ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Murat ÇOBANER

KIYI AKİFERLERİNDE TUZLU SU GİRİŞİMİNİN ÜÇ BOYUTLU SİMÜLASYONU: GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2009

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KIYI AKİFERLERİNDE TUZLU SU GİRİŞİMİNİN ÜÇ BOYUTLU SİMÜLASYONU: GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

Murat ÇOBANER

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez / / 2009 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

İmza:.....	**İmza:**.....	**İmza:**.....
Prof. Dr. Recep YURTAL	**Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ**	**Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR**
DANIŞMAN	**ÜYE**	**ÜYE**

İmza:.....	**İmza:**.....
Doç. Dr. Galip SEÇKİN	**Yrd. Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY**
ÜYE	**ÜYE**

Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

Bu Çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No:MMF2006D6

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Sevgili eşim Neşe ÇOBANER, biricik oğlum Burak ÇOBANER ve AİLEME…

ÖZ

DOKTORA TEZİ

KIYI AKİFERLERİNDE TUZLU SU GİRİŞİMİNİN ÜÇ BOYUTLU SİMÜLASYONU: GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

Murat ÇOBANER

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Recep YURTAL
Yıl : 2009, **Sayfa**: 156
Jüri : Prof. Dr. Recep YURTAL
Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ
Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR
Doç. Dr. Galip SEÇKİN
Yrd. Doç. Dr. Hatice ÇAĞATAY

Nüfusun yoğunlaştığı, çoğu zaman verimli arazilere sahip olan ve sulu tarım yapılan kıyı akiferlerinden plansızca aşırı olarak kullanılan su, kıyı akiferlerine deniz suyu girişimine sebep olabilir. Bu çalışmada deniz suyu girişiminin kontrolü/önlenmesine yönelik Silifke–Göksu deltası örneği ile model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Akdeniz bölgesi kıyı şeridinde bulunan Göksu Deltasındaki deniz suyu girişim mekanizmasını tanımlayabilmek için üç boyutlu değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımının simülasyonunu yapan SEAWAT programı kullanılmıştır. Geliştirilen deniz suyu girişim modelinin kalibrasyon çalışmalarında arazi verileri olarak önceki çalışmalardaki veriler ve 2008 su yılına ait 23 gözlem noktasında ölçülmüş statik yeraltı su seviyesi, elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş madde ve klorür değerleri kullanılmıştır. Deniz suyu girişimi modelinin Göksu deltasına uygulanmasının başlıca amaçları: (1) akiferin hidrolik ve hidrojeolojik parametrelerinin belirlenmesi, (2) akiferdeki tuz konsantrasyonunun uzaysal dağılımını tahmin etmek, (3) yeraltı suyu çekiminin artış ve azalışının akifere etkilerini araştırmak ve (4) iklim değişikliğinin kıyı akiferlerindeki yeraltı su kaynaklarına etkilerini değerlendirmektir. İklim değişikliğinin etkilerinin önlenmesi ya da en aza indirilmesi bakımından gelecekteki olması muhtemel üç senaryo için simülasyonlar yapılmış ve Göksu deltası akiferinin özellikle pompaj miktarındaki artışa duyarlı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yeraltı Suyu Modellemesi, Deniz Suyu Girişimi, İklim Değişikliği, Göksu Deltası, SEAWAT.

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

THREE DIMENSIONAL SIMULATION OF SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS: A CASE STUDY IN GOKSU DELTAIC PLANE

Murat ÇOBANER

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor : Prof. Dr. Recep YURTAL
Year : 2009, **Page :** 156
Jury : Prof. Dr. Recep YURTAL
Prof. Dr. M. Salih KIRKGÖZ
Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR
Assoc. Prof. Dr. Galip SEÇKİN
Asist. Prof. Dr. Hatice ÇAĞATAY

Unplanned exploitation of water from coastal aquifers which have generally over population and fertile agricultural land and irrigated farming activities may cause salt water intrusion in coastal aquifers. The objective of this study was to develop a model to control/prevent the seawater intrusion into the coastal aquifer with a case study at Silifke–Goksu deltaic plane. A computer program for simulation of three–dimensional variable density groundwater flow, SEAWAT, is used to model the seawater intrusion mechanism of Goksu deltaic plane along the Mediterranean coast of Turkey. The calibration analysis of the developed seawater intrusion model is performed using actual data measured in the field which included static groundwater head, electrical conductivity, total dissolved solid and chloride concentration values of 23 observation wells taken in the water year of , 2008 and the existing data were compiled and reviewed. The main objectives of application of the seawater intrusion model to the Goksu deltaic plane are (1) to determine the hydraulic and hydro geologic parameters of the aquifer, (2) to estimate the spatial variation of the salt concentration in the aquifer, (3) to investigate the impact of the increase and decrease in the groundwater extractions and (4) to evaluate the effects of the climate changes on the groundwater resources in coastal aquifer. In the Goksu deltaic plane, to prevent or decrease the impacts of the climate changes has been simulated by three different climate change scenarios and the Goksu deltaic plane aquifer is sensitive especially to the increase in groundwater extraction.

Keywords: Groundwater Modelling, Seawater Intrusion, Climate Change, Goksu Deltaic Plane, SEAWAT.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda beni yönlendiren ve yardımlarıyla bana destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Recep YURTAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana çalışmalarımda yardımcı ve destek olan Sayın Doç. Dr. Galip SEÇKİN'e, yeraltısuyu modelleme aşamasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ahmet DOĞAN'a, arazi ölçümlerinde bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Ali DOĞAN, Arş. Gör. Burhan ÜNAL ve Alptekin ÇAKAR'a, Göksu deltası ile ilgili verilerin teminindeki yardımlarından dolayı DSİ 6. Bölge ve 62. Şube Müdürlüklerine ve 62. Şube Baş Mühendisi İsmail GÜRBÜZ'e, Göksu Deltası Özel Çevre Koruma Müdürlüğü Müdiresi Nazife YILDIRIM ve Baş Mühendisi İbrahim KARACA'ya, gözlem kuyularından su örnekleri almamızda yardımlarını esirgemeyen Silifke ve Göksu Sulama Birlik Başkanlarına ve Saha Görevlileri Mehmet ve Mustafa Bey'e ve tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarımda beni destekleyen eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ IV
ABSTRACT V
TEŞEKKÜR VI
İÇİNDEKİLER VII
ÇİZELGELER DİZİNİ IX
ŞEKİLLER DİZİNİ X
SİMGELER VE KISALTMALAR XII
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
2.1. Deniz Suyu Girişimi ile İlgili Önceki Çalışmalar 5
2.2. Göksu Deltası İle İlgili Önceki Çalışmalar 18
2.3. İklim Değişikliği ve Önceki Çalışmalar 19
2.3.1. İklim değişikliği Emisyon Senaryoları 22
3. DENİZ SUYU GİRİŞİMİNİN TEORİSİ 24
3.1. Deniz Suyu Girişimi Probleminin Matematiksel Tanımı 24
3.2. Keskin Ara Yüzey Yaklaşımı 24
3.3. Ghyben–Herzberg Yaklaşımı 27
3.4. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akım ve Taşınım Denklemleri 28
4. DENİZ SUYU GİRİŞİM MODELİ 33
4.1. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akımının Matematiksel Tanımı 36
4.1.1. Eşdeğer Tatlı Su Yüksekliği 36
4.1.2. Yeraltı Suyu Akım Denklemi 39
4.1.3 Çözünmüş Madde Taşınım Denklemi 42
4.2. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akım Denklemi için Sonlu Farklar Yaklaşımı 43
5. GÖKSU DELTASI YERALTI SUYU MODELİ ÖRNEĞİ 48
5.1. Çalışma Alanı Genel Bilgileri 48
5.2. İklim ve Hidroloji 51

5.3. Hidrojeoloji 52
5.4. Yeraltı Suyu Gözlem Kuyuları 54
5.5. Göksu Deltası Akiferinin Modellemesi 61
5.5.1. Sınır Koşulları ve Grid Ağlarının Oluşturulması 63
5.5.2. Akiferin Hidrojeolojik Parametreleri 66
5.5.3. Akiferin Hidrolik Parametreleri 68
5.5.4. Yeraltı Suyu Beslenmesinin (Recharge) Tahmini 69
5.5.5. Yeraltı Suyu Pompaj Miktarının Tahmini 73
5.5.6. Yeraltı Suyu Akım ve Taşınım Modelinin Kalibrasyonu 76
6. MODELE AİT SENARYOLAR 86
6.1. Yeraltı Suyu Kullanım Miktarındaki Değişim 87
6.2. İklim Değişikliği Senaryoları 92
6.2.1. Senaryo 1 95
6.2.2. Senaryo 2 98
6.2.3. Senaryo 3 101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 105
KAYNAKLAR 108
ÖZGEÇMİŞ 121
EKLER 122

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 5.1. Akgöl ve Paradeniz Su Bütçesi Oranları 50
Çizelge 5.2. Bölgenin Uzun Yıllar (1931–2003) Yılı İklim İstatistikleri 52
Çizelge 5.3. Göksu Deltasındaki Jeolojik Tabakalar (Gordu, 2000) 53
Çizelge 5.4. Göksu Deltası Gözlem Kuyularının 2008 Yılı Ortalama Yeraltı Su Seviye, Elektriksel İletkenlik ve Klorür Miktarları 56
Çizelge 5.5. SKKY'a Göre Göksu Deltası Gözlem Kuyularının Yeraltı Sularının Sulamaya Uygunluk Sınıfları 57
Çizelge 5.6. SKKY'a Göre Göksu Deltası Yeraltı Sularının Sulamaya Uygunluk Sınıfları ve Kapladığı Alanlar 57
Çizelge 5.7. Göksu Deltası'nda DSİ 62. Şube Müdürlüğünün Şebekesi ile Sulanabilen Ürünler ve Yetiştirilme Alanları. 74
Çizelge 5.8. Sulama Birlikleri ve Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı 74
Çizelge 5.9. Sol Sahildeki Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı 75
Çizelge 5.10. Sağ Sahildeki Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı..... 75
Çizelge 6.1. Pompaj Oranındaki Azalış ve Artışa Bağlı Deniz Suyu Girişiminde İlerleme ve Gerileme..... 89
Çizelge 6.2. Pompaj Oranındaki Azalışa Bağlı 300.000 Gün Sonra Deniz Suyu Girişiminde Gerileme 91
Çizelge 6.3. IPCC (2007) İklim Değişikliği Senaryoları, SPM–2 92
Çizelge 6.4. Yeraltısuyu Beslenme Miktarlarındaki Azalma..... 93
Çizelge 6.5. Yeraltısuyu Beslenme Miktarlarındaki Azalma..... 94
Çizelge 6.6. Deniz Seviyesi Yükselmesi Sonucu Sular Altında Kalacak Alanlar 94
Çizelge 6.7. Senaryolar için Sıcaklık, Deniz Seviyesi, Beslenme ile Pompaj Miktarındaki Artış ve Azalış Miktarları 95
Çizelge 6.8. Senaryo 1'e göre Deniz Suyu Girişiminde İlerleme 98
Çizelge 6.9. Senaryo 2'ye göre Deniz suyu girişiminde ilerleme 101
Çizelge 6.10. Senaryo 3'e göre Deniz Suyu Girişiminde İlerleme 104

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 3.1. Keskin Ara Yüzey Yaklaşım Modeli 25
Şekil 3.2. Ghyben–Herzberg Yaklaşımı 28
Şekil 4.1. Akiferde Aynı Noktada Olan Biri Tatlı Suyla (A), Biri Tuzlu Suyla (B) Doldurulmuş Piezometreler 37
Şekil 4.2. Gözenekli Ortamdaki Akış İçin Birim Kontrol Hacmi 39
Şekil 4.3. Üç Boyutlu Grid Ağı 44
Şekil 4.4. Hücre Merkezli Grid Ağı 44
Şekil 4.5. Sonlu Farklar Modelindeki (i,j,k) İndeksli Hücre ve Bitişik Altı Hücrenin İndeksleri. 45
Şekil 5.1. Gölsu Deltası Genel Konumu 49
Şekil 5.2. Göksu Deltasındaki Hidrojeolojik Enkesit (Gordu, 2000) 54
Şekil 5.3. Göksu Deltası Akiferindeki Gözlem Noktalarının Model Alanında Dağılımı 55
Şekil 5.4. Temmuz 2008 Gözlenen Cl Değerlerine ait Kriging Tahmin Haritası 58
Şekil 5.5. Temmuz 2008 Gözlenen EC Değerlerine ait Kriging Tahmin Haritası 59
Şekil 5.6. Na/Cl Oranına Karşı Cl Konsantrasyon Değerleri (Temmuz 2008) 60
Şekil 5.7. TDS–Cl Konsantrasyon İlişkisi (2008 Su Yılı Verileri) 61
Şekil 5.8. Koşullanma Eşlenik Gradyan Paketi 2 Diyalog Kutusu 62
Şekil 5.9. Göksu Deltası Akiferinin Sonlu Farklar Model Ağı 64
Şekil 5.10. Akiferin Kuzey–Güney Doğrultusundaki Kalınlık Değişimi 65
Şekil 5.11. Düşey Sızma Katsayısının Hesaplamasında Kullanılan Grid Şekli 67
Şekil 5.12. Yağış ile Yeraltı Su Seviyesinde Yükselme Arasındaki İlişki 70
Şekil 5.13. Yağış ile Yeraltı Su Seviyesinde Yükselme Arasındaki İlişki 71
Şekil 5.14. Bölgelere göre yeraltı suyu beslenme dağılımı 73
Şekil 5.15. Göksu Deltası Akiferindeki Kuyuların Model Alanındaki Dağılımı 76
Şekil 5.16. Gözlenen ve Model ile Elde Edilen Yeraltı Su Seviyelerinin Saçılma Diyagramı 77

Şekil 5.17. Gözlenen ve Model ile Elde Edilen TDS Değerlerinin Saçılma Diyagramı 77
Şekil 5.18. Kalibrasyon Sonrası, 1,4,6 ve 7. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası. 78
Şekil 5.19. Kalibrasyon Sonrası, 2,3 ve 5. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası. 79
Şekil 5.20. Kalibrasyon Sonrası, 8. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası. 79
Şekil 5.21. Kalibrasyon Sonrası, 9–20. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası. . 80
Şekil 5.22. Göksu Deltası Serbest Akiferi için Kalibre Edilmiş Yeraltı Su Seviye haritası. 81
Şekil 5.23. Göksu Deltası Akiferi için Kalibre Edilmiş Yeraltı Su Seviyesinin En Kesit Boyunca Değişim Haritası. 82
Şekil 5.24. Göksu Deltası Serbest Akiferi için Kalibre Edilmiş TDS Haritası. 83
Şekil 5.25. Göksu Deltası Akiferi için Kalibre Edilmiş TDS Değerinin En Kesit Boyunca Değişim Haritası. 84
Şekil 5.26. Göksu Deltası Akiferinin Su Bütçesi 85
Şekil 6.1. Pompaj Miktarının Artış ve Azalışına Akiferin Tepkisi 88
Şekil 6.2. Pompaj Miktarının Azalışına Akiferin 300.000 Gün Sonraki Tepkisi 90
Şekil 6.3. Sıcaklık–Beslenme ilişkisi (2008 su yılı) 93
Şekil 6.4. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 1–Pompaj hariç) 96
Şekil 6.5. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 1–Pompaj dahil) 97
Şekil 6.7. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 2–Pompaj hariç) 99
Şekil 6.8. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 2–Pompaj dahil) 100
Şekil 6.9. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 3–Pompaj hariç) 102
Şekil 6.10. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 3–Pompaj dahil) 103

SİMGELER VE KISALTMALAR

H_f : tatlı su için piyozemetrik yükseklik

H_s : tuzlu su için piyozemetrik yüksekliği

γ_f : tatlı suyun özgül ağırlığı

γ_s : tuzlu suyun özgül ağırlığı

z : referans düzlemi

q_f : tatlı suyun özgül debisi

S_0 : özgül depolama

t : zaman

K_f : tatlı su için hidrolik iletkenlik

K_s : tuzlu su için hidrolik iletkenlik

k : permeabilite

μ_f : tatlı su için dinamik viskozite

μ_s : tuzlu su için dinamik viskozite

h_{0f} : tatlı su için bilinen başlangıç piyezometrik yükseklik

h_{0s} : tuzlu su için bilinen başlangıç piyezometrik yükseklik

z_i : ara yüzün yüksekliği

h_f : tatlı suyun yüksekliği

h_s : tuzlu suyun yüksekliği

K_{ij} : hidrolik iletkenlik

h : hidrolik yükseklik

x_j : kartezyen koordinatları

η : yoğunluk eşlenme katsayısı

c : çözünmüş madde konsantrasyonu

e_j : yer çekim kuvvetinin birim vektörü

S : özgül depolama katsayısı

ϕ : zeminin gözenekliliği

Q : beslenme/boşalım değeri

ρ : karışık akışkanın yoğunluğu

ρ_f : referans tatlı suyun yoğunluğu

P : akışkanın basıncı

z : referans düzlemi

k_{ij} : özgül geçirgenlik tensörü

μ : akışkanın dinamik viskozitesini

μ_0 : tatlı suyun dinamik viskozitesi

D_{ij} : hidrodinamik yayılma tensörü

V_i : Darcy hızı

c^* : sisteme katılan/sistemden çıkan suyun konsantrasyonu

K_{ij}^0 : tatlı su durumundaki hidrolik iletkenlik

d_{ij} : akiferin dispersiyon sabiti

v_m : m doğrusundaki hız bileşeni

v_n : n doğrusundaki hız bileşeni

v : hızın büyüklüğü

P_N : N noktasındaki basınç, (kg/ms^2)

ρ_f : tatlı suyun yoğunluğunu, (kg/m^3)

g : yer çekimi ivmesi, (m/s^2)

Z_N : N noktası ile referans düzlemi arasındaki mesafe, (m)

ρ_s : N noktasındaki tuzlu yeraltı suyunun yoğunluğu, (kg/m^3)

∇ : gradyan operatörünü ($\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}$)

$\vec{q}$: özgül debi vektörü

$\overline{\rho}$: kontrol hacmine giren veya çıkan akışkanın yoğunluğu

q_s : kontrol hacmine giren veya çıkan akımın hacimsel debisinin birim hacme oranı

θ : porozite

ε : yoğunluk farkı oranı

P : boşluk suyu basıncı

C : çözünmüş madde konsantrasyonu

ζ	: gözenekli malzemenin sıkışabilirliği
S_p	: basınca dayalı özgül depolama
D	: hidrodinamik dipsersiyon katsayısı
$\bar{v}$	: akışkanın viskozitesi
C_d	: bir kaynaktan giren veya çıkan çözünmüş madde konsantrasyonu
R_k	: farklı reaksiyonlarla çözünmüş madde oluşumu veya azalması
$A_{j,k}$	: α eksenine dik doğrultudaki sonlu farklar hücresinin alanı
$Z_{i,j,k}$	: hücre merkezinin yüksekliği
n	: zaman adım numarası
$V_{i,j,k}$	: hücrenin hacmi
Q_s	: giren veya çıkan hacimsel akış oranı
Vcont	: iki tabaka arasındaki sızma miktarı
P_s	: perkülasyon (sızma) miktarı
P_t	: yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olan yağış miktarı
P_e	: yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olmayan yağış miktarı
ΔH_k	: tabaka kalıklığı
EC	: elektriksel iletkenlik
TDS	: toplam çözünmüş madde konsantrasyonu
Cl	: klorür
Na	: sodyum
Mg	: magnezyum

1. GİRİŞ

Su yer yüzeyinde en değerli doğal kaynaktır. Mevcut su kaynakları arasında yüzeysel sular toplam miktarın %99.4'ünü ($1.4x10^9$ km^3), yeraltı suları ise %0.6'sını ($9x10^6$ km^3) oluşturmaktadır. Fakat hidrolojik çevrim içindeki suların %97.34'si deniz ve okyanuslar gibi tuzlu sulardan oluşmaktadır. Geriye kalan tatlı suların (%2.66 toplam suya göre) büyük çoğunluğu %77.23'ü buzullarda, %22.38'i yeraltı sularında, %0.36'sı göller ve akarsularda ve %0.03'ü ise atmosferde bulunmaktadır (Bear ve ark, 1999).

Dünyada olduğu gibi Türkiye'de de yüzeysel su kaynakları yaygınlıkla kullanılmasına rağmen, bazı iletim problemlerinden, çevresel etkilerden, tarımdaki sulama tekniklerinden, taşınan katı madde (sediment) ve buna bağlı sulama sistemindeki olumsuzluklardan (yağmurlama, ya da damlama sisteminde olduğu gibi) yeraltı su kaynaklarının da kimi bölgelerde yoğun olarak kullanılması gerekmektedir. Yeraltı suyu işletmesinde akifer sınırları içinde yıllık su çekme miktarları, su çekmek veya yapay besleme için kuyuların yerlerinin tespiti gibi kararların verilmesi en az yeraltı suyunun kalitesi kadar önemlidir. Dünyanın birçok bölgesinde yeraltı suyu kalitesi gün geçtikçe kötüleşmekte ve resmi kurumlar yeraltı suyu kirlenmesi üzerinde durmaktadır (Emekli, 1993).

Kıyı bölgelerindeki tatlı yeraltı suyu sistemleri tuzlu deniz suyu ile temas halindedir ve akiferlerden çekilen suyun akiferlere etkisi dikkate alınmadan kullanılmaktadırlar. Bu süreç yeraltı su seviyelerinde ve su kalitesinde değişmeler şeklinde kendisini göstermektedir. Yeraltı suyundan aşırı su çekilmesi sonucu deniz suyu tatlı su akiferlerinin içine doğru çekilir. Bu suyun kalitesini bozarak içilebilirliğini azaltmasının yanı sıra sulama suyu gibi diğer amaçlardaki faydalı kullanımı da azaltmaktadır. Dolayısıyla, yeraltı suyu hareketi ile tuzlu su–tatlı su etkileşimi ve bunları etkileyen faktörler bu kaynakların korunması ve gelecekte kullanımı için incelenmelidir.

Günümüzde bölgesel su ihtiyacını karşılamak için başlangıç yatırımı fazla ve maliyetli olan yüzeysel su projeleri yerine yeraltı suları tercih edilmektedir. Yeraltı

suyu sistemlerinde karşılaşılan ilk kirlenme kıyı akiferlerindeki deniz suyu girişimidir. Kıyı bölgelerindeki şehirleşmenin artmasından dolayı içme-kullanma ve tarımsal sulama suyu olarak tatlı suya olan ihtiyaç artmıştır. Yeraltısu kaynaklarının kullanımındaki artışın yanı sıra küresel iklim değişikliği de deniz suyu girişimini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. İnsan kökenli etkilerin yol açtığı ya da açacağı iklim değişikliklerinin su kaynaklarına nasıl yansıyacağı küresel iklim modelleriyle üretilen iklim projeksiyonlarının bölgesel bir modele uygulanması ile araştırılmalıdır. Bir yeraltı suyu sisteminin tepkisi ile ilgili gerekli bilgiler bir model yardımıyla sağlanabilir. Model, sistem uyarıldıktan sonraki davranışlarını tanımlamaktadır. Ele alınan örneğin heterojenliği, akifer sınırlarının düzensizliği ve çeşitli temel denklemlerinin analitik formlarından dolayı sadece nümerik modeller gerekli tahminlerin yapılmasını sağlayabilmektedir.

Göksu Deltası, orta Torosların eteğinde bulunan Mersin iline bağlı Silifke ilçesinin güney kenarındadır. Göksu Deltası su kaynakları açısından zengin olup yaklaşık 9500 hektarı sulanmaktadır. 1972 yılında DSİ I. Merhale Sulama Projesi ile 53.225 dekar (da) alanın sulamaya açılmıştır. Deltada sulanan alanların geriye kalan yaklaşık 40.000 da'lık kısmı ise çiftçilerin I. Merhale Projesinin uç noktaları, yeraltı suyu ve yer yer drenaj kanallarından temin edilen su ile sulanmaktadır (Özel Çevre Koruma, 2009). Bunun yanı sıra sulama alanı içerisindeki bazı çiftçiler kanaletlerdeki taşınan katı madde (sediment) ve buna bağlı sulama sistemindeki olumsuzluklardan dolayı yeraltı sularını tercih etmektedir. Bundan dolayı yeraltı suyundan fazla miktardaki su çekimi yeraltı su seviyesinin aşırı düşmesine ve deniz suyu girişiminin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durum gelecekte birçok problemin çıkmasına sebep olabilecektir, bunu önlemek veya kontrol altına alabilmek için yeraltı suyu işletme tekniklerinin bölgeye uygulanması gerekmektedir. Yeraltı su kaynaklarının potansiyeli belirlenerek deniz suyu girişimi probleminin durumu ve kapsamı belirlenmelidir. Bu yüzden yeraltı suyu akımının ve tatlı su–tuzlu su etkileşiminin fiziksel mekanizması doğru bir şekilde tanımlanmalıdır ve gelecekteki yeraltı suyu kullanım politikalarının belirlenmesinde kullanılacak gerekli ölçümler yapılmalıdır.

Bu çalışmanın amacı Göksu deltasındaki tatlı su ile tuzlu su arasındaki ilişkiyi incelemek ve deltadaki deniz suyu girişim problemini araştırmaktır. Ayrıca yeraltı su kaynaklarındaki ihtiyaca bağlı artma ve azalma durumuna göre pompaj politikalarındaki değişimin ve küresel iklim değişikliğinin deniz suyu girişimine etkilerini araştırarak oluşabilecek problemlerin önceden tahmin edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak geliştirilen model ile tatlı su-tuzlu su ara yüzünün konumu ve deniz suyu girişiminin potansiyel riski belirlenmiştir. Araştırma üç ayrı aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada tüm erişilebilir veriler toplanmış ve doğruluğu analiz edilmiştir. Akiferin nicelik özellikleri eldeki veriler kullanılarak geniş kapsamlı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca Göksu deltasını temsil edebilecek 24 adet değişik derinliklerdeki kuyuların 2008 su yılına ait yeraltı su seviyeleri ve klorür miktarları ölçülmüştür. Bu ölçümler deltadaki yeraltı suyu akım ve taşınım hareketinin tam olarak anlaşılabilmesi için geliştirilecek olan modelin kalibrasyonu için kullanılmıştır. İkinci aşamada, bölgedeki tatlı su ile tuzlu su arasındaki dinamik ilişkiyi tanımlamak için nümerik model geliştirilmiştir. Daha sonra bu mekanizmanın zamana, yere ve alana göre dinamik davranışı araştırılmıştır. Bu olay akışkan akımını ve tuzlu su kirlenmesini birlikte dikkate alan bir simülatör olan SEAWAT-2000 paket programı yardımıyla yapılmıştır. Göksu deltasına ait elde edilen bilgilerin bahsedilen programa girişi için görsel ara yüz görevi yapan GW Vistas Versiyon 5.0 (GW Vistas, 2006) yeraltı suyu modelleme programından yararlanılmıştır. Geliştirilen modelde başlangıç hidrolik yük dağılımı, ilk aşamada elde edilen 2008 su yılına ait statik su seviyelerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Kuyularda ölçülmüş statik su seviye ve toplam çözünmüş madde değerleri modele aktarılmış ve dengeli akım koşullarında çalıştırılarak oluşturulan modeldeki akiferin sınır koşulları ve parametreleri kalibre edilmiştir. Üçüncü aşamada ise, pompaj oranlarının değişimi ve iklim değişikliği dikkate alınarak oluşturulan senaryoların Göksu deltasındaki deniz suyu girişimine etkileri incelenmiştir. İlk olarak yeraltı sularının kullanımının artması veya azalması durumunda deniz suyu girişiminin hareketi incelenmiştir. Daha sonra iklim ve iklime bağlı hidrolojik çevrim elemanlarında öngörülen değişimlerin hidrojeolojik sistem üzerindeki etkilerini incelemek için göz önüne alınan iklim

değişim senaryolarının deniz suyu girişimine etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan iklim değişikliği senaryoları, yeraltı suyu beslenmesinin azalmasını, deniz suyu seviyesinin yükselmesini, sıcaklığın artışını ve yüzey suyu kaynaklarının kullanılamaz duruma gelmesi sonucu tarımsal ve kullanma suyu ihtiyacının yeraltı suyundan karşılanmasını kapsamaktadır.

Bu çalışmayla kıyı akiferlerinde yeraltı sularının aşırı kullanılması sonucu oluşan deniz suyu girişiminin konumsal ve zamansal değişimi geliştirilen model yardımıyla Silifke–Göksu deltası örneğine uygulanmıştır. Deltadan uzun süreli faydalı su sağlamak ve gelecekteki işletme politikası için karar vericilere yardımcı olması amacıyla küresel iklim değişikliği ile tarımsal ve kullanma suyu ihtiyacının yeraltı suyundan karşılanması gerektiğinde tatlı su–tuzlu su arasındaki etkileşimin durumu ve hareketi tanımlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda kıyı bölgelerde yeraltı sularının kullanımının artması ve deniz suyu girişimi probleminin ortaya çıkması kıyı akiferleri için işletme politikaları oluşturulurken deniz suyu girişiminin dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. İşletme çalışmaları için geliştirilen üç boyutlu yeraltı suyu akım modelleri, işletme amaçları ve kısıtlarını dikkate alan optimum işletme stratejilerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Literatürde, deniz suyu girişiminin mekanizması, sayısal benzetim modellemesi (simülasyonu) ve iklim değişikliğinin yeraltı sularına etkileri konusunda birçok çalışma bulunmaktadır.

2.1. Deniz Suyu Girişimi ile İlgili Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, deniz suyu girişimi ile ilgili çalışmaların sonuç ve kararları hakkında kısaca bilgi verilecektir. Bu çalışmalar güncel çalışmaların çoğunda referans olarak kullanılmasına rağmen, 1965 öncesi ve 1965–1985 döneminde deniz suyu girişim mekanizması ile ilgili yapılan çalışmalar için Reilly ve Goodman (1985), 1985-1991 dönemi için Emekli (1993) ve Karahanoğlu ve ark (1995) tarafından yapılan çalışmalar temel çalışma olarak seçilmiştir. Çalışmalar konuya göre değil tarih sırasına göre düzenlenmiştir.

Kıyı akiferlerindeki tatlı su–tuzlu girişimi ile ilgili yapılan en eski çalışmalardan biri 1880'lerin sonlarında Avrupa'nın kuzey kıyı bölgesinde yapılmıştır. Avrupalı iki bilim adamı W. Badon–Ghijben (Ghyben) (1889) ve A. Herzberg (1901) birbirinden habersiz olarak serbest bir akiferdeki tatlı su ile tuzlu arasındaki keskin ara yüz yüksekliği ile yeraltı suyu tablasının yüksekliği arasındaki ilişkiyi veren formülü geliştirmişlerdir.

Badon Ghyben–Herzberg formülü 1930'lardan önce sadece varsayılan tatlı su–tuzlu su ara yüzünün konumunun nicelik olarak belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu formüle göre serbest akiferde ölçülen su tablası seviyesinin belirli bir katsayı ile çarpılması sonucu tatlı su–tuzlu su sınırının derinliği bulunabilmektedir. Bu katsayı

ise tuzlu su ile tatlı suyun yoğunlukları kullanılarak elde edilmektedir. Reilly ve Goodman (1985) deniz suyu girişiminin meydana geldiğini ve tatlı su–tuzlu su ara yüzünün ortaya çıktığını bu dönemdeki birçok arazi çalışmasını referans göstererek belgelemişlerdir.

1930'larda Muskat (1937) ve Hubbert (1940), akım alanındaki basıncın sürekliliği varsayılan ara yüzeyde sabit olması gerektiğini göstermişlerdir. Böylece, tatlı su ve tuzlu su akım alanları genel bir keskin sınırla birleşmektedir. Bu formülasyon sadece su tablası ölçümleri kullanan Badon Ghyben–Herzberg denklemi kullanılarak yapılan yetersiz uygulamaların sonunu getirmiştir.

Reilly ve Goodman (1985), 1940 ile 1965 yılları arasındaki araştırmaları özetlemiştir. Bu çalışmaların birçoğu hidrodinamik yayılım (dispersiyon) ve yoğunluk mekanizmasını anlamaya yöneliktir ve ayrıca analitik ve nümerik yaklaşım sonuçlarının karşılaştırılmaları ile ilgilidir. Tatlı su–tuzlu su karışım (karışım bölgesi) hipotezi bu dönemde geliştirilmiştir. Arazi çalışmaları, jeolojik yapıdaki ve iletkenlik özelliklerindeki değişimlerin etkili olduğunu göstermiştir. Wentworth (1951, Essaid 1986'dan) yapay beslenme veya su çekilmesinin, ilk olarak tatlı su yüksekliğinde değişim ve ikinci ve daha yavaş olarak da tatlı su ara yüzünün konumundaki değişim olarak tepki göstereceğini ortaya atmıştır. Wentworth (1951: Essaid, 1986'dan) tatlı su–tuzlu su ara yüzündeki gecikmeyi gerçek fiziksel bir sistem içerisinde kaba olarak kendi prensiplerine göre göstermiştir. Cooper(1959), Glover (1959), Henry (1959), Bear ve Dagan (1964) ve Charmonman (1965) tatlı su akımı, yayılım (dispersiyon), keskin ara yüzey (sharp interface) ve bu yüzeyin zamana bağlı değişimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Henry (1960, Lee ve Cheng, 1974'den) yaptığı çalışmada, idealize edilmiş bir akiferde tatlı su–tuzlu su girişiminde dispersiyon etkisinin düzenli akım durumundaki çözümünü elde etmiştir. Henry (1964: Reilly ve Goodman, 1985'den) aynı zamanda ilk defa dispersiyonun nicelik olarak etkilerini ve kıyı akiferlerindeki yoğunluğa dayalı akışkan akımının deniz suyu girişimi üzerine etkilerini araştırmıştır. Henry (1964) tarafından geliştirilen dispersiviteye dayalı simülasyon modeli gelecekteki araştırmalar için bir basamak olmuştur. Bu dönemde geliştirilen analitik çözümler akım koşullarını ve tatlı su– tuzlu su mekanizmasını

Badon Ghyben–Herzberg'den daha iyi tanımlamaktadır (Glover,1959). Bu nedenle analitik çözümler basit adveksiyon kontrollü sistemlerde daha doğru sonuçlar vermiş ve yoğun olarak kullanılmıştır.

Yeraltı suyu sistemlerindeki tuzlu su–tatlı su ilişkisiyle ilgili yapılan çalışmalar 1965'e kadar sınırlıyken konu üzerindeki gelişmelerden sonra çalışma sayısı artmıştır (Reilly ve Goodman, 1985). Çalışmalar konularına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir; iki boyutlu kesit ve alansal analiz, üç boyutlu analiz, çok katlı akifer analizleri, koni yükselimi (upconing) uygulamaları ve sayısal yöntemler ve arazi çalışmaları için yapılan öneriler.

Dagan ve Bear (1968), keskin ara yüzeyde oluşan konik yükselmenin zamana bağlı tahmini çözümünü elde etmişlerdir. Düzgün geometriye sahip homojen akiferdeki sığ bir kuyudan çekilen tatlı suyun keskin ara yüzeye etkisi incelenmiştir. Analitik çözümler ile kum tankı modelinden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Kum tankı modelinin %50 tuzluluk değerleri esas olarak alınmış ve bu şekilde keskin ara yüzey yaklaşımlı analitik sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ara yüz ile su alma ağzı arasında oluşan tepe noktası, başlangıç mesafesinin 1/3 oranında su alma ağzına doğru yükseldiği durumda keskin sınır ara yüzey yaklaşımının yaklaşık sonuçlarının geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu 1/3 oranı kritik değer olarak kabul edilmiştir.

Schmorak ve Mercado (1969) hidrodinamik dispersiyon kavramını Dagan ve Bear (1968) tarafından geliştirilen model denklemlerine eklemişlerdir. Pompalanan suyun tuzluluğu ile tatlı su–tuzlu su sınırının konumu arasındaki ilişkiyi tespit etmişlerdir.

Pinder ve Cooper (1970) karakteristikler yöntemini kullanarak deniz suyu girişiminin zamana bağlı değişimini, dört köşeli bir akiferde dispersiyon etkisini de göz önüne alarak araştırmışlardır. Elde ettikleri çözümü Henry (1959) tarafından geliştirilen analitik çözüm ile karşılaştırmışlardır. Henry (1959) ile aynı sınır koşullarında yaptıkları çözümün çok başarılı sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir.

Shamir ve Dagan (1971), kıyı akiferlerindeki keskin ara yüzey hareketini simüle eden nümerik model geliştirmişlerdir. Bu model basınçlı ve serbest akiferler

için geçerlidir. Çalışmada düşey kesit seçilmiş ve düşey boyutta integral alınarak denklemler bir boyuta indirgenmiştir. Elde edilen denklemler sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Nümerik sonuçlar hipotetik lineer ara yüzey probleminin sonuçlarıyla uygunluk göstermiştir. Fakat, Hele–Shaw (1898) modelinden elde edilen deneysel bulgularla arasında aynı başarı elde edilememişlerdir.

Çok katlı kıyı akifer sistemlerinde deniz suyu girişimi birçok araştırmacı tarafından tanımlanmıştır. Collins ve Gelhar (1971) iki tabakadan oluşan çok katlı bir akiferde dengeli akım koşulları ve kesin girişim sınırı kabulleri ile ikinci tabakadaki deniz suyu girişimini araştırmışlardır. Her iki seviye için çözüm elde etmişler ve sonuçları Hele–Shaw (1898) modeli ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalardan tatlı su–tuzlu su sınırının değişimi ile ilgili başarılı sonuçlar elde etmişler, ancak bu sınırın topuk kısmında aynı başarı elde edilememiştir. Bu uyumsuzluğu, çözümde kullandıkları Dupuit (1863) varsayımlarına bağlanmışlardır.

Fetter (1972) düzenli akım ve keskin ara yüzey yaklaşımıyla problemi analitik olarak basit sınır problemleri için çözmüştür. Bu çözümler Henry (1959)'nin elde ettiği bulgular ile tamamen aynıdır. Mualem ve Bear (1974), Collins ve Gelhar (1971)'ın çalışmalarında elde ettikleri topuk bölgesindeki başarısız sonuçların sebebi olarak uygun olmayan matematik modeli ve sınır koşullarının kullanılması olduğunu açıklamışlardır. Aynı şekilde iki tabakadan oluşan çok katlı akiferi üç düşey alt bölgeye ayırmışlardır. Bu bölgelerin her birini üst ve alt yarı geçirgen bölge olarak iki alt bölgeye daha ayırmışlardır. Akım denklemlerini tüm alt bölgelerde eş zamanlı olarak çözmüşler ve sonuçları Hele–Shaw (1898) modelinin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Dupuit (1863) varsayımlarının önemli bir çelişki ortaya çıkarmadığı sonucuna varmışlardır.

Segol ve ark (1975) zamana bağlı olarak gözlenen deniz suyu girişim hareketini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlar ve çalışmada, hareketin yoğunluk farkına bağımlı olduğu varsayımını kullanmışlardır. Konsantrasyonun çözümünü, akım denklemlerinde varsayılan yoğunluk profilinin günceleştirilmesiyle sağlamışlardır. Hız ve basınçlar için yeni tahminler elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile Henry (1959) ile Pinder ve Cooper (1970)'in sonuçlarını lineer ve

kuadratik izoparametrik elemanlar kullanarak karşılaştırmışlardır. Metotlar arasındaki uyum tatmin edicidir ve seçilen her iki tip izoparametrik elemanların sonuçları benzerdir. Segol ve ark (1975) aynı zamanda katlı ve homojen olmayan durumlar içinde sonuç elde etmişlerdir. Permeabilitenin dereceli olarak değiştiği akiferler için hidrolik iletkenliği pratik olarak temsil eden bir gösterim önermişler ve ani bir değişiklik olmadığı durumlar da hidrolik iletkenliğin her bir eleman için sabit bir değer alınabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Segol ve Pinder (1976), Segol ve ark (1975) tarafından geliştirilen metodu Florida'daki Biscayne akiferinde iki boyutlu deniz suyu girişiminin simülasyonu için kullanmışlardır. Simülasyon su tablasının yüksekliğini ani artıran bir yağmurdan önceki ve sonraki arazi verileri elde edilerek kullanılmıştır.

Alansal, iki boyutlu ve zamana bağlı deniz suyu girişiminin simülasyonu için Pinder ve Page (1977) sonlu elemanları kullanmışlardır. Keskin sınır ara yüzey yaklaşımı kullanılmış ve her bir akışkan için doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ara yüzey sınırıyla ilişkilendirilmiştir.

Van der Veer (1977) iki boyutlu kıyı akiferlerinde Badon Ghyben–Herzberg keskin ara yüzey probleminin iki boyutlu analitik çözümünü göstermiştir. Sonuç olarak, Badon Ghyben–Herzberg yaklaşımının serbest akiferde kıyıya yakın yörelerde başarılı olmadığını, bunun yanında dengeli akım koşullarında ise bu yöntemin çok başarılı sonuçlar verdiğini ileri sürmüştür.

Deniz suyu girişimi probleminin alansal, kısmi üç boyutlu ortamda çözümü Mercer ve ark (1980) tarafından gerçekleştirilmiştir. Düşey boyutta integrasyon yönteminin kullanıldığı bu çalışmada keskin ara yüzey denklemlerini kullanmışlar ve sonlu farklar metodu ile çözmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar Hele–Shaw modelinin sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

Polo ve Ramis (1983), keskin ara yüzey yaklaşımı için sonlu farklar modelini kullanmışlardır. Geliştirdikleri modelin en önemli avantajı yakınsamayı sağlamak için gerekli olan zaman adımlarında limitinin olmamasıdır. Birçok analitik çözümlerle karşılaştırıldığında modelin yeterliliğinin çok iyi olduğu görülmüştür.

Reilly ve Goodman (1985) kıyı akiferlerinin içinde veya yakınındaki tatlı su–tuzlu su geçiş bölgesinin kalınlığının ve konumunun belirlenmesindeki önemli faktörleri tanımlamışlardır. Çalışmada önemli teorik ve arazi çalışmalarını kronolojik sıraya göre özetlemişlerdir. Ayrıca, kıyı akiferlerindeki tatlı su–tuzlu su girişimi, hesaplama ve simülasyon metotları hakkındaki literatür bilgilerini özetlenmişlerdir.

Eyre (1985) akiferdeki tatlı su yüzünün simülasyonunu Ghyben–Herzberg prensibi ile birleştirerek ve tuzlu su akımının anlık bir olay olduğunu varsayarak modellemiştir. Essaid (1986) akiferdeki gözlenmiş yıllık tatlı su yüksekliklerini, akifer tepkilerini dikkate alarak üç boyutlu sonlu farklar modeli kullanarak tekrar elde etmiştir. Model tatlı su ile tuzlu su akışın simülasyonunu keskin sınır ara yüzey yaklaşımını kullanarak yapmaktadır. Serbest akiferdeki hidrolik iletkenliği, sınır koşullarını, geçici tepkilerdeki anizotropiyi ve depolama karakteristiğini incelemiştir.

Sugio ve ark (1987) serbest yarı geçirgen kıyı akiferlerdeki deniz suyu girişimini pratik olarak tahmin etmek ve işletmesini sağlamak için sonlu farklar bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Hesap edilmiş keskin sınır ara yüzey sonuçları iki boyutlu kum tankı modelinden elde edilen gözlem sonuçları ile doğrulanmıştır.

Kuyularda tuzlu suyun yükselmesi Reilly ve ark (1987) ve ayrıca Reilly ve Goodman (1987) tarafından sonlu elemanlar kullanılarak ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmaların ilkinde keskin ara yüzey yaklaşımı kabul edilmiş ve kararlı hal için çözüm gerçekleştirilmiştir. İkinci çalışmada ise hem keskin ara yüzey hem de yoğunluğa bağlı geçiş bölgesi yaklaşımını kullanılmışlardır. İki model aynı alana uygulanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Reilly ve Goodman (1987) literatürden alınmış dört örneğe hem keskin sınır ara yüzey hem de yoğunluğa bağımlı çözünmüş madde taşınımı yaklaşımlarını uygulamışlardır. İki metodu da içeren nümerik deneylerin sonuçlarına göre düşük ve orta dereceli pompajlarda çözünmüş eş klor taşınımı ile keskin ara yüzey yaklaşımı arasında yüksek korelasyon gözlerlerken, yüksek pompajlar da özellikle kuyu alt kesimlerinde korelasyon olmadığını gözlemlemişlerdir. Yoğunluğa bağlı kararlı hal problemi için konsantrasyonun dağılımı yatay dispersivite için çok hassasken düşey dispersivite de

hassas olmadığını göstermişlerdir. Keskin sınır ara yüzey yaklaşımının ince geçiş bölgesinin oluştuğu durumlar için kullanılabileceğini önermişlerdir.

Wilis ve Finney (1988) geliştirdikleri işletme modelinde amaç, faydaların maksimizasyonu ve giderlerin minimizasyonudur. Bu doğrultusunda gerekli pompaj ve yeniden beslenme oranlarını, kuyu kapasitelerini ve hidrolik yükseklik kısıtlarını birlikte dikkate almışlardır. Modelin karar verici değişkenleri olarak, yeraltı suyu yüksekliği, deniz suyu yüksekliği ve planlama periyodunun sonundaki tatlı su–tuzlu su girişiminin başlangıç yeridir.

Ledoux ve ark (1990) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak tatlı su–tuzlu su girişim bölgesi iki boyutlu akımın nümerik modelini geliştirmişlerdir. Bölgesel iki boyutlu yeraltı suyu akım modeli sonuçları analitik çözümlerle ilerleyen bir girişim bölgesi ve tuzlu su üzerinde yüzen bir tatlı su merceği için test etmişlerdir. Bu modelin gerçek bir kıyı akiferine uygulanmasını Rivera ve ark (1990) göstermişlerdir.

Finney ve ark (1992) Jakarta'daki tabakalı akifer sisteminde deniz suyu girişimini kontrol etmek için simülasyon ve optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. İşletme modeli varsayımsal üç boyutlu keskin ara yüzey modelini ve non–lineer programlama modelini birleştirmektedir. Model akifer sisteminin hidrolik davranış denklemlerini ve yeraltı suyu pompaj limitlerini kapsamaktadır. Geliştirdikleri işletme modelinin amacı akifer sistemindeki toplam tuzlu su hacminin minimizasyonudur.

Hallaji ve Yazıcıgil (1996) Erzin akifer sisteminin geliştirilmesi ve işletilmesi üzerine kurulan amaç ve kısıtlara uygun olarak optimum pompaj programının belirlenmesi için yedi adet yeraltı suyu işletme modeli geliştirmişlerdir. Bu şekilde bir işletme programın belirlenmesi için, akifer sisteminin hidrolik tepkisini gösteren kararlı ve kararsız sonlu elemanlar benzetim modelleri tepki fonksiyonları yaklaşımı kullanılarak doğrusal ve kuadratik optimizasyon modellerine bağlanmıştır.

Yazıcıgil (1998) yapmış olduğu çalışmasında, yeraltısuyu işletme problemlerinin çözümü için yeraltısuyu benzetim modelleri ile optimizasyon modellerinin ne şekilde birleştirildiğini açıklamış ve sonuçlanan birleşik yeraltısuyu

modelinin etkinliğini göstermek üzere örnekler vermiştir. Çalışmada örnek olarak Hatay-Erzin ovası için deniz suyu girişimi altında pompaj politikasının belirlenmesi, optimum kapasite genişletme modeli ve optimum atık iyileştirme sistemlerini göstermiştir.

Bear ve ark (1999) kıyı bölgelerinde deniz suyu ve tatlı su arasında çok hassas bir denge olduğunu göstermişlerdir. Yeraltından aşırı şekilde su çekilmesi tatlı su ile deniz suyunun birleşme bölgesinin iç kesimlere doğru ilerlemesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak tatlı su akiferlerindeki tuzlu sudan dolayı zeminde de tuzlanma meydana gelmektedir. Yeraltı suyuna % 2–3 oranında deniz suyunun karışması yeraltı suyunun insanın tüketimine uygunsuz hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu değerin biraz daha artması yeraltı suyunun tarıma da elverişsiz hale geleceğini vurgulamışlardır.

Das and Datta (1999) kıyı akiferlerindeki yoğunluğa bağlı yeraltı suyu akım ve taşımın modelinin içine işletme modelinin kısıtlarını yerleştirmişlerdir. İşletme modelinin amaçları kıyı akiferlerindeki su çekimini ve tuzluluğu kontrol için planlanmış makul senaryoları içermektedir. Çözümlerin sonuçları, geliştirilmiş optimizasyon modellerinin uygulanabilirliğini ve aynı zamanda kıyı akiferlerinin farklı işletme durumlarında doğasındaki karmaşıklığı göstermiştir.

Cheng ve ark (2000) kıyı akiferinde var olan kuyulardan çekilecek optimum pompaj politikasını belirlemek için Genetik Algoritma (GA)'yı kullanmışlardır. Deniz suyu girişim mekanizması olarak basitliğinden dolayı keskin ara yüzey yaklaşımını tercih etmişlerdir. Çalışmalarında pompaj oranlarını ayrıklaştırarak Yapısal Messy Genetik Algoritması yaklaşımını kullanmışlardır. Yaklaşımda pompaj oranlarını temel amaç değişkeni olarak seçmişlerdir.

Das ve Datta (2000), kıyı akiferlerindeki yoğunluğa dayalı deniz suyu girişimi için optimizasyona dayalı simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Yoğunluğa dayalı akım ve taşınım denklemlerini sonlu farklar yaklaşımı ile eş zamanlı olarak çözmüşlerdir. Böylece denklemler arasında iterasyon yapmaya gerek kalmamıştır.

Paniconi ve ark (2001), Korba kıyı akiferinde yaptıkları çalışmada su çekme rejimleri, yeniden besleme senaryoları ve deniz suyu girişimi arasındaki karşılıklı

etkileşimi CBS yardımıyla incelemişlerdir. Korba akiferinin aşırı kullanılması sonucunda elde edilen veriler göstermiştir ki, zeminde ve Korba ovasındaki yeraltı suyunda tuzlanma meydana gelmektedir.

Figuero (2003) yapmış olduğu çalışmada; CBS ile birleştirilmiş Visual MODFLOW yeraltı suyu modelleme programını kullanarak atık suların Broad sahilindeki yeraltı su seviyesine etkilerini incelemiştir.

Lu (2003) üç boyutlu sonlu farklar yeraltı suyu akım modelini Regina akifer sistemine uygulamıştır. Modeli MODFLOW (MODular three–dimensional finite–difference ground–water FLOW model – Modüler üç boyutlu sonlu farklar yeraltı suyu akım modeli) yeraltı suyu paket programı yardımıyla geliştirmiştir. Ölçülmüş verilerle kalibre edilen model ilerde olabilecek yeraltı su seviyesinin alçalma miktarı ve iyileştirme senaryoları için kullanılmıştır. Muhtemel kirlilik taşınma oranları ve yönleri tahmin edilmiştir.

Theodossiou (2004) su kaynaklarının yönetiminde simülasyon ve optimizasyon tekniklerinin birlikte kullanılmasıyla mevcut su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Simülasyon ve optimizasyon tekniğini Kıbrıs'ın güney doğusundaki Kokkinohoria akiferine uygulamıştır. Optimizasyon tekniği olarak Yerleştirme (embedding) ve tepki fonksiyonları (response matrix) metotlarının avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmış ve yerleştirme metodunun küçük ölçekli problemler için sınırlı olduğundan çalışmasında tepki fonksiyonları metodunu seçmiştir. Optimizasyonda, akiferin 10 tabakasında her bir kuyudaki pompaj masraflarını minimum yapmak ve tabakalar arası su dağılımı yaparak toplam pompaj masrafını azaltmak amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir.

