ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Mehmet Eyyüp KAVŞUT

YER ALTI SUYU-YER ÜSTÜ SUYU ETKİLEŞİM MODELİ: SİLİFKE-GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2019

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YER ALTI SUYU-YER ÜSTÜ SUYU ETKİLEŞİM MODELİ: SİLİFKE-GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

Mehmet Eyyüp KAVŞUT

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 01/02/2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....	.....	.....
Prof. Dr. Recep YURTAL	Prof. Dr. M. Sami AKÖZ	Prof. Dr. Mahmut ÇETİN
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE
.....	.....	
Prof. Dr. Fatih ÜNEŞ	Doç. Dr. Zübeyde HATİPOĞLU BAĞCI	
ÜYE	ÜYE	

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No:MMF2012D11

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

ÖZ

DOKTORA TEZİ

YER ALTI SUYU-YER ÜSTÜ SUYU ETKİLEŞİM MODELİ: SİLİFKE-GÖKSU DELTASI ÖRNEĞİ

Mehmet Eyyüp KAVŞUT

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Recep YURTAL
Yıl: 2019, Sayfa: 122
Jüri : Prof. Dr. Recep YURTAL
: Prof. Dr. M. Sami AKÖZ
: Prof. Dr. Mahmut ÇETİN
: Prof. Dr. Fatih ÜNEŞ
: Doç. Dr. Zübeyde HATİPOĞLU BAĞCI

Yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşim oldukça karmaşıktır ve bu etkileşimi özellikle de eş zamanlı olarak simüle etmek zorlu bir süreçtir. Bu nedenle yakın zamana kadar iki sistem birbirinden ayrı olarak çalışılmış ve hidrolojik modeller genelde yer üstü veya yer altı su kaynaklarından sadece birine odaklanarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada içerisinde nehir, drenaj kanalları, sulak alan ve lagün gibi çeşitli yer üstü suları bulunan Göksu Deltasında yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Bunun için yer altı ile yer üstü sularını eş zamanlı olarak modelleyebilen GSFLOW (Ground-water Surface-water Flow) birleşik akım modeli kullanılmıştır. GSFLOW, Yağış-Akış Modelleme Sistemi PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) ile Modüler Yer Altı Suyu Akım Modeli MODLFOW-2005'in (Modular Ground-Water Flow Model) birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Entegrasyon öncesinde PRMS ile MODFLOW-2005 modelleri kurulmuş ve kalibrasyonları yapılmış, daha sonra GSFLOW kalibre edilmiştir. MODFLOW-2005'in kalibrasyonu kararlı akım şartlarında, modellenen ve ölçülen yer altı su seviyelerinin karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. Bunun için arazide belirlenen 18 adet kuyuda bir yıl boyunca statik su seviyeleri ölçülmüştür. Modelleme sonucunda araştırma alanında yer altı ile yer üstü suları arasında sürekli ve dinamik bir etkileşim olduğu sonucuna varılmıştır. Alanı daha iyi temsil edecek şekilde ve daha fazla sayıda kuyuda ölçüm yapılması, arazinin jeolojik enkesitinin belirlenmesi, ayrıntılı topoğrafya haritalarının oluşturulması ve Deltada henüz faaliyete geçmiş olan yeni sulama projesinin de dahil edilerek çalışmanın geliştirilmesi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi, Göksu Deltası, PRMS, MODFLOW-2005, GSFLOW

ABSTRACT

PhD THESIS

GROUNDWATER-SURFACE WATER INTERACTION MODEL: A CASE STUDY IN SILIFKE-GOKSU DELTAIC PLANE

Mehmet Eyyüp KAVŞUT

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

Supervisor : Prof. Dr. Recep YURTAL
Year: 2019, Page: 122
Jury : Prof. Dr. Recep YURTAL
: Prof. Dr. M. Sami AKÖZ
: Prof. Dr. Mahmut ÇETİN
: Prof. Dr. Fatih ÜNEŞ
: Assoc. Prof. Dr. Zübeyde HATİPOĞLU BAĞCI

The interaction between groundwater and surface water is quite complex and it is a difficult process to simulate this interaction, particularly simultaneously. Therefore until recently, the two systems have been studied separately and hydrological models have been developed usually focusing on only one of the surface water or groundwater resources. In this study, the interaction between groundwater and surface water was investigated in the Göksu Deltaic Plain which has various surface waters such as river, drainage channels, wetland and coastal lagoon. To this end, the GSFLOW integrated flow model, which can simulate groundwater and surface waters simultaneously, is used. GSFLOW was created by combining surface water model PRMS and groundwater flow model MODLFOW-2005. Before integration, PRMS and MODFLOW-2005 models were established and calibrated, then GSFLOW calibrated. The calibration of MODFLOW-2005 was made under steady state flow conditions, compared with modeled and measured groundwater levels. For this, static water depths were measured for one year in the 18 wells determined in the field. As a result of modeling, it was concluded that there is a continuous and dynamic interaction between groundwater and surface water in the research area. It has been proposed to improve the study by measuring in a larger number of wells to better represent the area, determination of the geological cross section, creating of detailed topographic maps and including the new irrigation project which has been in operation yet.

Keywords: Groundwater surface water interaction, Goksu Deltaic Plane, PRMS, MODFLOW-2005, GSFLOW

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Yer altı ve yer üstündeki sular sürekli bir etkileşim halindedir. Bu durum yer altı suyunu daha da önemli kılmaktadır. Su kaynakları arasındaki bu ilişki doğada farklı şekillerde gerçekleşebilmektedir. Yer üstü sularının yer altı suyu sistemlerinden gelen su ve çözünmüş maddelerle beslenmesi sıklıkla görülürken, bu suların yer altı suyuna önemli bir kaynak olduğu ve yer altı suyu kalitesinde belirgin değişikliklere sebep olduğu bir gerçektir. Bu nedenle, etkili bir arazi ve su yönetimi için yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki hidrolik bağlantının açık bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir.

Yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşimin oldukça karmaşık olmasından dolayı bu etkileşimi simüle etmek zor bir süreçtir. Bu nedenle çoğu zaman iki sistem birbirinden ayrı olarak çalışılmış ve hidrolojik modeller genelde yer üstü veya yer altı su kaynaklarından birine daha fazla odaklanarak geliştirilmiştir. Bazı modeller yüzeysel akış simülasyonları üzerinde yoğunlaşırken yer altı suyu ile ilgili bileşenler basite indirgenmiştir (PRMS, SWAT vb.). Benzer şekilde yer altı suyu modelleri, yer üstüne ait kısımları daha basit bir biçimde ele almıştır (MODFLOW vb.)

Yer altı ve yer üstü suları arasındaki etkileşimi daha doğru bir şekilde tespit edebilmek için eş zamanlı modelleme yapabilen çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS, United States Geological Survey) tarafından geliştirilen, entegre hidrolojik modelleme aracı GSFLOW (Ground-water Surface-water Flow) akım modeli bu modellere örnektir. Bu çalışmada bünyesinde nehir, drenaj kanalları, sulak alan ve lagün gibi çeşitli yer üstü sularını barındıran, Mersin İli Silifke İlçesinde bulunan Göksu Deltasında yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşim GSFLOW akım modeli kullanılarak araştırılmıştır.

Çalışma alanının hidrolojik durumu, iklim şartları, arazi kullanımı ve jeolojisi gibi farklı havza karakteristikleri göz önüne alınarak, Yağış-Akış

Modelleme Sistemi (PRMS, Precipitation-runoff modeling system), Modüler Yer Altı Suyu Akım Modeli (MODFLOW-2005, Modular groundwater flow model) ve GSFLOW modelleri oluşturulmuş, üç modelin bağımsız kalibrasyonları yapılarak yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi belirlenmeye çalışılmıştır.

Kalibrasyonlar birbirini takip eden üç aşamada yapılmıştır. Öncelikle PRMS kendi içinde yine üç aşamalı olarak 1974-1997 yıllarını kapsayan zaman aralığı için kalibre edilmiş, daha sonra kararlı halde MODFLOW-2005'in kalibrasyonu yapılmıştır. Son olarak birleşik model GSFLOW'un kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca GSFLOW'un kalibrasyon periyodu dışında herhangi bir zaman aralığındaki tahmin gücünü teyit etmek için 1998-2013 yıllarını kapsayan veriler kullanılarak doğrulama işlemi yapılmıştır.

Başlangıçta PRMS, MODFLOW-2005'ten bağımsız olarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon, ayrık örnek yaklaşımıyla (split sample approach), ölçülen verilerin birbiriyle çakışmayan üç farklı dönemi için modelin hazırlık, kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında kullanılmasıyla yapılmıştır. 1971 ile 1973 su yılları arasındaki veriler bazı model parametrelerinin iyileştirilmesi, 1974 ile 1997 arasındaki veriler kalibrasyonu, 1998 ile 2013 yıllarını kapsayan veriler ise kalibre edilmiş modelin doğrulaması için kullanılmıştır. Ek Çizelge 2'de belirtilmiş olan, akımı etkileyen bazı parametreler, her seferinde bir tanesi değiştirilmek suretiyle simüle edilen ve ölçülen akımların uyumlu hale gelmesi sağlanmıştır.

MODFLOW-2005'in kalibrasyonu kararlı halde, simüle edilen ve ölçülen yer altı suyu seviyelerinin karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. Amaç ölçülen ve hesaplanan seviyeler arasındaki farkı en aza indirgemektir. Yer altı su seviyelerini ölçmek için arazideki fiziki şartları müsait olan 18 adet gözlem kuyusundan veri toplanmıştır. 12 ay boyunca kuyularda yapılan ölçümlerde yer altı su seviyelerinin 0.12 m ile 4.95 m arasında değiştiği gözlenmiştir.

GSFLOW'un kalibrasyonu PRMS ve MODFLOW'da kalibre edilmiş olan çoğu parametre değiştirilmeden, PRMS ve MODFLOW arasındaki, akımı ve potansiyel buharlaşma-terlemeyi etkileyen bazı parametrelerde (epan_coef ve

ssr2gw_rate) düzeltme yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, GSFLOW etkileşim modeli ile Göksu Deltasının su bütçesi, çeşitli akışların analizleri ve yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimini kapsayan hidrolojik analizler yapılmıştır. Deltanın güneyinde bulunan Lagün göllerinin toplam hacimleri yazın yağışların azalmasına rağmen artış göstermiştir. Bunun nedeni yaz aylarında yapılan arazi sulamasıyla sulamadan dönen suların drenaj kanallarına, dolayısıyla Akgöl ve Paradeniz'e dökülmesidir. Buradan göllerin asıl beslenme kaynağının drenaj kanalları olduğu sonucuna varılmıştır.

Model ile arazi boyunca oluşan yer üstü akışı, zemin tabakası ile doymuş ve doymamış tabakalar arasındaki akışlar ve Göksu Nehri ile drenaj kanalları ve lagünlere olan akışlar hesaplanmıştır. Yer üstü akışı yağış ve buharlaşma-terlemeyi kapsamaktadır. Buharlaşma-terleme bitkilerden ve göllerden buharlaşma ile zemin tabakasından gerçekleşen buharlaşma-terlemenin toplamını ifade eder. Göksu Deltası için buharlaşma-terleme temmuz-ağustos aylarında en üst seviyelere ulaşırken en fazla yağış genellikle aralık-ocak aylarında gerçekleşmiştir. Simüle edilen diğer başlıca akışlar suyun zemin tabakasından doymamış tabakaya doğru yerçekimsel drenajı, doymuş tabakadan zemin tabakasına yer altı suyu deşarjı şeklinde gerçekleşen akışlardır. Yerçekimsel drenajın, kış ve bahar aylarında yer altı suyu deşarjından fazla olduğu görülmüş, yağışın en az ve buharlaşma-terlemenin en fazla olduğu yaz aylarında ise yer altı suyu deşarjının yerçekimsel drenajı aştığı tespit edilmiştir. Diğer bir akış, Göksu Nehri'ne, Akdeniz'e, drenaj kanallarına ve göllere doğru gerçekleşen yüzeysel akış, ara akış ve net yer altı suyu deşarjını kapsamaktadır. Yüzeysel akışın özellikle yağışlı aylarda baskın olduğu görülmüştür. Göksu Nehri, drenaj kanalları ve Akdeniz'e doğru gerçekleşen yer altı suyu deşarjı yıl boyunca istikrarlı bir şekilde devam etmiştir. Özellikle kış aylarında, yer altı suyunun en üst seviyelerde, göl sularının ise en düşük seviyelerde olması ve nehir akımının bahar aylarında eriyen karların da etkisiyle ulaştığı maksimum debiye henüz ulaşmamış olmasından dolayı yer altı suyu deşarjının diğer zamanlara göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Yılın farklı dönemlerinde farklı miktarlarda olmak üzere Göksu Nehri ve drenaj kanalları yer altı suyunu beslemektedir. Aynı şekilde yer altı suyu da deltanın farklı bölgelerinde değişen oranlarda Göksu Nehri ve drenaj kanallarına kaynak olmaktadır. Yer altı suyunun Göksu Nehri ve drenaj kanallarına deşarjı kış aylarında en üst seviyelere ulaşırken yaz aylarında minimum seviyelere inmektedir. Göksu Nehri ve drenaj kanallarından yer altına sızan su, ilkbahar aylarında artış göstermiştir. Bu durumun, bahar aylarında Toroslardan eriyerek gelen kar sularının da etkisiyle Göksu Nehri su seviyesinin yükselmesine bağlı olarak gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Modellenen yer altı suyu nehir etkileşimi delta boyunca değişiklik göstermektedir. Göksu Nehri ve drenaj kanallarına yer altı suyu deşarjının, deltanın güney ve güney batısında fazla, kuzey kesimlerinde ise daha az olduğu görülmüştür. Göksu Nehri ve drenaj kanallarından yer altına sızan su miktarının deltanın kuzeyine doğru arttığı, güney ve doğu kesimlerinde azaldığı tespit edilmiştir.

Yer altı suyu ile lagünler arasında yıl boyunca devam eden dinamik bir etkileşim söz konusudur. İlkbaharın gelmesiyle sulama kanallarına çevrilen su miktarı artmakta ve birincil beslenme kaynağı sulamadan dönerek drenaj kanallarına akan su olan Akgöl ve Paradeniz'deki su seviyesi yükselmektedir. Buna bağlı olarak göllerden yer altına sızan su hacmi de artmaktadır. Kış aylarında ise, göllerdeki suyun azalması ve yer altı su seviyesinin yükselmesiyle birlikte göllerden yer altına sızan su miktarı azalmaktadır. Yaz aylarında mevsime ve kaçak kullanımlara bağlı olarak yer altı su seviyesinin düşmesi ve göl su hacminin en fazla olduğu dönem olmasından dolayı, lagünlere yer altı suyu deşarjı kış mevsimine oranla oldukça düşük bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda beni yönlendirerek destek olan ve her konuda engin tecrübelerini esirgemeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Recep YURTAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarımla ilgili yurt dışında bulunduğum süre boyunca sabır ve anlayışla bana yardımcı olan Florida Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Louis H. Motz'a çok teşekkür ederim.

Arazinin fiziki şartları ve yer altı suyu modellemesi konularında bilgi ve tecrübelerini aktaran Doç. Dr. Murat ÇOBANER'e, bölümde birlikte çalıştığımız ve hep yanımda olan değerli arkadaşlarım Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ, Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ŞİMŞEK, Arş. Gör. N. Göksu SOYDAN ve Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK'a çok teşekkür ederim. Veri temini konusunda yardımcı olan Silifke Özel Çevre Koruma eski müdürü İbrahim KARACA'ya, Silifke Metereoloji Müdürlüğü çalışanlarına, arazi ölçümlerinde yardımlarını esirgemeyen Göksu Sulama Birliğine ve Teknisyen Mehmet Sarı'ya, Silifke Sulama Birliği başkanı Mehmet Yaşar DOĞDU ve Teknisyen Mustafa YILDIZ'a çok teşekkür ederim. Çalışmama maddi destek veren Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: MMF2012D11) teşekkürlerimi sunarım. Son olarak tüm çalışmam boyunca sabır ve anlayışla beni destekleyen değerli eşime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER **SAYFA**

ÖZ I
ABSTRACT II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET III
TEŞEKKÜR VII
İÇİNDEKİLER VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ XII
ŞEKİLLER DİZİNİ XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR XVIII
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
2.1. Yer Altı Suyu-Yer Üstü Suyu Etkileşimi ile İlgili Önceki Çalışmalar 5
2.2. Göksu Deltası İle İlgili Önceki Çalışmalar 7
3. MATERYAL VE YÖNTEM 11
3.1. Materyal 11
3.1.1. Yer altı Suyu-Yer Üstü Suyu Etkileşimi 11
3.1.1.1. Yer altı Suyu-Nehir Etkileşimi 11
3.1.1.2. Yer altı Suyu-Göl Etkileşimi 12
3.1.1.3. Yer altı Suyu-Sulak Alan Etkileşimi 13
3.1.1.4. Yer altı Suyu-Kıyı Bölgeleri 15
3.1.2. Çalışma Alanı 18
3.1.3. İklim ve Hidroloji 21
3.1.4. Hidrojeoloji 23
3.1.5. Yer Altı Suyu Gözlem Kuyuları 25
3.1.6. GSFLOW Akım Modeli 26
3.1.6.1. GSFLOW Hesap Adımları 27
3.1.7. Yağış Akış Modelleme Sistemi (PRMS) 28
3.1.7.1. Havzadaki Hidrolojik Süreçler 28

3.1.7.2. Hidrolojik Tepki Birimleri 31
3.1.7.3. Kademeli Akım Prosedürü 32
3.1.7.4. PRMS Hesap Adımları 35
3.1.8. Yer altı Suyu Akım Modeli (MODFLOW-2005) 36
3.1.8.1. Yer altında İşleyen Süreçler 36
3.1.8.2. Akifer Sisteminin Ayrıklaştırılması 38
3.1.8.3. Eş Değer Tatlı Su Yükü 40
3.1.8.4. MODFLOW-2005 Hesaplama Adımları 42
3.1.9. Etkileşim Modeli İçin Kullanılan Veriler 44
3.2. Yöntem 45
3.2.1. Verilerin Hazırlanması 45
3.2.2. PRMS ve GSFLOW Verileri 46
3.2.2.1. Veri Dosyası 47
3.2.2.2. Parametre Dosyası 50
3.2.2.3. Kontrol Dosyası 53
3.2.3. Hidrolojik Tepki Birimleri-Alansal Veriler 55
3.2.4. MODFLOW-2005 Verileri 58
3.2.4.1. Sınır Koşulları 58
3.2.4.2. Yer Altı Suyu Pompajı 62
3.2.5. GSFLOW Model Tasarımı 64
3.2.5.1. GSFLOW'da Kullanılan Modül ve Paketler 65
3.2.5.2. PRMS ve MODFLOW-2005 Modellerinin Entegrasyonu 66
3.2.5.3. Hidrolojik Tepki Birimleri-Sonlu Fark Hücreleri Bağlantısı 69
3.2.5.4. İklim Verilerinin Dağıtılması 71
3.2.5.5. Potansiyel Buharlaşma-Terleme 72
3.2.6. Etkileşim Modelinin Kalibrasyonu 73
3.2.6.1. PRMS Kalibrasyonu 73
3.2.6.2. MODLFOW-2005 Kalibrasyonu 74
3.2.6.3. GSFLOW Modelinin Kalibrasyonu 74

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 77
4.1. Çalışma Periyodunda Akım 77
4.2. Kalibrasyon Sonuçları 78
4.2.1. PRMS 78
4.2.2. MODFLOW-2005 80
4.2.3. GSFLOW 84
4.3. Su Bütçesi 85
4.4. Göksu Deltası Su Hacimleri 86
4.5. Göksu Deltası Su Akışları 88
4.6. Yer altı Suyu-Yer üstü Suyu Etkileşimi 91
4.6.1. Yer altı Suyu-Göksu Nehri ve Drenaj Kanalları Etkileşimi 91
4.6.2. Yer altı suyu-Akgöl ve Paradeniz Etkileşimi 92
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 97
ÖZGEÇMİŞ 107
EKLER 108

ÇİZELGELER DİZİNİ **SAYFA**

Çizelge 3.1. Akgöl ve Paradeniz su bütçeleri 21
Çizelge 3.2. Çalışma alanına ait 1970-2013 yılları iklim istatistikleri 22
Çizelge 3.3. Göksu Deltasındaki jeolojik tabakalar 24
Çizelge 3.4. PRMS veri dosyasında belirtilen zaman serisi verileri 50
Çizelge 3.5. Sulama şebekesi ile sulanabilen ürünler ve yetiştirilme alanları 63
Çizelge 3.6. Göksu Deltasında yer altı suyu ile sulanan bölgelerin su ihtiyacı 63
Çizelge 4.1. Gözlem kuyularında ölçülen 2012 su yılı ortalama yer altı su seviyeleri 80
Çizelge 4.2. Göksu Deltası 1990-1997 su yılları su bütçesi 85
Çizelge 4.3. Göksu Deltası 1990-1997 su yılları hacim değişimi 85

ŞEKİLLER DİZİNİ **SAYFA**

Şekil 2.1. Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi ile ilgili adı geçen üç derleme makaleye yıllara göre yapılan atıf sayısı. Web of Science'da taranmıştır 7
Şekil 3.1. Nehir-yer altı suyu etkileşimi 12
Şekil 3.2. Yer altı suyu-göl etkileşimi; (A) beslenim, (B) deşarj, (C) her ikisi 13
Şekil 3.3. Sulak alanların su kaynağı 15
Şekil 3.4. Kıyı akiferlerini etkileyen parametreler ve akifer yönetimi için önerilen planlama yaklaşımı 16
Şekil 3.5. Bir kıyı akiferinde tatlı su, tuzlu su ve karışım bölgesi 17
Şekil 3.6. Serbest yüzeyli kıyı akiferinde aşırı su pompajı 18
Şekil 3.7. Göksu Deltası 19
Şekil 3.8. 1970-2013 yılları aylık ortalama sıcaklık-yağış ilişkisi 22
Şekil 3.9. Göksu Deltası hidrojeolojik enkesiti 25
Şekil 3.10. Gözlem kuyularının çalışma alanındaki dağılımı 26
Şekil 3.11. Yer üstü ve yer altı suyunun dağılımı, akış yönü ve etkileşimi 27
Şekil 3.12. PRMS tarafından simüle edilen bir havza ve iklimsel parametreleri 29
Şekil 3.13. Kavramsal bir havzanın hidrolojik tepki birimlerine ayrıklaştırılması, (A) topolojiye, (B) topoloji, iklim ve bitki örtüsüne göre 32
Şekil 3.14. HTB'ler ve nehir kolları arasında kademeli akımın oluşturulması, (A) topoloji, iklim ve bitki örtüsüne, (B) sonlu fark grid ağına göre 33
Şekil 3.15. Çalışma alanını kapsayan sayısal yükseklik modeli 34
Şekil 3.16. Simülasyon için kullanılan PRMS hesaplama adımları 35

Şekil 3.17. MODFLOW-2005 ile simüle edilebilen kavramsal bir akifer sisteminde akım 37
Şekil 3.18. Ayrıklaştırılmış kavramsal bir akifer sistemi 39
Şekil 3.19. Aynı noktada açılan, biri tatlı suyla (A), diğeri tuzlu suyla (B) dolu iki piezometre 41
Şekil 3.20. Akifer sistemi boyunca yer altı suyu akımı simülasyonu için kullanılan MODFLOW-2005 hesap adımları 44
Şekil 3.21. Karahacılı Akım Gözlem İstasyonu ve Silifke Meteoroloji Gözlem İstasyonu 45
Şekil 3.22. Göksu Deltası için hazırlanan veri dosyası 48
Şekil 3.23. Göksu Deltası için hazırlanan parametre dosyası 51
Şekil 3.24. Göksu Deltası için hazırlanan parametre dosyasının devamı 52
Şekil 3.25. Göksu Deltası için hazırlanan kontrol dosyası 54
Şekil 3.26. Çalışma alanı için oluşturulan hidrolojik tepki birimleri (HTB) 55
Şekil 3.27. Göksu Deltası arazi kullanımı haritası 56
Şekil 3.28. Göksu Deltası litoloji haritası 57
Şekil 3.29. ModelMuse ile oluşturulan Göksu Deltası sonlu farklar model ağı 59
Şekil 3.30. Göksu Deltası için oluşturulan MODFLOW grid ağı 61
Şekil 3.31. Göksu Deltası Akiferi için kalibre edilmiş yer altı su seviyesinin en kesit boyunca değişimi ve deniz suyu girişimi 62
Şekil 3.32. GSFLOW'da üç bölge arasındaki akımın hareketi 64
Şekil 3.33. GSFLOW akım modelini oluşturan PRMS ve MODFLOW bileşenlerinin entegrasyonu 66
Şekil 3.34. Kavramsal zemin tabakası modülü 67
Şekil 3.35. GSFLOW'da uygulanan, MODFLOW-2005'te yapılan değişiklikler 68

Şekil 3.36. (A) HTB'leri sonlu fark hücrelerine bağlamak için kullanılan yerçekimi rezervuarlarının dağılımı, (B) 3 HTB, 12 sonlu fark hücresi, 18 yerçekimi rezervuarı 70
Şekil 4.1. Silifke Karahacılı Akım Gözlem İstasyonu'nda 1970-2013 yılları arasında ölçülen günlük ortalama akımlar 78
Şekil 4.2. PRMS ile simüle edilen ve Karahacılı akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük ortalama akımlar (kalibrasyon periyodu 1974-1997 su yılı) 79
Şekil 4.3. PRMS ile simüle edilen ve Karahacılı akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük ortalama akımlar (doğrulama periyodu 1998-2013 su yılı) 79
Şekil 4.4. 2012 su yılı boyunca aylık olarak ölçülen ve simüle edilen su yüklerine ait saçılma diyagramı..... 81
Şekil 4.5. Kalibrasyon sonrası, 1,4,6 ve 7. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler..... 82
Şekil 4.6. Kalibrasyon sonrası, 2,3 ve 5. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler..... 82
Şekil 4.7. Kalibrasyon sonrası, 8. tabakaya ait hidrolik iletkenlikler 83
Şekil 4.8. Kalibrasyon sonrası, 9-20. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler..... 83
Şekil 4.9. GSFLOW kalibrasyon periyodu için simüle edilen ve ölçülen günlük ortalama akımlar..... 84
Şekil 4.10. GSFLOW doğrulama periyodu için simüle edilen ve ölçülen günlük ortalama akımlar..... 84
Şekil 4.11. Yer üstü suyu birikimli hacim değişimi 86
Şekil 4.12. Zemin tabakası birikimli hacim değişimi 87
Şekil 4.13. Doymuş ve doymamış tabakalarda birikimli hacim değişimi 88
Şekil 4.14. Yer üstü akışı..... 89
Şekil 4.15. Suyun zemin tabakasından doymamış tabakaya yerçekimsel drenajı ve zemin tabakasına yer altı suyu deşarjı 89

Şekil 4.16. Göksu Nehri, drenaj kanalları, Akdeniz ve göllere akış..... 90
Şekil 4.17. Yer altı suyu-Göksu Nehri ve drenaj kanalları etkileşimi (1991 su yılı)..... 91
Şekil 4.18. Nehir ve drenaj kanalları boyunca; (A) yer altı suyu deşarjı, (B) yer altına sızma..... 92
Şekil 4.19. Yer altı suyu-göl etkileşimi; yer altı suyu deşarjı, (A) temmuz 1991, (B) ocak 1991. yer altına sızma, (C) temmuz 1991, (D) ocak 1991 93

SİMGELER VE KISALTMALAR

GSFLOW	: Groundwater-surface water flow model
PRMS	: Precipitation-runoff modeling system
MODFLOW	: Modular groundwater flow model
USGS	: United States Geological Survey
ArcGIS	: Ölçeklendirilebilir entegre bir coğrafi bilgi sistemi yazılımı
ModelMuse	: MODFLOW-2005 ve PHAST için grafiksel kullanıcı arayüzü
CRT	: Cascade routing tool
SWAT	: Soil and water assessment tool
SUTRA	: Saturated-unsaturated transport
GAMS	: Genel cebirsel modelleme sistemi
ÖÇK	: Özel Çevre Koruma Kurumu
DSİ	: Devler Su İşleri
DHKD	: Doğal Hayatı Koruma Derneği
HTB	: Hidrolojik tepki birimi
HRU	: Hydrologic response unit
SYM	: Sayısal yükseklik modeli
UTM	: Evrensel yatık eksenli merkatör sistemi
CBS	: Coğrafi bilgi sistemi
BAS	: Temel paket
DIS	: Ayrıklaştırma paketi
GAGE	: Ölçüm istasyonu paketi
LAK	: Göl paketi
LPF	: Tabaka özellikli akım paketi
GHB	: Genel hidrolik yük sınırı
CHD	: Sabit seviyeli hidrolik yük sınırı
OC	: Çıktı kontrol opsiyon dosyası
PCG	: Koşullanma eşlenik gradyan paketi

UZF	: Doymamış tabaka akım paketi
SFR	: Nehir yönlendirme paketi
NSE	: Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı
Qo_i	: Gözlenmiş i'inci akım değeri
Qs_i	: Simüle edilmiş i'inci akım değeri
$\overline{Qo}$	: Gözlenmiş akımların ortalaması
n	: Toplam gözlem sayısı
K_x, K_y, K_z	: Hidrolik iletkenlik (x, y, z koordinatlarında)
h	: Hidrolik yük
W	: Hacimsel yer değiştirme
S_s	: Özgül depolama katsayısı
t	: Zaman
h_f	: Eş değer tatlı su yükü
P_N	: Akışkanın N noktasındaki basıncı
ρ_f	: Tatlı su yoğunluğu
ρ	: Tuzlu yer altı suyu yoğunluğu
g	: Yer çekimi ivmesi
Z_N	: N noktası ile referans düzlemi arasındaki mesafe
Q_o	: Gözlenen akım
Q_s	: Modellenen akım

1. GİRİŞ

Su, yeryüzünde en önemli ve en çok bulunan doğal kaynaktır. Canlıların varlığı ve medeniyetin gelişimi için özellikle iklim üzerinde hayati rol oynar. Dünya üzerindeki toplam suyun yaklaşık %97'si tuzlu sulardan oluşur. Tatlı su kaynaklarının %68'inden fazlası buzullarda hapsedilmiştir. Geriye kalan tatlı suyun yaklaşık %30'u yer altında bulunmaktadır. İnsanların günlük olarak kullandıkları suyun çoğunluğunu oluşturan nehirler ve göller gibi yüzeysel tatlı su kaynakları ise dünyadaki toplam suyun sadece %0.0067'sini oluşturmaktadır.

