kireçtaşı, İlker [84], Yalçın ve Görür [85], Yetiş ve Demirkol [86] Karaisalı Formasyonu adını vermiştir. Bu ad formasyon özelliklerinin en iyi görüldüğü yer olan Adana'nın Karaisalı ilçesinden alınmıştır.

Resifal kireçtaşı olan Karaisalı Formasyonu, genellikle mercan, alg, foraminifer, ekinoderm, mollusk, bryozoa, halimeda, annelid tipleri gibi resif yapıcı organizmaların matriks ve kalsit ile çimentolanmasından oluşmuştur. Alt-Orta Miyosen zamanı boyunca bölgede hüküm süren geçiş ortamında (karbonatlı kıyı/resif) çökelen Karaisalı Formasyonu içinde altı birim ayıtlanabilir. Bunlar:

1. Mercanlı-algli istiftaşı ve bağlamtaşı birimi,
2. Küçük bentonik foraminiferli-algli istiftaşı birimi,
3. Mercanlı-algli vaketaşı ve istiftaşı birimi,
4. Büyük bentonik foraminiferli-algli istiftaşı birimi,
5. Globigerinli-algli istiftaşı birimi,
6. Globigerinli-killi vaketaşı birimi olarak adlandırılmışlardır.

Bu birimlerden ilk dört tanesi arazide birlikte topografik yükseltileri oluştururken, son iki tanesi bunlar arasında yada yakın çevresinde yer alan çukur ve düzlüklerde yüzeyler. Birimler ayrı ayrı haritaya geçirilmeyip hepsi bir formasyon adı altında haritalanmıştır (57).

Karaisalı Formasyonu; Miyosen öncesi birimler üzerine diskordon olarak gelmesine rağmen, Gildirli Formasyonu üzerine geçişli ve transgresif olarak gelmektedir [57]. Ayrıca, Kuvaterner birimleri formasyonu yer yer diskordan olarak yamalar şeklinde örtmektedir. Karaisalı Formasyonu'nun kalınlığı aşınma koşullarına bağlı olarak değişim göstermekte ve yayılımında düzensizlikler görülmektedir. Bu formasyonun kalınlığı başvuru kesit yerlerinde maksimum 300 m'ye ulaşmaktadır [57]. Fosil içeriğine göre formasyonun yaşının Alt-Orta Miyosen (Burdigaliyen-Langiyen-Serravaliyen) olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen fasiyes özelliklerine göre Karaisalı Formasyonu'nun karbonatlı kıyı (resif) ortamında çökeldiği söylenebilir [57].

#### 4.1.2.3. Güvenç formasyonu

Yeşilimsi gri, gri, beyazımsı sarı renklerde olan Güvenç Formasyonu stratigrafik olarak alt bölümlerde killi kireçtaşı-silttaşı birimlerinin egemen olduğu çökellerden meydana gelmiştir. Formasyona bu adı ilk olarak Schmidt [80] vermiştir. Alt-Orta Miyosen zamanında bölgede oluşan resif önü sığ-derin deniz ortamlarında çökelen Güvenç Formasyonu içinde iki birim ayırtlanmıştır [57]. Çoğu yerde bunlar birbirleri ile geçişlidir. Bunlar:

1. Killi kireçtaşı-marn birimi,
2. Kiltası-silttaşı birimidir.

Killi kireçtaşı-marn birimi stratigrafik olarak formasyonun alt bölümlerinde (Gildirli Formasyonu ve Karaisalı Formasyonu ile geçişli), kiltası-silttaşı birimi orta ve üst bölümlerde (Kuzgun Formasyonu ile geçişli olarak) egemendir. Formasyonun üzerine geldiği paleotopografyanın değişken olması, transgresyon ve regresyona bağlı olarak birimlerin çökeldiği ortam koşullarının önemli ölçülerde değişmesi nedeniyle, bazı bölgelerde bu sıralamada değişiklikler görülmektedir. Güvenç Formasyonu'nun görünen kalınlığı 50-600 m arasında değişmektedir. Birimlerin fasiyes özelliklerine göre Güvenç Formasyonu'nun resif önü sığ-derin deniz ortamlarında çökeldiği söylenebilir [57].



#### 4.1.2.4. Kuzgun formasyonu

Orta-Üst Miyosen zamanında bölgede, östatik deniz seviyesindeki oynamalara (transgresyon ve regresyonlar) bağlı olarak oluşan sığ deniz ve geçiş ortamlarında (kıyı, lagün, delta, gelgit, resif) çökelen Kuzgun Formasyonu içinde dört birim ayıtlanmıştır. Bunlar; kumtaşı-konglomera, resifal kireçtaşı, tüfit ve kıltaşı-marn-silttaşı birimleridir [57]. Bunlardan birincisi formasyonun alt bölümlerinde, ikincisi alt-orta bölümlerde, üçüncüsü orta bölümlerde, dördüncüsü üst bölümlerde egemendir. Formasyona bu adı ilk defa Schmidt [80] vermiştir. Resifal kireçtaşı ve tüfit, formasyon içinde ayırtlanarak, diğerleri ayrılmadan bir formasyon adı altında haritalanmıştır [57].

Kumtaşı-konglomera birimi, 0,5-10 m arasında değişen kalınlıklarda ve 10-500 m arasında değişen uzunluklarda, genellikle mercek ve kama şekilli kumtaşı ve konglomera katmanlarından oluşmuştur. Sarımsı beyaz rengin hakim olduğu kumtaşı-konglomera biriminin kırıntıları genellikle Miyosen öncesi kayalar olan ofiyolit, kuvarsit, çört, değişik renklerde kireçtaşı ve mermer gibi kayalardan türemiştir. Birimin bazı bölümlerinde kuvars ve feldispat gibi kırıntıların toplamı %90'lara kadar çıkmaktadır. Hebilli Köyü kum ocakları buna örnek olarak verilebilir. Birim; bazı seviyelerinde çok az, bazı seviyelerinde de yoğun karbonat çimentolu, karbonat çimentonun yoğun olduğu bölümlerde sert ve sıkı tutturulmuş, az olduğu bölümlerde gevşek ve dağınıktır [57].

Resifal kireçtaşı birimi (Tkuk), kumtaşı-konglomera birimi içerisinde birkaç seviye halinde bulunur. Resifal kireçtaşları, 5-50 m kalınlıkta ve yüzlerce metre uzunlukta mercekler şeklinde olup beyazımsı-bej renkte, masif ve/veya katmanlı, diğer birimler ile yanal ve düşey geçişli, bol fosilli, çoğunlukla kuvars ve feldispat kırıntısı olan çakıl ve kum içeriklidir [57].

Tüfit birimi (Tkut) ilk kez Schmidt [80] tarafından tanımlanmıştır. Birim, açık gri-kirli beyaz renkte, değişik oranda kil, kum ve çakıl içerikli, biyotit ve az mafik mineralli, bazı bölümlerde düşük açılı çapraz katmanlı, üst bölümlere doğru kil

oranı artmakta ve denizel lamelli brans, gastropod fosilleri içermektedir. Tüfitten alınan örneklerin kimyasal analizleri sonucu %46,5-67,8 SiO<sub>2</sub>, %9,3-14,5 H<sub>2</sub>O, %1,4-2,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %1,2-5,5 Na<sub>2</sub>O, %1,9-3,2 K<sub>2</sub>O içerdiği, fiziksel özellikler olarak doğal neminin %13,75, ağırlıkça su emmesinin %30,21, kuru birim hacim ağırlığının 0,68 g/cm<sup>3</sup> olduğu görülmüştür [83].

Marn-şeyl-kumtaşı birimi içerisinde oran olarak kumtaşı katmanları marn ve şeyle göre oldukça azdır. Katmanlar 1-30 m kalınlıkta onlarca metre ve kilometrelerce uzunlukta mercekler şeklindedir [57]. Marn ve şeyl katmanları yeşilimsi-gri, alacalı renklerde, lamelli (ostrea), gastropod fosilli, yoğun organizma eşelemesi nedeniyle laminalanma ve katmanlanma iyi gelişmemiş, yer yer küçük kumtaşı mercekli ve kum-çakıl serpintili karbonat çimento ile tutturulmuştur. Birimdeki kumtaşı katmanları, alt bölümlerde üst bölümlere göre daha fazladır. Bunlarda alttan üste doğru derecelenme görülür ve karbonat çimento ile az-orta tutturulmuştur. Kırıntıların çoğu feldispat ve kuvarstan oluşmuştur.

Kuzgun Formasyonu'nun kalınlığı 50-1500 m arasında değişmektedir. Formasyonun üzerine Handere Formasyonu uyumlu ve geçişli olarak gelmektedir. Şafak ve Nazik [87] buldukları fosillere göre formasyonun yaşının Tortoniyen-Messiniyen olabileceğini belirtmişlerdir. Kuzgun Formasyonu'nu oluşturan kumtaşı-çakıltaşı, silttaşı-marn-şeyl, tüfit ve resifal kireçtaşı birimlerinin yukarıda verilen fasiyes özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, bunların kıyı-sığ ve derin deniz ortamı koşullarında çökeldiği söylenebilir [57].

#### 4.1.2.5. Handere formasyonu

Beyazımsı, sarımsı, yeşilimsi, gri ve siyah renklerde olan Handere Formasyonu kilttaşı-marn-silttaşı, fosilli oolitik kireçtaşı, alçıttaşı (jips) ve kumtaşı-konglomera gibi belirgin dört birimden oluşmuştur [57]. Bunlar birbirleri ile girik olup, ilk üçü çoğunlukla formasyonun alt bölümlerinde, diğeri üst bölümlerinde egemendir. Formasyona bu adı ilk defa Schmidt [80] vermiştir. Üst Miyosen'de (Messiniyen) bölgede uzunca bir zaman hüküm süren kurak ve sıcak iklim

(Messiniyen krizi) nedeni ile denizel çökellerin yanı sıra jips (anhidrit) ve tuz birimleri çökelmiştir. Daha sonra Pliyosen zamanında hüküm süren ılık ve yağışlı iklimler ile östatik deniz seviyesindeki oynamalara (transgresyon ve regresyonlar) bağlı olarak gelişen sığ deniz-geçiş (kıyı, lagün, delta, gelgit) ve akarsu ortamlarında çökelmiştir. Fosilli oolitik kireçtaşı ve alçıtaşı (jips) birimleri formasyon içinde ayırtlanarak, diğerleri ayırtlanmadan bir formasyon adı altında haritalanmıştır [57].

Kiltaşı (şeyl)-marn-silttaşı birimi, Kuzgun Formasyonu'ndaki dördüncü birime çok benzer ve 5-100 m arasında değişen kalınlıklarda ve 100-1000 m arasında değişen uzunluklarda katmanlardan oluşmuştur. Yeşilimsi gri-koyu gri renklerin hakim olduğu kiltaşı, marn ve silttaşlarının ardalanmasından oluşan bu birim bazı bölümlerinde ince kum kırıntıları içerir [57].

Fosilli oolitik kireçtaşı birimi sarımsı-beyaz rengin hakim olduğu, sert ve sıkı tutturulmuş bir birimdir. Birimin çoğu bölümlerinde oolitik yapı iyi gelişmesine karşın bazı bölümlerinde görülmez veya iyi gelişmemiştir [57].

Alçıtaşı (jips) birimi 0,1-25 m kalınlıkta ve 50-250 m genişlikte yayımlı katmanlar halindedir. Beyaz-kirli beyaz renklerde olan alçıtaşı bazı bölümlerde kil ve silt boyutlu kırıntılarla ardalanmalıdır. Bazı bölümlerde iri kristalli, bazı bölümlerde ufak taneli ve kesme şeker görünümündedir. Kimyasal analizler sonucunda içeriğinde %33 CaO, %45 SO<sub>3</sub> ve %20 H<sub>2</sub>O olduğu saptanmıştır [57].

Kumtaşı-konglomera birimi, Berdan baraj gölü gövdesi sağ sahilinde tipik olarak görülür. Bu birim birkaç cm'den birkaç m'ye erişebilen kalınlıklar arasında değişen, onlarca cm ve yüzlerce metre uzunluklar arasında değişen katmanlı, mercek ve kama şeklindedir. Birimde kumtaşı egemen olup, yer yer konglomera katmanları görülür. Kırıntılar polijenik olup, karbonat çimento ile orta-sıkı tutturulmuş ve iyi yuvarlanmıştır.

Handere Formasyonu alttaki Kuzgun Formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir ve geçişli dokanaklıdır. Bu formasyon üzerine Kuvaterner birimleri diskordan olarak gelmektedir. Handere Formasyonu'nun üzeri genellikle Kuvaterner

birimleri ile örtülü olduğundan kesin kalınlık verilemez, ancak çalışma bölgesinde 50-500 m arasında değişen kalınlıkta görülmektedir [57]. Handere Formasyonu'nun yukarıda belirtilen fasiyes özellikleri göz önüne alındığında, kurak-sıcak iklimler ile sık sık değişen küçük ölçekte transgresyon ve regresyonlar sonucu oluşan sığ deniz, geçiş (kıyı, lagün, delta, gelgit) ve akarsu ortamlarında çökeldiği söylenebilir.

#### 4.1.3. Kuvaterner Birimleri

Kuvaterner zamanında karasal ve geçiş ortamı koşullarının hüküm sürdüğü çalışma bölgesinde oluşan birimler farklı fasiyes özellikleri göstermeleri nedeni ile Kalabriyen-Siciliyen zamanında oluşan birimler ve Tirreniyen-Güncel zamanında oluşan birimler olarak iki bölümde incelenmiştir [88].

##### 4.1.3.1. Kalabriyen-Siciliyen birimleri

Altındaki birimler üzerine açılı diskordans olarak oturan ve üstündeki birimler tarafından diskordan olarak örtülen Kalabriyen-Siciliyen birimleri alüvyon yelpazesi çökelleri/yüksek seki konglomeraları (Ayç), fan delta çökelleri (Fdç) ve kıyı çökelleri (Kç) ile pedalojik oluşukları (Paleosolik kalış/kolon horizonu (Pk), Akdeniz Kırmızı Toprağı/Terra Rosa (Akt) ve sert kalış (Sk)) içermektedir [88]. Kalışlerin eğimi 1°-10° arasında değişir ve hakim eğim yönü güneye doğrudur.

##### a) Alüvyon Yelpazesi Çökelleri/Yüksek Seki Konglomeraları (Ayç)

Şenol [89]'un glasi tipi konglomera veya konglomeratik kalış olarak tanımladığı birimin aynısı olan alüvyon yelpazesi çökelleri (Yüksek Seki Konglomeraları) aşınma yüzeyleri üzerinde çökelmişlerdir. Pliyosen-Pleyistosen zamanında oluşan bu yüzey, kuzeyden güneye doğru göreceli olarak eğimi azalan, doğu-batı yönünde ondülasyon gösteren, enine ve boyuna onlarca km uzanımı olan Adana-Mersin hattı güneyinde denize erişen etekdüzü şeklinde bir morfolojik birimdir. Şenol [89] bu birimi yüksek seki konglomeraları olarak tanımlamış ve üzerine biriken kırıntılara yüksek seki konglomeraları adını vermiştir. Alüvyon

yelpazesi çökelleri bu birim üzerinde gelişmiş ve Kuvaterner başlarında bölgede kısa dönemler şeklinde hüküm süren flüvyal ve interflüvyal iklim koşullarında genellikle kuzeydeki Toros Dağı ofiyolitik itilme kuşağında ayrıışan materyalin moloz akıntısı ve çamur akıntısı şeklinde gelmesi sonucu oluşmuştur [88].