Park ve Aral (2004) yaptıkları çalışmada akiferden çekilecek pompaj oranının yanı sıra kuyu yerlerinin kıyıya yakınlığını da optimize etmişlerdir. Yöntem Dupuit ve Ghyben–Herzberg yaklaşımlarını keskin ara yüzey yaklaşımıyla birleştirerek durgun homojen akifer sistemine uygulanmıştır. Pompaj oranları ve kuyu yerlerinin konumları Genetik Algoritma (GA) yardımıyla optimize edilmiştir. Yöntem ayrıca Cheng ve ark (2000)'ının çalışmasına uygulanmış ve çalışmada önerilen pompaj miktarından daha fazlası akiferden elde edilmiştir.

Gemitzi ve Tolikas (2004) kıyı akiferleri için zamandan bağımsız ve zamana bağlı akım durumu için simülasyon yapan sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Daha az hesaplama yükü getirdiğinden dolayı keskin ara yüzey yaklaşımını tercih etmişler ve tatlı su ile tuzlu su akımını birleştirmek için Hubbert (1940)'in ara yüzey denklemini kullanmışlardır. Sonuçlar analitik çözümlerle karşılaştırılmış ve birbirine benzer çıkmıştır. Geliştirilen simülasyon yöntemi ve analitik çözüm Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ortamında Kıbrıs'ta Yermasogia akiferine uygulanmışlardır. Simülasyon yöntemi daha az bilgi ve işlem yüküyle analitik çözümle benzer sonuçlar vermiştir. Çalışma, uygulamacıların yönetim çalışmalarında CBS destekli simülasyon modelini kolaylıkla işletme senaryoları üretmede kullanabileceklerini göstermiştir.

Tran (2004) yaptığı çalışmada tek katlı basınçlı akifer sistemi için belirsizlikler altında çok amaçlı işletme modeli geliştirmiştir. Literatürde deniz suyu girişimi işletme çalışmalarında genellikle akifer parametreleri kesin doğru kabul edilir ve sabit bir değer alınır. Gerçekte akifer parametreleri sabit bir değer olarak tanımlanamazlar, konumsal olarak değişirler. Bu yüzden simülasyon modellerinin çıktıları sadece deniz suyu girişim problemi hakkında ön izlenim vermektedir. Bu çalışmada akifer girdi parametrelerindeki belirsizlik dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada ortalama geçirimlilik katsayısı (transmissivity) kullanılırken, belirli bir aralıktaki hidrolik iletkenliğin rastgele değerleri kullanılarak belirsizlik işletme çalışmasına dahil edilmiştir. Tekli ve çok amaçlı problemlerin çözümünde ikinci derece konik optimizasyon programı kullanılmıştır (Second–Order Cone Optimization programming, SOCO). Akifer parametrelerinin belirsizliğinin dikkate alındığı işletme çalışmalarında deniz suyu girişiminin artım değerinin deterministik (rasgele olmayan) işletme modeline göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.

Qahman ve ark (2005) deniz suyu girişim tehdidi altında dört örnek için optimum ve sürdürülebilir su temini olanakları araştırmışlardır. Optimizasyonda amaç ve kısıt olarak; i) pompalanan su hacminin maksimizasyonu, ii) su gelirlerinin maksimizasyonu, iii) işletme ve arıtma masraflarının minimizasyonu, iv) pompalanan sudaki tuz konsantrasyonunun minimizasyonu, ve v) yeraltı suyu düşümlerinin kontrolü olarak belirlenmiştir. Fiziksel model olarak yoğunluğa ve advektif

dispersiviteye bağlı çözünmüş madde taşınım modeli, optimizasyon modeli olarak da genetik algoritmayı kullanmışlardır. Modeller serbest yüzeyli bir akifer üzerinde değişik derinliklerde 4 pompalama kuyusu kullanılarak test edilmişlerdir. Sonuçlar kıyı akiferlerinde optimum ve sürdürülebilir su temini senaryolarının karmaşık üç boyutlu akım ve taşınım modelleriyle ifade edilebileceğini göstermiştir.

Bhattacharjya ve Datta (2005), çalışmalarında kıyı akiferlerindeki üç boyutlu yoğunluğa bağlı akım ve taşınım süreçlerinin tahmin simülatörü olarak eğitilmiş yapay sinir ağları (YSA) modelini kullanmışlardır. Eğitilmiş YSA Ga'ya dayalı optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Das ve Data (2000)'nın geliştirdikleri yerleştirmeli (embedding) optimizasyona dayalı simülasyon modeli YSA için gerekli eğitme ve test datalarının üretilmesi içim kullanılmıştır. Çalışmadaki optimizasyonun amacı kıyı akiferlerinden pompayla çekilen sudaki tuz konsantrasyonun izin verilebilir limitler altında tutarken su çekilmesinden meydana gelen yeraltı suyundaki düşümleri faydalı kullanım için maksimize etmektir.

Nakagawa ve ark (2005) deniz suyu girişimini analiz etmek için kullanılan iki farklı nümerik modeli karşılaştırmışlardır. Bunlar CIP (profilin kısıtlı interpolasyonu–constrained interpolation profile) ve the MOC (Karakteristikler metodu–method of characteristics) metotlarıdır. CIP metodu genel olarak gazların, sıvıların, katıların ve plazmaların nümerik çözümlerinde kullanılır. Bu metot yarı–Lagranj bir yapıya sahip olup hiperbolik fonksiyonların çözümünde başarıyla kullanılmaktadır. MOC metodu yeraltı sularında çözünmüş madde taşınım problemlerinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller aynı zamanda serbest ve basınçlı akifer durumları için laboratuarda yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik çözümler karşılaştırıldığında CIP metodunun deneylerle daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Qahman and Larabi (2006) Gaza akiferindeki deniz suyu girişimi mekanizmasını SEAWAT paket programını kullanarak üç boyutlu olarak modellemişler ve iki farklı pompaj politikası tasarlayıp ileride olması muhtemel tehlikeleri dikkate almışlardır. Sonuçlar kullanılmakta olan pompaj politikasıyla yeraltı suyu kullanımının devam etmesi halinde akiferdeki deniz suyu girişiminin

daha kötüleşeceğini göstermiştir. Çözüm olarak pompaj oranlarının düşürülmesi, kuyu yerlerinin kıyı kesimlerinden iç kesimlere taşınması ve yapay besleme yöntemiyle deniz suyu girişimini engelleme ve yeraltı su düşümlerinin azaltılması gibi önerilerde bulunmuşlardır.

Bhattacharjya ve ark (2007), çalışmalarında kıyı akiferlerindeki zamana bağlı üç boyutlu akım ve taşınım süreçlerinin sanal tahmin simülatörü olarak eğitilmiş yapay sinir ağları (YSA) modelini kullanmışlardır. Eğitilmiş YSA için gerekli eğitme ve test datalarının üretilmesi için sonlu elemanlar temeline dayanan nümerik simülasyon modeli (FEMWATER) kullanılmıştır. Tahmin simülatörünün oldukça iyi sonuçlar vermesi geliştirilen YSA modelinin kıyı akiferlerinde zamanla değişen yoğunluğa bağlı üç boyutlu akım ve taşınım süreçlerinde kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak, YSA metodunun daha büyük ve kompleks alanlara uygulanmadan önce çok ciddi ön çalışma yapıldıktan sonra uygulanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Narayan ve ark (2007) Burdekin deltasındaki sulama arazilerindeki deniz suyu girişiminin simülasyonunu yapmak için 2 boyutlu değişik yoğunluklu akım ve taşınım modeli geliştirmişlerdir. Deniz suyu girişim modelinde pompaj oranları, yeraltı suyu beslemesi ve akifer sisteminin hidrolik iletkenliklerini dikkate almıştır. Aşırı pompaj oranları akiferdeki tuzlu su sınırının akiferin iç kesimlerine doğru hızlı ilerlemesine sebep olurken kontrollü pompaj ve aşırı besleme oranları ile deniz suyu girişiminin etkili bir şekilde azaldığını göstermiştir. Model sonuçları deniz suyu girişiminin hidrolik iletkenlik gibi akifer özelliklerinden çok pompaj oranlarına ve yeraltı suyu beslemesine daha hassas olduğunu göstermiştir. Analiz sonuçları ayrıca gelgitten meydan gelen kabarmaların kıyıya çok yakın kısımdaki alanları etkilediğini göstermiştir. Bu nedenle deniz suyu girişimi çalışmalarında gelgitten meydan gelen etkilerin ihmal edilebileceğini vurgulamışlardır. İki boyutlu olarak yapılan bu çalışma yeterince gerçekçi olmadığı için deltanın deniz suyu girişimi probleminin üç boyutlu olarak incelenmesi tavsiye edilmiştir.

Ferreira da Silva ve Haie (2007) Portekiz kıyı akiferi karakteristiklerini dikkate alarak bölgesel su temini yönetim modeli geliştirmişlerdir. Model, güvenli

şekilde yeraltından çekilebilecek suyun yerini tahmin etmekte kullanılmaktadır. Kıyı yerleşim bölgelerinde nüfus yoğunluğu genel olarak sahil şeridine yakın yerlerde olduğundan bu bölgelerde deniz suyu girişiminin kontrol altına alınması açısından sürdürülebilir su çekim stratejilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda kuyu yerleri, yeraltı suyu çekim miktarı ve tuzlu su sınırından olan güvenli uzaklığın fonksiyonu olarak kuyu bazında incelenmiştir. Sonuç olarak, kuyu yerlerinin bulundukları yerden küçük miktarlarda içeriye çekilmesi sürdürülebilir su kaynakları sistemlerinin güvenliğini artırdığını göstermişlerdir.

Shammas ve Jacks (2007) Umman'daki Salalah akiferi için yaptıkları çalışmada MODFLOW (Üç boyutlu sonlu farklar yeraltı suyu akım modeli) ve MT3DMS (çözünme madde taşınım modeli) paket programlarını kullanarak yeraltı suyunun kalitesini ve tatlı su–tuzlu su ara yüzünün durumunu ve hareketini incelemişlerdir. Salalah akiferindeki deniz suyu girişimini durdurmak için yapay besleme yöntemini denemişler ve bu yöntemin diğer bölgelere de rahatlıkla uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bölgede kurulan atık su artıma tesisinden elde edilen arıtılmış suların ücreti karşılığında kıyı şeridi boyunca sulama amaçlı kullanılabileceğini fakat çiftçilerin para ödemek yerine kendi açtıkları kuyuları tercih ettiklerini ifade etmiştir. Sonuç olarak deniz suyu girişimine karşı bir tür bariyer görevi yapması için yapay besleme yöntemini 2003'ün nisan ayından başlayıp 2005'in sonuna kadarki zaman aralığı için uygulamışlar ve yeterince iyi sonuç alamamışlardır. Çalışmanın sonunda yapay besleme yönteminin muhtemel yeraltı suyu yönetme planlarından sadece biri olduğu, olası diğer yeraltı suyu yönetim metotlarının uzun periyotlar için dikkate alınması gerektiğini önermişlerdir.

2.2. Göksu Deltası İle İlgili Önceki Çalışmalar

Haar ve Heunks (1992) tarafından yapılan bir çalışmada Göksu Deltası'nda 20 civarında artezyen kuyusu tespit edilmiştir. Artezyen kuyularının varlığı, kil gibi geçirgenliği az zemin tabakalarının varlığını, dolayısı ile basınçlı akiferin mevcudiyetini ifade etmektedir. Artezyen kuyularından başka, daha derinlerdeki yeraltı suyu akımının varlığı ise lagünde doğal su pınarlarının varlığını göstermektedir.

Menengiç (1998) Göksu deltasındaki yeraltı suyunun kirliliğinin tespiti için yaptığı çalışmada belirlenen 9 adet istasyon, taban suyu kontrolünü sağlamak üzere açılan 8 adet artezyen, 2 adet sondaj kuyusu ve 77 adet kuyu suyunun kirliliği ve varsa kirletici kaynakların tespitine ile ilgili çalışma yapmış, bölgenin tuzluluk haritası çıkarılmış, kuyu sularının seviye değerleri kullanılarak taban suyu seviye haritası çıkarılmış ve taban suyunun hareket yönü belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kuyu sularının gerek seviye testi, gerekse kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde iyon konsantrasyonunun akım yönünde denize doğru arttığı, elektriksel iletkenliğin buna uygun bir şekilde iyon konsantrasyonuna paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu da deniz suyu girişimini göstermektedir.

Gordu (2000), Gordu ve ark, (2001) ve Motz ve ark, (2001) yöreyle ilgili çalışmasını 2 ana amaç doğrultusunda yapmıştır. Birinci amaç; meydana gelen deniz suyu girişimin kavranması ve tatlı su–tuzlu su ara yüzünün nümerik simülasyon modeliyle yerinin belirlenmesidir. İkinci amaç ise su ihtiyaçlarını ve hidrolojik ve çevresel kısıtları dikkate alarak yeraltı suyunun kullanımını optimize etmektir. Arazideki beş kuyu üzerinde yapılan çalışmada birinci amacı gerçekleştirmek için bilgisayar kodu olan SUTRA ile akiferlerin nümerik simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. İkinci amacı gerçekleştirmek için ise, simülasyon modeli uygun bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Tepkili matris metodu kullanılarak iki işletme modeli geliştirmişlerdir. İki boyutlu olarak yapılan bu çalışma yeterince gerçekçi olmadığı için Göksu ovasının deniz suyu girişimi probleminin üç boyutlu olarak incelenmesini tavsiye etmişlerdir.

Ünlücömert (2003), Göksu deltasında tatlı su–tuzlu su girişiminin incelenmesi amacıyla jeofizik etüt yapmıştır. Ölçümler düşey elektrik sondaj yöntemi ile 10 profil hattı boyunca 44 noktada yapılmıştır. Deltanın özdirenç kontur haritaları ve yapma kesitleri hazırlamıştır. Elde edilen yeraltı kesitleri deltanın farklı bölgelerde yanal ve düşey litolojik değişimlerini, tabaka kalınlıklarını ve deniz suyu girişim bölgelerini göstermektedir. Denize yakın olan 9 profilde deniz suyu girişimine rastlamıştır.

Yurtal ve ark (2004) Göksu deltasında tuzlusu girişimine maruz yeraltı suyu pompajının simülasyon ve optimizasyon modellerini geliştirmişlerdir. Araştırmanın amacına uygun olarak literatürde bulunan mevcut veriler ile 1999, 2001, 2002 yıllarında toplanan veriler birleştirilerek çalışma alanının kavramsal ve hidrojeolojik modeli geliştirilmiştir. SUTRA (Değişken Yoğunluktaki Yeraltı suyu Akım ve Taşınım) Modeli yardımıyla çalışma alanının bir en kesiti boyunca iki boyutlu sayısal model geliştirilmiş ve kalibre edilmiştir. GAMS (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi) paket programı kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon modeli, su talepleri ve su kalitesi kısıtlamaları dikkate alınarak formüle edilmiş ve müsaade edilebilir klorür konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olarak, modellenen enkesitteki iki kuyunun pompalama oranlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2.3. İklim Değişikliği ve Önceki Çalışmalar

Fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma, arazi kullanımı değişiklikleri ve sanayi süreçleri ile atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki birikimleri, sanayi devriminden bu yana hızla artmaktadır. Bu ise, doğal sera etkisini kuvvetlendirerek, şehirleşmenin de katkısı ile dünyanın yüzey sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Yüzey sıcaklıklarında 19. yüzyılın sonlarında başlayan ısınma, 1980'li yıllardan sonra daha da belirginleşerek, hemen her yıl bir önceki yıla göre daha sıcak olmak üzere, küresel sıcaklık rekorları kırmıştır. Yüksek sıcaklık rekorunun en sonuncusu, 1998 yılında kırılmıştır. 1998, hem küresel ortalama hem de kuzey ve

güney yarımkürelerin ortalamaları açısından, 1860 yılından beri yaşanan en sıcak yıl olmuştur (Türkeş ve ark, 2000).

Son yüzyılda dünyanın sıcaklığı 0.6 °C artmıştır (IPCC, 2001). Son 30 yıllık periyottaki ısınma trendi geçmiş 100 yıldaki trendin 3 katıdır (Stouffer ve ark, 1994; WMO, 2002). Sera gazlarının ve aerosollerin etkilerini birlikte dikkate alan iklim değişikliği senaryoları ve modelleri, 2100 yılına kadar dünya çapındaki sıcaklığın 1.1 ile 6.4 °C arasında artacağını buna bağlı olarak ta deniz seviyesinde 0.18 ile 0.59 m arasında bir yükselme olacağını öngörmektedir (IPCC, 2007).

İklim değişikliğinin sürmesi durumunda su kaynaklarının üzerinde daha kısa yağmur mevsimleri, taşkın ve kuraklık gibi, hidrolojik uç değerlerde artışlar gibi negatif etki oluşturacaktır. Yüzeysel su kaynaklarına göre, iklim değişikliğinin potansiyel sonuçları yeraltı sularında tam olarak etkisini göstermemiştir. İklim değişikliğinin yeraltı su kaynakları açısından olası potansiyel etkileri arasında yeraltı su seviyelerinde dalgalanmalar (Chen ve ark, 2004), zemindeki boşluk suyu basıncına etkileri (Collison ve ark, 2000), yeraltı suyu akım rejimlerinde değişim (Scibek ve Allen, 2006), yeraltı suyu kalite ve miktarında değişimler (Bloomfield ve ark, 2006; Ranjan ve ark, 2006) ve deniz seviyesindeki artışın deniz suyu girişimine etkileri (Bobba, 2002; Giambastiani ve ark, 2007) gibi değişimler beklenmektedir.

Doğal ve insan kaynaklı iklim değişikliği su döngüsü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Atmosferdeki sera gazlarındaki artış yeryüzünün enerji dengesinde değişikliklere yol açmakta ve böylelikle daha yüksek atmosfer sıcaklığına sebep olmaktadır. İklim değişikliğinin hızlanmasına yol açan atmosferdeki sera gazlarının kaynaklarının azaltılması, iklim politikalarının anahtar hedefi olmayı sürdürürken, geçen yüzyıl boyunca ekonomik faaliyetlerin sebep olduğu atmosfer kirlenmesinin, tüm ilave kirlenmeler yarın duracak olsa bile, gelecek onlarca yıldan yüzlerce yıla kadar geri döndürülemeyecek bir iklim değişikliği sürecinin başlayacağı bir gerçektir (Uyumaz, 2009).

Bu yüzden iklim değişikliğinin su kaynakları ve su yönetimi stratejileri üzerindeki kaçınılmaz etkilerine uyarlanabilmek (adaptasyon) için gerekli önlemleri

bugünden almamız gereklidir. Su sektörü ile iklim ve kalkınma politikaları arasında çok yakın ilişkiler bulunmaktadır. Bir dereceye kadar iklime eğer hükmedilebilirse su kaynaklarına hükmedilebilir kuralı çıkar ki bugün için bunun aksi geçerlidir (Uyumaz, 2009).

Su döngüsü ve gelişimindeki mekansal değişkenlik büyüktür ve küresel ortalamaya kıyasla bölgeler arasında büyük farklılıklara yol açmaktadır. Bölgesel iklim gelişmelerinin tahmininde hâlâ oldukça yüksek bir belirsizlik bulunmaktadır. İklim değişikliği senaryolarının büyük çoğunluğunda, yüksek enlemler ve Güneydoğu Asya'da yıllık ortalama yağışta artış ve Orta Asya, Akdeniz'in etrafındaki bölgeler (Türkiye), güney Afrika ve Avustralya'da azalmalar tahmin edilmektedir (Uyumaz, 2009).

Türkiye, IPCC Dördüncü Değerlendirme Raporuna göre, küresel ısınmadan en çok etkilenecek bölgelerden biri olan Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle, iklim değişikliğinin etkilerinin önlenmesi ya da en aza indirilmesi bakımından Türkiye'nin gelecekteki ikliminin tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye ve bölgesi için iklim değişikliği öngörülerine yönelik bölgesel iklim modeli çalışmaları oldukça sınırlıdır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ile İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü'nün ortaklaşa yürüttüğü, "Türkiye için İklim Değişikliği Senaryoları" başlıklı TÜBİTAK projesi (105G015), bu tür çalışmaların ilklerinden sayılabilir (Dalfes ve ark, 2008). Türkiye'nin İklim Değişikliği Birinci Ulusal Bildiriminde de yer alan projenin ilk sonuçları (First National Communication of Turkey on Climate Change, 2007) ve Doğu Akdeniz için gerçekleştirilen RegCM3 bölgesel iklim modeli çalışmasının analizleri (Önol ve ark, 2007), 2071–2100 döneminde IPCC SRES A2 senaryosuna göre Türkiye genelinde 2–3 °C oranında ısınma ve yağışlarda Ege ve Akdeniz kıyıları boyunca azalma ile Karadeniz kıyısı boyunca artış öngörmektedir (Demir ve ark, 2008).

2.3.1. İklim değişikliği Emisyon Senaryoları

İklim değişikliğinin etkilerinin önlenmesi ya da en az düzeye indirilmesi için geleceğe yönelik iklim değişikliği senaryolarının oluşturulması ve bu senaryolara göre etki değerlendirilmelerinin yapılması gerekmektedir. İklim değişikliğinin etkileri alansal ve zamansal ölçekte farklılık gösterecektir. Hangi bölgelerde hangi sektörlerin hangi düzeyde etkileneceğinin belirlenmesi, ülkelerin iklim değişikliğinin sonuçlarına hazırlıklı olması ve iklim değişikliğine uyum bakımından çok önemlidir. (Demir ve ark, 2007).

İklim modelleri kullanılarak geleceğe yönelik iklim projeksiyonların da değişik senaryolar kullanılmaktadır. Bu senaryolar, Dünya Meteoroloji Teşkilatı ile Birleşmiş Milletler Çevre Programının ortaklaşa kurdukları Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli (IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change) tarafından 2000 yılında hazırlanmıştır. Bu senaryolarda, gelecek için sera gazı emisyonları hesaplanırken, değişik demografik gelişme, sosyo–ekonomik gelişme ve teknolojik değişme projeksiyonları kullanılmıştır. Bu senaryoların en çok kullanılanları kısaca aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Karaca ve Şen, 2007; Uyumaz, 2009):

A1 Öykü Çizgisi: Bu senaryo dünyanın geleceğini çok hızlı ve çağın ortasında zirveye ulaşan ekonomik büyüme; sonrasında azalma ile birkaç veya fazlaca yetkin teknolojinin hızlı tanımı esaslarına dayanır. Konuların büyük bir çoğunluğu bölgeler arasında, kapasite yapımlarında ve artan kültür ve sosyal etkinliklerle yaklaşır ve bölgeler arasında kişi başına gelir dağılımındaki farklar azalır.

A1 senaryosu ailesi üç gurupta gelişir ve enerji sistemindeki teknoloji seçeneklerinin değişimini tanımlar. Üç A1 gurubu, teknolojiye verdikleri öneme göre birbirinden ayrılırlar.

a) A1F1 yoğunlukla fosil yakıt,

b) A1T olarak fosil olmayan enerji kaynakları ve

c) A1B ile temsil edilen tüm kaynaklar arasında bir dengeyi sağlayan gruplardır (Uyumaz, 2009).

A2 Öykü Çizgisi: Bu öykü çizgisi ve aile senaryosu tektür (heterojen) olmayan bir dünya tanımlar. Temel konu kendi kendine dayanma (self–reliance) ve yerel kimliklerin muhafaza edilmesidir. Bölgelerdeki verimlilik deseni çok yavaş olarak yakınsar ve bunun sonucunda da küresel nüfus sürekli artar. Ekonomik gelişme temel olarak bölgesel yöndedir ve kişi başına ekonomik büyüme ve teknoloji değişimleri fazlaca kırılgandır ve diğer öykü çizgilerinden daha da yavaştır (Uyumaz, 2009).

B1 Öykü Çizgisi: B1 öykü çizgisi ve senaryo ailesi A1 öykü çizgisindekine benzer olarak çağın ortasında zirveye ulaşan ve sonrasında azalan yakınsayan bir dünya tanımlar ama ekonomik yapıda hizmet ve bilgi ekonomisinde hızlı değişmeler gösterir. Aynı zamanda madde yoğunluğunda azalmalar ve temiz ve verimli kaynağı olan teknolojiler kullanılır. Burada etki ekonomik, sosyal ve çevre sürdürülebilirliği üzerine olup eşitliğin iyileştirilmesi olmasına karşılık ilave iklim özendiricilik yoktur (Uyumaz, 2009).

B2 Öykü Çizgisi: Bu öykü çizgisi ve senaryo ailesi ekonomik, sosyal ve çevre sürdürülebilirliğine ağırlık veren bir dünya tanımlar. Bu dünyada A2'den daha az büyüme oranında artan bir nüfus, nerede ise orta seviyelerde ekonomik gelişme ama B1 ve A1 öykü çizgilerine göre daha az hızlı ve çok çeşitli teknolojik değişmeler söz konusudur. Bu senaryo çevre koruması ve sosyal eşitliğe doğru yönlendirilmiş olmasına rağmen, yerel ve bölgesel ölçeklerde odaklanır (Uyumaz, 2009).

Geleceğe yönelik iklim projeksiyonları, bu senaryoların küresel iklim modellerine entegre edilmesi ile gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde elde edilmektedir. İklim değişikliğinin bölgesel/yerel etkilerini değerlendirme çalışmalarında, küresel modellerin çözünürlüğünden daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlara gereksinim duyulmaktadır. Küresel modellerin çözünürlükleri düşüktür (150–200 km) ve bölgesel özellikleri içermemektedirler. Bölgesel iklim modelleri, dinamik ölçek küçültme yöntemlerinden biri olarak, bu amaçla başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu modeller, başlangıç ve sınır koşullarını küresel model çıktılarından almaktadırlar ve topografya özelliklerinin de yansıtıldığı daha yüksek çözünürlükte (20–30 km) çalıştırılabilmektedirler (Demir ve ark, 2008).

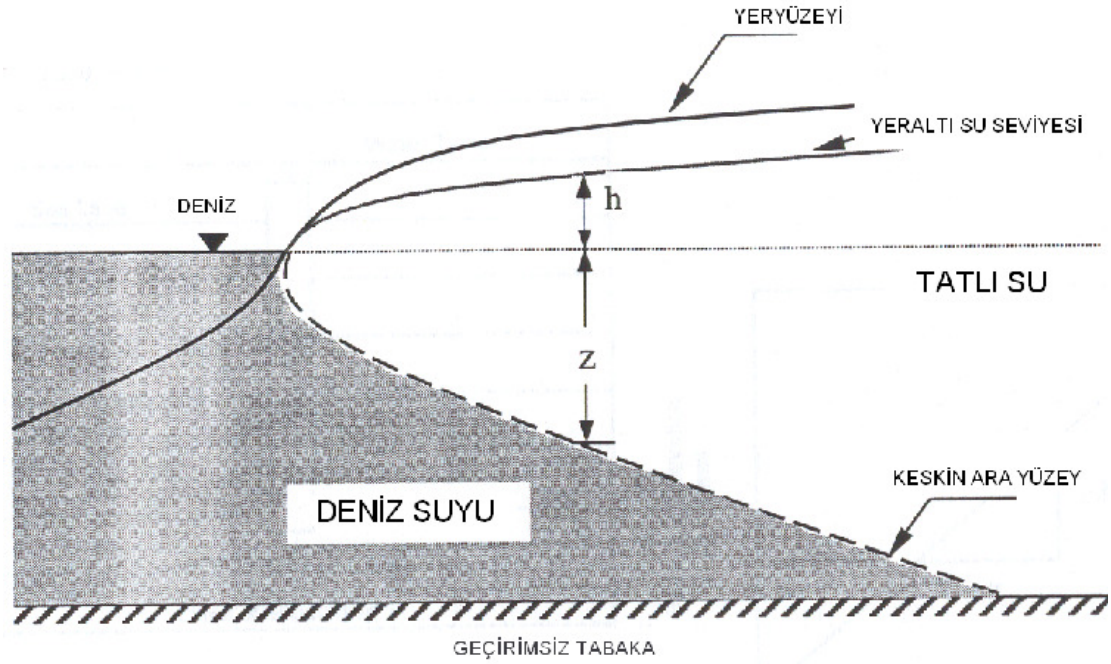
3. DENİZ SUYU GİRİŞİMİNİN TEORİSİ

3.1. Deniz Suyu Girişimi Probleminin Matematiksel Tanımı

Deniz suyu girişim probleminin matematiksel tanımı iki akışkanı dikkate almaktadır (Bear, 1979). Gözenekli ortamda iki veya daha fazla akışkanın bulunduğu durumlarda girişim probleminin çözümü için muhtemel iki farklı yöntem vardır. İlki, iki veya daha fazla akışkanın gözenekli ortam içinde birbirine karışmadığını varsayan keskin ara yüzey yaklaşımıdır. İkinci yaklaşım ise akışkanların kendi aralarında çözünebilir olduğunu varsayan değişken yoğunluklu yaklaşımdır. Bu yaklaşım bazen hidrodinamik dispersiyon olarak da adlandırılır. Bu yaklaşımda karışabilir yer değiştirme mevcutken keskin ara yüzeyde mevcut değildir. Deniz suyu girişim olayında tatlı su ile deniz suyu ilk olarak keskin ara yüzey olarak birbirinden ayrılabilir. Daha sonra bu ayrıma hidrodinamik dispersiyonun etkisiyle oluşan geçiş bölgesi eklenebilir. Bu olayın gerçekleşmesini sağlayan itici güç deniz suyunun yoğunluğunun tatlı suyunkinden fazla olmasıdır. Geçiş bölgesinde suyun yoğunluğu tatlı sudan tuzlu suya doğru kademeli olarak değişmektedir. Klorür veya toplam çözünmüş madde miktarı da aynı şekilde geçiş bölgesi kesitinde kademeli olarak değişmektedir.

3.2. Keskin Ara Yüzey Yaklaşımı

Keskin ara yüzey yaklaşımında deniz suyu ile tatlı suyun aralarında karışmadığı var sayımı yapılarak tuzlu su ile tatlı su birbirlerinden ani bir şekilde ayrılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Keskin Ara Yüzey Yaklaşım Modeli

Her iki bölge için piyozemetrik yükseklik aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Bear, 1979):

$$\left.\begin{aligned} H_f &= z + \frac{P}{\gamma_f} \qquad \text{(tatlı su için)} \\ H_s &= z + \frac{P}{\gamma_s} \qquad \text{(tuzlu su için)} \end{aligned}\right\} \tag{3.1}$$

Burada; H_f ve H_s sırasıyla tatlı su ve tuzlu su için piyozemetrik yüksekliği, γ_f ve γ_s sırasıyla tatlı su ile tuzlu suyun özgül ağırlığını, z referans düzlemini göstermektedir.

Tatlı su bölgesi için kütlenin korunumu veya süreklilik denklemi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\nabla q_f + S_0 \frac{\partial H_f}{\partial t} = 0 \quad \Longrightarrow \quad -\nabla q_f = S_0 \frac{\partial H_f}{\partial t} \tag{3.2}$$

Burada, q_f tatlı suyun özgül debisini, S_0 özgül depolamayı ve t zamanı göstermektedir.

Özgül debi q_f Darcy denklemi ile tanımlanabilir:

$$q_f = -K_f . \nabla H_f \tag{3.3}$$

Böylece, süreklilik denklemi (3.2) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\nabla.(K_f . \nabla H_f) = S_0 \frac{\partial H_f}{\partial t} \tag{3.4.a}$$

Benzer şekilde tuzlu su bölgesi için süreklilik denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\nabla.(K_s . \nabla H_s) = S_0 \frac{\partial H_s}{\partial t} \tag{3.4.b}$$

Burada, K_f ve K_s sırasıyla tatlı su ve tuzlu su için hidrolik iletkenliği göstermektedir. K_f ve K_s aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_f = \frac{k\gamma_f}{\mu_f} \text{ ve } K_s = \frac{k\gamma_s}{\mu_s} \tag{3.5}$$

Burada k, permeabiliteyi, μ_f ve μ_s sırasıyla tatlı su ve tuzlu su için dinamik viskoziteyi ifade eder.

Denklem (3.1)'deki h_f ve h_s denklem (3.4)'de yerine konur ve z=0 ve $\frac{P}{\gamma} = h$ olarak kabul edilirse, aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\left.\begin{aligned} \nabla.(K_f.h_f) &= S_0 \frac{\partial h_f}{\partial t} \quad \text{(tatlı su için)} \\ \nabla.(K_s.h_s) &= S_0 \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad \text{(tuzlu su için)} \end{aligned}\right\} \qquad (3.6)$$

Kütlenin korunumu için geliştirilen iki potansiyel denklemin başlangıç şartları aşağıdaki gibidir:

$$h_f = h_{0f} \text{ ve } h_s = h_{0s} \qquad (3.7)$$

Burada, h_{0f} ve h_{0s} her bir bölge için bilinen başlangıç piyezometrik yüksekliklerdir.

3.3. Ghyben–Herzberg Yaklaşımı

Badon–Ghyben (1889) ve Herzberg (1901) bağımsız olarak tuzlu su ile tatlı suyun konumlarının yoğunluklarının farkıyla ilişkili olduğunu keşfetmişlerdir. Ara yüzdeki değişmeyen ve yatay akım için hidrostatik denge olduğunu varsayarak formül geliştirmişlerdir.

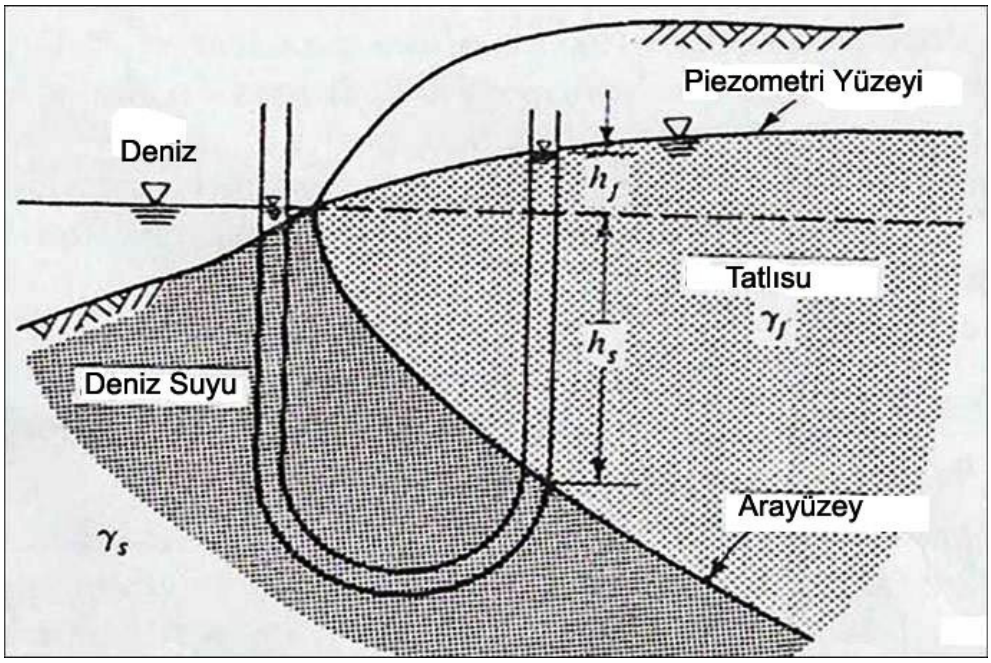
Deniz seviyesine bağlı olarak ara yüzün yüksekliği, üzerindeki tatlı su sütununun hidrostatik basıncı ile ara yüzün altındaki tuzlu suyun basıncı birbirini dengelemektedir.

$$-\gamma_s z_i = \gamma_f (-z_i + h_f) \quad \Longrightarrow \quad z_i = -\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}\right) h_f \qquad (3.8)$$

Burada; $\gamma = \rho g$ 'dir. $\delta = \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}\right)$ eşitliği yukarıdaki denklemde yerine konursa:

$$z_i = -\delta h_f \qquad (3.9)$$

Burada; z_i, ara yüzün yüksekliğini, h_f ise tatlı suyun yüksekliğini göstermektedir. Ghyben–Herzberg yaklaşımı Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Ghyben–Herzberg Yaklaşımı

3.4. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akım ve Taşınım Denklemleri

Pratik olarak tatlı su ile tuzlu suyun birlikte bulundukları akiferlerde bu iki akışkan arasında bir karışım bölgesi bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda karışım bölgesinin şeklinin, konumunun ve kalınlığının büyük önem taşıdığı görülmektedir. Bu gibi durumlarda ilerleme–yayılma ile taşınım (advective–dispersive solute transports) adı verilen modeller kullanılmaktadır. Tatlı su ile tuzlu suyun karışabildiği bu tür modelleme çalışmalarda tuzlu su hareketi iki adet kısmi diferansiyel denklemin çözümü ile incelenebilmektedir. Bunlardan ilki;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[K_{ij}\left[\frac{\partial h}{\partial x_j}+\eta ce_j\right]\right]=S\frac{\partial h}{\partial t}+\phi\eta\frac{\partial c}{\partial t}-\frac{\rho}{\rho_f}Q \tag{3.10}$$

olarak verilen akım denklemidir (Huyakorn ve ark, 1987). Burada K_{ij} hidrolik iletkenliği, h hidrolik yüksekliği, x_j kartezyen koordinatları (j=1,2,3), η yoğunluk eşlenme katsayısı, c çözünmüş madde konsantrasyonunu, e_j yer çekim kuvvetinin birim vektörü (e_1=0, e_2=1, e_3=0), S özgül depolama katsayısını, t zamanı, ϕ gözenekliliği, Q beslenme/boşalım değerini ve ρ ve ρ_f ise sırasıyla karışık (deniz suyu ve tatlı su) akışkan ile referans tatlı suyun yoğunluğunu göstermektedir. Denklemde 2 doğrultusundaki kartezyen koordinatı düşey doğrultudadır.

Denklem (3.10)'daki hidrolik yükseklik aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h=\frac{P}{\rho_0 g}+z \tag{3.11}$$

Burada P akışkanın basıncını, g yerçekimi ivmesini ve z referans düzlemi üzerindeki yüksekliğini göstermektedir.

Yoğunluk eşlenme katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\eta=\frac{\varepsilon}{c_s} \tag{3.12}$$

burada ε yoğunluk farkı oranını göstermektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\varepsilon=\frac{\rho_s-\rho_0}{\rho_0} \tag{3.13}$$

ve c_s maksimum yoğunluğa (ρ_s) karşılık gelen çözünmüş madde konsantrasyonunu göstermektedir.

Gerçek hidrolik iletkenlik aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_{ij} = \frac{k_{ij}\rho g}{\mu} \tag{3.14}$$

Burada, k_{ij} özgül geçirgenlik tensörünü, μ akışkanın dinamik viskozitesini ($\mu = \mu_0$) ve μ_0'da tatlı suyun viskozitesini göstermektedir.

Karışık akışkanın yoğunluğu ise aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\rho = \rho_0 (1 + \frac{\varepsilon c}{c_s}) \tag{3.15}$$

Tatlı suyun yayılma (dispersiyon) hareketini temsil eden ikinci denklem ilerleme–yayılma ile taşınım denklemi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - V_i \frac{\partial c}{\partial x_j} = \phi \frac{\partial c}{\partial t} + q(c - c^*) \tag{3.16}$$

Burada D_{ij} hidrodinamik yayılma tensörünü (hydrodynamic dispersion), V_i Darcy hızını, c^* ise sisteme katılan/sistemden çıkan suyun konsantrasyonunu gösterir. Darcy hızı,

$$V_i = -K_{ij}^0 \left[\frac{\partial h}{\partial x_j} + \eta c e_j \right] \tag{3.17}$$

şeklinde ifade edilir. Burada K_{ij}^0 tatlı su durumundaki hidrolik iletkenliği gösterir.

Taşınım mekanizmasının bileşkeleri ilerleme, yayılma ve kimyasal etkileşimdir. Tuzun akifer malzemesi ile reaksiyona girmediği varsayılarak kimyasal etkileşim denklemden çıkarılmıştır. Denklemin solundaki ilk terim yayılım ile

gerçekleşen taşınımı, ikinci terim ise suyun ilerlemesi ile ortaya çıkan taşınımı göstermektedir.

Denklem (3.10) ve (3.16)'nın ortaklaşa çözülmesiyle tuzlu suyun akifer içerisinde yer ve zaman bağımlı hareketi elde edilir. Denklemlerin çözümü için çeşitli sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde en yaygın olanları Sonlu Elemanlar (Finite Elements) ve Sonlu Farklar (Finite Difference) yöntemleridir (Karahanoğlu ve ark, 1995).

Sistem denklemleri 3.10 ve 3.16 içerisinde yer alan ve bu denklemlerin çözümünü etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi yayılma tensörünü (D_{ij}) oluşturan yayılma katsayılarıdır. Yayılma katsayısı ise sayısal çözüm yaklaşımlarının bazılarında sabit olarak alınmakta (Pinder ve Cooper, 1970; Volker ve Rushton, 1982), diğerlerinde ise yeraltı suyu hızına bağlı bir terim olarak kullanılmaktadır (Segol ve Pinder, 1976). Yeraltı suyuna bağımlı olarak alınan yayılma katsayısı, enine ve boyuna yayılım (longitudinal and transverse dispersivity) katsayıları yeraltı suyu akımının hızı ve akiferin özellikleriyle ilgilidir ve Scheidegger'in denklemiyle kullanılır.

$$D_{ij} = d_{ij} \frac{v_m v_n}{|v|} \tag{3.18}$$

Burada d_{ij} akiferin dispersiyon sabitini, v_m ve v_n sırasıyla m ve n doğrusundaki hız bileşenini, v hızın büyüklüğünü gösterir (Emekli, 1993).

İlermele–yayılma ile taşınım modellerinde karşılaşılan en önemli problem akiferdeki yayılım değerlerinin belirlenmesidir. Yayılma katsayısının arazi koşullarında elde edilmesi, fazla sayıda gözlem kuyusu içeren zor ve pahalı bir uygulama gerektirmektedir. Bunun yanında laboratuar çalışmaları ile elde edilen yayılma katsayısı değerlerinin ise arazi koşullarında elde edilenlerle farklılıklar gösterdiği saptanmıştır. Laboratuarda elde edilen yayılma genellikle cm boyutlarında değişirken, arazi koşullarında bu değer 100–150 m ye kadar çıkabilmektedir (Anderson, 1979; Karahanoğlu ve ark, 1995). Yukarıda belirtilen zorluklar nedeniyle,

sayısal modelleme çalışmalarının çoğunluğunda kullanılan yayılım katsayıları, model kalibrasyonu ile elde edilmektedir (Anderson 1976, Goodwill, 1993). Bu tür çalışmalara örnek olarak Segol ve Pinder (1976), Andersen ve ark (1988) ve Yurtal ve ark (2004) gösterilebilir.

4. DENİZ SUYU GİRİŞİM MODELİ

Yeraltı suları deniz suyunda bulunan tuzlar gibi çözünmüş madde bileşenlerini içerisinde bulundurur. Düşük konsantrasyon değerlerinde çözünmüş maddeler akışkanın yoğunluğunu büyük ölçüde etkilemez. Çözünmüş madde konsantrasyonu yükseldiğinde ise, çözünmüş maddelerin kütlesi akışkanın yoğunluğunu önemli miktarda etkiler. Eğer çözünmüş maddenin uzaysal dağılımı minimum düzeyde ise yeraltı akımının yoğunluğunu önemsemeden akım oranını ve desenini belirleyen matematiksel denklemler nispeten doğru sonuçlar verir. Kıyı akiferlerinde olduğu gibi akışkan yoğunlunun uzaysal değişimi önem arz ettiği durumlarda yoğunluk değişimi büyük ölçüde akım oranını ve desenini etkilediği için yeraltı suyu akımı karmaşık bir hal alır. Birçok hidrojeolojik durum için yeraltı suyu akım oranını, yönünü ve kalma zamanını yanlışsız tanımlamak ve tahmin etmek için değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımının yeniden düzenlenmesi gerekir.

Yeraltı suyu akımını etkileyen akışkan yoğunluğunun uzaysal değişimi birçok hidrojeolojik durum için gözlenmiştir. Örneğin kıyı akiferlerinde tatlı suyun denize doğru, deniz suyunun iç kesimlere doğru akmak istemesi sonucu tatlı su ile tuzlu su arasında bir ara yüzey oluşmaktadır. Ara yüzey boyunca akışkan yoğunluğu 1000 kg/m^3 (tatlı su için)'den 1025 kg/m^3 (deniz suyu için)'e kadar %2.5'lik bir değişim göstermektedir. Arazi ölçümleri ve matematiksel analizler az gibi görünen yoğunluk değişiminin yeraltı suyu akım oranında ve deseninde önemli değişimlere sebep olduğunu göstermektedir. Bu yüzden kıyı akiferlerinde karşılaşılan deniz suyu girişimi, kirlenmiş bölgelerin iyileştirilmesi ve tatlı yeraltı suyunun denize deşarjı gibi çalışmalarda, değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımının iyi anlaşılması önemlidir.

Değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımının teorisi Badon–Ghyben (1889) ve Herzberg (1901)'den beri çalışılmaktadır. Hubbert (1940)'da keskin ara yüzeyin yüksekliğini, ara yüzey üzerindeki tatlı su yüksekliği ile deniz suyu ve tatlı suyun yoğunluklarına bağlı olarak temsil eden basit bir denklem önermiştir. Henry (1964)'de tatlı suyun deniz sınırına doğru sabit hareket ettiği koşulu altında ara

yüzeyin konumunu ve şeklini tanımlayan yarı analitik bir çözüm kullanmıştır. Bu tarihten itibaren Henry (1964) probleminin sonuçlarının iyileştirilebilmesi için birçok analitik ve nümerik çözümler geliştirilmiştir (Pinder ve Cooper, 1970; Lee ve Cheng, 1974; Huyakorn ve ark,1987; Voss ve Souza, 1987, Croucher ve O'Sullivan, 1995).

Değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımı simule eden özel ve kamuya açık birçok bilgisayar kodu mevcuttur. Örneğin, Birleşik Devletler Jeoloji Kurumu (U.S. Geological Survey, USGS) sonlu elemanlar SUTRA (Voss, 1984), sonlu farklar HST3D (Kipp, 1997) ve MOCDENSE (Sanford ve Konikow, 1985) bilgisayar kodlarını sunmaktadır. Bu kodlar geniş kapsamlı karmaşık problemlerin simule edilebilmesi için etkili seçenekler içermektedir. Birçok hidrolojist sabit yoğunluklu MODFLOW (MODular three–dimensional finite–difference ground–water FLOW model – Modüler üç boyutlu sonlu farklar yeraltı suyu akım modeli) (McDonald ve Harbaugh, 1988) kodunu tercih etmelerine rağmen az da olsa karmaşık değişken yoğunluklu kodları tercih edenler de mevcuttur. Bu çalışmada geliştirilen Göksu deltası yeraltı suyu akım ve taşınım modelinin simülasyonu için yeraltısularındaki yoğunluk değişimini dikkate alan SEAWAT programı tercih edilmiştir.

SEAWAT–2000 (Three–dimensional variable–density finite–difference ground–water flow model – Üç Boyutlu Değişken Yoğunluklu Sonlu Farklar Yeraltısuyu Akım Modeli) v3.13 (Langevin ve ark, 2003) programı üç boyutlu değişken yoğunluklu zamana bağlı yeraltı suyu akımının simülasyonu için geliştirilmiş SEAWAT (Guo ve Bennett, 1998) bilgisayar programının son versiyonudur. SEAWAT (Guo ve Bennett, 1998) programının ilk versiyonu MODFLOW–88 (McDonald ve Harbaugh, 1988) ve MT3D (Zheng, 1996) bilgisayar kodları kullanılarak geliştirilmiştir. SEAWAT programının üçüncü versiyonu olan SEAWAT–2000 ise MODFLOW–2000 (Harbaugh ve ark, 2000) ve MT3DMS (Zheng ve Wang, 1999) programlarının birleştirilmiş versiyonudur.

MODFLOW programının değişken yoğunluklu akım denklemini çözebilmesi için matris işlemlerindeki akışkan hacim terimi yerine akışkan yoğunluğunu da dikkate alan akışkanın kütlesi terimini ile yer değiştirilerek yeniden düzenlenmiştir. Akışkanın yoğunluğu, çözünmüş maddelerin konsantrasyonunun bir fonksiyonu

olduğunu kabul etmektedir. Sıcaklığın akışkanın yoğunluğuna olan etkisi dikkate alınmamıştır. Tuz konsantrasyonunun zamansal ve uzaysal değişimi MT3DMS programının kodları kullanılarak SEAWAT tarafından simüle edilmektedir.

SEAWAT programı yeraltı suyu akımı denklemi ile çözünmüş madde taşınım denklemini birleştirmek için açık (explicit) ve kapalı (implicit) prosedürleri kullanır. Explicit prosedürde; ilk olarak her bir zaman adımı için akım denklemi çözülür ve sonuç advektif hız alanı, çözünmüş madde taşınım denkleminin çözümünde kullanılır. Bu prosedür simülasyon ve stres periyodu tamamlanana kadar tekrar eder. Implicit prosedürde ise; akım ve taşınım denklemleri aynı zaman adımları için birlikte bir çok defa çözülürler, ardışık iterasyonlar arasındaki yoğunluk farkı kullanıcı tarafından belirlenen toleranstan küçük olana kadar bu işlem devam eder.

SEAWAT programının yazlım kodu değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımını içeren beş farklı değerlendirme problemi (benchmark) çözülerek test edilmiştir. Bu değerlendirme problemleri iki tane kutu problemi, Henry (1964), Elder (1967) ve HYDROCOIN (OECD, 1988) problemlerinden oluşmaktadır. Kutu problemlerinin amacı akışkan hızlarının SEAWAT tarafından düzgün bir şekilde hesaplanabildiğini doğrulamaktadır. SEAWAT, her bir kutu problemindeki hız dağılımlarını uygun bir şekilde çözmüştür. SEAWAT aynı zamanda Henry'nin problemini de doğru olarak simüle etmiştir ve SUTRA programının sonuçları ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Elder'in problemi akımın yoğunluk değişiminden etkilenen karmaşık bir akım sistemidir. Altı farklı zaman için SEAWAT'ın sonuçları Elder'in orijinal sonuçları ve aynı zamanda SUTRA'nın sonuçları ile karıştırılmıştır ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. HYDROCOIN problemi tuzlu su tabakası üzerindeki tatlı yeraltı suyunun akışını içermektedir. Simüle edilen tuzluluk konturları ile SEAWAT ve MOCDENSE programlarının sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.

4.1. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akımının Matematiksel Tanımı

Burada sunulan gelişmeler Darcy kanununun (laminer akım) geçerli olduğu; sınırlanmış akiferdeki özgül depolama katsayısının standart tanımının uygulanabilir olduğu, Fick kanunun yayılma ile taşınım yaklaşımına uygulanabildiği ve ısı farkının olmadığı kabullerinin yapılmasıyla elde edilmiştir. Yeraltındaki gözenekli ortamın suya doygun olduğu varsayılmaktadır. Aynı zamanda, sıvı haldeki karışabilir bir akışkanın çok az sıkışabilirliğe sahip olduğu kabulü yapılmaktadır.

4.1.1. Eşdeğer Tatlı Su Yüksekliği

SEAWAT, tuzlu yeraltı ortamında tatlı su yüksekliği veya eşdeğer tatlı su yüksekliği kavramlarını dikkate almaktadır. SEAWAT programındaki değişken yoğunluklu yeraltı suyu akım denklemlerinin geliştirilmesi için eşdeğer tatlı su yüksekliği kavramının eksiksiz şekilde anlaşılması gerekir. Aşağıda eş değer tatlı su yüksekliği ve su yüksekliği ile olan ilişkisi detaylı şekilde anlatılmıştır.