Yeryüzündeki toplam suya oranla oldukça az miktardaki yüzey sularını depolamak için hazne inşa etmek, özellikle son yıllarda çevresel kaygılar ve uygun bölge bulmanın zorluğu nedeniyle daha güç hale gelmiştir. Bu haznelere olan ihtiyacı azaltmak veya tamamen ortadan kaldırabilmek için, bir akifer sistemi geçici bir hazne olarak kullanılabilir. Örneğin; nehir akımının fazla olduğu zamanlarda yer altında depolanan su, akımın düşük olduğu zamanlarda kullanılabilir. Yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşimin özellikleri ve ölçüsü bu alanda yapılan birleşik kullanım türündeki projelerin başarısını doğrudan etkilemektedir.

Yeryüzünde akışkan halde bulunan tatlı suyun önemli bir kısmı yer altında bulunur. Yer altındaki ve yer üstündeki sular sürekli bir ilişki halindedir. Bu ilişki yer altı suyunu daha önemli kılmaktadır. Kurak bölgelerde, özellikle yaz mevsiminde akarsular yer altından beslendikleri takdirde kurumazlar. Akarsulardaki toplam akımın yaklaşık %30'u yer altı suyu besleniminden oluşur. Kuyular vasıtasıyla yer altından çekilen su insanlar tarafından geniş ölçüde kullanılmaktadır. Yer altından elde edilen suyun iyi bir özelliği, doğal bir şekilde filtrelenmiş olduğundan; genellikle bakterilerden, organik maddelerden, koku ve tatlardan arınmış, kimyasal bileşimi ve sıcaklık derecesi fazla değişmeyen, iyi kalitede bir su olmasıdır. Bugün yeryüzünde kullanılan suyun yaklaşık %40'ı yer altından sağlanmaktadır. Gelecekte barajlar gibi yeni biriktirme hazneleri inşa etme

olanağının giderek azalacak olması, buna karşılık yer altında büyük bir doğal hazne bulunması ve dengeleme süresinin uzun olması nedeniyle bu oranın artması beklenebilir.

Yer altı suları ile yer üstü suları arasındaki etkileşim çeşitli şekillerde olabilir. Birçok durumda yüzeysel suların kalitesi yer altı su sistemlerinden gelen su ve çözünmüş maddelerden etkilenir. Bunun yanında, yüzeysel sular da yer altı suyuna önemli bir kaynaktır ve yer altı suyu kalitesinde belirgin değişikliklere sebep olur. Akarsulardan su çekilmesi yer altı suyunu azaltabilir ya da tersine, yer altı suyu pompajı akarsu, göl ve sulak alanlardaki suyu tüketebilir. Yüzey sularının kirlenmesi, yer altı suyu kalitesini bozabilir veya yer altı suyu kirliliği yüzeysel su kalitesini düşürebilir. Bu nedenle, etkili bir arazi ve su yönetimi için yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki bağlantının açık bir şekilde anlaşılması gerekir (Winter ve ark., 1998).

Ülkelerin su kaynakları ve çevre üzerindeki kaygılarının gittikçe artmasıyla beraber, yer altı suyu ve yer üstü suyunun tek bir kaynak olarak değerlendirilmesi de daha önemli hale gelmiştir. Su temini, su kalitesi ve sucul ortamların bozulması ile ilgili sorunlar ilgili kurum ve kuruluşlarca sık sık rapor edilmektedir. Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin bu sorunların çoğunda önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarda dile getirilmektedir. Örneğin akarsuyu besleyen kirlenmiş bir akifer yer üstü suyunun uzun vadede kirlenmesine neden olabilir. Diğer taraftan akarsular, akiferler için önemli bir kirlilik kaynağı olabilir. Yer üstü suyu, yer altı suyu ile çoğu zaman hidrolik olarak bağlantılıdır. Fakat bu bağlantının gözlemlenmesi ve ölçülmesi zor olduğundan su yönetimi ile ilgili değerlendirme ve politikalarda genellikle göz ardı edilmektedir. Tabiattaki doğal işleyişin önemli bir kısmı ve beşerî faaliyetler, yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminde pay sahibidir.

Yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki etkileşim oldukça karmaşıktır ve bu etkileşimi simüle etmek de zor bir iştir. Bu nedenle çoğu zaman iki sistem birbirinden ayrı olarak çalışılmış ve hidrolojik modeller genelde yer üstü veya yer

altı su kaynaklarından sadece birine odaklanarak geliştirilmiştir. Bazı modeller yüzeysel akış simülasyonları üzerinde yoğunlaşırken yer altı suyu ile ilgili bileşenleri basite indirgemiştir (PRMS, SWAT vb.). Benzer şekilde yer altı suyu modelleri, yer üstüne ait kısımları daha basit bir biçimde ele almıştır (MODFLOW vb.).

Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin modellenmesi son yirmi yılda hidroloji alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Mohammed, 2009). Bu etkileşimin anlaşılmasında kullanılan entegre hidrolojik modellerden birisi de GSFLOW (Groundwater-Surface Water Flow) akım modelidir (Markstrom ve ark., 2008). GSFLOW, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (United States Geological Survey, USGS) Yağış-Akış Modelleme Sistemi PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System, Leavesley ve ark., 1983) ile yine aynı kuruma ait Modüler Yer altı Suyu Akım Modeli MODFLOW (Modular Groundwater Flow Model, Harbaugh, 2005) adlı iki modelin entegrasyonuna dayanan birleşik bir yer altı suyu-yer üstü suyu akım modelidir. GSFLOW, arazi yüzeyindeki, yer altında doymuş ve doymamış bölgeler ile nehir ve göllerdeki akımı eş zamanlı olarak simüle ederek; yer altı suyu ve yer üstü suyu akımını modellemek için geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması ile:

1. Nehir, drenaj kanalları, lagün gibi yer üstü sularını bünyesinde barındıran Göksu Deltasının, yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin araştırılması,

2. Bunun için eş zamanlı simülasyona imkân veren bir modelin kurulması,

3. Kurulan model ile çeşitli bölgelere ayrılmış çalışma alanında, her bir bölgedeki su hacimlerinin tespiti ve bölgeler arasındaki akışların belirlenmesi,

4. Göksu Deltası toplam su bütçesinin belirlentcemesi amaçlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Yer Altı Suyu-Yer Üstü Suyu Etkileşimi ile İlgili Önceki Çalışmalar

Araştırmacıların nehir, göl ve sulak alanlara yer altı suyu akım sistemleri perspektifinden bakmaya başlamaları 1960'lara kadar söz konusu değildi. Toth (1962,1963) yaptığı çalışmalarında, yerel, orta ölçekli ve bölgesel yer altı suyu akım sistemlerinin, iklim, jeoloji ve topoğrafya tarafından nasıl kontrol edildiğini ilk kez ana hatlarıyla belirtmiş oldu. Aslında bu da bir anlamda yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin ilk mekânsal örneklerini ifade etmekteydi. Daha sonraları yer altı suyu-göl etkileşimi (McBride ve Pfannkuch, 1975; Winter, 1978, 1983) ve yer altı suyu-sulak alan etkileşimi üzerine teorik çalışmalar yapılmaya başlandı. Rorabaugh (1964) nehir akımı ve yer altı suyu arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için bazı yöntemler geliştirdi.

Yer altı suyu-yer üstü suyu ara yüzünü tanımlamak için geliştirilen fikirler ilk sayısal yer altı suyu modellerine 1980'lerde eklendi. Daha sonra yer altı suyu-yer üstü suyu alışverişinde işleyen süreçleri daha iyi temsil etmesi için çeşitli eklenti ve modüller programlara dahil edildi (Prudic, 1989). İlk uygulamalar ağırlıklı olarak su bütçesi yönetimine odaklandı ve modeller çoğunlukla birleşik kullanım senaryolarını belirlemek için kullanıldı (Gorelick, 1986). Nispeten büyük ölçekli araştırmalar ve hesaplamalardaki kısıtlar nedeniyle bu modellerdeki yer altı suyu-yer üstü suyu ara yüzü zamansal ve mekânsal olarak kaba bir çözünürlükte temsil edildi. Yer üstü suyu akımı ve dinamikleri basitleştirildi ve akifer ile nehir yatağı homojen birimler olarak tanımlandı. Sistemin temsil edilmesindeki bazı eksikliklerin giderilebilmesi için hidrolojik döngüdeki yer altı ve yer üstü bileşenlerine ait daha karmaşık entegre modellerin geliştirildiği ilk çalışmalar 1980'lerde yapılmaya başlandı (Abbott ve ark., 1986). 1980'li yıllar, aynı zamanda ekolojik fonksiyonlar (Grimm ve Fisher, 1984; Stanford ve Ward, 1988) ve biyojeokimyasal süreçlerle (Bencala, 1984; Hill, 1990) yer altı suyu ile yer üstü suyu arasındaki dinamik etkileşimi tespit etmek için yapılan ilk çalışmalara da

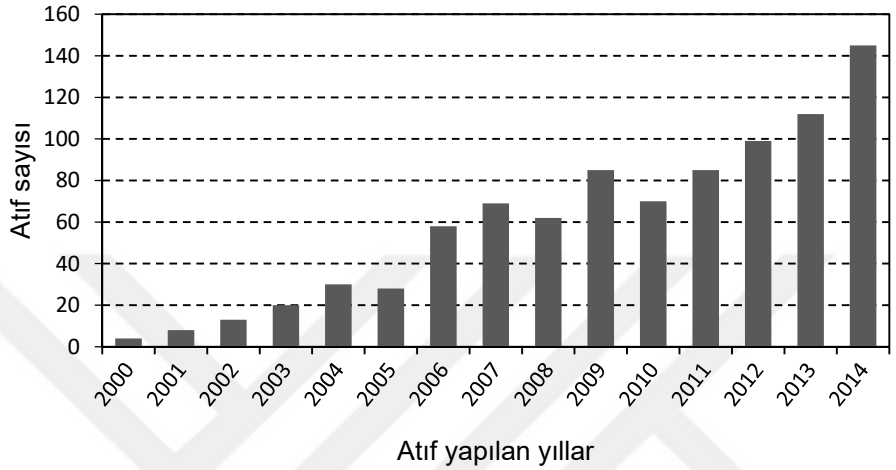
tanıklık etmiş oldu.

Bencala ve Walters (1983) akarsu sistemlerinde akarsu-yer altı suyu girişim tabakasındaki (hyporheic zone) alışverişin etkileri ile çözünmüş madde taşınımı ve biyojeokimyasal süreçlerin araştırılmasına (Jackman ve ark., 1984; Triska ve ark., 1989; Bencala ve ark., 1990) başlangıç noktası olan zamana bağlı değişen hacim modellerini oluşturdular. Bu çalışmalar sonradan hyporheic tabaka ile ilgili süreçlerin modellenmesinde Advances in Water Resources isimli bilimsel derginin özel bir sayısına öncülük etti (Runkel ve ark., 2003).

1990'lardan bu yana yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi üzerine yapılan çalışmalar hidroloji ve hidrojeolojiden ekoloji, biyojeokimya, çevre yönetimi ve hukuk gibi dallara kadar geniş bir alanda giderek artmaya başladı (Krause ve ark., 2009). Daha karmaşık yer üstü suyu akım modelleri mevcut yer altı suyu modellerine (Jobson ve Harbaugh, 1999; Swain ve Wexler, 1993) eklendi ve sonrasında tam birleşik yer altı suyu-yer üstü suyu sistemlerini simüle edebilen modeller geliştirildi (Jones ve ark., 2008; Kollet ve Maxwell, 2006; Panday ve Huyakorn, 2004; Vander Kwaak ve Loague, 2001). 90'lar aynı zamanda küçük ölçekli yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi (Elliott ve Brouks, 1997; Packman ve Brooks, 2001) ve buna bağlı biyojeokimyasal süreçler ile ekolojik fonksiyonlar (Boulton ve ark., 1998; Dahm ve ark., 1998; Wroblicky ve ark., 1998) gibi konulara olan ilginin arttığı yıllar oldu. Örneğin Brunke ve Gonser (1997) çalışmalarında hyporheic tabakanın ekolojik önemini vurgulayarak hidroloji ile ekoloji arasındaki karmaşık bağlantıyı ana hatlarıyla ifade ettiler.

Yeni yüzyılın başlarında yayınlanan üç derleme makale yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi ile ilgili bu yeni çok disiplinli alan için referans olmuş ve bu konuda bilimin geldiği son nokta olarak kabul edilmiştir (Winter, 1999; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002). Daha sonra bu alana duyulan ilgi söz konusu derleme yayınlara yapılan atıf sayısına da yansıyarak hızla artmıştır (Şekil 2.1). Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin önemi ile ilgili artan bu farkındalık ve bunun Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi gibi yeni yasal düzenlemelere de yansıması, bu

konularda gerçek anlamda multidisipliner bir bakış açısına sahip önemli araştırmalar yapılmasına neden olmuştur (Krause ve ark., 2011).



Şekil 2.1. Yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi ile ilgili adı geçen üç derleme makaleye (Winter, 1999; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002) yıllara göre yapılan atıf sayısı. Web of Science'da (http://apps.webofknowledge.com) taranmıştır

2.2. Göksu Deltası İle İlgili Önceki Çalışmalar

Haar ve Heunks (1992) tarafından yapılan çalışmada, Göksu Deltası'nda 20 civarında artezyen kuyusu tespit edilmiştir. Artezyen kuyuları, kil gibi geçirgenliği az zemin tabakaları ve basınçlı akiferlerin varlığını göstermektedir.

Menengiç (1998), Göksu Deltasındaki yer altı suyu kirliliğinin tespiti için belirlediği 9 adet istasyon ile taban suyu kontrolünü sağlamak üzere açılan 8 adet artezyen, 2 adet sondaj kuyusu ve 77 adet kuyu suyunun kirliliği ve varsa kirletici kaynakların tespitine yönelik çalışma yapmıştır. Bölgenin tuzluluk haritası çıkarılmış, kuyu sularının seviye değerleri kullanılarak taban suyu seviye haritası oluşturulmuş ve taban suyunun hareket yönü belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kuyu sularının gerek seviye testi gerekse kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde, iyon yoğunlaşmasının akım yönünde denize doğru arttığı, elektriksel iletkenliğin de

iyon yoğunlaşmasına paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu da deniz suyu girişimini göstermektedir.

Gordu (2000), Gordu ve ark., (2001) ve Motz ve ark., (2001), Göksu Deltası ile ilgili çalışmalarını iki temel amaç doğrultusunda yapmışlardır. Birincisi, deniz suyu girişiminin kavranması ve tatlı su-tuzlu su ara yüzü konumunun, sayısal bir model kullanarak belirlenmesidir. İkinci amaç, su ihtiyacı ile hidrolojik ve çevresel kısıtlar dikkate alınarak yer altı suyu kullanımını optimize etmektir. Gordu ve ark., (2001), çalışmalarında, arazideki beş kuyuda yapılan çalışmada ilk amacı gerçekleştirmek için SUTRA isimli bilgisayar programı ile akiferin sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci amacı gerçekleştirmek için ise, simülasyon modeli uygun bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Tepkili matris metodu kullanılarak iki işletme modeli geliştirmiş, iki boyutlu olarak yapılan çalışmalar yeterince gerçekçi olmadığı için Göksu Deltası 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 hazırlanmıştır. Elde edilen yer altı kesitleri Deltanın farklı bölgelerde yatay ve düşey litolojik değişimlerini, tabaka kalınlıklarını ve deniz suyu girişim bölgelerini göstermektedir. Çalışma sonucunda denize yakın olan 9 profilde deniz suyu girişimine rastlanmıştır.

Yurtal ve ark (2004), Göksu Deltasında tuzlu su girişimine maruz yer altı suyu pompajının simülasyon ve optimizasyon modellerini geliştirmişlerdir. Literatürde bulunan mevcut verilere ilave olarak 1999, 2001, 2002 yıllarında toplanan verileri ekleyerek çalışma alanının kavramsal ve hidrojeolojik modelini geliştirmişlerdir. Değişken Yoğunluktaki Yer altı suyu Akım ve Taşınım Modeli (SUTRA) yardımıyla çalışma alanının bir en kesiti boyunca iki boyutlu sayısal modeli 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 en kesitteki iki kuyunun pompalama oranlarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çobaner (2009) deniz suyu girişimini önlemek ve kontrol altına almak amacıyla geliştirdiği modeli Göksu Deltasına uygulamıştır. Deltadaki deniz suyu girişimini belirleyebilmek için, üç boyutlu değişken yoğunluklu yer altı suyu akım modeli SEAWAT'ı kullanmıştır. Geliştirdiği modeli kalibre etmek için arazide belirlediği gözlem kuyularından statik yer altı su seviyesi, elektriksel iletkenlik, toplam çözünmüş katı madde ve klorür değerlerini ölçmüştür. İklim değişikliği etkilerinin önlenmesi veya en aza indirilmesi bakımından olası üç farklı senaryo için simülasyonlar yapmış ve Göksu Deltası akiferinin özellikle pompaj miktarındaki artışa duyarlı olduğunu tespit etmiştir. İklim değişikliğinin etkileriyle yüzeysel suların azalması ve sıcaklıktaki artışa bağlı içme-kullanma ve sulama suyu ihtiyacındaki artışın çalışmadaki senaryolarda kullanılan yer altı suyu çekim miktarlarından çok daha fazla yer altı suyu kullanımına sebep olabileceğini, bununla birlikte deniz suyu girişiminin iç kısımlara doğru ilerlemesine ve iyi kalitede suların marjinal sular sınıfına girmesine neden olabileceğini gözlemlemiştir. Dolayısıyla deniz suyu girişiminin olduğu bölgelerde yer altı sularından sağlanan sulama sularının hem bitkilere hem de toprağa zarar vererek, tarımın sürdürülebilirliğini riske atacağı sonucuna varmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

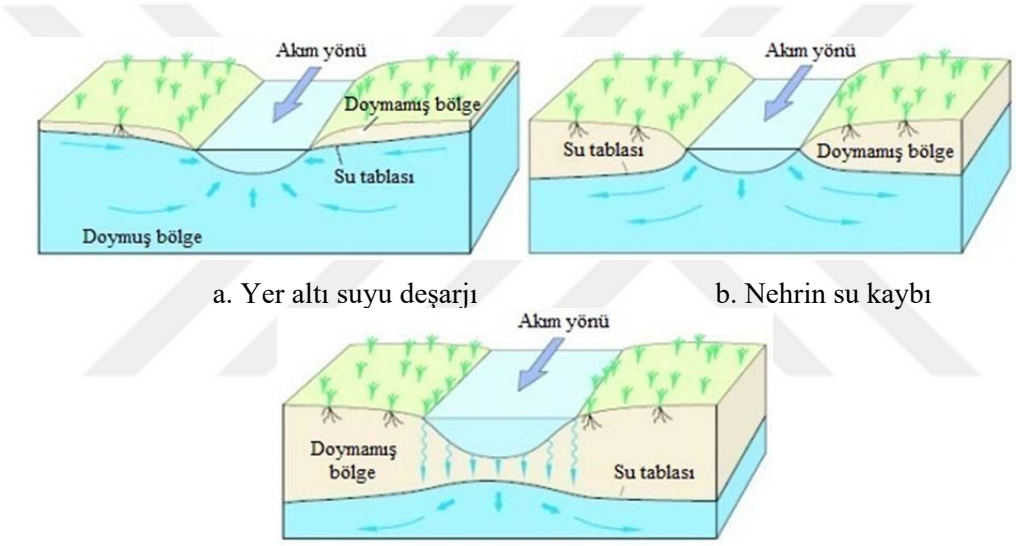
3.1.1. Yer altı Suyu-Yer Üstü Suyu Etkileşimi

Yakın zamana kadar yer altı suyu ile yer üstü suyu ayrı sistemler olarak düşünülmüş ve birbirinden bağımsız olarak araştırılmıştır. Aslında iki sistem farklı kimyasal, biyolojik ve fiziksel özelliklere sahiptir (Kalbus ve ark. 2006). Bu farklılıklara rağmen, birbirleriyle devamlı bir dinamik etkileşim halindedirler. İki sistem yeryüzünün neredeyse tamamında farklı şekillerde birbirini etkiler. Bu etkileşim çoğunlukla iki şekilde meydana gelir. Yer üstü suyu yer altı sisteminden su ve çözünmüş maddeleri alır, ya da zemin içinden yer altı suyuna sızar. Göller ve sulak alanlar yatakları boyunca yer altı suyundan beslenebilir. Yer altı suyunu besleyebilir veya farklı bölgelerde her iki durum da gerçekleşebilir. Yer altı suyu birçok dere ve nehir için de önemli bir kaynaktır. Ayrıca bitki ve hayvanlar için nehir ve sulak alan habitatlarında önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle etkili bir arazi ve su yönetimi politikası geliştirilebilmek için yer altı ve yer üstü suyu arasındaki etkileşimin anlaşılması ve bunun için de tüm hidrolojik bileşenlerin detaylı bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir.

3.1.1.1. Yer altı Suyu-Nehir Etkileşimi

Yer altı suyu ile nehir arasındaki etkileşim 3 temel şekilde gerçekleşir. Nehir, yatağı boyunca yer altı suyundan beslenir, yer altı suyunu besler ya da her ikisi bazı bölgelerde yer altı suyunu besler bazı bölgelerde ise yer altı suyundan beslenir. Genelde çoğu nehirde her iki durum birlikte gerçekleşir. Ayrıca, yer altı suyu-yer üstü suyu arasındaki akış yönleri mevsimsel olarak değişebilir. Ani taşkın olaylarında nehir seviyesinin yükselmesi ya da kurak dönemlerde azalmasına bağlı olarak yer altı suyu seviyesi değişiklik gösterebilir.

Yer altı suyu ile nehrin direk bağlantılı olduğu durumlarda, yer altı su tablasının kotu nehrin yüzey kotundan yüksek ise yer altı suyu nehri besler (Şekil 3.1.a). Nehrin yüzey kotu daha yüksek ise yer altı suyu nehirden beslenir (Şekil 3.1.b). Yer altı suyu ile nehir arasında direk bir bağlantı yoksa, nehir doymamış bölgeden sızıntı şeklinde yer altı suyunu besler (Şekil 3.1.c) (Winter ve ark., 1998). Bu durumda su, akifer seviyesinden etkilenmeksizin nehirden yer altı suyuna sızacak, dolayısıyla yer altı suyu pompajı su tablasını düşürmekle beraber yer üstü suyunu etkilemeyecektir.



a. Yer altı suyu deşarjı b. Nehrin su kaybı

c. Sızıntı şeklinde yer altı suyu beslenimi

Şekil 3.1. Nehir-yer altı suyu etkileşimi (Winter ve ark., 1998)

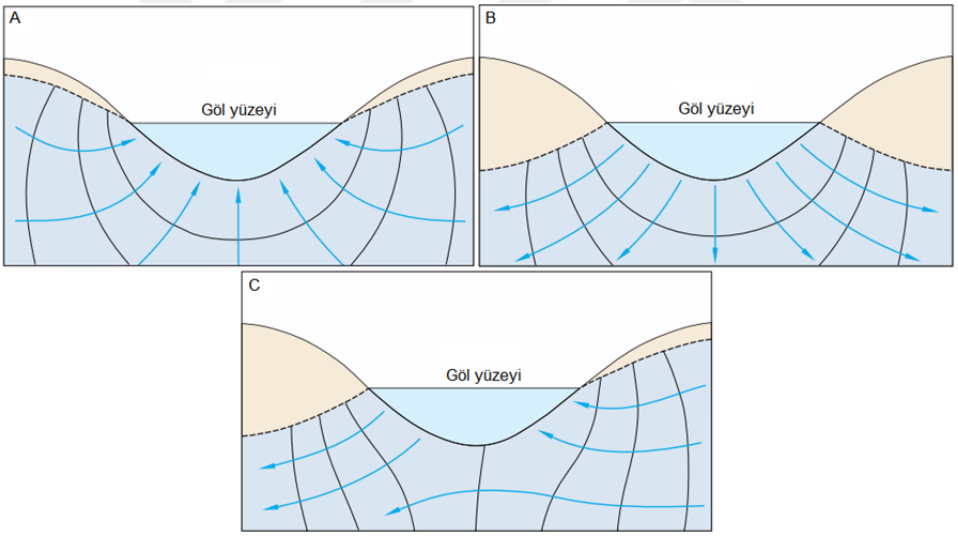
Nehir ile akifer arasındaki akımın yönünü belirleyen mevsimsel şartlar yer altı su seviyesini kontrol edebilir. Nehrin bazı bölgelerinde beslenme ve deşarj birlikte görülebilir.

3.1.1.2. Yer altı Suyu-Göl Etkileşimi

Yeryüzünün farklı bölgelerinde doğal ya da suni birçok göl mevcuttur. Bu göller kendileriyle bağlantılı karmaşık yer altı suyu sistemlerine sahip olabilirler.

Göller ile yer altı suyu etkileşimi tıpkı akarsularda olduğu gibi üç temel şekilde gerçekleşir. Bazı göller, yatağı boyunca yer altı suyundan beslenir, bazıları yer altı suyuna deşarj olur. Diğerleri ise, belki de çoğu göl, bazı bölgelerinde yer altı suyundan beslenirken, bazılarında yer altı suyunu besler (Şekil 3.2). Yer altı suyundan su çekilmesi sonucu göl seviyesinin azalması göl ekosistemini ve göl kıyısında bulunabilecek rıhtım gibi sahil yapılarını olumsuz şekilde etkileyebilir.

Yer altı suyunun kimyasal özellikleri, akış yönü ve yer üstü suları ile arasındaki alışverişin büyüklüğü göle giren çözünmüş kimyasalları önemli ölçüde etkiler. Bunun sebebi, yer altı suyunun göle giren çözünmüş kimyasalların ana kaynağı olabilmesidir. Dengeli durumlarda yer altı suyu deşarjı göl su bütçesinin küçük bir bileşenini oluşturur.