Birim 2-25 cm boyutlarında çakıllı, kum, silt ve kil matiriksli, karbonat (kaliş) çimento ile sıkı-çok sıkı tutturulmuş, iç yapısız ve kötü boylanmalıdır. Kırıntılar başatlık sırasına göre ofiyolitik, metamorfik, magmatik ve Neojen yaşta sedimanter kayaçlardan türemiştir [89]. Taban topografyasına bağılı olarak ilksel durumda birbirlerinden kopuk irili ufaklı parçalar halinde olan (1-25 m arasında değışen kalınlıklarda ve birkaç metre hatta binlerce metre yayılım gösteren) bu birim daha sonra Pleyistosen-Holosen zamanında gelişen akarsular tarafından aşındırılarak üzerinde vadiler açılmış, sık sık kesintilere uğramıştır. Bu yüzden çoğı yerde haritaya geçirilememiştir [88]. Bu birimin mostrası genellikle Mersin-Tarsus hattının kuzey bölümlerindeki vadi yamaçlarının üst bölümlerinde, kalişlerin altında sıkça görölmektedir.

#### b) Fan Delta Çökelleri (Fdç)

Büyük olasılıkla fan delta çökellerinin (Fdç) Adana-Tarsus hattının güney bölümlerinde gelişmesi gerekmektedir. Siciliyen sonlarında bu bölümlerin çöküntüye uğraması ve buralarda daha genç sedimanların çökmesi nedeni ile üzerleri örtüldüğünden birim görölmez [88].

#### c) Kıyı Çökelleri (Kç)

Bölgede, Kalabriyen-Siciliyen zamanında oluşan kıyı çökellerinin de (Kç) fan delta çökelleri gibi (Fdç) Adana-Tarsus hattının güney bölümlerinde gelişmesi gerekmektedir. Siciliyen sonlarında bu bölümlerin çöküntüye uğraması ve Seyhan delta çökelleri ile doldurulması sonucu sınırlı alanlarda görölür [88].

#### d) Pedolojik Oluşuklar

Büyük bir olasılıkla erken Kuvaterner'de bölgede hüküm süren flüviyal (yağışlı) ve interflüviyal (kurak) iklim koşullarında, eski kayaların yüzeylerinde şiddetli ayrışmaların meydana gelmesinin yanısıra toprağı oluşturan diğer faktörlerinde etkisiyle pedolojik oluşuklar (Pedolojik Kalış/Kolon Horizonu, Akdeniz Kırmızı Toprağı/Terra Rosa ve Sert Kalış) meydana gelmiştir [89, 90].

#### e) Paleosolik Kalış/Kolon Horizonu (Pk)

Önceleri bölgede traverten olarak bilinen, daha sonra kapilarite ile oluştuğı söylenen paleosolik kalış/kolon horizonunun (Pk), Adana-Kurttepe bölgesinde çalışma yapan Çavuşgil [90] tarafından, pedolojik kökenli olduğu saptanmıştır. Bunlar sert kalışın altında olup, en iyi silttaşı-kiltaşı yüzeyinde gelişim gösterir. En fazla 10 cm çapında birkaç metre uzunluğunda, dik ve dike yakın, yukarıdan aşağıya doğru göreceli olarak kireç oranı azalan sütunlardan oluşan birim kalsit minerali dışında, başatlık sırasına göre simektit, paligorskit, illit, kaolinit gibi kil mineralleri içermektedir [88].

#### f) Akdeniz Kırmızı Toprağı/Terra-Rosa (Akt)

Bölgede paleosolik kalış/kolon horizonu (Pk) ile oluşmaya başlayan Akdeniz Kırmızı Toprağı/Terra Rosa (Akt) Siciliyen sonlarına doğru oluşumunu tamamlamış ve daha sonraki zamanlarda olgunlaşmaya devam etmiştir [89; 90; 91]. Bu topraklar genel olarak %20 kum, %40 silt ve %40 kil boyu materyallerden ibaret olup, %20 dolayında CaCO<sub>3</sub>, toplam olarak %45 SiO<sub>2</sub>, %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5 dolayında Fe elementi ve başatlık sırasına göre simektit, paligorskit, illit, kaolinit gibi kil mineralleri içermektedir [89].

#### g) Sert Kaliş (Sk)

Çavuşgil [90]'in bölgede yaptığı çalışmaya kadar sert kalişin kökeninin de Paleosolik kaliş gibi olduğu bilinmekteydi. Bu çalışma sonucu bunun kökeninin de pedolojik olduğu saptanmıştır. Oluşum sırasında Akdeniz kırmızı topraklarındaki karbonatın bünyeden uzaklaşması (dekalsifikasyon) sonucu kalsitin genellikle Paleosolik kaliş ile Akdeniz kırmızı toprakları arasında zamanla yoğunlaşması (kalsifikasyon) sonucu sert kaliş horizonu oluşur [90]. Başka bir deyişle (Akt)'nin ilk oluşum evresi olan (Pk)'nin üst bölümlerinin tamamen kalsite doygun hale gelmesi sonucu sert kaliş oluşur ve alt bölümlere doğru (Pk) oluşumu devam eder. 0,1-3 m dolayında kalınlıkta olan ve oluştuğu yüzeyin morfolojisine uyumluluk gösteren sert kaliş, %85 dolayında CaCO<sub>3</sub> içerir. Akdeniz kırmızı toprakları ve sert kaliş oluşuklarında simektitin başatlık olması, ortamın zayıf alkali ve nötr olduğunu, paligorskite kil minerallerinin bulunması karasal ve kurak dönem Pleyistosen ürünü olduğunu, flüvyal devrelerin interflüvyal devrelerden daha az olduğunu, oluşuklarda saptanan kil minerallerine göre ayrışmaların Pleyistosen başlarında başlayıp sonrada devam ettiğini göstermektedir [92, 93]. Kapur ve ark. [92] tarafından saptanan paligorskite kil minerallerinin oluşum zamanını saptanan Yüksek Seki Konglomeraları, Fan Delta Çökelleri ve Kıyı Çökellerinin karasal olaylara sahne olması ile uyumluluk göstermektedir.

#### 4.1.3.2. Tirreniyen-Güncel Birimleri

Altaki birimler üzerine uyumsuz olarak gelen Tirreniyen-Güncel birimler yamaç molozları (Ym1, Ym2, Ym3), Akarsu seki konglomeraları (As1, As2, As3), delta çökelleri (Dç1, Dç2, Dç3), kıyı çökelleri (Kç1, Kç2, Kç3), kumul (Ku) ve pedolojik oluşuklar olan kahverengi toprak (Gkt), alüvyal toprak (Al) gibi kısımlara ayrılmıştır. Karasal ortamlarda ayrışma-aşınma-taşınma ile birlikte morfolojik-pedolojik oluşuklar meydana gelirler. Geçiş ortamı ve denizel havzada bunlarla eş zamanlı jeolojik-stratigrafik birimler çökelmiştir [88]. Bu birimlerden vadi yamaçlarında oluşan seki konglomeraları çok küçük boyutlu olduklarından çoğu yerde haritaya geçirilememiştir.

a) Yamaç Molozları (Ym1, Ym2, Ym3)

Adana bölgesinde, Tirreniyen-Güncel zamanda oluşmuş, yaşlıdan gence doğru Ym1, Ym2 ve Ym3 olarak üç ayrı yamaç molozu görülür. Morfolojik olarak yaşlılar üst seviyelerde ve vadi tabanlarında yer alır. Bunlara dağ eteklerinde ve vadilerin memba bölümlerinde sıkça rastlanır. Kırıntılar, üzerine oturduğu kayalardan ve yakın çevredeki birimlerden türemiş olup, blok boyundan kil boyutuna kadar değişir ve köşelidir. Birim kötü boylanmalı olup, yaşlılar karbonat çimento ile sıkı tutturulmuş ve yeniler gevşektir [88].

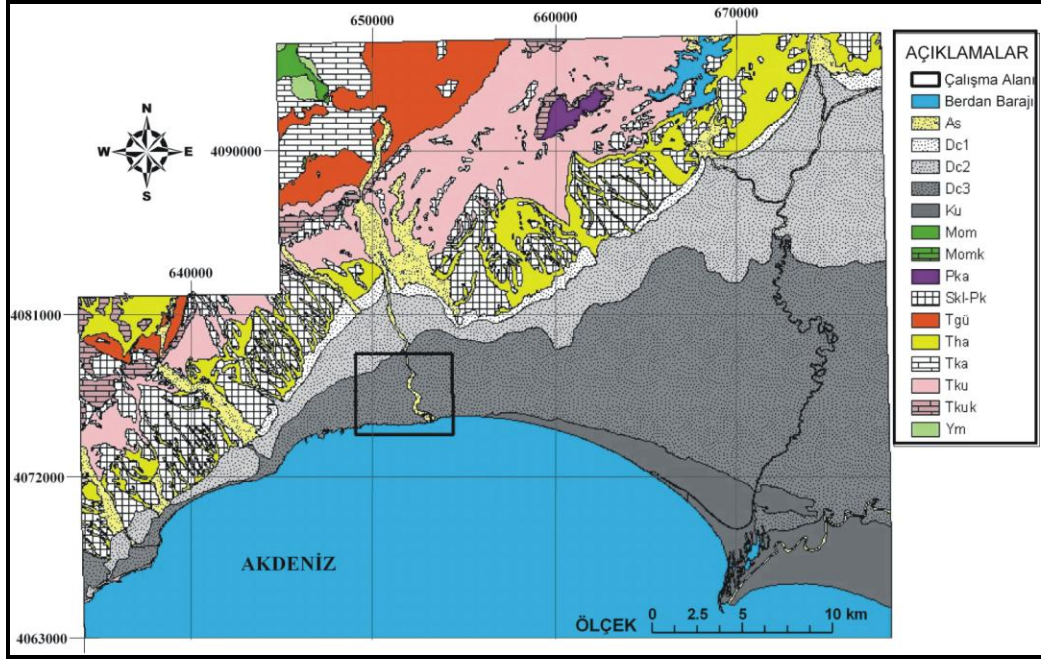
b) Akarsu Seki Konglomeraları (As1, As2, As3)

Çalışma bölgesinde, akarsu seki konglomeraları yaşlıdan gence ve morfolojik olarak üstten alta doğru As1, As2, As3 olarak üçe ayrılmıştır. Bunlar genellikle devamlı akan akarsuların vadi tabanlarında yer alır. Kalınlıkları 0,5-3 m ve genişlikleri 5-3000 m arasında değişen mercek ve kama şeklindedirler. Sık sık yan dereler tarafından aşındırılarak parçalara bölünmüşler, küçülmüşler veya yok olmuşlardır. Yaşlılar karbonat çimento ile orta-sıkı tutturulmalarına karşın gençler gevşektir.

c) Delta Çökelleri (Dç1, Dç2, Dç3)

Siciliyen sonlarında Adana bölgesinde meydana gelen çöküntü alanlarının daha sonra oluşan akarsu ve kolları tarafından getirilen materyallerle dolması sonucu delta çökelleri birikmiştir. Bölgede Seyhan deltası olarak gelişen çökeller stratigrafik olarak alttan üste ve karadan denize doğru Dç1, Dç2, Dç3 olarak üçe ayrılabilir [88].





Şekil 4.2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin sayısal jeoloji haritası (Şenol ve ark.[57] ve Hatipoğlu [59]'ndan değiştirilerek).

#### d) Kıyı Çökelleri (Kç1, Kç2, Kç3)

Bölgede büyük olasılıkla Tirreniyen'den günümüze kadar süregelen delta çökeline bağlı olarak gelişen delta loblarının denize ulaştığı yerlerde kıyı çökelleri (Kç) oluşmuştur. İki metre kıyı sekisi olarak bilinen ve kıyı kumları içinde irili ufaklı kirli beyaz renkli pomza taşı (Kefe taşı) kırıntıları içeren ve Kç2 olduğu saptanan kıyı çökellerinin Ege Denizin'de M.Ö. 4000-5000 yıllarında patlayan volkanizma ile eş zamanlı olduğu düşünülmektedir. Daha sonra deniz seviyesindeki alçalma ile Kç3 olarak adlandırdığımız güncel kıyı çökelleri oluşmuştur [88].

#### e) Kumullar (Ku)

Yakın tarihte ve günümüzde kıyıda esen şiddetli rüzgarların etkisi ile kıyıda kumların onlarca metre içerilere kadar taşınması sonucu bölgede kıyı kumulları oluşmuştur. Bunlar kıyı boyunca yayılım gösteren 1-10 m yükseklikteki tepecikler veya şeritler halindedirler. Bitki örtüsünden yoksun olanlar rüzgarın etkisi ile

hareket ederler ve sık sık yer değiştirirler. Kumulların kaynak kayasının Miyosen öncesi metamorfikler, magmatikler, ofiyolitler, Neojen ve daha genç birimler olduğu söylenebilir. Genellikle ofiyolitlerden türeyen mineraller egemendir.

f) Pedolojik Oluşuklar/Kahverengi Topraklar (Kt), Grimsi Kahverengi Topraklar (Gkt), Alüvyal Topraklar (Al)

Bölgede Tirreniyen-Güncel zamanda gelişen morfolojik birimler üzerinde oluşan pedolojik oluşuklar, yaşlıdan gence doğru kahverengi toprak (Kt), grimsi kahverengi toprak (Gkt) ve Alüvyal toprak (Al) olarak ayrılmıştır. Alüvyal topraklar yeni yeni gelişmekte olup, taşkın ovalarında ve taban arazilerinde yer almaktadır [88].

#### 4.2. ÇALIşMA ALANININ GENEL DURUMU

Çalışma alanı, Türkiye coğrafi bölgelerinden Akdeniz bölgesinin doğu bölümünde yer alır ve batısında Mersin şehir merkezi, doğusunda Tarsus, kuzeyinde Bolkar dağları ve güneyinde Akdeniz bulunmaktadır (Şekil 4.3). Toros kuşağının güneydoğu ucundaki bu bölgede bulunan ve yükseklikleri 4000-300 metre dolayında değişen dağ ve tepeler güneye doğru göreceli olarak yüksekliklerini kaybeder. Denize yakın yerlerde genellikle Kuvaterner yaşlı delta çökellerinin yoğun olarak gözlendiği verimli düzlükler hakimdir.