Şekil 4.1'de tuzlu su içeren bir akifere N noktasına iki adet piezometre açılır. Akiferdeki tuzlu suyun tatlı su ile karşımasını engelleyen, aynı zamanda N noktasındaki basıncı piezometreye doğru bir şekilde ileten bir sistemi olan A piezometresine tatlı su ile doldurulmaktadır. B piezometresinde ise akiferdeki N noktasındaki suyu temsil eden tuz konsantrasyonuna sahip tuzlu su ile doldurulmaktadır. A piezometresindeki N noktasının üzerinde bulunan suyun yüksekliği $\frac{P_N}{\rho_f \times g}$ şeklinde ifade edilir. N noktasındaki tatlı su yüksekliği referans düzleminin üzerindeki A piezometresindeki su yüksekliğine eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f \times g} + Z_N \tag{4.1}$$

Burada;

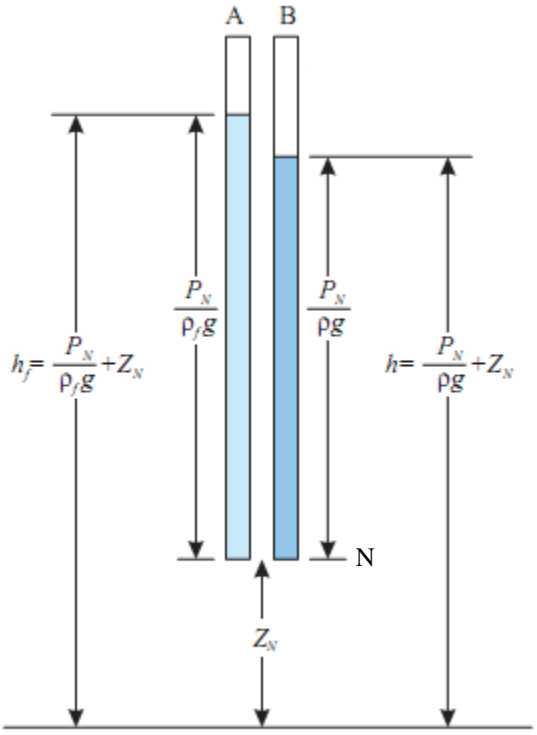
h_f ; eşdeğer tatlı su yüksekliğini, (m)

P_N ; akışkanın N noktasındaki basıncı, (kg/ms^2)

ρ_f ; tatlı suyun yoğunluğunu, (kg/m^3)

g ; yer çekimi ivmesini, (m/s^2) ve

Z_N ; N noktası ile referans düzlemi arasındaki mesafeyi, (m) temsil etmektedir.



Şekil 4.1. Akiferde Aynı Noktada Olan Biri Tatlı Suyla (A), Biri Tuzlu Suyla (B) Doldurulmuş Piezometreler

B piezometresindeki N noktasının üzerindeki su seviyesinin yüksekliği $\frac{P_N}{\rho \times g}$ şeklinde ifade edilir. Referans düzleminin üzerindeki B piezometresindeki tuzlu akiferdeki su yüksekliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$h = \frac{P_N}{\rho \times g} + Z_N \tag{4.2}$$

Burada; h, su yüksekliğini (m), ρ, N noktasındaki tuzlu yeraltı suyunun yoğunluğunu, (kg/m^3) temsil etmektedir.

Akiferde bulunan su cinsinden, su yüksekliği, (h), sadece basınç ve seviyeye göre değil aynı zamanda suyun yoğunluğuna göre değişim gösterir. Dolayısıyla eşit basınç ve aynı seviyedeki iki noktada farklı su yoğunlukları mevcutsa farklı su yükseklikleri elde edilebilir. Yeraltı suyu akım denklemi h terimiyle kullanılarak ifade edilebilir. Ancak sonuçlar yoğunluk ve türevlerine bağlı kullanışsız ifadeler içerir bu da hesaplamada herhangi bir avantaj sağlamaz. Diğer taraftan, akım denklemi eşdeğer tatlı su yüksekliği cinsinden formüle edilirse karmaşıklık ortadan kalkar ve çok küçük bir değişiklikle MODFLOW gibi paket programlarının kullanımına imkan sağlar.

A piezometresinde (Şekil 4.1) su seviyesi değişken yoğunluklu simülasyon yapan SEAWAT programı tarafından eş değer tatlı su yüksekliği cinsinden hesaplanmaktadır. Eş değer tatlı su yükseklikleri hacimsel yeraltı suyu akımını hesaplamak için Darcy denkleminin değişken yoğunluklu formunda kullanılabilirler. Ancak, eş değer tatlı su yüksekliği Şekil 4.1 de görüldüğü üzere akiferdeki tuzlu yeraltı su seviyesini temsil etmez. Eş değer tatlı su yüksekliği ile doğal akiferdeki su yüksekliği arasında dönüşüm yapılması gereklidir. Bu dönüşüm aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılabilir:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} Z \tag{4.3}$$

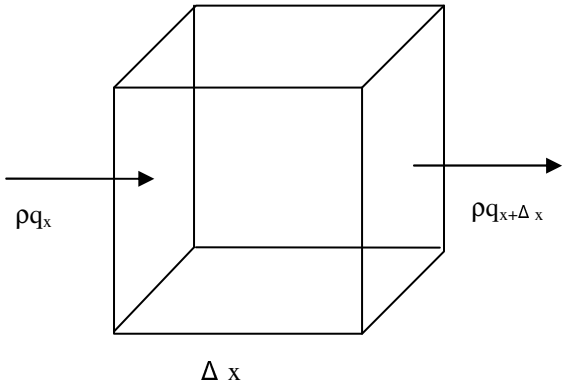
ve

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} Z \tag{4.4}$$

Burada, Z (m) yüksekliği temsil etmektedir.

4.1.2. Yeraltı Suyu Akım Denklemi

Gözenekli ortamdaki akış için birim kontrol hacmi Şekil 4.2'de görülmektedir. Gözenekli ortamın birim hacmini göz önene alırsak, kütle korunumu yasasına göre, birim kontrol hacim içerisine giren su kütlesi akış oranı, birim kontrol hacimden çıkan su kütlesi akış oranına eşittir (Şekil 4.2). Kütlenin korunumu yasasının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir;



Şekil 4.2. Gözenekli Ortamdaki Akış İçin Birim Kontrol Hacmi

$$-\nabla\cdot(\rho\bar{q})+\overline{\rho}\,q_s=\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} \tag{4.5}$$

burada, ∇, gradyan operatörünü ($\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}$), ρ, akışkanın yoğunluğunu, $\bar{q}$, özgül debi vektörünü, $\overline{\rho}$, kontrol hacmine giren veya çıkan akışkanın yoğunluğunu, q_s kontrol hacmine giren veya çıkan akımın hacimsel debisinin birim hacme oranını, θ, poroziteyi ve t ise zamanı temsil etmektedir. Denklemin sol tarafı kontrol hacmindeki kütlenin net değişimini temsil etmektedir. Denklemin sağ tarafı ise belirli bir zaman periyodunda kontrol hacminde depolanan kütlenin zamana göre değişimini ifade etmektedir ve zincir kuralıyla aşağıdaki gibi genişletilebilir:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho\frac{\partial(\theta)}{\partial t} + \theta\frac{\partial(\rho)}{\partial t} \tag{4.6}$$

Porozitenin değişimi, akışkan basıncının değişimiyle ilişkilendirilmiştir ve bununla sınırlıdır ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial\theta}{\partial P}\frac{\partial P}{\partial t} \tag{4.7}$$

Eşit ısı olma durumunda, akışkanın yoğunluğu boşluk suyu basıncının ve çözünmüş madde konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu yüzden akışkanın yoğunluk denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\rho=f(P, C) \tag{4.8}$$

burada, P boşluk suyu basıncını, C ise çözünmüş madde konsantrasyonun temsil etmektedir. Denklem (4.8)'in zamana göre diferansiyeli alınırsa:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\partial\rho}{\partial P}\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial\rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} \tag{4.9}$$

Denklem 4.7 ve 4.9, Denklem 4.6'da yerine konursa;

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho\frac{\partial\theta}{\partial P}\frac{\partial P}{\partial t} + \theta\frac{\partial\rho}{\partial P}\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial\rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} \tag{4.10}$$

Denklem 4.10'un sağ tarafındaki ilk iki terim sırasıyla gözenekli ortamın sıkışması ve suyun genleşmesi ile biriken suyun kütle oranını temsil etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki üçüncü terim ise çözünmüş madde konsantrasyonunun değişmesi ile biriken suyun kütle oranını temsil etmektedir.

Gözenekli malzemenin sıkışabilirliği ile porozite ve boşluk suyu basıncı arasındaki ilişki Bear (1979) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\xi = \frac{1}{(1-\theta)}\frac{\partial\theta}{\partial P} \tag{4.11}$$

burada, ξ, gözenekli malzemenin sıkışabilirliğini temsil etmektedir. Suyun sıkışabilirlik katsayısı ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Bear, 1979):

$$\xi = \frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial P} \tag{4.12}$$

Denklem 4.11 ve 4.12 kullanılarak denklem 4.10'da yeniden yazılırsa:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho(\xi[1-\theta]+\xi\theta)\frac{\partial P}{\partial t} + \theta\frac{\partial\rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} \tag{4.13}$$

Denklemdeki $\rho(\xi[1-\theta]+\xi\theta)$ terimi basınçlı akiferdeki basıncın birim değişiminde birim hacim depolamasından bırakılan su hacmini ifade eder:

$$S_p = \rho(\xi[1-\theta]+\xi\theta) \tag{4.14}$$

burada, S_p, basınca dayalı özgül depolamayı temsil eder. Denklem 4.13'de yerine konursa:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = \rho S_p\frac{\partial P}{\partial t} + \theta\frac{\partial\rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} \tag{4.15}$$

Depolama ile ilgili detaylı araştırma Bear (1979) tarafından yapılmıştır. Denklemin sol tarafı kontrol hacmindeki kütlenin net değişimini temsil etmektedir.

Denklem 4.15'in sağ tarafındaki ilk terim belirli bir zaman periyodunda kontrol hacminde boşluk basıncı değişiminden dolayı depolanan akışkan kütlesinin zamana göre değişimini ifade etmektedir. İkinci terim ise çözünmüş madde konsantrasyonunun değişiminden dolayı depolanan akışkan kütlesinin oranını temsil eder.

Denklem 4.15, Denklem 4.13'de yerine konursa:

$$-\nabla\cdot(\rho\bar{q})+\bar{\rho}q_s=\rho S_p\frac{\partial P}{\partial t}+\theta\frac{\partial\rho}{\partial C}\frac{\partial C}{\partial t} \tag{4.16}$$

Denklem 16, gözenekli ortamlardaki değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımının kısmı diferansiyel denkleminin genel formudur.

Eğer yoğunluk sabit olursa, $\frac{\partial\rho}{\partial C}$ terimi sıfır olur ve yoğunluğa bağlı terimler iptal olur. Bu durumda denklem sabit yoğunluğa sahip sistemler için akışkanın hem hacmini hem de kütlesini temsil ederken, değişken yoğunluğa sahip sistemlerde sadece akışkanın hacmini temsil edebilir. Akışkan hacminin korunumu yasasına dayanan akış denklemleri genel olarak sabit yoğunluklu durumlar için bahsedilmiştir (de Marsily, 1986). Ancak, Bear (1972)'de yoğunluğun ve sıcaklık değişiminin önemli olduğu durumlarda hacim dengesine dayanan denklemlerin uygun olmayan sonuçlar vereceğini belirtmiştir. Evans ve Raffensperger (1992)'de yaptıkları çalışmada değişken yoğunluklu yeraltı suyu akımı için kütleye ve hacme dayalı akış denklemlerini karşılaştırmışlar ve 600 yıllık periyot için yapılan bazı çalışmalarda aradaki farkın %9.55 'e ulaştığını göstermişlerdir. Yoğunluğun önemli olduğu yeraltı suyu akımını tanımlarken hacimsel akış yerine kütlesel akışın kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

4.1.3 Çözünmüş Madde Taşınım Denklemi

Denklem 4.16'da geliştirilen akım denklemine ek olarak akiferdeki çözünmüş madde taşınımının tanımlanabilmesi için ikinci bir kısmi diferansiyel denkleme

ihtiyaç vardır. Yeraltı suyu akımı çözünmüş madde konsantrasyonunun yer değiştirmesine sebep olmaktadır ve buda yoğunluk alanının değişimine sebep olur. Bundan dolayı, akiferdeki yeraltı suyu hareketi ve çözünmüş madde taşınımı bağlantılı süreçlerdir ve bu iki denklem birlikte çözülmelidirler.

Gözenekli ortamdaki çözünmüş madde yeraltı suyu akımı (adveksiyon), moleküler difüzyon ve mekanik dispersiyonla (yayılım) taşınır. Yeraltı suyundaki çözünmüş maddelerin taşınımı aşağıdaki kısmi diferansiyel denklemle tanımlanabilir (Zheng ve Bennett, 1995):

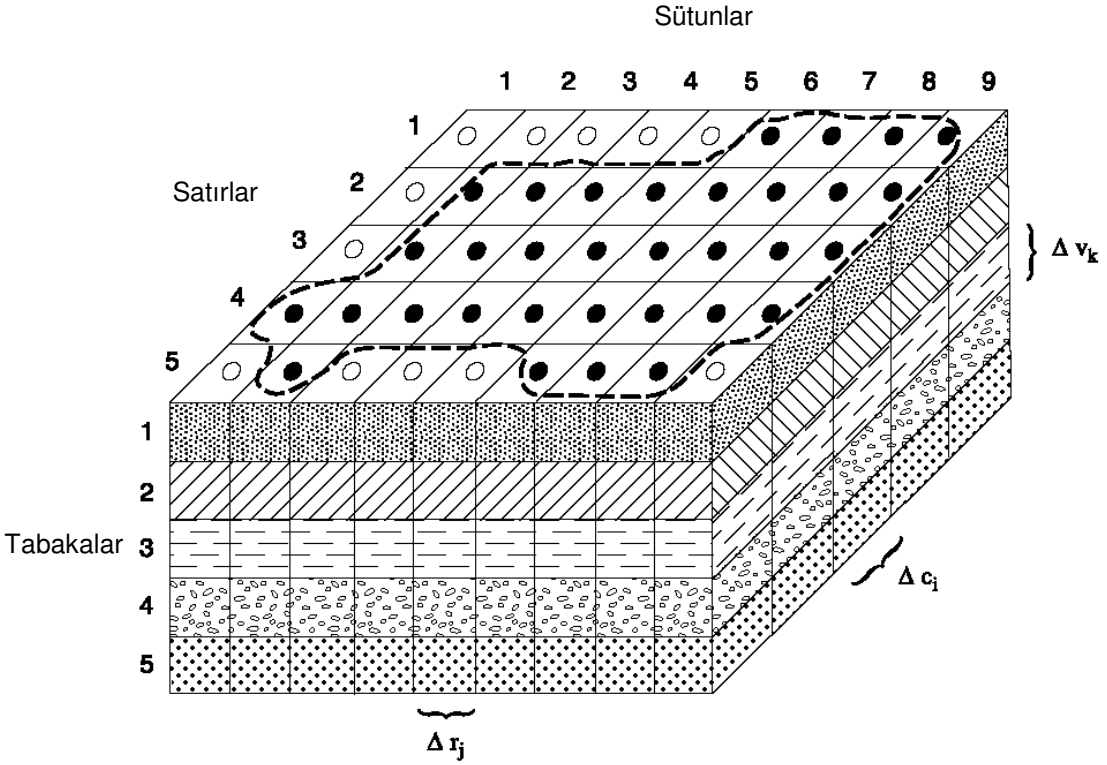
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v} C) - \frac{q_s}{\theta} C_d + \sum_{k=1}^{N} R_k \qquad (4.17)$$

Burada, D hidrodinamik dipsersiyon katsayısını, $\vec{v}$ akışkanın hızını, C_d bir kaynaktan giren veya çıkan çözünmüş madde konsantrasyonunu, R_k farklı reaksiyonlarla çözünmüş madde oluşumunu veya azalmasını temsil etmektedir.

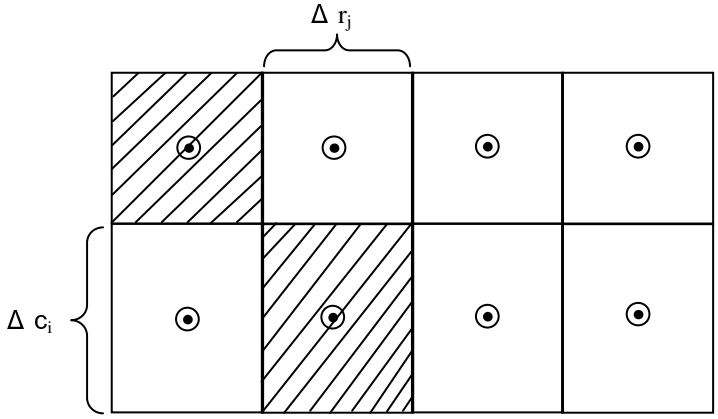
Akışkan yoğunluğunun değiştiği durumlarda, konsantrasyonun eğimi (∇C), $\rho \nabla \left(\frac{C}{\rho} \right)$ şeklinde formüle edilmelidir (de Marsily, 1986, p.239). Bu durum özellikle yüksek yoğunluğa sahip tuzlu sular için gereklidir. Saf su ile deniz suyu yoğunluğu aralığındaki akışkanların yoğunlukları için bu formül ihmal edilebilir ve taşınım denklemi Denklem 4.17'deki haliyle kullanılabilir.

4.2. Değişken Yoğunluklu Yeraltı Suyu Akım Denklemi için Sonlu Farklar Yaklaşımı

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde çoğunlukla sonlu farklar metodu kullanılmaktadır. Çalışma yapılacak alan küçük hücrelere ayrılarak grid ağı oluşturulur (Şekil 4.3). Bundan sonra sonlu farklar metodu her bir ayrık hücre için uygulanır. MODFLOW ve MT3DMS programlarının her ikisi de hücre merkezli grid ağı kullanırlar (Şekil 4.4).



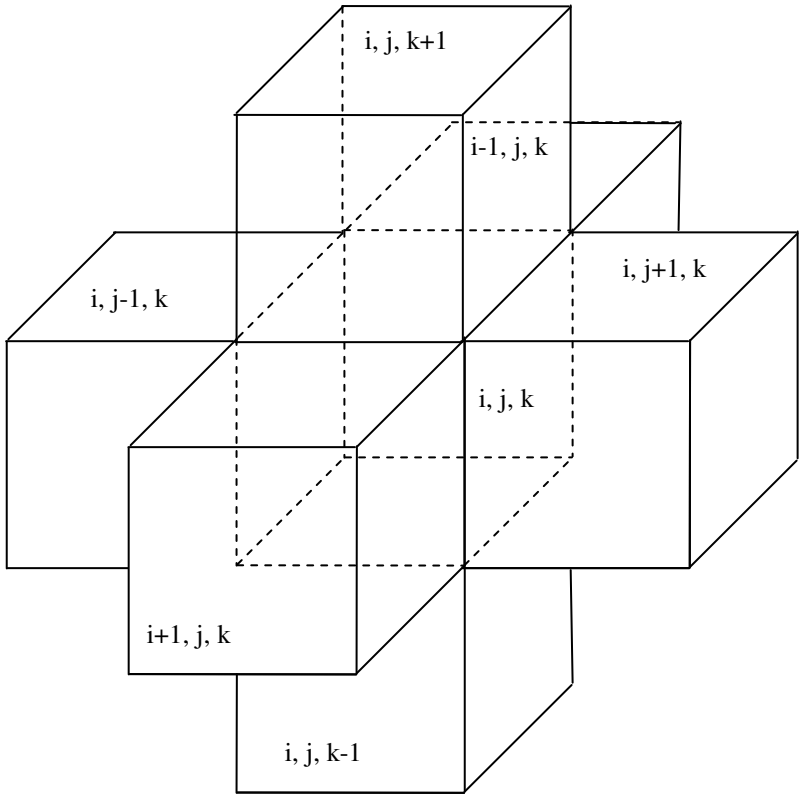
Şekil 4.3. Üç Boyutlu Grid Ağı



Şekil 4.4. Hücre Merkezli Grid Ağı

Sonlu farklar metodu ile elde edilen bağımlı değişkenlerin sonuçları grid ağındaki her bir hücrenin (hücrenin merkezinde oluştuğu varsayılarak) ortalama değerini temsil eder. SEAWAT programı da diğer iki model gibi hücre merkezli grid

ağı kullanır. Üç boyutlu değişken yoğunluklu yeraltı suyu akım denklemi düğüm noktasındaki su yüksekliği temsil eden cebirsel denklemlere dönüştürülür. Her bir denklem grid ağındaki her bir hücredeki suyun korunumunu temsil eder. Yeraltı suyu akımının kısmi diferansiyel denklemlerinin merkezi sonlu farklar yaklaşımı Şekil 4.5'de görülmektedir. Şekil 4.5'deki i, j, k sırasıyla satır, sütun ve tabaka indislerini temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Sonlu Farklar Modelindeki (i,j,k) İndeksli Hücre ve Bitişik Altı Hücrenin İndeksleri.

Yeraltı suyu akışını temsil eden kısmi diferansiyel denkleminin nümerik çözümünde akışkan akımı için merkezi sonlu farklar yaklaşımı, zaman için ise geri yayılmalı sonlu farklar yaklaşımı kullanılmaktadır. Yeraltı suyu akımını temsil eden sonlu farklar eşitlikleri Denklem 4.18'de görülmektedir.

$$\hat{\rho}_{i+1/2,j,k}\frac{K_{\alpha,i+1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i+1/2,j,k}}A_{j,k}\left[h_{f,i+1,j,k}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i+1/2,j,k}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i+1,j,k}-Z_{i,j,k}\right)\right]$$

$$-\hat{\rho}_{i-1/2,j,k}\frac{K_{\alpha,i-1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i-1/2,j,k}}A_{j,k}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i-1,j,k}+\frac{\rho_{i-1/2,j,k}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i,j,k}-Z_{i-1,j,k}\right)\right]$$

$$\hat{\rho}_{i,j+1/2,k}\frac{K_{\alpha,i,j+1/2,k}}{\Delta\alpha_{i,j+1/2,k}}A_{i,k}\left[h_{f,i,j+1,k}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i,j+1/2,k}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i,j+1,k}-Z_{i,j,k}\right)\right]$$

$$-\hat{\rho}_{i,j-1/2,k}\frac{K_{\alpha,i,j-1/2,k}}{\Delta\alpha_{i,j-1/2,k}}A_{i,k}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i,j-1,k}+\frac{\rho_{i,j-1/2,k}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i,j,k}-Z_{i,j-1,k}\right)\right]$$

$$\hat{\rho}_{i,j,k+1/2}\frac{K_{\alpha,i,j,k+1/2}}{\Delta\alpha_{i,j,k+1/2}}A_{i,j}\left[h_{f,i,j,k+1}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i,j,k+1/2}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i,j,k+1}-Z_{i,j,k}\right)\right]$$

$$-\hat{\rho}_{i,j,k-1/2}\frac{K_{\alpha,i,j,k-1/2}}{\Delta\alpha_{i,j,k-1/2}}A_{i,j}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i,j,k-1}+\frac{\rho_{i,j,k-1/2}-\rho_f}{\rho_f}\left(Z_{i,j,k}-Z_{i,j,k-1}\right)\right]$$

$$=\left(\rho_{i,j,k}S_{f,i,j,k}\frac{h_{f,i,j,k}^{n+1}-h_{f,i,j,k}^{n}}{t_{n+1}-t_n}+\theta E\frac{\partial C}{\partial t}\right)V_{i,j,k}-\left(\bar{\rho}Q_s\right)_{i,j,k} \qquad (4.18)$$

Burada, i,j,k sırasıyla satır, sütun ve tabaka indislerini, $A_{j,k}$ α eksenine dik doğrultudaki sonlu farklar hücresinin alanını (α ve β eksenleri tabakalardaki permeabiliteye paralel doğrultuları gösterirken, γ ise bunlara dik doğrultuyu gösterir ve $A_{j,k}=\Delta\beta_j\cdot\Delta\gamma_k$), $Z_{i,j,k}$ hücre merkezinin yüksekliğini, n zaman adım numarasını, $V_{i,j,k}$ hücrenin hacmini ($V_{i,j,k}=\Delta\alpha_i\ \Delta\beta_j\Delta\gamma_k$), Q_s ise giren veya çıkan hacimsel akış oranını temsil eder.

Denklemdeki i+1/2, i-1/2, j+1/2, j-1/2, k+1/2 ve k-1/2 indisleri iki komşu hücre arasındaki bir özelliğin veya değişkenin değerini temsil eder (örneğin, hidrolik iletkenliğin harmonik ortalaması). Denklem 4.18'deki "f" alt indisi eşdeğer tatlı su hidrolik iletkenlik terimlerinden kolaylık olsun diye düşürülmüştür. Denklem 4.18'in sol tarafındaki eşdeğer tatlı su yükseklikleri n+1 zaman adımındaki değerleri temsil etmektedir.

Denklem 4.18'de, sınırlardaki model hücrelerinde iki farklı yoğunluk terimi hesaplanmaktadır. Denklemdeki ,$\hat{\rho}$, yoğunluk terimi hacimsel akış oranını kütlesel

değişime çevirmektedir. SEAWAT programında, yoğunluk terimi her bir akış denklemi için iterasyonu yapılmadan yukarı yönde ağırlıklandırma algoritmasıyla (upstream weighting algorithm) hesaplanmaktadır. Örneğin, eğer akım i,j,k indisli hücreden i,j,k+1 indisli hücreye doğru ise $\hat{\rho}_{i,j,k+1/2}$ terimi $\rho_{i,j,k}$'deki yoğunluk değerine eşit kabul edilmektedir. Eğer akış yönü tersine dönerse (i,j,k+1'den i,j,k'ya doğru ise), $\hat{\rho}_{i,j,k+1/2}$ terimi $\rho_{i,j,k+1}$'deki yoğunluk değerine eşit kabul edilir. Denklemdeki diğer yoğunluk terimi, ρ, ise komşu hücreler arasındaki akışkan yoğunluklarının aritmetik ortalamasıdır.

5. GÖKSU DELTASI YERALTI SUYU MODELİ ÖRNEĞİ

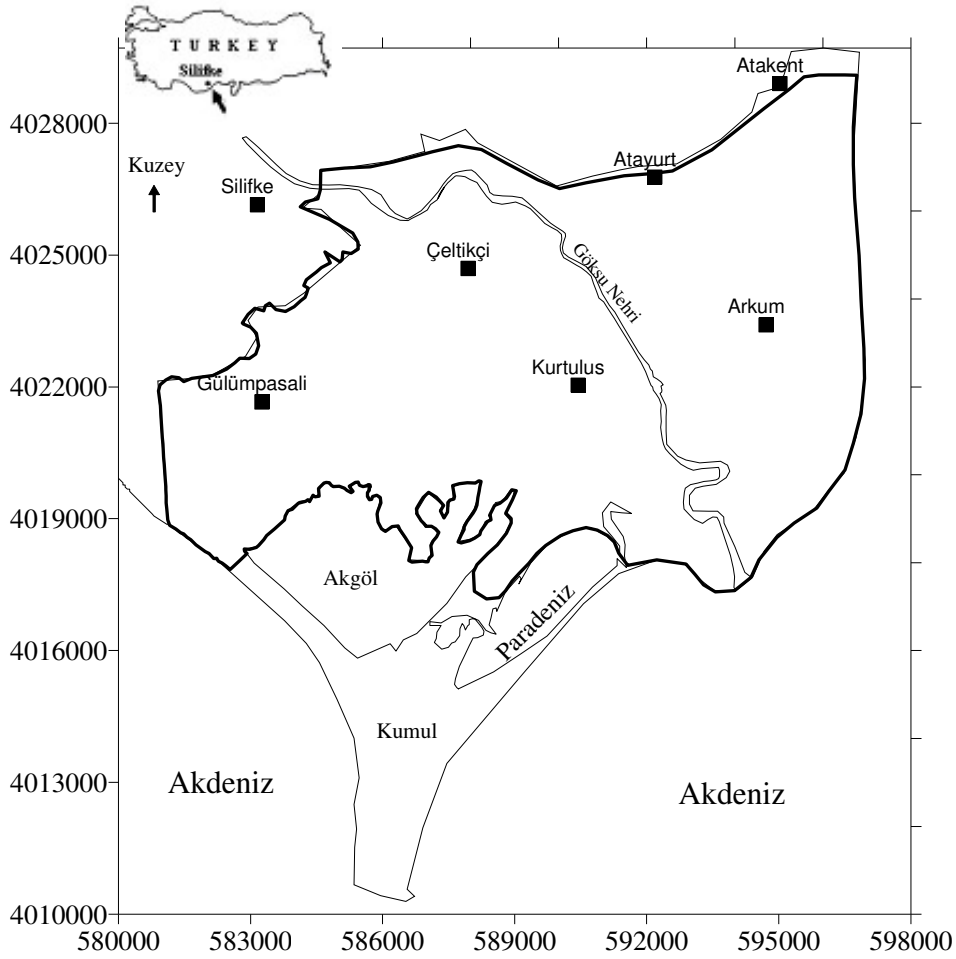
5.1. Çalışma Alanı Genel Bilgileri

Göksu Deltası, Ortadoğu ve Avrupa'nın en önemli sulak alanı olup, Mersin İl merkezinin 85 km batısında Mersin iline bağlı Silifke İlçesinin güney kenarında 33° 17' Kuzey, 35° 59' doğu koordinatları arasında yer almaktadır (Şekil 5.1). Göksu nehrinin batısında iki sığ lagün gölü, Paradeniz ve Akgöl yer almaktadır. Göksu deltasındaki toplam karasal alan 155.34 km^2 dir. Bu alanın 13.804 hektarlık (ha) kısmı kara yüzeyini 1.730 ha alanı ise su yüzeyini oluşturmakta ve delta yüzeyi boyunca rakım değerleri 0–5 m arasında değişmektedir (ÖÇK, 2009).

Türkiye kuşlarının 328'i Göksu Deltasında görülür. Deltada yaşayan kuşların 70'i kesinlikle, 20'si büyük olasılıkla burada üremektedir. Türkiye'nin 140 ulusal ve uluslar arası öneme sahip kuş türünün 106'sı dünya çapında yok olma tehlikesi altında olan 24 kuş türünden 12'si Göksu Deltası'nda görülebilmektedir. Su kuşu türlerinin çeşitliliği ve sayılarının fazla oluşu nedeniyle, özellikle Su Kuşları Yaşama Ortamı Olarak Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alanlar Hakkındaki Sözleşme (RAMSAR) kriterlerinin birçoğunu kapsadığı için 1994 yılında RAMSAR Alanı Statüsüne sahip olmuştur. Ayrıca bu alan bir defada barındırdığı kuş varlığı dikkate alındığında "A" sınıfı sulak alan olma niteliğindedir. Ülkemiz bu sözleşmeye 1993 yılında taraf olmuş, 1994 yılında Türkiye Büyük Millet Meclisi'nce onaylanmıştır. Bölge 12.02.1996 tarih ve 2380 sayılı Adana Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulunun kararı ile Birinci Derece Doğal Sit Alanı olarak ilan edilmiştir (ÇBÇKGM, 1998).

Göksu deltası, Akdeniz iklimine özgü çok çeşitli doğal bitki örtüsüne sahiptir. T.C. Çevre Bakanlığı Çevre Koruma Genel Müdürlüğü verilerine göre, bölgede 332 bitki türü belirlenmiştir. Türkiye'de korunmaya ihtiyacı olan dünyanın başka hiçbir yerinde bulunmayan 8 adet tür ile 32 adet nadir türün deltada yaşadığı rapor edilmiştir (ÖÇK, 2009).

5. GÖKSU DELTASI YERALTI SUYU MODELİ ÖRNEĞİ Murat ÇOBANER



Şekil 5.1. Gölsu Deltası Genel Konumu

Göksu deltası; sahip olduğu doğal, tarihi ve kültürel değerlerinin korunması ve gelecek nesillere aktarılmasının güvence altına alınması amacıyla 2872 sayılı Çevre Kanunu'nun 9. maddesine istinaden, 2 Mart 1990 tarih ve 20449 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan 18.01.1990 tarih ve 90/77 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile "Özel Çevre Koruma Bölgesi" olarak tespit ve ilan edilmiştir (ÇBÇKGM, 1998).

Göksu nehri; 260 km uzunluğa, 10 400 km^2 drenaj alanına, yıllık ortalama 110 m^3/s debiye sahiptir. Göksu Deltası su kaynakları açısından zengin olup yaklaşık 95000 dekarı sulanmaktadır. 1972 yılında DSİ I. Merhale Sulama Projesi ile 53.225 da alanın sulamaya açılmıştır. Deltada sulanan alanların geriye kalan kısmı ise çiftçilerin I. Merhale Projesinin uç noktaları, yeraltı suyu ve yer yer drenaj kanallarından temin edilen su ile sulanmaktadır (ÖÇK, 2009).

DSİ sulama ve drenaj kanalları deltanın merkezinde ve kuzey bölümünde yer almakta, Göksu nehrinden alınan sulama sularının bir kısmı drenajla tekrar yüzeysel su sistemine geri dönmektedir. Sulama sonunda araziden toplanan drenaj suyu, deltanın güney bölümünde bulunan Akgöl ve Paradeniz göllerine veya Göksu nehrine deşarj edilmektedir. Akgöl'ün yüzey alanı yaklaşık 800 ha olup, genellikle tatlı ve hafif tuzlusu arası su cinsine sahip iken, Paradeniz'in alanı 602 ha olup, genellikle hafif tuzlu ve tuzlu arası su cinsine sahiptir [Haar ve Heunks 1992]. Bu iki göl suni olarak yapılmış bir kanal ile birbirlerine bağlanmışlardır.

Çizelge 5.1. Akgöl ve Paradeniz Su Bütçesi Oranları

Akgöl su bütçesi		Paradeniz su bütçesi	
Su girişleri	**%**	**Su girişleri**	**%**
Yağmur	18	Yağmur	12
Drenaj kanallarından gelen su	82	Drenaj kanallarından gelen su	38
Yeraltı suyu	0	Akgöl'den giriş	50
		Yeraltı suyu	0
Su çıkışları	**%**	**Su çıkışları**	**%**
Buharlaşma	71	Buharlaşma	41
Paradeniz'e akış	29	Denize akış	59

Drenaj suyu Akgöl'e sulama sistemine bağlı iki kanaldan ve sulanmayan araziyi kurutan birkaç küçük kanaldan girer ve Paradeniz Gölü'ne doğru akar. Akgöl'deki su seviyesi sulamanın en yüksek olduğu dönemde (Haziran–Ekim) en yüksekte ve oldukça istikrarlıdır. Kış boyunca su seviyesi yağışa bağlı olarak 0.4 m kadar değişim gösterir. Yeraltı suyu girdisi dışında Akgöl'ün, deltanın havzası ile ilişkisi yoktur ve Göksu nehrinin akışından bağımsızdır. Akgöl ve Paradeniz göllerine ait su bütçe oranlarını Manley (1997) vermiştir (Çizelge 5.1).

Drenaj kanalları, Akgöl için önemli su girdisi oluşturmaktadır. En önemli su çıkışı buharlaşma olarak görülmektedir. Ayrıca yaz aylarında aşırı buharlaşma ile su seviyesi düşmesi ile Paradeniz'den de su girişi olmaktadır.

5.2. İklim ve Hidroloji

Bölgede yarı–kurak Akdeniz iklimi hakimdir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar yağışlı ve ılık geçmektedir. Yıllık toplam yağış 557.1 mm, uzun yıllara ait yıllık buharlaşma miktar aylık olarak 48 mm'dir. Yıllık ortalama sıcaklık ise 19°C'dir (Çizelge 5.2). Yıl boyunca yüksek nem oranı kıyı ovasının tipik özellikleridir.

Eskiden beri Göksu Deltası, batıdan esen siklonik Lodos ve Göksu vadisinden esen Poyraz gibi sert rüzgarları ile tanınır. Akdeniz`in başka bölümlerinde olduğu gibi Göksu'nun yerel rüzgarları dağ zincirlerinin ve aralarındaki boşlukların konumu nedeni ile oluşmaktadır. Türkiye'nin Akdeniz sahili boyunca yer alan üç büyük boşluk rüzgarların oluşumuna etki eder; Antalya Körfezi, Göksu Nehri Vadisi, İskenderun Körfezi. Bu siklonlar özellikle kış aylarında görülürler.

Sıcak deniz suyu üzerinde esen soğuk ve kuru Poyraz, sıcaklık düşmeleri yaratarak deniz suyunda orta derinliklere ulaşan batma hareketi yaratır. Bu süreç Akdeniz`in genel fiziksel ve ekolojik karakterleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Deniz suyundaki besinlerin bu yolla taşınması, doğu Akdeniz'in balık potansiyelinin zayıf olmasının başlıca sebebidir.

Yaz ayları boyunca bölgede devamlı değişen bir rüzgar sistemi vardır. Kara ile deniz arasındaki sıcaklık farklarından dolayı meltemler oluşur. Gün boyunca denizden karaya doğru sert bir rüzgar eser, gece ise yön değişir.

Yılda ortalama 557.1 mm yağış düşer. Yağmur mevsimi, Aralık en yağışlı ay olmak üzere Kasım'dan Mart'a kadardır. Buharlaşmanın en yoğun olduğu aylar Haziran – Temmuz arasıdır, en düşük olduğu aylar ise Aralık ve şubat aylarıdır.

Yıl boyunca ortalama %60 ile %70 arasında olan havanın nispi nem oranı, büyük ölçüde rüzgarın yönüne bağlıdır. Bölgedeki hakim rüzgar kuzeybatıdan estiğinde karadan kuru havayı getirir ve nem oranı % 35–40'lara düşer. Hava durgun olduğunda veya meltemler estiğinde nem oranı yükselir. Mayıs ile Ekim sonu arasında geniş çeltik tarlalarının önemli bir katkısı olmasına rağmen yüksek nem oranının başlıca sebebi, nehir ve lagünlerden ziyade denizdir (ÖÇK, 2009).

Çizelge 5.2. Bölgenin Uzun Yıllar (1931–2003) Yılı İklim İstatistikleri

AYLAR	Sıcaklık ℃			Ortalama Değerler			
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama	Nispi Nem (%)	Buharlaşma (mm)	Yağış (mm)	Rüzgar Hızı (m/sn)
Ocak	15.1	7.6	10.2	59.2	30	114.3	3.3
Şubat	16.2	8.0	10.9	60.0	29	91.9	3.3
Mart	19.1	9.8	13.4	61.0	39	51.2	2.7
Nisan	22.2	12.5	17.1	63.0	37	25.4	2.2
Mayıs	29.9	17.9	21.2	65.0	45	18.8	1.8
Haziran	30.9	21.3	25.2	65.0	74	4.0	1.8
Temmuz	33.7	23.6	27.8	66.0	81	1.4	2.0
Ağustos	33.2	23.6	28.0	65.0	70	1.7	2.1
Eylül	31.0	21.1	25.5	59.0	56	3.2	2.3
Ekim	29.1	18.1	14.2	56.0	49	37.6	2.6
Kasım	24.4	14.2	16.0	58.0	35	76.9	2.9
Aralık	13.6	6.7	11.7	61.0	25	130.7	2.9
Toplam					570	557.1	
Ortalama	24.9	15.4	19.0	61.5	48	46.4	2.5

5.3. Hidrojeoloji

Manley (1997)'de Devlet Su İşleri (DSİ) ve Doğal Hayatı Koruma Derneği (DHKD) ile birlikte deltada ve özellikle Akgöl'de karşılaşılan problemleri belirlemek için bir çalışma başlatmıştır. Çalışmasının sonucunda çözümler ve önlemlerin yanı sıra iki amacı olan matematiksel model önermiştir. Birincisi, deltanın içindeki süreçleri ve problemlerin sebeplerini iyi bir şekilde anlamadır. İkincisi ise problemlere alternatif çözümlerin test edilmesidir. Veri eksikliğinden dolayı çalışmasının sonucunda hassas veri toplama programı önermiştir.

Haar ve Heunks (1992) Göksu deltasında hidrojeolojik bir çalışma yapmışlardır. Deltadaki birçok sediment profillerini karşılaştırarak, 30 m ile 130 m arasında ve daha derin bölgelerde kaba taneli tabakalı akiferlerin ince killi tabakalarla birbirine bağlandığını belirtmişlerdir. Jeolojik çalışmalarına göre delta 5000 yıldan daha önce biçimlenmiştir. Haar ve Heunks (1992) aynı zamanda arazi çalışması yapmışlar ve 187 yeraltı suyu ve yüzeysel su örneği toplamışlardır. Bunlarda 109 tanesi yüzeysel akiferden ve 18 tanesi de derin akiferlerden alınmıştır. Yüzeysel

akiferden alınan örneklere göre taban suyu haritası çizilmiştir. Haritaya göre kıyı şeridinde taban suyu deniz seviyesi ile yaklaşık aynıdır. Orta kısımlarda ise taban suyu 5 metre civarındadır. Derin akiferlerde oluşan artezyen kuyuları derin akiferlerin üzerleri killi tabakalar tarafından örtülmüş basınçlı akifer olduğunu göstermektedir.

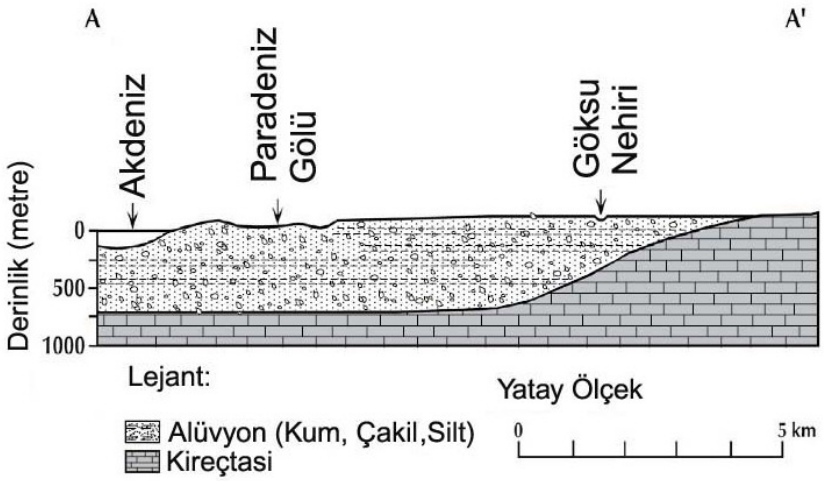
Menegiç (1998) Göksu deltasının yeraltı suyunun potansiyel kirlenme riskini araştırmıştır. Çalışmasında 77 sığ kuyudan, 8 artezyen kuyusundan ve 2 sondaj kuyusundan veri toplamıştır. Çalışmasının sonucunda yüzeyden 20 ila 30 m'ye kadar ulaşan tabakanın aşağısında çoğunlukla killi malzemenin olduğunu belirlemiştir.

Çizelge 5.3. Göksu Deltasındaki Jeolojik Tabakalar (Gordu, 2000)

Jeolojik Dönem	Stratigrafi (Tabaka Bilim)	Yaklaşık kalınlık (m)	Litoloji (Taş Bilim)
Holosen (0.01 My–Günümüz)	Quaterner sediment	3–4	Gevşek kum, silt
		20–25	İnce tabakalı farklı dokulu malzemeler, çoğunlukla silt, kum, kil, siltli kil ve kumlu kil
Pleistosen (1.81 My–0.01 My)	Quaterner sediment	>130	Kalın tabakalı ince ve kaba malzemeler yanında ince killi tabakalar. Kum, çakıl, kil ve killi kum
Pliyosen (5.32 My–1.81 My)	Tersiyer	Veri yok	Siltli kireç taşı
Miyosen (23.8 My–5.32 My)	Veri yok	750–800	Kil taşı, killi şist, kireç taşı ve miyosen karbonatlı kayaçlar
Kretase (142My–65.5 My)	Veri yok	Veri yok	Karbonatlı kayaçlar
Jura (205.1 My–142My)	Veri yok	Veri yok	Karbonatlı kayaçlar
Devoniyen (417My–354 My)	Veri yok	Veri yok	Killi şist, kum taşı, konglomera, kuvarsit, ve kayalık kireçtaşı

Gordu (2000) Göksu deltasında yapmış olduğu iki boyutlu çalışmasında Haar ve Heunks (1992) ve Menegiç (1998)'in çalışmalarındaki verileri birleştirerek deltaya ait jeolojik tabakaları çıkarmıştır. Deltada yapılan çalışmalara göre, Göksu nehrinin taşıdığı alüvyon depozitlerinin deltadaki derinliği yaklaşık 500 ile 700 m civarındadır (Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2). Alüvyon depozitleri, çakıl, kum, silt, kil ve kumlu kilin heterojen karışımından oluşmuştur. Deltanın bazı bölümlerinde, nispeten düşük geçirgenliğe sahip killi toprak yüzeyden itibaren yaklaşık 20 ile 30 m derinliğe

ulaşmaktadır. Bu düşük geçirgenlikli kil tabaka, alt kısımlarda kalan ve ince kil tabakalarla ayrılmış tabakalar halindeki daha geçirimli iri taneli malzemelerden oluşan alüvyon akiferi üst taraftan kaplamakta ve geçirimsiz/yarı geçirgen bir tabaka gibi çalışmaktadır. Kavramsal açıdan, deltadaki akifer sisteminde derin tabakalarda artezyen şeklinde basınçlı yeraltı suyu bulunmakta, sığ birimlerde ise yeraltı suyu serbest yüzeyli akifer şeklinde bulunmaktadır [Haar ve Heunks 1992].



Şekil 5.2. Göksu Deltasındaki Hidrojeolojik Enkesit (Gordu, 2000)

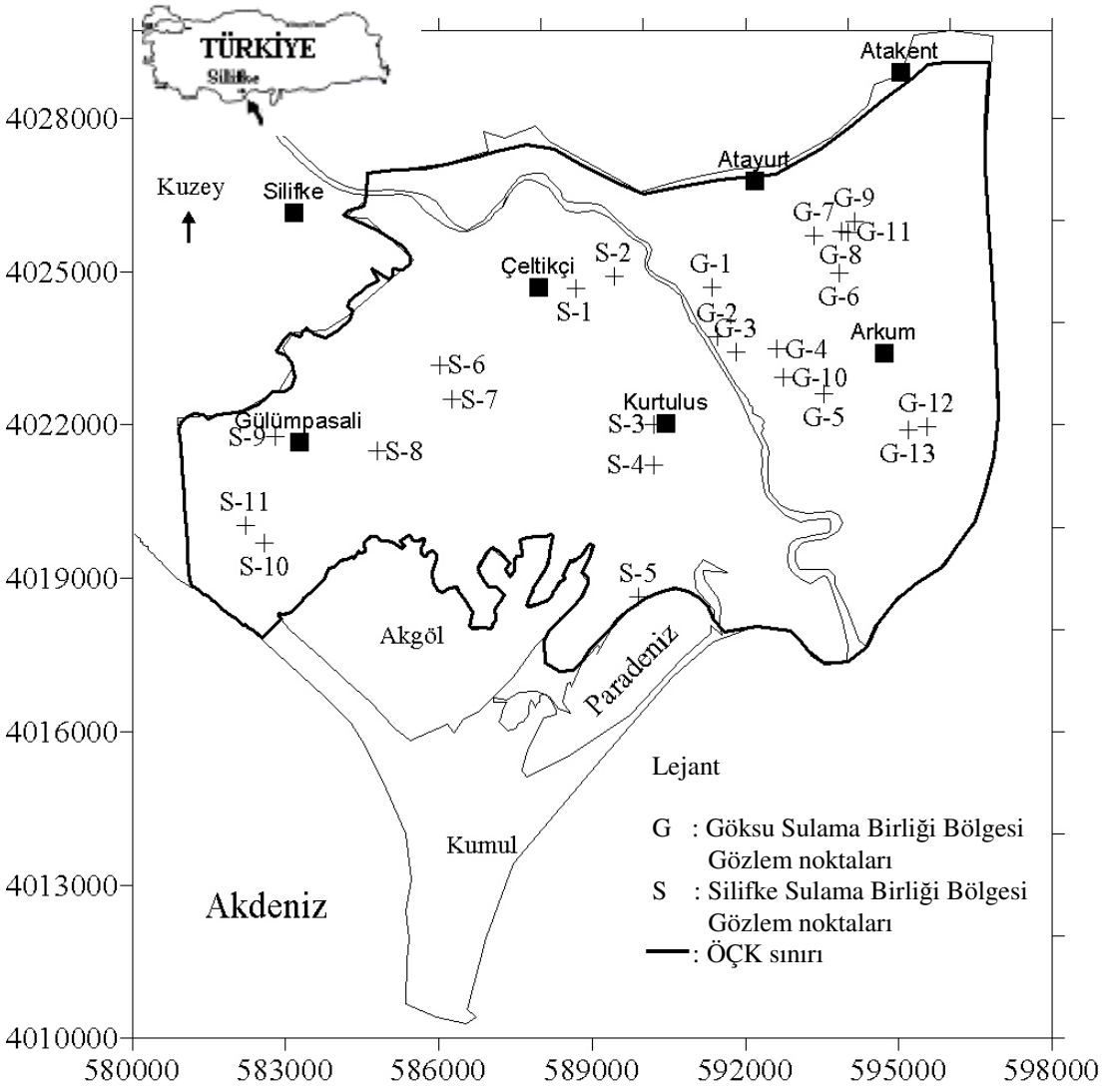
5.4. Yeraltı Suyu Gözlem Kuyuları

Göksu deltası yeraltı suyu akım ve taşınım modelinin kalibrasyonu aşamasında kullanılacak 23 adet gözlem noktasının arazi içindeki dağılımı Şekil 5.3'de görülmektedir.

Gözlem kuyularında 2008 su yılı süresince aylık olarak yapılan yeraltı su seviyesi, elektriksel iletkenlik (EC) ve klorür (Cl) miktarlarının yıllık ortalama değerleri Çizelge 5.4'de verilmektedir.

Ekim 2007–Eylül 2008 döneminde 23 kuyuda yapılan ölçümlerde su seviyelerinin 0 ile 3.1 m arasında değiştiği gözlenmiştir. 30 m'den derin kuyuların hidrolik su yükseklikleri deniz seviyesinden yaklaşık 0.7 ile 2.45 m arasında değişmektedir. 12 ay süresince yapılan ölçümlerde elektriksel iletkenlik değerleri

0.386 dS/m ile 5.23 dS/m arasında, klorür (Cl) değerleri ise 23.2 mg/l ile 1661.7 mg/l arasında değiştiği görülmüştür. Çizelge 5.4'de 2008 su yılında gözlem kuyularında ölçülen yeraltı su seviyesi, elektriksel iletkenlik ve klorür değerlerinin yıllık ortalamaları verilmiştir.



Şekil 5.3. Göksu Deltası Akiferindeki Gözlem Noktalarının Model Alanında Dağılımı

Çalışmada, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY) Teknik Usuller Tebliği (1991), Çizelge 4'de verilen "Sulama Sularının Sınıflandırılmasında Esas Alınan

Sulama Suyu Kalite Parametreleri" ne göre Çizelge 5.5 ve 5.6 oluşturulmuştur. Çizelge 5.5 incelendiğinde yaz aylarındaki bitki su ihtiyacının arttığı dönemde yeraltı sularının kalitesinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.4. Göksu Deltası Gözlem Kuyularının 2008 Yılı Ortalama Yeraltı Su Seviye, Elektriksel İletkenlik ve Klorür Miktarları

Gözlem kuyusu	Enlem	Boylam	Kuyu derinliği (m)	Yeraltı su seviyesi (m)	Elektriksel iletkenlik (dS/m)	Klorür, Cl (mg/l)
G-1	591339	4024689	6.0	1.46	0.86	42
G-2	591457	4023732	7.0	1.45	1.13	77
G-3	591813	4023427	43.0	1.29	0.58	64
G-4	592615	4023485	44.0	1.37	0.68	87
G-5	593536	4022617	42.0	1.17	1.56	328
G-6	593838	4024962	8.0	1.10	0.95	44
G-7	593342	4025710	32.0	1.16	1.21	145
G-8	593868	4025795	17.5	1.30	0.86	115
G-9	594142	4025990	40.0	0.73	0.93	129
G-10	592748	4022926	41.0	1.21	0.68	90
G-11	594014	4025775	43.0	0.70	0.91	123
G-12	595122	4021772	65.0	1.91	5.06	1470
G-13	595150	4021782	60.0	1.41	4.19	1212
S-1	588672	4024666	55.0	2.27	0.61	52
S-2	589424	4024916	30.0	2.45	0.48	44
S-3	590197	4021222	35.0	1.51	1.30	290
S-4	589904	4018637	49.0	0.97	3.27	899
S-5	586015	4023179	30.0	1.98	0.70	35
S-6	586266	4022494	38.0	1.82	0.45	33
S-7	584788	4021485	30.0	1.52	0.60	37
S-8	582795	4021768	42.0	1.41	0.60	31
S-9	582590	4019689	4.0	0.67	1.93	413
S-10	582215	4020045	12.5	1.46	0.70	43

Çizelge 5.6'ya göre EC ve Cl parametrelerine göre sulanmakta olan tarım arazilerinin %70–75'inde kullanabilir yeraltı suları varken, yaklaşık %17'sini bazı önlemler almak kaydıyla kullanılabilir (4. sınıf) suya sahip olduğu belirlenmiştir. Klorür konsantrasyonu dikkate alındığında ise, tarım arazilerinin %11'inde 5. sınıf yeraltı suyu (zararlı–uygun değil) bulunduğu anlaşılmıştır. Bu suların tarımsal amaçlı olarak kullanılması, tarımın sürdürülebilirliğini tehlikeye sokacağı için sakıncalıdır.