Şekil 3.2. Yer altı suyu-göl etkileşimi; (A) beslenim, (B) deşarj, (C) her ikisi (Winter ve ark., 1998)

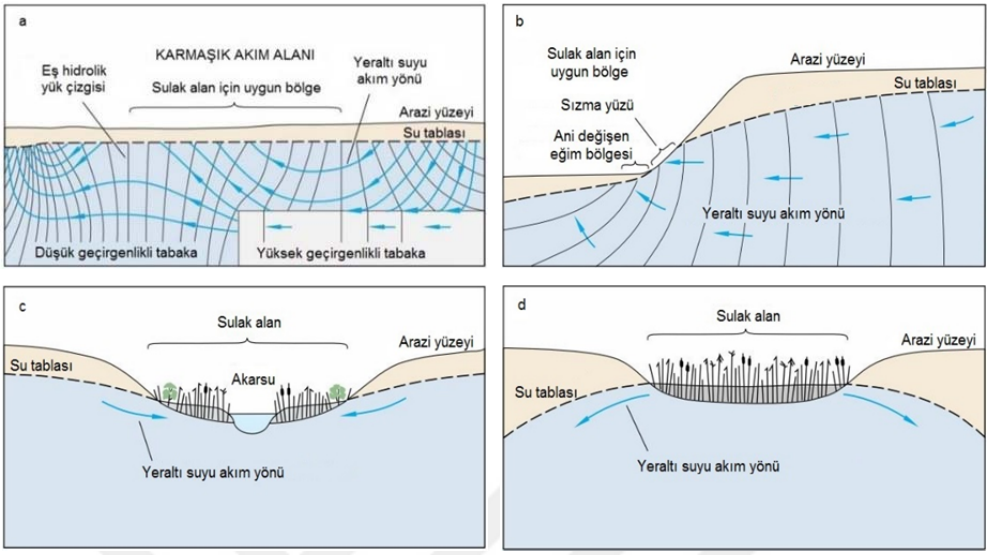
3.1.1.3. Yer altı Suyu-Sulak Alan Etkileşimi

Sulak alanlar sahil şeridinden taşkın alanları ve dağ oluklarına kadar çeşitli alanlarda ortaya çıkabilir. Sulak alanlar da akarsu ve göllerdeki gibi, yer altı suyundan beslenebilir, yer altı suyunu besleyebilir ya da her iki durum birlikte

gerçekleşebilir. Sulak alanlarla ilgili genel ve bilimsel görüşler zamanla büyük ölçüde değişmiştir. Yakın zamana kadar değersiz ya da çok az değerli kabul edilen sulak alanlar, yabani hayat ve taşkın koruması, erozyondan koruma, sahil kesimlerinde kıyı koruması ve kirleticileri filtreleyerek su kalitesinin iyileştirilmesi gibi faydalı işlevlere sahiptir.

Sulak alanların ömrü, büyüklüğü ve işlevleri hidrolojik süreçler tarafından kontrol edilir (Carter, 1996). Yer altı suyunun sulak alanlara deşarjını ve sulak alan bitkilerinin köklerini ihtiva eden bölgedeki nem içeriği ve kimyası gibi çevresel faktörlerle ilişkisini tanımlamak sulak alan hidrolojisi için oldukça önemlidir (Hunt ve ark., 1999).

Arazi yüzeyindeki çöküntüleri kaplayan sulak alanlar akarsu ve göllerdeki gibi yer altı suyu ile etkileşim halindedir. Ancak akarsu ve göllerin aksine sulak alanlar sadece düşük kotlarda oluşmaz (Şekil 3.3a). Eğimli arazilerdeki besin bakımından zengin olan çayırlık alanlar veya drenaj kanallarının birbirinden ayırdığı besin fakiri bazı bataklıklar da bir çeşit sulak alandır. Besin anlamında nispeten daha zengin olan çayırlık alanlar çoğunlukla yer altı suyundan beslenir (Şekil 3.3b). Bu nedenle yer altı suyu bu alanlara çözünmüş kimyasallar bakımından devamlı bir kaynak teşkil eder. Çoğu sulak alanlar, özellikle yavaş hareket eden akarsular boyunca meydana gelir (Şekil 3.3c). Bu sulak alanlar genelde yer altı suyundan beslense de, temel beslenim kaynakları akarsudur. Daha fakir olan bataklıklar yayla gibi daha yüksek kotlarda veya geniş düzlük arazilerde oluşur (Şekil 3.3d). Bunlar ise, su ve çözünmüş kimyasalların önemli kısmını yağıştan karşılar.



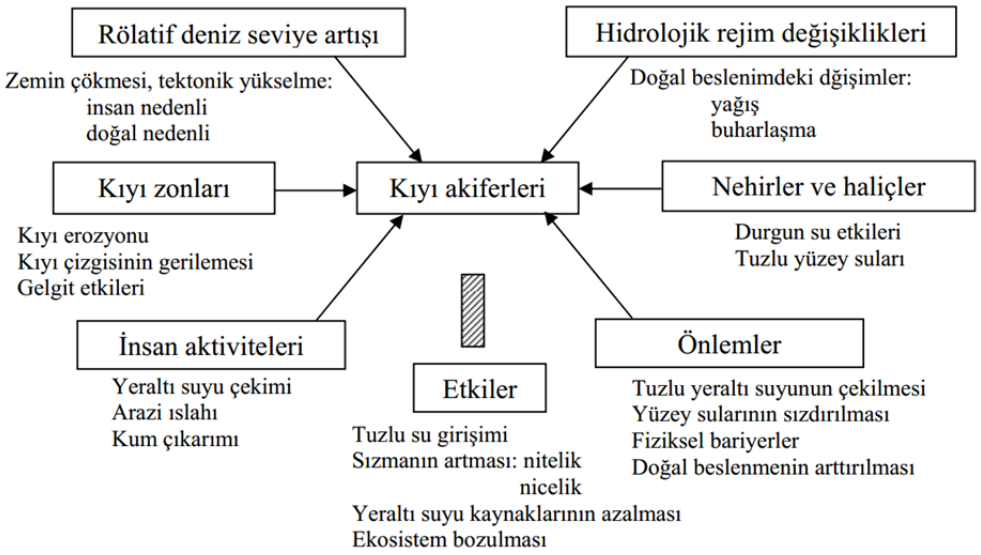
Şekil 3.3. Sulak alanların su kaynağı; (a) Karmaşık yer altı suyu akım alanı bulunan arazilerde yer altı suyu, (b) sızma yüzünde ve su tablası eğiminin ani değiştiği bölgelerde yer altı suyu, (c) nehirler ve (d) herhangi bir akarsu ile bağlantının olmadığı ve yer altı su tablası eğiminin sulak alandan itibaren azaldığı yerlerde yağış olabilir (Winter ve ark., 1998)

Akarsu boyunca ve kıyı bölgelerindeki sulak alanlar, dönemsel ve düzenli su seviyesi değişimlerine maruz kaldıkları için daha karmaşık hidrolojik etkileşime sahiptirler. Özellikle kıyı bölgelerindeki bazı sulak alanlar öngörülebilir gelgit döngülerinden etkilenirler. Bunun dışındaki kıyı sulak alanları ve akarsu boyu ekosistemindeki sulak alanlar mevsimsel su seviyesi değişimleri ve taşkınlardan daha fazla etkilenirler. Yağış, buharlaşma-terleme ve yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşiminin birleşik etkisi sulak alanlardaki su derinliğinde belirleyicidir.

3.1.1.4. Yer altı Suyu-Kıyı Bölgeleri

Birçok kıyı bölgesi, özellikle deltalar yoğun bir insan popülasyonu barındırmaktadır. Dünya nüfusunun %50'si deniz kıyısı ile denizden 60 km mesafede bulunan alanda yaşamaktadır (Oude Essink, 2001). İnsanoğlu geçmişten beri bu bölgelere gıda ihtiyacı ve ekonomik sebeplerden dolayı ilgi göstermişlerdir.

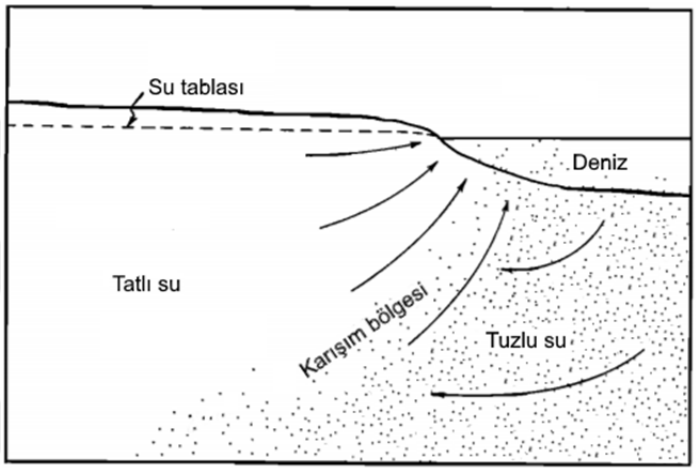
Yerleşim alanlarının çoğalması, tarımsal gelişmeye bağlı olarak içme-kullanma suyu ihtiyacının ve endüstriyel faaliyetlerin artması ile kıyı bölgelerinde yer altı suyu kullanımı da artmıştır. Kıyı bölgeleri aynı zamanda, kasırgalar gibi şiddetli hava olaylarından kaynaklanan taşkınlar, dalga kabarması ve kontrolsüz yer altı suyu kullanımıyla oluşan tuzlu su girişiminden dolayı tatlı su yetersizliği gibi problemlerle de karşı karşıyadır. Kıyı bölgesi akiferlerinde, yer altı suyunun kullanımı, yenilenmesi ve yönetimi ile ilgili en önemli konuların başında yer altı suyu tuzlanması gelmektedir. Bunu yanında kıyı akiferlerini etkileyen hemen tüm parametreler ve akifer yönetimi için önerilen planlama yaklaşımı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kıyı akiferlerini etkileyen parametreler ve akifer yönetimi için önerilen planlama yaklaşımı (Kumar, 2006)

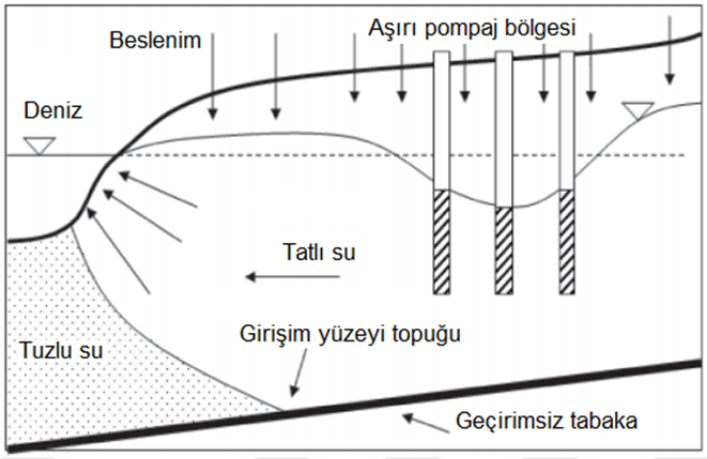
Kıyı bölgelerinde, tuzlu suyun tatlı sudan daha yoğun olması nedeniyle akiferin dibine çökme eğilimi vardır. İki akışkan arasında difüzyon ve dispersiyon etkileri sebebiyle bir karışım bölgesi oluşur (Cooper, 1959). Bu karışım bölgesinde, bir miktar tatlı su ile tuzlu suyun karışması ve denize doğru hareket etmesi, tuzlu

suyun karışım bölgesine doğru akmasına neden olur (Şekil 3.5). Bu karışım bölgesinin yukarısında tatlı su, karışım bölgesi ile su tablası arasında oluşan pencereden denize deşarj olur (Hubbert, 1940). Karışım bölgesinin konumu, şekli ve boyutu, tatlı su ile tuzlu suyun yoğunluk farkına ve yer altı suyunun denize deşarj miktarına bağlıdır (Bear, 1979).



Şekil 3.5. Bir kıyı akiferinde tatlı su, tuzlu su ve karışım bölgesi (Cooper, 1959)

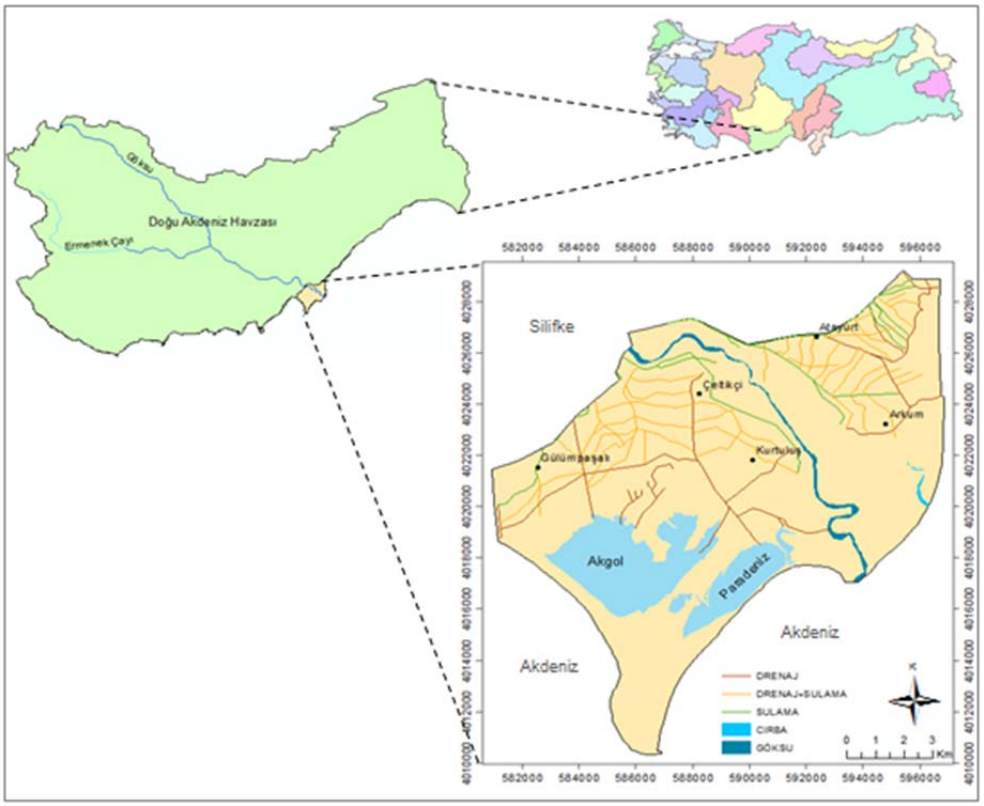
Kıyı akiferinde açılan kuyulardan aşırı su çekilmesi durumunda, tatlı su tablasında düşüş meydana gelir (Şekil 3.6). Tatlı su ile tuzlusu arasındaki mevcut dengenin bozulmasıyla, yeni denge kurulana kadar girişim yüzeyi karaya doğru ilerler. Bu ilerlemeye deniz suyu girişimi adı verilir. Deniz suyu girişiminde akiferin porozitesi, beslenim miktarı, yer altı su seviyesi, denizin tuzluluk oranı, kuyulardan çekilen su miktarı ile çekilen suyun derinliği, akiferin hidrojeolojik yapısı ve kalınlığının önemli etkileri bulunmaktadır.



Şekil 3.6. Serbest yüzeyli kıyı akiferinde aşırı su pompajı (Bear, 1979)

3.1.2. Çalışma Alanı

Bu çalışma için seçilen Göksu Deltası, Türkiye'nin güneyinde Mersin İl merkezinin yaklaşık 80 km batısında Silifke İlçesi'nin güney kenarında yer almaktadır (Şekil 3.7). Delta, Akdeniz'e dökülen 10000 km²'lik havzaya sahip Göksu Nehrinin Silifke-Taşucu arasında denize açıldığı bölgede, nehrin taşıdığı alüvyonların oluşturduğu bir kıyı ovasıdır. Göksu nehrinin batısında iki sığ lagün gölü olan Paradeniz ve Akgöl yer almaktadır. Göksu Deltası toplam 155.34 km^2 karasal alanı kapsamakta, bunun 138 km^2'si kara yüzeyi, 17.3 km^2'si su yüzeyinden oluşturmaktadır. Delta yüzeyi boyunca rakım 0-5 m arasında değişmektedir (ÖÇK, 2009).



Şekil 3.7. Göksu Deltası

Her yıl Batı Palearktik ve Afrika arasında göç eden milyonlarca kuş türünün üç büyük göç yolundan ikisi Anadolu üzerinden geçmektedir. Ülkemiz ağırlıklı olarak yarı kurak bir özellik gösterdiğinden, Anadolu'daki sulak alanlar bu göçmen kuşların pek çoğu için hayati öneme sahiptir. Ayrıca gerek bölgesel gerekse küresel ölçekte gerçekleşen birçok ekolojik sürece katkıda bulunmakla, vazgeçilmez birçok fonksiyon üstlenirler. Göksu Deltası, uygun iklim koşulları, farklı habitatları ve zengin besin varlığı ile değişik türden çok sayıda su kuşuna üreme, beslenme, kışlama ve konaklama olanağı sağlar. Bu özellikleri bakımından ülkemizdeki önemli sulak alanlar arasında seçkin bir yere sahiptir. 1990 yılında 23600 ha'lık bölümü "Özel Çevre Koruma Bölgesi" olarak ilan edilmiş ve Deltada yer alan Akgöl ve Paradeniz lagünlerini kapsayan 4350 ha'lık saha ise "Yaban

Hayatı Koruma Sahası" ilan edilerek kaçak ve usulsüz avcılık kontrol altına alınmıştır.

Göksu Deltası özellikle Su Kuşları Yaşama Ortamı Olarak Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alanlar Hakkında Sözleşme (RAMSAR) kriterlerinin birçoğunu kapsadığı için 1994 yılında RAMSAR Alanı statüsüne sahip olmuştur. Ayrıca bu alan barındırdığı kuş varlığı dikkate alındığında "A Sınıfı Sulak Alan" niteliğindedir. Ramsar Sözleşmesine göre bir defada 25000'in üzerinde su kuşunu barındıran sulak alanlar A sınıfı sulak alandır. Ülkemiz bu sözleşmeye 1993 yılında taraf olmuş, 1994 yılında TBMM tarafından onaylanmıştır. Bölge 12.02.1996 tarih ve 2380 sayılı Adana Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kurulunun kararı ile Birinci Derece Doğal Sit Alanı ilan edilmiştir.

Göksu Deltası, Akdeniz iklimine özgü çok çeşitli doğal bitki örtüsüne sahiptir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü verilerine göre bölgede 352 bitki türü belirlenmiştir. Türkiye'de korunmaya ihtiyacı olan ve dünyanın başka hiçbir yerinde bulunmayan 8 adet tür ile 32 adet nadir tür deltada yaşamaktadır (ÖÇK, 2009).

DSİ sulama ve drenaj kanalları, Deltanın merkezinde ve kuzey bölümünde yer almakta ve 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 tuzlu arası su kalitesine sahip iken; Paradeniz'in alanı 602 ha olup, genellikle hafif tuzlu ve tuzlu arası su kalitesine sahiptir (Haar ve Heunks, 1992). Bu iki göl suni olarak yapılmış bir kanal ile birbirlerine bağlanmıştır.

Drenaj suyu Akgöl'e sulama sistemine bağlı iki kanaldan ve sulanmayan araziyi kurutan birkaç küçük kanaldan girer ve Paradeniz'e doğru akar. Akgöl'deki su seviyesi sulamanın en yüksek olduğu haziran-ekim döneminde en yüksekte ve istikrarlıdır. Kış boyunca su seviyesi yağışa bağlı olarak 0.4 m kadar değişim gösterir. Manley (1997), çalışmasında Akgöl ve Paradeniz göllerine ait

su bütçesini hesaplamıştır (Çizelge 3.1).

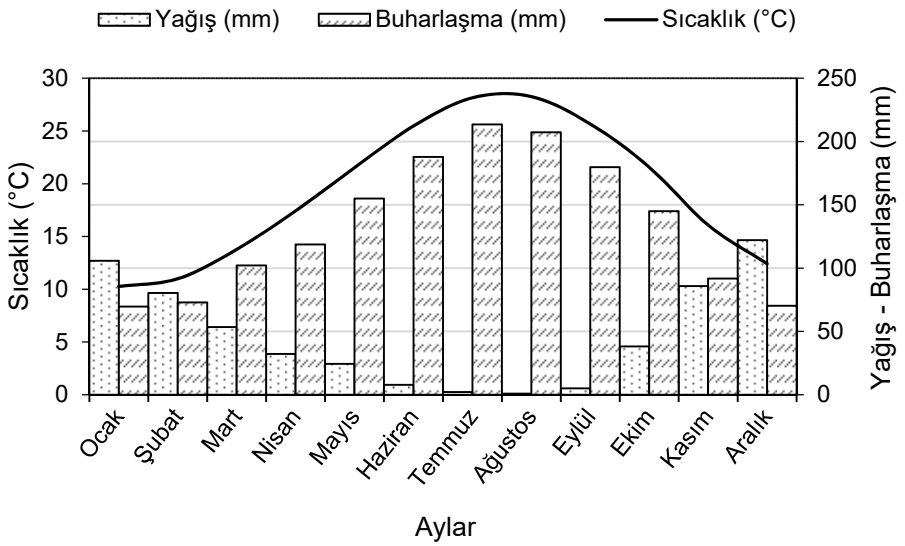
Drenaj kanalları, Akgöl için önemli su girdisi oluşturmaktadır. En önemli su çıkışı buharlaşma olarak görülmektedir. Ayrıca yaz aylarında aşırı buharlaşmadan dolayı su seviyesinin düşmesi sonucu, Paradeniz'den de su girişi olmaktadır.

Çizelge 3.1. Akgöl ve Paradeniz su bütçeleri (Manley, 1997)

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

3.1.3. İklim ve Hidroloji

Delta ve çevresinde, tipik Akdeniz iklimi hakimdir. Kışları ılık ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kuraktır. Silifke Meteoroloji Gözlem İstasyonuna ait 1970-2013 yılları arasındaki 43 yıllık verilere göre, yıllık ortalama sıcaklık 19.3°C'dir. En sıcak aylar 28.1 °C ve 28.3 °C ile Temmuz ve Ağustos, en soğuk ay ise 10.3 °C ile Ocak ayıdır. Maksimum sıcaklık ortalaması en yüksek olan ay 37.3°C ile Temmuz, minimum sıcaklık ortalaması en düşük olan ay ise 2.4°C ile Şubat ayıdır. 43 yıllık verilerin ortalamalarına göre Deltaya yıllık 558.5 mm yağış düşmektedir. En fazla yağış 122.2 mm ile aralık ayında düşerken en az yağış ise 0.9 mm ile ağustos ayında düşmektedir. Yıl boyunca yüksek nem oranı, kıyı ovasının tipik özelliklerindendir. Yıllık oransal nem ortalaması %59.8'dir. Nemin en yüksek olduğu aylar Mayıs, Haziran ve Temmuz iken en düşük olduğu aylar ekim, kasım, aralık ve ocak aylarıdır (Şekil 3.8 ve Çizelge 3.2).



Şekil 3.8. 1970-2013 yılları aylık ortalama sıcaklık-yağış ilişkisi

Çizelge 3.2. Çalışma alanına ait 1970-2013 yılları iklim istatistikleri

Aylar	Sıcaklık (°C)			Nispi Nem (%)	Buharlaşma (mm)	Yağış (mm)	Rüzgâr Hızı (m/s)
	En Yüksek	En Düşük	Ortalama				
Ocak	19.3	2.5	10.3	56.8	69.7	105.8	3.0
Şubat	20.7	2.4	11.0	57.6	73.0	80.4	3.0
Mart	24.6	5.1	13.8	59.4	102.2	53.4	2.5
Nisan	29.9	8.8	17.4	62.9	118.8	32.2	2.0
Mayıs	33.5	12.1	21.5	64.4	155.0	24.3	1.7
Haziran	35.3	16.3	25.5	64.3	187.8	7.9	1.7
Temmuz	37.3	19.9	28.1	64.9	213.5	2.2	1.8
Ağustos	37.2	20.3	28.3	63.9	207.3	0.9	1.9
Eylül	36.0	17.4	25.7	57.9	179.8	5.1	2.1
Ekim	33.2	13.0	21.6	54.0	145.0	38.2	2.4
Kasım	27.3	8.1	16.1	54.9	91.8	85.9	2.6
Aralık	21.0	4.3	12.4	56.9	70.3	122.2	2.8
Toplam					1614	558.5	
Ortalama	29.6	10.8	19.3	59.8	134.5	46.5	2.3

3.1.4. Hidrojeoloji

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, yer altı ve yer üstü sularından 187 adet örnek toplamışlardır. Bunlardan 109 tanesi yüzeysel akiferden, 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 m civarındadır. Tespit ettikleri artezyen kuyularıyla, geçirimsiz veya yarı geçirimli tabakalarla ayrılmış basınçlı akiferler bulunduğunu belirtmişlerdir.

Manley (1997), Devlet Su İşleri (DSİ) ve Doğal Hayatı Koruma Derneği (DHKD) ile birlikte deltada ve özellikle Akgöl'de karşılaşılan problemleri belirlemek için bir çalışma yapmıştır. Bunun için iki temel amaca hizmet edecek bir matematiksel model önermiştir. Birincisi, deltada işleyen süreçleri ve problemlerin sebeplerini iyi bir şekilde anlamak, ikincisi ise mevcut problemlere karşı alternatif çözümlerin test edilmesidir. Çalışma sonucunda, veri eksikliğinden dolayı hassas veri toplama programı kullanılması gerektiğini önermiştir.

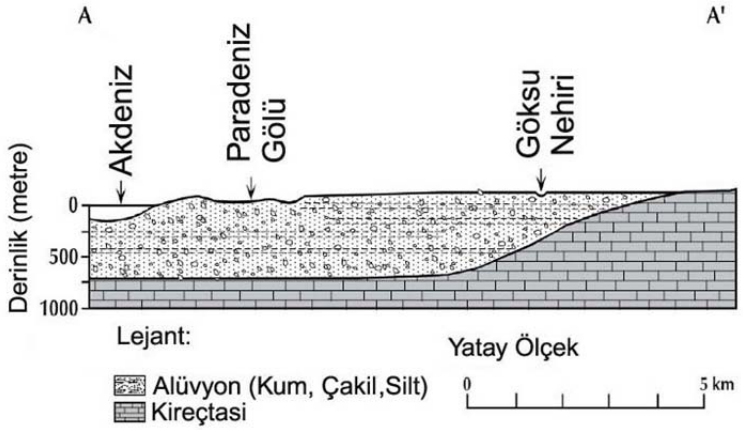
Menengiç (1998), Göksu Deltasının yer altı suyunun potansiyel kirlenme riskini araştırmıştır. Çalışmasında 77 sığ kuyudan, 8 artezyen kuyusundan ve 2 sondaj kuyusundan veri toplamıştır. Çalışmasının sonucunda yüzeyden 20 ila 30 m'ye kadar ulaşan tabakanın aşağısında çoğunlukla killi malzemenin olduğunu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

Gordu (2000), Göksu Deltasında yapmış olduğu çalışmasında, Haar ve Heunks (1992) ile Menengiç (1998)'in çalışmalarındaki verileri birleştirerek Deltaya ait jeolojik tabakaları çıkarmıştır. Yaptığı araştırmalara göre, Göksu

nehrinin taşıdığı alüvyon depozitlerinin derinliği yaklaşık 500 m ile 700 m civarındadır (Çizelge 3.3 ve Şekil 3.9). 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 m ile 30 m derinliğe ulaşmaktadır. Bu 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 geçirimli bir tabaka gibi çalışmaktadır. Kavramsal açıdan, Deltadaki akifer sisteminde, derin tabakalarda artezyen şeklinde basınçlı yer altı suyu bulunmakta, sığ birimlerde ise yer altı suyu, serbest yüzeyli akifer şeklinde bulunmaktadır (Haar ve Heunks, 1992).

Çizelge 3.3. Göksu Deltasındaki jeolojik tabakalar (Gordu, 2000)

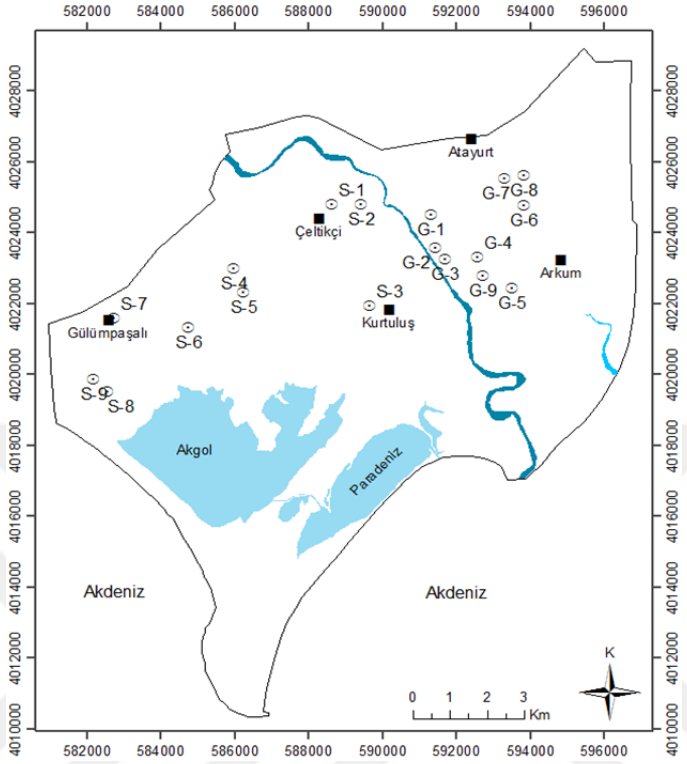
Jeolojik Dönem	Stratigrafi (Tabaka Bilim)	Yaklaşık kalınlık (m)	Litoloji (Taş Bilim)
Holosen (0.01 My–Günümüz)	Quaterner sediment	3–4	Gevşek kum, silt
		20–25	İnce tabakalı farklı dokulu malzemeler, çoğunlukla silt, kum, kil, siltli kil ve kumlu kil
Pleistosen (1.81 My–0.01 My)	Quaterner sediment	>130	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



Şekil 3.9. Göksu Deltası hidrojeolojik enkesiti (Gordu, 2000)

3.1.5. Yer Altı Suyu Gözlem Kuyuları

Modelin kalibrasyon aşamasında kullanmak üzere, arazideki fiziki şartları müsait olan, 9 tanesi Göksu Nehri'nin sol sahilinden sorumlu Göksu Sulama Birliği bölgesinde, 9 tanesi sağ sahilden sorumlu Silifke Sulama Birliği bölgesinde olmak üzere, toplam 18 adet gözlem kuyusunda yer altı su seviyesi ölçülmüştür. Gözlem kuyularının arazideki dağılımı Şekil 3.10'da görülmektedir. Ölçümler 2012 su yılı süresince, aylık olarak ve her ayın son haftasında yapılmıştır. Başlangıçta 19 adet kuyudan ölçüm alınmış, Göksu Sulama Birliği Bölgesindeki bir kuyunun tulumbasına dinamo sistemi bağlandığı görülmüş ve yapılan ölçümlerde yer altı suyu seviyesinin suni olarak yukarı çekildiği tespit edilmiştir. Bu noktadaki yer altı su seviyesi gerçeği yansıtmadığından, kuyuda gözlem yapılmaktan vazgeçilmiştir.