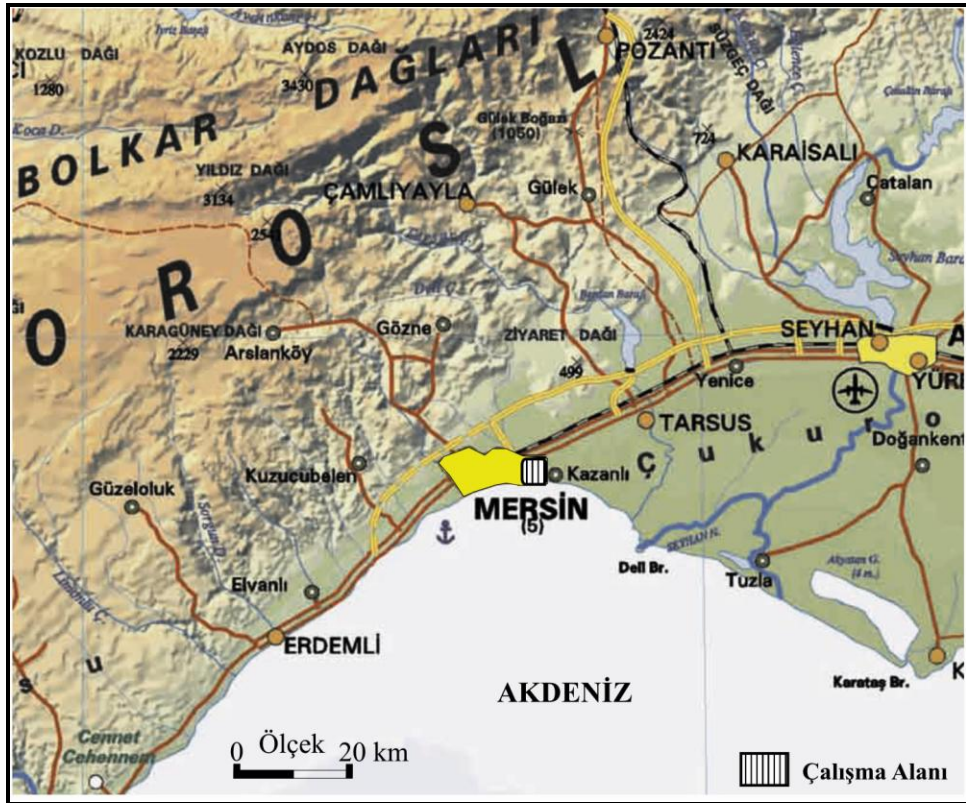
##### 4.2.1. Konum ve Ulaşım

İnceleme alanı 1/25,000 ölçekli O33-a3 paftasının güney kesiminde yer almaktadır. Bu alan, doğu-batı yönünde Deliçay ve Mersin Serbest Bölgesi, kuzey-güney yönünde ise Mersin-Adana devlet karayolu (D400) ve Akdeniz arasındaki yaklaşık 10 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplar. Bu alan; Mersin iline bağlı Akdeniz Belediyesi sınırları içinde olup, Karaduvar mahallesini tamamen içine almaktadır. İnceleme alanına ulaşım D400 devlet karayolu vasıtasıyla her mevsim mümkündür. Mersin şehir merkezine kadar da demiryolu ulaşımından faydalanılabilmektedir. Toros

dağlarının ve yakın dolayının kuzeyden güneye derin vadilerle yarılmış olması yerleşim ve ulaşım olanaklarını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Dağlık kuzey bölümlerdeki yerleşim yerleri ile taşıt ulaşımı genellikle kuzey-güney yönlü yollarla yapılmaktadır (Şekil 4.3). Çalışma alanı içinde yer alan belde ve köy yollarının büyük kısmı asfalt kaplı olup, stabilize köy yolları da iyi konumdadır.

#### 4.2.2. Morfoloji

İnceleme alanının topografyası engebesiz ve oldukça düşük bir eğime sahip olup, yükseklikler 0 m (deniz seviyesi) ile 30 m arasında değişmektedir. İnceleme alanı deniz seviyesinden ortalama olarak 10 m'lik bir yüksekliğe sahiptir. Akdeniz'den (güneyden) kuzeye doğru Toroslar'la uyumlu bir yükselme gözlenen bölgede, Bolkar Dağları ve bunun üzerindeki zirveler önemli yükseltileri oluşturur.



Şekil 4.3. Çalışma alanının genel konumu.

#### 4.2.3. Nüfus ve Yerleşim

Geçmiş Neolitik döneme (İ.Ö. 3600) kadar uzanan Karaduvar mahallesi, Mersin'in doğusunda yer alan eski bir sahil yerleşkesidir. 2000 yılı nüfus sayımına göre bölgede yaşayan kişi sayısı yaklaşık olarak 18,000'dir. Bu nüfusun %43'lük kısmını bölgedeki çeşitli sanayi kuruluşlarında çalışanlar oluşturmaktadır. Ayrıca, 2000 yılı verilerine göre; bu bölgede 2137'si konut ve 1154'ü işyeri olmak üzere toplam 3291 adet bina mevcuttur [1].

Bölgenin ekonomik faaliyetleri bir zamanlar tamamen tarım ve balıkçılığa dayalı iken, ATAŞ (Anadolu Tasfiyehanesi A.Ş.) Petrol Rafinerisi'nin bölgede kurulması sebebiyle, petrol şirketlerinin cazibe merkezi konumuna gelmiştir. ATAŞ Rafinerisi 1957 yılında T.C. hükümetiyle o yıllarda Türkiye'de petrol ürünleri pazarlaması yapan yabancı şirketler arasında yapılan özel bir anlaşma ile 3,2 milyon ton/yıl ham petrol işleme kapasitesiyle kurulmuş ve 30 Nisan 1962'de işletmeye alınmıştır. Rafinerinin ham petrol işleme kapasitesi 1969 yılında yapılan yatırımla 4,4 milyon ton/yıl olarak arttırılmıştır. ATAŞ Rafinerisi Mersin-Adana devlet yolu (D400) 10. km'si güneyiyle Karaduvar mahallesi arasında kalan yaklaşık 1750 dönümlük bir arazi üzerinde bulunmaktadır. Kısa bir süre içinde de büyük petrol şirketleri ATAŞ'a yakın olup maliyeti düşürmek amacıyla Karaduvar'a taşınmaya başlamış ve şu an Karaduvar'da başta OPET ve TUTA olmak üzere birçok (petrol ve LPG) depolama-dolum ünitesi faaliyet göstermektedir [1]. Bunların yanı sıra bu bölgede bir gübre fabrikası, faaliyeti durdurulmuş bir termik santral, çeşitli fabrikalar, tarım alanları ve Mersin Serbest Bölgesi bulunmaktadır (Şekil 4.4). Kısa bir süre önce rafineri faaliyetlerini kademeli olarak durdurma kararı aldığını açıklayan ATAŞ rafinerisi şu anda sadece petrol türevi depolama faaliyetlerine devam etmektedir.

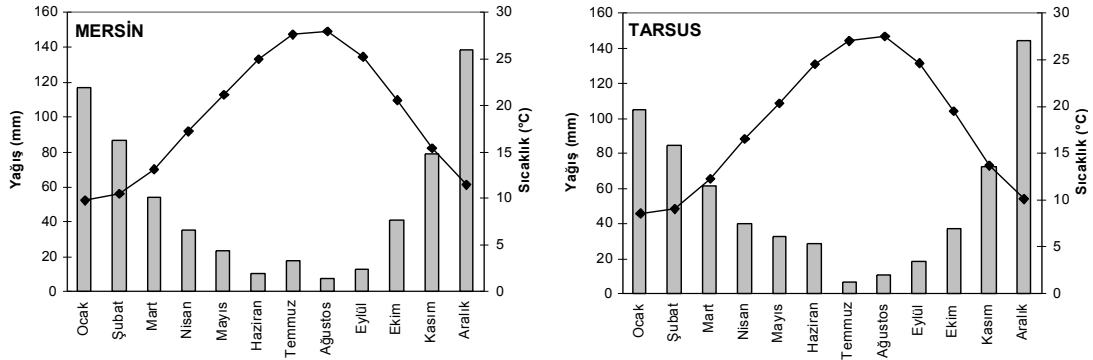




Şekil 4.4. Çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü Quickbird uydu görüntüsü [94].

#### 4.2.4. İklim ve Bitki Örtüsü

Akdeniz iklimine sahip olan inceleme alanında yazlar sıcak ve kurak, kışlar ılık ve yağışlı geçmektedir. Bölgenin iklimi tipik olarak; düşük yağış, bol güneşli günler, sıcak yaz ayları, yüksek nemlilik ve yüksek evapotranspirasyon potansiyeli ile karakterize edilebilir [1]. Mersin ili ve Tarsus ilçesine ait aylık ortalama yağış ve sıcaklık değerleri Şekil 4.5'te görülmektedir. Bölgede uzun yıllara ait yıllık ortalama yağış miktarları Mersin ili için yaklaşık 502 mm ve Tarsus ilçesi için 489 mm'dir. Ortalama sıcaklık değerleri ise Mersin ili için yaklaşık 18,8°C ve Tarsus ilçesi için 17,9°C'dir. En çok yağışın Kasım-Mart ayları arasında gözlendiği bölgede bazen uzun süreler boyunca (3-4 ay) hiç yağış gözlenmez [1]. Dağlık kuzey bölgelerde daha çok karasal iklim hakimdir.



Şekil 4.5. Mersin ili (1930–2002 yılları arası) ve Tarsus ilçesinin (1988–1997 yılları arası) aylara göre ortalama yağış miktarları ve ortalama hava sıcaklıkları (Veriler Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden alınmıştır) [1].

Çalışma alanındaki bitki örtüsü “Delta Ekosistemi” ve “Doğal Yapısını Tümüyle Kaybetmiş Alanlar” olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır [1]. Seracılık ve tarım faaliyetlerinin yoğun olarak gözlendiği bölgede, birbirinden izole ve küçük alanlar kaplayan okaliptüs ağaçları mevcuttur. Türkiye’nin özellikle güney kıyılarında yoğun olarak yetişen bu ağaç, ülkemize ilk kez 1885 yılında Mersin-Adana demiryolu üzerindeki istasyonlara süs amaçlı dikilmek üzere, yolun yapımcısı olan Fransız şirketi tarafından getirilmiştir. Sıtma ağacı olarak ta bilinen okaliptüs, ilk kez 1939’da Tarsus yakınındaki Karabucak Bataklığı’ni kurutmada kullanılmıştır [1]. Bölgede çoğunlukla biber, nane, fasulye, maydanoz, tereotu, semizotu, roka, domates, v.b. çeşitli sebze ve meyve tarımı yapılmaktadır.

### 4.3. ÇALIŞMA ALANININ HİDROJEOLÖJİK ÖZELLİKLERİ

#### 4.3.1. Akarsular

İnceleme alanındaki en önemli akarsu, çalışılan bölgenin doğusundaki 365 km<sup>2</sup>’lik drenaj alanı olan Deliçay’dır. Bu akarsu genel olarak kuzeybatı-güneydoğu uzanımlı olup Toros Dağlarından beslenmektedir. Bölgedeki yeraltı ve yerüstü su kaynaklarını besleyen en önemli kaynaklar yağmur ve kar sularıdır. Kuzey kesimlerde erozyon vadisi karakterinde olan Deliçay deresi, güneyde eğimin

azalması ile enerjisini kaybeder ve taşıdığı alüvyon malzemeleri kıyı bölgesinde depolar. Alüvyon malzemenin oluşturduğu yüksek verimli akifer “Kıyı Akiferi” olarak tanımlanmıştır ve bir delta ortamınca temsil edilmektedir. Deliçay üzerinde uzun süreli akım ölçümü yapılan istasyon bulunmamaktadır. Bu akarsuda DSİ tarafından yapılan sınırlı ölçümler sonucu minimum debisinin  $0,096 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Kasım 1993) ve maksimum debisinin de  $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Ocak 1996) olduğu belirlenmiştir.

#### 4.3.2. Kanallar ve Su Yapıları

İnceleme alanı dahilinde, DSİ tarafından yapılmış 18 adet sulama kanalı ve 1 adet drenaj amaçlı kanal bulunmaktadır. Ana sulama kanalları ve kurutma kanalı genellikle kuzey-güney uzanımlıdır. Ana sulama kanallarının toplam uzunluğu 24,16 km ve ana kurutma kanalının toplam uzunluğu ise 2,71 km'dir.

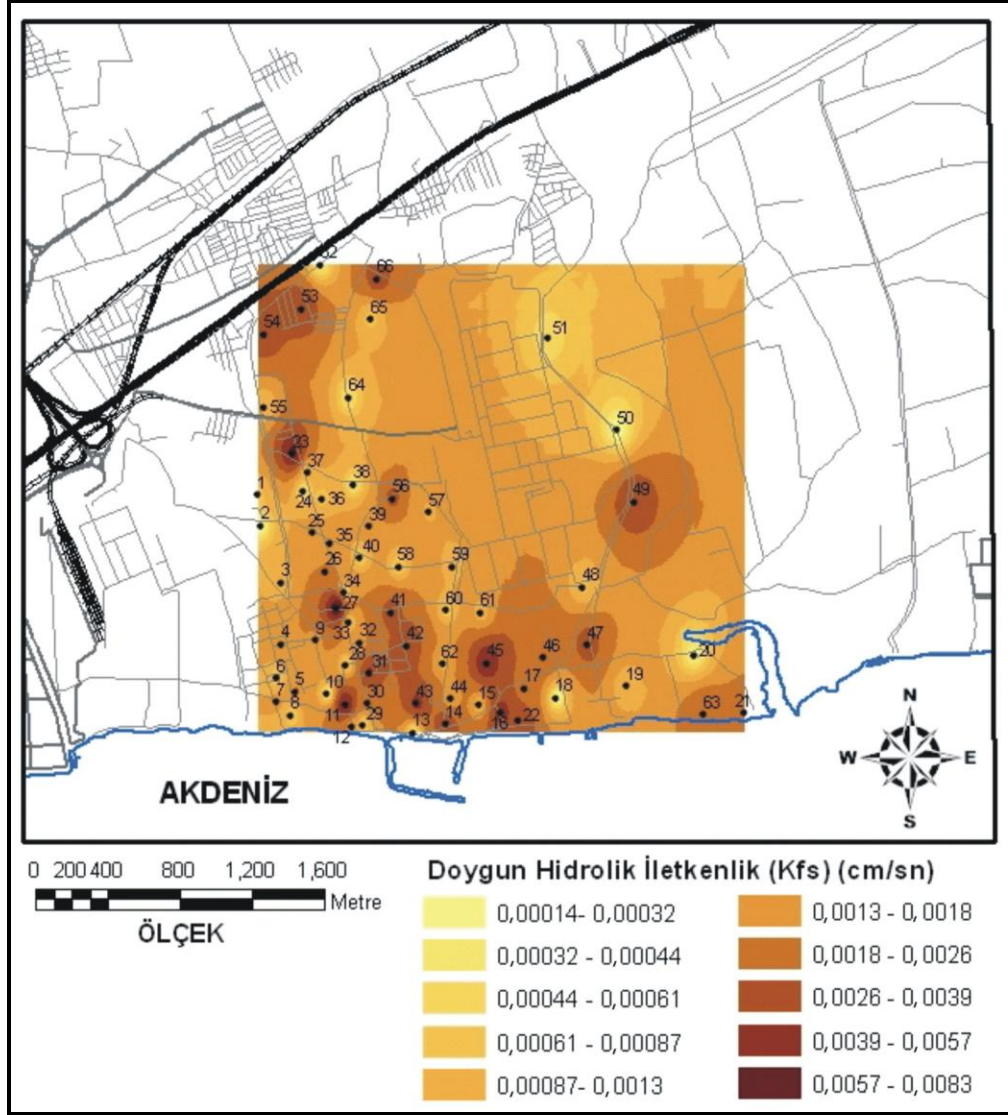
#### 4.3.3. Kuyular

İnceleme alanında, özellikle kıyı akiferinin bulunduğu kesimde, sanayi, içme ve tarımda kullanılmak üzere açılmış pek çok kuyu bulunmaktadır. Bu kuyular genellikle izinsiz olarak açıldığından özellikleri hakkında detaylı bilgi edinmek mümkün olmamıştır. Devlet Su İşleri, Köy Hizmetleri ve İller Bankası tarafından bölgede yasal olarak açılan pek çok kuyu da bulunmaktadır. DSİ'nin açtığı araştırma amaçlı kuyuların pek çoğu günümüzde kullanılmamaktadır. Mersin-Tarsus arasında bulunan sanayi kuruluşları için bedelli olarak açılan kuyular ise kullanılmaya devam edilmektedir. Ayrıca bölgede genellikle sulama amaçlı açılmış çok sayıda sığ kuyu (5-15 m) mevcuttur.