Şekil 5.4 ve 5.5'de 2008 Temmuz ayında ölçülmüş klorür (Cl) ve elektriksel iletkenlik Kriging tahmin haritaları görülmektedir. Cl ve EC Kriging tahmin

haritalarına göre Göksu nehrinin sol sahilinde özellikle yeraltı su seviyesinin düşük olduğu kesimlerde su kalitesinin tarıma elverişsiz hale geldiği görülmektedir.

Çizelge 5.5. SKKY'a Göre Göksu Deltası Gözlem Kuyularının Yeraltı Sularının Sulamaya Uygunluk Sınıfları

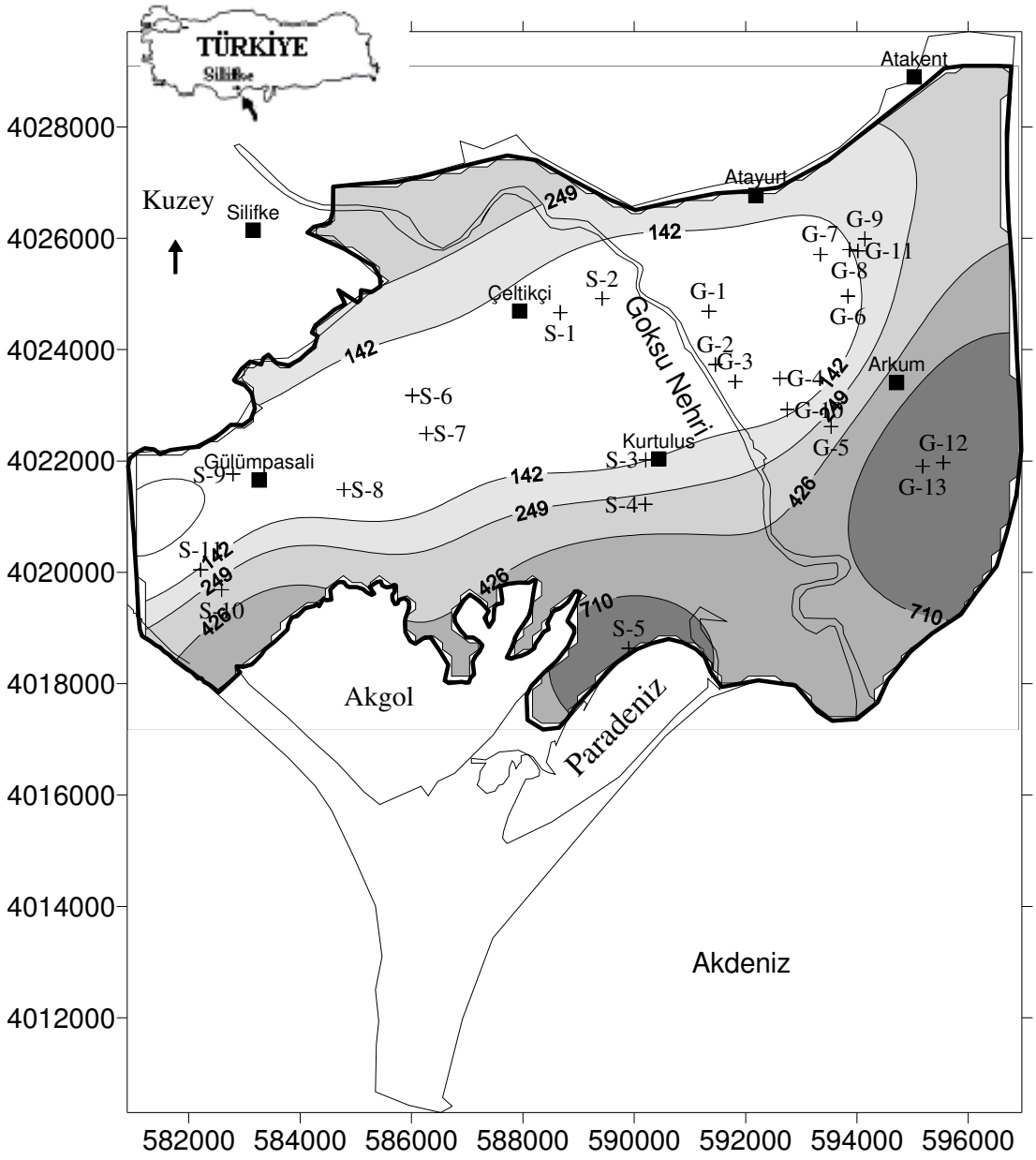
	Sınıf	Limitler	Genel Ortalama	Temmuz 2008
EC (dS/m)	1	0–0.25	–	–
	2	0.25–0.75	17	9
	3*	0.75–2.00	4	11
	4**	2.00–3.00	2	1
	5***	>3.00	1	3
Cl (mg/l)	1	0–142	16	16
	2	142–249	2	1
	3*	249–426	3	3
	4**	426–710	–	1
	5***	>710	3	3

* : Kullanılabilir, ** : İhtiyatla kullanılmalı, *** : Uygun değil (Zararlı)

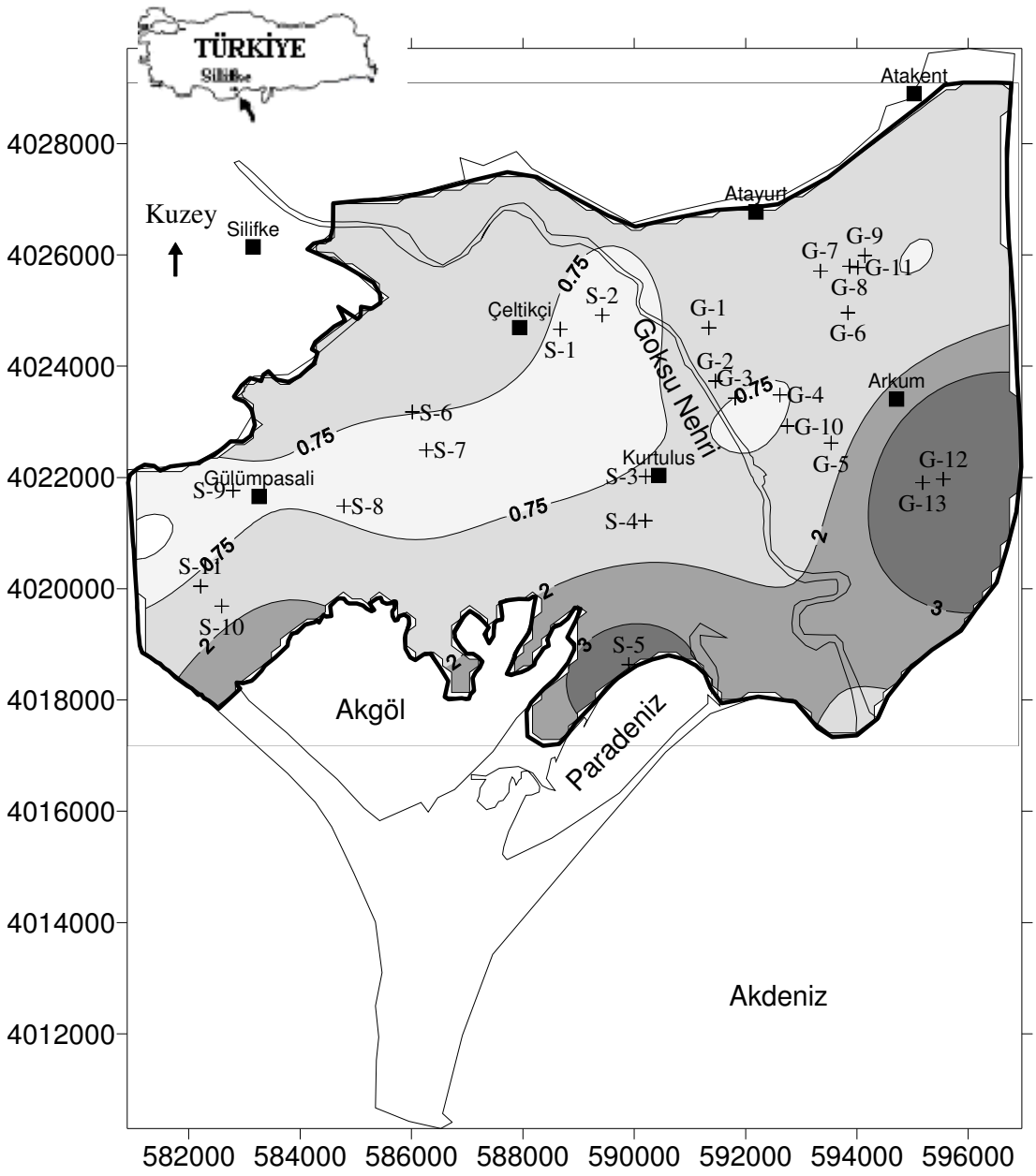
Çizelge 5.6. SKKY'a Göre Göksu Deltası Yeraltı Sularının Sulamaya Uygunluk Sınıfları ve Kapladığı Alanlar

	Sınıf	Limitler	Kapladığı Alan (ha)	Alana %'si
EC (dS/m)	1	0–0.25	0.0	0
	2	0.25–0.75	5.9	20
	3*	0.75–2.00	69.1	56
	4**	2.00–3.00	23.6	16
	5***	>3.00	1.4	9
Cl (mg/l)	1	0–142	31.9	35
	2	142–249	21.3	17
	3*	249–426	16.3	19
	4**	426–710	23.3	17
	5***	>710	7.3	11

* : Kullanılabilir, ** : İhtiyatla kullanılmalı, *** : Uygun değil (Zararlı)

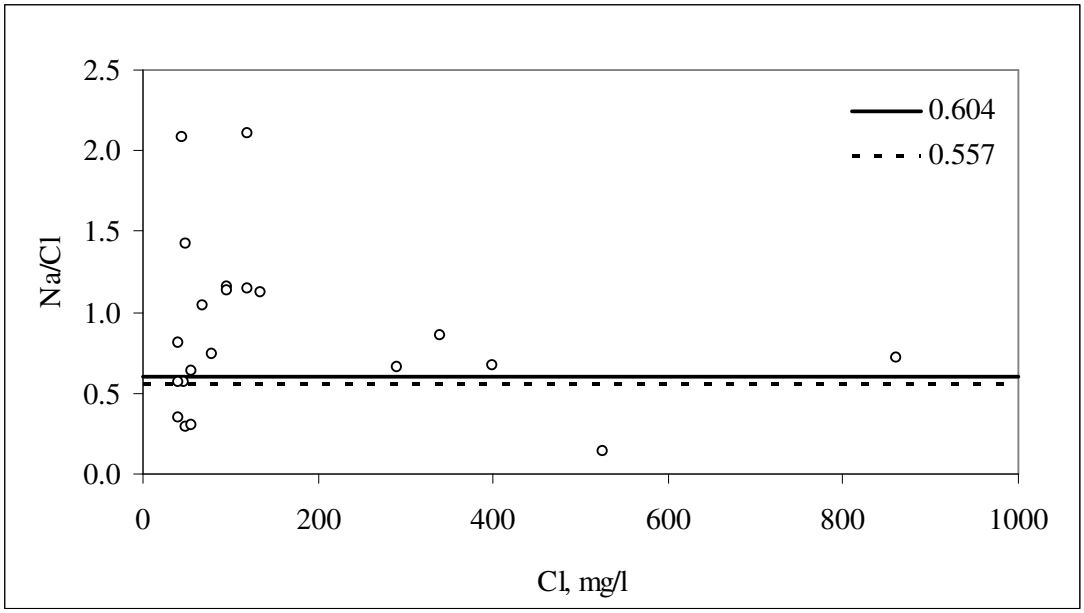


Şekil 5.4. Temmuz 2008 Gözlenen Cl Değerlerine ait Kriging Tahmin Haritası



Şekil 5.5. Temmuz 2008 Gözlenen EC Değerlerine ait Kriging Tahmin Haritası

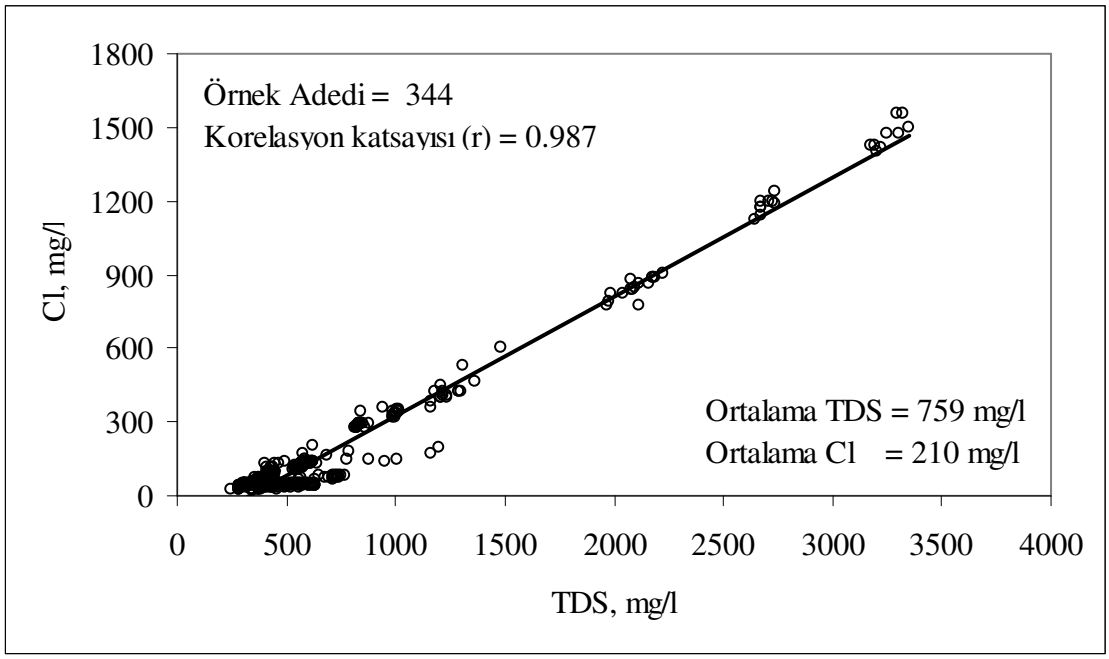
Temmuz 2008 verilerine ait Na/Cl oranları Şekil 5.6'da görülmektedir. Bu oran 0.557'nin altında ise deniz suyu girişiminin olduğunu, 0.604'ün üzerinde olduğunda ise tatlı su deşarjı olduğunu göstermektedir (Shammas ve Jacks, 2007). Şekil 5.6'dan da görüleceği üzere Silifke Sulama Birliği Bölgesindeki kıyıya yakın 4 kuyu da deniz suyu girişimi varken biri Göksu Sulama Birliği Bölgesinde olmak üzere 2 kuyuda risk altındadır.



Şekil 5.6. Na/Cl Oranına Karşı Cl Konsantrasyon Değerleri (Temmuz 2008)

EC değerleri 1970'lerden beri doğal suların toplam çözünmüş katı madde (TDS, Total Dissolved Solids) değerlerini tahmin etmede kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda TDS değeri, EC değerinin 0.55 ile 0.75 arasında bir değerle çarpılmasıyla tahmin edilmektedir (McNeil ve Cox, 2000). Bu çalışmada da TDS değerleri EC değerlerinin 0.64 ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. SEAWAT programı çözümleri TDS cinsinden olduğu için model sonuçlarından klorür (Cl) değerine geçiş yapmak için 2008 su yılına ait 12 aylık yeraltı su numunelerinin TDS ve Cl değerleri arasında ilişki geliştirilmiştir. Analizi sonuçlarına göre TDS ile Cl arasında lineer bir ilişki vardır. Bu ilişki kullanılarak ölçülen TDS veya Cl değerleri arasında geçiş yapılabilir. Şekil 5.7'de TDS ve Cl konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi veren en

uygun eğrinin çizimi gösterilmiştir. TDS–Cl konsantrasyonu ilişkisine göre, 759 mg/L ortalama TDS konsantrasyonu, 210 mg/L Cl konsantrasyonuna denktir.



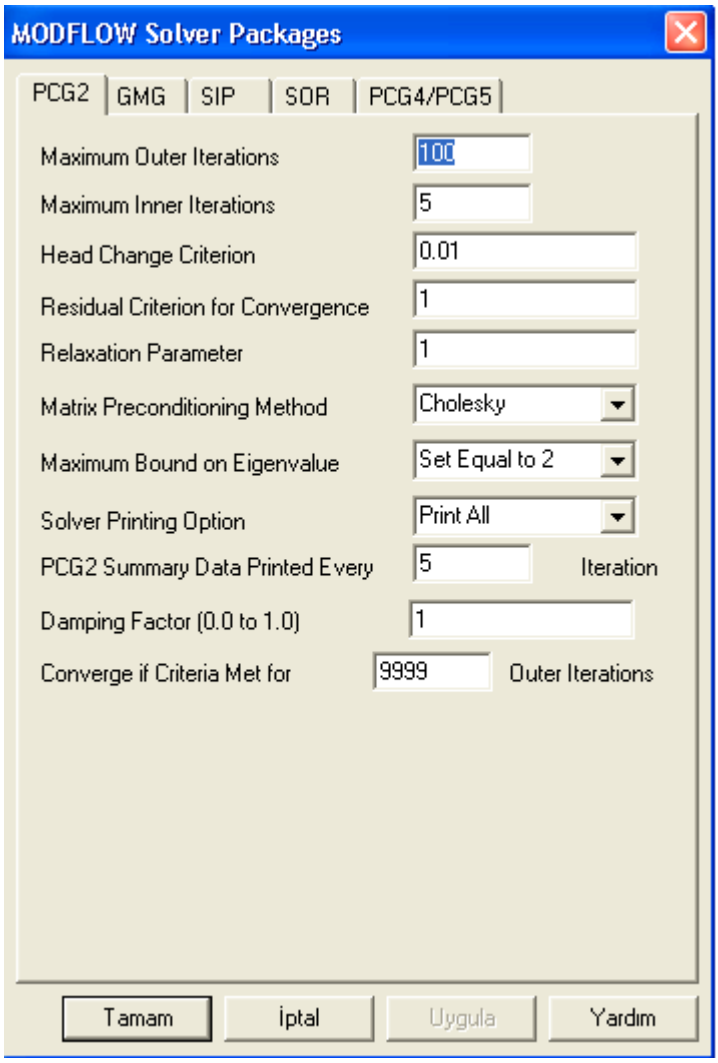
Şekil 5.7. TDS–Cl Konsantrasyon İlişkisi (2008 Su Yılı Verileri)

5.5. Göksu Deltası Akiferinin Modellemesi

SEAWAT–2000 paket programı kullanılarak 155.34 km^2'lik alana sahip Göksu Deltası akiferinin yeraltı suyu akım ve taşınım modeli simüle edilmiştir. Çalışma alanı için yapılan uzun zaman yağış verileri değerlendirilerek 2008 su yılına ait verilerin uzun zaman ortalamalarına yakın değerler taşıdığı ve kararlı akımı temsil edeceği düşünülmüştür. Bu nedenle modelde 2008 su yılına ait yeraltı suyu beslenme miktarları, gözlem kuyularındaki EC, Cl ve yeraltı su seviyesi değerleri ile yeraltı suyu pompaj miktarları kullanılmıştır.

Yeraltı suyu modellemesi sırasında kullanılan Groundwater Vistas, SIP (Strongly Implicit Procedure), SOR (Successive Over–Relaxation), PCG2 (Pre–conditioned Conjugate Gradient) ve GMG (Geometric Multigrid) gibi birçok çözüm paketinin kullanımına izin vermektedir. Çalışmada Groundwater Vistas'ın tavsiye ettiği PCG2 (Koşullanma Eşlenik Gradyan Paketi 2) çözüm paketi kullanılmıştır

(GW Vistas, 2006). PCG2 çözüm paketi için gerekli olan ve modelde kullanılan parametreler Şekil 5.8'deki MODFLOW Çözümleme Paketi diyalog kutusunda belirtilmiştir. Bu parametreler aşağıda tanımlanmıştır.



Şekil 5.8. Koşullanma Eşlenik Gradyan Paketi 2 Diyalog Kutusu

PCG2 paketi iki ön koşullanma seçeneği sağlamaktadır. Bunlar Değiştirilmiş Tamamlanmamış Cholesky Ön Koşulu MICCG (Axeslsson ve Lindskog, 1986) ve Neuman Serileri Polinom Ön Koşulu POLCG (Saad, 1985)'dur. Modelleme aşamasında daha kısa sürede sonuca giden Değiştirilmiş Tamamlanmamış Cholesky Ön Koşulu MICCG (Axeslsson ve Lindskog, 1986) kullanılmıştır (Hill, 1990). İzin verilmiş iterasyon sayısı doğrusal olmayan problemler için genellikle 1 ile 100

arasında değerler alabilir. Modelimizde izin verilen iterasyon sayısı 100 alınmıştır. Ardışık iki iterasyon arasındaki maksimum hidrolik seviye ve konsantrasyon değişimi, verilen yakınsama kriterinden daha küçük olunca iterasyon durur. Modelde yakınsama kriterine 0.01 değeri verilmiştir.

5.5.1. Sınır Koşulları ve Grid Ağlarının Oluşturulması

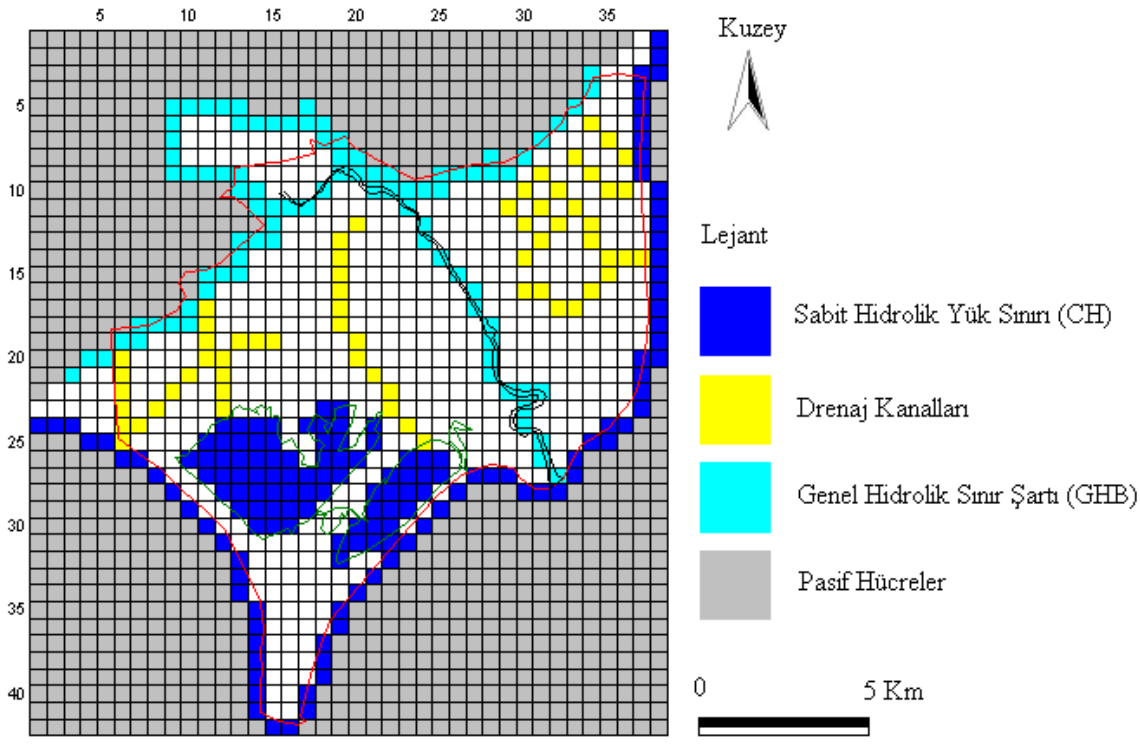
Modelde akifer sistemi sınır koşulları Akdeniz kıyı şeridi boyunca sabit seviyeli hidrolik yük (Constant Head, CH) ve diğer sınırların tamamı ise akım olmayan (No–Flow) sınır koşulları olarak modellenmiştir. Akım olmayan pasif hücreler sonlu farklar yönteminin doğal bir sonucu olarak dikdörtgen şeklindeki model ağı ile akiferin sınırları arasındaki bölgeyi tanımlar ve hesaplarda hiçbir şekilde dikkate alınmazlar.

Sabit seviye hidrolik yük olarak modellenen Akgöl, Paradeniz ve Akdeniz ise, akifer sistemindeki aktif bölgenin su seviyelerine bağlı olarak akiferden beslenen veya akiferi besleyen bir alan olarak tanımlanmıştır. Beslenme havzası sınırları dışındaki hücreler aktif olmayan hücreler olarak isimlendirilmekte ve yeraltı suyu akım denklemine katılmamaktadır. SEAWAT dolayısıyla MODFLOW akım modelinde 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 seviye hücreler negatif bir değer, akışın olmadığı pasif hücreler ise sıfır (0) değeri ile tanımlanmaktadır. Model alanı güneyinde yer alan Akgöl ve Paradeniz Gölleri ve Akdeniz'in başlangıç seviye değeri modellemenin temel alındığı 2008 yılı için sırasıyla 0.6 m, 0.497 m ve 0 m olarak alınmıştır (DSİ, 2008).

Çalışma alanı 36. UTM bölgesine karşılık gelen 314000E, 4214000N (30.52.48,00E/38.03.16.73N) ve 361000E, 4264000N (31.24.20,42E/38.30.48,74N) koordinatları arasında kalan x yönünde 18 km, y yönünde 20.1 km olmak üzere 155.34 km^2 alanı kapsamaktadır. Modelin güney batı köşesi orijin olarak alınarak km

x=y=0 noktası yerine x=578500E ve y=4010000N UTM başlangıç koordinatları kabul edilerek, tüm veriler UTM koordinatları kullanılarak girilmiştir.

Göksu Deltası akiferini sonlu farklar yöntemi ile modelleyebilmek için, model alanı 500x500 m boyutunda hücrelere bölünüp, 42 satır ve 38 kolon ve 20 tabakadan oluşan 31920 hücreye sahip dikdörtgen boyutlu model ağı oluşturulmuştur (Şekil 5.9). Bu hücrelerin 12611 adedi akifer sınırlarının içinde kalan aktif hücrelerden geriye kalan 19309 hücre ise akifer sınırları dışında kalan pasif hücrelerden oluşmaktadır. Pasif hücreler sonlu farklar yönteminin doğal bir sonucu olarak dikdörtgen şeklindeki model ağı ile akiferin sınırları arasındaki bölgeyi tanımlarlar ve hesaplarda hiçbir şekilde dikkate alınmazlar (Şekil 5.9).

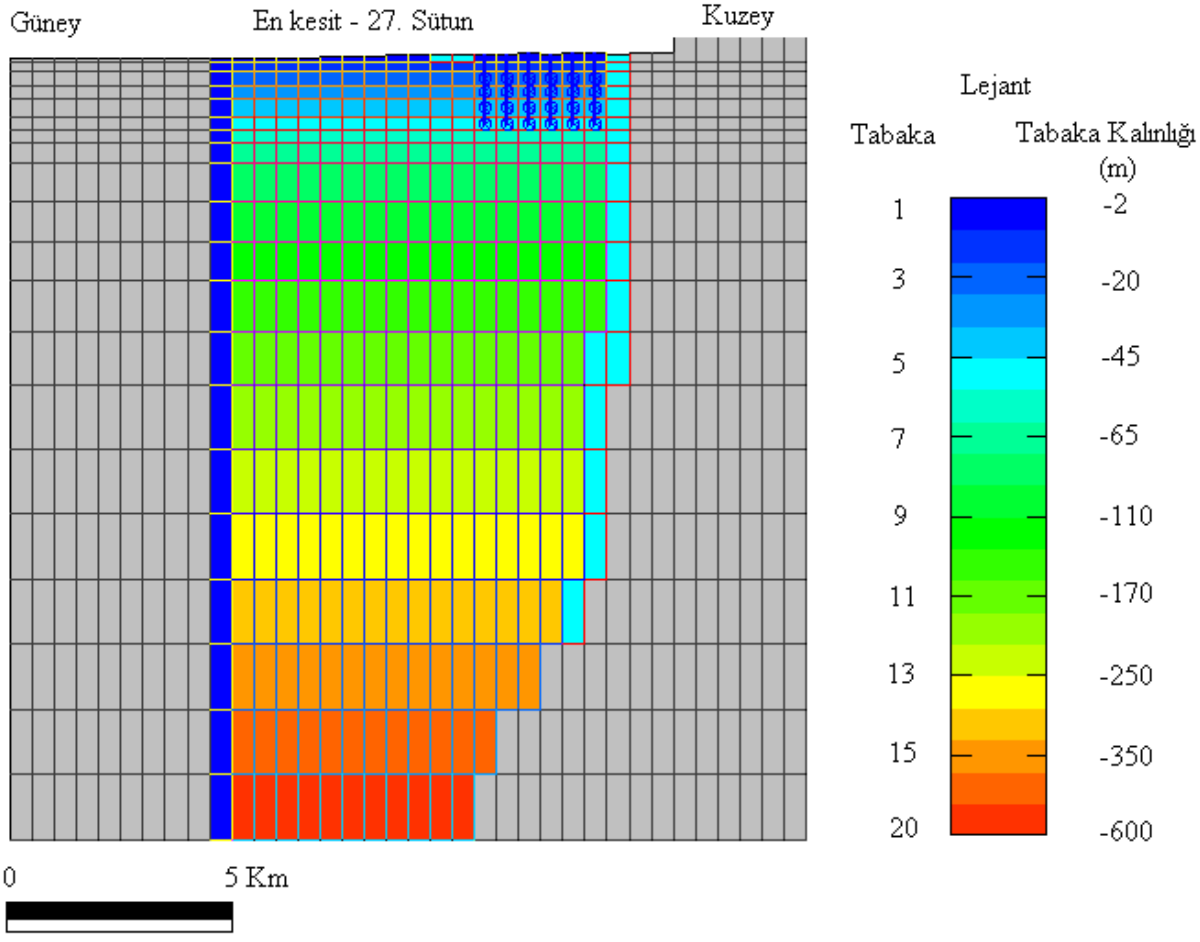


Şekil 5.9. Göksu Deltası Akiferinin Sonlu Farklar Model Ağı

Modelin sınır şartları şöyle tespit edilmiştir; 1383 hücre sabit hidrolik yük (Constant Head, CH) sınır şartına sahiptir, bunların 1309 tanesi deniz kenarına denk gelmekte ve bunların sabit hidrolik yükü deniz seviyesi olan sıfır metredir. Geriye kalan 52 ve 22 hücre ise sırasıyla Akgöl ve Paradeniz göllerini temsil etmekte olup

sabit hidrolik yük olarak 2008 su yılındaki ortalama su seviyesi alınmıştır. Model alanının geriye kalan sınır bölgeleri, akiferin üzerindeki ÖÇK sınırları dikkate alınarak pasif bölgeler yani hesaplama esnasında akışın olmadığı varsayılarak modellenmiştir (Şekil 5.9).

Akış olmayan bölgenin sınırında bulunan hücrelerde modelde genel hidrolik yük (General Head Boundary, GHB) sınır şartları kullanılmış ve gözlem kuyularından ölçülen su yüklerine göre kalibre edilmiştir. Çünkü akış olmayan sınır şartı, modelin sınır bölgelerine yakın kısımlarında ölçülen hidrolik yük değerlerini tam olarak yansıtamamıştır.



Şekil 5.10. Akiferin Kuzey–Güney Doğrultusundaki Kalınlık Değişimi

Akifer yirmi tabakalı olarak modellenmiştir. Tabaka kalınlıkları değişken olup her hücre için kalınlık değerleri farklı olarak girilmiştir. Akifer kalınlıklarının modeldeki Kuzey–Güney yönündeki dağılımı Şekil 5.10'da görülmektedir.

5.5.2. Akiferin Hidrojeolojik Parametreleri

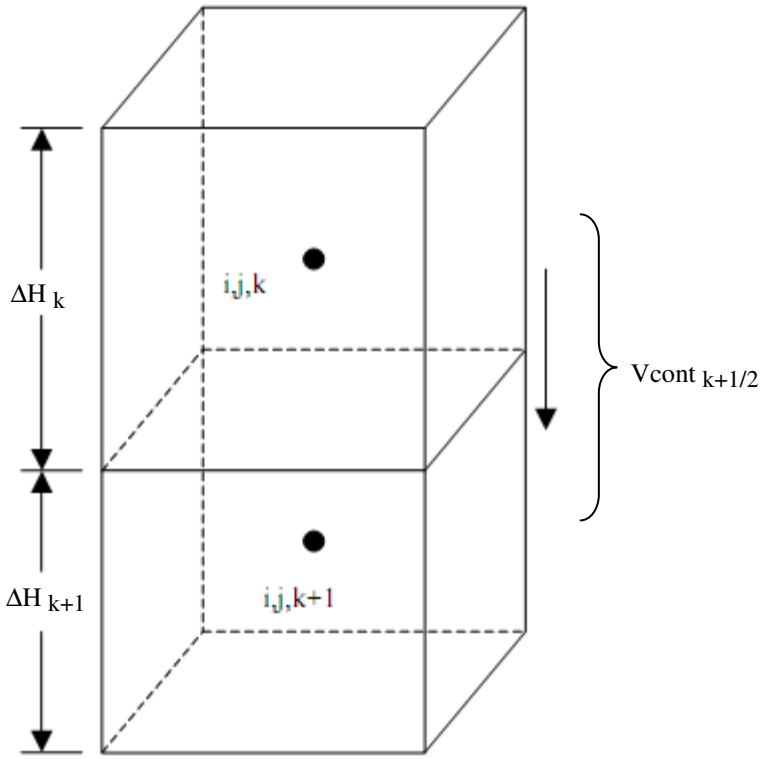
SEAWAT'ın bileşenlerinden olan MODFLOW'da yeraltı suyu akım denklemi yalnız doygun ortam için geçerlidir ve doymamış ortam model tarafından pasif hücreler ile temsil edilir. Serbest akifer koşullarında başlangıç hidrolik seviyesi olarak sıfır değeri verilmiştir. Kararlı akımda başlangıç hidrolik seviyeleri sadece iterasyon sayısının çokluğu veya azlığını etkilemektedir. SEAWAT programı zamana bağlı çalıştığı için programın çıkış hidrolik yük değerleri bir sonraki modelin çalıştırılması esnasından başlangıç hidrolik yük değeri olarak verilmiştir. Aynı sistem hücrelerin toplam çözünmüş madde (TDS) değerleri için de uygulanmıştır. Modelin kararlı hale ulaşıp ulaşmadığı konsantrasyon değerindeki değişime bağlı belirlenmiştir. Konsantrasyondaki ve hidrolik yüklerde değişim sıfır olana kadar model çalıştırılmıştır. Modellemede kullanılan 20 tabakaya ait yatay ve düşey hidrolik iletkenlik değerleri belirlenirken önemli güçlükler ile karşılaşılmıştır.

Hidrojeoloji bölümünde sondaj kuyularına ait pompaj verileri değerlendirilerek akiferlerin hidrojeolojik parametreleri belirlenmiştir. Fakat bu sondajların modellemede kullanılan 20 tabakadan sadece ilk 20–30 metrelik bölüme ait olduğundan ve yeterli sayıda olmadığından dolayı elde edilen parametrelerin modeldeki tabakaları temsil etmesinin mümkün olmadığı görülmüştür. Bundan dolayı pompaj deney sonuçlarına göre bulunan parametreler ve literatür bilgileri (Gordu, 2000; Gordu ve ark, 2001; Motz ve ark, 2001; Yurtal ve ark, 2004) ile karşılaştırılarak her bir tabaka için başlangıçta kullanılacak temsili yatay ve düşey hidrolik iletkenlik değerleri belirlenmiştir.

Yeraltı suyu akım modellemesi birden fazla tabakayı içerdiği için, MODFLOW iki tabaka arasındaki düşey sızma (VCONT) olarak bilinen değerine ihtiyaç duymaktadır. Bu değer düşey hidrolik iletkenlik değerleri girilerek iki tabaka

arasındaki sızma şeklinde oluşan düşey akım MODFLOW tarafından hesaplanmaktadır.

Düşey sızma miktarı hücre hücre veya bölgesel hesaplanarak modele girilebildiği gibi Denklem 5.1 kullanılarak model tarafından da hesaplanabilir (Şekil 5.11). Modelde de düşey hidrolik iletkenlik değerleri kullanılarak düşey sızma katsayısı program tarafından hesaplanarak kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Düşey Sızma Katsayısının Hesaplamasında Kullanılan Grid Şekli

$$\mathrm{Vcont}_{k+1/2} = \frac{1}{\dfrac{\Delta H_k / 2}{(Kz)_{i,j,k}} + \dfrac{\Delta H_{k+1} / 2}{(Kz)_{i,j,k+1}}} \qquad (5.1)$$

Burada, Vcont, iki tabaka arasındaki sızma miktarını, ΔH_k ve ΔH_{k+1} sırasıyla üstteki (k) ve alttaki (k+1) tabakaların kalınlıklarını, $(Kz)_{i,j,k}$ ve $(Kz)_{i,j,k+1}$ ise sırasıyla üstteki ve alttaki tabakaların hidrolik iletkenliğini temsil etmektedir (Langevin ve ark, 2003).

5.5.3. Akiferin Hidrolik Parametreleri

Yeraltı suyu beslenmesi, deltanın üst kısımlarındaki iri taneli sedimentlerin olduğu yerlerde esas olarak yağıştan ve nehir sularının infiltrasyonundan meydana gelmektedir. Bunun yanında, deltayı çevreleyen dağların kar ve yağmur suları tarafından beslenen, alüvyon tabakanın hemen bitişiğinde başlayıp altına doğru uzanan karstik kireç taşı formasyonu da Göksu Deltasındaki alüvyon akiferlerin beslenmesine katkıda bulunmaktadır. Beslenme kıyı boyunca akifer sınırlarından içeri giren tuzlusu miktarını da kapsamaktadır. Akifer sisteminden boşalım ise; düşük kotlarda gerçekleşen yeraltı suyundan Göksu Nehrine ve göllere doğru su çıkışı, sulama ve içme suyu temini için pompalama ile alınan suyu ve ayrıca kıyı boyunca denize doğru oluşan deşarjı kapsamaktadır.

Özgül kapasite test sonuçları, Gordu (2000) tarafından elde edilmiştir. Göksu Deltası içerisindeki 12 kuyu için derlenmiştir. Hidrolik iletkenlik değerleri, raporlardaki özgül kapasite test sonuçlarından tahmin edilmiştir. Bu değerler Theis (1935) denklemi kullanılarak hesaplanmış ve hesaplamalar sırasında özgül kapasite, pompalama zamanı, kuyu çapı ve kuyu filtre uzunluğu gibi mevcut bilgiler kullanılmış ve depolama katsayısı de 1.0×10^{-4} olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan yatay hidrolik iletkenlikler 4 ile 500 m/gün arasında iken, düşey doğrultuda ise 0.05 ile 27 m/gün arası bulunmuştur. Bu sonuçlar dikkate alındığında akiferin anizotrop bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Göksu deltasında yapılan çalışmalar akiferin değişik derinliklerde birçok ince killi tabakalar içerdiğini göstermiştir. Akifer homojen olmadığından dolayı delta farklı tabakalara bölünmüş ve farklı hidrolik iletkenlik değerli tanımlanarak kalibrasyonu yapılmıştır.

Bear (1979)'a göre dispersivite genellikle tüm ortamı tanımlayan tek bir özelliktir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki dispersivite sabit bir değer değildir ve sistemin hareket mesafesine ve ölçeğine bağlı olarak değişmektedir (Bear ve ark, 1999). Narayan ve ark (2007) yaptıkları çalışmada dispersiviteyi ölçmeden pratik olarak grid büyüklüğüne bağlı tahmin etmişlerdir. Enine dispersivite, boyuna dispersiviteye göre arazi ölçümlerinden daha zor tespit edilebilmektedir. Voss (1984) iki boyutlu taşınım modellerinde enine dispersivitenin tahmini için boyuna dispersivite değerinin 1/1000 ile 1/3'ü arasında bir değer alınabileceğini önermiştir. Ranganathan ve Hanor (1988), izotropik geçirgenliğe sahip iki boyutlu madde taşınım sistemlerinde boyuna dispersivitenin 1/5'inin enine dispersivite olarak kullanılmasının uygun olabileceğini söylemiştir. Kopsiaftis ve ark (2009), yaptıkları üç boyutlu modellerinde enine dispersivite olarak boyuna dispersivitenin 1/10'unu kullanmışlardır.

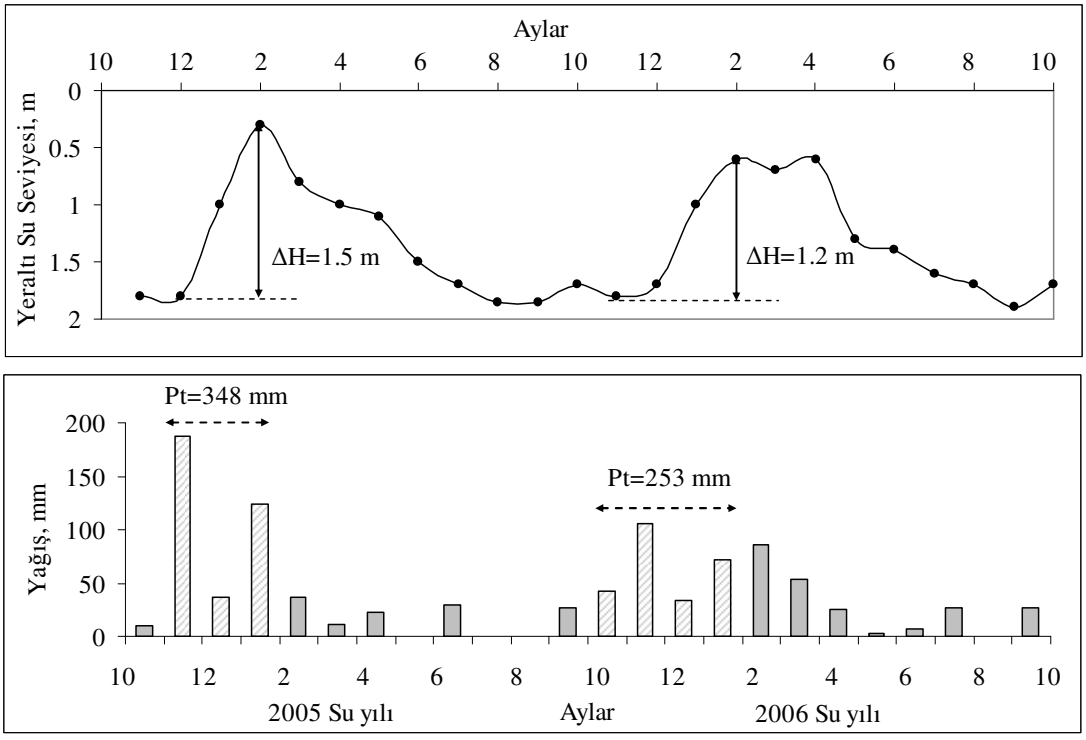
Göksu deltasına ait dispersivite değeri ölçülmemiştir. Bu çalışmada, boyuna dispersivite değeri olarak akıma paralel olan akifer elemanının maksimum uzunluğunun dörtte birine eşit veya küçük bir değer seçilmiştir (Narayan ve ark, 2007). Enine dispersivitenin yatay ve düşey bileşenleri değişik oranlarda denenerek belirlenmiştir. Deniz suyu girişiminin enine düşey dispersiviteye karşı çok hassas olduğu görülmüştür. Boyuna dispersivite değeri kalibrasyonu sonucu 100 m seçilmiş ve buna bağlı olarak enine yatay dispersivite değeri 10 m alınmıştır. Enine düşey dispersivite değeri ise ilk iki tabaka için 1 m diğer tabakalar içinse 0.1 m olarak belirlenmiştir.

5.5.4. Yeraltı Suyu Beslenmesinin (Recharge) Tahmini

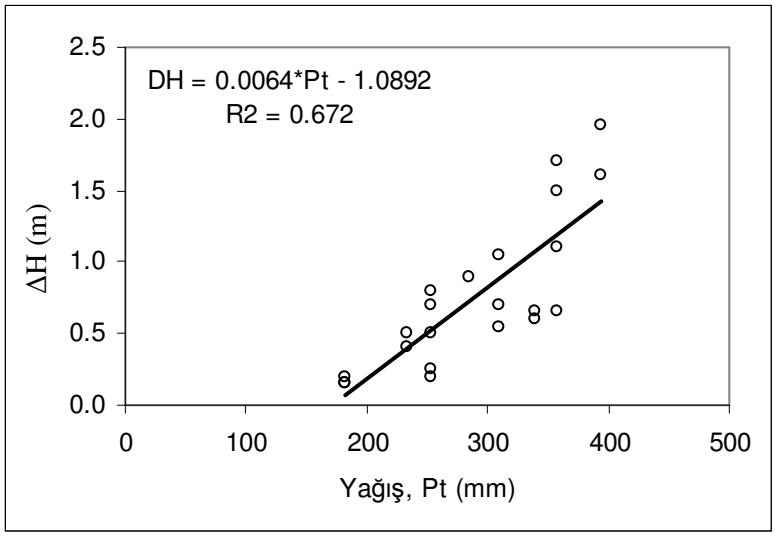
Yeryüzüne yağan yağmurun zemine sızması sonucu yağmur beslenmesi oluşur. Yağıştan kaynaklana beslenme çok küçük olsa bile yağış çok geniş alanları etkilediği için toplam hacmi büyük olur. Örneğin Amerika Birleşik Devletler'indeki New Mexico eyaletinde 2 mm olan yıllık ortalama beslenme miktarı eyaletteki evsel ve endüstriyel su ihtiyacına eşittir. Bu örnek bize yağıştan kaynaklanan beslenme

miktarının sadece gelecekteki su ihtiyacını karşılama problemi açısından değil aynı zamanda bu değerin milimetre cinsinden tahminin önemini göstermektedir (Simmers, 1997).

Bilindiği üzere yağmurlar yeraltı suyu için önemli bir kaynaktır. Herhangi bir mevsimdeki yeraltı su seviyesindeki değişim akifer giren (beslenme) ve çıkan su arasındaki farktan etkilenmektedir. Yağmurlu sezondaki yağışlardan dolayı yeraltı su seviyesi artmaktadır. Kurak mevsimde ise beslenme olmadığı için yeraltı su seviyesi düşmektedir. Bu sonuçla, akifer özelliklerini temsil eden kuyulardaki yeraltı su seviyelerinin değişiminden yararlanılarak yağmurlardan, nehirlerden veya diğer sebeplerden oluşmuş beslenme miktarı hesaplanabilir. Yağış ve yeraltı su seviyesi arasındaki ilişkiye dayanan beslenme miktarının tahmin yöntemi Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından geliştirilmiştir (Kaya, 1994).



Şekil 5.12. Yağış ile Yeraltı Su Seviyesinde Yükselme Arasındaki İlişki



Şekil 5.13. Yağış ile Yeraltı Su Seviyesinde Yükselme Arasındaki İlişki

Beslenme miktarını DSİ metoduyla hesaplayabilmek için, yeraltı su seviyesi ve yağış verilerine ihtiyaç vardır. Bu analiz pompaj tarafından etkilenmemiş doğal durum için geçerlidir. Aynı periyottaki yağış ve yeraltı su seviyeleri incelenerek yeraltı su seviyesinde artışa sebep olan yağış miktarını belirlenir. Bu yağış miktarına "Yeraltı su seviyesinin artışına sebep olan toplam yağış miktarı" (Pt) denir. Toplam yağışın meydana getirdiği yeraltı su seviyesindeki artış "Beslenmeden kaynaklanan yeraltı su seyisindeki artış"(ΔH) şeklinde adlandırılır ve yeraltı su seviye hidrografından direk okunur. Bu işlem yıllar boyunca ölçülmüş veriler için tekrarlanır ve Pt ve ΔH değişkenleri arasındaki ilişki basit istatistiksel metotlarla araştırılır (Şekil 5.12 ve 5.13).

Δh, yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olmayan (P_e) eşik değerinin üzerinde kalan yağışın fonksiyonudur. Yağışın yüzey akışına, terleme–buharlaşmaya (evapotraspirasyon) ve yüzey altı akışına neden olan kısmına yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olmayan (P_e) eşik değeri denilmektedir (Kaya, 1994). Göksu deltası için yağış ve yeraltı su seviyesi değişimi arasındaki ilişkiyi veren denklem aşağıda görülmektedir.

$$\Delta H = 0.0064*Pt - 1.0892 \qquad (5.2)$$

P_e değeri Denklem 5.2'deki Δh değeri sıfıra eşitlendiğinde elde edilen yağış miktarına eşittir. Göksu deltası için yerlatı su seviyesinde yükselmeye sebep olmayan yıllık ortalama yağış miktarı (P_e) 170.18 mm'ye eşittir.

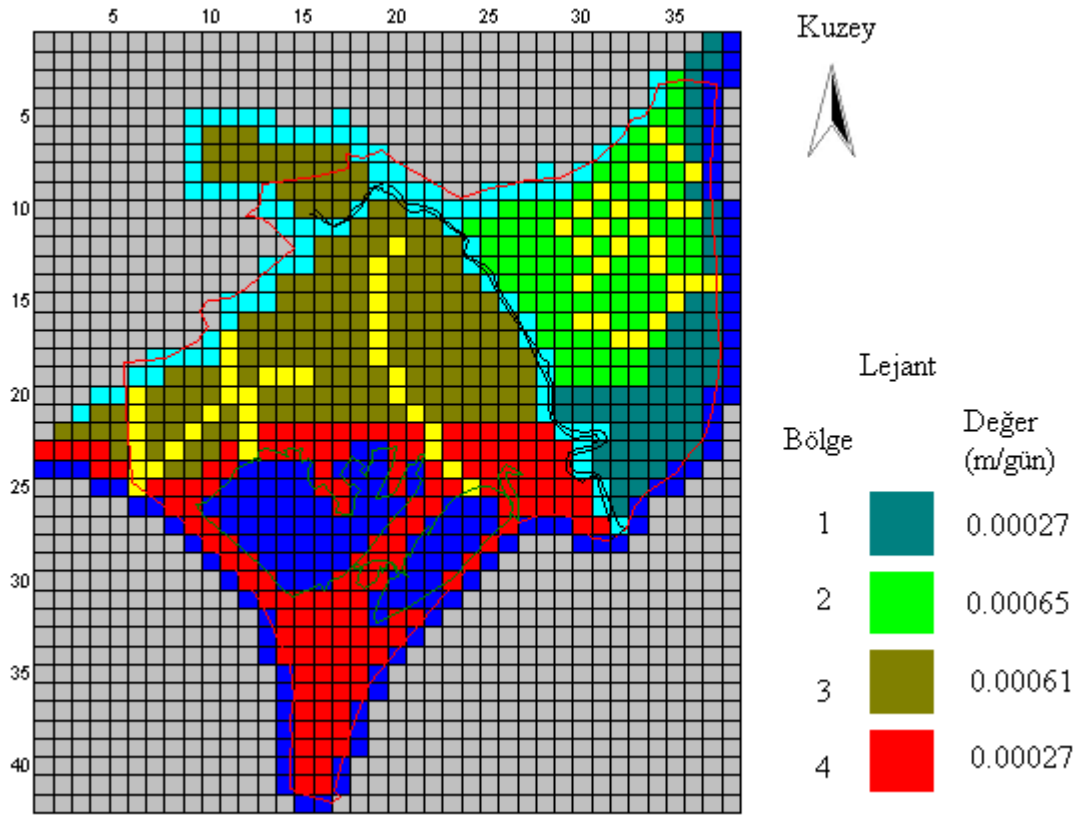
Daha sonra yıllık beslenme miktarı aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$P_s = P_t - P_e \tag{5.3}$$

Burada, P_s, perkülasyon (sızma) miktarını, P_t, yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olan yağış miktarını, P_e, ise yeraltı su seviyesinin yükselmesinde etkili olmayan yağış miktarını temsil etmektedir.