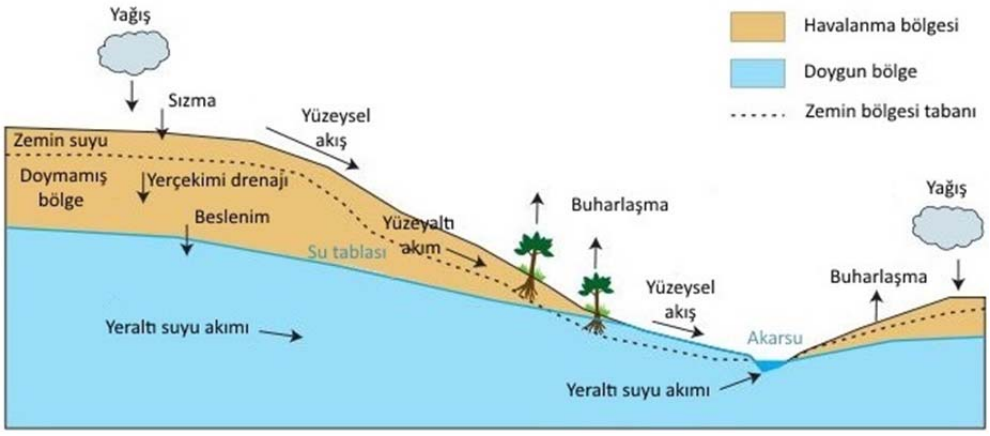
Şekil 3.10. Gözlem kuyularının çalışma alanındaki dağılımı

3.1.6. GSFLOW Akım Modeli

GSFLOW (Ground-water and Surface-water Flow), kavramsal olarak Şekil 3.11'de dağılımı, akış yönü ve etkileşimi gösterilen, yer altı ve yer üstü sularını eş zamanlı olarak simüle etmek için geliştirilmiş birleşik bir hidrolojik akım modelidir. GSFLOW genel anlamda yüzey sularının beslenme ve yer altı su tablasına etkisi, iklim değişikliğinin yer altı ve yer üstü suları üzerinde oynadığı rol ve bu suların kaynaklar, sulak alanlar ve ekolojik sistemlerin davranışlarına etkileri gibi çeşitli araştırma konularıyla ilgili potansiyel uygulamaları kapsayan bir modelleme sistemidir (Markstrom ve ark., 2008).

Yeni model, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (USGS; United States Geological Survey) geliştirdiği Yağış Akış Modelleme Sistemi PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) (Leavesley ve

ark., 1983) ile Modüler Yer altı Suyu Akım Modeli MODFLOW-2005 (Modular Ground-Water Flow Model) (Harbaugh, 2005) olarak adlandırılan iki modelin birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. GSFLOW ilk olarak Mayıs 2008'de yayınlanmıştır. Modelin parametreleri söz konusu iki modelin birleştirilmesini kolaylaştırmak için mevcut parametrelerin modifiye edilmesiyle oluşturulmuştur. PRMS ve MODFLOW, kendi özgünlüklerini korurken aynı zamanda birleşmeye de imkân vermek için, PRMS modülleri ve MODFLOW paketlerinin sonradan eklenmesini sağlayan benzer modüler programlama tekniklerine sahiptirler.



Şekil 3.11. Yer üstü ve yer altı suyunun dağılımı, akış yönü ve etkileşimi (Markstrom, S.L. ve ark., 2008'den uyarlanmıştır)

3.1.6.1. GSFLOW Hesap Adımları

GSFLOW hesaplama adımları GSFLOW simülasyon moduna bağlı olarak çalışır (Ek Şekil 1). Simülasyon, MODFLOW-2005'i içermezse MODFLOW-2005 paketleri pas geçilir. Hesaplama bir günlük zaman adımı döngüsünü kapsar ve takip eden adımlar sadece PRMS'ye göre işler. Aynı şekilde simülasyonda PRMS olmazsa PRMS modülleri pas geçilir, hesaplama standart MODFLOW-2005 stres periyodu, zaman adımı ve iterasyon döngülerine göre yapılır. Birleşik simülasyon modeli ise değişken uzunlukta stres periyotları ve iterasyon döngülerini kapsayan günlük zaman adımında hem PRMS modülleri hem de MODFLOW-2005

paketlerini çalıştırır. İterasyon döngüsü PRMS ve MODFLOW-2005 arasındaki yer altı suyu seviye bağımlı akım denklemleri gibi GSFLOW içerisinde birbirine bağlı denklemleri hesaplar.

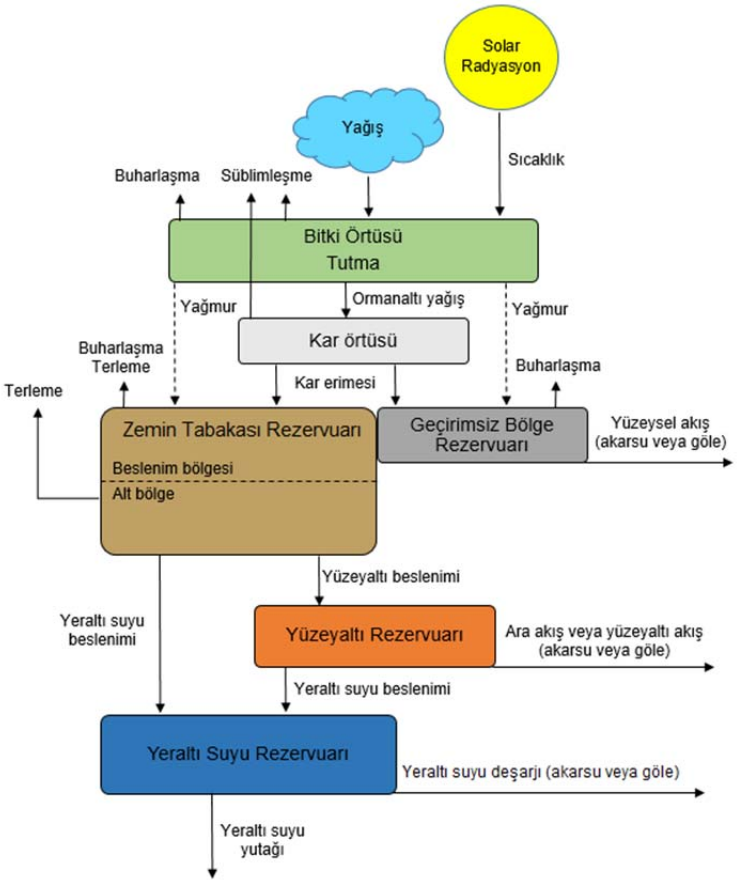
3.1.7. Yağış Akış Modelleme Sistemi (PRMS)

PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) yağış, iklim, arazi kullanımı, sızma ve buharlaşma-terleme gibi yüzeyde işleyen hidrolojik süreçlerin bir fonksiyonu olarak arazi yüzeyindeki su döngüsünü simüle eden bir yer üstü hidrolojik modelidir. Havzanın normal veya aşırı yağışa tepkisi, su dengesi, akarsu rejimi, zemin suyu ve yer altı suyu beslenimindeki değişimler PRMS ile simüle edilebilir.

Akımı modellemek için kullanılan her bir hidrolojik bileşen, PRMS içerisinde fiziksel bir kanuna, veya ölçülen ve tahmin edilen karakteristiklerle ampirik bir ilişkiye dayanan, bir işlem algoritması ile temsil edilir. Hidrolojik sistemin PRMS içinde nasıl kavramsallaştırılıp ayrıklaştırıldığı, belli bir hidrolojik sistemin temsil edilebilmesi için ne şekilde bir model geliştirilebileceği konusunda temel bir anlayış oluşturulmasını da kapsamaktadır. Bununla birlikte bu çalışmada PRMS'nin yapabildikleri GSFLOW ile birleştirilmiş şekliyle ele alınmıştır.

3.1.7.1. Havzadaki Hidrolojik Süreçler

Havza, suyun belirli bir konum üzerindeki akarsuya doğru aktığı arazi parçası olarak tanımlanır (Chow ve ark., 1988). PRMS sonlu veya sonsuz kapasitede bir hacmi temsil eden bir rezervuar dizisi kullanarak havzadaki hidrolojik süreçleri modeller. Su, buharlaşma-terleme, süblimleşme ve akımı simüle etmek için her bir rezervuarda toplanır ve depolanır. Akarsu-kanal ve tutma-rezervuar (veya basit göl) bölümlerinden oluşan drenaj ağına doğru olan akım, yüzeysel akış, ara akış ve yer altı suyu deşarjı ile simüle edilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. PRMS tarafından simüle edilen bir havza ve iklimsel parametreleri (Leavesley ve ark., 1983)

Ölçülen veya tahmin edilen yağış, sıcaklık ve solar radyasyondan oluşan iklim verileri, PRMS modelinde buharlaşma, terleme, süblimleşme, kar erimesi, yüzeysel akış ve sızmayı hesaplamak için kullanılan belirleyici unsurlardır (Leavesley ve ark., 1983). Yağış tipi (yağmur, kar veya ikisinin karışımı) sıcaklık verileriyle belirlenir veya direk girdi verisi olarak kullanılabilir. Yağış bitki örtüsü tarafından tutulabilir ve buharlaşabilir. Orman altı yağış olarak da adlandırılan ve bitki örtüsü tarafından tutulmayan yağış havza yüzeyine dağıtılır. Arazi yüzeyine ulaşan yağış kar örtüsünün bir parçası olabilir, geçirimsiz bölge rezervuarında

depolanabilir, zemin bölgesine sızabilir, buharlaşabilir veya yüzeysel akışa dönüşebilir.

Tüm yer altı bölgesi, zemin tabakası rezervuarı, yüzey altı ve yer altı suyu rezervuarları olmak üzere üç rezervuar ile temsil edilir (Şekil 3.12). Bitki solma eşiğinin üstünde ve arazi kapasitesinin altında olan su doygunluk seviyeleri zemin tabakası rezervuarında simüle edilir. Bu rezervuarda önceden var olan su, mevcut suyun (orman altı yağış ve kar erimesi) yüzeysel akışa ve sızmaya ayrıklaştırılmasını kontrol eder. Zemin tabakası rezervuarında depolanan su, kapiler yani kılcal su olarak adlandırılır. Bu su, bitki tipi ve örtüsü, köklenme derinliği, yağış, solar radyasyon ve sıcaklığa bağlı olarak buharlaşma ve terlemeye dönüşebilir. Zemin tabakası rezervuarı, beslenme bölgesi ve alt bölge olmak üzere ikiye ayrılır. Beslenme bölgesi, buharlaşma ve terleme için mevcut olan maksimum su doyma kapasitesine kadar olan suyu ihtiva eder. Alt bölge ise, rezervuardaki su doyma kapasitesi, maksimum eşiği aştığında su içerir. Alt bölge suyu yalnızca terleme için kullanılabilir. Solma eşiğinin altında, zemin tabakası rezervuarındaki su muhtevasının sabit olduğu ve su dengesi hesaplamalarına dahil edilmediği varsayılmıştır. Bu su, tanecikli matrise kuvvetle yapışır, bitkilerde kullanılamaz ve nispeten hareketsizdir.

Arazi kapasitesi üzerindeki zemin tabakası rezervuarına sızan su, yüzey altı ve yer altı suyu rezervuarlarına dağıtılır (Şekil 3.12). Yüzey altı rezervuarında depolanan su, yer altı suyu rezervuarına yerçekimsel drenaj veya bir nehir veya göle ara akış şeklinde akabilir. Yer altı suyu rezervuarında depolanan su ise bir nehre veya yer altı suyu yutağına deşarj olabilir.

PRMS matematiksel olarak suyu bir tabakadan diğerine yönlendirmek için ampirik bir kurallar dizisi kullanır. Bu ampirik yaklaşım yer altı suyu akım denklemleriyle tanımlanan fizik kurallarına dayalı MODFLOW'dan çok daha basittir. Akım şartları ve bilinen hidrolik parametreleri göz önüne alarak, yer altı suyu akımını daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilen MODFLOW, GSFLOW akım modelinde bu ampirik bileşenin yerini almıştır.

PRMS suyu istenilen çalışma süresi boyunca ve günlük zaman aralıklarında havzanın bağımsız alt alanları içerisinde hareket ettirir. Model, yağış ve sıcaklık gibi meteorolojik veriler ile arazi kullanımı ve bitki örtüsü dağılımına bağlı olarak, bir havzanın hidrolojik döngüsünü simüle edebilir.

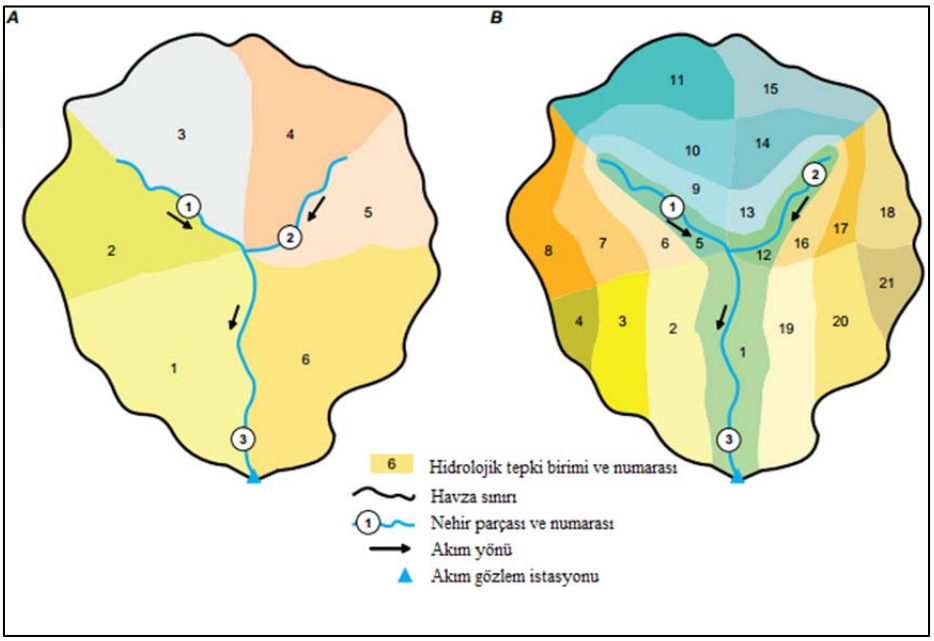
Sıcaklık model için önemli bir parametredir. Çünkü potansiyel buharlaşma-terleme sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Sıcaklık aynı zamanda suyun hidrolojik döngüdeki formunu ve davranışını da belirler. Örneğin sıcaklık 0^{o}C veya altında olursa yağış kar şeklinde olacağından, ani bir sızma veya yüzey akışı söz konusu olamaz. Başka bir deyişle kar kış mevsiminde zemin tabakası veya yer altı suyu rezervuarı gibi hidrolojik sistemin diğer bölümlerine geçmez. Sıcaklık 0^{o}C'nin üzerine çıkana kadar yüzeyde birikir, sıcaklık artınca erimesine izin verilerek sisteme dahil edilir.

Yağışın geçirimsiz yüzeylere düşmesi halinde su direk olarak en yakın nehir ve göle doğru akacaktır. Geçirimsiz yüzeyler asfalt yollar veya beton kaplı alanlar gibi kentsel bölgelerdeki alanlar olabilir. Havzanın diğer kısımlarında ise belli bir ölçüde zemine sızma söz konusudur. Akışın ne ölçüde meydana geldiği model içinde çeşitli ampirik parametreler tarafından belirlenir.

3.1.7.2. Hidrolojik Tepki Birimleri

PRMS'nin temel elemanı, bir havzaya ait arazi kullanımı, bitki örtüsü, yağmur/kar dağılımı, sıcaklık, drenaj özellikleri, toprak morfolojisi ve jeolojik durum gibi faktörler bakımından homojen olan alt havzalar olarak tanımlanabilecek Hidrolojik Tepki Birimleridir (Hydrologic Response Units, HTB). Uygulamada bazı havza karakteristiklerinin mekânsal değişimi, çalışma alanının söz konusu HTB'lere bölünmesiyle hesaplanır. Su ve enerji dengesi günlük olarak her bir HTB için hesaplanır. Her bir HTB sayısal olarak numaralandırılır. Numaralandırmanın hangi HTB'den başlayacağı isteğe bağlıdır ancak benzersiz, ardışık olmalı ve 1'den başlamalıdır.

Tipik olarak üç ayrıklaştırma yaklaşımı kullanılır (Viger ve Leavesley, 2007). Bunlar; tepe eğimleri ve akış düzlemlerini temsil eden düzensiz şekilli poligonların oluşturulduğu topolojik yaklaşım, düzenli dikdörtgenlerin oluşturulduğu ağ tabanlı yaklaşım ve havza karakteristiklerinin kombinasyonuyla belirlenen, benzersiz ve düzensiz şekilli poligonların oluşturulduğu ayrık yaklaşımdır (Şekil 3.13).



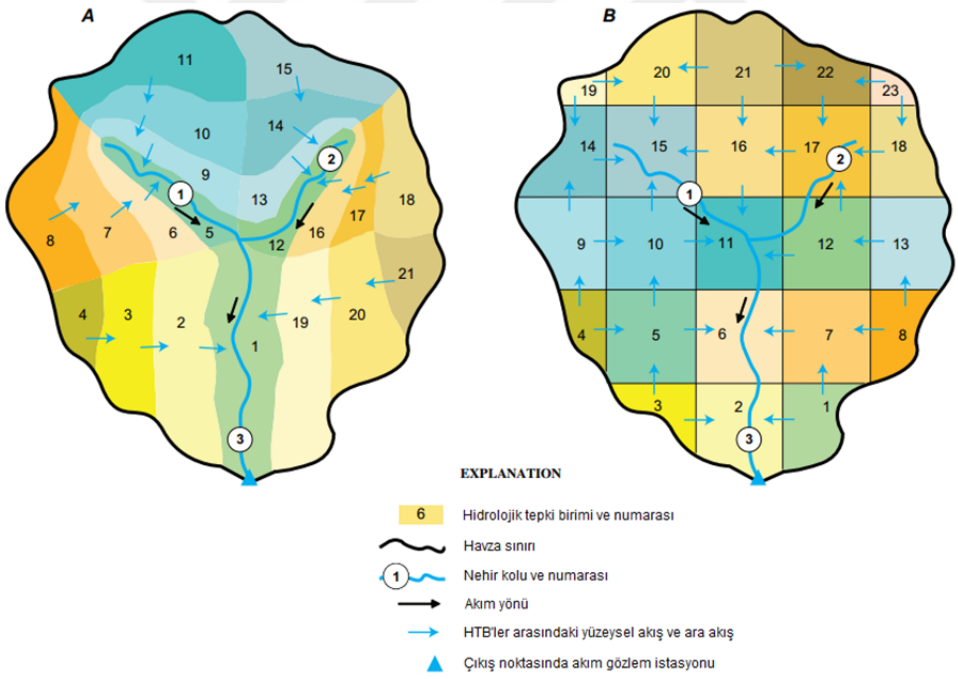
Şekil 3.13. Kavramsal bir havzanın hidrolojik tepki birimlerine ayrıklaştırılması, (A) topolojiye, (B) topoloji, iklim ve bitki örtüsüne göre

3.1.7.3. Kademeli Akım Prosedürü

Hidrolojik tepki birimleri ile nehir ve göller arasındaki yer üstü ve ara akışı yönlendirmek için geliştirilen kademeli akım prosedürü (cascading-flow procedure), dönüşümsüz bir akım ağı (acyclic-flow network) kullanır (Ford ve Fulkerson, 1956). Akış yolları, en yüksek kottaki HTB'lerden başlar ve bir nehir kolu veya göle ulaşana kadar düşük kottaki HTB'lere doğru devam eder. Kademeli

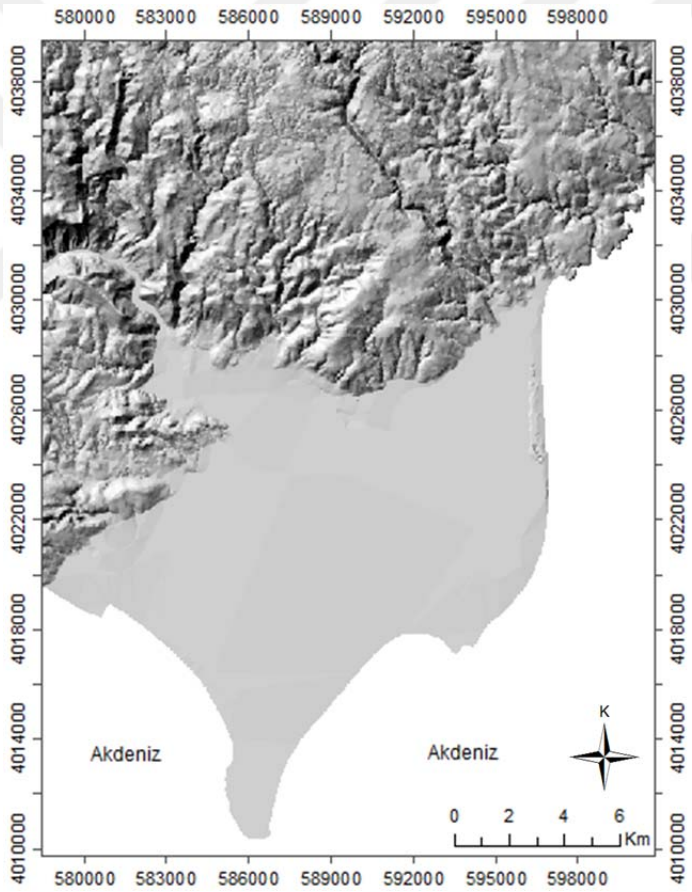
akış, birçok farklı yol boyunca gerçekleşebilir. Nehir kollarına veya göllere ulaşmadan önce, düşük kottaki HTB'lerin zemin tabakasında depolanmasını sağlar.

PRMS parametreleri, bir rezervuardan diğerine doğru olan akımları, düşük kottaki HTB'lere akışı yönlendiren üst kottaki HTB'deki alan parçasını tanımlamak için kullanılır. Girdi parametreleri, HTB'lerin oluşturulmasında kullanılan, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) akım toplama ve yönlendirme analizine dayanarak elde edilebilir (Şekil 14A). HTB'lerin sonlu fark grid ağı ile oluşturulması durumunda, sonlu fark hücreleri arasındaki akım yolları, hücrelerin kendi yüzey kotlarıyla belirlenebilir (Şekil 14B). Kademeli akım parametreleri tüm HTB'leri hesaba katmalı, her bir akım yolu, nehir kolu veya gölde sonlandırılmalı ve yol içinde döngüler oluşmamalıdır.



Şekil 3.14. HTB'ler ve nehir kolları arasında kademeli akımın oluşturulması, (A) topoloji, iklim ve bitki örtüsüne, (B) sonlu fark grid ağına göre

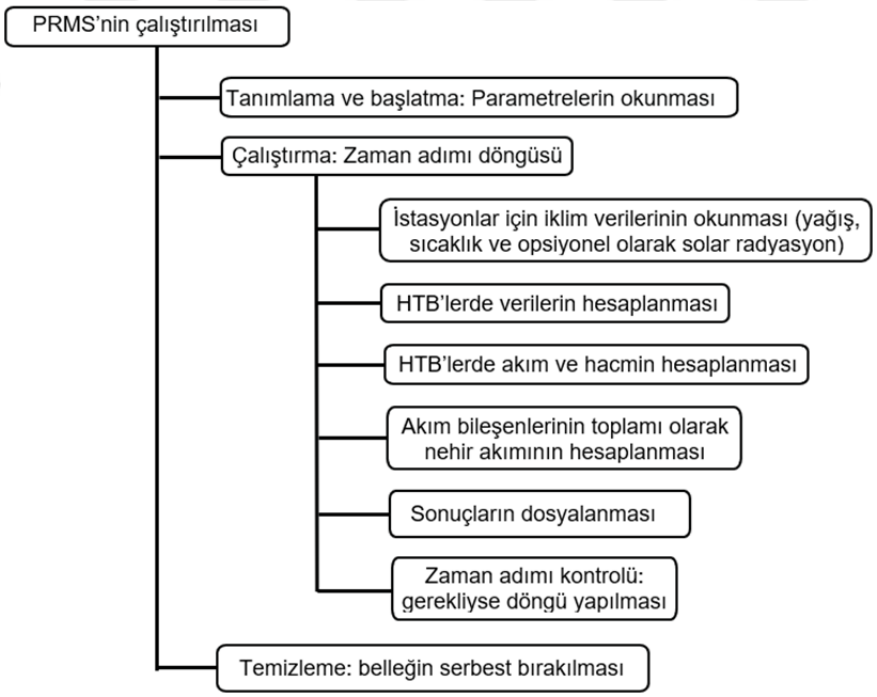
Göksu Deltası için temin edilen SYM, yer üstü akımının doğrultusu ve toplanma bölgelerinin tespiti için düşük çözünürlüktedir (Şekil 3.15). Dolayısıyla kademeli akım parametreleri, SYM akım toplama ve yönlendirme analizi ile belirlenememiştir. Bunu için, USGS'nin geliştirdiği, GSFLOW ve PRMS modellerinde kullanılabilen, Kademeli Yönlendirme Aracı (Cascade Routing Tool, CRT) adlı programdan yararlanılmıştır (Henson ve Niswonger, 2016). CRT, yer üstü ve sığ yüzey altı akım yollarını belirleyerek PRMS ve GSFLOW'da kullanılan kademeli akım parametrelerini hesaplar (Henson ve ark., 2013).



Şekil 3.15. Çalışma alanını kapsayan sayısal yükseklik modeli

3.1.7.4. PRMS Hesap Adımları

Modelin uygulanması kontrol ve parametre dosyalarının okutulmasıyla başlar. Hidrolojik süreçler ve program seçenekleri girdi verilerinin okunmasıyla belirlenir ve takiben tüm gerekli parametre ve değişkenler tanımlanır. Daha sonra zaman adımı döngüsü başlatılır ve her bir istasyon için yağış, sıcaklık, opsiyonel olarak solar radyasyon veri dosyasından okunarak alandaki her bir HTB'ye dağıtılır. Akım ve hacimlerin hesaplanması bitki örtüsü, arazi yüzeyi, zemin tabakası, yüzey altı ve yer altı suyu rezervuarları boyunca herhangi bir akıma ulaşana kadar suyun ilerleyişini takip eder. Sonuçlar bir çıktı dosyasına kaydedilir ve bir önceki zaman adımı için hesaplamalar bittiğinde yeni bir zaman adımı başlatılır (Şekil 3.16). Son zaman adımı tamamlanana kadar her biri için akım ve hacmin hesaplanması devam eder. Tüm zaman adımları simüle edildikten sonra çıktı dosyaları kapatılır ve ayrılan bellek serbest bırakılır.