#### 4.3.4. Doygun Hidrolik İletkenlik Ölçümleri

Doygun hidrolik iletkenlik ( $K_{fs}$ ) ölçümleri Şekil 4.6'da gösterilen 66 ayrı noktada yapılmıştır.  $K_{fs}$  değerlerinin 2 boyutlu alansal dağılımını göstermek için Kriging interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; kıyı akiferinin doymuş hidrolik iletkenlik ( $K_{fs}$ ) değerleri  $1,39 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  ve  $8,30 \times 10^{-3}$

$\text{cm s}^{-1}$  arasında değişim gösterirken, aritmetik ortalama değer de  $1,83 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  olarak elde edilmiştir [1].



Şekil 4.6. Permeabilite ölçümü için seçilen noktaların konumları ve arazide doymun hidrolik iletkenliğin ( $K_{fs}$ ) 2 boyutlu dağılımı.

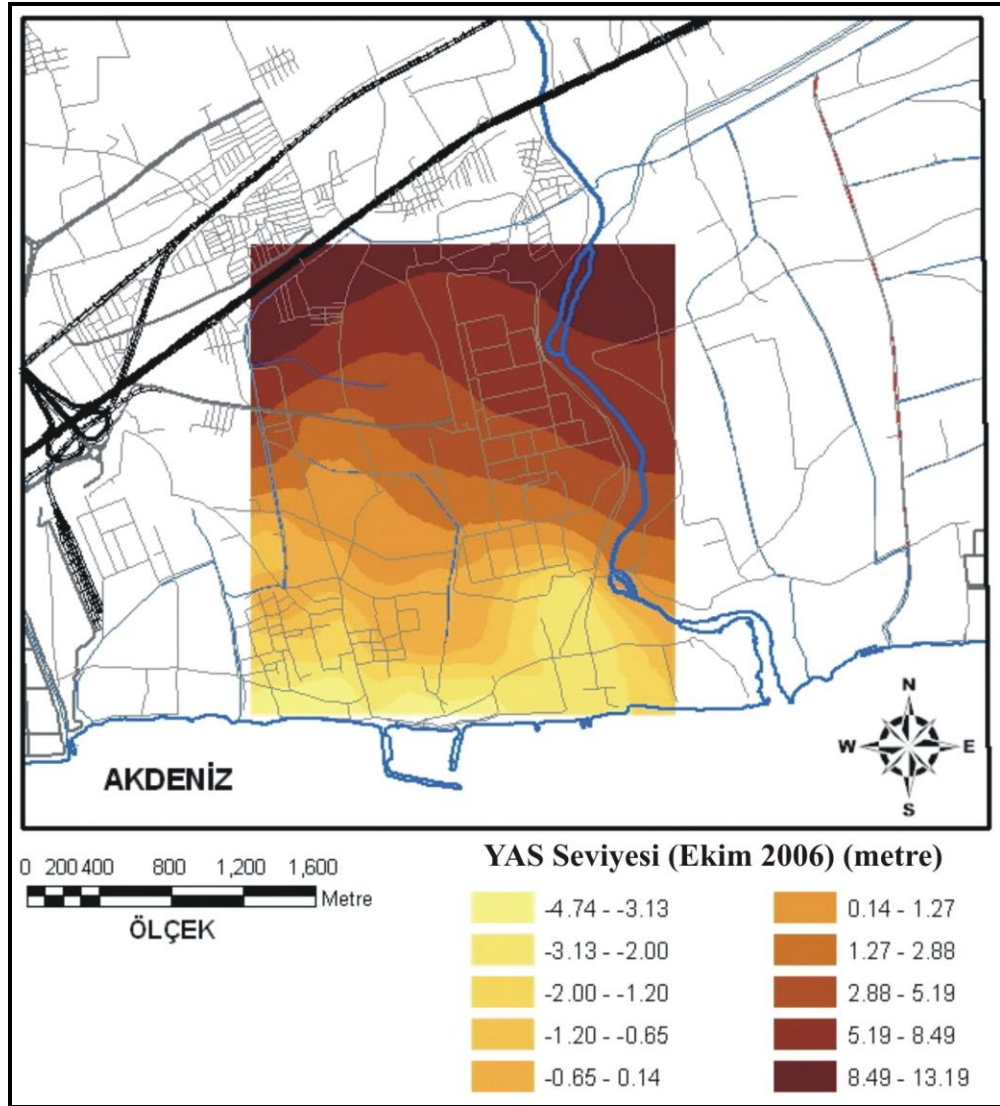
Çalışma alanındaki kıyı akiferinin, bir delta ortamı olması ve bu nedenle heterojen bir yapıya sahip olması sonucu doymun hidrolik iletkenlik değerleri ( $K_{fs}$ ) kısa mesafelerde büyük değişimler gösterebilmektedir (Şekil 4.6). Bu heterojenliğin esas nedeni Deliçay'ın yatay olarak yer değiştirmesine bağlanabilir. Deliçay'ın yatay olarak yer değiştirmesine bağlı olarak çökelim ortamı karmaşık bir yapı



kazandığından, kıyı akiferinin tane boyu dağılımında yatay ve düşey yönde kısa mesafelerde büyük değişimler gözlenebilmektedir. Genel olarak bakıldığında, kıyı akiferine ait doygun hidrolik iletkenlik ( $K_{fs}$ ) değerleri, çalışma alanının kuzeybatı ve güneybatı kesimlerinde daha yüksek ve geri kalan alanlarda göreceli olarak daha düşük değerler almaktadır. Özellikle, petrol kirliliği tarafından büyük oranda etkilediği bilinen Karaduvar mahallesi civarında bu değerler oldukça yüksektir. Bu nedenle bu bölgedeki yeraltı suyu akış hızının dolayısıyla kirliliğin yayılım hızının diğer bölgelere göre daha yüksek olması beklenmektedir [1].

#### 4.3.5. Yeraltı Su Seviyesi Ölçümleri ve Hidrolik Eğim

Çalışma alanında biri Ekim 2006 diğeri de Ağustos 2007'de olmak üzere iki ayrı dönemde yeraltı su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda çalışma alanının güneydoğusunda bulunan Termik Santral ve ATAŞ arasında kalan dar alanda yeraltı su seviyesi deniz seviyesinin yaklaşık 3 m altına düşerek akiferde tuzlu deniz suyu girişimine neden olmuştur. Buradaki yeraltı su seviyesinde gözlenen bu önemli düşüm bölgede açılmış olan sanayi ve tarım amaçlı kuyulardan büyük miktarlarda ve sürekli pompaj yapıldığını göstermektedir. Hatipoğlu [59] tarafından yapılan çalışmada bu düşüm ortalama olarak 1,5 m olarak belirlenmiştir. Ekim 2006'da bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerde ise bu düşümün iki katına çıkarak 3 metreye ulaştığı ve durumun giderek kötüleştiği saptanmıştır. Yeraltı su seviyesindeki bu düşümler sadece bu bölge ile sınırlı olmayıp tüm Karaduvar sahilinde yeraltı su seviyelerinde önemli miktarlarda düşümler gözlenmektedir (Şekil 4.7). Kıyı akiferinin bulunduğu alanlarda hidrolik eğim 0,0151 ile 0,0021 arasında değişen değerler almaktadır. Genel olarak, çalışılan alanın kuzeydoğusunda düşük hidrolik eğim değerleri gözlenirken, güneydoğu kesimlerde hidrolik eğim değerleri oldukça yüksek değerler almaktadır. Buna göre; ortalama hidrolik iletkenliğin  $1,83 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  ve porozitenin 0,35 olduğu varsayılırsa yukarıdaki hidrolik eğim değerlerine karşılık gelen ortalama yeraltı suyu akış hızları sırasıyla  $25,4 \text{ m yıl}^{-1}$  ve  $2,8 \text{ m yıl}^{-1}$  olarak hesaplanmaktadır. Bu da çalışılan alandaki yeraltı suyu akış hızlarında yer yer 9 kata kadar varan farklar olabileceğini göstermektedir [1].



Şekil 4.7. Karaduvar kıyı akiferine ait yeraltı suyu seviye haritası (Ekim 2006)  
(Yükseklikler deniz seviyesine göre) [1].

#### 4.4. YERALTI SULARININ ANALİZLERİ

##### 4.4.1. Fiziksel Parametreler

Şekil 3.1’de belirtilen toplam 212 adet yeraltı suyu örnekleme noktasından alınan örneklerde sıcaklık, pH, Eh, elektrik iletkenlik, çözülmüş oksijen (DO) konsantrasyonu, oksijen doygunluğu (%) ve tuzluluk ölçümleri çeşitli portatif

elektrotlar kullanılarak arazide yapılmıştır. Eylül 2008’de arazide yerinde yapılan fiziksel parametre ölçümlerine ait istatistiksel değerler Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

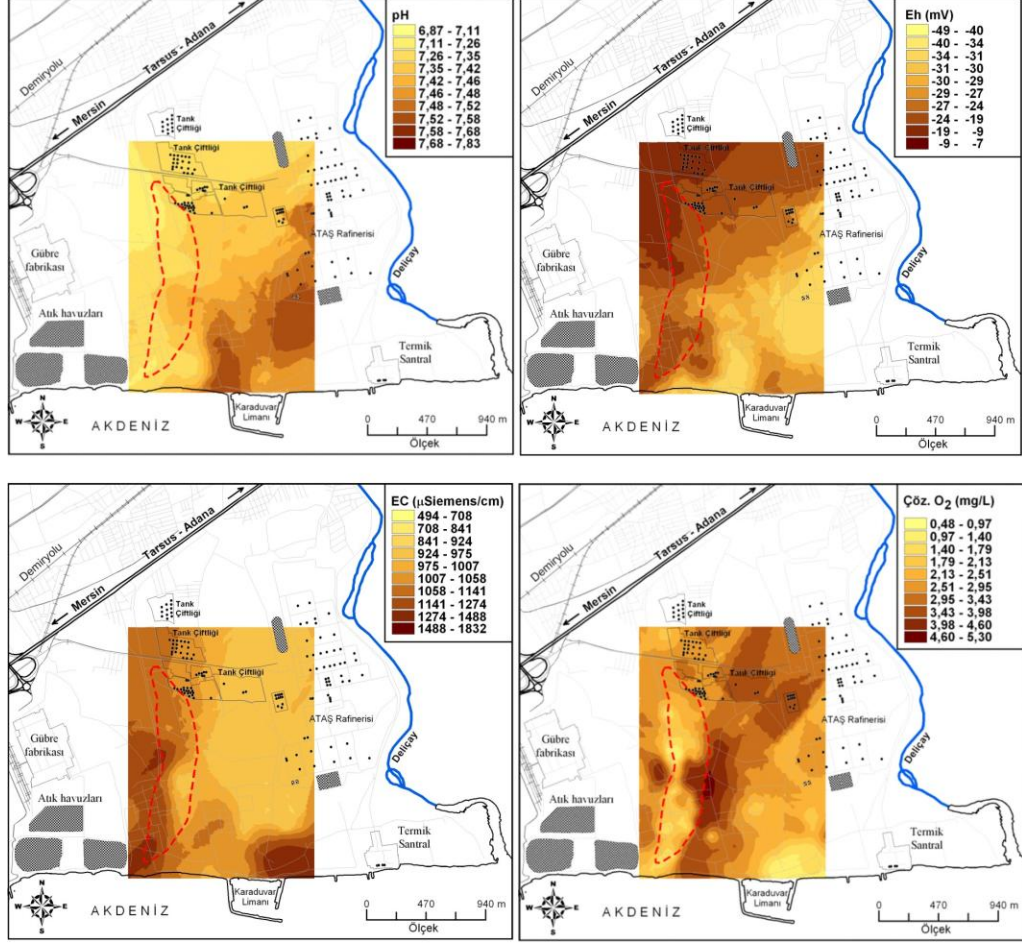
Çizelge 4.1. Kirlenmiş ve temiz kuyulardan alınan yeraltı suyu örneklerinin fiziksel özellikleri.

<b>Parametre</b>	<b>İstatistik</b>	<b>Kirlenmiş Kuyular</b>	<b>Temiz Kuyular</b>
<b>pH</b>	Min-Maks	6,87-7,53	7,02-7,24
	A.O.±S.S.	7,3±0,17	7,4±0,01
<b>Eh</b>	Min-Maks	-31-7	-49 – -22
	A.O.±S.S.	-20,5±9,75	-26,6±7,9
<b>EC</b>	Min-Maks	780-1568	494-1080
	A.O.±S.S.	1247±201	1070±168
<b>ÇO</b>	Min-Maks	0,48-2,38	0,79-3,44
	A.O.±S.S.	1,39±0,6	3,01±1,14

A. O.: Aritmetik Ortalama, S.S.: Standard Sapma

Elde edilen sonuçlara göre, pH ve Eh değerlerinin arazideki dağılımlarının büyük benzerlikler göstermekte olduğu, ölçülen pH değerlerinin genellikle çalışma alanının kuzeybatı kesiminde minimum değerler alırken, Eh değerleri bunun tam tersi çalışma alanının güney-güneydoğu kesiminde (Karaduvar limanı önü ve civarında) minimum değerlere ulaştığı söylenebilir (Şekil 4.8). Diğer yandan, arazide ölçülen çözünmüş oksijen değerleri ise tamamen farklı bir dağılım sunmaktadır. Çözünmüş oksijen değerleri Karaduvar kıyı akiferi dahilinde bölgesel olarak değişik noktalarda düşük değerler göstermekle birlikte, en belirgin olarak çalışma alanının batısında bulunan petrol türevi depolama tanklarının güneyinde KD-GB doğrultusu boyunca uzanım göstermektedir. Düşük çözünmüş oksijen değerlerinin görüldüğü diğer bir bölge ise ATAŞ atık su havuzları ve Akdeniz arasında kalan dar alandır. Çeşitli petrol türevleri tarafından kirlendiği bilinen bu bölgelerde ölçülen düşük çözünmüş oksijen değerleri bir bakıma petrol türevleri tarafından kirlenmiş bölgeleri işaret etmektedir. Bölgedeki en yüksek elektrik iletkenlik değerleri ise çalışma alanının batısında bulunan petrol türevi depolama

tanklarının hemen güneyinde ve ATAŞ petrol rafinerisi ile Akdeniz arasında kalan alanda gözlenmektedir (Şekil 4.8).

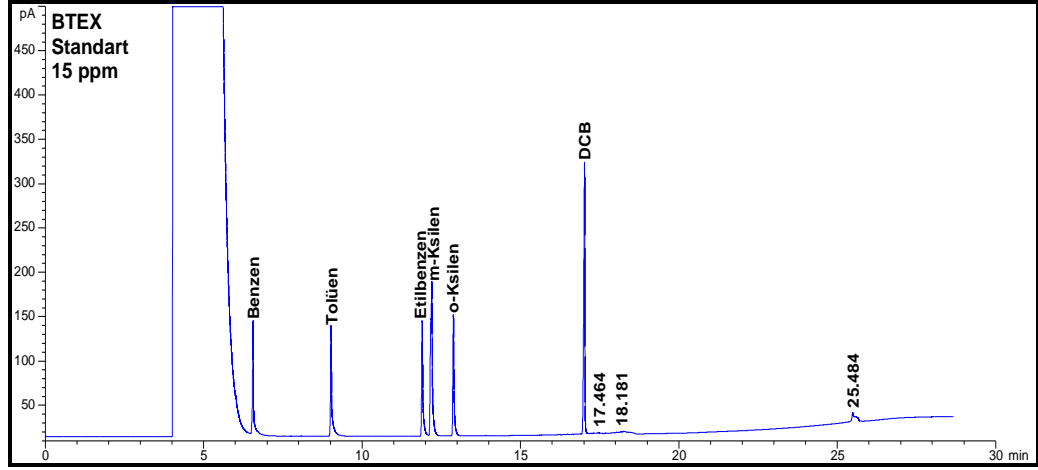


Şekil 4.8. Çalışma alanından alınan yeraltı suyu örneklerine ait çeşitli fiziksel parametrelerin (EC, ÇÖ, pH ve Eh) alansal dağılımı.