Göksu deltası için kurulan modelde, 2008 su yılı verileri düzenli akım kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Yağış ve yeraltı su seviyesi değişimlerine bakıldığında, 2008 su yılı için P_t değerinin 269.7 mm olduğu görülmektedir. Denklem 5.3.'de yerine konulduğunda yıllık ortalama beslenme miktarı 99.52 mm (0.00027 m/gün) bulunmuştur.

Yağıştan kaynaklanan beslenmenin yanı sıra sulama dönemlerinde sulama sularından kaynaklanan beslenme miktarı da önemlidir. DSİ ve Sulama Birlikleri tarafından Genel Sulama Planlaması raporlarındaki gerçekleşen bitki desenine göre sulama suyu ihtiyacı ve uygulamada sulamaya bırakılan su arasındaki farkın %10'unun yeraltı suyunu beslediği kabulü yapılmıştır. Buna göre Göksu deltası sulamasından kaynaklanan beslenme miktarı sağ sahildeki sulanan bölge için 0.00033 m/gün, sol sahildeki sulanan bölge için 0.00037 m/gün olarak bulunmuştur. Beslenme miktarlarının deltadaki dağılımı aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 5.14. Bölgelere göre yeraltı suyu beslenme dağılımı

5.5.5. Yeraltı Suyu Pompaj Miktarının Tahmini

Göksu Deltası'nda 1972 yılında DSİ tarafından tamamlanan I. Merhale projesi ile 5860 ha alanda sulama ve drenaj sistemlerinin devreye girmesi, deltada ürün deseninin ve üretim şeklinin değişmesine neden olmuştur. I. Merhale projesinden önce bölgede yoğun olarak buğday, arpa, çeltik, susam, yerfıstığı gibi ürünlerin tarımı yapılırken proje sonrası narenciye, çilek, turfanda sebze bakla, mısır, bostan gibi ürünlerin tarımı yapılmaya başlanmıştır.

Göksu Deltası su kaynakları açısından zengin olup yaklaşık 9500 hektarı sulanmaktadır. 1972 yılında DSİ I. Merhale Sulama Projesi ile 53.225 da alanın sulamaya açılmıştır. Deltada sulanan alanların geriye kalan kısmı ise çiftçilerin I. Merhale Projesinin uç noktaları, yeraltı suyu ve yer yer drenaj kanallarından temin edilen su ile sulanmaktadır. Göksu Deltası'nda sulanabilen arazi ve ürün deseni

aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 5.7). Göksu Deltası'nda yaklaşık 40.000 dekar tarım arazisi yeraltı suyu ile sulanmaktadır (ÖÇK, 2009).

Çizelge 5.7. Göksu Deltası'nda DSİ 62. Şube Müdürlüğünün Şebekesi ile Sulanabilen Ürünler ve Yetiştirilme Alanları.

Ürün Adı	Sağ Sahil (da)	Sol Sahil (da)	Toplam (da)
Narenciye	7.305	3.220	10.525
Çeltik	9.613	550	10.163
Mısır	3.840	1.230	5.070
Çeşitli Fidan	3.680	2.568	6.248
Çilek	2.695	2.838	5.533
Yer Fıstığı	2.687	1.472	4.159
Bakliyat	2.348	2.560	4.908
Susam	1.360	1.350	2.710
Domates	197	1.600	1.797
Diğer	4.144	391	4.535
TOPLAM	**37.869**	**17.779**	**55.648**

Yüzeysel sularla sulanan alanların bitki deseni Göksu nehrinin sol ve sağ sahilinde benzer özellik gösterdiği kabulü ile yeraltı sularından sulanan ürünlerin su ihtiyaçları aşağıdaki çizelgelerde belirlenmiştir (Çizelge 5.8-10).

Çizelge 5.8. Sulama Birlikleri ve Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı

	Sulama Birlikleri		Yeraltı Suyu	
	Sol Sahil	Sağ Sahil	Sol Sahil	Sağ Sahil
AYLAR	(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)	(hm^3)
OCAK	0.05	0.00	0.04	0.00
SUBAT	0.04	0.00	0.03	0.00
MART	0.06	0.00	0.04	0.00
NİSAN	0.43	0.19	0.31	0.14
MAYIS	1.96	3.19	1.41	2.29
HAZİRAN	2.14	5.23	1.54	3.76
TEMMUZ	2.79	4.67	2.01	3.36
AĞUSTOS	2.68	4.74	1.93	3.41
EYLÜL	1.46	3.38	1.05	2.43
EKİM	0.70	1.99	0.50	1.43
KASIM	0.00	0.02	0.00	0.01
ARALIK	0.00	0.00	0.00	0.00
Toplam	**12.31**	**23.41**	**8.85**	**16.83**
Sulanan Alan, dekar	17779	37869	12779.6	27220.4
Toplam, dekar	55648		40000	

Çizelge 5.9. Sol Sahildeki Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı

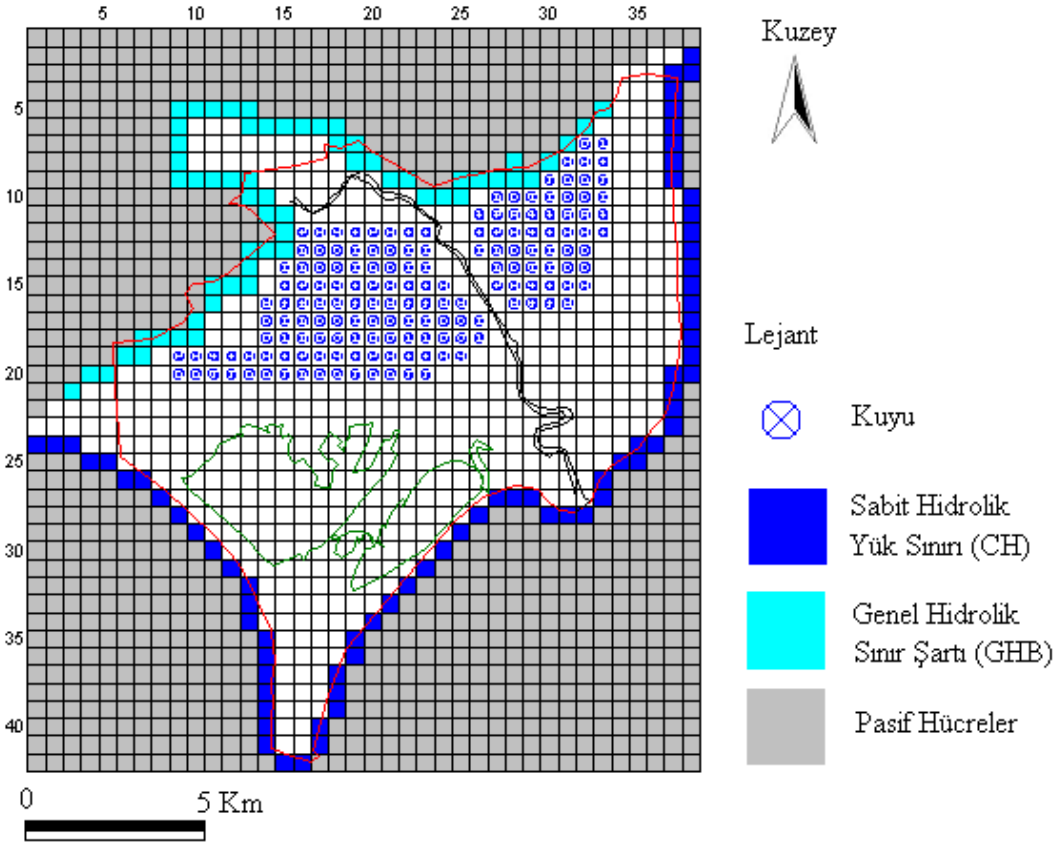
Aylar	Sol Sahil Sulama İhtiyacı (hm^3)	Net yağış (m^3)	Sulama Suyu İhtiyacı (m^3)	İçme Suyu İhtiyacı (m^3)	Toplam Su İhtiyacı (m^3)	Her bir hücreden Çekilecek Günlük Su Miktarı, (m^3/gün)
Ocak	0.04	10680	25266	3773	29039	17.0
Şubat	0.03	14883	13875	3773	17648	11.5
Mart	0.04	328	42808	3773	46581	27.3
Nisan	0.31	4293	304846	3773	308619	187.0
Mayıs	1.41	215	1408883	3773	1412656	828.5
Haziran	1.54	0	1538505	7546	1546051	937.0
Temmuz	2.01	0	2005808	7546	2013354	1180.9
Ağustos	1.93	0	1926726	7546	1934272	1134.5
Eylül	1.05	14825	1034809	3773	1038582	629.4
Ekim	0.50	3758	499492	3773	503265	295.2
Kasım	0.00	24288	0	3773	3773	2.3
Aralık	0.00	32050	0	3773	3773	2.2
					Yıllık Ortalama	438

Çizelge 5.10. Sağ Sahildeki Yeraltı Suyundan Sulanan Bölgelerin Su İhtiyacı

Aylar	Sol Sahil Sulama İhtiyacı (hm^3)	Net yağış (m^3)	Sulama Suyu İhtiyacı (m^3)	İçme Suyu İhtiyacı (m^3)	Toplam Su İhtiyacı (m^3)	Her bir hücreden Çekilecek Günlük Su Miktarı, (m^3/gün)
Ocak	0.00	10680	0	831	831	0.3
Şubat	0.00	14883	0	831	831	0.3
Mart	0.00	328	0	831	831	0.3
Nisan	0.14	4293	132303	831	133134	42.3
Mayıs	2.29	215	2293151	831	2293982	704.8
Haziran	3.76	0	3759970	1662	3761632	1194.2
Temmuz	3.36	0	3357373	1662	3359035	1032.0
Ağustos	3.41	0	3407698	1662	3409360	1047.4
Eylül	2.43	14825	2415137	831	2415968	767.0
Ekim	1.43	3758	1426900	831	1427731	438.6
Kasım	0.01	24288	9909	831	10740	3.4
Aralık	0.00	32050	0	831	831	0.3
					Yıllık Ortalama	436

Göksu deltası yeraltı suyu akım ve taşınım modelinde tarımın yoğunlukla yapıldığı dolayısı ile yeraltı suyu pompajının yapıldığı bölgeler Şekil 5.15'de görülmektedir. Yapılan arazi çalışmalarında kıyıya yakın bölgelerde kuyuların

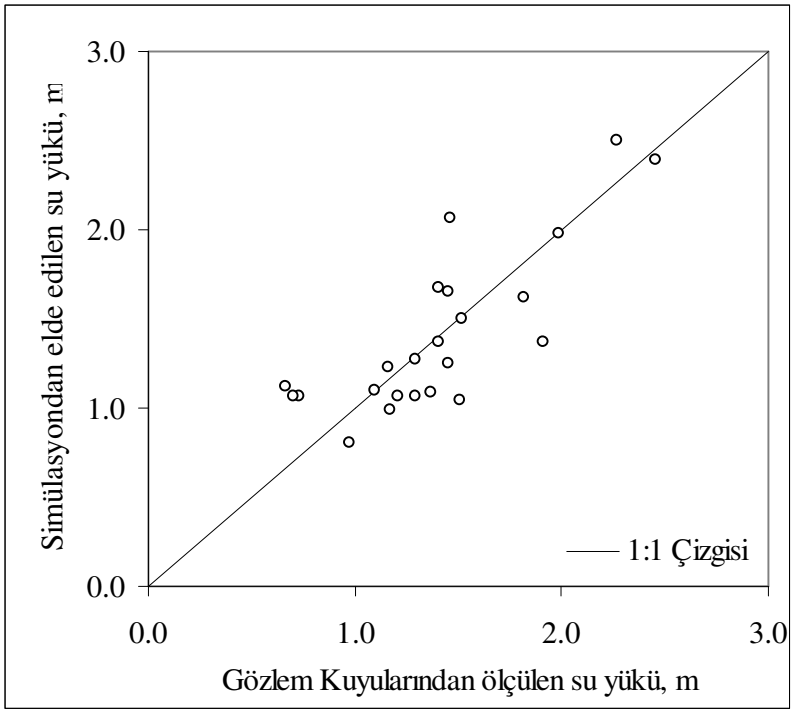
tuzluluklarının fazla olması nedeniyle terk edildiği görülmüştür. Bu nedenle modelde kuyu yerleri belirlenirken kıyıya yakın yerler seçilmemiştir.



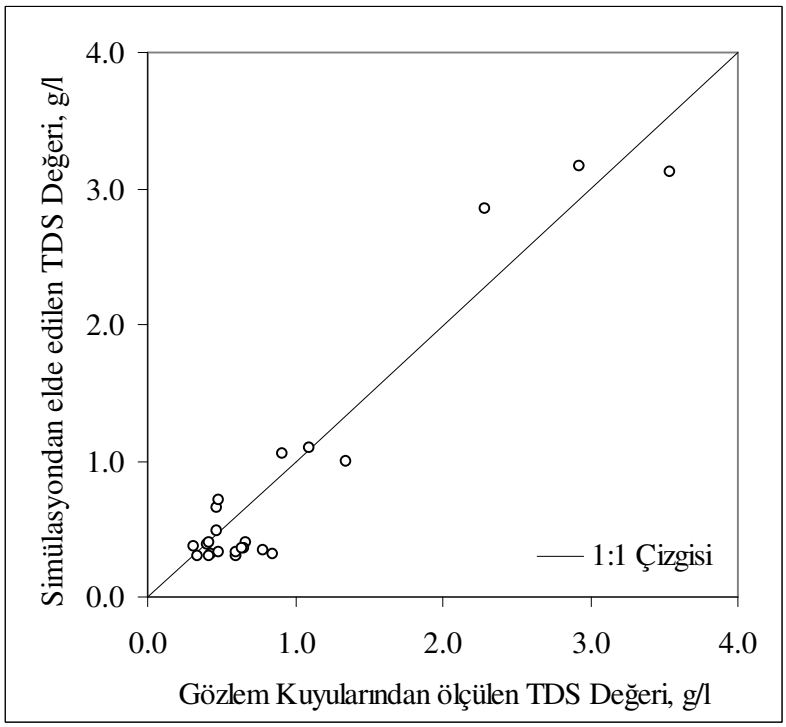
Şekil 5.15. Göksu Deltası Akiferindeki Kuyuların Model Alanındaki Dağılımı

5.5.6. Yeraltı Suyu Akım ve Taşınım Modelinin Kalibrasyonu

Kalibrasyon çalışmalarında kuyuların bulunduğu hücrelerde gözlenen yeraltı suyu seviye ve toplam çözünmüş madde (TDS) değerleri ile model tarafından hesaplanan değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Model kalibrasyonundaki asıl amaç ölçülen ya da gözlenen yeraltı suyu seviye ve TDS değerleri ile model kullanılarak hesaplananlar arasındaki farkı en aza indirgemektir. Gözlenen ve hesaplanan yeraltı suyu seviye ve TDS değerleri arasındaki yaklaşımı sağlayabilmek için kalibrasyon parametresi olarak yatay ve düşey hidrolik iletkenlik değerleri kullanılmıştır. Gözlem kuyularındaki su yükseklikleri ve TDS konsantrasyonlarının,



Şekil 5.16. Gözlenen ve Model ile Elde Edilen Yeraltı Su Seviyelerinin Saçılma Diyagramı

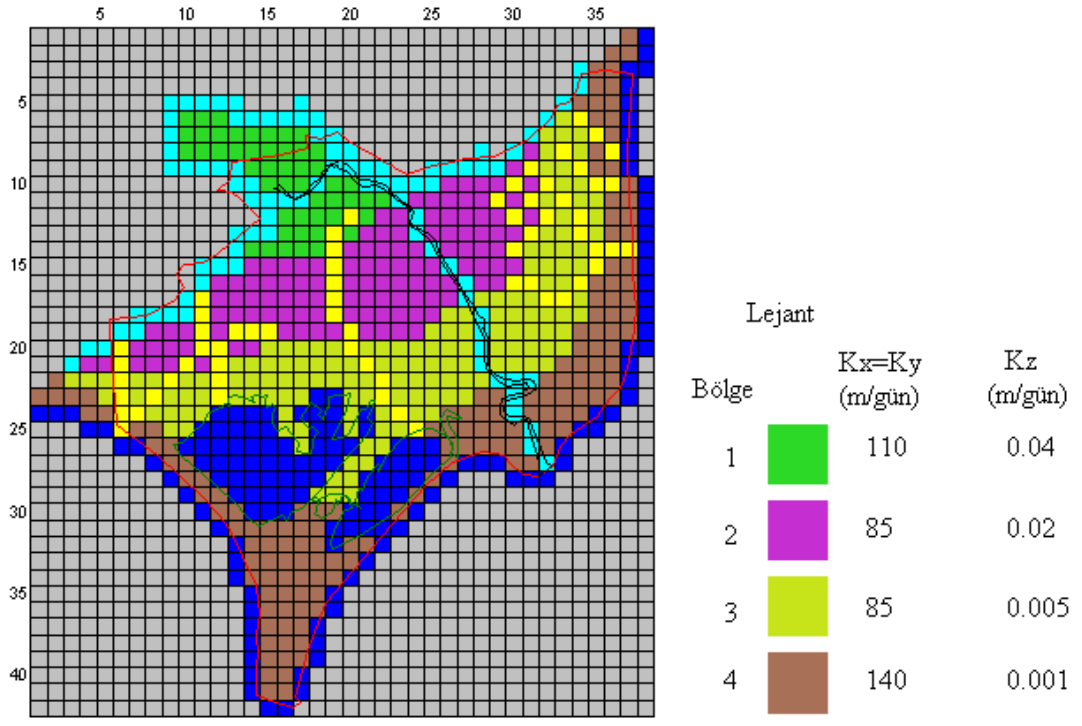


Şekil 5.17. Gözlenen ve Model ile Elde Edilen TDS Değerlerinin Saçılma Diyagramı

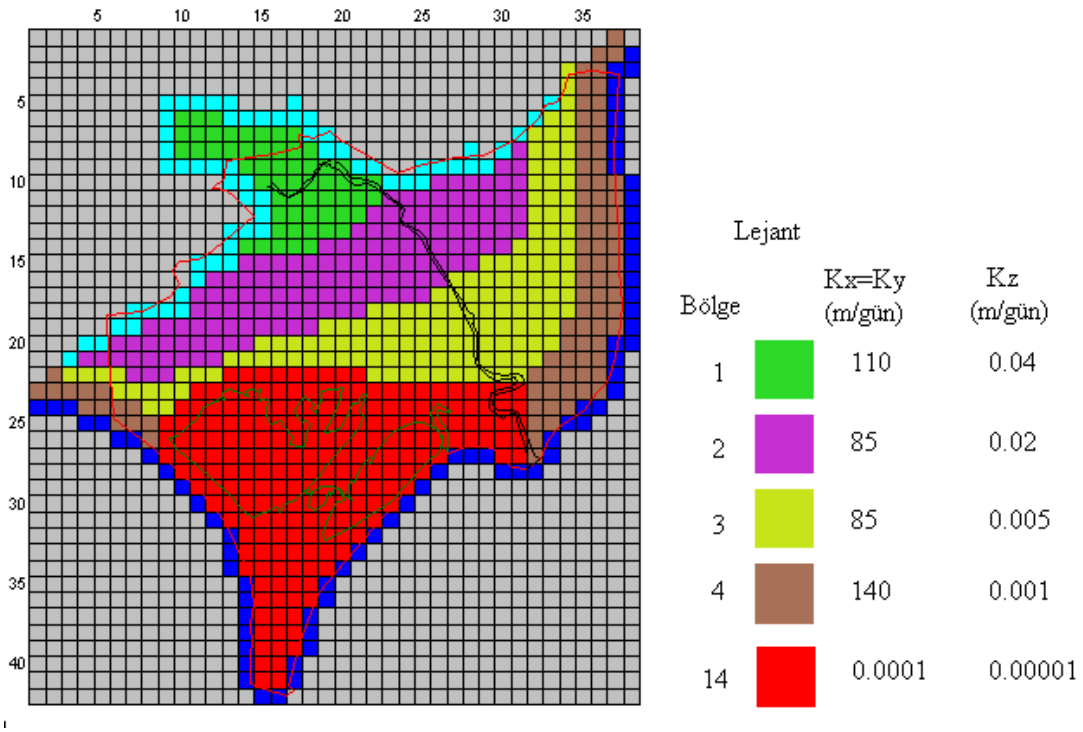
kuyuların son 1 metresine konulan delikli boruların bulunduğu derinlikteki düşey su yüksekliğini ve TDS konsantrasyonunu gösterdiği kabul edilmiştir.

Kalibrasyon sonucu elde edilen hesaplanan ve gözlenen değerler biri X- diğeri Y- ekseninde olacak şekilde karşılıklı olarak çizilerek saçılma diyagramı oluşturulmuştur. Bu grafikte gözlenen–hesaplanan değerleri belirten noktalar beklendiği şekilde 1–1 çizgisi (eşitlik çizgisi) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 5.16 ve 5.17).

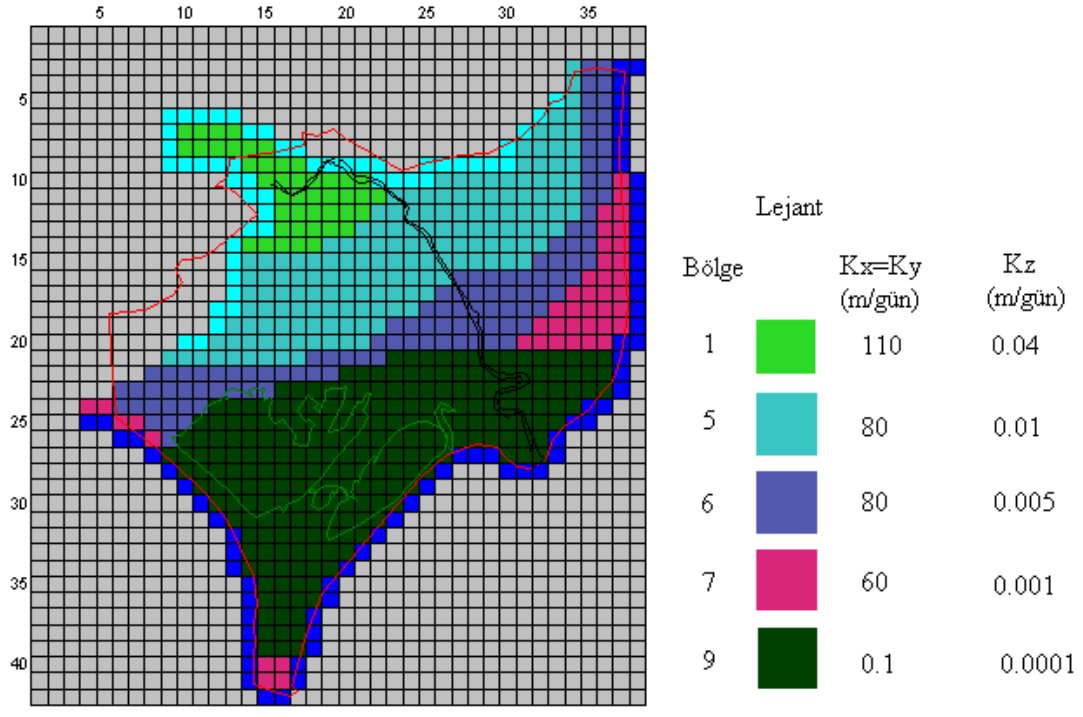
Model tarafından gözlenen ve hesaplanan yeraltı suyu seviye ve TDS değerleri arasındaki fark sırasıyla 0.54 m ile -0.60 m ve 0.54 g/l ile -0.56 g/l arasında değişmektedir. Gözlenen ve hesaplanan yeraltı suyu seviye ve TDS değerlerine ait standart sapma ve hata ortalaması değerleri sırası ile 0.29 m, 0.003 m ve 0.26 g/l ile 0.10 gl'dir.



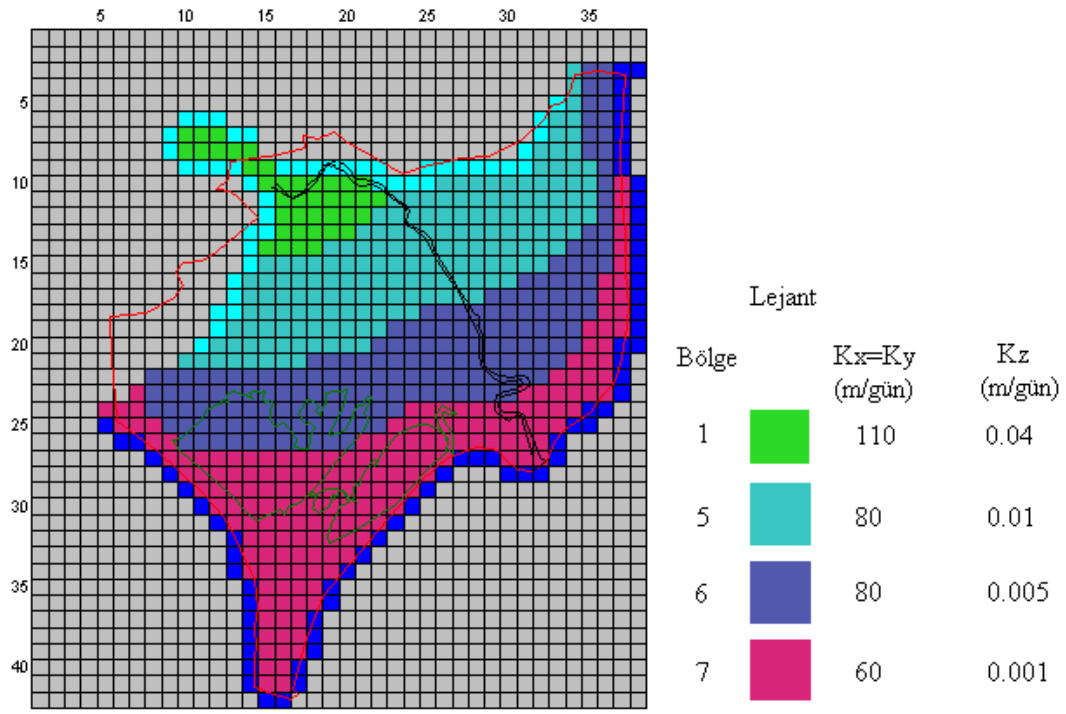
Şekil 5.18. Kalibrasyon Sonrası, 1,4,6 ve 7. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası.



Şekil 5.19. Kalibrasyon Sonrası, 2,3 ve 5. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası.

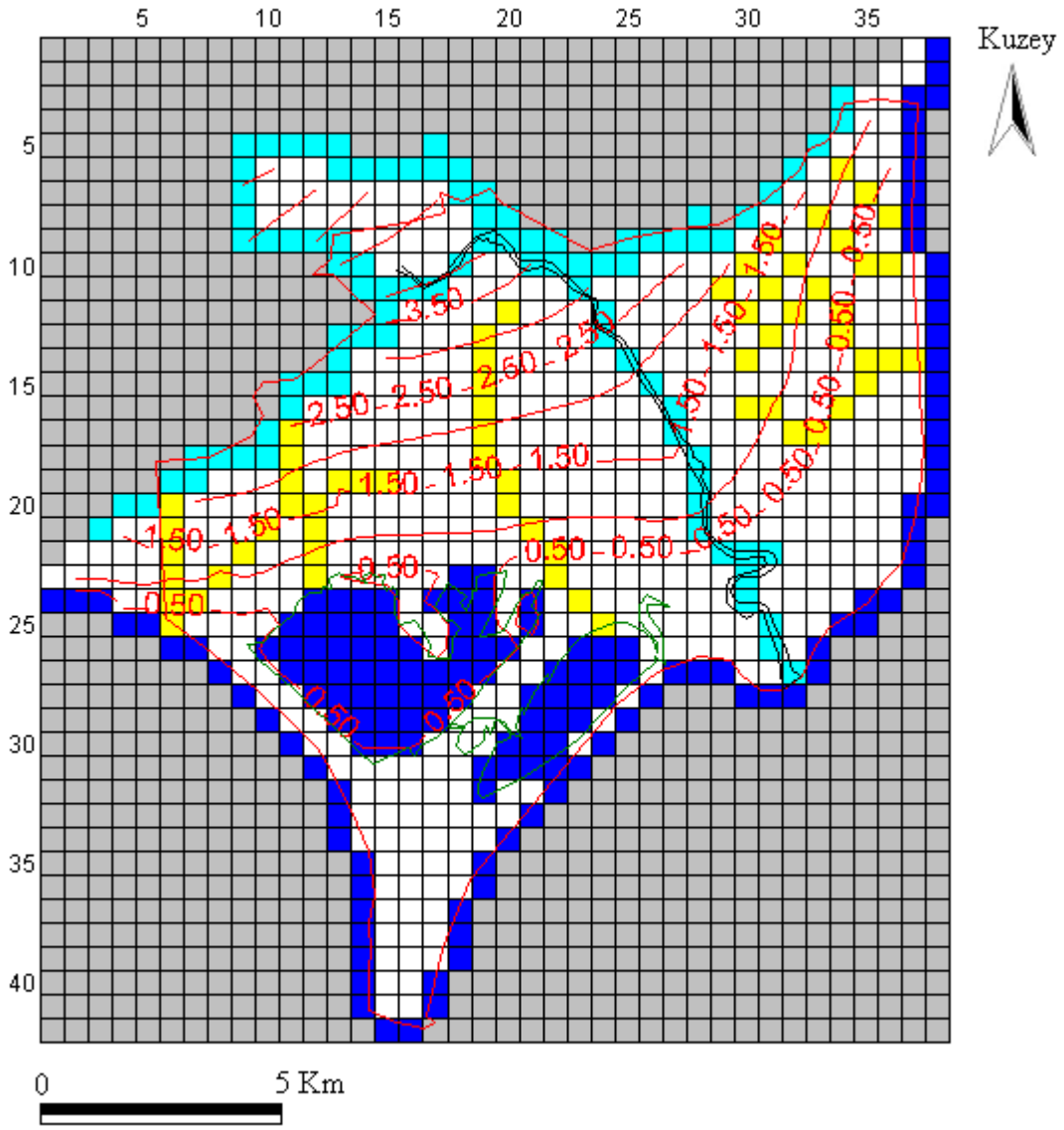


Şekil 5.20. Kalibrasyon Sonrası, 8. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası.



Şekil 5.21. Kalibrasyon Sonrası, 9–20. Tabakalara ait Hidrolik İletkenlik Haritası.

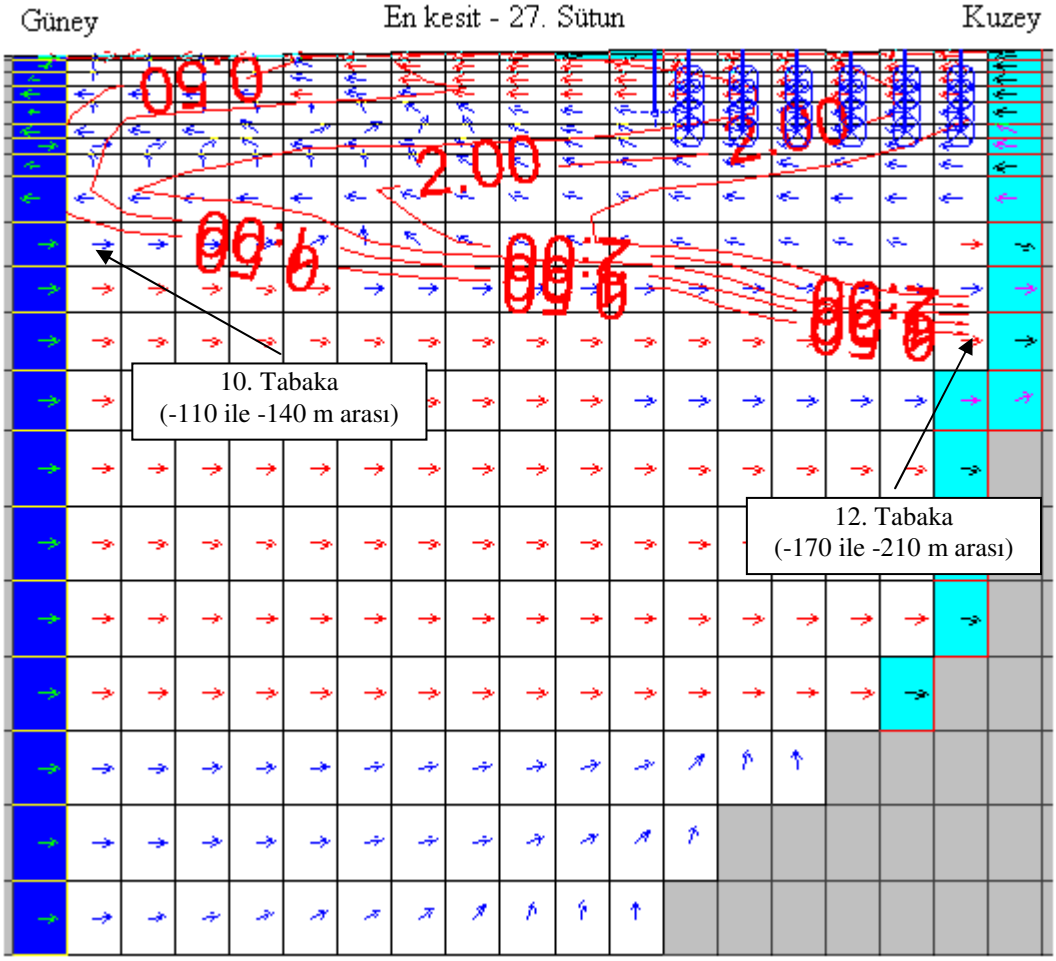
Kalibrasyon işlemlerine önceki çalışmalarda (Gordu, 2000; Yurtal ve ark, 2004) bulunan hidrolik iletkenlik katsayıları kullanılarak başlanmış ve daha sonra kalibre edilmiş hidrolik iletkenlik katsayıları bulunmuştur. Şekil 5.18–21'de, kalibrasyon sonrası değişik tabakalara ait hidrolik iletkenlik katsayıları görülmektedir. Kalibrasyon sırasında akifer farklı hidrolik iletkenlik bölgelerine (zone) ayrılarak, değerler bölgesel olarak kalibre edilmişlerdir. Hücresel olarak değiştirilmemiş ve aşırı kalibrasyon (over–fitting) durumuna düşülmemiştir.



Şekil 5.22. Göksu Deltası Serbest Akiferi için Kalibre Edilmiş Yeraltı Su Seviye haritası.

Çalışma alanındaki gözlem kuyularının 2008 su yılına ait seviyelerine göre Göksu deltası akiferi için kalibre edilmiş yeraltı su seviye ve TDS haritaları ve haritalara ait en kesitler hazırlanmıştır (Şekil 5.22–25). Yeraltı su seviye haritasında akım yönü Toroslardan deniz kıyısına doğru, TDS taşınımı ise tam ters istikamette oluşmaktadır. Göksu nehrinin sol sahilindeki yeraltı su seviye değerleri sağ sahile göre daha uzaktır. Bu da sol sahildeki deniz suyu girişimini artırmaktadır (Şekil 24). Şekil 25'den görüleceği üzere deniz suyu girişiminin ara yüzünün en uç noktası 12.

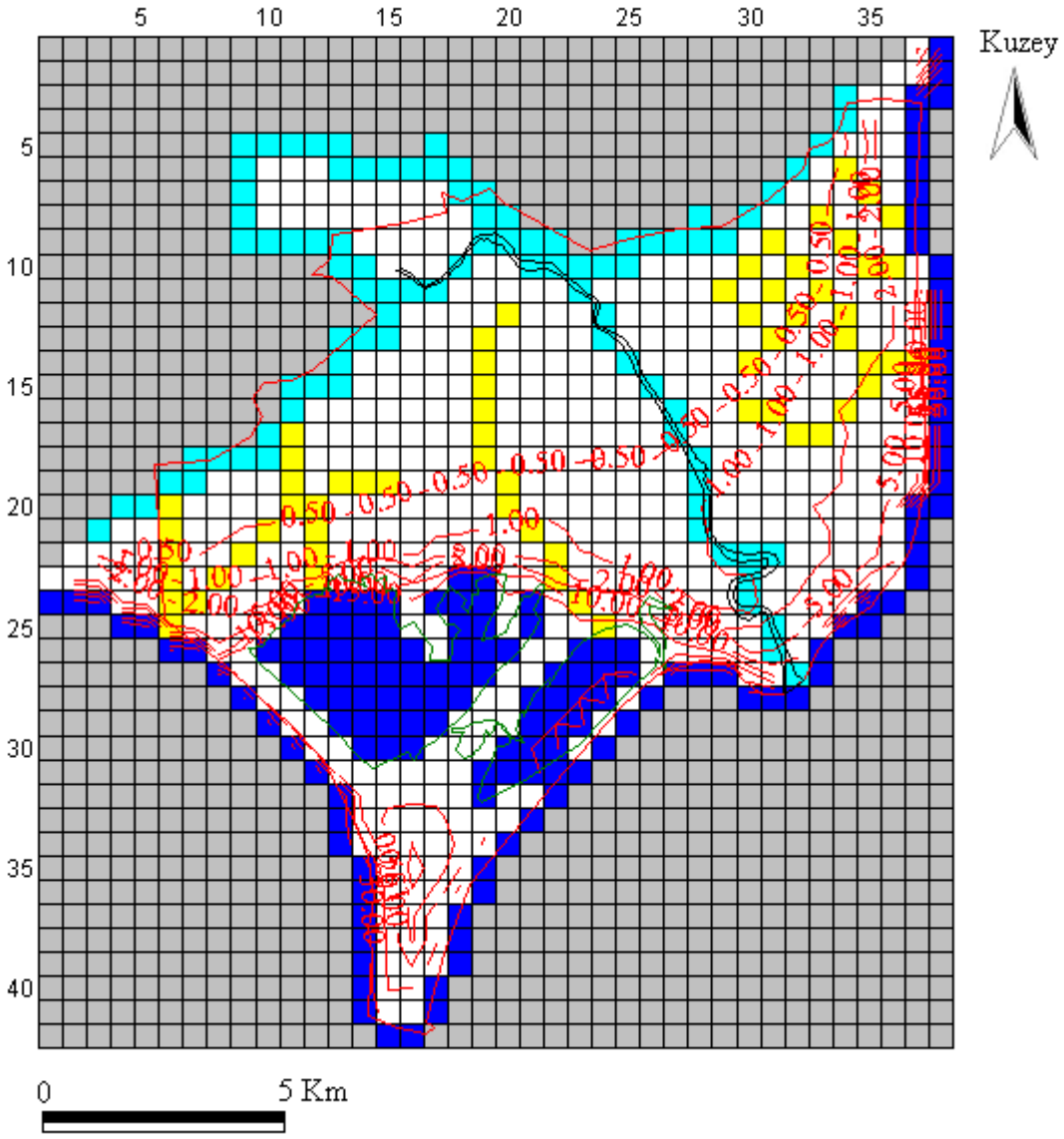
tabakada (-210 m kotu) bitmektedir. Bu tabakadan itibaren geçirimsiz kireç taşı tabakasına kadar yeraltı suyu tamamen tuzlanmış deniz suyuna benzer özellik göstermektedir.



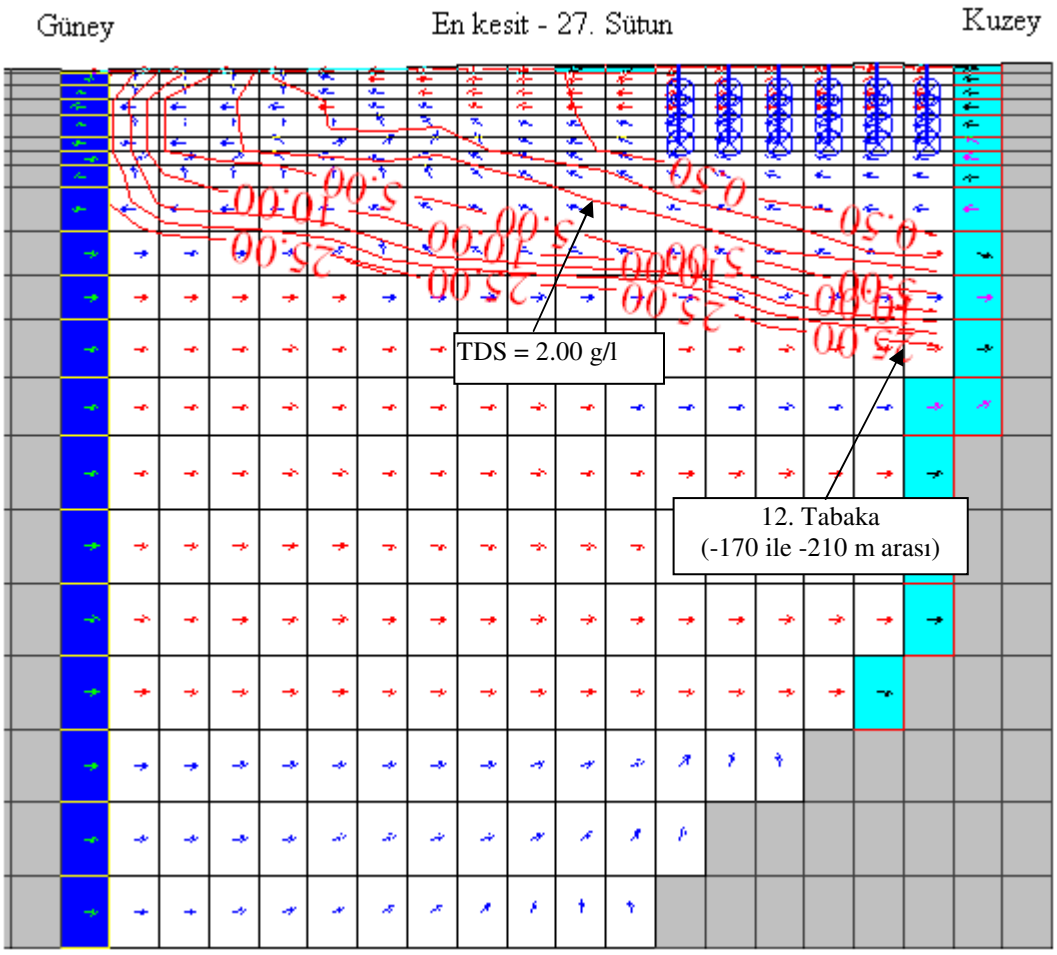
Şekil 5.23. Göksu Deltası Akiferi için Kalibre Edilmiş Yeraltı Su Seviyesinin En Kesit Boyunca Değişim Haritası.

Şekil 5.22'deki mavi oklar yukarıya doğru, kırmızı oklar ise aşağıda doğru meydana gelen yeraltı suyu akımını göstermektedir. Deniz kıyısındaki tatlı suyun deşarjı ve tuzlu suyun girişimi açık şekilde görülmektedir. Deniz sınırında ilk 10 tabakada çoğunlukla tatlı su deşarjı olması rağmen 1. ve 7. tabakada deniz suyu girişimi görülmektedir. Akdeniz'i temsil eden sabit yük sınırının bulunduğu 10.

tabakadan 20. tabakaya kadar tüm tabakalarda yeraltı suyu akımının yönü denizden karaya doğrudur.



Şekil 5.24. Göksu Deltası Serbest Akiferi için Kalibre Edilmiş TDS Haritası.

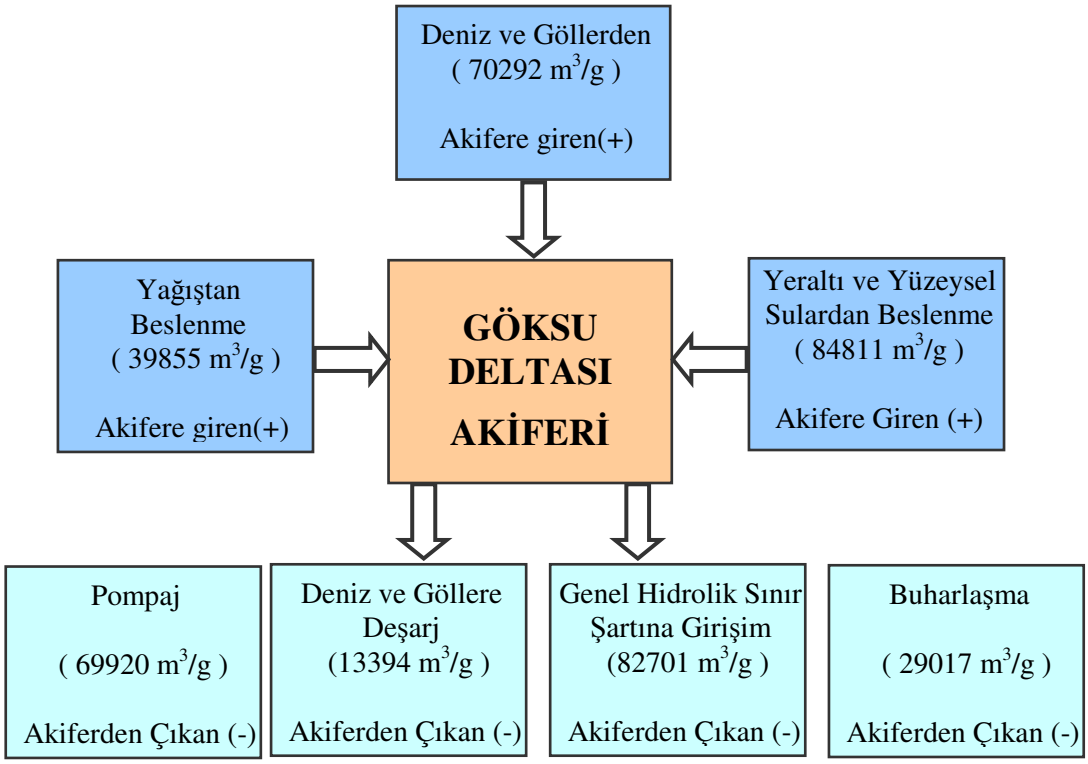


Şekil 5.25. Göksu Deltası Akiferi için Kalibre Edilmiş TDS Değerinin En Kesit Boyunca Değişim Haritası.

Şekil 5.24'den de görüleceği üzere Göksu nehrinin sol sahilindeki yeraltı su seviyesinin düşük olması sonucu deniz suyu girişimi sağ sahile göre daha fazladır. Deniz suyu yoğunluğunun ve eşdeğer tatlı su yükünün fazla olması yeraltı suyu akımının denizden karaya doğru oluşmasına sebep olmaktadır. Buda deniz suyu girişimine yol açmaktadır. SKKY'ye göre TDS değeri 2.1 g/l'nin üzerinde tuz konsantrasyonuna sahip yeraltı suyu sulama için zararlıdır. Şekil 5.25'e bakıldığında TDS değeri 2.1 g/l'yi temsil eden çizgi kıyıdan yaklaşık 1300 m içeriye girmiş durumda ve 7. tabakadan (-55.0 m ile -65.0 m arası) itibaren kademeli olarak artarak 10. tabakanın (-110.0 m ile -140.0 m arası) sonuna kadar aşağıya doğru inmektedir.

Bu çizginin altında kalan bölümden içme-kullanma ve sulama amaçlı olarak yeraltı suyu çekilmesi sakıncalıdır.

Model sonucu elde edilen su bütçesi de şematik olarak Şekil 5.26'da sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere kararlı halde modellenen Göksu deltası akiferinde, toplam giren (194958.78 m^3/g) ve toplam çıkan (195034.51 m^3/g) su miktarları eşit olup herhangi bir depolama olmamıştır. Su bütçesindeki hata payı %0.04'tür. Göksu nehri ve model sınırları dışından gelen yeraltı suyu modele genel hidrolik sınır şartı (GHB) olarak girilmiştir ve aşağıdaki şekilde yeraltı ve yüzeysel sulardan beslenme olarak gösterilmiştir. Su bütçesinden de görüleceği üzere akifere giren toplam tatlı su miktarının (84811+39855=124666 m^3/gün) %56'sı pompaj yoluyla kullanılmaktadır.



Şekil 5.26. Göksu Deltası Akiferinin Su Bütçesi

6. MODELE AİT SENARYOLAR

İnsan etkinliklerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarındaki hızlı artışa bağlı olarak küresel ortalama yüzey sıcaklıklarının arttığı ve iklimin değiştiği bilinen bir gerçektir (IPCC, 2007). İklim değişiminin küresel anlamda etkileri IPCC Dördüncü Değerlendirme Raporunda dört ana senaryo(A1, A2, B1, B2) kendi içinde ayrıştırılarak 23 farklı küresel model için simülasyon yapılmıştır (IPCC, 2007). Bu en iyimser ve kötümser simülasyonlara göre 2090–2099 döneminde ortalama yüzey sıcaklığının, 1980–1999 dönemi ortalamasına göre 1.1–6.4 °C artacağı ve yağışların yüksek enlemlerde azalacağı, buna karşılık ve subtropikal karaların büyük bölümünde ise artacağı öngörülmektedir. Ülkemiz için yapılan IPCC SRES A2 senaryosuna göre 2071–2100 döneminde Türkiye genelinde 2–3 °C oranında ısınma ve yağışlarda Ege ve Akdeniz kıyıları boyunca azalma ile Karadeniz kıyısı boyunca artış öngörmektedir (Demir ve ark, 2008). Türkiye, IPCC Dördüncü Değerlendirme Raporuna göre, küresel ısınmadan en çok etkilenecek bölgelerden biri olan Akdeniz Havzası'nda yer alması nedeniyle, iklim değişikliğinin etkilerinin önlenmesi ya da en aza indirilmesi için geleceğe yönelik iklim değişikliği senaryolarının oluşturulması ve bu senaryolara göre etki değerlendirilmelerinin yapılması gerekmektedir.