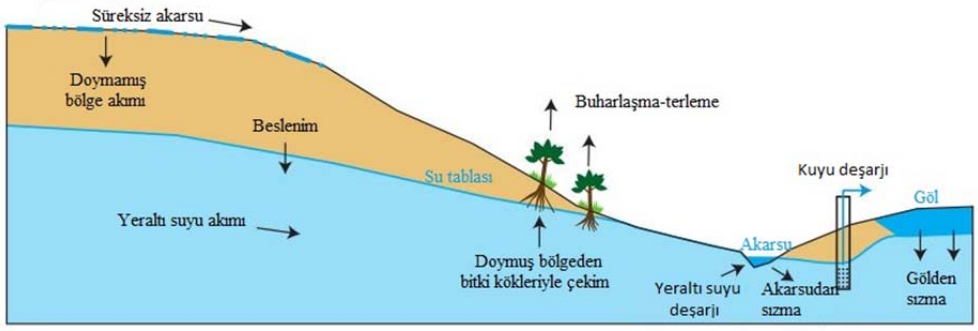
Şekil 3.16. Simülasyon için kullanılan PRMS hesaplama adımları

3.1.8. Yer altı Suyu Akım Modeli (MODFLOW-2005)

MODFLOW-2005 çoğunlukla MODFLOW olarak bilinen sonlu farklar üç boyutlu yer altı suyu akım modelinin yeni bir versiyonudur (McDonald ve Harbaugh, 1988; Harbaugh ve McDonald, 1996; Harbaugh ve ark., 2000). USGS tarafından hidrojeoloji alanındaki uygulamalarda karşılaşılan problemleri çözmeye yönelik uzun yıllar boyunca geliştirilerek güçlü bir modelleme aracı haline getirilen MODFLOW-2005'in, McDonald ve Harbaugh tarafından geliştirilen ilk sürümü 1984 yılında yayınlanmıştır. Programın hali hazırdaki son sürümü (v1.12.00) 2017'de yayınlanmıştır (Harbaugh ve ark., 2017).

3.1.8.1. Yer altında İşleyen Süreçler

Suyun yerin altında aktığı ve depolandığı gözenekli ve geçirgen ortamlara akifer denir (Meinzer, 1923). Yer altındaki doygun düşük geçirgenlikli bölgeler de çoğunlukla sınırlama tabakası olarak adlandırılır (Lohman ve ark., 1972; Sun, 1986). Yer altı, kısmen doymuş (doymamış tabaka) veya tamamen doymuş (doymuş tabaka) olan jeolojik materyallerden meydana gelmektedir. Doymuş tabakanın modellenen kısmı, sınırlama tabakası tarafından birbirinden ayrılan ve toplu olarak akifer sistemi olarak adlandırılan birçok akiferden oluşabilir. MODFLOW-2005 su tablası boyunca bölgesel beslenim, akarsu ve göllerden akifere sızma, sabit veya hidrolik yükün bir fonksiyonu olarak değişen oranlardaki yüzey altı akışı, bitkilerden buharlaşma-terleme yoluyla deşarj, pompaj kuyularından deşarj, akarsu ve göllerden deşarj gibi süreçleri hesaplayabilir (Şekil 3.17). Sınırlama tabakaları ayrı birimler şeklinde veya dolaylı olarak akifer sisteminin genel özellikleriyle ifade edilebilen quasi üç boyutlu yaklaşımıyla simüle edilebilir. Kuyular ise bir veya daha fazla akiferden suyu uzaklaştırmak veya akifere suyu eklemek şeklinde simüle edilir. MODFLOW-2005 başlangıçta sadece doymuş tabakayı simüle etmek için tasarlandıysa da Doymamış Tabaka Akım Paketi (Niswonger ve ark., 2006a), MODFLOW-2005'e su tablası üzerindeki doymamış tabaka boyunca bir boyutlu akımı simüle etme özelliği kazandırmıştır.



Şekil 3.17. MODFLOW-2005 ile simüle edilebilen kavramsal bir akifer sisteminde akım

MODFLOW-2005 pratikte karşılaşılan karmaşık problemleri modelleyebilme konusunda oldukça yeteneklidir. Birbirinden farklı yapılardaki hidrojeolojik süreçleri üç boyutlu olarak simüle edebilir. Bu durum kullanıcının karmaşık hidrolik iletkenlik veya geçirgenliğe sahip akım alanlarını modellemesine imkân verir. Model, akarsu beslenme ve deşarjı, pompaj, drenaj ve buharlaşma-terleme gibi süreçlerle temsil edilen, sisteme giren ve çıkan akımları modelleyebilir (Harbaugh, 2005). Kullanıcı hidrolik yük dağılımı, yer altı su seviyesindeki düşüşler ve akış yönleri gibi çeşitli sonuçları çıktı olarak görebilme konusunda büyük bir esnekliğe sahiptir.

MODFLOW aşağıda gösterilen üç boyutlu zamana bağlı yer altı suyu akım denkleminin sayısal çözümünü verir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+W=S_S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (3.1)$$

Burada;

K_{xx}, K_{yy} ve K_{zz} : x, y, z eksenleri boyunca hidrolik iletkenlikleri (LT^{-1}),

h : hidrolik yükü (L),

W : birim hacim için hacimsel yer değiştirmeyi (su giriş veya çıkışı) (T^{-1}),

S_S : özgül depolama katsayısını (L^{-1})

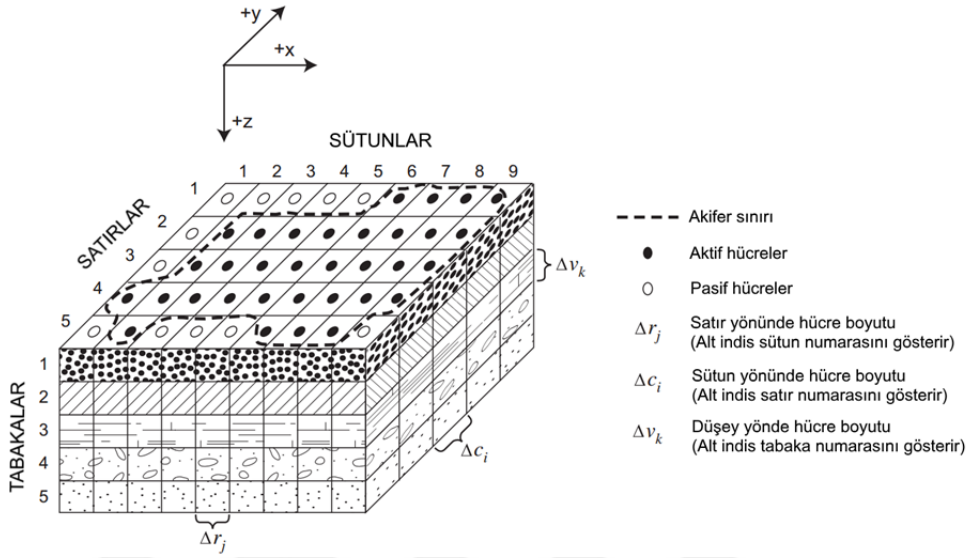
t : ise zamanı (T) ifade eder.

Çoğunlukla S_S, K_{xx}, K_{yy} ve K_{zz} mekânın, h ve W ise mekân ve zamanın fonksiyonlarıdır. Denklem heterojen ortamlarda dengesiz akım şartlarında yer altı suyu akımını ifade eder.

MODFLOW-2005 Fortran 90 programlama dilinde yazılmış ve birçok paket ve modüllere ayrılmıştır. Hali hazırda bir GSFLOW modeli için 4 adet çözücü paketiyle beraber toplam 18 adet MODFLOW-2005 paketi uygulanabilir. Nehir (river, RIV) ve drenaj (drain, DRN) paketlerinin de dahil olduğu toplam 9 adet MODFLOW-2005 paketi henüz GSFLOW için kullanılamamaktadır. Bu tez çalışması için kurulan modelde kullanılan paketler ilerleyen bölümlerde belirtilmiştir.

3.1.8.2. Akifer Sisteminin Ayrıklaştırılması

Bir akifer sistemi MODFLOW-2005 içinde, yer altı su seviyelerini ve akımları hesaplamak için kullanılan hücrelerden oluşan bir sonlu fark grid ağı ile ayrıklaştırılır. Sonlu fark grid ağı hidrolik iletkenlik eksenleriyle aynı doğrultuda olmalıdır. Sonlu fark hücreleri i, j ve k indislerine göre numaralandırılır. Burada; i satır indeksi, j sütun indeksi ve k tabaka indeksidir (Harbaugh, 2005). Yatay ayrıklaştırma, satır ve sütunlardan oluşan dikdörtgen biçimli grid ağı oluşturularak yapılır. Satırlar x eksenine paralel olarak hizalanır. Satır indeksi i, y yönünde azalır. Sütunlar y eksenine paralel hizalanır. Sütun indeksi j, x yönünde artar. Düşey ayrıklaştırma tabakalarla tanımlanır. Hücre tabakaları yatay düzleme paralel olarak hizalanır. Tabaka indeksi k, z yönünde artar (Şekil 3.18). Dolayısıyla modelin en üst tabakası k=1'e karşılık gelir. Her bir tabakadaki sol üst hücre birinci satıra (i=1) ve birinci sütuna (j=1) karşılık gelir. Tabakalar sabit veya değişken kalınlıkta olabilir.



Şekil 3.18. Ayrıklaştırılmış kavramsal bir akifer sistemi

Sınır koşullarını simüle etmek için kullanılan hücreler, belirli hidrolik yük (specified-head) hücreleri ve akış olmayan (no-flow) hücreler olarak ikiye ayrılır (Harbaugh, 2005). Belirli hidrolik yük hücreleri için veri girişinde bir hidrolik yük belirtilir. Sonraki zaman ve stres periyotları için veri girişinde değiştirilmedikçe hidrolik yük değeri değişmez. Akış olmayan hücreler, hücre içine veya hücreden dışarı akışa izin verilmeyen hücrelerdir. Yer altı su seviyesi akış olmayan hücreler için hesaplanmaz. Diğer hücreler değişken hidrolik yük hücreleri olarak adlandırılır. Çünkü hidrolik yükler bu hücrelerde hesaplanır ve hesaplanan yükler zamanla değişebilir (Harbaugh, 2005). Sonlu fark grid ağının en üstü veya en altı boyunca veya akifer sisteminde bir kenarın, grid ağının dış kenarıyla çakıştığı yerlerde özel bir tanımlamaya gerek yoktur. Sonlu fark grid ağı içindeki herhangi bir hücre, akifer sisteminin akış olmayan sınırlarını yaklaşık olarak belirlemek için akış olmayan hücreler olarak tanımlanabilir. Akış olmayan hücreler, akımın oluşmadığı sonlu fark grid ağındaki iç bölgeleri temsil etmek için değişken hidrolik yük hücreleri ile çevrelenebilir.

3.1.8.3. Eş Değer Tatlı Su Yükü

Denize kıyısı olan bölgesel yer altı suyu akım sistemlerinde, deniz suyu girişiminin etkileri, kıyı sınır koşulu için çeşitli yaklaşımlarla ifade edilmiştir. Birçok yer altı suyu akım modelinde kıyı sınırı, belirli hidrolik yük sınır koşulu ile (specified-head boundary) temsil edilir ve belirtilen hidrolik yük değerleri deniz seviyesi (h=0) veya eş değer tatlı su yüküne eşittir (Motz ve Sedighi, 2009).

MODFLOW gibi sabit yoğunluklu yer altı suyu akım modellerinde, kıyı sınırı hidrolik yükünün, tatlı su basıncından daha yüksek olan deniz suyu basıncına uyacak şekilde ayarlanması gerekir. Bu ayarlama, eş değer tatlı su yükünün hesaplanmasıyla yapılır. Aşağıda eş değer tatlı su yükü ve su yüksekliği ile olan ilişkisi detaylı şekilde anlatılmıştır.

Tuzlu su içeren bir akiferin herhangi bir N noktasına açılan iki adet piezometre Şekil 3.19'da görülmektedir. Tatlı su ile dolu olan A piezometresi, akiferdeki tuzlu suyun piezometredeki tatlı su ile karışmasını önleyen bir mekanizma ile donatılırken, piezometrenin N noktasındaki basıncı tam olarak yansıtmasını sağlar. B piezometresi ise, N noktasındaki tuzlu su içeren akiferle aynı suyu içerir. A piezometresinde, N noktasının üzerinde bulunan su 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:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f \times g} + Z_N \tag{3.2}$$

Burada;

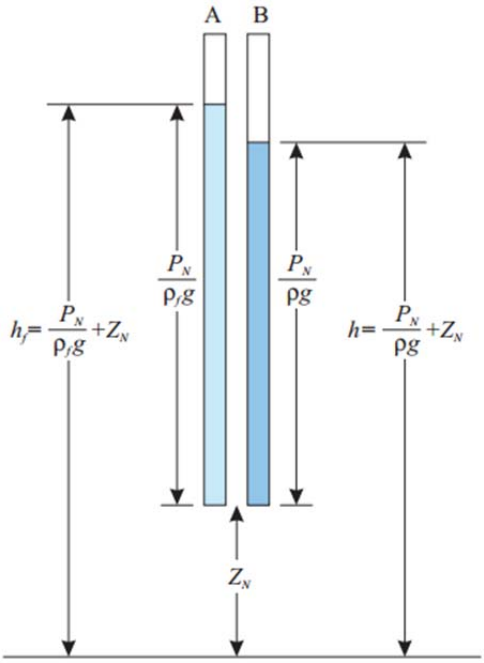
h_f : eş değer tatlı su yükü (m),

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

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

g : yer çekimi ivmesini, (m/s^2)

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



Şekil 3.19. Aynı noktada açılan, biri tatlı suyla (A), diğeri tuzlu suyla (B) dolu iki piezometre

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

$$h = \frac{P_N}{\rho \times g} + Z_N \tag{3.3}$$

Burada;

h : su yüksekliğini (m),

ρ : N noktasındaki tuzlu yer altı 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 mevcut ise farklı su yükseklikleri elde edilir. Yer altı suyu akım denklemi, h terimi kullanılarak ifade edilebilir. Ancak sonuçlar yoğunluk ve türevlerine bağlı kullanışsız ifadeler içerir. Bu da hesaplamada herhangi bir avantaj sağlamaz. Diğer taraftan, akım denklemi, eş değer tatlı su yükü cinsinden formüle edilirse karmaşıklık ortadan kalkar ve küçük bir değişiklikle MODFLOW gibi yazılımların kullanımına imkân sağlar.

Eş değer tatlı su yükü hacimsel yer altı suyu akımını hesaplamak için Darcy denkleminin değişken yoğunluklu formunda kullanılabilir. Ancak, eş değer tatlı su yükü Şekil 3.19'da görüldüğü üzere akiferdeki tuzlu yer altı su seviyesini temsil etmez. Eş değer tatlı su yükü ile doğal akiferdeki su yüksekliği arasında dönüşüm yapılması gereklidir. Bu dönüşüm aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılabilir:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} Z \tag{3.4}$$

ve

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho} Z \tag{3.5}$$

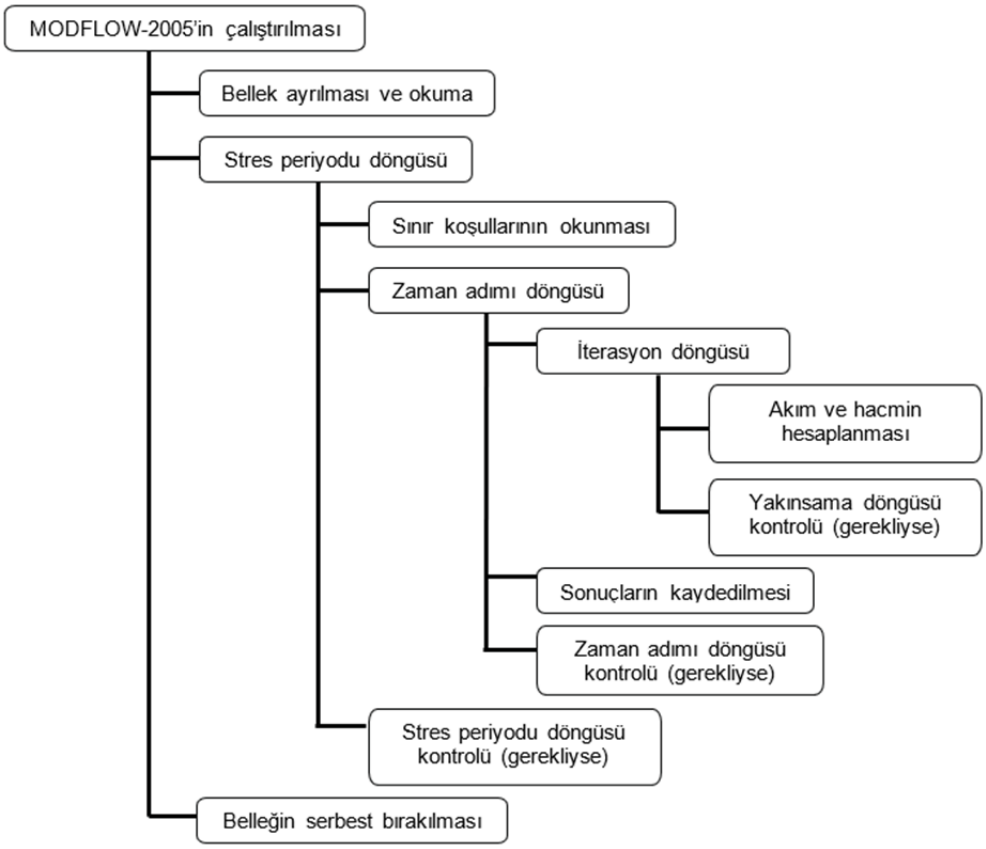
Burada, Z (m), yüksekliği temsil etmektedir.

3.1.8.4. MODFLOW-2005 Hesaplama Adımları

MODFLOW-2005 simülasyonu, stres periyotlarıyla değişmeyen girdi verilerinin okunmasıyla başlar. Simüle edilecek hücre sayısı, stres periyodu seçenekleri ve çözüm metodu ile birlikte belirlenir. Daha sonra tüm simülasyon

için bilgisayarda bellek ayrılır. Bellek ayırma işlemini takiben sonlu fark grid ağı, stres periyotları ve zaman adımları ile her bir sonlu fark hücresi için başlangıç yer altı su tablası ve hidrolik özellikler okunur (Şekil 3.20). Hesaplama dizisi üç temel döngüyü takip eder. İlk döngü belirtilen stres verilerinin sabit kaldığı stres periyodu döngüsüdür. Stres periyodu döngüsü, her bir zaman adımında yer altı su tablası ve seviye bağımlı sınırlara giren ve sınırlardan çıkan akımların hesaplandığı zaman adımı döngüsünü kapsamaktadır. İteratif çözüm metotları iterasyon döngüsünde her bir zaman adımı için seviyeleri belirlemek için kullanılır.

Akımlar, yer altı su tablası ve su bütçesi, istenildiğinde herhangi bir zaman adımı sonunda kaydedilebilir veya çıktısı alınabilir. Program her bir zaman adımı ve stres periyodu boyunca simülasyon bitene kadar çalışmaya devam eder. Bununla birlikte program herhangi bir zaman adımında, belirtilen bir iterasyon sayısı içinde belli bir hata toleransının altına düşmezse sonlanabilir. Programın bu şekilde sonlandırılması, yakınsama hatası olarak adlandırılır. Yakınsama hatası (sadece MODFLOW simülasyonu için geçerli olan) zaman adımı sayısının artırılması, çözücü başlangıç parametrelerinin veya diğer girdi verilerinin değiştirilmesiyle azaltılabilir (Markstrom ve ark., 2008).



Şekil 3.20. Akifer sistemi boyunca yer altı suyu akımı simülasyonu için kullanılan MODFLOW-2005 hesap adımları

3.1.9. Etkileşim Modeli İçin Kullanılan Veriler

Bu çalışmada kurulan model için, girdi verisi olarak çalışma alanına ait bazı hidrolojik, meteorolojik ve hidrojeolojik veriler toplanmıştır. Toplanan veriler:

- ✓ 1970-2013 yıllarını kapsayan günlük toplam yağış, günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar ve günlük toplam buharlaşma gibi iklim verileri ile aynı yılları kapsayan günlük ortalama akımlar.
- ✓ Mekansal veriler: Sayısal yükseklik modeli (SYM), arazi kullanımı ve toprak litolojisi haritaları.

- ✓ Pompaj ve gözlem kuyuları ile ilgili deltada önceden yapılmış çalışmalardan elde edilen veriler ve 2012 su yılına ait statik yer altı suyu seviyelerini kapsamaktadır.

İklim verilerinin ölçüldüğü Silifke Meteoroloji Gözlem İstasyonu ile günlük ortalama akımların ölçüldüğü Karahacılı Akım Gözlem İstasyonunun konumları Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3.21. Karahacılı Akım Gözlem İstasyonu ve Silifke Meteoroloji Gözlem İstasyonu

3.2. Yöntem

3.2.1. Verilerin Hazırlanması

GSFLOW için gereken girdi verilerinin hazırlanması; veri dosyası, GSFLOW haritaları, parametre dosyası ve MODFLOW girdi dosyalarının

oluşturulmasını kapsar. Bu girdilerin hazırlanması için çeşitli bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır:

- ArcGIS v10.1
- USGS PRMS Paramtool
- Microsoft Excel
- USGS ModelMuse
- USGS CRT v1.3.1

ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) günümüzde sıkça kullanılan, coğrafi mekânsal bilgilerin işlendiği ve yönetildiği popüler bir yazılımdır. Yapabildikleri ve bünyesinde barındırdığı kullanışlı eklentilerden dolayı, bu çalışmada özellikle GSFLOW'daki bazı alan parametreleri için harita üretiminde kullanılmıştır. PRMS Paramtool, USGS'ye ait PRMS ve GSFLOW için kullanılan java tabanlı bir kullanıcı ara yüzüdür. ArcGIS'te veriler üretildikten sonra Paramtool programı yardımı ile akarsu, drenaj kanalı ve göller ile meteorolojik veriler gibi tüm parametreler, her bir HTB için düzenlenir. Microsoft Excel, iklim ve akım verilerinin GSFLOW'un kullanabileceği uygun formata dönüştürülmesi ve çeşitli tablo ile şekillerin oluşturulması için kullanılmıştır. USGS ModelMuse (Winston, 2009), GSFLOW için gereken MODFLOW girdi verilerinin hazırlanması ve MODFLOW-2005 programının çalıştırılması için kullanılan bir grafiksel kullanıcı ara yüzüdür. Kademeli Yönlendirme Aracı CRT (Cascade Routing Tool), akımın HTB'ler arasında, nehir ve göllere iletilmesini sağlamak için kullanılmıştır.

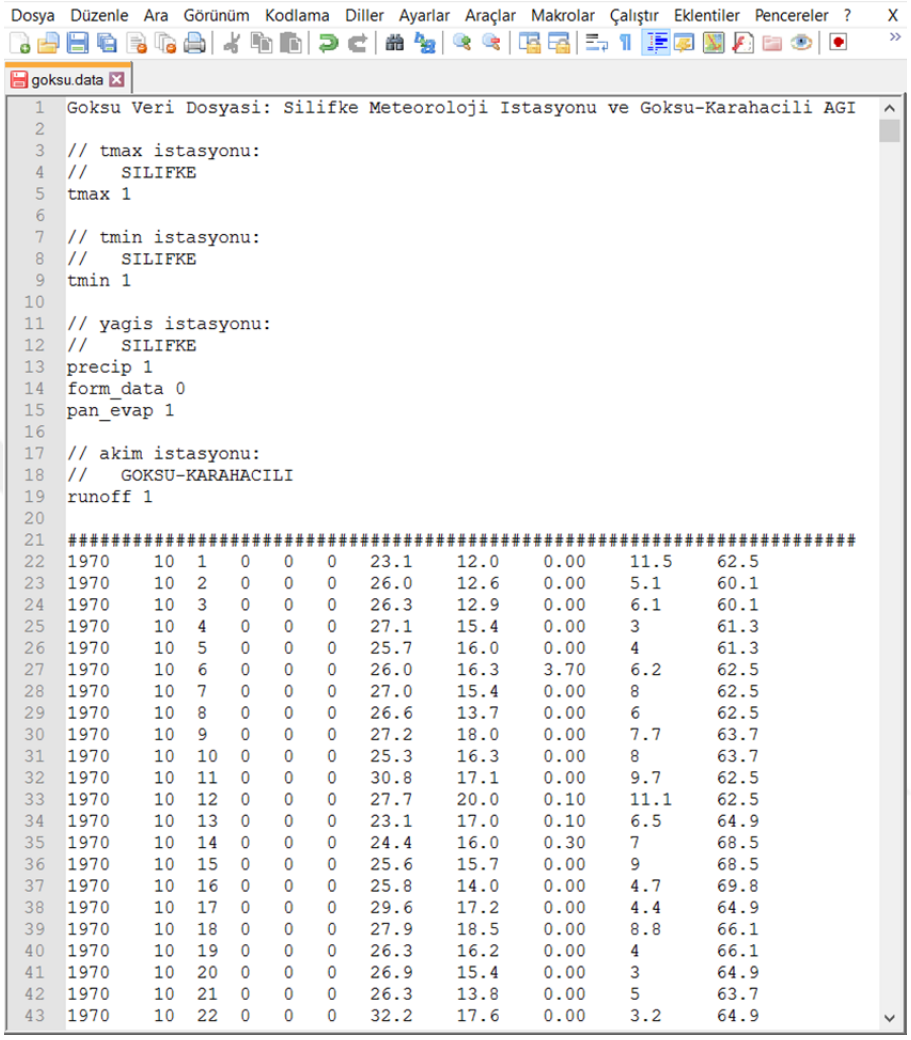
3.2.2. PRMS ve GSFLOW Verileri

PRMS, bağımsız veya GSFLOW'un parçası olarak çalışabilen bir programdır. Bu nedenle girdi verileriyle hidrolojik sistemin temsil edildiği kavramsallaştırmalar iki model için de geçerlidir. GSFLOW akım modelinin

PRMS kısmını çalıştırmak için veri, parametre ve kontrol dosyaları olmak üzere üç dosyaya ihtiyaç vardır. Bu dosyalar Modüler Modelleme Sistemi (Modular Modeling System) girdi verisi dosya formatlarına dayanmaktadır (Leavesley ve ark., 1996b).

3.2.2.1. Veri Dosyası

PRMS veri dosyası 01/10/1970 ile 09/30/2013 yıllarını kapsayan zaman aralığı için oluşturulmuştur (Şekil 3.22). Veri dosyası, Silifke ilçe merkezinde bulunan 17330 numaralı Silifke Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar, günlük toplam yağışlar ve günlük ortalama buharlaşma verileri ile, Silifke ilçesinin yaklaşık 15 km kuzeybatısında, Ermenek Çayı'nın Göksu Nehri'ne katıldığı lokasyondan 40 km güneydoğuda bulunan Karahacılı Akım Gözlem İstasyonu'ndan ölçülmüş günlük akımları içermektedir.




```
Goksu Veri Dosyasi: Silifke Meteoroloji Istasyonu ve Goksu-Karahacili AGI

// tmax istasyonu:
//   SILIFKE
tmax 1

// tmin istasyonu:
//   SILIFKE
tmin 1

// yagis istasyonu:
//   SILIFKE
precip 1
form_data 0
pan_evap 1

// akim istasyonu:
//   GOKSU-KARAHACILI
runoff 1

##############################################################################
1970    10  1   0   0   0   23.1    12.0    0.00    11.5    62.5
1970    10  2   0   0   0   26.0    12.6    0.00    5.1     60.1
1970    10  3   0   0   0   26.3    12.9    0.00    6.1     60.1
1970    10  4   0   0   0   27.1    15.4    0.00    3       61.3
1970    10  5   0   0   0   25.7    16.0    0.00    4       61.3
1970    10  6   0   0   0   26.0    16.3    3.70    6.2     62.5
1970    10  7   0   0   0   27.0    15.4    0.00    8       62.5
1970    10  8   0   0   0   26.6    13.7    0.00    6       62.5
1970    10  9   0   0   0   27.2    18.0    0.00    7.7     63.7
1970    10  10  0   0   0   25.3    16.3    0.00    8       63.7
1970    10  11  0   0   0   30.8    17.1    0.00    9.7     62.5
1970    10  12  0   0   0   27.7    20.0    0.10    11.1    62.5
1970    10  13  0   0   0   23.1    17.0    0.10    6.5     64.9
1970    10  14  0   0   0   24.4    16.0    0.30    7       68.5
1970    10  15  0   0   0   25.6    15.7    0.00    9       68.5
1970    10  16  0   0   0   25.8    14.0    0.00    4.7     69.8
1970    10  17  0   0   0   29.6    17.2    0.00    4.4     64.9
1970    10  18  0   0   0   27.9    18.5    0.00    8.8     66.1
1970    10  19  0   0   0   26.3    16.2    0.00    4       66.1
1970    10  20  0   0   0   26.9    15.4    0.00    3       64.9
1970    10  21  0   0   0   26.3    13.8    0.00    5       63.7
1970    10  22  0   0   0   32.2    17.6    0.00    3.2     64.9
```

Şekil 3.22. Göksu Deltası için hazırlanan veri dosyası

Girdi değişkeni bildirim öğeleri, PRMS veri dosyasına dahil edilen zaman serisi verilerinin türünü belirtmek için kullanılır. Her bir zaman serisi verisini tanımlamak için bir satır kullanılır. Bir girdi değişkeni bildirim öğesinden önce veya sonra boş satırlar veya yorum satırları eklenebilir. Yorum satırları, herhangi bir girdi değişkeni hakkında açıklayıcı bilgiler içermek üzere, 1 ve 2 sütunlarındaki iki eğik çizgiyle (//) başlar. Her öğe iki değer belirtir: Bunlar, girdi değişkeninin adı olan bir karakter dizisi ve girdi değişkeni için her bir zaman serisi verisinde

belirtilen değerlerin sayısı olan bir tam sayıdır. Göksu Deltası için hazırlanan veri dosyasındaki tmax 1 ve tmin 1 değişkenleri, Silifke Meteoroloji İstasyonunda ölçülen, günlük maksimum ve günlük minimum sıcakları, 1 sayısı ise istasyon sayısını ifade eder. precip 1 değişkeni, aynı gözlem istasyonunda ölçülen günlük toplam yağışları, 1 sayısı da yine istasyon sayısını ifade eder. Form_data değişkeni yağış türünü, pan_evap ise buharlaşma tavası verilerini temsil eder. Günlük ortalama akımlar Karahacılı Akım Gözlem İstasyonundan elde edilmiş ve veri dosyasında runoff 1 değişkeni olarak belirtilmiştir.