#### 4.4.2. Hidrokarbon Analizleri

Temmuz 2007'de araziden alınan su örneklerinde BTEX bileşenlerinin ekstraksiyonları, örneklerin araziden getirilmesini takiben 5 saat içerisinde tamamlanmış ve analizleri de 12 saat içerisinde Mersin Üniversitesi Eczacılık Fakültesi'nde bulunan GC-MS cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerin doğruluğunu ve kullanılan ekstraksiyon yönteminin geri kazanım (recovery) oranlarını değerlendirmek amacıyla standart referanstan hazırlanan üç adet 15

ppm'lik BTEX çözeltisi de araziden alınan örneklerle birlikte ekstrakte edildikten sonra analiz edilmiştir. Standart referans örneğine ait GC-MS kromatogramlarından biri Şekil 4.9'da sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi bütün BTEX bileşenlerine ait (benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilen) pikler kromatogramda mevcuttur.



Şekil 4.9. BTEX bileşenlerine ait analizlerinin doğruluğunu ve geri kazanımları saptamak için hazırlanan 15 ppm'lik BTEX standardının GC-MS yöntemiyle elde edilen kromatogramı [1].

Elde edilen sonuçlara göre çeşitli BTEX bileşenleri için elde edilen geri kazanım oranları şöyledir: benzen için %94,54; tolüen için %80,70; etilbenzen için %73,59; o-ksilen için %78,00 ve m-ksilen için %75,61. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere, benzen için oldukça yüksek geri kazanımlar elde edilebilirken, tolüen, etilbenzen, o-ksilen ve m-ksilen için geri kazanımlar düşük kalmaktadır. Bu da örnek alım aşamasından başlayarak örneğin ekstrakte edilip analizine kadar geçen süre içerisinde çeşitli sebepler nedeniyle kayıpların olabileceğini göstermektedir. Bu çalışma sırasında, örnek alımı, örneklerden BTEX bileşenlerinin ekstraksiyonu ve analizi sırasında gereken azami gayret gösterilmesine karşın bu kayıpların önüne geçilememiştir. Ancak, yine de elde edilen geri kazanım oranlarının oldukça iyi olduğu söylenebilir [1]. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi toplam 11 kuyuda BTEX bileşenlerinden en az birinin mevcut olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2. Temmuz 2007’de Karaduvar kıyı akiferi’nden alınan su örneklerinde ölçülen BTEX konsantrasyon değerleri (değerler ppm cinsindedir) [1].

Örnek No	Benzen	Etilbenzen	Tolüen	orto-Ksilen	meta-Ksilen	para-Ksilen
14	977,19	230,81	499,37	170,84	251,77	nm
15	20,94	8,71	2,92	1,25	6,66	nm
16	nd	0,24	nd	nd	nd	nm
18	156,38	35,14	2,89	nd	1,51	nm
56	5,36	7,60	2,30	4,20	6,79	nm
57	33,67	24,29	2,39	nd	3,23	nm
62	70,39	nd	nd	nd	nd	nm
63	40,12	7,39	1,86	nd	nd	nm
64	5,92	19,65	4,22	17,82	29,91	nm
65	12,90	10,00	nd	nd	1,36	nm
67	577,67	31,37	5,68	0,35	1,97	nm

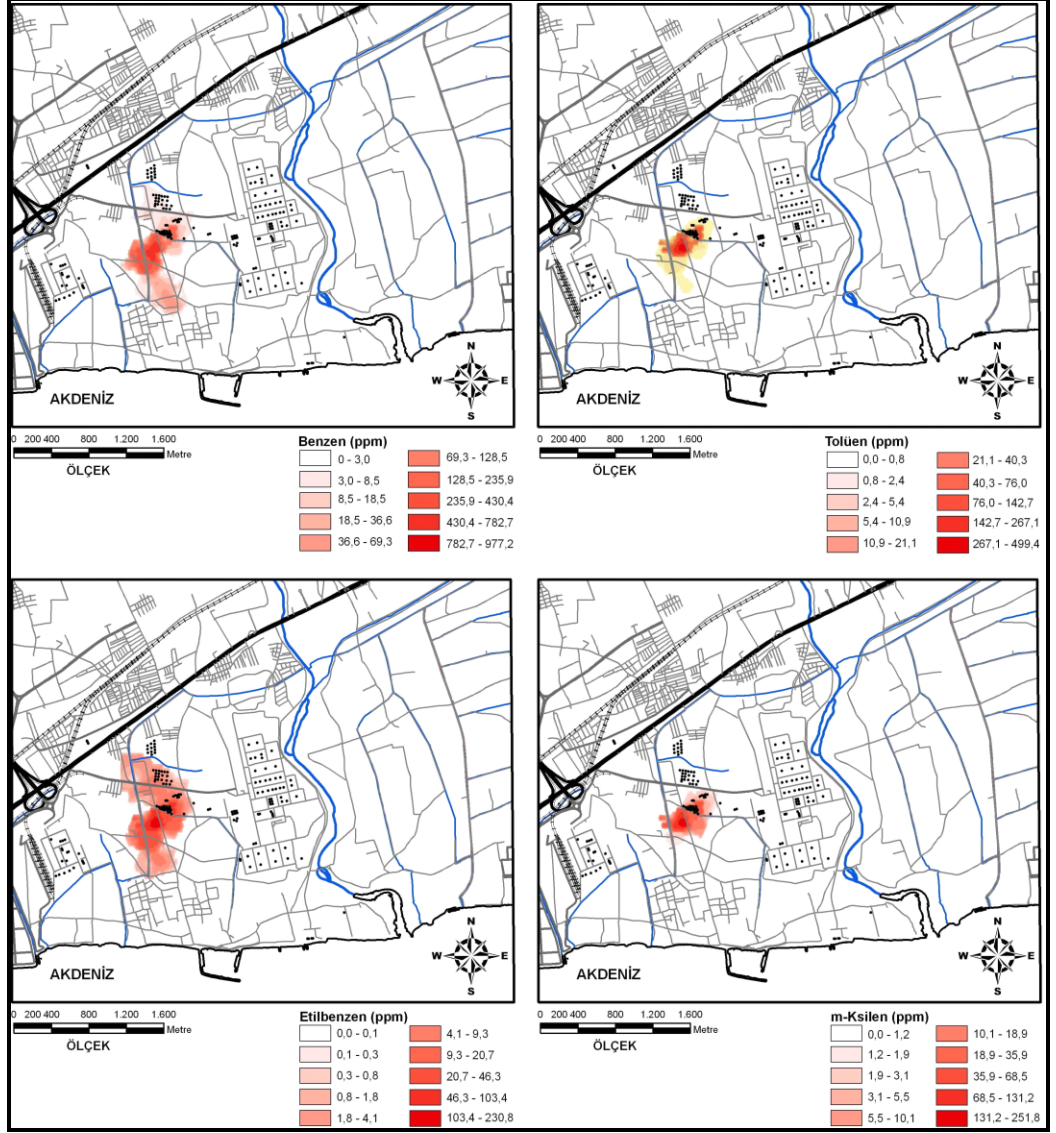
nd = Ölçüm aralığının altında.

nm = Kalibrasyon probleminde dolayı ölçülmedi.

Analiz sonuçlarına göre, 14 nolu kuyuda BTEX konsantrasyonları en yüksek değerlere ulaşmış olup kirlilik sınırlarının oldukça üzerinde değerler sergilemektedir. Ayrıca bu kuyuda BTEX bileşenlerinin dışında çeşitli hidrokarbon türevleri de bulunmaktadır. Benzer bir durum 64 nolu kuyuda da gözlenmiştir [1]. Bu çalışmada, sadece BTEX bileşenlerinin tespiti hedeflenip, buna göre kullanılacak olan yöntemler seçildiğinden dolayı diğer hidrokarbon türevlerinin türleri hakkında yorum yapmak yada konsantrasyonlarını ölçmek mümkün olmamıştır. Hidrokarbon türlerindeki bu çeşitliliğin sadece iki kuyuda gözlenmesi, bu hidrokarbonların yeraltı suyunda ve toprakta bulunan çeşitli mikroorganizma (aerobik ve anaerobik) faaliyetleri sonucu kısa süre içinde parçalandıklarını ve farklı ürünlere dönüştürdüklerini düşündürmektedir [1]. Bunun yanı sıra, 13, 16, 51 ve 66 nolu kuyularda BTEX bileşenlerine rastlanmamıştır; ancak bu kuyulardan alınan örneklerde değişik hidrokarbon türevlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu veriler neticesinde, akiferde BTEX kirliliğine yol açan kirletici kaynağın, oldukça kompleks bir bileşime sahip olan bir hidrokarbon karışımından (örn. benzin veya motorin) oluştuğu anlaşılmaktadır [1]. Çizelge 4.2.’deki sonuçlar incelendiğinde benzen konsantrasyonlarının diğer BTEX bileşenlerine göre oldukça yüksek değerler sergiledikleri görülmektedir. Bu durum, oldukça kararlı bir bileşik olan benzenin bozunma reaksiyonlarına en son giren ürün olmasından kaynaklanmaktadır [1].



Petrol türevlerinin akiferdeki yayılımlarını göstermek amacıyla oluşturulan kirlilik haritaları Şekil 4.10’da sunulmuştur.



Şekil 4.10. Temmuz 2007 döneminde Karaduvar Kıyısı Akiferi’nden alınan su örneklerinde ölçülen BTEX konsantrasyonlarının dağılımı [1].

Elde edilen kirlilik haritaları incelendiğinde, en yüksek BTEX konsantrasyonlarının çalışma alanının batısındaki petrol depolama tesislerine ait tankların civarında yoğunlaştığı görülmektedir [1].

## 4.5. YERALTI SUYU AKIM MODELİ

### 4.5.1. Karaduvar Kıyı Akiferinin PMWIN ile Modellenmesi

PMWIN modeli, yeraltı suyu akımı ve yeraltı suyuna karışan kirleticilerin taşınımı proseslerini üç boyutlu olarak simüle eder. Model MODFLOW, PMPATH, MOC3D, MT3D, MT3DMS, PEST ve UCODE olmak üzere 7 modülden oluşmaktadır [95]. Bu çalışmada MODFLOW ve PMPATH modülleri kullanılmıştır. Öncelikle yeraltı suyu akım denklemini çözmek için, United States Geological Survey tarafından geliştirilen MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model) yeraltı suyu akımı simülasyon modeli kullanılmıştır. MODFLOW, basınçlı veya serbest akiferler için benzeşim yapabilir. Model katmanları serbest, basınçlı veya birinden diğerine değişebilen şekilde olabilir [12].

MODFLOW, yeraltı suyu akımı kısmi diferansiyel eşitliğini hidrolik yük için çözmektedir [92].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

Burada:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ : Hidrolik iletkenlik katsayısının x, y, z koordinat eksenlerindeki bileşenleri ( $L T^{-1}$ ),

h: Hidrolik yük (L),

W: Hacimsel su katkısı / kaybı ( $T^{-1}$ ),

$S_s$ : Özgül depolama ( $L^{-1}$ ),

t: Zaman (T).



MODFLOW eşitlik 4.1'i her bir hücre için sonlu farklar metodunu kullanarak aşağıdaki doğrusal denkleme dönüştürmektedir [96].

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,k-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
& CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \quad (4.2) \\
& P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} (\Delta r_j \times \Delta c_i \times \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}
\end{aligned}$$

Burada:

$h_{i,j,k}^m$  : m zaman adımında i, j, k hücresindeki yük değeri (L),

$CR, CC, CV$  : i, j, k düğüm noktaları ve komşu düğüm noktaları arasındaki hidrolik iletkenlik ( $L^2 T^{-1}$ ),

$P_{i,j,k}$  : Kaynaklardan türetilen hidrolik yük katsayılarının toplamı ( $L^2 T^{-1}$ ),

$Q_{i,j,k}$  : Kaynaktan türetilen sabitlerin toplamı ( $L^3 T^{-1}$ ),

$Ss$  : Özgül Depolama ( $L^{-1}$ ),

$\Delta R_j$  : Tüm satırlardaki j kolonunun hücre genişliği (L),

$\Delta C_i$  : Tüm kolonlardaki i satırının hücre genişliği (L),

$\Delta V_{i,j,k}$  : i, j, k hücresinin düşey kalınlığı (L),

$t^m$  : m zaman adımındaki zaman (T).

PMPATH modülü yeraltı suyu akım yollarını ve yönünü belirlemeye yarar. Bunun yanı sıra partikül izleme yöntemini kullanarak sadece advektif kirlenici taşınımını simüle ederler. Böylece kirlenici partikülünün geçmişte ve gelecekte izleyeceği yolları incelemek mümkündür [95].

#### 4.5.1.1. Grid tasarımı ve akifer parametreleri

Yaklaşık olarak 10 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplayan model alanı için oluşturulan grid ağı 86 sütun ve 91 satırdan mevcut olup, toplam 7826 aktif hücre bulunmaktadır. Her bir hücre 50 m × 50 m'lik bir alanı temsil etmektedir. MODFLOW yeraltı suyu



MODFLOW'da yeraltı suyu denklemi yalnız doymuş ortam içinde geçerlidir ve doymamış ortam model tarafından inaktif hücreler ile temsil edilir. Çalışma alanının kuzeyinde bulunan sabit hidrolik yük hücrelerinin değerleri 2001 yılı su seviye ölçümleri [59] esas alınarak belirlenmiştir. Aktif hücrelerin hidrolik yük değerleri ise 20 m alınmıştır. Kararlı akımda başlangıç hidrolik seviyeleri sadece iterasyon sayısının çokluğu veya azlığını etkilemektedir. Sabit hidrolik yük olarak tanımlanmış (IBOUND matrisindeki değeri negatif) hücrelerin başlangıç hidrolik yük seviyeleri simülasyon boyunca sabit kalacaktır [2].