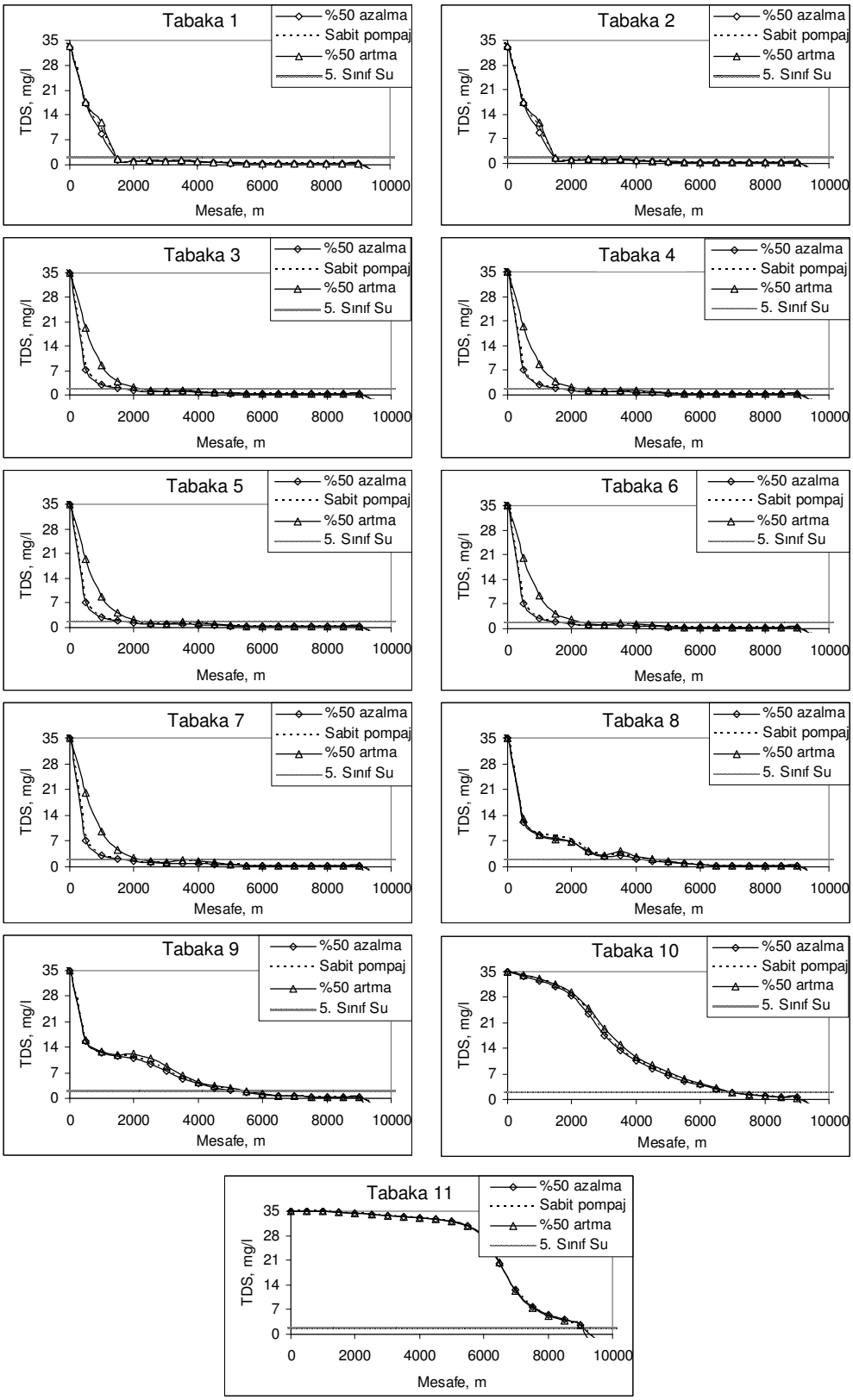
Bu tez çalışması kapsamında farklı senaryolara bağlı olarak oluşabilecek iklimsel değişim süreçlerinin ve yeraltı suyu kullanımındaki artışın ve azalışın Göksu deltası modelinde, yeraltı suyu seviye ve kalitesinde oluşturabileceği etkilerin ortaya konulması amaçlanmıştır. İklim değişimlerine bağlı olarak deniz suyu seviye değişimleri ve beslenmede azalma ve yeraltı suyu kullanımında meydana gelecek artışların akifer sisteminde yaratacağı etkilerin belirlenmesi amacıyla, 5. Bölüm'de geliştirilen modelin uygulanmasında SEAWAT-2000 programı kullanılarak farklı senaryolar için simülasyonlar yapılmıştır.

6.1. Yeraltı Suyu Kullanım Miktarındaki Değişim

Göksu Deltası'nda 1972 yılında DSİ tarafından tamamlanan I. merhale projesi ile 5860 ha alanda sulama ve drenaj sistemlerinin devreye girmesi, Deltada ürün deseninin ve üretim şeklinin değişmesine neden olmuştur. I. Merhale projesinden önce bölgede yoğun olarak buğday, arpa, çeltik, susam, yerfıstığı gibi ürünlerin tarımı yapılırken proje sonrası narenciye, çilek, turfanda sebze bakla, mısır, bostan gibi ürünlerin tarımı yapılmaya başlanmıştır (ÖÇK, 2009).

Ekonomik getirisi daha fazla olan özellikle çilek, limon gibi bahçe ve tarla bitkileri yetiştirilen alanların artması, sulama suyu ihtiyacında artışlara sebep olacaktır. Yeraltı sularının kontrolsüz kullanılması deniz suyu girişiminin iç kısımlara doğru ilerlemesine ve iyi kalitedeki suların marjinal sular sınıfına girmesine sebep olabilecektir. Bu da ekonomik değeri yüksek olan bahçe bitkileri yetiştirilen alanların daralmasına ve deniz suyu girişiminin olduğu bölgelerde verimin düşmesine sebep olacaktır. Deltadaki deniz suyu girişiminin olduğu bölgelerde yeraltı sularından sağlanan sulama suları hem bitkilere hem de toprağa zarar vererek tarımın sürdürülebilirliğini riske atacağı aşikardır. Bu yüzden bu bölümde Göksu deltası akiferinden çekilen içme-kullanma ve sulama sularının %50 artması ve aynı oranda azalması durumunda akiferin vereceği tepki araştırılmıştır. Şekil 6.1'de 5. Bölümde belirlenen pompaj miktarları %50 arttırılarak ve azaltılarak her bir hücreden çekilen su miktarı sırasıyla 655.5 m^3/gün ve 218.5 m^3/gün olarak değiştirilmiş ve model 50 yıllık (18250 gün) periyot için çalıştırılmıştır.

Şekil 6.1 ve Çizelge 6.1'den görüleceği üzere Göksu deltası akiferi yeraltı suyu kullanım miktarındaki artışa karşı hassastır. Modelin 50 yıllık simülasyonu sonucu elde edilen verilere göre özellikle akiferde yoğunlukla pompaj yapılan 3–6. tabakalarda ve 7. tabakada deniz suyu girişimi etkili olmuştur. Bu tabakalardaki deniz suyu girişimdeki ilerleme yaklaşık 700 m civarındadır.



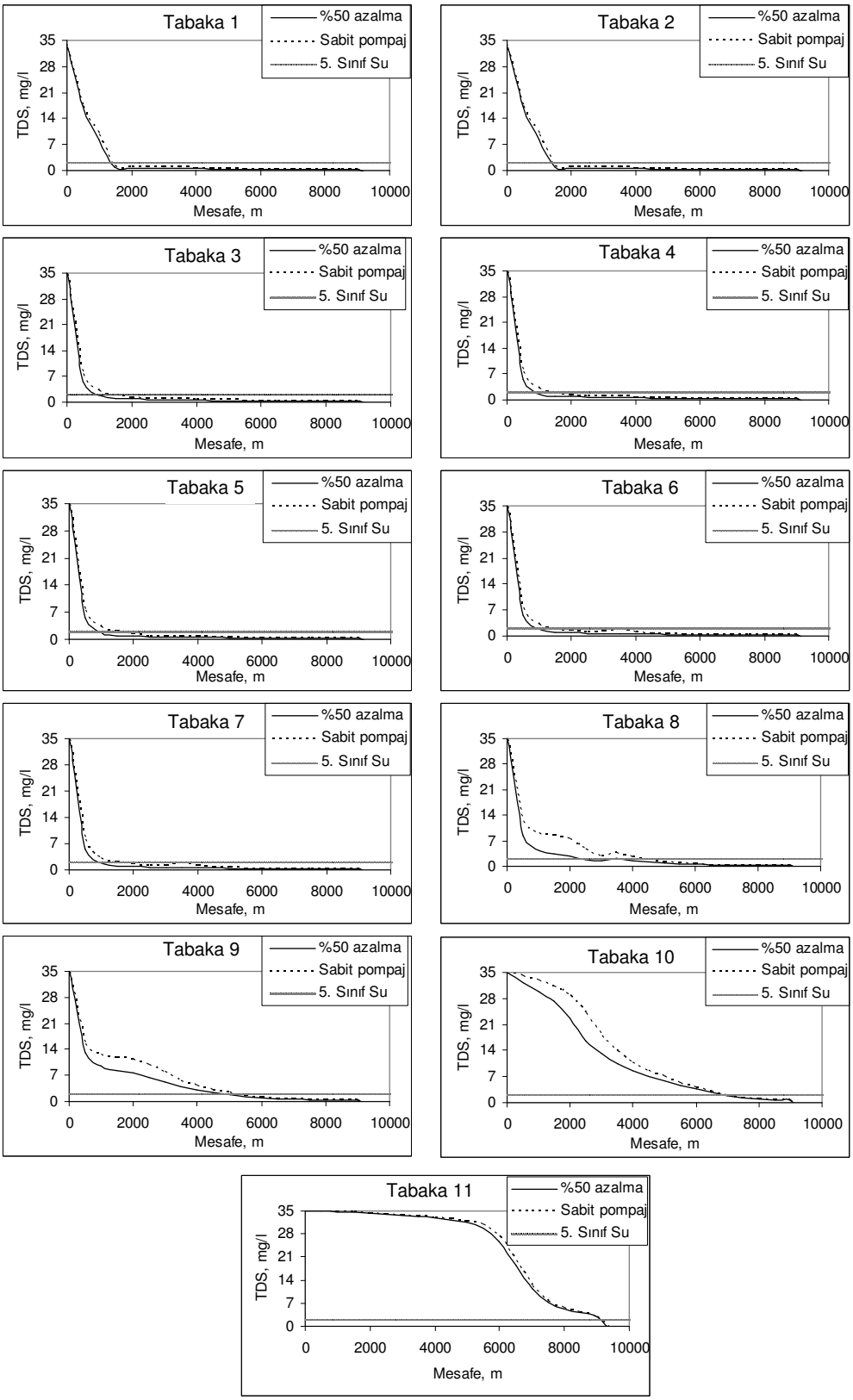
Şekil 6.1. Pompaj Miktarının Artış ve Azalışına Akiferin Tepkisi

Çizelge 6.1. Pompaj Oranındaki Azalış ve Artışa Bağlı Deniz Suyu Girişiminde İlerleme ve Gerileme

Tabaka İsimleri	Tabaka Kalınlıkları	5. Sınıf Suyun Kıyıya uzaklığı			Deniz suyu Girişiminde gerileme (m)	Deniz suyu Girişiminde ilerleme (m)
		%50 azalma (m)	Sabit pompaj (m)	%50 artma (m)		
Tabaka 1	Yeryüzü ile -2 m	1439	1450	1473	11	23
Tabaka 2	-2 m ile -10 m	1439	1450	1473	11	23
Tabaka 3	-10 m ile -20m	1424	1425	1697	1	273
Tabaka 4	-20 m ile -30 m	1424	1425	2082	1	658
Tabaka 5	-30 m ile -45 m	1431	1431	2122	0	691
Tabaka 6	-45 m ile -55 m	1441	1443	2175	1	732
Tabaka 7	55 m ile -65 m	1460	1464	2208	5	743
Tabaka 8	-65 m ile -80 m	4059	4298	4445	239	147
Tabaka 9	-80 m ile -110 m	5134	5240	5373	106	133
Tabaka 10	-110 m ile -140 m	6909	6928	6954	20	26
Tabaka 11	-140 m ile -170 m	>9300	>9300	>9300		

Şekil 6.1'e bakıldığında 8. tabaka pompajın artışından fazla etkilenmemiştir. Bunun sebebi ise bu tabakadaki geçirimsiz bölgedir. 9. ve 10. tabakalarda ise kıyıdan itibaren 2000 m ile 4000 m arasındaki bölümde pompajın artışından dolayı konikleşme görülmektedir.

Pompajın azaltıldığı durumda ise ilk 7 tabakada deniz suyu girişiminde gerileme etkili olmamıştır. Pompaj oranı azaldığından dolayı 8–10. tabakalardan yukarıya doğru çekilen ve konikleşmeye sebep olan su miktarı azaldığından dolayı bu bölgelerde bir miktar gerileme meydana gelmiştir. Sulama suyu çekimin yapıldığı 3-6. tabakalarda pompaj miktarındaki azalma deniz suyu girişimini kontrol altına alsa da 50 yıllık periyotta iyileştirme yapmamıştır. Model içersindeki gözlem kuyuları incelendiğinde azda olsa su kalitesinde iyileşme görülmektedir ve bu iyileşme devam etmektedir. Su kalitesinde iyileşmenin kararlı hale geldiği zamanı bulabilmek için model 300.000 gün (yaklaşık 822 yıl) çalıştırılmıştır. Simülasyon sonucunda gözlem kuyularında su kalitesinde iyileşme miktarı (Örneğin S-3 gözlem kuyusundaki son zaman adımındaki TDS değerindeki değişim 0.554496-0.554489=0.00007 mg/l) çok azaldığı için daha fazla gün için çalıştırılmaya gerek olmadığı görülmüştür. Simülasyon sonucu deniz suyu girişimindeki gerileme Şekil 6.2 ve Çizelge 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Pompaj Miktarının Azalışına Akiferin 300.000 Gün Sonraki Tepkisi

Çizelge 6.2. Pompaj Oranındaki Azalışa Bağlı 300.000 Gün Sonra Deniz Suyu Girişiminde Gerileme

Tabaka İsimleri	Tabaka Kalınlıkları	5. Sınıf Suyun Kıyıya uzaklığı		Deniz suyu Girişiminde gerileme (m)
		%50 azalma (m)	Sabit pompaj (m)	
Tabaka 1	Yeryüzü ile -2 m	1415	1450	35
Tabaka 2	-2 m ile -10 m	1415	1450	35
Tabaka 3	-10 m ile -20m	950	1425	475
Tabaka 4	-20 m ile -30 m	950	1425	475
Tabaka 5	-30 m ile -45 m	950	1431	482
Tabaka 6	-45 m ile -55 m	950	1443	493
Tabaka 7	55 m ile -65 m	952	1464	513
Tabaka 8	-65 m ile -80 m	3555	4298	743
Tabaka 9	-80 m ile -110 m	4827	5240	413
Tabaka 10	-110 m ile -140 m	6854	6928	74
Tabaka 11	-140 m ile -170 m	>9000	>9000	

Şekil 6.2 ve Çizelge 6.2'ye bakıldığında ilk 2 tabaka yine pompajın azalmasından etkilenmemiştir. Pompajın yapıldığı 3–6. tabakalarda yaklaşık 475 m civarında gerileme varken 7. ve 8. tabakada sırasıyla 513 m ve 743 m'dir. Buda 3-6. tabakalardaki su seviyesinin düşmediğini ve alt tabakaları sızma yoluyla beslediğini ayrıca tuzlu su üzerinde ilave tatlı su yükü oluşturduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu tabakalarda deniz suyu girişiminde daha fazla gerileme meydana gelmiştir.

Göksu deltası akiferinde, deniz suyu girişimi pompaj oranındaki artışa karşı çok hassas olmasına karşın pompaj oranının azaltılmasına karşı çok geç tepki vermiştir. Bu da bize yeraltı sularının kirlenmeden pompaj politikalarının kontrol altına alınması gerektiğini göstermektedir. Aksi halde kirlenme olduktan sonra yeraltı suyu pompaj miktarlarını azaltıp denize olan deşarjı artırarak yeraltı sularının kalitesini yükseltmeye çalışmak çok zaman alacaktır. Pompaj miktarlarının çok uzun süre azaltılması tarım yapılan bir bölge için ekonomik bir çözüm değildir. Pompajın arttırıldığı ve azaltıldığı durumlarda tabakalarda ve en kesitteki yeraltısuyu seviyesi ve TDS değerlerinin değişimi EK–1 ve 2'de görülmektedir.

6.2. İklim Değişikliği Senaryoları

İklim değişiminin küresel anlamda etkileri IPCC Dördüncü Değerlendirme Raporunda 23 farklı küresel model için simülasyonlar yapılmıştır (IPCC, 2007). Raporda su politikaları üzerine çalışanlar için birçok özet tablo verilerek hava sıcaklığı ve deniz seviyesindeki değişim aralıkları tablolar halinde verilmiştir (Çizelge 6.3).

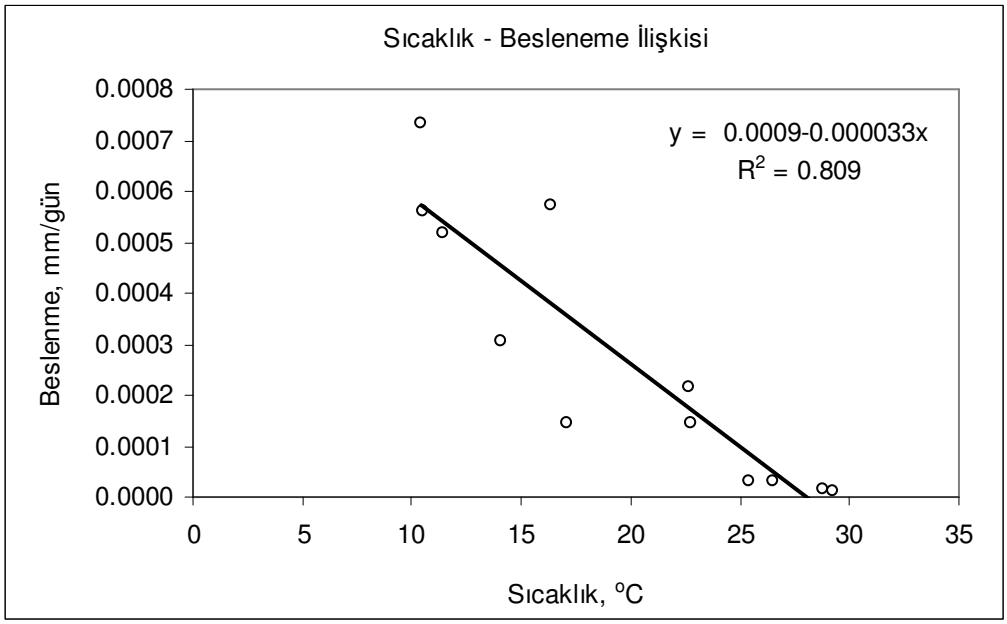
Çizelge 6.3. IPCC (2007) İklim Değişikliği Senaryoları, SPM–2

Çalışma	Sıcaklık Değişimi (1980–1999 yıllarına göre 2090–2099 yılları için) (ºC)		Deniz seviyesi Değişimi (1980–1999 yıllarına göre 2090–2099 yılları için) (m)
	En iyi tahmin	Değişim aralığı	Modele dayalı değişim aralıkları ani buz akımlarını dikkate almamaktadır
2000 yılı sabit konsantrasyonları	0.6	0.3 – 0.9	----
B1 Senaryosu	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T Senaryosu	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
B2 Senaryosu	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
A1B Senaryosu	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 Senaryosu	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI Senaryosu	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Bu çalışmada Çizelge 6.3'de verilen iklim değişikliği senaryolarının içinden en iyimser (B1) ve en kötümser (A1FI) senaryoları seçilmiş ve bu senaryoların ortalama ve maksimum değerleri için simülasyonlar yapılmıştır. B1 senaryosunun maksimum değerleri A1FI senaryosunun ortalama değerlerine eşittir. Bu nedenle 3 adet senaryo için geliştirilen Göksu deltası yeraltı suyu modeli çalıştırılmıştır. B1 senaryosunun ortalama değerleri, "Senaryo 1", B1 senaryosunun maksimum değerleri, "Senaryo 2", A1FI senaryosunun maksimum değerleri ise "Senaryo 3" olarak adlandırılmıştır. 2090-2099 dönemine ait iklim değişikliği senaryo sonuçları 20 şer yıllık aralıklarla modeldeki buharlaşma değerinde ve deniz seviyesinde artma, beslenme değerinde azalma olarak kademeli olarak değiştirilerek adapte edilmiştir. Tiruneh (2004) yaptığı çalışmasında iklim değişikliği senaryolarındaki deniz

seviyesindeki değişimlere 2. derece denklemler önermiştir. Fakat bu denklemlerin kareli teriminin kat sayısı çok küçük olduğu için deniz seviyesindeki ve diğer iki değişkenin yıllar içindeki değişimi lineer kabul edilmiştir.

İklim değişikliği sonucu beslenme miktarındaki azalmayı belirlemek için 2008 su yılına ait beslenme ve sıcaklık değerleri arasında doğrusal ilişki kurulup, sıcaklık değişimine karşılık beslenme miktarındaki azalma hesaplanmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Sıcaklık–Beslenme ilişkisi (2008 su yılı)

Çizelge 6.4. Yeraltısuyu Beslenme Miktarlarındaki Azalma

Yıl	Ortalama Sıcaklık	Net Beslenme, (m/gün)	Azalış (m/gün)	Azalış (%)
2008	19.61	0.00026		
Senaryo 1 (B1 ortalama)	21.41	0.00022	0.00005	17.5
Senaryo 2 (B1 maksimum ve A1FI ortalama)	23.61	0.00014	0.00012	45.0
Senaryo 3 (A1FI maksimum)	27.81	0.00001	0.00021	97.4

Şekil 6.3'deki denklem kullanılarak iklim değişikliği senaryoları için ortalama sıcaklık ve sıcaklıktaki artışa bağlı yeraltı suyu beslenme miktarlarındaki azalma hesaplanmıştır (Çizelge 6.4). En kötümser senaryoya (Senaryo 3) göre yeraltı suyu beslenmesi %97.4 oranında azalarak yeraltı suyu yağışlardan beslenemez hale gelmiştir.

Çalışmada dikkate aldığımız iklim değişikliği senaryolarına göre sıcaklık ve deniz seviyesindeki artış ve beslenme miktarında azalma değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 6.5. Yeraltısuyu Beslenme Miktarlarındaki Azalma

Senaryolar	Sıcaklık (ºC)	Deniz Seviyesi (m)	Beslenme (m/gün)
Senaryo 1	1.8	0.25	-0.00005 (%17)
Senaryo 2	4.0	0.38	-0.00012 (%45)
Senaryo 3	6.4	0.59	-0.00021 (%97.4)

Deniz seviyesi artışı sonucu modeldeki sabit su yüksekliği şeklinde tanımlanmış deniz sınırı iç kesimlere doğru ilerleyecektir. Deniz seviyesindeki artışa bağlı sular altında kalacak bölgeleri hesaplayabilmek için Göksu deltasında ölçülmüş kot seviyeleri kullanılarak ters uzaklık yöntemiyle arazinin eş yükselti haritası oluşturulmuştur. Bu harita kullanılarak deniz seviyesindeki yükselme sonrası sular altında kalacak alanlar belirlenmiştir (Çizelge 6.6 ve EK–3,4 ve 5).

Çizelge 6.6. Deniz Seviyesi Yükselmesi Sonucu Sular Altında Kalacak Alanlar

Senaryolar	Deniz Seviyesi (m)	Sular altında kalacak alanlar (km^2)
Senaryo 1	0.25	1.18
Senaryo 2	0.38	2.43
Senaryo 3	0.59	21.72

İklim değişikliği senaryolarının simülasyonları çalıştırılırken ilk olarak sadece sıcaklıktaki ve deniz seviyesindeki artış ile beslenme miktarındaki azalış değerleri

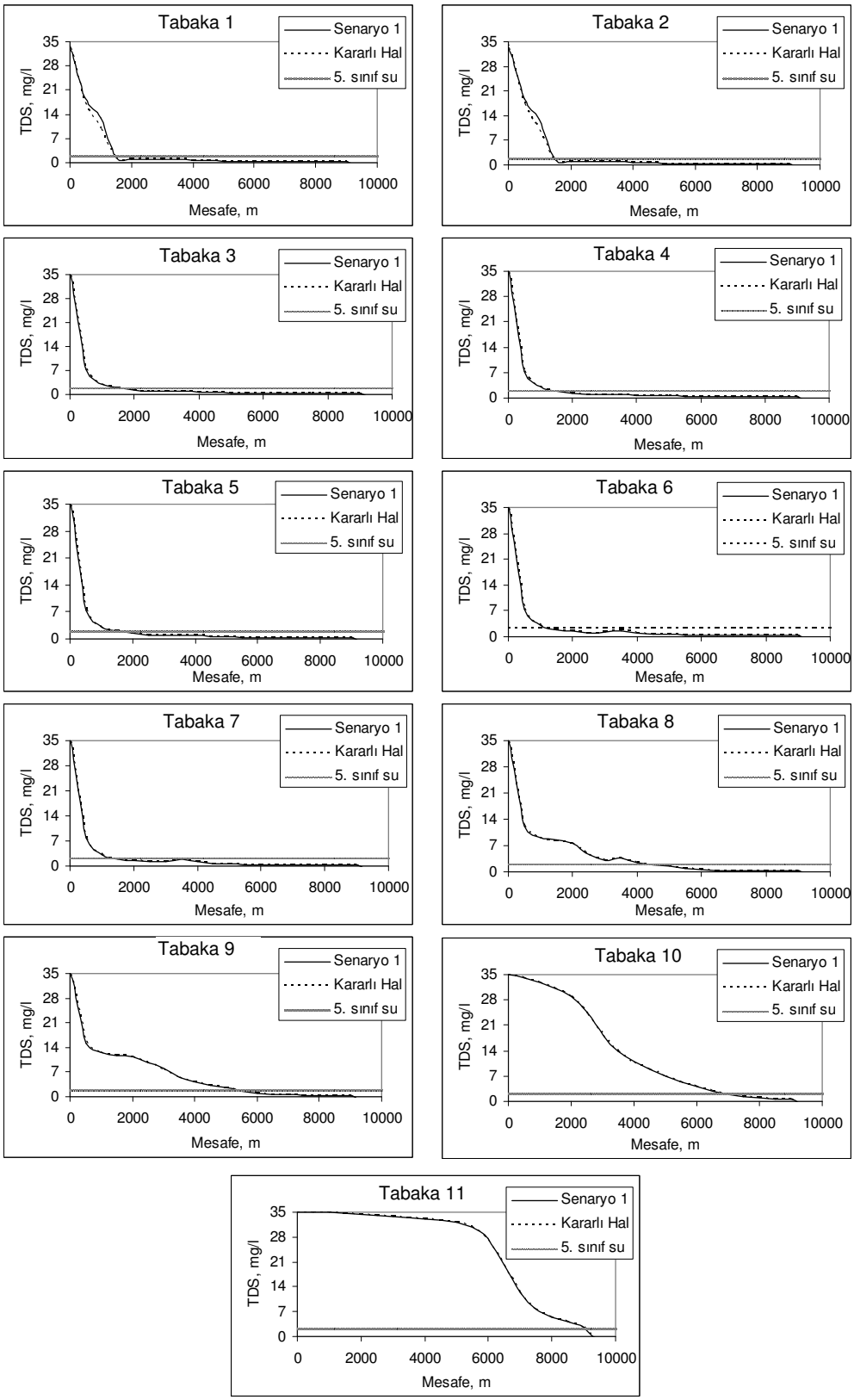
değiştirilmiştir. Daha sonra 3 değişkene ilave olarak sıcaklık artışına bağlı bitkilerin su ihtiyacı artacağı nedeniyle yeraltı suyu pompaj miktarları sıcaklıktaki rölatif değişim oranında artırılmıştır. Aşağıdaki çizelgede 20'şer yıllık periyotlar için sıcaklık, deniz seviyesi, beslenme ve pompaj miktarındaki artış ve azalış miktarları aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir. Değişkenler modele girilirken 20 yıllık periyodun başındaki ve sonundaki değerin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 6.7. Senaryolar için Sıcaklık, Deniz Seviyesi, Beslenme ile Pompaj Miktarındaki Artış ve Azalış Miktarları

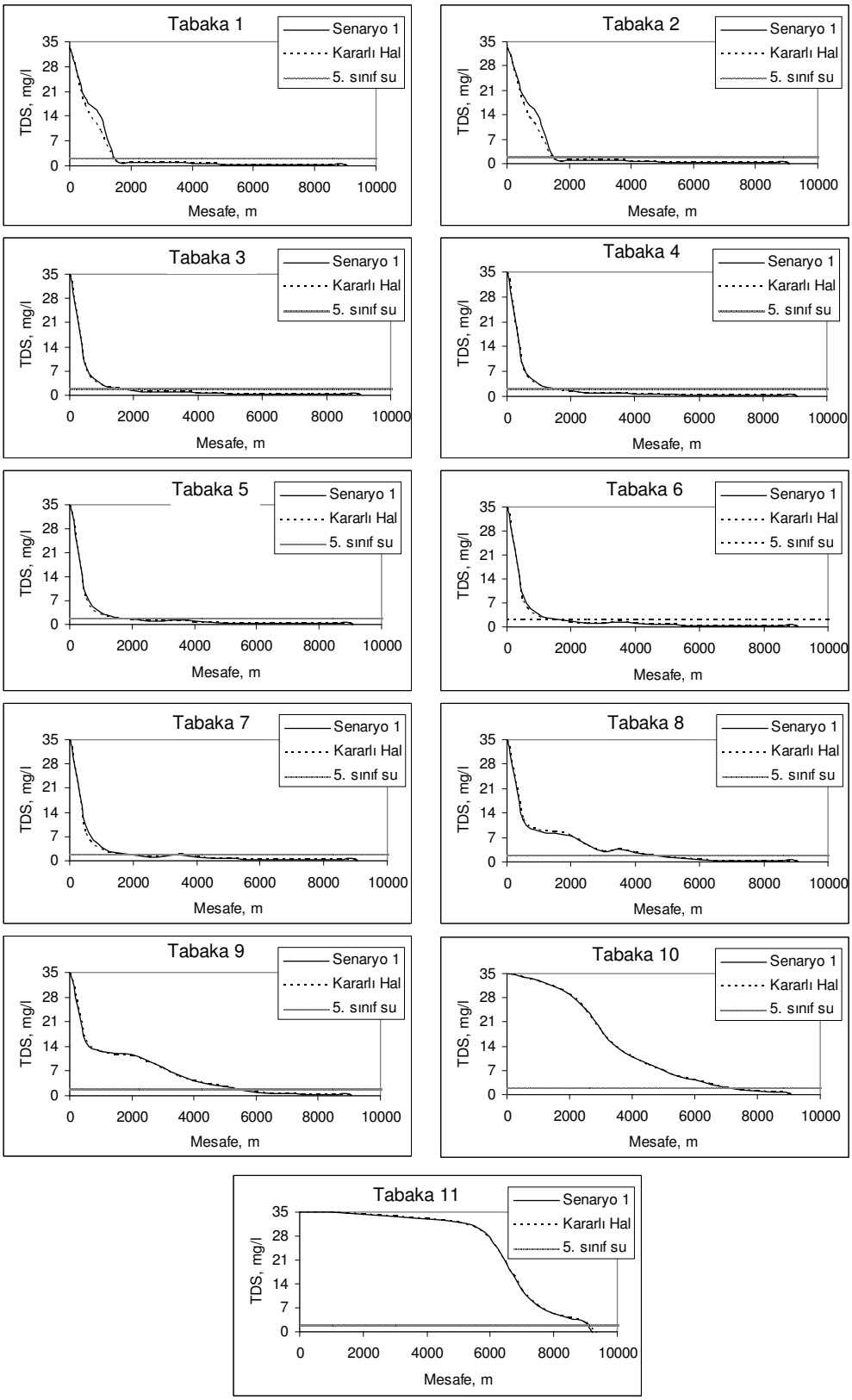
Yıllar	Değişkenler	Birim	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
2030	Sıcaklık	℃	0.48	1.07	1.72
	Deniz Seviyesi	m	0.07	0.10	0.16
	Beslenme	m/gün	-0.000013	-0.000032	-0.000056
	Pompaj miktarı	m^3/gün	5.4	11.9	19.1
2050	Sıcaklık	℃	0.92	2.05	3.28
	Deniz Seviyesi	m	0.13	0.19	0.30
	Beslenme	m/gün	-0.000026	-0.000061	-0.000108
	Pompaj miktarı	m^3/gün	15.6	34.7	55.5
2070	Sıcaklık	℃	1.36	3.02	4.84
	Deniz Seviyesi	m	0.19	0.29	0.45
	Beslenme	m/gün	-0.000038	-0.000091	-0.000159
	Pompaj miktarı	m^3/gün	25.3	56.3	90.1
2090	Sıcaklık	℃	1.80	4.00	6.40
	Deniz Seviyesi	m	0.25	0.38	0.59
	Beslenme	m/gün	-0.00005	-0.00012	-0.00021
	Pompaj miktarı	m^3/gün	35.1	77.9	124.8

6.2.1. Senaryo 1

Çizelge 6.7'deki değişkenler ile artış ve azalış miktarlarının kararlı hal için kalibrasyonu yapılmış Göksu deltası yeraltı suyu akım ve taşınım modeline uygulanarak model iki defa çalıştırılmıştır. İlk simülasyonda pompajdaki artış miktarları dikkate alınmamıştır. Bu sayede bitki su ihtiyacındaki ve buna bağlı pompaj miktarındaki artışın deniz suyu girişimine etkisi incelenmiştir. Şekil 6.5 ve 6.6'da sırasıyla Senaryo 1'in pompaj miktarındaki değişimin dahil edilmediği ve edildiği durumda en kesitteki TDS değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 6.4. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 1–Pompaj hariç)



Şekil 6.5. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 1–Pompaj dahil)

Çizelge 6.8. Senaryo 1'e göre Deniz Suyu Girişiminde İlerleme

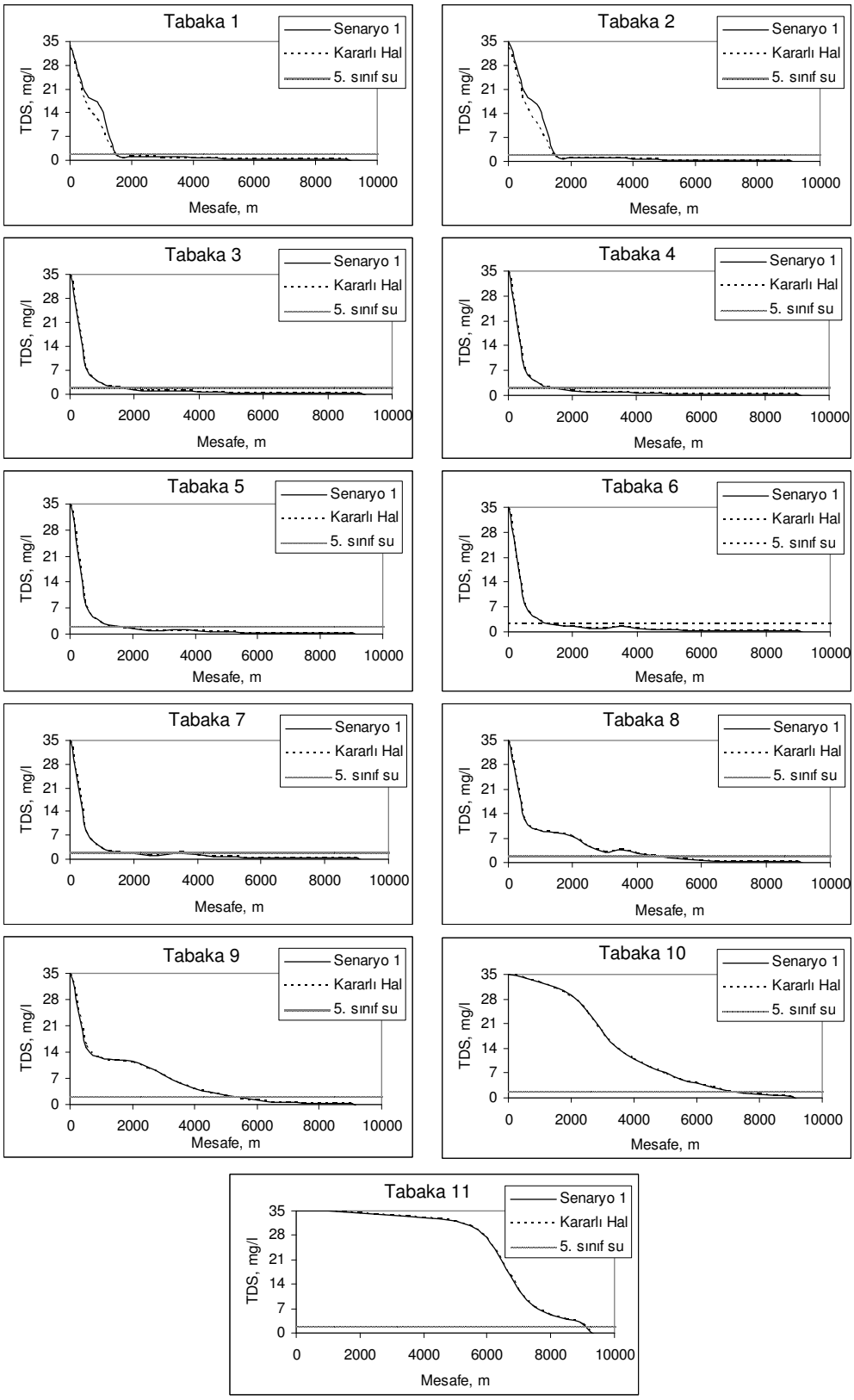
Tabaka İsimleri	5. Sınıf Suyun Kıyıya Uzaklığı			Deniz suyu Girişiminde ilerleme	
	Senaryo 1 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 1 (Pompaj Dahil) (m)	Kararlı Hal (m)	Senaryo 1 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 1 (Pompaj Dahil) (m)
Tabaka 1	1478	1489	1450	28	39
Tabaka 2	1478	1489	1450	27	39
Tabaka 3	1437	1492	1425	13	67
Tabaka 4	1438	1498	1425	13	73
Tabaka 5	1445	1538	1431	14	107
Tabaka 6	1458	1624	1443	16	182
Tabaka 7	1483	1712	1464	19	247
Tabaka 8	4308	4318	4298	10	19
Tabaka 9	5247	5268	5240	7	28
Tabaka 10	6933	6937	6928	4	8
Tabaka 11	>9000	>9000	>9000		

Senaryo 1'de pompaj miktarındaki artış göz ardı edildiği durumda iklim değişikliğinin deniz suyu girişimine etkileri ilk 2 tabakada daha fazla görülmektedir (Şekil 6.4). Pompaj miktarındaki artışın dahil edildiği durumda ise en belirgin ilerleme 6. ve 7. tabakada görülmektedir (Şekil 6.5). Bunun sebebi pompaj miktarındaki artıştan dolayı yeraltı su seviyesinin düşmesi ve yoğunluğu daha fazla olan deniz suyunun üzerindeki tatlı su yükünün azalması sonucu deniz suyu girişiminin iç kesimlere doğru ilerlemesidir.

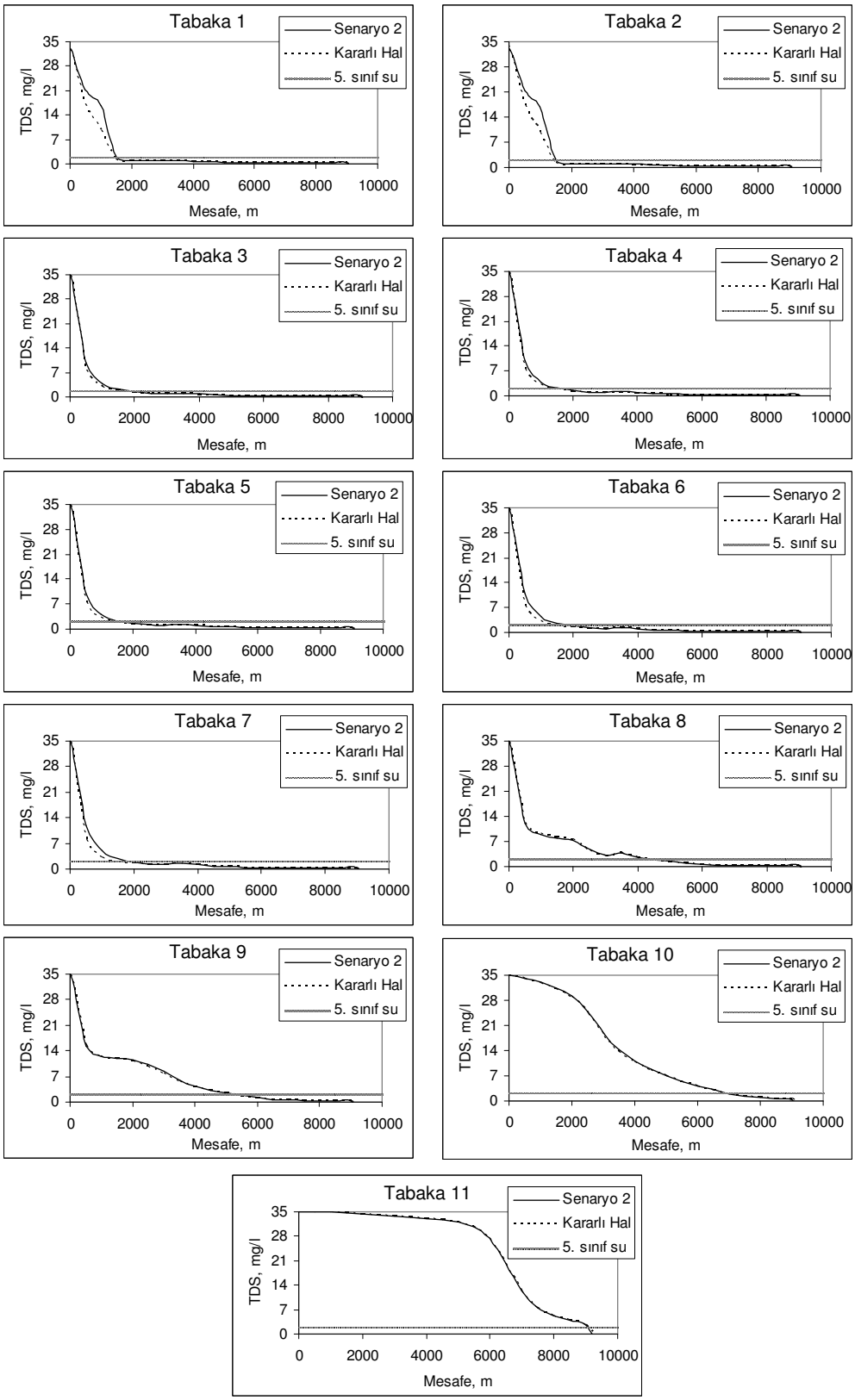
Çizelge 6.8'e bakıldığında pompaj miktarındaki artışın ve diğer parametrelerin etkileri açık şekilde görülmektedir. Sıcaklık, deniz seviyesi ve beslenme miktarındaki değişim ilk iki tabakada etkili olurken pompajdaki değişim senaryoya eklendiğinde deniz suyu girişimindeki ilerleme kademeli artarak 7. tabakaya kadar etkisini göstermiştir. Pompaj miktarındaki değişimin daha aşağıdaki tabakalara etkisi 8. tabadaki geçirimsiz bölgeden dolayı azalmıştır.

6.2.2. Senaryo 2

Şekil 6.7 ve 6.8'de sırasıyla Senaryo 2'nin pompaj miktarındaki değişimin dahil edilmediği ve edildiği durumda en kesitteki TDS değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 6.7. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 2–Pompaj hariç)



Şekil 6.8. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 2–Pompaj dahil)

Çizelge 6.9. Senaryo 2'ye göre Deniz suyu girişiminde ilerleme

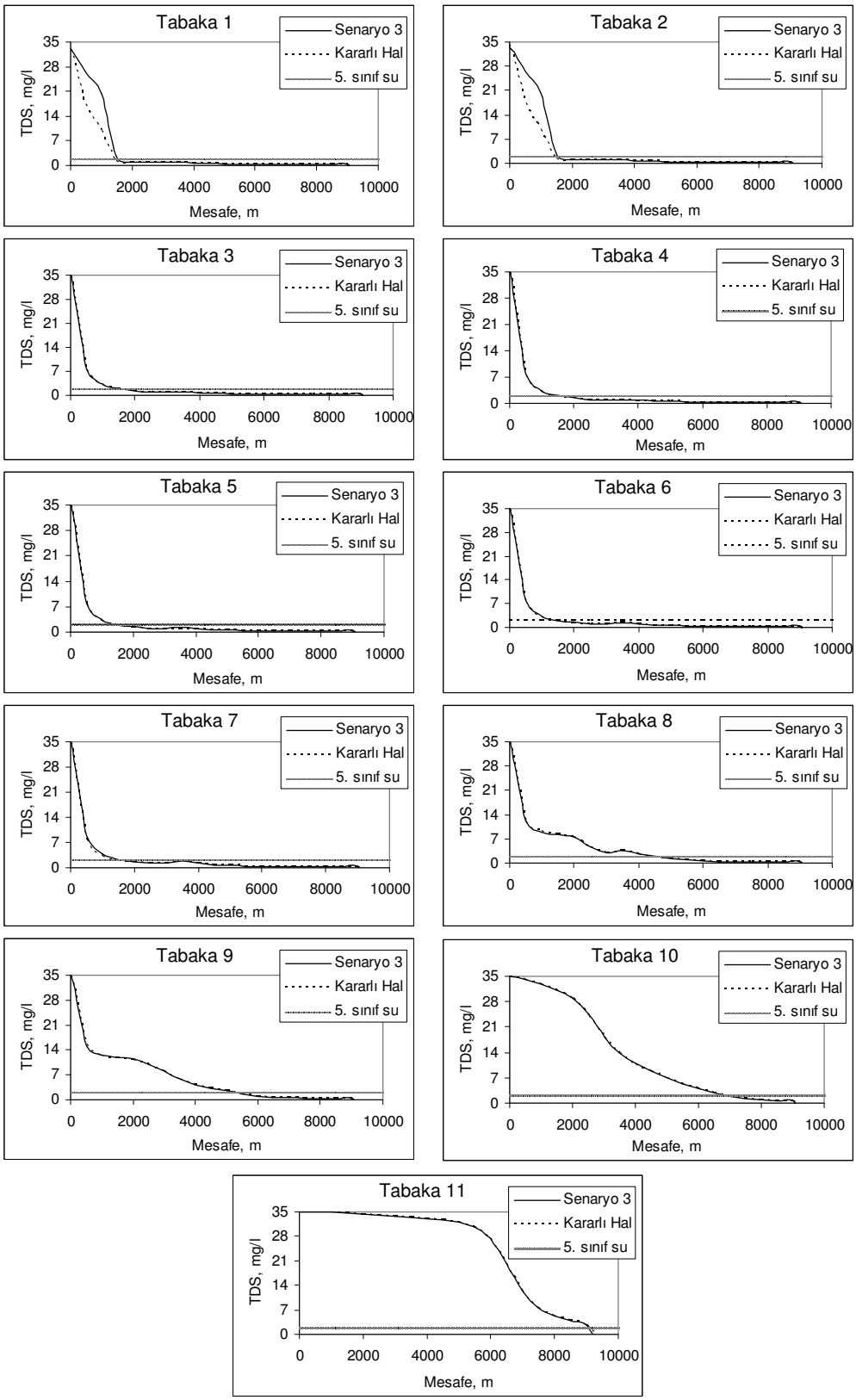
Tabaka İsimleri	5. Sınıf Suyun Kıyıya Uzaklığı			Deniz suyu Girişiminde ilerleme	
	Senaryo 2 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 2 (Pompaj Dahil) (m)	Kararlı Hal (m)	Senaryo 2 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 2 (Pompaj Dahil) (m)
Tabaka 1	1495	1600	1450	45	149
Tabaka 2	1495	1599	1450	45	148
Tabaka 3	1450	1621	1425	25	197
Tabaka 4	1452	1649	1425	27	224
Tabaka 5	1461	1714	1431	30	282
Tabaka 6	1478	1795	1443	35	352
Tabaka 7	1528	1851	1464	64	387
Tabaka 8	4320	4353	4298	21	55
Tabaka 9	5255	5294	5240	15	54
Tabaka 10	6934	6942	6928	6	13
Tabaka 11	>9000	>9000	>9000		

Senaryo 2'de pompaj miktarındaki artış göz ardı edildiği durumda iklim değişikliğinin deniz suyu girişimine etkileri ilk 2 tabakada daha net görülmektedir (Şekil 6.7). Pompaj miktarındaki artışın dahil edildiği durumda ise Senaryo 1'deki duruma göre ilk 7 tabakada deniz suyu girişiminde daha fazla ilerleme meydana gelmiştir (Şekil 6.8 ve Çizelge 6.9). Senaryo 1'de pompaj miktarındaki artış Senaryo 2'ye göre küçük olduğu için pompajdaki artışın etkileri ilk 2 tabakada belirgin şekilde görülmemiştir. Senaryo 2'de ise pompajın dahil durumda, dahil edilmediği duruma göre deniz suyu girişimi ilk iki tabakada yaklaşık 3 kat fazla ilerlemiştir (Çizelge 6.9).

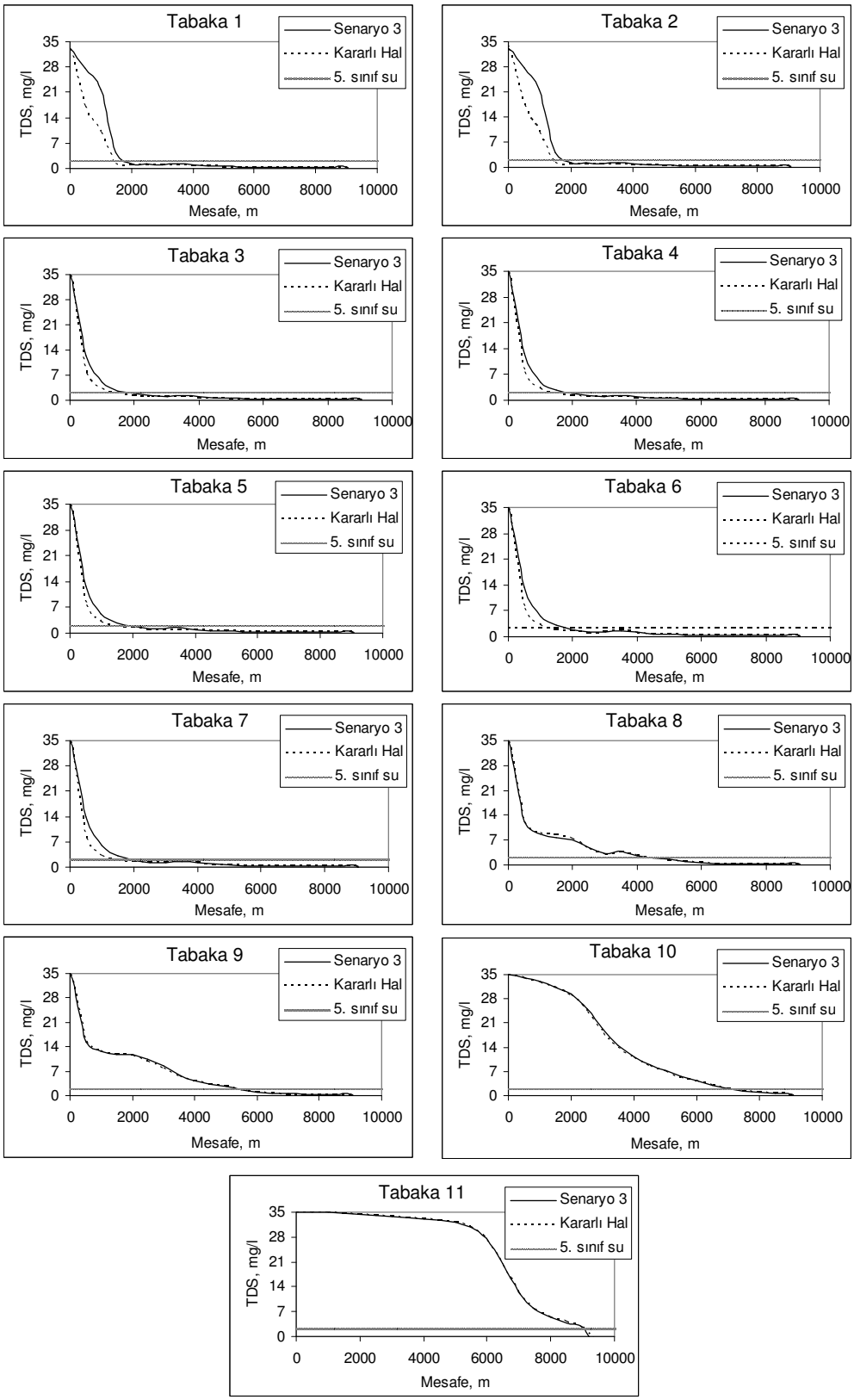
Çizelge 6.9'a bakıldığında Senaryo 1'in sonuçlarına benzer özellik görülmektedir. Beslenme miktarındaki azalma ve buharlaşma kayıplarındaki artış yeraltı su seviyesini düşürdüğü için deniz suyu girişiminin etkileri alt tabakalarda da görülmeye başlanmıştır.