Birinci sütundan başlayarak, en az dört kare sembolünden (####) ve tek bir satırdan oluşan bir sınırlayıcı, girdi değişkeni bildirim öğelerinin sonuna gelindiğini ifade eder. Takip eden satırlar ardışık tarihler için zaman serisi verilerini gösterir. Her bir zaman serisi verisi, en az bir boşlukla ayrılmış veri sütunlarından oluşur. İlk altı sütun sırasıyla yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniyeden oluşan, her bir verinin tarih ve saatini belirtir. GSFLOW simülasyonlarında her bir zaman serisi verisi, tüm veri setinde tam olarak 24 saat olarak belirtilmelidir. Saat, dakika ve saniye sıfır olarak yazılır. Geriye kalan sütunlar, girdi değişkeni bildirim öğelerinin dosyaya eklendiği sırada belirtilmesi gereken verileri ifade eder. Göksu Deltası için 7. sütun günlük maksimum sıcaklığı, 8. sütun günlük minimum sıcaklığı, 9. sütun, günlük toplam yağışı, 10. sütun günlük toplam buharlaşmayı ve 11. sütun ise günlük ortalama akımları gösterir.

Zaman serisi girdi değişkenleri Çizelge 3.4'te gösterilmektedir. Değişkenlerin isimleri büyük/küçük harfe duyarlıdır ve Çizelge 3.4'te tanımlandığı şekilde belirtilmelidir.

Çizelge 3.4. PRMS veri dosyasında belirtilen zaman serisi verileri

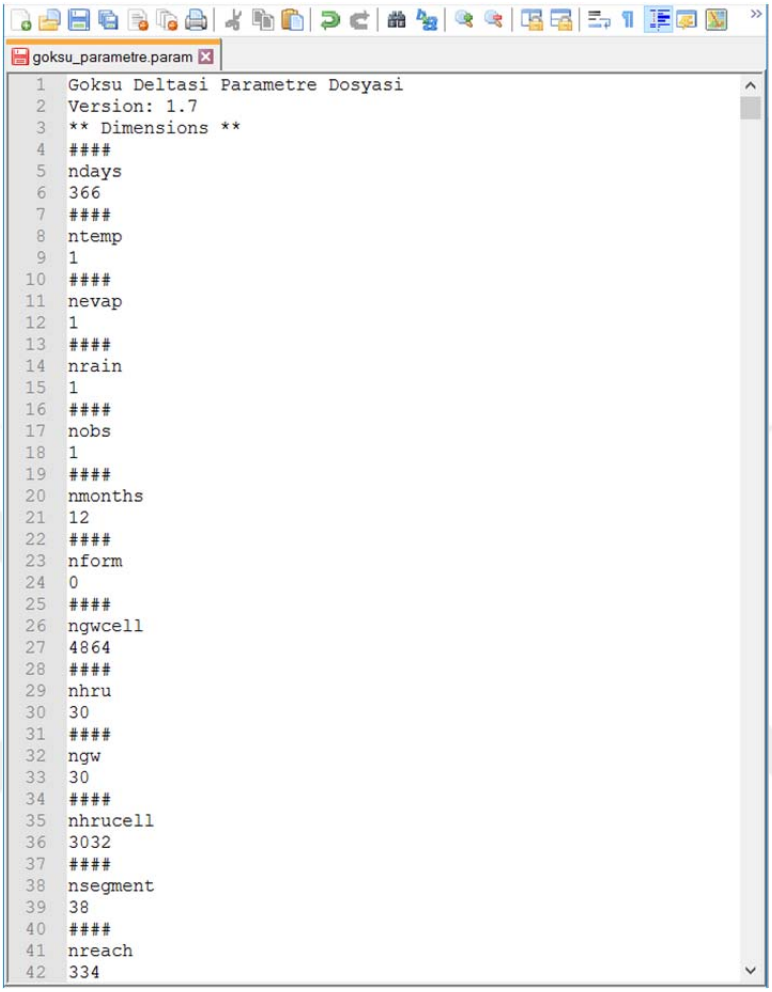
Değişken Adı	Açıklama	Birim	Aralık	Boyut değişkeni
pan_evap	Her bir istasyonda ölçülen buharlaşma	mm	0'dan büyük	nevap
runoff	Her bir akım gözlem istasyonunda ölçülen akım	m^3/s	0'dan büyük	nobs
precip	Her bir istasyonda ölçülen yağış	mm	0'dan büyük	nrain
tmax	Her bir istasyonda ölçülen günlük maksimum sıcaklık	^oC	-50 ile 150 arası	ntemp
tmin	Her bir istasyonda ölçülen günlük minimum sıcaklık	^oC	-50 ile 150 arası	ntemp
form_data	Yağış şekli (0=bilinmiyor; 1=kar, 2=yağmur)	boyutsuz	0, 1 veya 2	nform

Çizelge 3.4'ün en sağındaki sütunda boyut değişkenleri görülmektedir. Parametre dosyasında tanımlanan bu değişkenlerden; nevap, buharlaşma ölçümlerinin yapıldığı ölçüm istasyonu sayısını, nobs akım gözlem istasyonu sayısını, nrain yağış ölçümlerinin yapıldığı istasyon sayısını, ntemp sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı istasyon sayısını, nform ise yağışın türünü ifade eder.

3.2.2.2. Parametre Dosyası

PRMS parametre dosyası, PRMS ve GSFLOW modülleri için gereken boyutları ve parametleri kapsar. Bu dosya, başlık, boyutlar ve parametreler olmak üzere üç bölümden oluşur (Şekil 3.23).

Başlık bölümü iki öğeden oluşur. Birinci öğe, PRMS parametre dosyasını tanıtan tek satırlık bir ifadedir. En fazla 256 karakter içerebilir. İkinci öğe yine tek satırdan oluşan, Modüler Modelleme Sistemi PRMS dosya formatı versiyonunu gösterir.

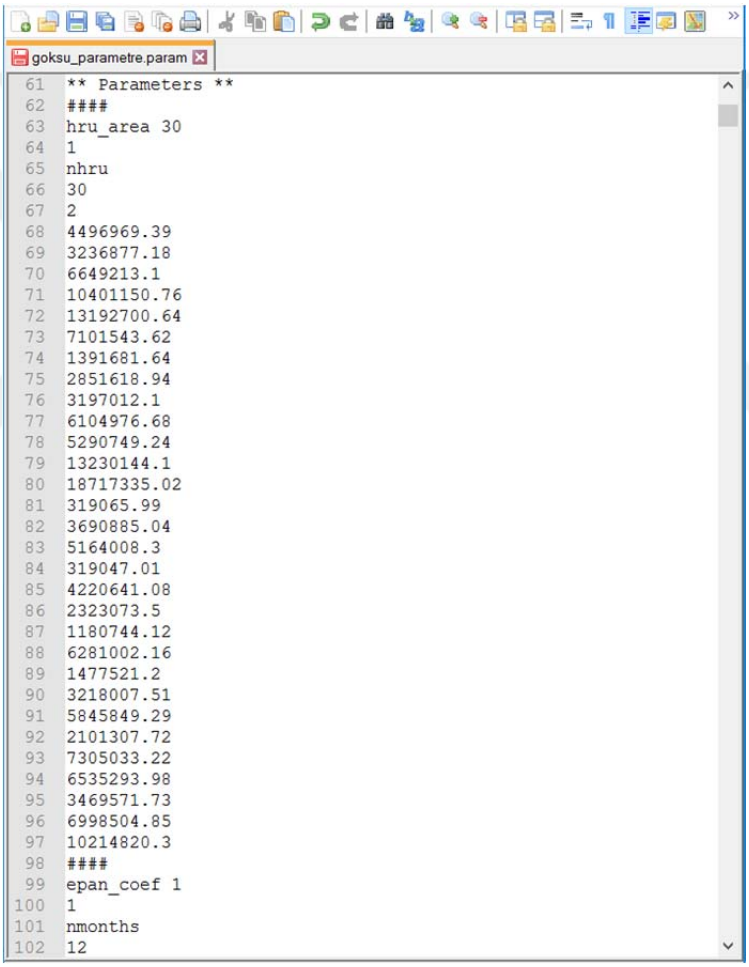


Şekil 3.23. Göksu Deltası için hazırlanan parametre dosyası

Boyutlar (** Dimensions **) bölümü, simülasyonun GSFLOW ve PRMS modülleri tarafından istenen parametre ve değişkenler için, bilgisayarda bellek ayırma işleminde kullanılan boyutların sayısını tanımlar. Bu bölüm, bölümü tanımlayan ve birinci sütundan başlayan başlık satırından sonra, üç satırla devam eder. Birinci satır, birinci sütundan başlar ve dört kareden (####) oluşur. Boyut açıklamalarını birbirinden ayırmak için kullanılır. İkici satır, boyutun adını ifade eder. Küçük harflerden ve boşluksuz bir karakter dizisinden oluşur. Üçüncü satır

boyutun büyüklüğünü, yani sayısını ifade eden bir tam sayı değeridir. Örneğin, Şekil 3.23'te Göksu Deltası'nın hidrolojik tepki birimlerinin sayısını belirten ve 30 büyüklüğünde olan "nhru" boyutu görülmektedir.

Parametreler bölümü (** Parameters **), boyutlar bölümü gibi birinci sütundan başlayan ve hangi bölümde olunduğunu ifade eden bir başlık satırından sonra, yedi satırla devam eder (Şekil 3.24).



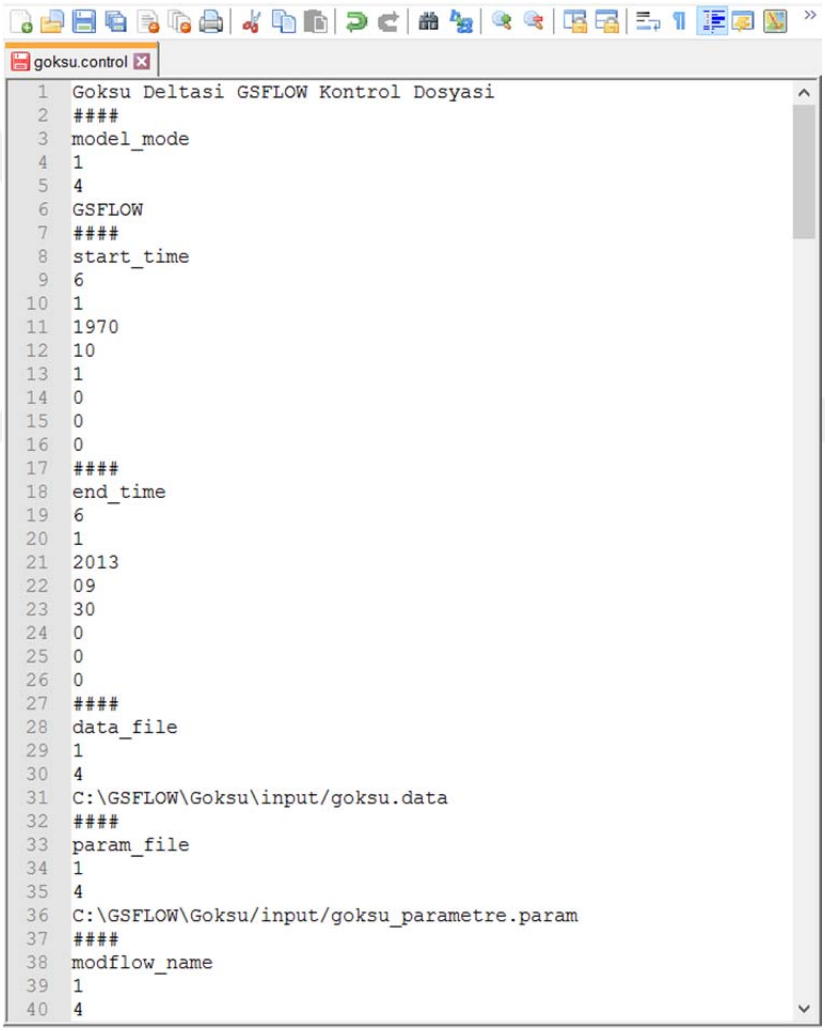
Şekil 3.24. Göksu Deltası için hazırlanan parametre dosyasının devamı

İlk satır, birinci sütundan başlar, dört kareden (####) oluşur ve her bir parametre bildirim öğesi için sınırlayıcı olarak kullanılır. İkinci satır, iki değeri belirtir. Birincisi, parametrenin adıdır (Şekil 3.24'te hru_area) ve boşluksuz bir karakter dizesi olarak belirtilir. İkincisi, GSFLOW'da uygulanmayan bir Modüler Modelleme Sistemi tablolama editörü tarafından kullanılan, bir tam sayı değeri olarak belirtilen bir sütun genişliğidir. Genişlik değeri GSFLOW tarafından dikkate alınmaz, ancak herhangi gibi tam sayı belirtilmelidir (Şekil 3.24'te 30). Üçüncü satır, parametrenin bağlı olduğu boyut sayını ifade eder ve bir tam sayı değeri alır. Şekil 3.24'te görülen hru_area parametresi, bu çalışmada 1 adet olan nhru boyutuna bağlıdır. Dördüncü satır, bağlı olunan boyutun adını gösterir (Şekil 3.24'te nhru). Birden fazla boyut olması durumunda her satır için bir boyut belirtilmelidir. Boyutlar karakter dizesinde ve boşluksuz olarak yazılmalıdır. Beşinci satır parametre için kaç tane girdi verisi olduğunu belirtir. Tam sayı olarak girilmelidir. Şekil 3.24'e göre hru_area parametresi için HTB'lerin sayısı olan 30 değeri girilmiştir. Altıncı satır, parametre değerlerinin bir tamsayı değeri olarak türünü belirtir. Parametreler tam sayı ise 1, reel sayı ise 2 (tek duyarlıklı, değişken ondalık basamak-single-precision, floating decimal point), çift duyarlıklı değişken ondalık basamak (double-precision, floating decimal point) için 3, karakter dizesi için 4 sayısı girilir. GSFLOW'da çift duyarlıklı reel sayı gerekmemektedir. Şekil 3.24'te görülen HTB'lerin alanları reel sayı olarak yazıldığından bu satıra 2 sayısı girilmiştir. Yedinci satır (ve sonrası), her bir satırda bir tane olacak şekilde parametre değerleridir. Şekil 3.24'te görülen 30 adet değer çalışma alanı için oluşturulan HTB'lerin alanlarını ifade eder.

3.2.2.3. Kontrol Dosyası

Kontrol dosyası, modelin kullanacağı yönetimsel görevlerin ayarlanması amacıyla oluşturulur. Dosya bir başlık satırıyla başlar. Parametre değerlerinin başladığı satır dışında 4 satırdan oluşur. İlk satır, kontrol parametresi öğesinin başladığını gösteren, birinci sütundan başlayan dört kareden (####) oluşur. İkinci

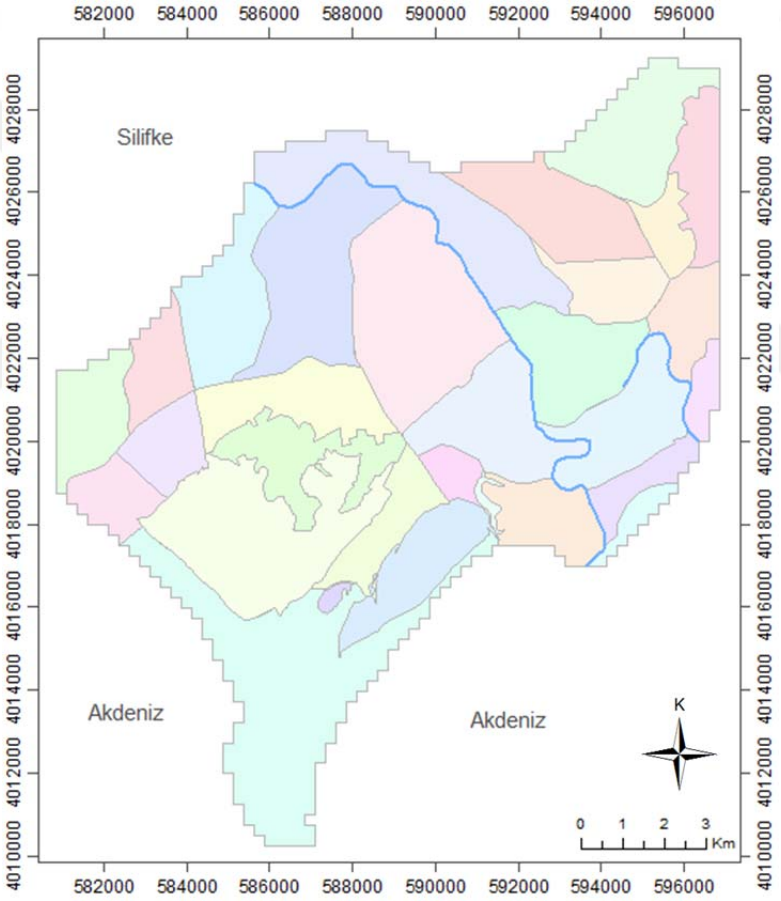
satır kontrol parametresinin adını (Şekil 3.25'te model_mode), üçüncü satır parametre değerlerinin sayısını (Şekil 3.25'te 1), dördüncü satır, kontrol parametresinin türünü ifade eder (Şekil 3.25'te 4). Parametrenin türüne göre; tam sayı için 1, reel sayı için 2 (tek duyarlıklı, değişken ondalık basamak), çift duyarlıklı değişken ondalık basamak için 3 ve karakter dizesi için 4 sayısı girilir. Şekil 3.25'te GSFLOW yazdığı için 4 girilmiştir.



Şekil 3.25. Göksu Deltası için hazırlanan kontrol dosyası

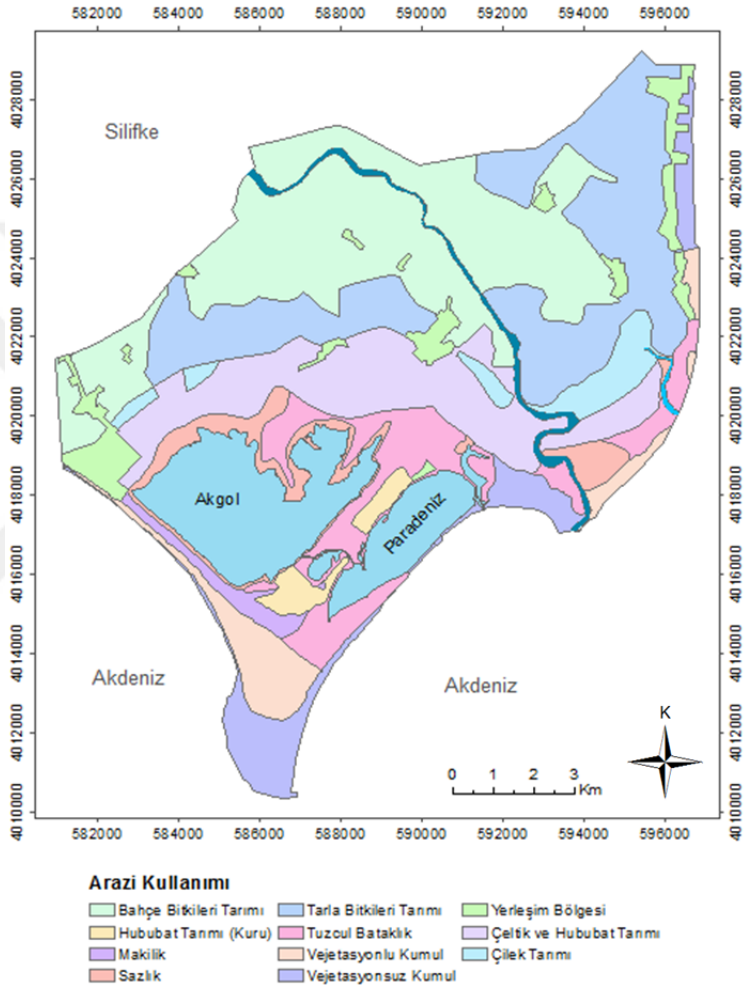
3.2.3. Hidrolojik Tepki Birimleri-Alansal Veriler

GSFLOW modelinde, alansal dağıtılmış parametrelerin belirlenmesi için bazı haritalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Göksu Deltası, ArcGIS programı kullanılarak, arazi kullanımı ve yüzey sularının toplanıp döküldüğü drenaj kanallarının konumu dikkate alınarak 30 adet HTB'ye bölünmüştür (Şekil 3.26). HTB'lerin alanları 0.3 km^2 ile 18.7 km^2, kotları ise 0 ile 5 m arasında değişmektedir.



Şekil 3.26. Çalışma alanı için oluşturulan hidrolojik tepki birimleri (HTB)

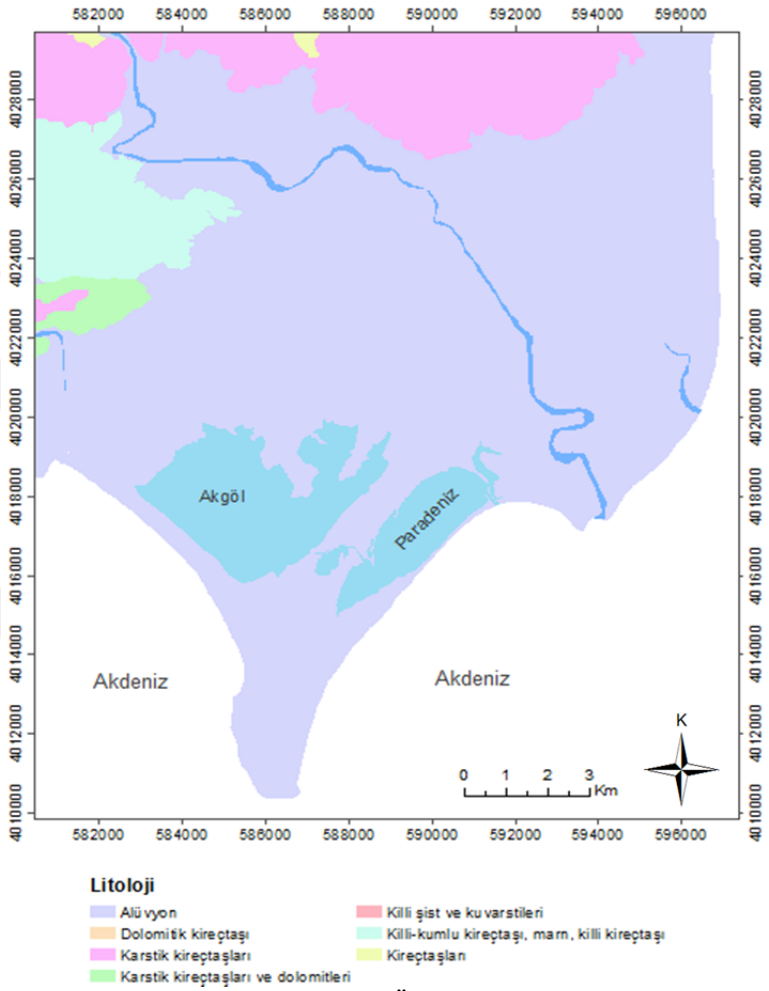
2009'da yapılan Göksu Deltası Yönetim Planı kapsamında oluşturulan arazi kullanımı haritası, Silifke Özel Çevre Koruma Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Göksu Deltası arazi kullanımı haritası (ÖÇK, 2009)

Göksu Deltası Yönetim Planı kapsamında oluşturulan toprak litoloji haritası, Silifke Özel Çevre Koruma Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Şekil 3.28). Görüldüğü üzere Delta'nın tamamı alüvyon depozitlerinden oluşmaktadır. Bu

depozitler kil, kum ve çakıldan oluşmakta, deniz kıyısına yakın kilin yoğunlaştığı alanlar bataklık özelliği taşımaktadır (ÖÇK, 2009).



Şekil 3.28. Göksu Deltası litoloji haritası (ÖÇK, 2009)

GSFLOW modelinde, HTB'ler için tanımlanabilecek 4 farklı bitki sınıflandırması yapılmıştır. Bunlar; boş veya herhangi bir bitki türü olmayan arazi, ot ve çayır tipi arazi, çalı veya funda tipi arazi ve ağaçla kaplı arazilerdir. Bitki sınıfı, PRMS bitki su tutma modülü (intcp_prms) için gereken bir parametre ile

(cov_type) belirtilir ve boş arazi (bare soil) için 0, ot ve çayır tipi arazi (grass) için 1, çalı veya funda tipi arazi (shrubs) için 2, ağaçla kaplı arazi (tree) için 3 değeri girilir. Göksu Deltasında bu dört tip arazinin tamamı bulunmaktadır. Saptanan bitki türlerinden %85'i otsu bitki, %12'si çalı ve %3'ü ise ağaç formundadır (ÖÇK, 2009).

3.2.4. MODFLOW-2005 Verileri

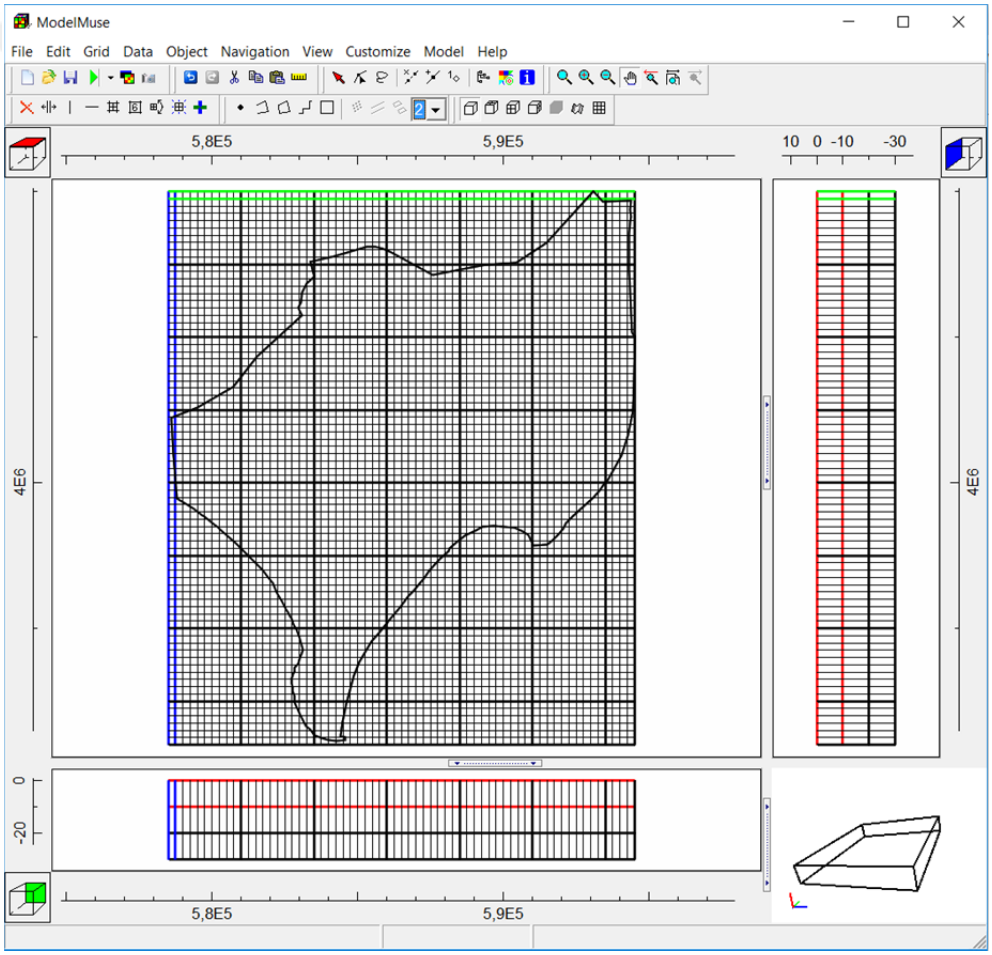
3.2.4.1. Sınır Koşulları

Yer altı suyu akım problemlerini çözmek için, modelin sınır koşullarının belirlenmesi gerekir. Göksu Deltası Özel Çevre Koruma Bölgesi sınırı, modelleme için kullanacak alan sınırı olarak belirlenmiştir. Göksu Deltası modelinin Akdeniz ile birleştiği kısım sabit hidrolik yük sınır şartı (constant head boundary, CHD), deltanın kuzey kısmı genel hidrolik yük sınır şartı (general head boundary, GHB), modellenen alanın dışında kalan kısımlar ise akım olmayan (no-flow) sınır şartı olarak belirlenmiştir.