#### 4.5.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları

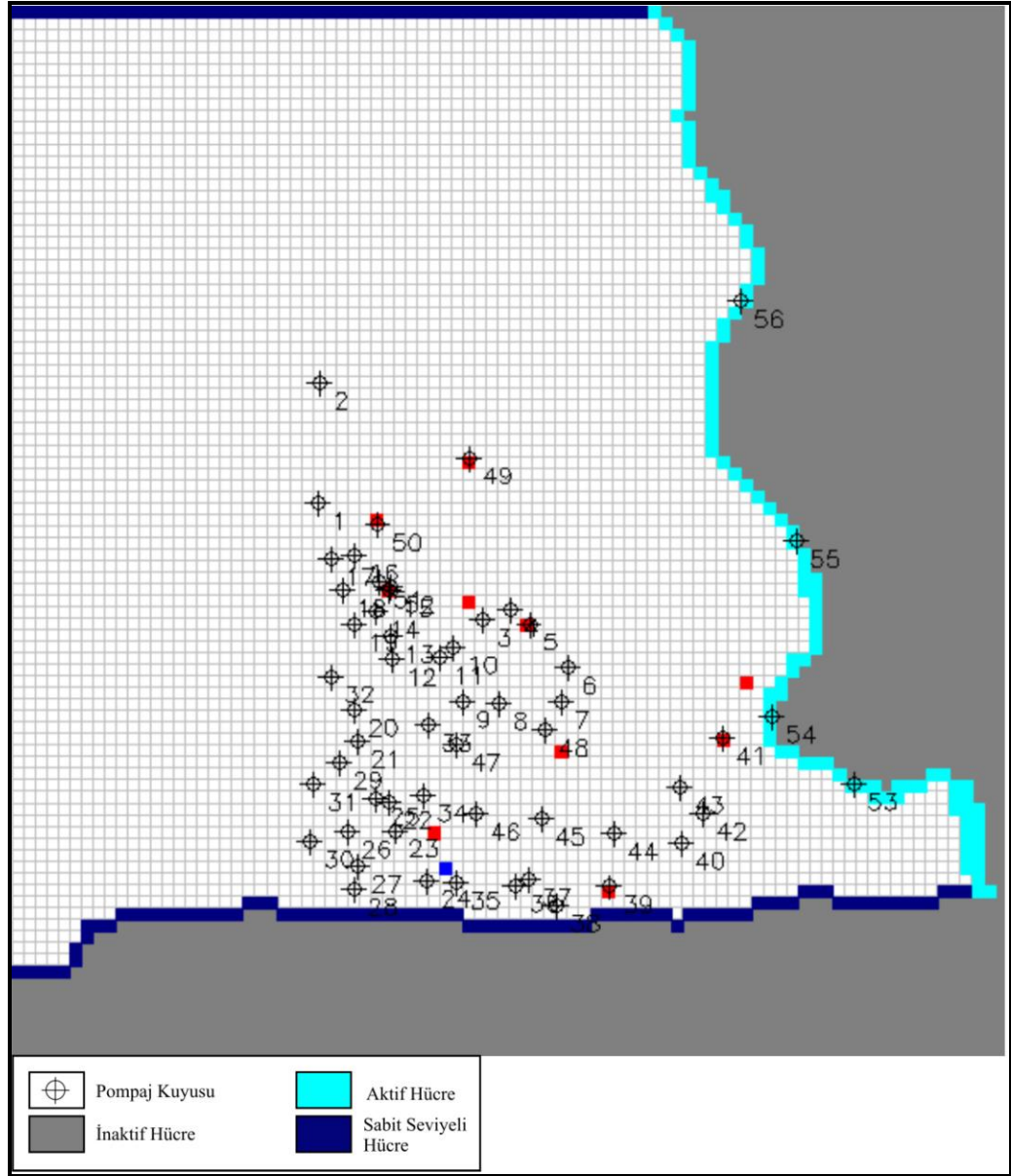
Topografik haritalar, sayısal eşyüksekti haritaları, Devlet Su İşleri ve Köy Hizmetlerinin bölgede açmış olduğu kuyulara ait olan kuyu logları yardımıyla modeldeki katmanların alt ve üst sınırları belirlenmiştir. Çalışma alanının kuzey ve güney sınırı sabit hidrolik yük sınırı olarak tanımlanmıştır. Çalışma alanının doğusundaki Deliçay ise akarsu sınır koşulu olarak tanımlanmıştır.

#### 4.5.1.3. Model parametreleri

Çalışma alanı için model parametreleri olarak belirlenen yağış miktarı ve gözlem kuyularındaki yeraltı suyu seviye değerlerinin tutarlı olabilmesi için belirli bir yıla ait değerlerin seçilmesi gerekmektedir [2]. Bu nedenle Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 2006 yılına ait yağış değerlerinden Turc yöntemiyle hesaplanan buharlaşma değerleri çıkartılarak net beslenme elde edilmiş ve programa girilmiştir. Modellemede zaman [T] birimi gün, uzunluk [L] metre olarak kullanılmıştır.

Bunların dışında pompaj yada enjeksiyon kuyuları, MODFLOW'un Well paketi ile iki parametreyle tanımlanmaktadır. Bu değerler kuyudan su çekilme ve enjeksiyon oranı (Q) [ $L^3/T$ ] ve parametre numarasıdır. Kuyunun su çekilme oranı negatif, enjeksiyon oranı pozitif değerler ile belirlenir. Parametre numarası, ters modellerde otomatik kalibrasyon için Q yerine parametre atamakta kullanılır.

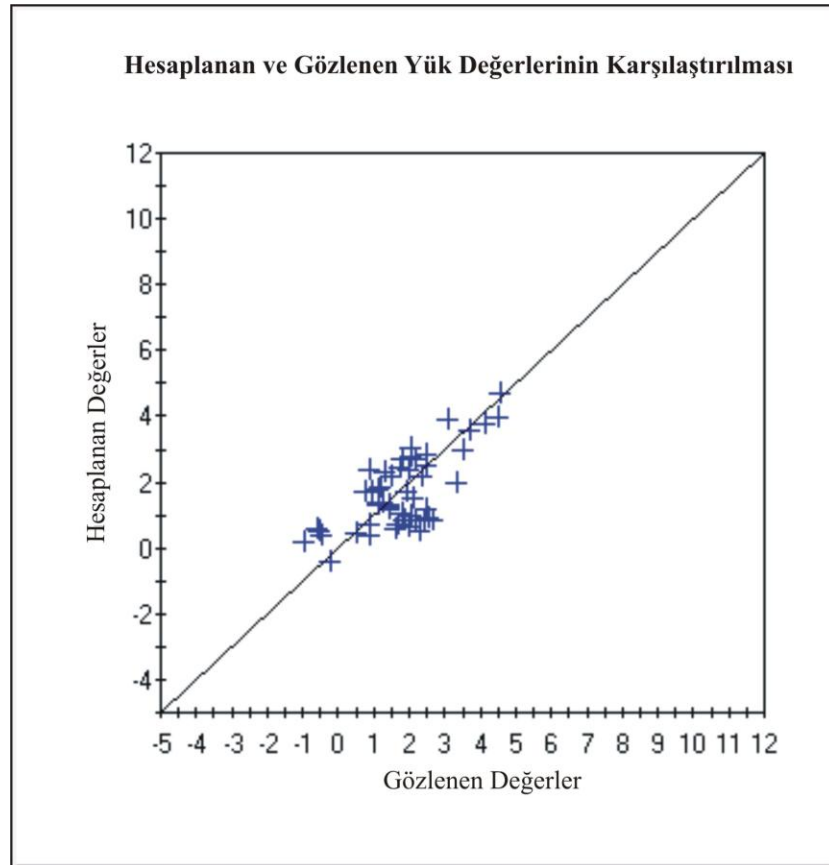
Kararlı akım simülasyonunda bir kuyunun enjeksiyon yada pompaj oranı simülasyon boyunca sabittir ve hücredeki hidrolik seviye ile hücre alanına bağlıdır [2]. Seviye Gözlem Kuyularının (Head Observation) isimleri, koordinatları (doğu x, kuzey y), ve yeraltı su seviyelerinin de modele girilmesi gerekmektedir. Modelde kullanılan tüm parametreler 2006 yılı için seçildiğinden, Ekim 2006'da yapılan arazi çalışmaları kapsamında Devlet Su İşleri, Köy Hizmetleri ve şahıs kuyularına ait yeraltı su seviyeleri kullanılmıştır. Gözlem kuyularının lokasyonları Şekil 4.12'de verilmiştir.



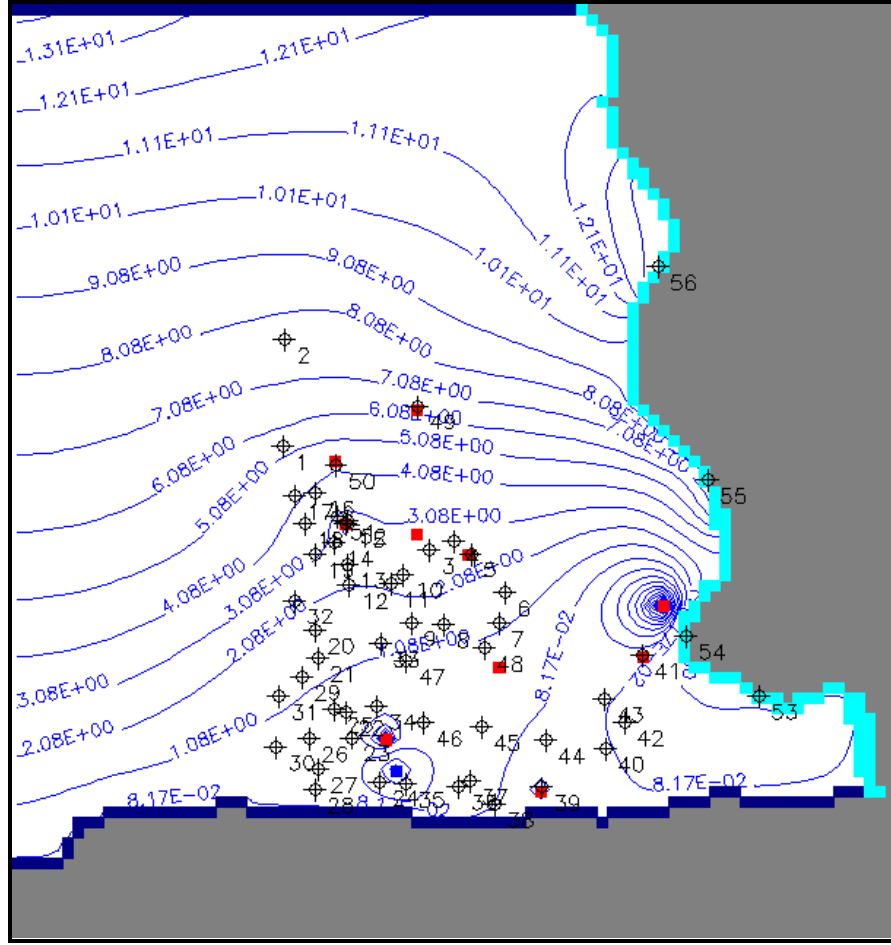
Şekil 4.12. Çalışma alanındaki gözlem kuyularının lokasyonları.

#### 4.5.1.4. Modelin kalibrasyonu

Modelde alanın hidrojeolojik özellikleri, sınırları ve başlangıç koşulları tanımlandıktan sonra, elimizde mevcut olan ölçülmüş hidrolik yük verileri ile simüle edilen hidrolik yük değerleri karşılaştırılarak, sınır koşullarında ve hidrolik parametrelerde yapılan değişikliklerle ortalama hata oranı en aza indirilerek, kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri arasında iyi bir uyum gözlenmektedir. Çalışma alanındaki gözlem kuyularının 2006 yılına ait seviyelerine göre serbest akifer için kalibre edilmiş yeraltı suyu seviye haritası hazırlanmıştır (Şekil 4.14). Hazırlanan yeraltı suyu seviye haritasında, yeraltı suyu akım yönünün KB-GD yönünde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Modelin kalibrasyonu sonucu elde edilen kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.14. Serbest akifer için kalibre edilmiş yeryaltı suyu seviye haritası.

Model sonuçlarından elde edilen 2006 yılına ait su bütçesi Çizelge 4.3'de verilmiştir. Su bütçesinde beslenme ve boşalım miktarları  $m^3/yıl$  cinsinden verilmiştir.

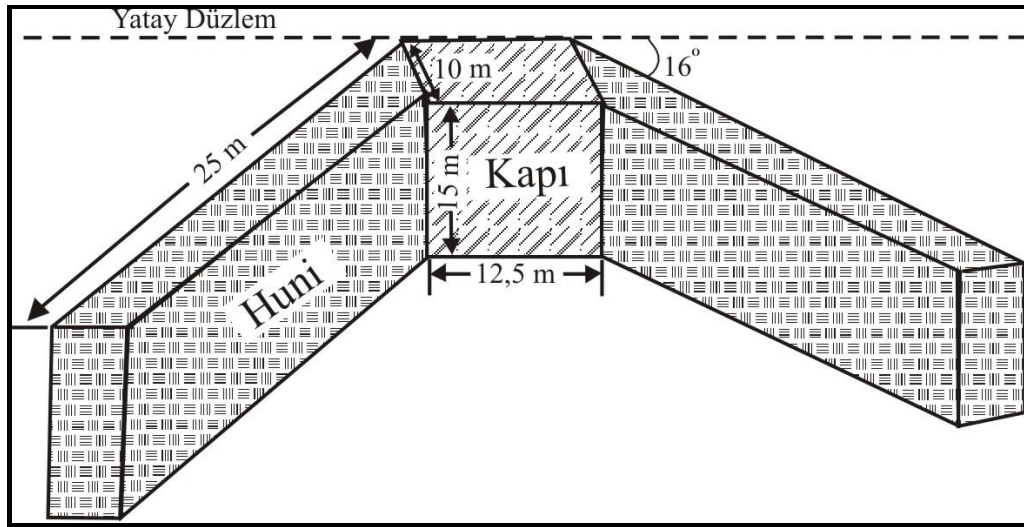
Çizelge 4.3. Model sonuçlarından elde edilen 2006 yılına ait su bütçesi değerleri ( $m^3/yıl$ ).

	Giren ( $m^3/yıl$ )	Giren %	Çıkan ( $m^3/yıl$ )	Çıkan %	Giren-Çıkan ( $m^3/yıl$ )
<b>Sabit yük</b>	871,48	11.7	1474,95	19.76	-603,46
<b>Kuyu</b>	2000	26.8	5125	68.76	-3125
<b>Kaynak</b>	0	-	0	-	0
<b>Beslenme</b>	353,13	4.71	0	-	353,13
<b>Deliçay</b>	4238,50	56.83	863,08	11.56	3375,42
<b>Toplam</b>	7463,11	100	7463,02	100	0,09

2006 yılı verileri esas alınarak yapılan yeraltı suyu akım modelinde 10 km<sup>2</sup> olan model alanındaki toplam beslenimin, % 4.71'i yağıştan ( $3,53 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/yıl), %26,8'i kuyudan ( $2 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl), %56,83'ü ise Deliçay'dan beslenim ( $4,238 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl) olmak üzere toplam  $7,463 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl'dır. Model alanından  $7,463 \times 10^3$  lük boşalım gerçekleşmekte ve bunun %68,76'sı kuyulardan ( $5,125 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl), %11,56'sı ise Deliçay'a boşalımdan ( $8,63 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/yıl) kaynaklanmaktadır. Beslenim ve boşalım arasındaki fark ise  $9 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/yıl olarak model tarafından hesaplanmıştır.

#### 4.6. GEÇİRGEN REAKTİF BARIYER TASARIMI

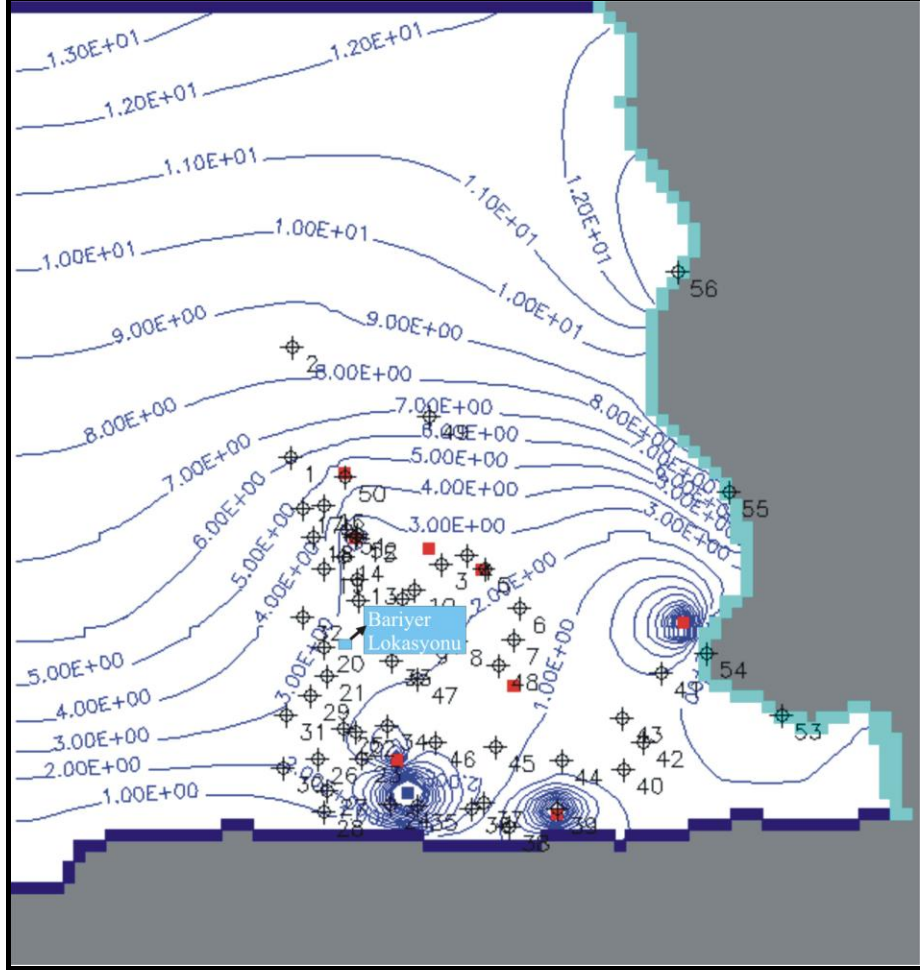
Oluşturulan yeraltı suyu akım modeli ve çalışma alanında kirliliğin gözlemlendiği bölge dikkate alınarak bariyerin yerleştirileceği yer tespit edilmiş, yeraltı suyunun akış yönüne ve kirlenmiş olan bölgeye bağlı olarak huni (funnel) ve kapı (gate) tipi bir bariyer seçilmiştir. Şekil 4.15'de modele yerleştirilen huni ve kapı tipi bariyerin boyutları verilmiştir.