6.2.3. Senaryo 3

Senaryo 3'ün pompaj miktarındaki değişimin dahil edilmediği ve edildiği durumda en kesitteki TDS değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 6.9 ve 6.10'da görülmektedir.



Şekil 6.9. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 3–Pompaj hariç)



Şekil 6.10. En Kesit Boyunca TDS'nin Değişimi (Senaryo 3–Pompaj dahil)

Çizelge 6.10. Senaryo 3'e göre Deniz Suyu Girişiminde İlerleme

Tabaka İsimleri	5. Sınıf Suyun Kıyıya Uzaklığı			Deniz suyu Girişiminde ilerleme	
	Senaryo 3 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 3 (Pompaj Dahil) (m)	Kararlı Hal (m)	Senaryo 3 (Pompaj Hariç) (m)	Senaryo 3 (Pompaj Dahil) (m)
Tabaka 1	1513	1850	1450	62	400
Tabaka 2	1513	1849	1450	62	399
Tabaka 3	1460	1809	1425	35	384
Tabaka 4	1463	1833	1425	38	408
Tabaka 5	1476	1872	1431	45	441
Tabaka 6	1491	1925	1443	49	482
Tabaka 7	1598	1961	1464	134	496
Tabaka 8	4330	4389	4298	32	91
Tabaka 9	5261	5320	5240	22	81
Tabaka 10	6936	6947	6928	8	19
Tabaka 11	>9000	>9000	>9000		

Senaryo 3'te ilk 2 tabakada iklim değişikliğinin deniz suyu girişimine etkileri daha net görülmektedir (Şekil 6.9). Pompaj miktarındaki artışın dahil edildiği durumda ise Senaryo 1 ve 2'deki duruma göre ilk 7 tabakada deniz suyu girişiminde daha fazla ilerleme meydana gelmiştir (Şekil 6.10 ve Çizelge 6.10).

Çizelge 6.10'a bakıldığında Senaryo 2 ve 3'ün sonuçlarına benzer özellik görülmektedir. Senaryo 3'teki pompaj miktarındaki artışın etkileri ilk 7 tabakada açıkça görülmektedir. Pompajın dahil edilmediği durumda 7. tabakadaki deniz suyu girişimindeki ilerleme 134 m iken, dahil edildiği durumda ise 496 m'dir. İlk 6 tabakada pompajın dahil edilmediği durumda deniz suyu girişiminde ortalama 50 m ilerleme varken dahil edildiği durumda ise ortalama 400 m'dir. Pompaj oranındaki artışa bağlı deniz suyu girişimindeki ilerleme ilk iki tabakada 6 kat, 3–6. tabakalarda yaklaşık 10 kat daha etkili olmuştur (Çizelge 6.9). İklim değişikliği senaryoları sonucu tabakalarda ve en kesitteki yeraltı su seviyesi ve TDS değerlerinin değişimi EK–6 ve 7'de görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Göksu Deltası akiferinin yeraltı suyu akım ve taşınım simülasyon modeli SEAWAT paket programı kullanılarak geliştirilmiştir. Simülasyon modeli Göksu delta akiferindeki tatlı su–tuzlu su ara yüzünün yerini ve deltadaki toplam çözünmüş madde (TDS) konsantrasyon değerlerinin dağılımını vermektedir. Simülasyon sonucu elde edilen TDS değeri ile klorür konsantrasyon değeri arasındaki ilişki kullanılarak deltadaki klorür değerleri elde edilebilmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, yeraltı suyu kullanım miktarlarında meydana gelebilecek olası artış ve azalışın deniz suyu girişimine etkileri incelenmiştir. İnceleme sonucu, 50 yıllık sürede, 4–7. tabakalarda deniz suyu girişiminin deltanın iç kesimlerine doğru yaklaşık 700 m ilerlediği tespit edilmiştir. 50 yıllık periyot için yapılan simülasyon sonucunda, pompaj miktarının azaltılmasının yeraltı suyu kalitesine bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Pompaj miktarındaki azalmaya bağlı olarak yeraltı suyu kalitesindeki iyileşme model kararlı hale gelene kadar devam etmektedir. Simülasyon 300.000 (822 yıl) gün sonunda kararlı hale gelmiş ve deniz suyu girişiminin deltadan denize doğru 500 m gerilediği tespit edilmiştir.

İkinci aşamada ise, iklim değişikliğinin Göksu deltasındaki bölgesel etkileri incelenmiştir. İklim değişikliği senaryoları içinden en iyimser (B1) ve en kötümser (A1FI) senaryoları seçilmiş, bu senaryoların ortalama ve maksimum değerleri için simülasyonlar yapılmıştır. B1 senaryosunun maksimum değerleri A1FI senaryosunun ortalama değerlerine eşittir. Bu nedenle 3 adet senaryo için SEAWAT modeli çalıştırılmıştır. İklim değişikliği senaryolarının simülasyonları çalıştırılırken ilk olarak sadece sıcaklıktaki ve deniz seviyesindeki artış ve beslenme miktarındaki azalış değerleri değiştirilmiştir. Daha sonra 3 değişkene ilave olarak sıcaklık artışına bağlı bitkilerin su ihtiyacı artacağından yeraltı suyu pompaj miktarları sıcaklık artışındaki rölatif artışa benzer şekilde artırılmıştır. İklim değişikliği senaryolarının simülasyonları günümüzden 2090 yılına kadar 20'şer yıllık periyotlar için sıcaklık, deniz seviyesi, beslenme ve pompaj miktarındaki artış ve azalış miktarları dikkate

alınarak yapılmıştır. Simülasyonların sonuçları günümüz koşullarını temsil eden kararlı hal için elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında;

- Deltada genel olarak yeraltı su seviyelerinde azalma meydana gelmesi sonucu deniz suyu girişiminde artış meydana gelmiştir.
- Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak yağış ve sulamadan kaynaklanan beslenme miktarları 0.00026 m/gün'den Senaryo 1'e göre 0.00022 m/gün'e, Senaryo 2'ye göre 0.00014 m/gün'e ve Senaryo 3'ye göre 0.00001 m/gün'e düşmüştür.
- En kötümser senaryo olan Senaryo 3'e göre deniz seviyesinin 0.59 m yükselmesi sonucu ÖÇK sınırları içindeki 21.72 km^2 arazi sular altında kalacaktır.
- Deniz seviyesinin yükselmesi, sıcaklığın artması ve beslenmenin azalması özellikle ilk iki tabakada etkili olmuştur. En kötümser senaryoda (Senaryo 3) yeraltı su seviyesi diğer senaryolara ve günümüz koşullarına göre daha düşük seviyeye inmiş ve akiferdeki tuzlu suyun üzerindeki tatlı su yükü azaldığı için buna bağlı olarak deniz suyu girişimi ilk iki tabakada 60 m, 2–4. tabakalarda yaklaşık 40 m ve 7. tabakada ise 134 m ilerlemiştir.
- Pompaj miktarındaki artışın dahil edildiği senaryolarda deniz suyu girişimindeki ilerleme 5–7. tabakalarda daha etkili olmuştur. Bunun sebebi olarak tabakalardaki tatlı su seviyesinin düşmesi sonucu tatlı su–tuzlu su ara yüzünün pompajın yapıldığı üstteki tabakalara doğru ilerlemesi gösterilebilir. Deniz suyu girişimindeki ilerleme en fazla 7. tabakada görülmüştür. Bu tabakadaki iklim değişikliği senaryolarına göre deniz suyu girişimindeki ilerlemeler sırasıyla 247 m, 387m ve 496 m'dir.
- Model, pompajdaki artışa duyarlı olduğu için pompaj miktarındaki artışın ilave edildiği iklim değişikliği senaryolarında, dahil edilmediği

senaryolara kıyasla deniz suyu girişiminde farklı tabakalarda 3 ile 10 kat arasında daha fazla ilerleme kaydedilmiştir.

Araştırmanın sonucu göstermiştir ki, Göksu deltasındaki deniz suyu girişiminin etkilerini incelemek için SEAWAT paket programı yardımıyla oluşturulan yeraltı suyu akım ve taşınım modeli özellikle yeraltı suyu kullanım oranındaki artışa karşı hassas bir yapıya sahiptir. İklim değişikliğinin etkileri sonucu yüzeysel suların azalması ve sıcaklıktaki artışa bağlı içme–kullanma ve sulama suyu ihtiyacındaki artış, çalışmadaki senaryolarda kullanılan yeraltı suyu çekim miktarlarından çok daha fazla yeraltı suyu kullanımına sebep olabilecektir. Bunun sonucu, deniz suyu girişiminin iç kısımlara doğru ilerlemesine ve iyi kalitedeki suların marjinal sular sınıfına girmesine sebep olabilecektir. Bu da ekonomik değeri yüksek olan bahçe bitkileri yetiştirilen alanların daralmasına ve deniz suyu girişiminin olduğu bölgelerde verimin düşmesine sebep olacaktır. Deltadaki deniz suyu girişiminin olduğu bölgelerde yeraltı sularından sağlanan sulama suları hem bitkilere hem de toprağa zarar vererek tarımın sürdürülebilirliğini riske atacaktır.

Geliştirilen Göksu deltası akifer modelinde varsayımlara dayalı özelliklerin olması model sonuçlarının güvenirliliğini azaltmaktadır. Bu nedenle model sonuçlarının daha güvenilir olabilmesi için, gerekli hidrolik, hidrolojik ve hidrojeolojik verilerin zenginleştirilmesi gereklidir. Bu doğrultuda Göksu deltasında var olan sulama ve diğer amaçlı kuyulardan ilave veri toplanması, deltanın jeolojik enkesitlerinin çıkarılması gereklidir. Ayrıca Göksu nehri ve yeraltı suyu ilişkisini tanımlayabilmek için nehrin farklı noktalarında seviye ve su kalite ölçümleri yapılmalıdır. Deniz kıyısındaki yerlerde, hidrolik yükseklikler ve TDS konsantrasyonları düşeydeki değişime bağlı olduğu için gözlem kuyuları, kısa düşey aralıklarla küme halinde açılarak tatlı su–tuzlu su arasındaki geçiş bölgesi iyi tanımlanmalıdır. Sonuç olarak Göksu deltasında yeraltı suyu kullanımı belirlenerek deniz suyu girişimi kontrol altına alınmalıdır. Ayrıca, muhtemel iklim değişikliği senaryolarını dikkate alan yeraltı suyu kullanım stratejileri geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

ANDERSEN, P.F., MERCER, J.W. and WHITE, Jr, H.O., 1988. Numerical Modeling of Salt–Water Intrusion at Hallandale, Florida, Groundwater, 26 (5): 619–630.

ANDERSON, M.P., 1976. Unsteady Groundwater Flow Beneath Strip Oceanic Islands, Water Resources Research, 12 (4): 640–644.

ANDERSON, M.P., 1979. Using Models to Simulate the Movement of Contaminants Through Groundwater Flow Systems, CRC CRC Critical Reviews in Environmental Control, 9(2):97-156.

AXELSSON, O., and LINDSKOG, G.1986. On the Eigenvalue Distribution of a Class of Preconditioning Methods, Numerical Mathematics, 48: 479–498.

BADON GHIJBEN (Ghyben), W., 1889. Nota in Verband Met de Voorgenomen Putboring Nabij Amsterdam. Tijdschrlft Het Koninkliijk Instituut Voor Ingenieurs, the Hague, 8–22.

BEAR, J. and DAGAN, G., 1964. Some Exact Solutions of Interface Problems by Means of the Hydrograph Method. Journal of Geophysical Research., 69 (8): 1563–1572.

BEAR, J. 1972 Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier.

BEAR, J., 1979. Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill Book Company.

BEAR, J., CHENG, A.H.D., SOREK, S., OUAZAR, D. and HERRERA, I., 1999. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices, Kluwer, Dordrecht, 652.

BHATTACHARJYA R.K., and DATTA B., 2005. Optimal Management Of Coastal Aquifers Using Linked Simulation Optimiziation Approach. Water Resources Management 19: 295–320.

BHATTACHARJYA R.K., DATTA B., and SATISH M.G., 2007. Artificial Neural Networks Approximation of Density Dependent Saltwater Intrusion Process in Coastal Aquifers. Journal of Hydrologic Engineering, 12 (3) : 273–282.

BLOOMFIELD, J.P., WILLIAMS, R.J., GOODDY, D.C., Cape J.N. and Guha, P., 2006. Impacts of Climate Change on the Fate and Behaviour of Pesticides in

Surface and Groundwater – a UK Perspective. Science of the Total Environment 369: 163–177.

BOBBA, A.G., 2002. Numerical Modelling of Salt–Water Intrusion due to Human Activities and Sea–Level Change in the Godavari Delta, India. Hydrol Sci J–J Sci Hydrol 47:S67–S80

CHARMONMAN, S.A., 1965. A Solution of the Pattern of Fresh–Water Flow in an Unconfined Coastal Aquifer, Journal of Geophysical Research. 70(12): 2813–2819.

CHENG, A.H.-D., HALHAL, D., NAJI, A., and OUAZAR, D., 2000. Pumping Optimization in Saltwater–Intruded Coastal Aquifers. Water Resources Research 36(8): 2155–2165.

CHEN, Z., GRASBY, S.E. and OSADETZ, K.G., 2004. Relation between Climate Variability and Groundwater Levels in the Upper Carbonate Aquifer, Southern Manitoba, Canada. Journal of Hydrology, 290: 43–62.

COLLINS, M.A. and GELHAR, L.W., 1971. Seawater Intrusion in Layered Aquifers. Water Resources Research, 7 (4): 971–979.

COLLISON, A., WADE, S., GRIFFITHS, J. and DEHN, M., 2000. Modelling the Impact of Predicted Climate Change on Landslide Frequency and Magnitude in SE England. Engineering Geology 55: 205– 218.

COOPER, H.H., 1959. A Hypothesis Concerning the Dynamic Balance of Fresh Water and Salt Water in a Coastal Aquifer. Journal of Geophysical Research, 64 (4): 461–467.

CROUCHER, A.E. and O'SULLIVAN, M.J., 1995. The Henry Problem for Saltwater Intrusion. Water Resources Research, 31(7): 1809–1814.

DAGAN, G. and BEAR, J., 1968. Solving the Problem of Local Interface Upconing in a Coastal Aquifer by the Method of Small Perturbations. Journal of Hydraulic Research, 6 (1): 15 –44.

DALFES, N., KARACA, M., ŞEN, Ö.L., KINDAP, T., TURUNÇOĞLU U.U., GÖKTÜRK, O.M., BOZKURT, D., 2008. Türkiye için İklim Değişimi Senaryoları. TÜBİTAK – 105G015.

DAS, A. and DATTA, B. 1999. Development of Management Models for Sustainable use of Coastal Aquifers. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 125 (3): 112–121.

DAS, A. and DATTA, B. 2000. Optimization Based Solution of Density Dependent Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Journal of Hydrologic Engineering, 5 (1): 82–89.

DE MARSILY, G., 1986. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers: San Diego, California, Academic Press, 440p.

DEMİR, I., KILIÇ, G., COŞKUN, M., 2008. PRECIS Bölgesel İklim Modeli ile Türkiye için İklim Öngörüleri: HadAMP3 SRES A2 Senaryosu, IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 365–373. ITÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, 25–28 Mart 2008, İstanbul.

DSİ (2008), Devlet Su İşleri, 6. Bölge Müdürlüğü Arşivi, Adana.

DUPUIT, J., 1863. Estudes Thèoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux dècouverts et à travers les terrains permèables (Second Edition ed.). Paris: Dunod.

ELDER, J.W., 1967. Transient convection in a porous medium. Journal of Fluid Mechanics, 27(3): 609-623.

EMEKLI, N., 1993. Numerical Simulation of Saltwater Intrusion in Erzin Groundwater Basin Hatay–Turkey, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

ESSAID, H.I., 1986. A Comparison of the Coupled Fresh Water– Salt Water Flow and the Ghyben–Herzberg Sharp Interface Approaches to Modelling of Transient Behavior in coastal Aquifer Systems. Journal of Hydrology, 80: 169–193.

EVANS, D.G. and RAFFENSPERGER, J.P., 1992. On the Stream Function for Variable–Density Groundwater Flow: Water Resources Research, 28(8): 2141–2145.

EYRE, R.P., 1985. Simulation of Ground–Water Flow in Southeastern Oahu, Hawaii. Groundwater, 23(3): 325–330.

FERREIRA DA SILVA, J.F., and HAIE, N., 2007. Optimal Locations of Groundwater Extractions in Coastal Aquifers. Water Resour Manage 21:1299–1311.

FETTER, C.W., 1972. Position of the saline water interface beneath oceanic islands. Water Resources Research, 8 (5): 1307–1315.

FIGUEROA, O.F., 2003.Groundwater Flow of a Coastal Aquifer, Malibu, California, Master of Science in Geology, California State University, U.S.A.

FINNEY, B.A., SAMSUHADI, D., and WILLIS, R., 1992. Quasi–3–Dimensional Optimization Model of Jakarta Basin. Journal of Water Resources Planning and Management–ASCE, 118:18–31.

FIRST NATIONAL COMMUNICATION OF TURKEY ON CLIMATE CHANGE, 2007. Ministry of Environment and Forestry, Ankara, January 2007.

GEMITZI, A., and TOLIKAS, D., 2004. Development of a Sharp Interface Model that Simulates Coastal Aquifer Flow with the Coupled use of GIS. Hydrogeology Journal, 12:345–356.

GIAMBASTIANI, B.M.S., ANTONELLINI, M., OUDE ESSINK, G.H.P., and STUURMAN, R.J., 2007. Saltwater Intrusion in the Unconfined Coastal Aquifer of Ravenna (Italy): A numerical Model. Journal of Hydrology (2007) 340, 91– 104.

GLOVER, R.E., 1959. The Pattern of Fresh–Water Flow in a Coastal Aquifer. Journal of Geophysical Research, 64 (4): 457–459.

GOODWILL, I., 1993. Mathematical Modeling of Saline Intrusion in Coastal Aquifers, Expert Consultation on Seawater Intrusion into Coastal Aquifer in the Mediterranean Basin and the Near East, Cairo, Egypt, 10–13 October 1993, Food and Agricultural Organization of the United Nations.

GORDU, F., 2000. Simulation of Seawater Intrusion and Optimization of Groundwater Use in the Goksu Delta, Turkey. Master of Engineering Thesis, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, 106 pp.

GORDU, F., YURTAL, R., MOTZ, L.H., 2001. Optimization of Groundwater Use in the Goksu Delta at Silifke, Turkey, First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25.

GUO, W., and BENNETT, G.D., 1998, Simulation of Saline/Fresh Water Flows using MODFLOW; in E. Poeter and others, Proceedings of the MODFLOW '98 Conference, Golden, Colo., v. 1, p. 267–274.

GW VISTAS, 2006. Guide to using Groundwater Vistas. Environmental Simulations Inc., ESI, Pennsylvania, USA.

HAAR, B.L.H., and HEUNKS, E., 1992, Use It or Loose It: A Hydrological Inventarisation of the Göksu Delta, Turkey, Interfaculty of Environmental Studies, State University of Utrecht, the Netherlands, 91 pp.

HALLAJI, K., and YAZICIGIL, H., 1996. Optimal Management of a Coastal Aquifer in. Southern Turkey. Journal of Water Resources Planning and Management. Division of American Society of Civil Engineers, 122: 233–244.

HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., and MCDONALD, M.G., 2000, MODFLOW–2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground–Water Model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground–Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open–File Report 00–92, 121 p.

HELE-SHAW, H.S., 1898. Investigation of the Nature of Surface Resistance of Water and of Stream-line Motion under Certain Experimental Conditions. Transactions of the Institute of Naval Architects 40: 21–46.

HENRY, H.R., 1959. Salt Intrusion into Fresh–Water Aquifers. Journal of Geophysical Research, 64 (11): 1911–1919.

HENRY, H.R., 1960 Saltwater Intrusion into Coastal Aquifers. International Association of Scientific Hydrology Publication, 2:478–487.

HENRY, H. R., 1964. Effects of Dispersion on Salt Encroachment in Coastal Aquifers. U.S. Geological Survey water–supply paper. 1613–C:C71–C84.

HERZBERG, A., 1901. Die Wasserversorung Einiger Nordseebäder. Jour. Für Gaseleuchtung und Wasserversorung, München, 44, 815–819; 45, 842–844.

HILL, M., 1990. Preconditioned Conjugate Gradient 2 (PCG2), a Computer Program for Solving Ground–Water Flow Equations. U.S. Geological Survay Water–Resources Investigations Report 90–4048, 43 p.

HUBBERT, M.K., 1940. The Theory of Groundwater Motion, Journal of Geology, 48(8):785–944.

HUYAKORN, P.S., ANDERSEN, P.F., MERCER, J.W., and WHITE H.O., 1987. Saltwater Intrusion in Aquifers: Development and Testing of a Three–Dimensional Finite Element Model. Water Resources Research, 23(2): 293–312.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE), 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Cambridge University Press: Cambridge.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers. IPCC, Geneva, 1–18.

KARACA, M. ve ŞEN, Ö.L., 2007. Küresel Isınma: Gerçekler ve Belirsizlikler, TÜBİTAK–Genç– Güncel Haber ve Yazılar, http://www.tubitak.gov.tr/home.do?sid=0&cid=773.

KARAHANOĞLU, N., YAZICIGİL, H., DOYURAN, V., EMEKLİ, N. ve HALLAJİ, K., 1995. Kıyı Akiferlerindeki Tatlı Su–Tuzlu Su Girişiminin Sonlu Elemanlar Benzetim Yöntemi ile Modellenmesi. Tübitak Projesi, No: YBAG–0074, ODTÜ, Ankara.

KAYA, N., 1994. Hidrojeolojik Etütlerde Hidrolojik Verileri Toplama ve Değerlendirme Yöntemleri, DSİ Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara.

KIPP, K.L., 1997. Guide to the Revised Heat and Solute Transport Simulator: HST3D–Version 2, U.S.Geological Survey Water–Resources Investigation Report 97–4157, 149 p.

KOPSIAFTIS, G., MANTOGLOU, A. and GIANNOULOPOUSLOS, P., 2009. Variable Density Coastal Aquifer Models with Application to an Aquifer on Thira island. Desalination, 237: 65–80.

LANGEVIN, C.D., SHOEMAKER, W.B., and GUO, WEIXING, 2003, MODFLOW–2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground–Water Model–Documentation of the SEAWAT–2000 Version with the Variable–Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT): U.S. Geological Survey Open–File Report 03–426, 43 p.

LEDOUX, E., SAUVAGNAC, S., and RIVERA, A., 1990. A Compatible Single–Phase/Two–Phase Numerical Model: 1. Modeling the Transient Salt–Water Interface Motion. Groundwater, 28(1): 79–87.

LEE, C.H. and CHENG, R.T.Sh., 1974. On Seawater Encroachment in coastal aquifers. Water Resources Research, 10 (5): 1039–1043.

LU, F., 2003. Groundwater Modeling for the Regina Ares–A Case Study. Master of Applied Science in Environmental Systems Engineering, University of Regina, Saskatchewan, Canada.

MANLEY, R.E. 1997. Interim Report on the Hydrological Study, In: Integrating Development and Conservation in the Goksu Delta. DHKD (The Society for The Protection Of Nature), Istanbul, Turkey.

MCDONALD, M.G., and HARBAUGH, A.W., 1988, A Modular Three–Dimensional Finite–Difference Ground–Water Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, 586 p.

MCNEIL, V.H. and COX, M.E., 2000. Relationship between Conductivity and Analysed Composition in a Large Set of Natural Surface–Water Samples, Queensland, Australia. Environmental Geology, 39(12), 1325–1333.

MERCER, J.W., LARSON, S.P. and FAUST, C.R., 1980. Simulation of salt–water interface motion. Groundwater, 18 (4): 374–385.

MENENGİÇ, M., 1998. Göksu Deltası Yeraltısuyu Kirliliği. Yukseklisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 77 pp.

MOTZ, L.H., GORDU, F., YURTAL, R., 2001. Simulation and Optimization of Groundwater Use in Coastal Areas, AGU 2001 Fall Meeting, American Geophysical Union, CA10-14 Moscone Center San Francisco.

MUALEM, Y. and BEAR, J., 1974. The Shape of the Interface in Steady Flow in a Stratified Aquifer. Water Resources Research, 10 (6): 1207–1215.

MUSKAT, M., 1937. The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. McGraw–Hill, New York, N.Y., 763 s.

NAKAGAWA, K., MOMII, K., and BERNDTSSON, R., 2005. Saltwater Intrusion in Coastal Aquifer – Comparison between the CIP and MOC Simulation Technique. Environmental Modeling and Assessment 10: 323–329.

NARAYAN, K.A., SCHLEEBERGER, C., and BRISTOW, K.L., 2007. Modelling Seawater Intrusion in the Burdekin Delta Irrigation Area, North Queensland, Australia. Agricultural Water Management 89: 217–228.

OECD, Editor,1988. Hydrocoin Project. The International Hydrocoin Project, Level 1: Code Verification, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.

ÖÇK, 2009, Göksu Deltası Yönetim Planı, Özel Çevre Koruma Kurumu Başkanlığı, Ankara.

ÖNOL B., SEMAZZI, F., UNAL, Y. S., DALFES H.N., 2007. Regional Climatic Impacts of Global Warming over the Eastern Mediterranean, Proceedings of the International Conference on Climate Change and Middle East; Past, Present and Future, 20–23 November 2006, Istanbul.

PANICONI, C., KHLAIFI, I., LECCA, G., GIACOMELLI, A. and TARHOUNI, J., 2001. Modeling and Analysis of Seawater Intrusion in the Coastal Aquifer of Eastern Cap–Bon, Tunisia, Transport in Porous Media, 43, 3–28.

PARK, C.–H. and ARAL, M.M., 2004. Multi–Objective Optimization of Pumping Rates and well Placement in Coastal Aquifers. Journal of Hydrology, 290: 80–99.

PINDER, G.F. and COOPER, H.H., 1970. A numerical Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front. Water Resources Research, 6 (3): 875–882.

PINDER, G.F. and PAGE, R.H., 1977. Finite Element Simulation of Salt Water Intrusion on the South Fork of Long Island. In: Finite Elements in Water Resources. Proc. of the First International Conference on Finite Elements in Water Resources, Pentech, London, pp. 251–269.

POLO, J.F. and RAMIS, F., 1983. Simulation of Salt Water–Fresh Water Motion. Water Resources Research, 19 (1): 61–68.

QAHMAN K., LARABI A., OUAZAR D., NAJI A. and CHENG A.H.–D. 2005. Optimal and Sustainable Extraction of Groundwater in Coastal Aquifers. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19: 99–110.

QAHMAN K., and LARABI A., 2006. Evaluation and Numerical Modeling of Seawater Intrusion in the Gaza Aquifer (Palestine). Hydrogeology Journal 14: 713–728.

RANGANATHAN, V. and HANOR, J.S., 1988. Density–Driven Groundwater Flow Near Salt Domes. Chemical Geology, 74: 173–188.

RANJAN, S.P., KAZAMA, S. and SAWAMOTO, M., 2006. Effects of Climate and Land use Changes on Groundwater Resources in Coastal Aquifers. Journal of Environmental Management 80: 25–35.

REILLY, T. E., and GOODMAN, A.S., 1985. Quantitative Analysis of Saltwater–Freshwater Relationships in Groundwater systems–A Historical Perspective. Journal of Hydrology, 80: 125–160.

REILLY, T.E., FRIMPTER, M. H., LEBLANC, D.R., and GOODMAN, A.S.,1987. Analysis of Steady–State Salt–Water Upconing with Application at Truro Well Field, Cape Cod, Massachusetts. Ground Water, 25(2): 194–206.

REILLY, T. E., and GOODMAN, A.S., 1987. Analysis of Saltwater Upconing Beneath a Pumping Well. Journal of Hydrology 89:169–204.

RIVERA, A., LEDOUX, E., and SAUVAGNAC, S., 1990. A Compatible Single–Phase/Two–Phase Numerical Model: 2. Application to a Coastal Aquifer in Mexico. Groundwater, 28(2): 215–223.

SAAD, Y., 1985. Practical Use of Polynomial Preconditionings for the Conjugate Gradient Method, SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 6(4): 865–881.

SANFORD, W.E., and KONIKOW, L.F., 1985, A Two–Constituent Solute Transport Model for Ground Water Having Variable Density: U.S. Geological Survey Water–Resources Investigations Report 85–4279, 89 p.

SCHMORAK, S. and MERCADO, A., 1969. Upconing of Fresh Water–Sea Water Interface Below Pumping Wells, field study. Water Resources Research, 5 (6): 1290–1311.

SCIBEK, J. and ALLEN, D.M., 2006. Comparing Modelled Responses of two High–Permeability, Unconfined Aquifers to Predicted Climate Change. Global and Planetary Change 50: 50–62.

SEGOL, G., PINDER, G.F. and GRAY, W.G., 1975. A Galerkin–Finite Element Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front. Water Resources Research, 11(2): 343–347.

SEGOL, G. and PINDER, G.F., 1976. Transient Simulation of Saltwater Intrusion in Southeastern Florida. Water Resources Research, 12 (1): 65–70.

SHAMIR, U. and DAGAN, G., 1971. Motion of the Seawater Interface in Coastal Aquifers: A Numerical Solution. Water Resources Research, 7 (3): 644–657.

SHAMMAS, M.I. and JACKS, G., 2007. Seawater Intrusion in the Salalah Plain Aquifer, Oman. Environmental Geology 53: 575–587.

SIMMERS, I., 1997. Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi–) Arid Areas, International Association of Hydrogeologists, 19, pp. 277.

STOUFFER, R.J., MANABE, S. and VINNIKOV, K.Y., 1994. Model Assessment of the Role of Natural Variability in Recent Global Warming. Nature, 367: 634–636.

SUGIO, S., NAKADA, K. and URISH, D.W., 1987. Subsurface Seawater Intrusion Barrier Analysis. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(6):767–779.

SU KİRLİLİĞİ KONTROL YÖNETMELİĞİ (SKKY) Teknik Usuller Tebliği, 07.01.1991 tarih ve 20748 sayılı Resmi Gazete, 1991.

ÇBÇKGM (1998), T.C. Çevre Bakanlığı Çevre Koruma Genel Müdürlüğü, http://www.cevreorman.gov.tr /sulak/sulakalan/goksu.htm.

THEODOSSIOU, N.P., 2004. Application of Non–Linear Simulation and Optimization Models in Groundwater Aquifer Management. Water Resources Management, 18: 125–141.

TIRUNEH, N.D., 2004, Simulation and Optimization of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Due to Climate Change and Sea Level Rise, Ph.D. Thesis, University of Florida, U.S.A.

TRAN, T.M., 2004. Multi–Objective Management of Saltwater Intrusion in Groundwater: Optimization under Uncertainty, Master of Science, Delft University, Netherlands.

TÜRKEŞ, M., SÜMER, U. M. ve ÇETINER, G., 2000. Küresel İklim Değişikliği ve Olası Etkileri, Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (13 Nisan 2000, İstanbul Sanayi Odası), 7–24, ÇKÖK Gn. Md., Ankara.

UYUMAZ, A., 2009. İklim Değişikliği ve Su Kaynakları. 5th World Water Forum, Bridging Divides for Water, İstanbul, Turkiye.

ÜNLÜCÖMERT Ö. B., 2003. Silifke–Göksu Deltası Tatlı Su–Tuzlu Su Girişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, 121 s.

VAN DER VEER, P., 1977. Analytical Solution for Steady Interface Flow in a Coastal Aquifer Involving a Phreatic Surface with Precipitation. Journal of Hydrology, 34: 1-11.

VOSS, C.I., 1984. SUTRA: A Finite-Element Simulation Model for Saturated-Unsaturated, Fluid–Density–Dependent Ground–Water Flow with Energy Transport or Chemically Reactive Single–Species Solute Transport: U.S. Geological Survey Water–Resources Investigation Report 84–4369, 409 p.

VOSS, C.I., and SOUZA, W.R., 1987. Variable Density Flow and Solute Transport Simulation of Regional Aquifers Containing a Narrow Freshwater–Saltwater Transition Zone: Water Resources Research, 23(10): 1851–1866.

VOLKER, R.E. and RUSHTON, K.R., 1982. An Assessment of the Importance of some Parameters for Seawater Intrusion in Aquifers and a Comparison of Dispersive and Sharp–Interface Modeling Approaches, Journal of Hydrology, 56: 239–250.

WENTWORTH, C.K., 1951. The Process and Progress of Salt Water Encroachment. International Association Scientific Hydrology, General Assembly, Brussels, 2: 238–248.

WILLIS, R., and FINNEY, B. A., 1988. Planning–Model for Optimal–Control of Saltwater Intrusion. Journal of Water Resources Planning and Management–Asce 114:163–178.

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION), 2002. World Meteorological Organization Statement on the Status of Global Climate in 2002, Geneva.

YAZICIGİL, H., 1998. Yeraltısuları Optimum İşletme Modelleri. İMO Teknik Dergisi, 119, 1639-1657.

YURTAL, R., MOTZ, L. H., GÖRDÜ, F., ve DOĞAN, A. 2004. Optimization of Groundwater Use Subject to Saltwater Intrusion Along the Mediterranean Coast of Turkey. TÜBİTAK–NSF Joint Research and Development Project. Project Number: 9819824. 54 s.

ZHENG, C., and BENNETT, G.D., 1995. Applied Contaminant Transport Modeling, Theory and Practice: Van Nostrand Reinhold, 440p.

ZHENG, C., 1996, MT3D–A Modular Three–Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems: S.S. Papadopulos & Associates, Inc., Bethesda, Md.

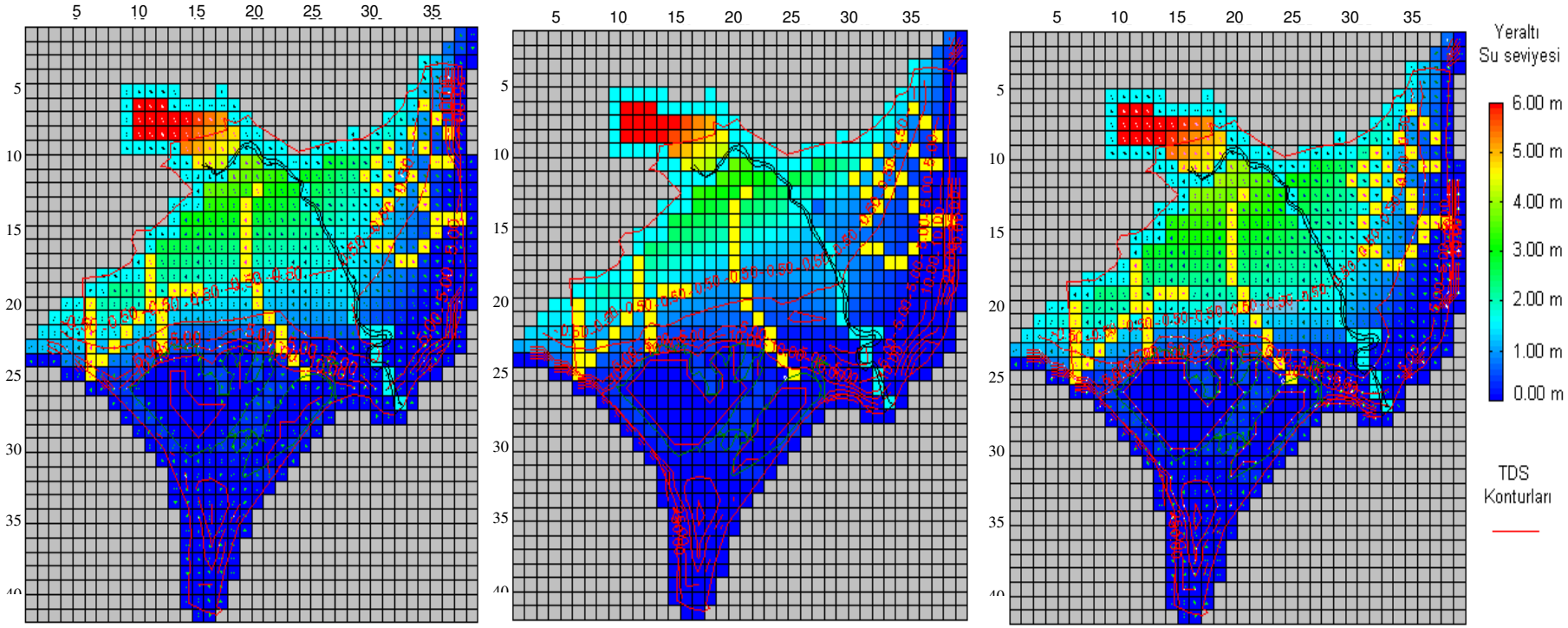
ZHENG, C., and WANG, P.P., 1998, MT3DMS, A Modular Three–Dimensional Multi Specie Stransport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems: Vicksburg, Miss., Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers.

ÖZGEÇMİŞ

Murat ÇOBANER, 1978 yılında Manisa'nın Soma ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Soma'da, lise öğrenimini Bursa Demirtaşpaşa Anadolu Teknik Lisesinde tamamladı. 1996 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Lisans öğrenimine başladı. 2000 yılında " Beton Akışkanlaştırıcılarının Basınç Dayanımına ve İşlenebilirliğe Etkisi " hakkında taptığı yıl içi projesiyle mezun oldu. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat mühendisliği Programında Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. 2001 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Hidrolik Ana Bilim Dalına Araş. Gör. olarak atandı. 2003 yılında Yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2004 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora eğitimine başladı. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

EK-1

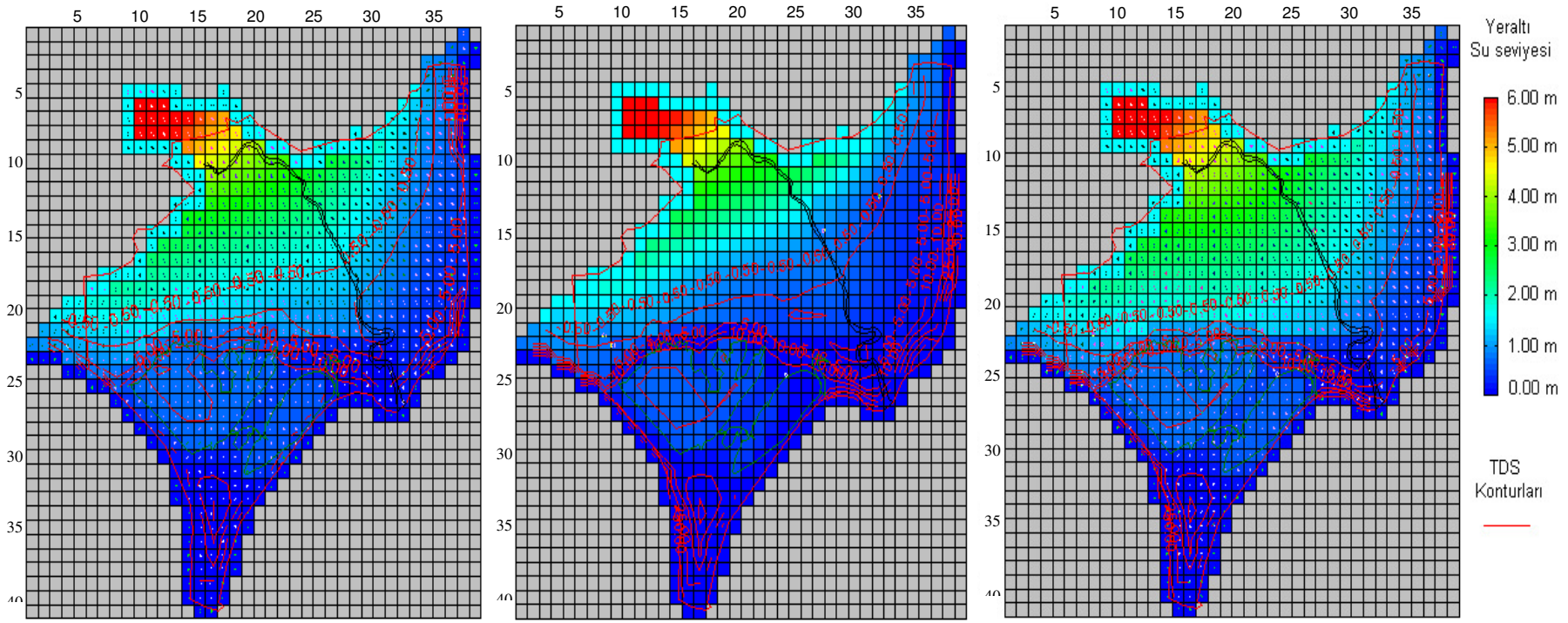
GÖKSU DELTASI AKİFERİNİN KARARLI HALDE, POMPAJIN %50 ARTTIĞI VE AZALDIĞI DURUMLARDA TABAKALARA GÖRE YERALTI SU SEVİYELERİ VE TDS DAĞILIMLARI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 1

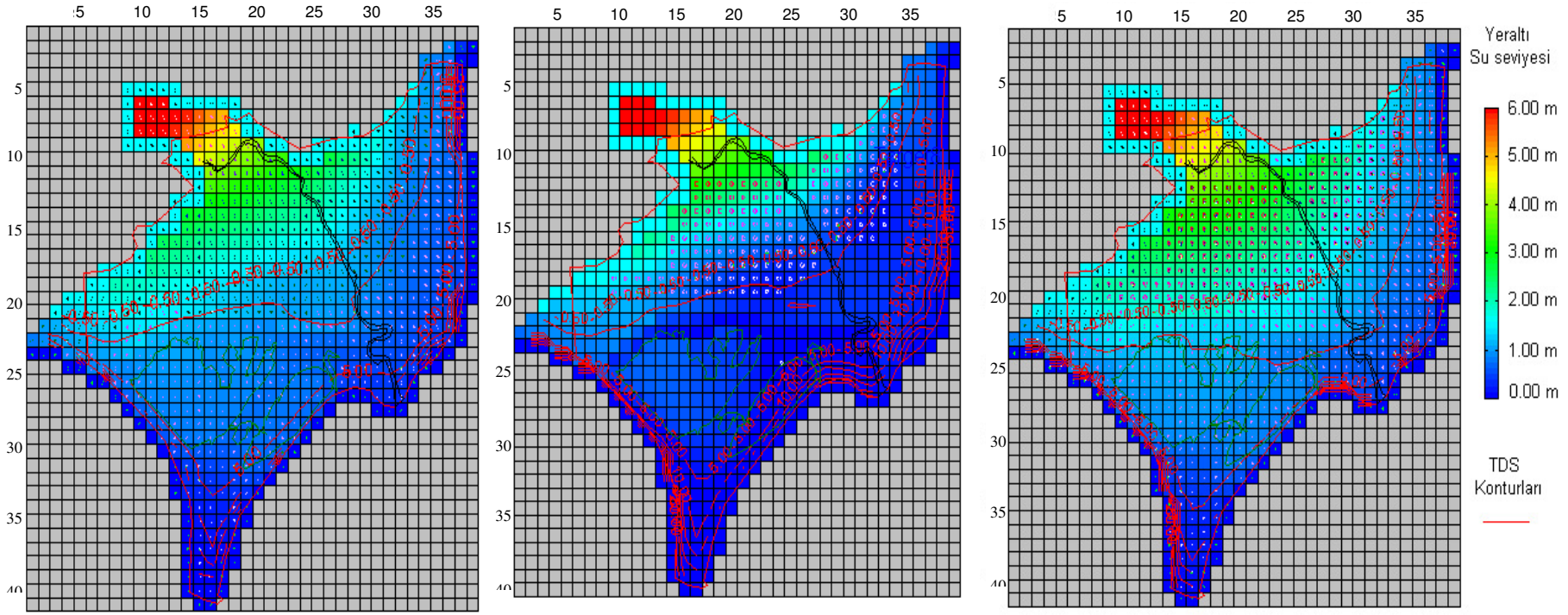
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 2

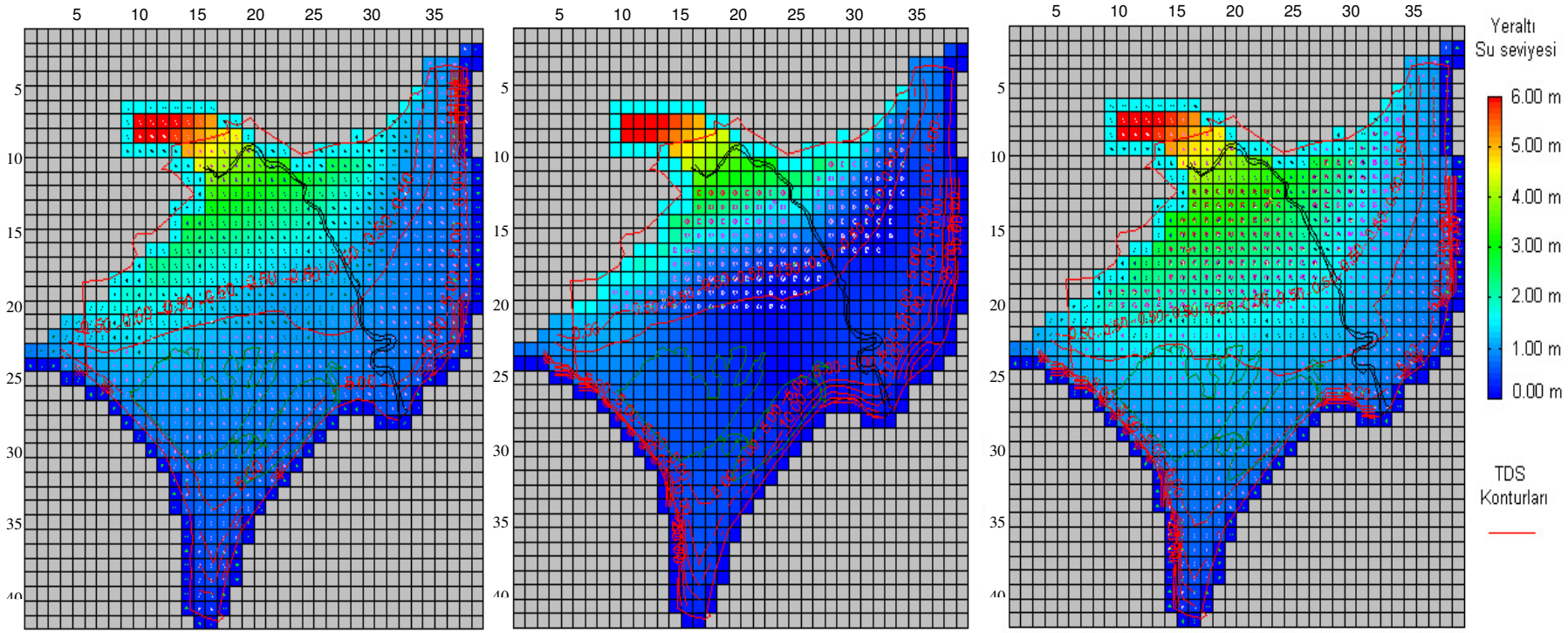
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 3

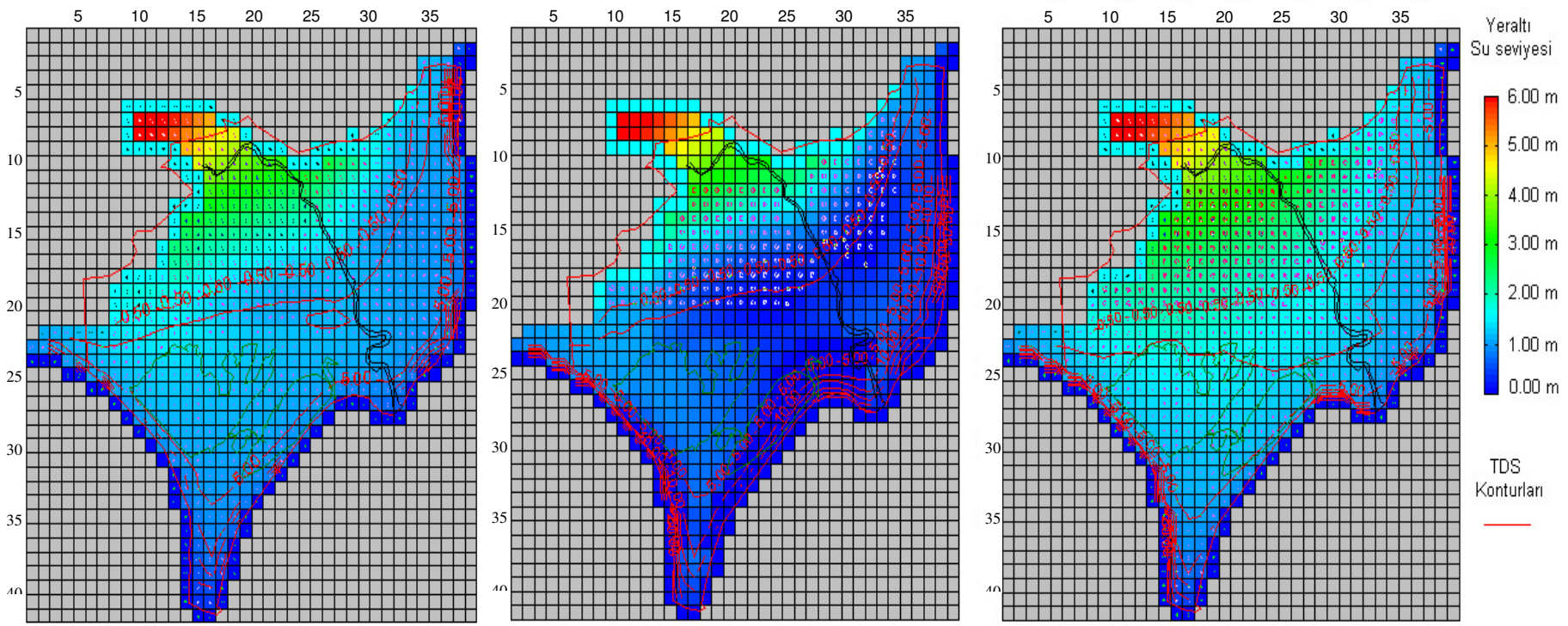
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 4