Akarsular, kuyular, göller ve tüm yer altı tabakaları MODFLOW-2005 paketleri tarafından simüle edilir. Bu çalışmada kullanılan MODLFOW-2005 paket ve dosyaları: BAS (Basic Package), DIS (Discretization File), GAGE (Gage Package), LAK (Lake Package), LPF (Layer Property Flow Package), GHB (General Head Boundary), CHD (constant head boundary), OC (Output Control Option File), PCG (Preconditioned Conjugate Gradient Solver Package), Unsaturated Zone Flow Package (UZF) ve SFR (Streamflow-Routing Package) paketleridir.

Öncelikle ModelMuse ara yüzü kullanılarak, çalışma alanı için bir MODFLOW-2005 modeli oluşturulmuştur. 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 km2 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. Kurulan üç boyutlu model, 250x250 metre boyutunda hücrelere bölünüp 64 kolon, 76 satır ve düşeyde 20 tabakadan oluşturulmuştur (Şekil 3.29). Alanın kuzey bölümü ve deltanın güneyinde Akdeniz'in olduğu kısım, pasif hücrelerden oluşmakta ve hesaplamalara dahil edilmemektedir. Geriye kalan ve deltayı temsil eden aktif hücreler, modelin %40'ını oluşturmaktadır.

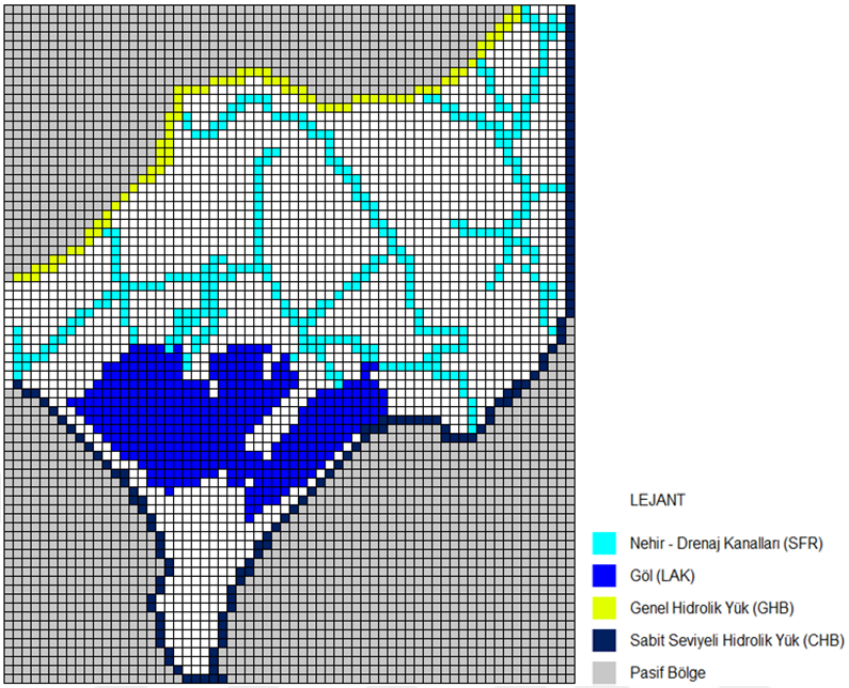


Şekil 3.29. ModelMuse ile oluşturulan Göksu Deltası sonlu farklar model ağı

MODFLOW-2005 paketlerinden Drenaj (DRN) ve Nehir (RIV) paketleri, GSFLOW için kullanılamamaktadır. Çünkü bu paketler, yüzeysel akımlar için bir hesaplama prosedürüne sahip olmamakta ve bu tip seviye bağımlı sınır koşulları, SFR paketi kullanılarak simüle edilebilmektedir (Markstrom ve ark., 2008). SFR paketi, nehir akımını ve nehrin altındaki doymamış tabaka akımını simüle etmek için kullanılır (Niswonger ve Prudic, 2005). Şekil 3.7'de deltadaki konumları gösterilen Göksu Nehri ve drenaj kanalları SFR paketi kullanılarak modele dâhil edilmiştir.

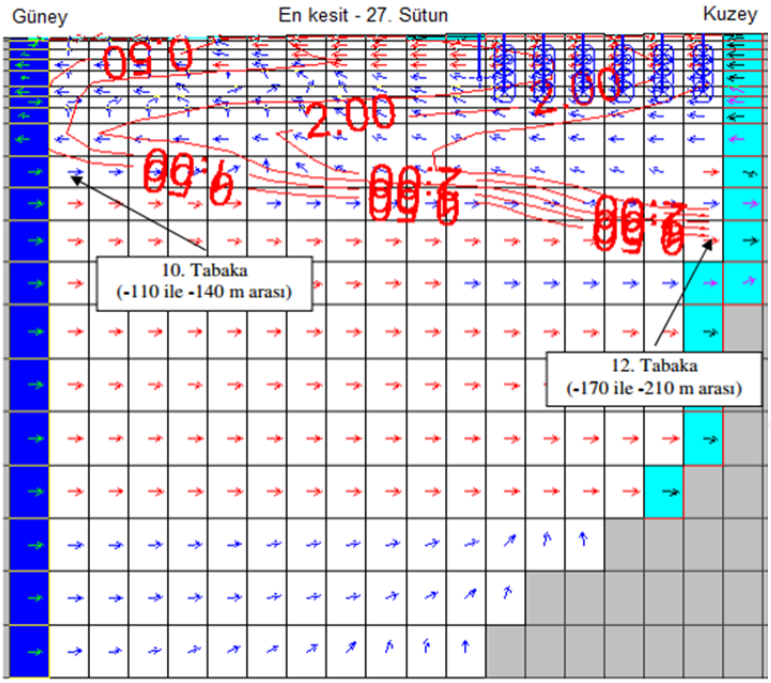
Deltadaki sulama ağı drenaj, sulama ve sulama+drenaj kanallarından oluşmaktadır. Bu çalışmada, MODFLOW sınır koşulları ve HTB'ler belirlenirken sulama ve drenaj+sulama kanalları ayrıca belirtilmemiş, yüzey sularının bu kanallar vasıtasıyla birleşip aktıkları ana drenaj kanallarına göre modelleme yapılmıştır. Kurulan modelde, nehir ve drenaj kanalları 334 adet sonlu fark hücresiyle temsil edilmiştir (Şekil 3.30).

Yer altı suyu ile göller arasındaki etkileşim Göl Paketi (Lake Package, LAK) kullanılarak simüle edilebilir (Merritt ve Konikow, 2000). Bu çalışmada Göksu Deltasının güneyindeki Akgöl ve Paradeniz Lagünleri ile aralarındaki Kuğu Gölü, GSFLOW akım modelinde, MODFLOW-2005 Göl Paketinin modifiye edilmiş haliyle simüle edilmiştir. Göl Paketinin orijinal halinde yağış, buharlaşma ve yüzeysel akış, göl paketine veri girişi yapılarak tanımlanırken birleşik modelde PRMS ile hesaplandığından, bu girdi değişkenleri göl paketi için sıfır olarak alınmıştır. Modelde toplam göl alanı için 373 adet sonlu fark hücresi belirlenmiştir (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Göksu Deltası için oluşturulan MODFLOW grid ağı

Göksu Deltası akiferi bir kıyı akiferi olduğundan, hesaplamaların sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, eş değer hidrolik yüklerin belirlenmesi gerekir. Çobaner (2009) yaptığı çalışmasında, Göksu Deltasındaki deniz suyu girişimini, üç boyutlu değişken yoğunluklu yer altı suyu akım modeli SEAWAT kullanarak modellemiştir. Şekil 3.31'de, deniz kıyısındaki tatlı suyun deşarjı ve tuzlu su girişimi açıkça görülmektedir. Kıyı sınırında 10. tabakadan itibaren, memba sınırında 12. tabakadan akifer tabanına kadar olan tüm bölgede deniz suyu girişimi söz konusudur. Buna göre, bu çalışma için kurulan MODFLOW modelinde eş değer hidrolik yükler, kıyı sınırı ve Şekil 3.31'de görülen, model alanının kuzey-güney sınırı boyunca girişimin olduğu tüm hücreler için hesaplanmıştır. Hesaplanan eş değer hidrolik yükler, arazideki gerçek su seviyelerini temsil etmediğinden, Eşitlik 3.5'e göre dönüşümü yapılarak modelin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.31. Göksu Deltası Akiferi için kalibre edilmiş yer altı su seviyesinin en kesit boyunca değişimi ve deniz suyu girişimi (Çobaner, 2009)

3.2.4.2. Yer Altı Suyu Pompajı

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, yer fıstığı gibi ürünlerin tarımı yapılırken, proje sonrası narenciye, çilek, turfanda sebze bakla, mısır gibi ürünlerin tarımı yapılmaya başlanmıştır.

Göksu Deltası su kaynakları açısından zengin olup toplamda yaklaşık 9500 hektarı sulanmaktadır. 1972 yılında DSİ I. Merhale Sulama Projesi ile 5322 hektar alan sulamaya açılmıştır. Deltada sulanan alanların geriye kalan kısmı ise çiftçilerin I. Merhale Projesinin uç noktaları, yer altı suyu ve yer yer drenaj kanallarından temin edilen su ile sulanmaktadır (ÖÇK, 2009). Göksu Deltası'nda sulanabilen arazi ve ürün deseni Çizelge 3.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.5. Sulama şebekesi ile sulanabilen ürünler ve yetiştirilme alanları (Silifke ve Göksu Sulama Birlikleri, 2007)

Ürün Adı	Sağ Sahil (da)	Sol Sahil (da)	Toplam (da)
Narenciye	7305	322	10525
Çeltik	9613	550	10163
Mısır	384	123	507
Çeşitli Fidan	368	2568	6248
Çilek	2695	2838	5533
Yer Fıstığı	2687	1472	4159
Bakliyat	2348	256	4908
Susam	136	135	271
Domates	197	16	1797
Diğer	4144	391	4535
TOPLAM	37869	17779	55648

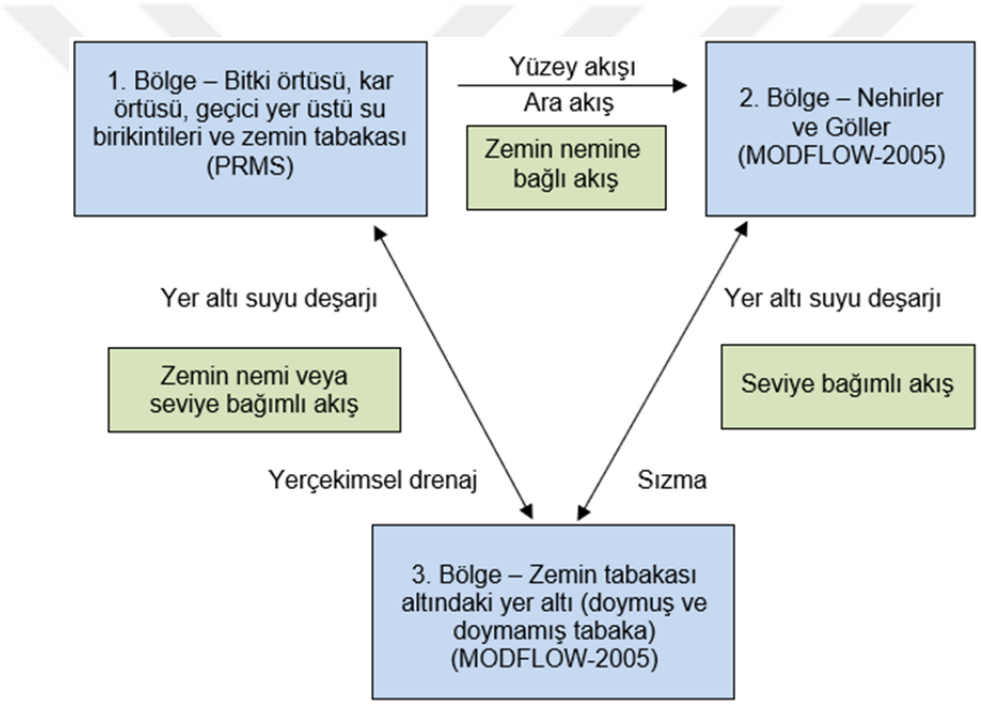
Çobaner (2009)'da deltada sulama yapılan bölgelerde, Göksu Nehrinin sol sahilinde 55, sağ sahilinde 105 olmak üzere toplam 160 kuyu için yer altı suyundan çekilen su miktarları hesaplanmıştır. Bu çalışmada, Çobaner (2009)'da kullanılan verilerden yararlanılarak pompaj yapılan her bir sonlu fark hücresi için çekilecek su miktarı belirlenmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Göksu Deltasında yer altı suyu ile sulanan bölgelerin su ihtiyacı (Çobaner, 2009'dan uyarlanmıştır)

	Aylık Toplam Su İhtiyacı (m^3)	Pompaj Yapılan Her Bir Hücreden Çekilecek Günlük Su Miktarı (m^3/gün)	Aylık Toplam Su İhtiyacı (m^3)	Pompaj Yapılan Her Bir Hücreden Çekilecek Günlük Su Miktarı (m^3/gün)
	Sol Sahil		Sağ Sahil	
Ocak	29039	17.0	831	0.3
Şubat	17648	11.5	831	0.3
Mart	46581	27.3	831	0.3
Nisan	308619	187.0	133134	42.3
Mayıs	1412656	828.5	2293982	704.8
Haziran	1546051	937.0	3761632	1194.2
Temmuz	2013354	1180.9	3359035	1032.0
Ağustos	1934272	1134.5	3409360	1047.4
Eylül	1038582	629.4	2415968	767.0
Ekim	503265	295.2	1427731	438.6
Kasım	3773	2.3	10740	3.4
Aralık	3773	2.3	831	0.3
Aylık Ortalama		438		436

3.2.5. GSFLOW Model Tasarımı

Akım, modellenen hidrolojik sistem boyunca akışı ve hacmi hesaplayan birbirine bağlı denklemlere dayanarak, GSFLOW'un üç bölgesi arasında değiştirilir (Şekil 3.32). Birinci bölge bitki örtüsü ve zemin tabakasıyla sınırlandırılmıştır. İkinci bölge tüm nehir ve gölleri kapsar. Yer altı veya üçüncü bölge ise birinci ve ikinci bölgenin altında doymuş ve doymamış tabakalardan oluşur. Birinci bölge PRMS modülleri ile simüle edilirken, MODFLOW-2005 paketleri ikinci ve üçüncü bölgelerden sorumludur.



Şekil 3.32. GSFLOW'da üç bölge arasındaki akımın hareketi (Markstrom ve ark., 2008)

Yağış ve sıcaklık girdileri, birinci bölge içinde enerji bütçesi, akım ve hacmi hesaplamak için her bir HTB'ye dağıtılır. Birinci bölgeye giren suyun bir kısmı zemine sızar, bir kısmı buharlaşma ve terleme yoluyla atmosfere geri döner,

bir kısmı ikinci bölgedeki nehir ve göllere akar veya üçüncü bölge olan doymuş ve doymamış tabakalara akar.

Suyun, zemin tabakasından nehir ve göllere akma miktarı; arazi yüzeyine yağmurla ulaşan suya, zemin tabakasına sızma miktarına ve zemin tabakasında önceden mevcut olan su miktarına bağlıdır. Zemin tabakasından doymuş ve doymamış tabakalara (3. bölge) akan su, yerçekimsel drenaj olarak adlandırılır. Yerçekimsel drenaj, doymamış tabakanın düşey hidrolik iletkenliğine ve zemin tabakasında depolanan su miktarına bağlıdır. Bununla birlikte yerçekimsel drenaj, su tablası zemin tabakasına yükseldikçe durur.

3.2.5.1. GSFLOW'da Kullanılan Modül ve Paketler

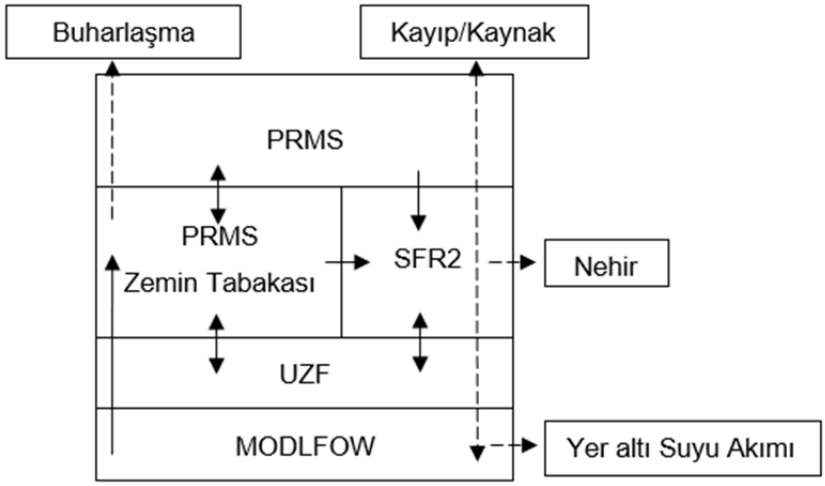
GSFLOW için toplamda 25 PRMS modülü ve 16 MODFLOW-2005 paketi kullanılmaktadır. Kullanılan PRMS modülleri, Fortran 90 (American National Standards Institute, 1992) programlama dili kullanılarak yeniden kodlanmış ve güncellenmiştir. Bazı PRMS modülleri bu dönüşüm esnasında daha doğru sabitleri içermesi ve mevcut programlama hatalarının düzeltilmesi için yeniden düzenlenmiştir. Bununla birlikte bazı MODFLOW-2005 paketleri de PRMS ile bağlantıya izin vermek ve yine mevcut programlama hatalarını düzeltmek için değiştirilmiştir (Markstrom ve ark., 2008).

GSFLOW, birleştirilmiş, sadece-PRMS ve sadece-MODFLOW olmak üzere üç modelleme biçimine imkân verir. İki tanesi dışında tüm PRMS modülleri birleştirilmiş modelde kullanılır. Söz konusu iki modül Yer altı Suyu Akımı (gwflow_casc_prms) ve Nehir Akımı (strmflow_prms) Modülleridir. Değiştirilen ve oluşturulan PRMS ve GSFLOW modülleri ile MODFLOW-2005 paketleri Ek Çizelge 1.'de gösterilmiştir. Ek Çizelge 1.'de listelenen tüm MODFLOW-2005 paketleri simülasyon için hem birleştirilmiş hem de sadece-MODFLOW modunda kullanılabilir.

3.2.5.2. PRMS ve MODFLOW-2005 Modellerinin Entegrasyonu

GSFLOW, beş adet model elemanının birleşmesinden meydana gelir (Şekil 3.33).

1. PRMS: Yağış, sıcaklık ve solar radyasyonu mekânsal olarak dağıtır. Potansiyel buharlaşma-terleme, su tutma, kar erimesi ve yüzey buharlaşmasını hesaplar.
2. PRMS-zemin tabakası: Yağışı sızma, yüzeysel akış, buharlaşma-terleme, ara akış gibi kısımlara ayırır.
3. SFR2: Akımı nehir ve kanallara iletir.
4. UZF: Zemin tabakası altındaki düşey doymamış akımı hesaplar.
5. MODFLOW-2005: Yer altı suyu akımını hesaplar.

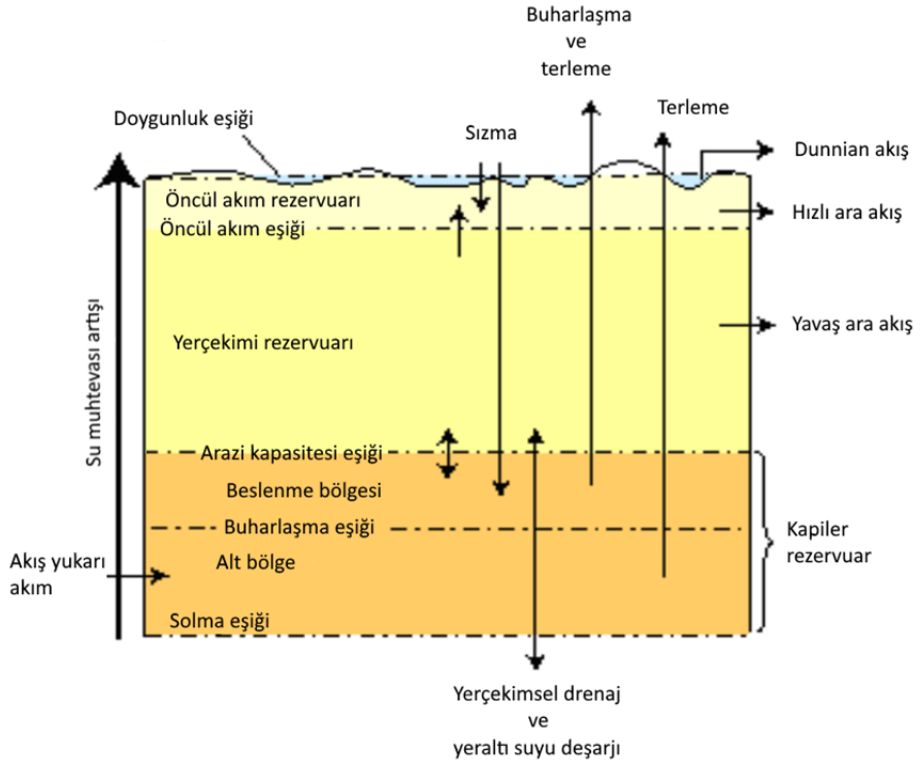


Şekil 3.33. GSFLOW akım modelini oluşturan PRMS ve MODFLOW bileşenlerinin entegrasyonu

Çizelge Ek 1'de belirtilmiş olan yeni zemin tabakası modülü (soilzone_gsflow) PRMS zemin tabakasını, MODFLOW-2005 tarafından simüle edilen yer altı tabakaları (doymuş ve doymamış) ile nehir ve göllere bağlamak için geliştirilmiştir. Yeni modül, orijinal PRMS zemin nemi hesaplama modülü ile

yüzey altı akımı modüllerinin yerini almıştır (Leavesley ve ark., 1983). Bu nedenle orijinal modüller GSFLOW'da kullanılmazlar.

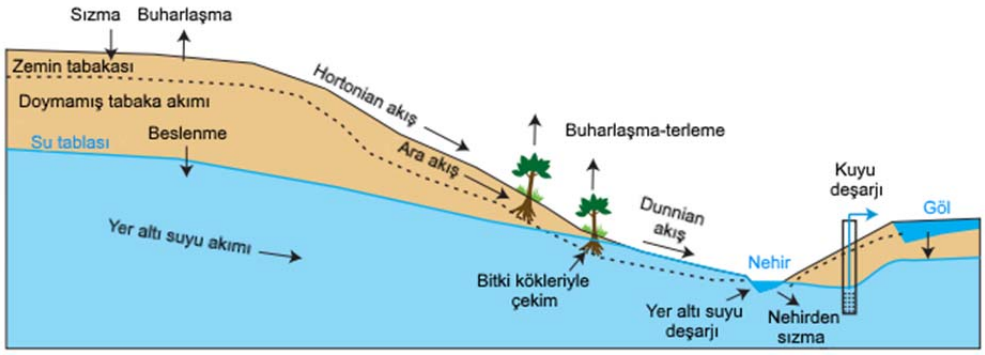
PRMS ile MODFLOW-2005'in entegrasyonunda önemli bir rol oynayan zemin tabakası modülü, her bir HTB için zemin tabakasına giren ve tabakadan çıkan akımları hesaplamak için kullanılır. Fiziksel olarak köklenme derinliğine kadar olan bölgeyi kapsayan zemin tabakası, kendi içinde üç rezervuara ayrılmıştır (Şekil 3.34). Kalıcı solma eşiği ile arazi kapasitesi eşiği arasındaki su muhtevası kapiler rezervuarı, arazi kapasitesi ile doygunluk seviyesi arasındaki su muhtevası yerçekimi rezervuarı, akışın hızlı gerçekleştiği, yerçekimi rezervuarının bir kısmı da öncül (preferential) akım rezervuarı olarak tanımlanır.



Şekil 3.34. Kavramsal zemin tabakası modülü (Markstrom ve ark., 2008)

Doymamış Tabaka Akım Paketi (UZF), GSFLOW modelinde, doymamış tabaka boyunca oluşan akım, yer altı suyu beslenimi ve arazi yüzeyine yer altı suyu deşarjını simüle etmek için kullanılır. GSFLOW'da uygulanan, MODFLOW-2005'te yapılan değişiklikler Şekil 3.35'te gösterilmiştir. Bu değişiklikler, doymamış tabakanın zemin tabakası tabanında PRMS'ye bağlanması, doymamış tabaka akımının göllerin altında simüle edilmesi ve yer üstü akımlarının nehre yönlendirilmesini kapsar. Doymamış tabaka akım paketi, GSFLOW'a dahil edilmeyen, MODFLOW-2005'in standart Beslenme ve Buharlaşma-Terleme Paketlerinin yerini almıştır.

Doymamış tabaka akımı, GSFLOW'da, difüzif gradyanların (kılcal basınç gradyanları) ihmal edilebilir olduğunu varsayan Richards denklemine kinematik dalga yaklaşımının uygulanmasıyla simüle edilir (Colbeck, 1972; Smith, 1983). Bu şekilde, Richards denkleminin, asıl olarak Smith (1983) ve Charbeneau (1984) tarafından yapılan, karakteristikler yöntemi kullanılarak çözülmesine imkân sağlanmış olur.