Şekil 4.15. Çalışma alanına uygulanan huni ve kapı tipi bariyerin boyutları

MODFLOW'da bariyer tasarımının yapılacağı bölgeyi temsil eden hücreler  $12,5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 'lik alanları temsil etmektedir. Kapının bulunduğu hücrelerin hidrolik iletkenlik değerleri bölgenin ortalama hidrolik iletkenlik değerinin 3 katı alınırken,

huninin bulunduğu hücrelerin hidrolik iletkenliğine yeraltı suyunu kapıya doğru yönlendirebilmeleri açısından daha düşük değerler verilmiştir [44]. Bunlara bağlı olarak model tekrar çalıştırılmıştır. Elde edilen yeraltı suyu seviye haritası Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde oluşan su seviyelerindeki değişiklik bariyer tasarımının doğru yerde yapıldığını ispatlamaktadır.



Şekil 4.16. Bariyer tasarımından sonra oluşan yeraltı suyu seviye haritası.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mersin ili, hızla büyüyen ve endüstrileşen sahil kentlerimizden biridir. Bu hızlı büyüme ve endüstrileşmeye bağlı olarak içme-kullanma-tarımsal sulama ve sanayi için ihtiyaç duyulan suyun tamamına yakını, delta ortamı karakterindeki “Karaduvar Kıyı Akiferinde” açılan çeşitli derinliklerdeki kuyulardan temin edilmekte ve çeşitli kirletici kaynaklar nedeniyle oluşan kirlilik yeraltı suyu kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Karaduvar bölgesinde bulunan delta çökellerine ait hidrolik özellikler yerinde (in situ) saptanmıştır. Elde edilen verilere göre kıyı akiferinin doygun hidrolik iletkenlik ( $K_{fs}$ ) değerleri  $1,39 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$  ve  $8,30 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  arasında değişim göstermektedir. Yeraltı suyuna ait hidrolik eğim değerleri, yeraltı suyu akış yönü ve hızları hakkında bilgi edinebilmek için Ekim 2006’da ve Ağustos 2007’de su seviyesi ölçümü yapılmıştır. Çalışma alanının güneydoğusunda bulunan Termik Santral ve ATAŞ arasında kalan dar bir alanda yeraltı su seviyesinde önemli bir düşüm gözlenmiştir. Bu düşüm, bölgede açılmış olan sanayi ve tarım (seracılık) amaçlı kuyulardan büyük miktarlarda ve sürekli pompaj yapıldığını göstermektedir. Sadece bu bölgede değil, aynı zamanda Karaduvar sahilinde de yeraltı su seviyelerinde önemli miktarlarda düşümler gözlenmektedir. Kıyı akiferinin bulunduğu alanlarda hidrolik eğim 0,0151 ile 0,0021 arasında değişen değerler almaktadır. Genel olarak, çalışılan alanın kuzeydoğusunda düşük hidrolik eğim değerleri gözlenirken, güneydoğu kesimlerde hidrolik eğim değerleri oldukça yüksek değerler almaktadır. Buna göre; ortalama hidrolik iletkenliğin  $1,83 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  ve porozitenin 0,35 olduğu varsayılırsa belirtilen hidrolik eğim değerlerine karşılık gelen ortalama yeraltı suyu akış hızları sırasıyla  $24,9 \text{ m yıl}^{-1}$  ve  $3,5 \text{ m yıl}^{-1}$  olarak hesaplanmaktadır.

Petrokimya endüstrisine yönelik faaliyetlerin (rafineri, depolama ve dolum) yoğun olduğu bu bölgede yeraltı suyuna karıştığı bilinen çeşitli petrol türevlerinin (BTEX) cinslerinin ve konsantrasyonlarının tespit edilmesi için GC-MS yöntemi kullanılmıştır. Çeşitli petrol türevleri tarafından kirlendiği bilinen Karaduvar kıyı

akiferinde meydana gelen değişimleri izlemek amacıyla Eylül 2008’de bölgedeki mevcut sığ kuyulardan seçilen toplam 212 kuyuda yerinde (in situ) çeşitli fiziksel parametrelere (çözünmüş oksijen, pH, Eh, elektrik iletkenlik) ait ölçümler yapılmıştır. Elde edilen verilere bağlı olarak CBS yazılımı kullanılarak dağılım haritaları oluşturulmuş ve yorumlamalar yapılmıştır. Buna göre düşük pH değerlerinin kirlenmiş bölgenin etrafında yoğunlaştığı, yüksek pH değerlerinin ise genellikle, yüzey sularının (Akdeniz ve Deliçay) akiferle etkileşimde bulunduğu bölgelerde gözleendiği tespit edilmiştir. En yüksek elektriksel iletkenlik (EC) değerleri petrol depolama tanklarının güneyinde ölçülmüştür. Analiz sonuçlarına göre bu kuyularda tuzlu su ve yüksek konsantrasyonlarda petrol türevleri bulunduğu anlaşılmaktadır. Bunun dışında ATAŞ rafinesinin güneyinde ve Karaduvar limanının kuzeyinde de yüksek EC değerleri gözlenmiştir. Bu bölgelerdeki yüksek EC değerlerinin sebebinin aşırı yeraltı suyu çekiminden kaynaklanan tuzlu su girişimi olduğu tespit edilmiştir. Çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu dağılımına bakılacak olursa, kirlenmiş bölgelerde bulunan kuyuların ÇO içeriklerinin kirlenmemiş bölgelerdeki kuyuların ÇO içeriklerine göre çok düşük olduğu gözlenmiştir.

Karaduvar kıyı akiferinin yeraltı suyu akışının ve potansiyelinin belirlenmesi amacıyla PMWIN (Processing Modflow) programı kullanılarak yeraltı suyu akım modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak kavramsal model oluşturulmuş, sonra programa geometri, model ağı, hidrolik parametreler, sınır koşulları, stresler ve su seviyeleri aktarılmıştır. Model çalıştırılarak gözlenen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak, model parametrelerinin kalibrasyonu yapılarak model sonuçlarının gözlenen veriler ile uyumu sağlanmıştır. Yeraltı suyu akım modeli sonucunda 2006 yılına ait su bütçesi hazırlanmıştır. Sonuç olarak çalışma alanından yeraltı suyuna süzülen beslenme miktarının % 4.71’i yağıştan ( $3,53 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/yıl), %26.8’i kuyudan ( $2 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl), %56.83’ü ise Deliçay’dan beslenme ( $4,238 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl) olmak üzere toplam  $7,463 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl’dır. Model alanından  $7,463 \times 10^3$ ’lük boşalım gerçekleşmekte ve bunun %68,76’sı kuyulardan ( $5,125 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/yıl), %11,56’sı ise Deliçay’a boşalımdan ( $8,63 \times 10^2$  m<sup>3</sup>/yıl) kaynaklanmaktadır.

Beslenme ve boşalım arasındaki fark ise  $9 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{yıl}$  olarak model tarafından hesaplanmıştır.

Çalışma alanındaki kirliliği temizleyebilecek olan iyileştirme tekniği olarak GRB seçildikten sonra, oluşturulan yeraltı suyu akım modeli ve çalışma alanında kirliliğin gözlemlendiği bölge dikkate alınarak bariyerin yerleştirileceği yer tespit edilmiş, yeraltı suyunun akış yönüne ve kirlenmiş olan bölgeye bağlı olarak huni ve kapı tipi bariyer seçilmiştir. Bariyerin lokasyonu, biçimi ve boyutu ise bölgenin karakteristik verilerine bağlı olarak belirlenmiştir. Yeraltı suyu akım modelinde, bariyer tasarımının yapılacağı bölgeyi temsil eden hücreler  $12,5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  olarak ayarlanmıştır. Kapının bulunduğu hücrelerin hidrolik iletkenlik değerleri bölgenin ortalama hidrolik iletkenlik değerinin 3 katı alınırken, huninin bulunduğu hücrelerin hidrolik iletkenliğine yeraltı suyunu kapıya doğru yönlendirebilmeleri açısından daha düşük değerler verilmiştir. Bunlara bağlı olarak model tekrar çalıştırılmış, oluşturulan yeraltı suyu seviye haritasında gözlenen seviye değişimleri ile bariyer tasarımının doğru yerde yapıldığı ispatlanmıştır.

Karaduvar mahallesinde gözlenen petrol kirliliğinin temizlenmesine yönelik somut bir çözüm üretecek olan bu çalışma, ayrıca yeraltı suyu kullanım ve yönetim planlarının oluşturulması ve akiferden su sağlayan kuyularda, kirlenici kaynaklarda yada arazi kullanımında meydana gelebilecek değişimler neticesinde oluşabilecek çeşitli durumların değerlendirilmesinde de kullanılabilir. Bu da yeraltı suyu yönetim ve koruma planlarının yapılmasında daha doğru kararların alınmasını sağlayacaktır.

Mersin ilinin son yıllarda çevre illerden aldığı hızlı göç, plansız şehirleşme ve hızlı bir endüstrileşme süreci sonucu özellikle kıyı akiferlerinde birçok sorunlara neden olmaktadır. Gelecekte, bölgedeki artan su ihtiyacının ağırlıklı olarak yeraltı sularından karşılanacağı düşünülürse bu sınırlı kaynağın bilinçli kullanımı ve kirlilikten korunması da büyük önem arz etmektedir.

Bu alışma sonucunda, bölgedeki yeraltı suyu kalitesini olumsuz yönde etkileyen kaynaklar belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma sonucunda tasarımı yapılıp lokasyonu belirlenen iyileştirme yöntemi, çalışma alanındaki kirlenmiş yeraltı suyunun temizlenmesi için önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Güler, C., Alpaslan, M., Temel, A., Gizir., A.M. ve Sangün, M.K. “Karaduvar (Mersin) Kıyı Akiferinde Yeraltı Suyu Kimyasını Etkileyen Kirlenici Kaynakların Araştırılması ve Jeokimyasal Modellemesi”, 104Y268 TÜBİTAK ÇAYDAG nolu proje 3. dönem ara raporu, (Yayınlanmamış), 165s, (2006).
- [2] Soyaslan, İ.İ. “Eğirdir Gölü Doğusunun Hidrojeoloji İncelemesi ve Yeraltısuyu Modellemesi”, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 298s, (2004).
- [3] Güler, C. ve Alpaslan, M. “Petrol Türevleri Tarafından Kirlenmiş Akiferlerde Uygulanan Yerde İyileştirme Teknolojileri”, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, **30(2):33-50**, (2006).
- [4] Bedient, P.B., Rifai, H.S. ve Newell, C.J. “Ground water contamination: Transport and remediation”, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 604s, (1999).
- [5] Zheng, C., Wang, P.P. “MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User’s Guide”, Engineer Research and Development Center, SERDP-99-1, 169s, (1999).
- [6] Miles, B., Maji, R., E.A. Sudicky, A.E., Teutsch, G. ve Peter, A. A. “Pragmatic Approach For Estimation Of Source-Zone Emissions At LNAPL Contaminated Sites”, J.Contam.Hydrol. **96(1-4):83-96**, (2008).
- [7] Khaitan, S., Kalainesan, S., Erickson, L.E., Kulakow, P., Martin, S., Karthikeyan, R., Hutchinson, S.L.L., Davis, L.C., Illangasekare, T.H. ve Ng’oma, C. “Remediation of Sites Contaminated by Oil Refinery Operations”, Proceedings of the 33rd Annual Biochemical Engineering Symposium, Pp: 47-54, (2005).
- [8] Newell, C.J., Acree, S.D., Ross, R.R ve Huling, S.G. “Light Nonaqueous Phase Liquids”, U.S. Environmental Protection Agency Ground Water Issue Paper, R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada OK. EPA/540/S-95/500, (1995).

- [9] Digiulio, D.C. ve Cho, J.S. "Conducting field tests for evaluation of soil vacuum extraction application: In: Proc. Fourth Natl. Outdoor Action Conf. On Aquifer restoration, ground water monitoring and geophysical methods", Natl. Ground water Assoc. Dublin, OH, s:587-601, (1990).
- [10] World Health Organization (WHO), Draft third edition of the WHO Guidelines Drinking Water Quality, (1998).
- [11] Sami Matar, Ph.D. "Chemistry Of Petrochemical Processes" Gulf Publishing Company, Texas, 405 s., (2000).
- [12] Afşin, M., Kayabalı, K. "Uygulamalı Hidrojeoloji", 4. Baskı, Gazi Kitapevi, Ankara, 682 s., (2004).
- [13] Odermatt, JR. "Natural chromatographic separation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes (BTEX compounds) in a gasoline contaminated ground water aquifer", *Organic Geochemistry*, **21**: 1141–1150, (1994).
- [14] Coates, JD., Chakraborty, R. ve McInerney, MJ. "Anaerobic benzene biodegradation-a new era", *Research in Microbiology*, **153**: 621–628, (2002).
- [15] Farhadian, M., Vachelard, C., Duchez, D. ve Larroche, C. "In situ bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater: A review", *Bioresource Technology*, (2007).
- [16] Chen, Y. D., Barker, J. F. ve Gui, L. "A Strategy For Aromatic Hydrocarbon Bioremediation Under Anaerobic Conditions And The Impacts Of Ethanol: A Microcosm Study", *Journal of Contaminant Hydrology*, (2007).
- [17] Cho, J.S., Wilson, J.T., DiGiulio, D.C., Vardy, J.A. ve Choi, W. "Implementation of natural attenuation at a JP-4 jet fuel release after active remediation", *Biodegradation*, **8**: 265-273, (1997).
- [18] Bockelmann, A., Zamfirescu, D., Ptak, T., Grathwohl, P. ve Teutsch, G. "Quantification of mass fluxes and natural attenuation rates at an industrial site with a limited monitoring network: a case study", *Journal of Contaminant Hydrology*, **60**: 97-121, (2003).
- [19] Chen, K.F., Kao, C.M., Wang, J.Y., Chen, T.Y. ve Chien, C.C. "Natural attenuation of MTBE at two petroleum-hydrocarbon spill sites", *Journal of Hazardous Materials*, **125**: 10-16, (2005).