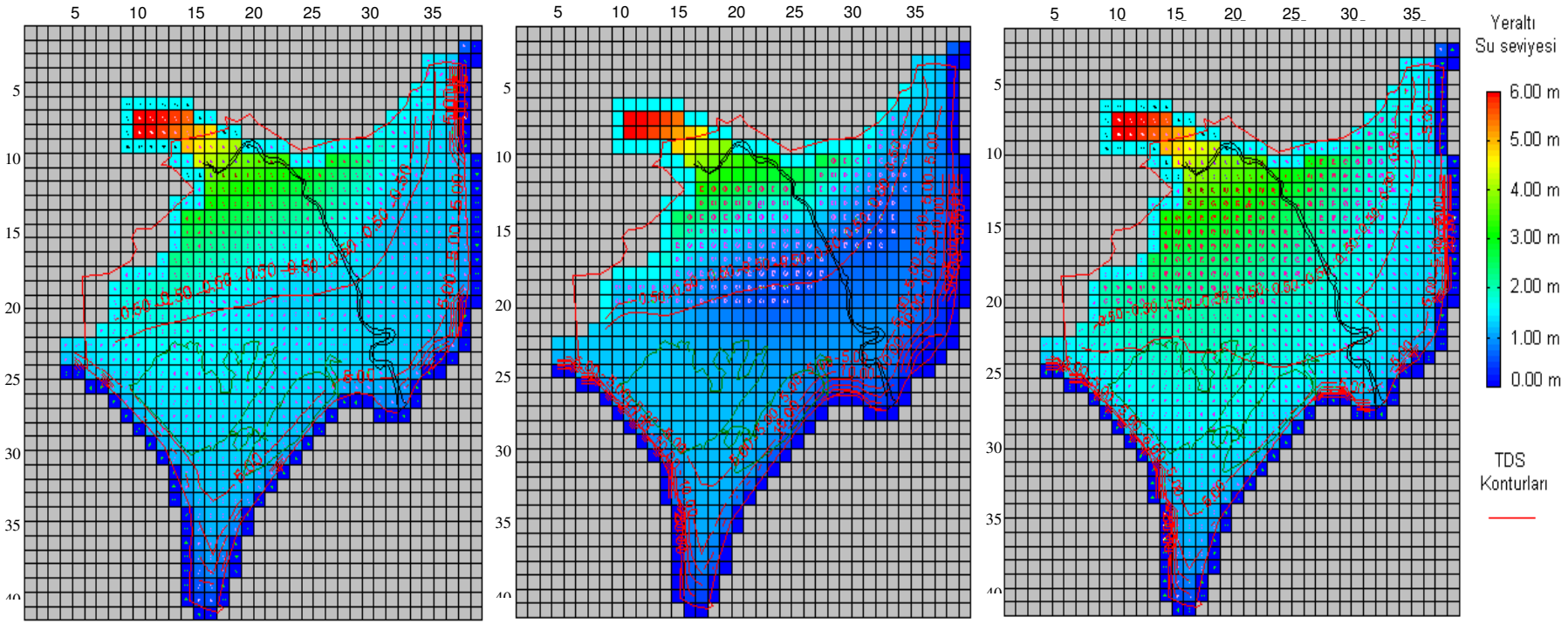
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 5

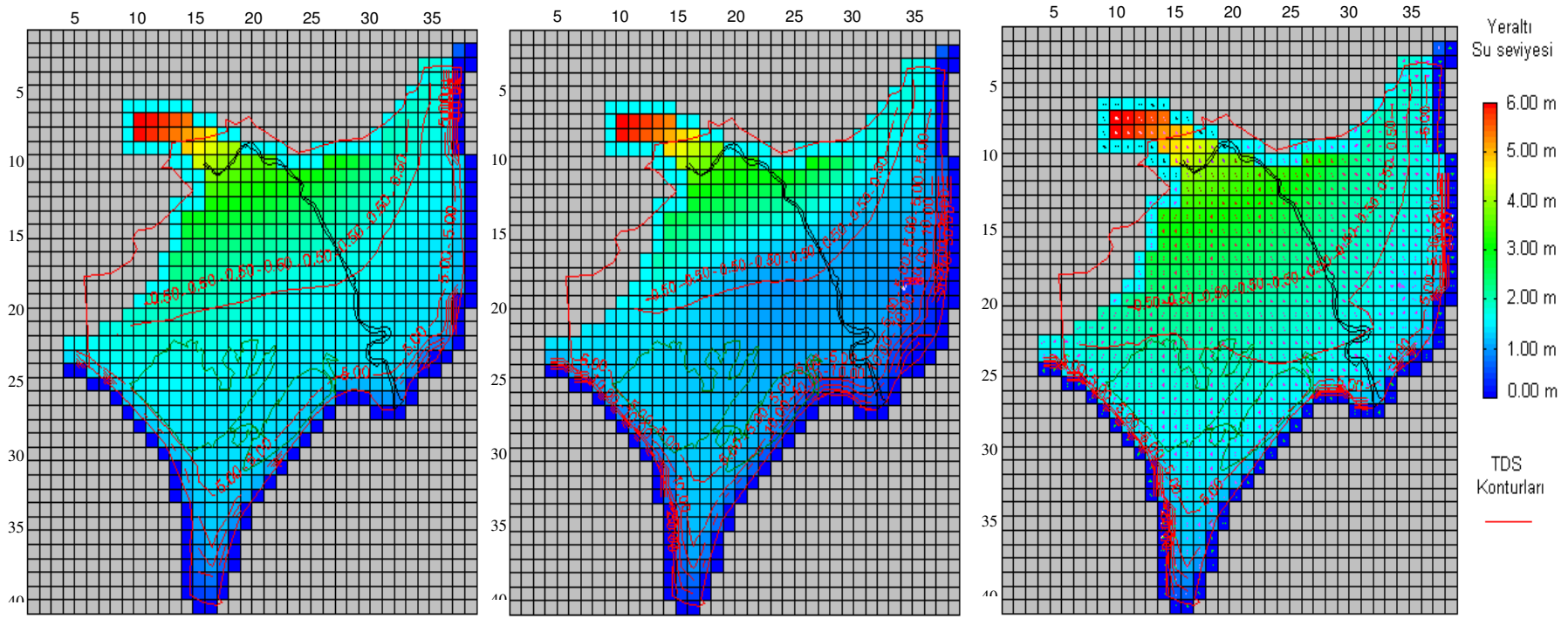
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 6

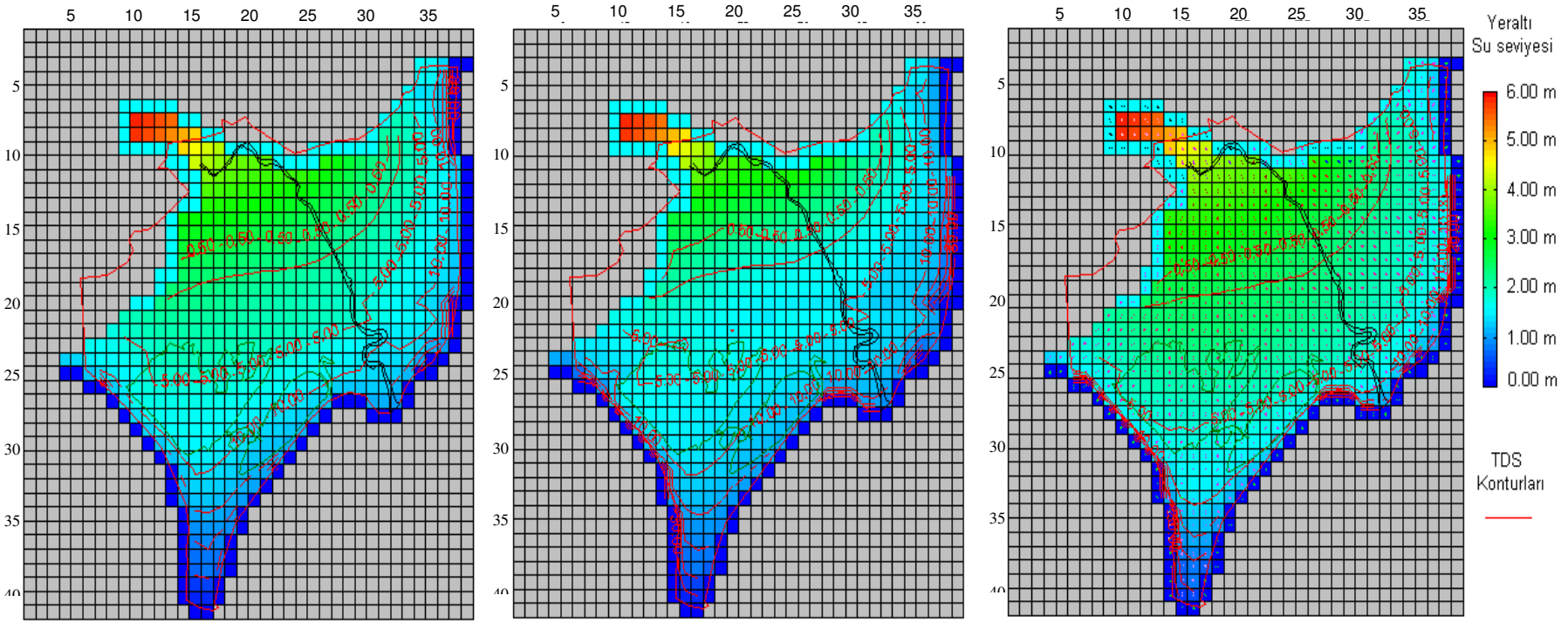
EK-1'İN DEVAMI



Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

Tabaka 7

EK-1'İN DEVAMI

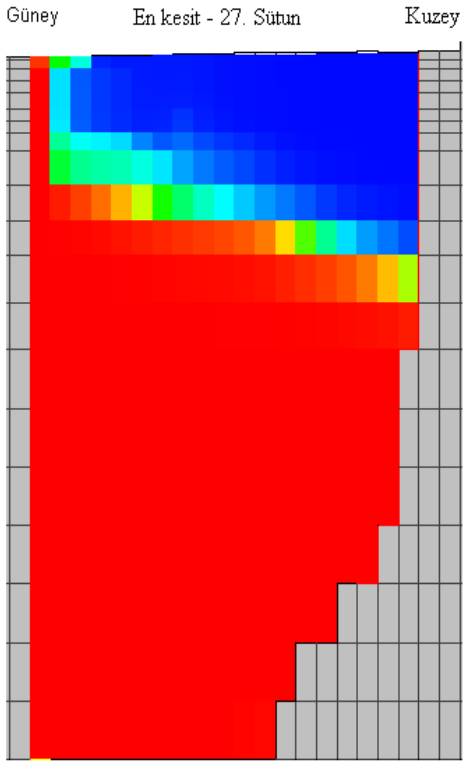


Kararlı Hal **Pompajın %50 arttığı** **Pompajın %50 azaldığı**

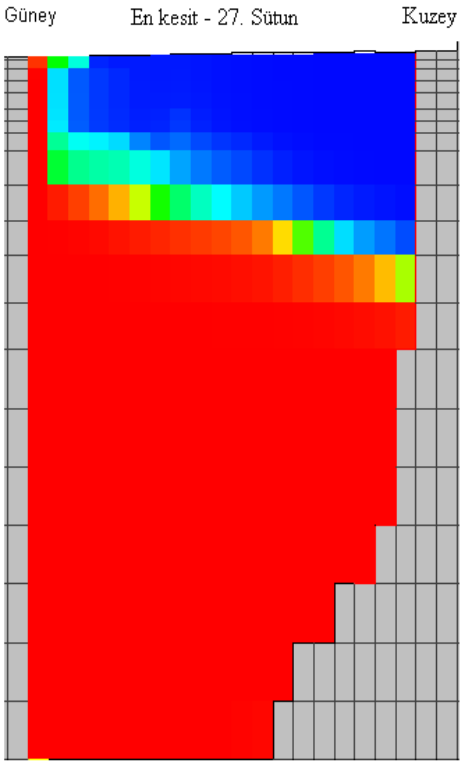
Tabaka 8

EK-2

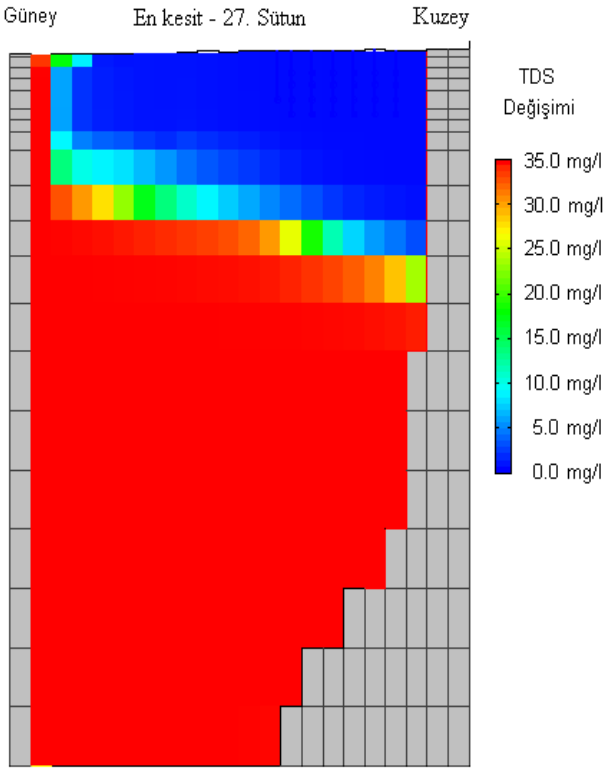
GÖKSU DELTASI AKİFERİNİN KARARLI HALDE, POMPAJIN %50 ARTTIĞI VE AZALDIĞI DURUMLARDA EN KESİT BOYUNCA TDS DAĞILIMLARI



Kararlı Hal



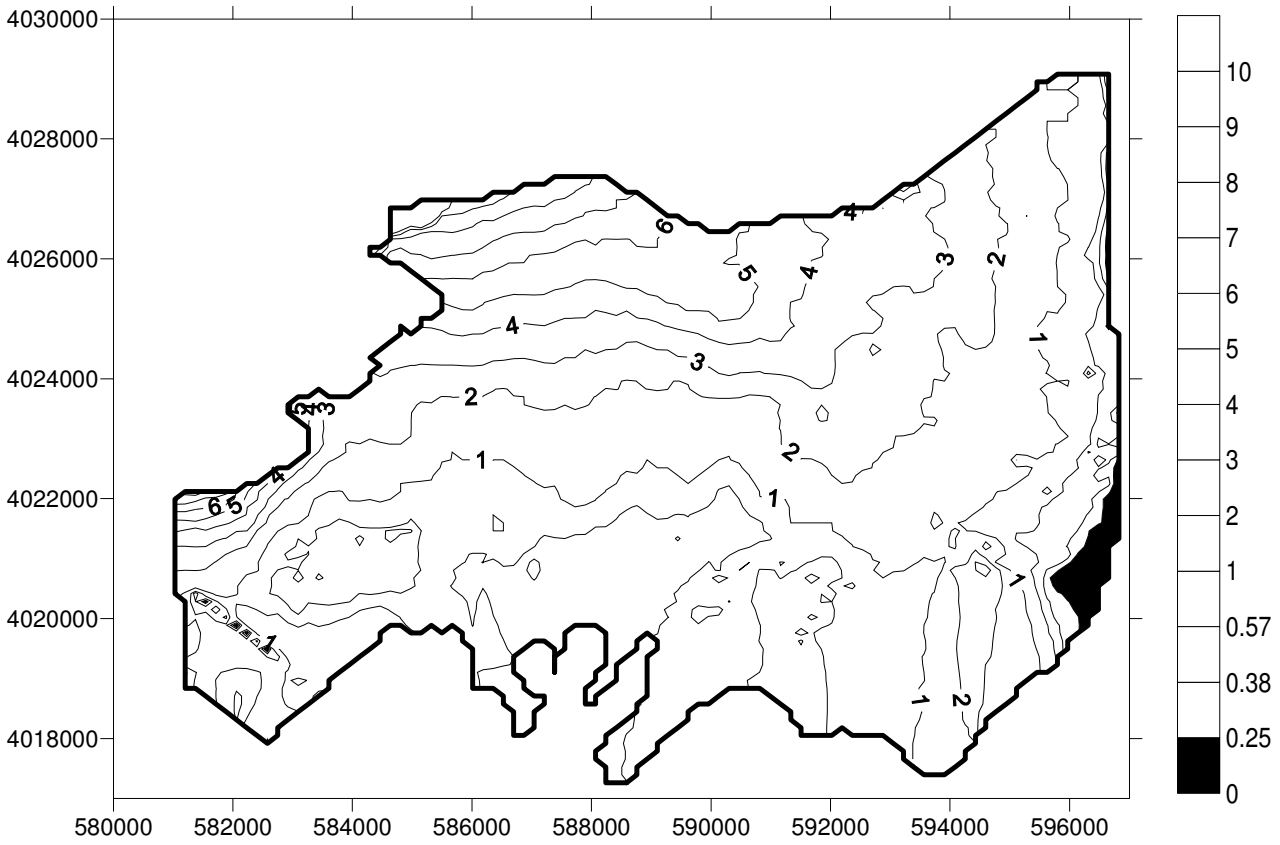
Pompajın %50 arttığı



Pompajın %50 azaldığı

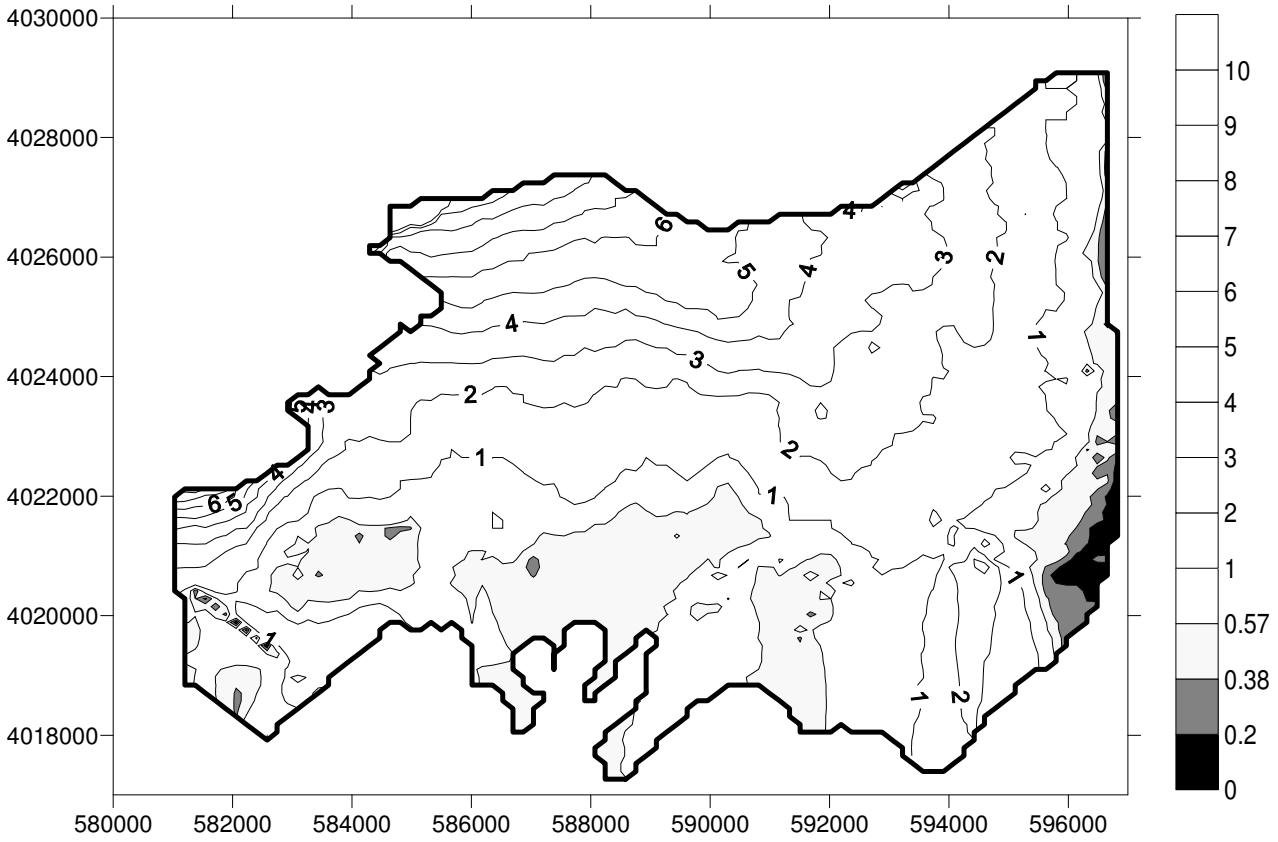
EK-3

SENARYO 1'İN ORTALAMA DEĞERİNE GÖRE SULAR ALTINDA KALACAK BÖLGELER (Δh=0.25 m)



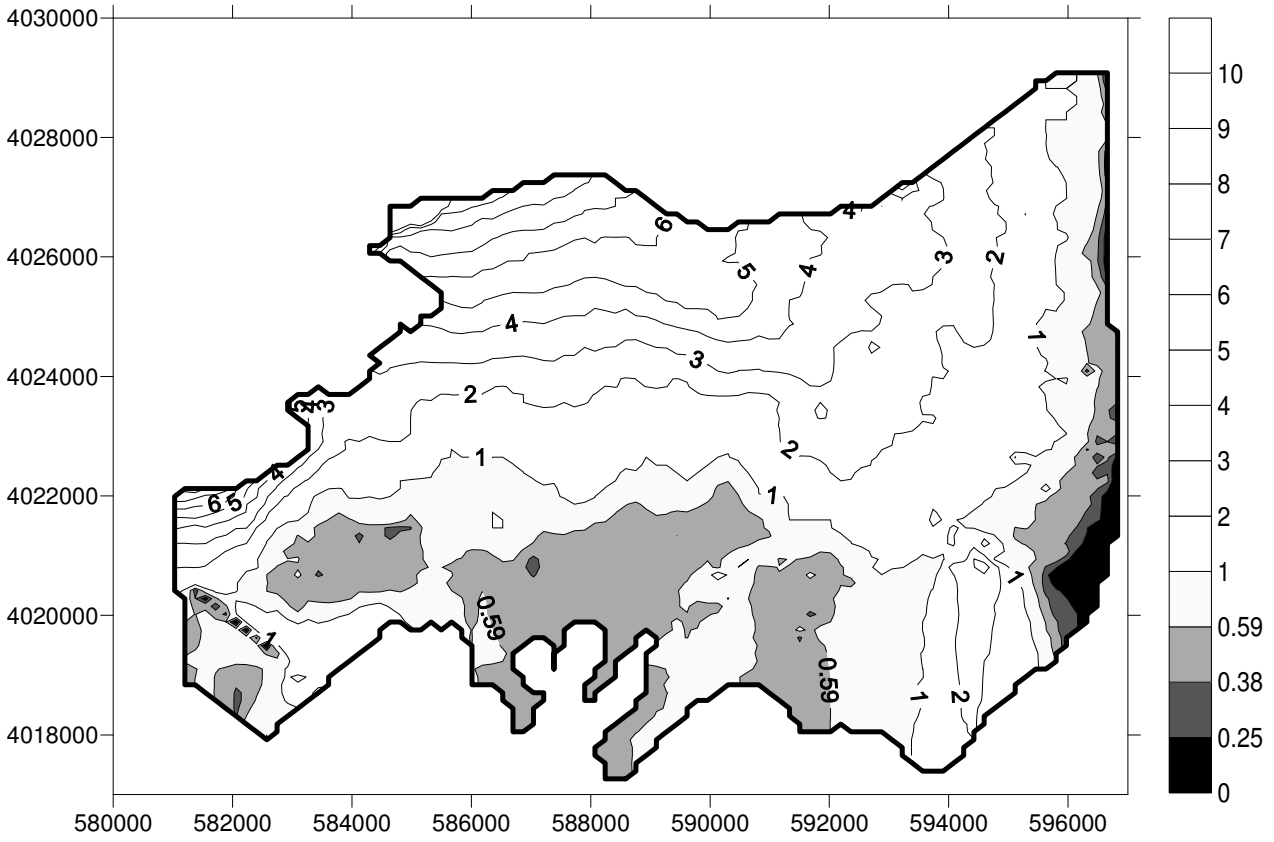
EK-4

SENARYO 2'NİN ORTALAMA DEĞERİNE GÖRE SULAR ALTINDA KALACAK BÖLGELER (Δh=0.28 m)



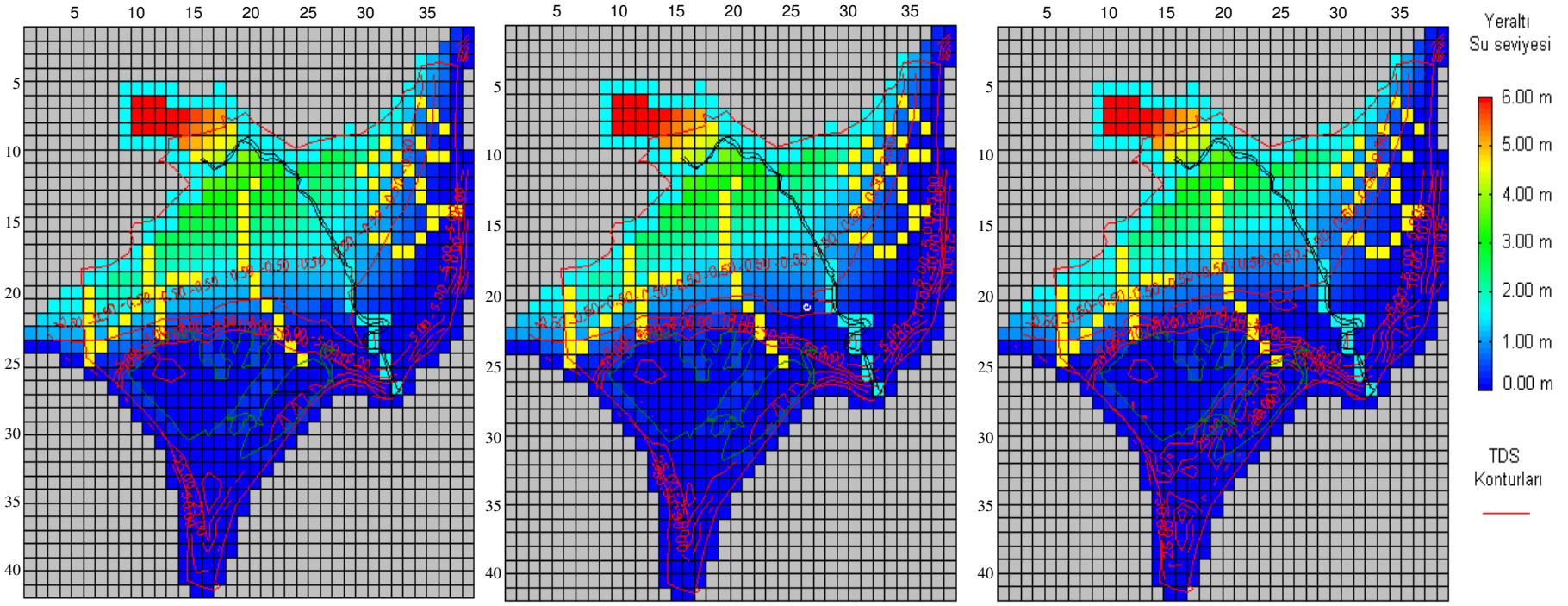
EK-5

SENARYO 3'ÜN ORTALAMA DEĞERİNE GÖRE SULAR ALTINDA KALACAK BÖLGELER (Δh=0.59 m)



EK-6

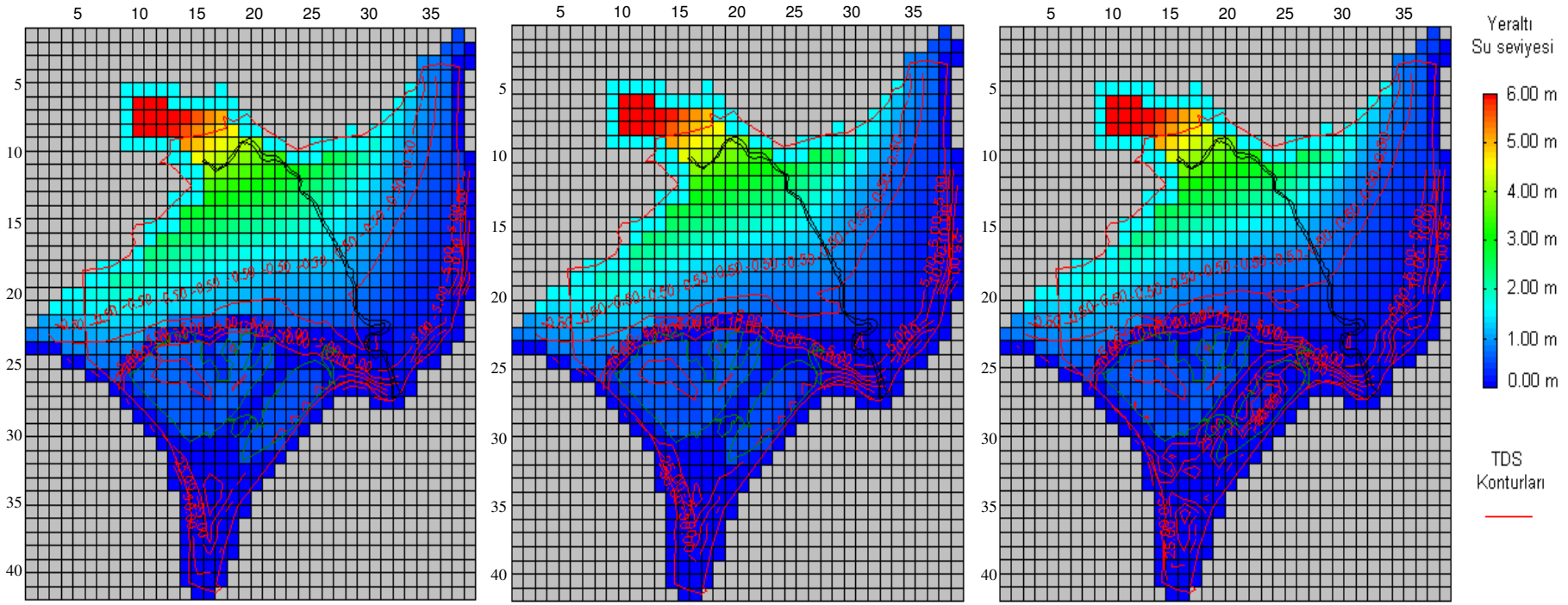
GÖKSU DELTASI AKİFERİNİN SENARYO 1DE, SENARYO 2 VE AZALDIĞI DURUMLARDA TABAKALARA GÖRE YERALTI SU SEVİYELERİ VE TDS DAĞILIMLARI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 1

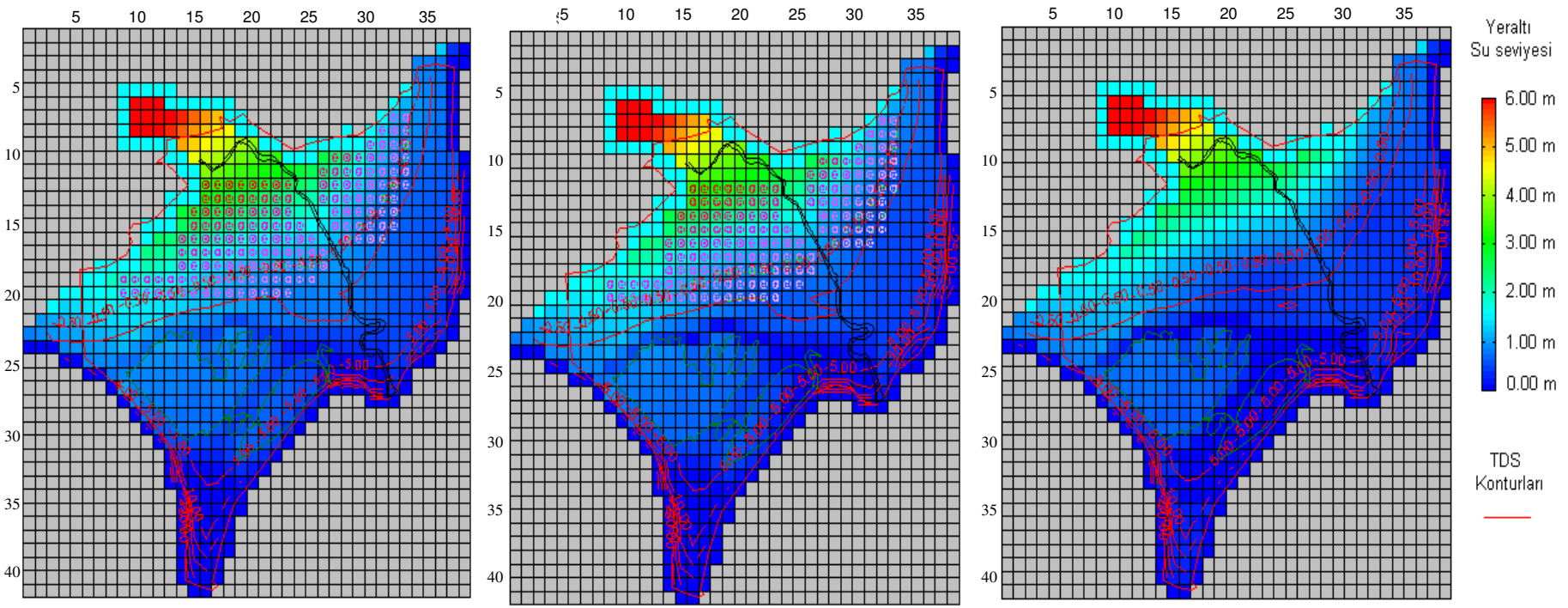
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 2

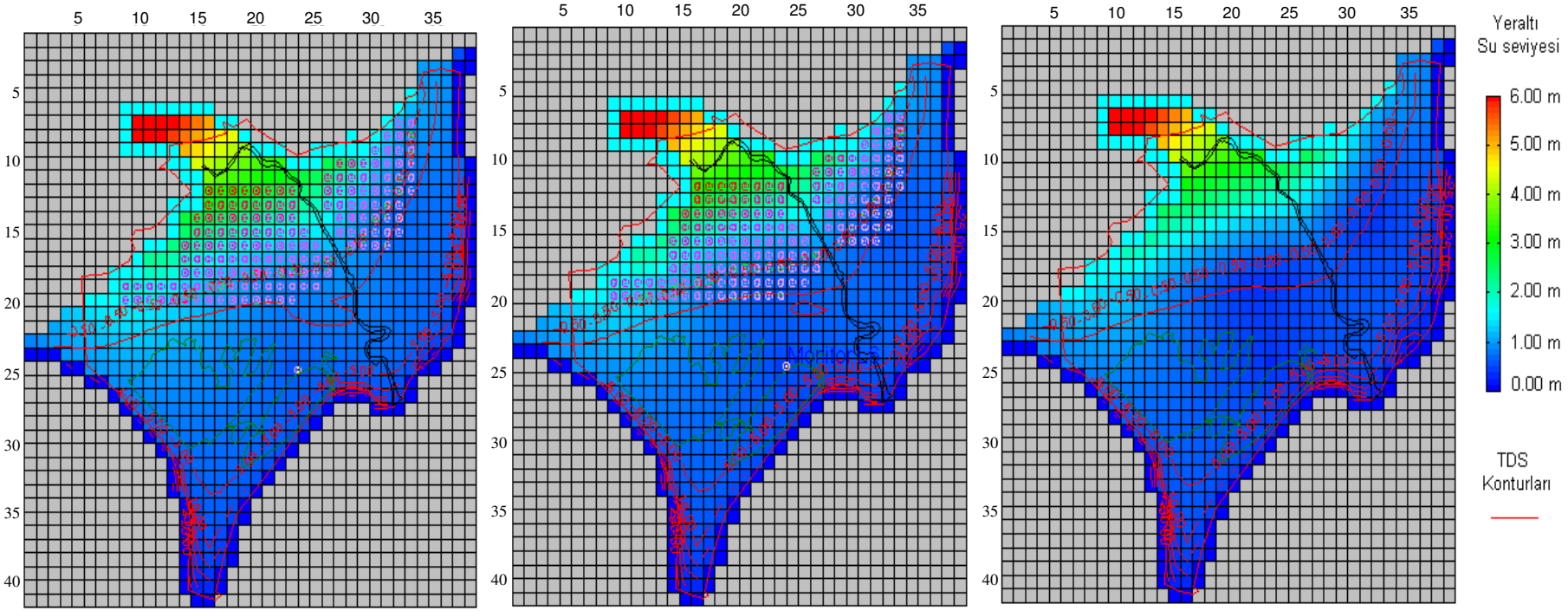
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 3

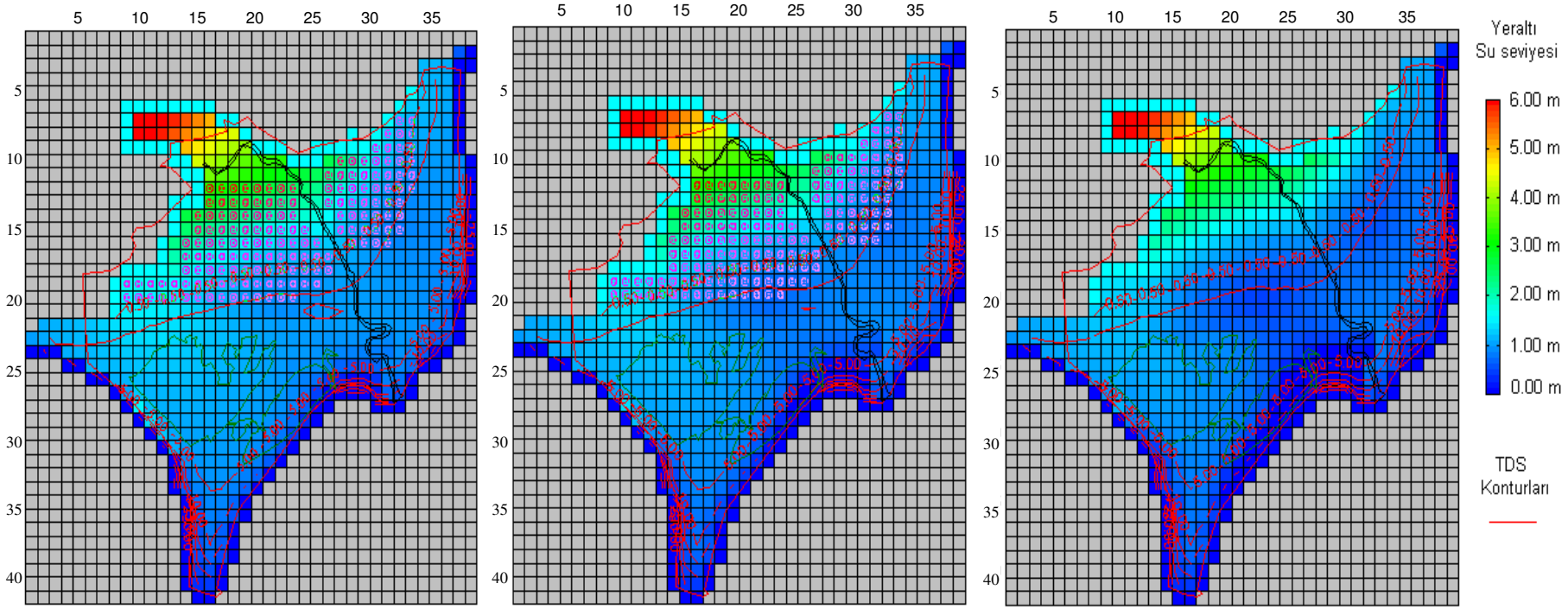
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 4

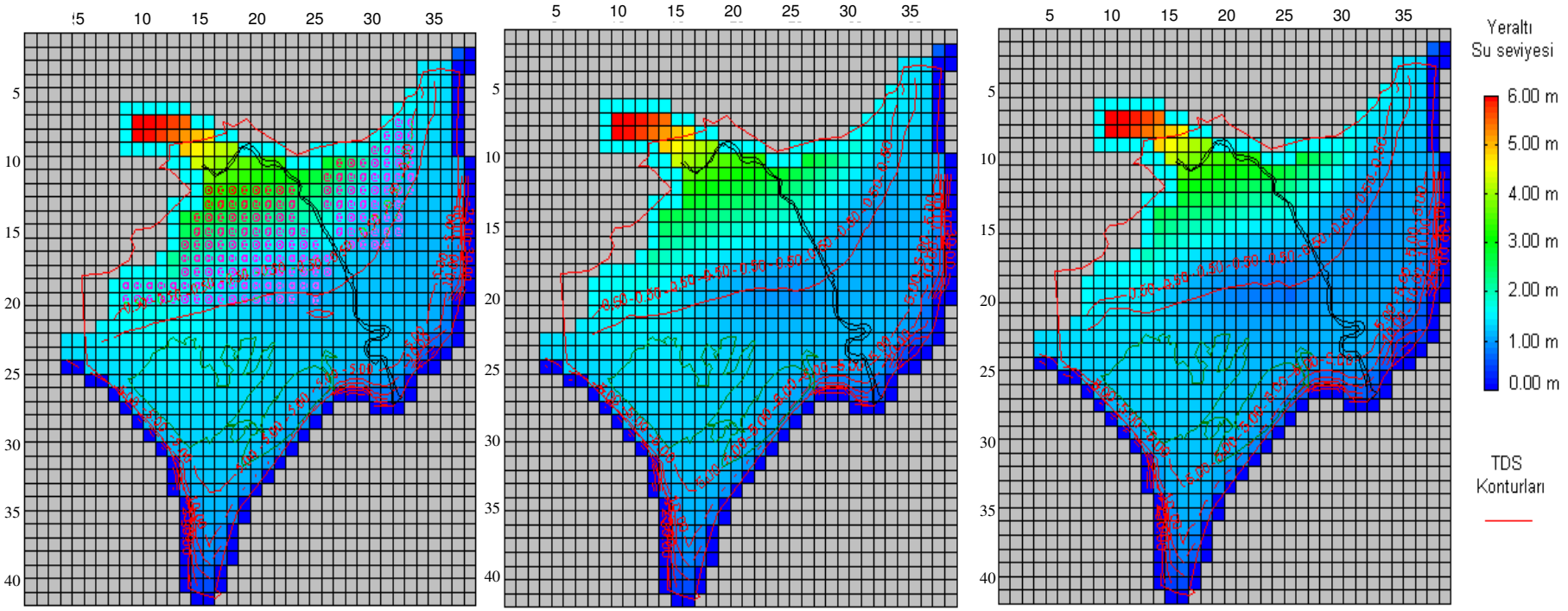
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 5

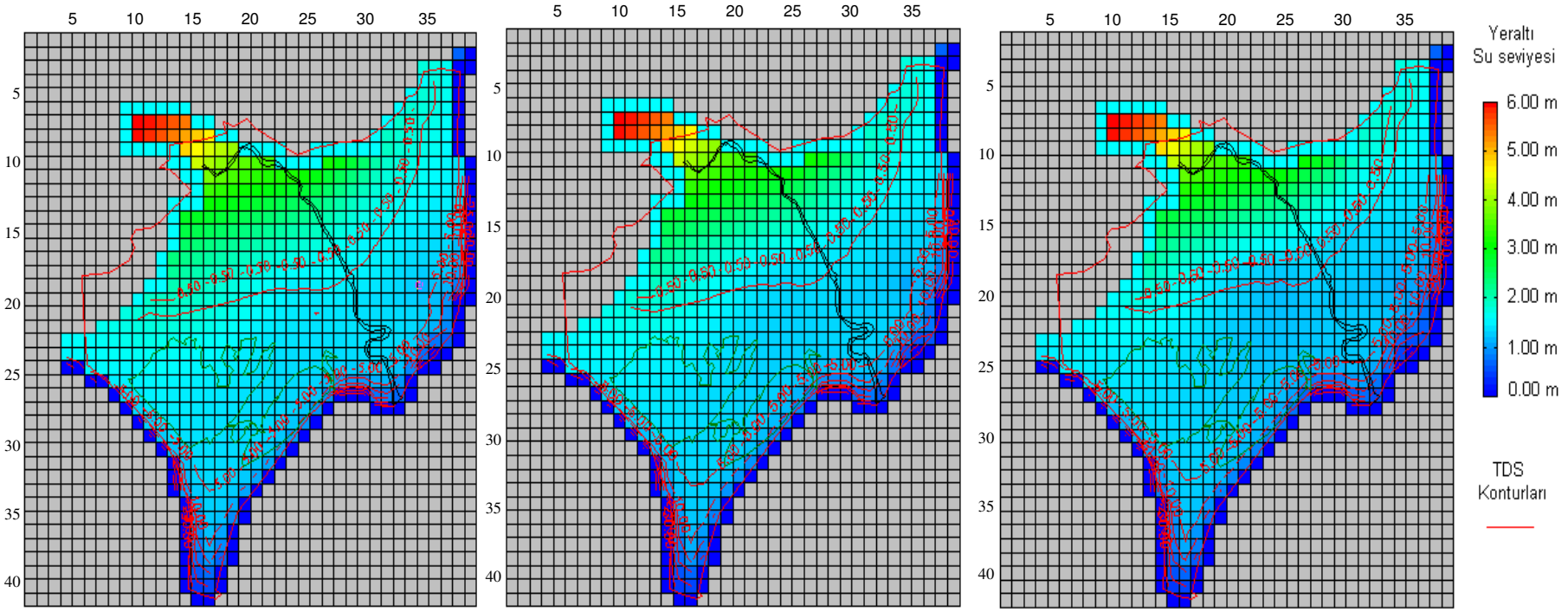
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 6

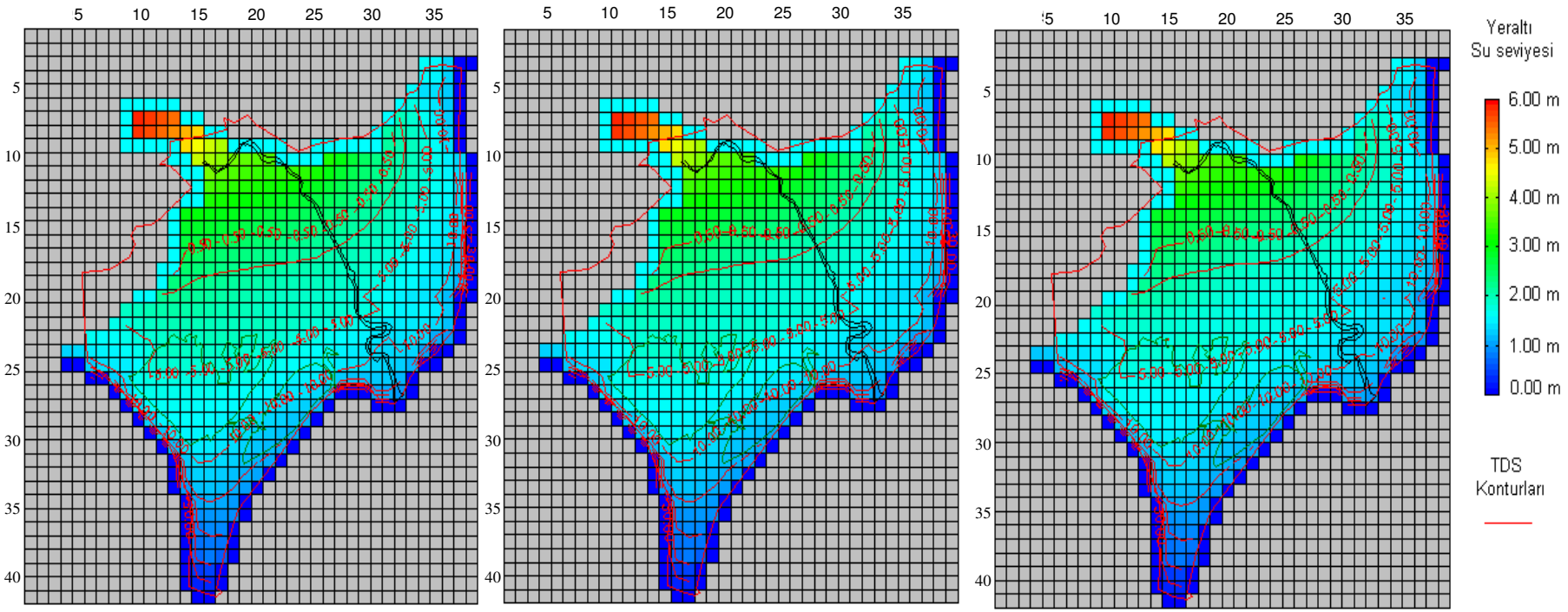
EK-6'NIN DEVAMI



Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

Tabaka 7

EK-6'NIN DEVAMI

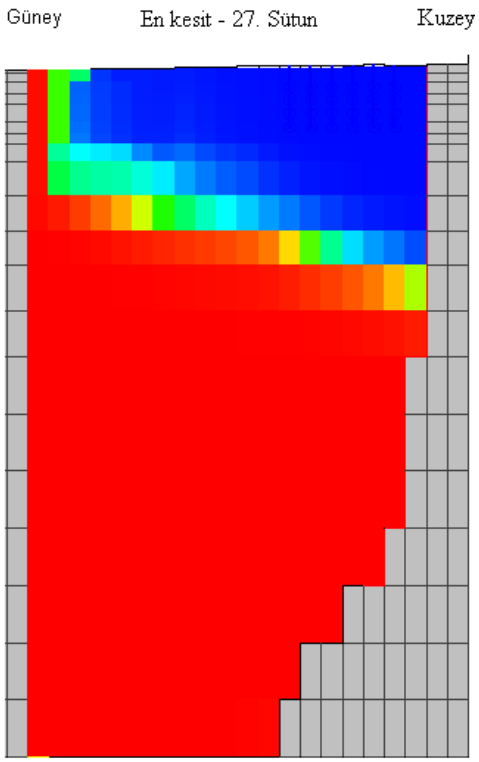


Senaryo 1 **Senaryo 2** **Senaryo 3**

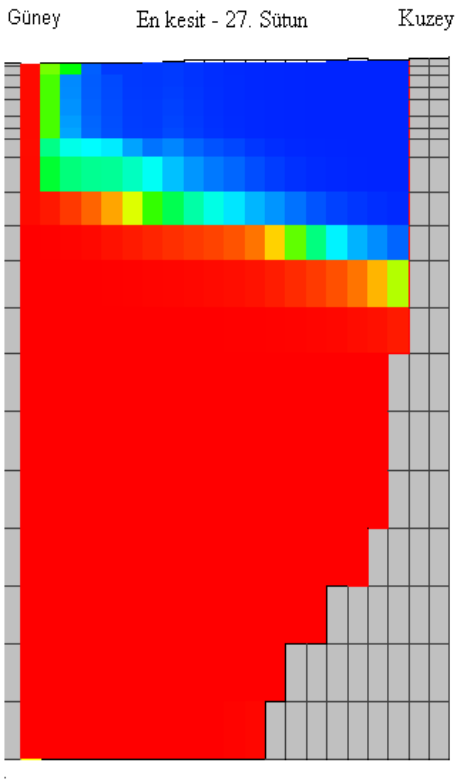
Tabaka 8

EK-7

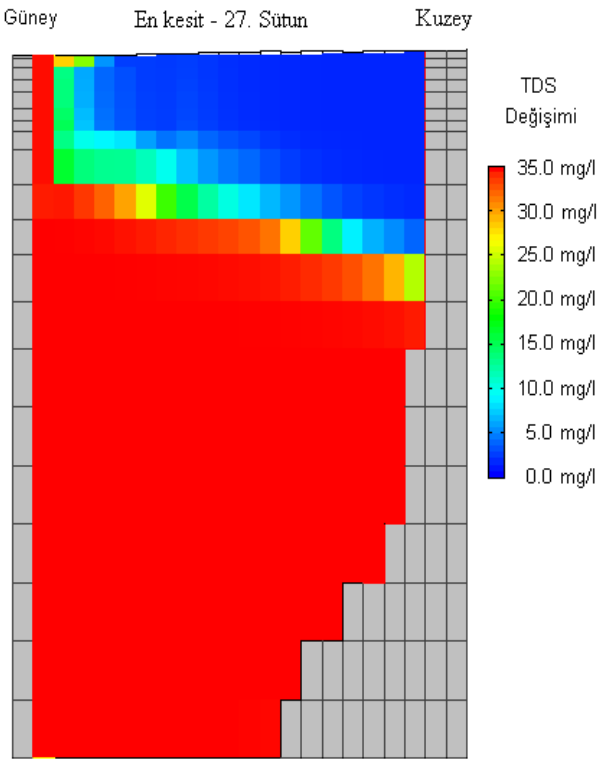
GÖKSU DELTASI AKİFERİNİN SENARYO 1, SENARYO 2 VE SENARYO 3'de EN KESİT BOYUNCA TDS DAĞILIMLARI



Senaryo 1



Senaryo 2



Senaryo 3