- [20] Mak, K.S., Griebler, C., Meckenstock, R.U., Liedl, R. ve Peter, A. “Combined application of conservative transport modeling and compound-specific carbon isotope analyses to assess in situ attenuation of benzene, toluene, and o-xylene”, *Journal of Contaminant Hydrology*, **88**: 306-320, (2006).
- [21] Ruiz-Aguilar, G.M.L., O'Reilly, K. ve Alvarez, P.J.J. “A comparison of benzene and toluene plume lengths for sites contaminated with regular vs. ethanol-amended gasoline”, *Ground Water Monitoring & Remediation*, **23**: 48-53, (2003).
- [22] Chapelle, F.H. “Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated ground water: The perspectives of history and hydrology”, *Ground Water*, **37**: 122-132, (1999).
- [23] Shakia, A.A. ve Adeloyeb, A.J. “Mathematical Modelling Of Effects Of Irawan Irrigation Project Water Abstractions On The Murzuq Aquifer Systems In Libya”, *Journal of Arid Environments*, **71**: 133–156, (2007).
- [24] Senthilkumar, M. ve Elango, L. “Three-dimensional mathematical model to simulate groundwater flow in the lower Palar River basin, southern India”, *Hydrogeology Journal*, **12**: 197–208, (2004).
- [25] Kresic, N., “Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling”, Lewis Publishers, Boca Raton, (1997).
- [26] Anderson, M. P. “Characterization of geological heterogeneity. In *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*”, ed: G. Dagan and S. P. Neuman, Cambridge University Press, Cambridge, Pp: 23–43, (1997).
- [27] Hess, K. M., Wolf, S. H. ve Celia, M. A. “Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts 3. Hydraulic conductivity variability and calculated macrodispersivities”, *Water Resources Research*, **28(8)**: 2011–2027, (1992).
- [28] McElwee, C. D. ve Butler Jr. J. J. “Characterization of heterogeneities controlling the transport and fate of pollutants in unconsolidated sand and gravel aquifers”, *Kansas Geological Survey Open-File Report*, **95**: 16, (1995).
- [29] Xiang J., Scanlon B. R., Mullican III W. F., Chen L. ve Goldsmith R. S. “A multistep constant-head borehole test to determine field saturated hydraulic conductivity”, *Advances in Water Resources*, **20(1)**: 45-57, (1997).

- [30] Lubczynska, M. W. ve Gurwinb, J. “Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes—Sardon study case, Spain”, *Journal of Hydrology*, **306**: 71–96, (2005).
- [31] Catherine, M. ve Doherty, J. “The cost of uniqueness in groundwater model calibration”, *Advances in Water Resources*, **29**: 605–623, (2006).
- [32] Environmental Security Technology Certification Program. Evaluating the Longevity and Hydraulic Performance of Permeable Reactive Barriers at Department of Defense Sites, 69 s, (2003).
- [33] EPA, “A Citizen’s Guide to Permeable Reactive Barriers”, United States Environmental Protection Agency, EPA 542-F-01-005, Washington DC, (2001).
- [34] Powell, R.M., Powell, P.D. “Iron Metal for Subsurface Remediation. The Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation”, Robert A. Myers, ed. John Wiley&Sons, Inc., New York. **8**: 4729-4761, (1998).
- [35] Powell, R.M., Puls, R. W. “Permeable Reactive Subsurface Barrier for the Interception and Remediation of Chlorinated Hydrocarbon and Chromium (VI) Plumes in Ground Water”, U. S. EPA Remedial Technology Fact Sheet, EPA/600/F-97/008, (1997).
- [36] EPA. “Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater (Phase III)”, United States Environmental Protection Agency, EPA 542-R-98-003, Washington DC, (1998).
- [37] ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). “Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New Directions. PRB-4”, Interstate Technology & Regulatory Council, Permeable Reactive Barriers Team, Washington, (2005).
- [38] EPA. “Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation”, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-98/125, Washington DC, (1998).



- [39] Elder, C. R. "Evaluation and Design Of Permeable Reactive Barriers Amidst Heterogeneity", Phd thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, 384p, (2000).
- [40] EPA Hardrock Mining Innovative Technology Case Study, "Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barrier", 22, (2006).
- [41] Gavaskar, A. "Design And Construction Techniques For Permeable Reactive Barriers", Journal of Hazardous Materials, **68**: 41-71, (1999).
- [42] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), "Design Guidance for the Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents". CEMP DG 1110-345-117, U.S. Department of Army, Washington, DC, (1997).
- [43] Uyuşur, B. "Laboratory Investigation Of The Treatment Of Chromium Contaminated Groundwater With Iron-Based Permeable Reactive Barriers", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ-Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara, 121s, (2006).
- [44] Gupta, N. ve Fox, T. C. "Hydrogeologic modeling for permeable reactive barriers", Journal of Hazardous Materials, **68**: 19–39, (1999).
- [45] Environics Directorate U.S. Air Force, "Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents", DG1110-345-117,(1997).
- [46] Sharma, H.D., Reddy, K.R. "Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies", Wiley Publishers, (2004).
- [47] Rael, J., Shelton, S., ve Dayaye, R. "Permeable Barriers to Remove Benzene: Candidate Media Evaluation", Journal of Environmental Engineering, **121(5)**: 411-415, (1995).
- [48] O'Hannesin, S. ve Gillham, R. "Long-Term Performance of an In Situ "Iron Wall" for Remediation of VOCs", Ground Water, **36(1)**: 164-170, (1998).

- [49] Fort, J. "Long-Term Hydraulic Performance of Permeable Reactive Barriers," MS Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, 384p, (2000).
- [50] Thiruvengkatachari, R., Vigneswaran, S. ve Naidu, R. "Permeable reactive barrier for groundwater remediation", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, **14**: 145–156, (2008).
- [51] Arnold, W ve Roberts, A. "Pathways of Chlorinated Ethene and Chlorinated Acetylene Reaction with Zn(0)," Environmental Science and Technology, **32(19)**: 3017-3025. (1998).
- [52] Roberts, A., Totten, L., Arnold, W., Burris, D. ve Campbell, T. "Reductive Elimination of Chlorinated Ethylenes by Zero-Valent Metals", Environmental Science and Technology, **30(8)**: 2654-2659, (1996).
- [53] Eykholt, G. ve Sivavec, T. "Contaminant Transport Issues for Reactive-Permeable Barriers" Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics (2), Daniel, D. and Acar, Y. (Eds.), ASCE, GSP 46, 1608-1621, (1995).
- [54] Schlimm, C. ve Heitz, E. "Development of a Wastewater Treatment Process: Reductive Dehalogenation of Chlorinated Hydrocarbons by Metals," Environmental Progress, **15(1)**: 38-47, (1996).
- [55] Eykholt, G. "Analytical Solution for Networks of Irreversible First-Order Reactions", Water Research, **33(3)**: 814-826, (1999).
- [56] Gavaskar, A.R., Gupta, N., Sass, B.M., Janosy, R.J. ve O'Sullivan, D. "Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design, Construction and Monitoring", Battelle Press, Columbus, Ohio, (1998).
- [57] Şenol, M., Şahin, Ş. ve Duman, T.Y. Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu. MTA, Ankara, 46s. (yayınlanmamış), (1998).
- [58] Demirel, Z. "The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey", Journal of Environmental Management, **70**: 275-282, (2004).

- [59] Hatipoğlu, Z. “Mersin–Tarsus kıyı akiferinin hidrojeokimyası”, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 142s, (2004).
- [60] Cheon, J.Y., Lee, J.Y. ve Lee, K.K. “Characterization of the hydrogeologic environment at a petroleum hydrocarbon contaminated site in Korea”, *Environmental Geology*, **45**: 869–883, (2004).
- [61] Al-Kharabsheh, A.A. “Influence of urbanization on water quality at Wadi Kufranja basin (Jordan)”, *Journal of Arid Environments*, **43**: 79–89, (1999).
- [62] Kim, K., Rajmohan, N., Kim, H.J., Hwang, G.-S. Ve Cho, M.J. “Assessment of groundwater chemistry in a coastal region (Kunsan, Korea) having complex contaminant sources: a stoichiometric approach”, *Environmental Geology*, **46**: 763–774, (2004).
- [63] Atilla, A. Ö. “Afyon Ovasının Yeraltı Suyu Kütle Taşımını Modeli”. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi-Hidrojeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 106s, (2002).
- [64] Öz, B. “Modelling of groundwater contamination (an oil field application)”, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ-Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, Ankara, 183s, (1997).
- [65] Acar, Ö. “Simulation of groundwater flow using a numerical flow model- a case study: application of modflow to misli groundwater basin”. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ-İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, (1998).
- [66] Ersoy, A. F. ve Gültekin, F. “Havza Yönetim SiStemine Bir Örnek: Gümüşhacıköy (Amasya) Akiferi”, Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, KTÜ, Trabzon, (2007).
- [67] Bartzas, G., Komnitsas, K. Ve Paspaliaris, I. “Laboratory evaluation of Fe<sup>0</sup> barriers to treat acidic leachates”, *Minerals Engineering*, **19**: 505–514, (2006).
- [68] Lee, Y.C., Kwon T.S., Yang, J.S. ve Yang, J.W. “Remediation of groundwater contaminated with DNAPLs by biodegradable oil emulsion”, *Journal of Hazardous Materials* **140**: 340–345, (2007).

- [69] Simon, F.G., Segebade, C. Ve Hedrich, M. “Behaviour of uranium in iron-bearing permeable reactive barriers: investigation with  $^{237}\text{U}$  as a radioindicator”, *The Science of the Total Environment*, **307**: 231–238, (2003).
- [70] VanStone, N., Przepiora, A., Vogan, J., Couloume, G. L., Powers, B., Perez, E., Mabury, S. ve Lollar B. S. “Monitoring Trichloroethene Remediation At An Iron Permeable Reactive Barrier Using Stable Carbon Isotopic Analysis”, *Journal of Contaminant Hydrology*, **78**: 313– 325, (2005).
- [71] Kastaneka, F., Maleterovaa, Y., Rottc, J., Jiricny, V. Ve Jiratovaa, K. “Complex treatment of wastewater and groundwater contaminated by halogenated organic compounds”, *Desalination*, **211**: 261–271, (2007).
- [72] Rabideau, A., Benschoten, Van J., Patel, A. ve Bandilla, K. “Performance assessment of a zeolite treatment wall for removing Sr-90 from groundwater”, *Journal of Contaminant Hydrology*, **79**: 1– 24, (2005).
- [73] Wang, Z., Li, K., Fingas, M., Sigouin, L. ve Menard, L. “Characterization and source identification of hydrocarbons in water samples using multiple analytical techniques”, *Journal of Chromatography*, **971**: 173–184, (2002).
- [74] Kim, J. ve Corapcioglu, M. Y. “Modeling dissolution and volatilization of LNAPL sources migrating on the groundwater table”, *Journal of Contaminant Hydrology*, **65**: 137– 158,(2003).
- [75] Reynolds, W. D., Elrick, D. E., In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph permeameter, *Soil Science*, **140(4)**: 292-302, (1985).
- [76] Reynolds, W. D., Elrick, D. E., Clothier, B. E., The constant head well permeameter: Effect of unsaturated flow, *Soil Science*, **139**: 172-180, (1985).
- [77] Reynolds, W. D., Elrick, D. E., A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship, *Ground Water Monitoring Review*, **6(1)**: 84-95, (1986).
- [78] Mottaleb, M. A., Abedin, M. Z., Islam, M. S., Determination of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene in river water by solid-phase extraction and gas chromatography, *Analytical Sciences*, **19**: 1365–1369, (2003).

- [79] Ünlügenç, U. C. “Kızıldağ–Yayla (Adana) dolayının jeolojik incelemesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (1986).
- [80] Schmidt, G., VII. Adana petrol bölgesinin stratigrafik nomenklaturü, Petrol Der. Yay. **6**: 47–63, (1961).
- [81] Görür, N., Karaisalı kireçtaşının (Miyosen) sedimantolojisi, T.J.K. Bülteni, **22(2)**: 227–234, (1979).
- [82] Görür, N., Karaisalı kireçtaşının (Miyosen) diyajenezi evrimi, Türkiye 5. Petrol Kongresi Tebliğleri, s:123–128, (1980).
- [83] Yetiş, C. ve Demirkol, C. Adana baseni kuzey–kuzeybatı kesiminin temel stratigrafisine ilişkin bazı gözlemler, T.J.K. 38. Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildiri Özetleri, Ankara, s.59–61, (1984).
- [84] İlker, S., Adana baseni kuzeybatısının jeoloji ve petrol olanakları, T.P.A.O. Arama Arşiv No: 973, Ankara, (Yayımlanmamış), s: 63, (1975).
- [85] Yalçın, N. M. Görür, N. “Sedimentological evolution of the Adana Basin, International Symposium on the Geology of the Tarsus Belt”, Ankara, Pp: 165–172, (1984).
- [86] Yetiş, C. Demirkol, C., Adana baseni batı kesiminin detay jeoloji etüdü M.T.A. Rap. No: 8037 (Yayımlanmamış), (1986).
- [87] Şafak, Ü. ve Nazik, A. “Eshab-ı Kehf (Tarsus–Mersin) dolayını Neojen istifinin ortamsal yorumu”, Ç. Ü. 15. Yıl Sempozyumu, Adana, s: 291–300, (1994).
- [88] Şenol, M., Kapur, S. ve Şahin, Ş. Adana Havzası Kuvaterneri, İ.T.Ü. Maden Fak. Türkiye Kuvaterneri Workshop Bildiri Özleri, s.24–27, İstanbul, (1993).
- [89] Şenol, M. “Adana–Balcalı/Çatalan bölgesi Geç Tersiyer–Kuvaterner istifinin Lito–pedolojik ve sedimantolojik incelemesi”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (1989).
- [90] Çavuşgil, V. L. “Adana–Kurttepe akarsu sekilerinde yeralan Akdeniz kırmızı topraklarının oluşumları ve birbirleri ile olan ilişkisi üzerinde bir araştırma”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (1985).
- [91] Gürel, N., Çukurova Üniversitesi yerleşme alanında yer alan akarsu sekilerinde jeomorfoloji–toprak ilişkileri üzerine bir araştırma: Ç. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (1985).

- [92] Kapur, S., Çavuşgil, V. L., Şenol, M., Gürel, N. Ve Fitzpatrick, A. “Geomorphology and pedogenic evolution of Quaternary calcretes in the northern Adana basin of southern Turkey”, *Geomorphology*, **34**: 49–59, (1990).
- [93] Kapur, S., Gökçen, S. L. ve Yaman, S. “Soil stratigraphy and Quaternary caliche in the Misis area, Adana basin, *Catena*, (1993).
- [94] Nik Sistem, Quickbird Image, (2002).
- [95] Chiang W. H. Ve Kinzelbach W. PMWIN (Processing MODFLOW for Windows) software.
- [96] McDonald, M. G. ve Harbaugh, A. W. “A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model, U. S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations”. Pp.586, (1988).

## ÖZGEÇMİŞ

Adı- Soyadı	Can AKBULUT
Doğum Tarihi	14.04.1984
Adres	Mersin Üniv. Müh. Fak. Jeoloji Mühendisliği Bölümü 33343 Çiftlikköy-Mersin
E-Posta	canakbulut@mersin.edu.tr
Yabancı Dil	İngilizce

## EĞİTİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lisans	Jeoloji Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2006
Yüksek Lisans	Jeoloji Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	-

## AKADEMİK DENEYİM

Ünvan	Alan	Birim	Başlangıç	Bitiş
Arş. Gör.	Jeoloji Mühendisliği	Mersin Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği	2006	-