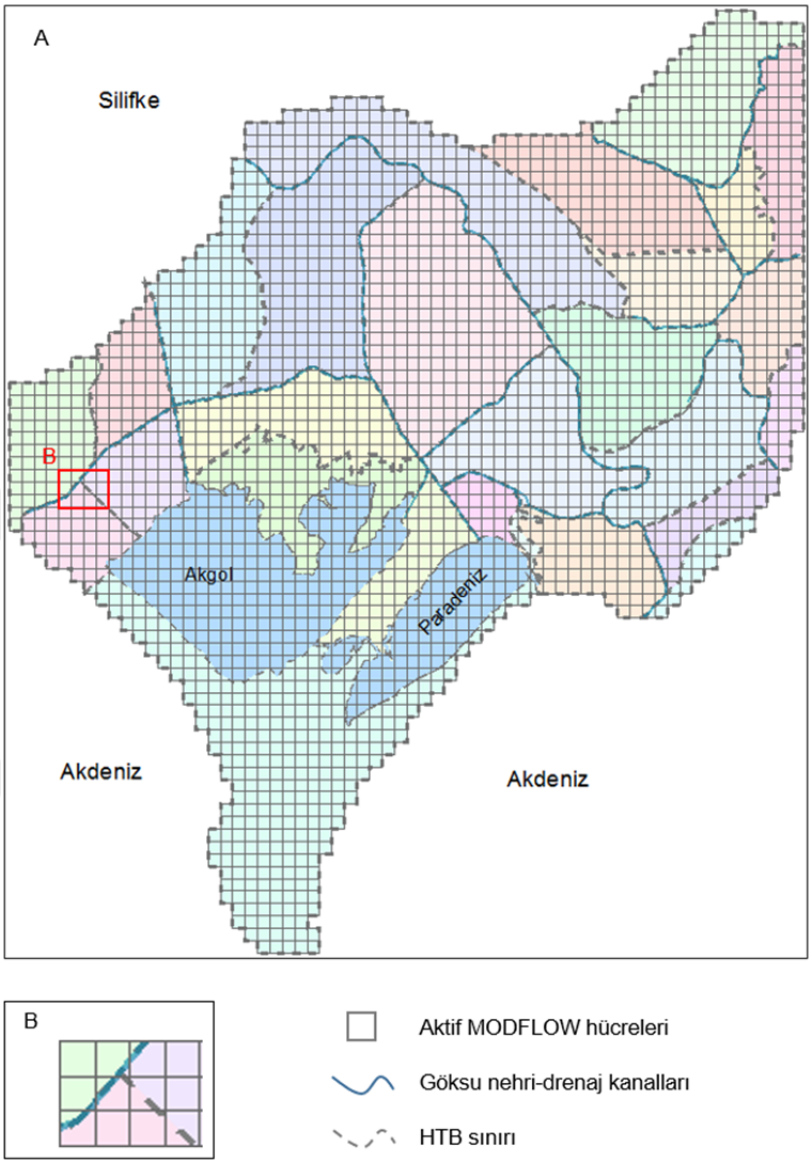
Şekil 3.35. GSFLOW'da uygulanan, MODFLOW-2005'te yapılan değişiklikler (Markstrom ve ark., 2008)

Nehir akımı yönlendirme paketi (SFR2), GSFLOW'da, nehir ve kanallardaki suyu yönlendirmek, nehir yatağından sızmayı hesaplamak ve PRMS'den yer üstü akışı ve ara akışı almak için kullanılır. Değişken nehir akımını

bir kanallar ağına yönlendirebilme özelliği, kinematik dalga yönlendirme metodu kullanılarak SFR2 paketine eklenmiştir. SFR2 paketi ayrıca, akımı PRMS'den yer üstü akışı ve komşu HTB'lerden gelen akış şeklinde almak üzere revize edilmiştir. Yer üstü akışı ve ara akış, HTB'lerin nehir bölümlerine bağlanmasıyla her bir sonlu fark hücresindeki nehir parçalarına eklenir. MODFLOW-2005'in Nehir (RIV) ve Drenaj (DRN) paketleri, yer üstü akışları için bir hesaplama prosedürü içermediğinden ve bu seviye bağımlı sınır koşulları SFR2 paketi ile simüle edilebildiğinden, GSFLOW'da uygulanmazlar.

3.2.5.3. Hidrolojik Tepki Birimleri-Sonlu Fark Hücreleri Bağlantısı

PRMS ve MODFLOW modellerinin entegrasyonundaki en önemli bileşen, PRMS tarafından kullanılan HTB'ler ile MODFLOW'un sonlu fark hücrelerinin mekânsal olarak bağlanması işlemidir. Bu işlem, akımı HTB'ler ile sonlu fark hücreleri arasında transfer etmek için kullanılan yerçekimi rezervuarlarının oluşturulmasıyla yapılır (Şekil 3.36). HTB'ler ve sonlu fark hücreleri farklı mekânsal boyutlara sahip olabileceğinden, her bir yerçekimi rezervuarının mekânsal boyutu, HTB'lerin ve sonlu fark hücrelerinin kesişimi şeklinde tanımlanır. Yerçekimi rezervuarları 1'den başlayarak numaralandırılır. HTB'ler ve sonlu fark hücreleri, kendi sınırları içinde birden fazla yerçekimi rezervuarına sahip olabilirler. Göl ile çakışan yerçekimi rezervuarları o bölgede zemin tabakası olmadığından model tarafından ihmal edilir. GSFLOW simülasyonundaki minimum yerçekimi rezervuarı sayısı, her bir sonlu fark hücresine bir tane HTB atanması durumunda, HTB'lerin sayısına eşit olur. Göksu Deltası için kurulan modelde 30 HTB (göller dahil), 2629 aktif MODFLOW sonlu fark hücresi ve 3032 yerçekimi rezervuarı oluşturulmuştur (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. (A) HTB'leri sonlu fark hücrelerine bağlamak için kullanılan yerçekimi rezervuarlarının dağılımı, (B) 3 HTB, 12 sonlu fark hücresi, 18 yerçekimi rezervuarı

3.2.5.4. İklim Verilerinin Dağıtılması

Model girdileri günlük toplam yağış, günlük toplam buharlaşma, günlük maksimum ve minimum sıcaklıkları kapsar. Bu noktasal veriler, bölgesel iklim verileri kullanılarak geliştirilmiş, bir dizi düzeltme katsayısı kullanılarak her bir HTB için hesaplanır. Bu katsayılar genellikle yükselti, eğim, bakı ve ölçüm istasyonuna olan uzaklığı kapsar (Linsley ve ark, 1975).

(1) Sıcaklık

Sıcaklık, genel olarak buharlaşma, terleme, süblimleşme ve kar erimesi hesabında kullanılır. Maksimum ve minimum günlük sıcaklıklar, "temp_1sta_prms" modülü kullanılarak her bir HTB için hesaplanır. Maksimum ve minimum HTB sıcaklıkları, ölçüm istasyonu verileri ve aylık hata oranına göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T_{HRU}^{m}=T_{sta}^{m}-b_{month}\left(\frac{Z_{HRU}-Z_{tsta}}{1000}\right)-taf_{HRU} \quad (3.6)$$

Burada;

T_{HRU}^{m} : m'inci zaman adımı için her bir HTB'deki günlük maksimum (veya minimum) sıcaklık

T_{sta}^{m} : m'inci zaman adımı için istasyonda ölçülen maksimum (veya minimum) günlük sıcaklık

b_{month} : aylık maksimum (veya minimum) sıcaklık hata oranı

Z_{HRU} : HTB'nin ortalama yüzey kotu,

Z_{tsta} : ölçüm istasyonunun kotu

taf_{HRU} : maksimum (veya minimum) günlük HTB sıcaklığı düzeltme faktörünü (tmax_adj veya tmin_adj) temsil etmektedir.

(2) Yağış

Her bir HTB'deki günlük yağış yükselti, mekânsal değişim, topoğrafya, ölçüm istasyonunun konumu, rüzgâr ve benzeri hava olaylarının etkisiyle oluşan ölçüm eksiklikleri gibi etkenlere bağlı olan bir aylık düzeltme faktörü kullanılarak aşağıdaki eşitliğe göre tahmin edilir:

$$P_{HRU}^{m}=P_{sta}^{m}CF_{HRU} \tag{3.7}$$

Burada;

P_{HRU}^{m} : m'inci zaman adımında HTB'deki yağış

P_{sta}^{m} : m'inci zaman adımında istasyonda ölçülen yağış

CF_{HRU} : HTB'deki yağmur (veya kar) için aylık düzeltme faktörünü (rain_adj parametresi) temsil etmektedir.

3.2.5.5. Potansiyel Buharlaşma-Terleme

Potansiyel buharkaşma-terleme, "potet_pan_prms" modülü ile, ölçülen buharlaşma ve aylık düzeltme katsayısı kullanılarak, her bir HTB için aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$PET_{HRU}^{m}=Pancoef_{month}Panevap_{sta}^{m} \tag{3.8}$$

Burada;

PET_{HRU}^{m} : m'inci zaman adımı için HTB'deki potansiyel buharlaşma terleme

$Pancoef_{month}$: aylık buharlaşma katsayısı (epan_coef parametresi)

$Panevap_{sta}^{m}$: m'inci zaman adımı için istasyonda ölçülen buharlaşma

3.2.6. Etkileşim Modelinin Kalibrasyonu

GSFLOW'un kalibrasyonu, aşamalı olarak yapılmıştır. Öncelikle PRMS ve MODFLOW-2005 modelleri ayrı ayrı çalıştırılarak kalibre edilmiştir. Daha sonra birleşik model GSFLOW'un kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; GSFLOW'un kalibrasyon periyodu dışında, herhangi bir zaman aralığındaki tahmin gücünü teyit etmek için doğrulama işlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bulgular ve Tartışma bölümünde ayrı bir başlıkta verilmiştir.

3.2.6.1. PRMS Kalibrasyonu

Başlangıçta PRMS, MODFLOW-2005'den bağımsız olarak kalibre edilmiştir. Bunun için GSFLOW kontrol dosyasındaki "model_mode" parametresi "PRMS" olarak ayarlanır. Kalibrasyon, ayrık örnek yaklaşımıyla (split sample approach), ölçülen verilerin birbiriyle çakışmayan üç farklı dönemi için, modelin hazırlık, kalibrasyon ve doğrulama aşamalarında kullanılmasıyla yapılmıştır. PRMS modelinde başlangıç hacimlerini belirlemek için, 1971-1973 su yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. 1974-1997 su yıllları arasındaki veriler, modeli kalibre etmek için kullanılmıştır. Kalibre edilmiş modelin doğrulaması için ise 1998-2013 su yıllarını kapsayan veriler kullanılmıştır.

Kalibrasyon prosedürü, simüle edilen ve ölçülen girdi verileri arasında makul bir uyum elde edilene kadar, akımı ve hacmi etkileyen parametrelerin ayarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ek Çizelge 2'de açıklamalarıyla belirtilen bu parametrelerden bazıları; tmax_adj, tmin_adj, rain_adj, epan_coef, soil_moist_max, pref_flow_den, smidx_coef, soil2gw_max, gwflow_coef parametreleridir.

Ölçülen ve simüle edilen hidrograflar arasındaki uyum Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu katsayı hidrolojik modellerin tahmin gücünü belirlemek için kullanılır (Nash ve Sutcliffe, 1970). NSE katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Qo_i-Qs_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qo_i-\overline{Qo})^2} \quad (3.9)$$

Burada;

n : toplam gözlem sayısını,

Qo_i : gözlenmiş i'inci akım değerini,

Qs_i : simüle edilmiş i'inci akım değerini,

$\overline{Qo}$: gözlenmiş akımların ortalamasını temsil etmektedir.

NSE katsayısı -∞ ile 1 arasında değer alabilir. 1'e eşit olması simülasyon sonuçları ile ölçüm değerleri arasında mükemmel bir uyum olduğunu gösterir. 0 ile 1 arasında olması genelde model performansının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ifade eder. 0'dan küçük olması ise ortalama gözlem değerlerinin modelden daha iyi tahmin edici olduğunu vurgulamaktadır (Krause ve ark., 2005).

3.2.6.2. MODLFOW-2005 Kalibrasyonu

MODFLOW-2005 modelinin kalibrasyonu, gözlem kuyularında ölçülen yer altı su seviyeleri ile model tarafından hesaplanan seviyelerin karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. Karşılaştırmadaki amaç, ölçülen ve hesaplanan seviyeler arasındaki farkı en aza indirgemektir. Bu farkı azaltmak için kalibrasyon parametresi olarak yatay ve düşey hidrolik iletkenlik değerleri kullanılmıştır.

MODFLOW-2005 modelinin performansını görmek için ortalama hata, korelasyon katsayısı, hata karelerinin ortalamasının karekökü, Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı gibi istatistik ölçütler kullanılmıştır.

3.2.6.3. GSFLOW Modelinin Kalibrasyonu

GSFLOW modelinin kalibrasyonu, PRMS ve MODFLOW'da kalibre edilmiş olan çoğu parametre değiştirilmeden, PRMS ve MODFLOW arasındaki akımı ve potansiyel buharlaşma-terlemeyi etkileyen parametrelerde (epan_coef ve

ssr2gw_rate) düzeltme yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. NSE katsayısı, PRMS ve MODFLOW modellerinde olduğu gibi, GSFLOW modelinin de performansını görmek için kullanılmıştır.

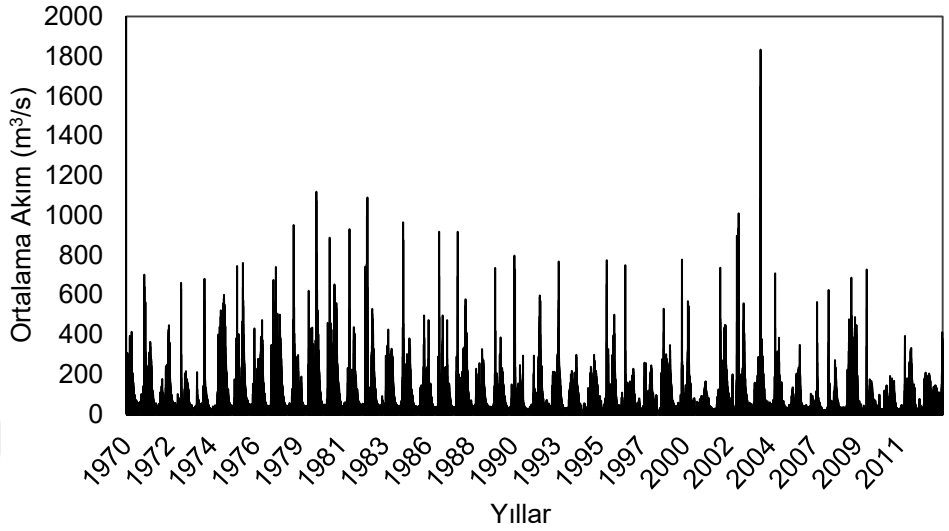
Doğrulama işlemi, kalibrasyon periyodu dışındaki herhangi bir dönemde modelin tahmin gücünü görmek için yapılmıştır. Modelin doğrulaması 1998-2013 su yıllarını kapsayan zaman aralığı için gerçekleştirilmiştir. Doğrulama, model parametrelerinde değişikliğe gitmeden, bağımsız veriler kullanılarak kalibre edilmiş modelin çalıştırılmasıyla yapılmıştır. NSE katsayısı doğrulama işleminin performansını görmek için kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma periyodu boyunca gözlenen nehir akımı analizi, kalibrasyon sonuçları, su bütçesi ve simülasyon sonucu elde edilen Göksu Deltası'nın hidrolojik analizlerine yer verilmiştir. Bu analizler; su hacmi analizleri, tabakalar arasındaki akış analizleri ve yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimini kapsamaktadır.

4.1. Çalışma Periyodunda Akım

Göksu Deltası etkileşim modeli için belirlenen çalışma periyodunda gözlenen en düşük akım, 08.09.2008 tarihinde 12.7 m^3/s, en yüksek akım ise 06.03.2004 tarihinde 1833 m^3/s olarak ölçülmüştür. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 2004 yılında aşırı bir akım söz konusudur. Bunun nedeni 5-7 Mart 2004 tarihinde Göksu Nehri'nin taşmasıyla Silifke ve çevresinde büyük bir taşkın felaketi yaşanmasıdır. Taşkına sebep olan akım yükselmesinin yağıştan ziyade kar erimelerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Göksu Nehri'ni oluşturan iki önemli koldan biri olan Ermenek Çayı Havzası'ndaki mevcut karın sıcaklıkların yükselmesi ve şiddetli rüzgârla birlikte hızlı erimeye başlaması böyle bir felaketin yaşanmasına yol açmıştır. Taşkın sonucunda Silifke'nin bazı mahalleleri başta olmak üzere bazı belde ve köy gibi yerleşim birimleri ile yaklaşık 5000 da'lık tarım arazisi zarar görmüştür (Buldur ve ark., 2007).

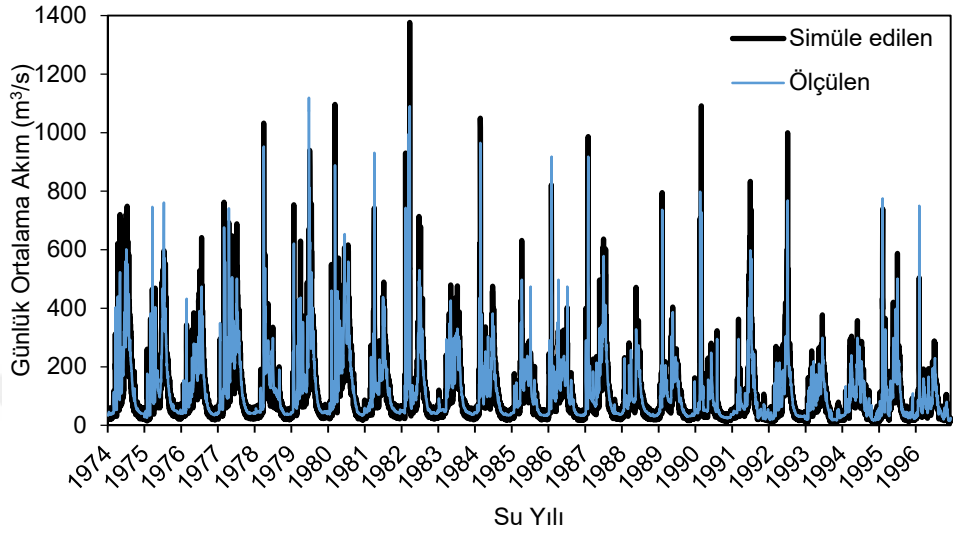


Şekil 4.1. Silifke Karahacılı Akım Gözlem İstasyonu'nda 1970-2013 yılları arasında ölçülen günlük ortalama akımlar

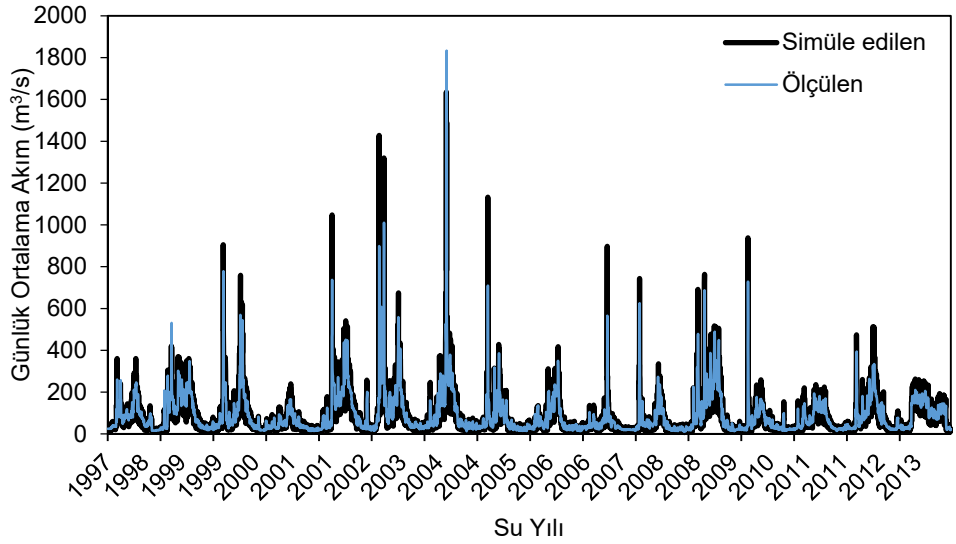
4.2. Kalibrasyon Sonuçları

4.2.1. PRMS

Kalibrasyon periyodu için PRMS modeline ait NSE katsayısı 0.82, doğrulama periyodu için 0.77 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te simüle edilen ve ölçülen hidrograflar görülmektedir. Görsel karşılaştırmaya bakıldığında modelin genel olarak iyi bir performans sergilediği söylenebilir. Ancak özellikle kış aylarında, ölçülen yüksek akımların model tarafından tam olarak simüle edilemediği veya modelin ölçülen akımdan daha yüksek bir akım simüle ettiği bazı sapmalar göze çarpmaktadır. Bu durumun, bölgedeki hava sıcaklığının 0^{o}C'ye yakın olduğu zamanlarda modelin yağışın türünü tam olarak belirleyememesinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.2. PRMS ile simüle edilen ve Karahacılı akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük ortalama akımlar (kalibrasyon periyodu 1974-1997 su yılı)



Şekil 4.3. PRMS ile simüle edilen ve Karahacılı akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük ortalama akımlar (doğrulama periyodu 1998-2013 su yılı)

4.2.2. MODFLOW-2005

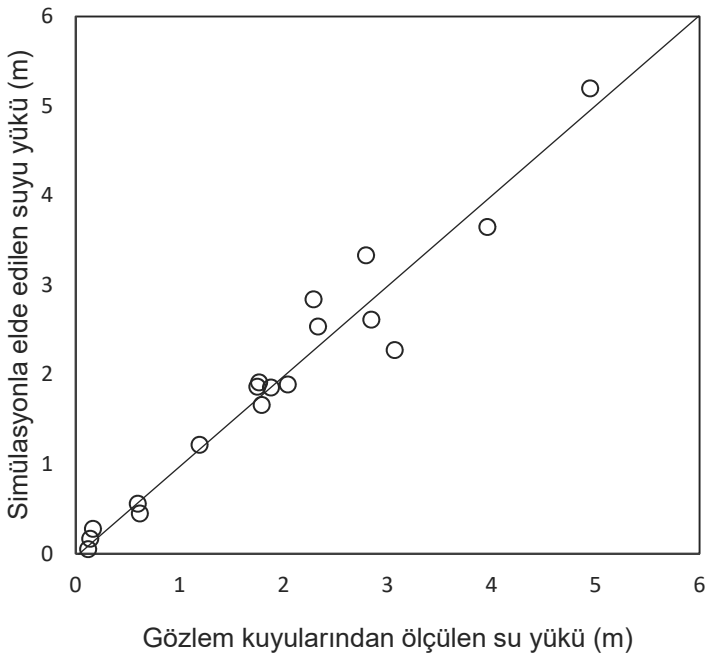
Bir yıl (12 ay) boyunca kuyularda yapılan ölçümlerde yer altı su seviyelerinin 0.12 m ile 4.95 m arasında değiştiği gözlenmiştir. Yer altı su seviye ölçümlerinin yıllık ortalama değerleri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Gözlem kuyularında ölçülen 2012 su yılı ortalama yer altı su seviyeleri

Gözlem kuyusu	Kuzey enlem (UTM, Datum WGS84, Zone 36)	Doğu boylam	Kuyu derinliği (m)	Yer altı su seviyesi (m)
G-1	591312	4024514	6.0	2.79
G-2	591424	4023561	7.0	2.84
G-3	591698	4023241	43.0	2.33
G-4	592579	4023312	44.0	1.79
G-5	593501	4022430	42.0	0.62
G-6	593818	4024782	8.0	1.88
G-7	593308	4025535	32.0	1.75
G-8	593838	4025619	17.5	1.19
G-9	592721	4022798	41.0	1.77
S-1	588642	4024787	55.0	3.96
S-2	589431	4024792	30.0	3.07
S-3	589661	4021933	75.0	0.14
S-4	585972	4023002	30.0	2.04
S-5	586225	4022323	38.0	0.60
S-6	584744	4021315	30.0	0.17
S-7	582736	4021593	42.0	4.95
S-8	582547	4019523	4.0	0.12
S-9	582180	4019872	12.5	2.29

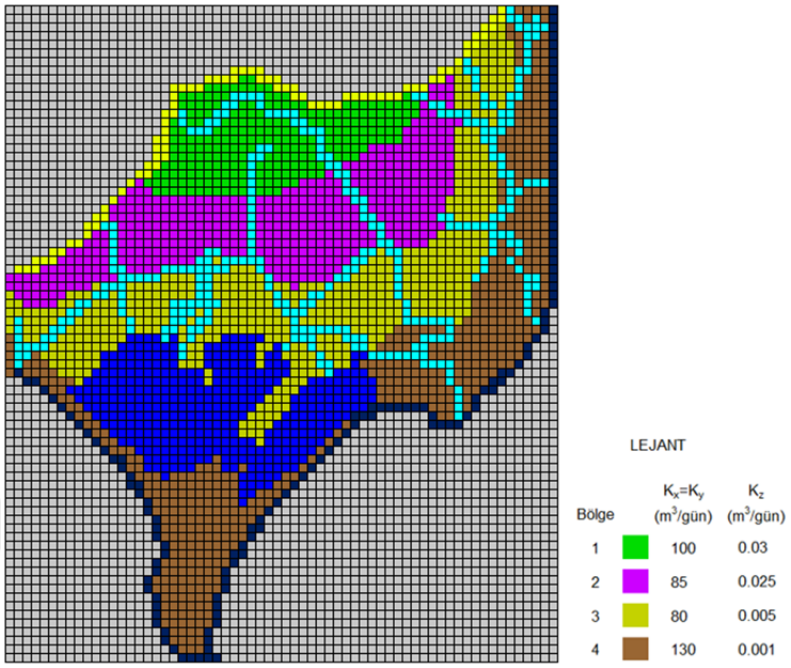
Kalibre edilmiş MODFLOW-2005 modeli 0.95 korelasyon ile simüle edilen ve ölçülen yer altı suyu seviyeleri arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. Bu ilişki Şekil 4.4'deki saçılma diyagramında gösterilmiştir.

Model tarafından hesaplanan ve ölçülen yer altı su seviyeleri arasındaki fark 0.79 m ile -0.54 m arasında değişmektedir. Ortalama hata 0.001 m, hata karelerinin ortalamasının karekökü 0.31 m, NSE katsayısı 0.95 olarak elde edilmiştir.

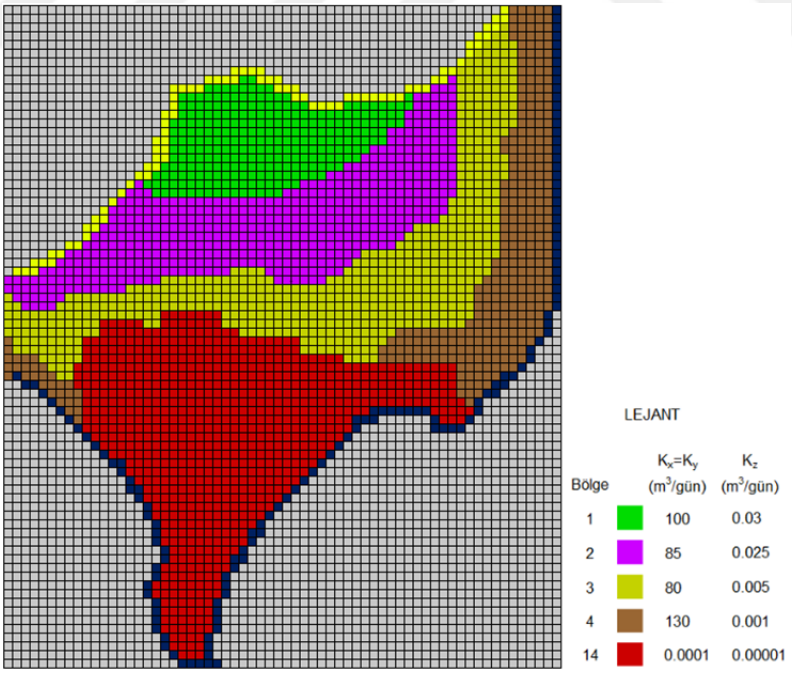


Şekil 4.4. 2012 su yılı boyunca aylık olarak ölçülen ve simüle edilen su yüklerine ait saçılma diyagramı

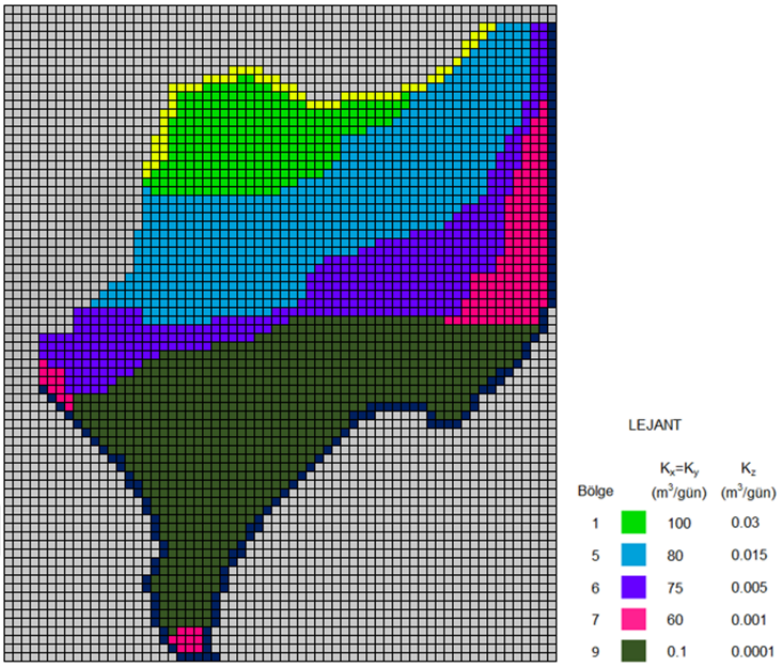
Kalibrasyon işlemlerine Göksu Deltası'nda daha önce yapılmış geniş kapsamlı çalışmalardan biri olan, Çobaner (2009)'da belirlenen hidrolik iletkenlik katsayıları kullanılarak başlanmış ve daha sonra kalibre edilmiş hidrolik iletkenlik katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.5–Şekil 4.8'de, kalibrasyon sonrası değişik tabakalara ait hidrolik iletkenlik katsayıları görülmektedir. Kalibrasyon sırasında akifer farklı hidrolik iletkenlik bölgelerine ayrılmış, kalibrasyon işlemi bu bölgeler için yapılmıştır.



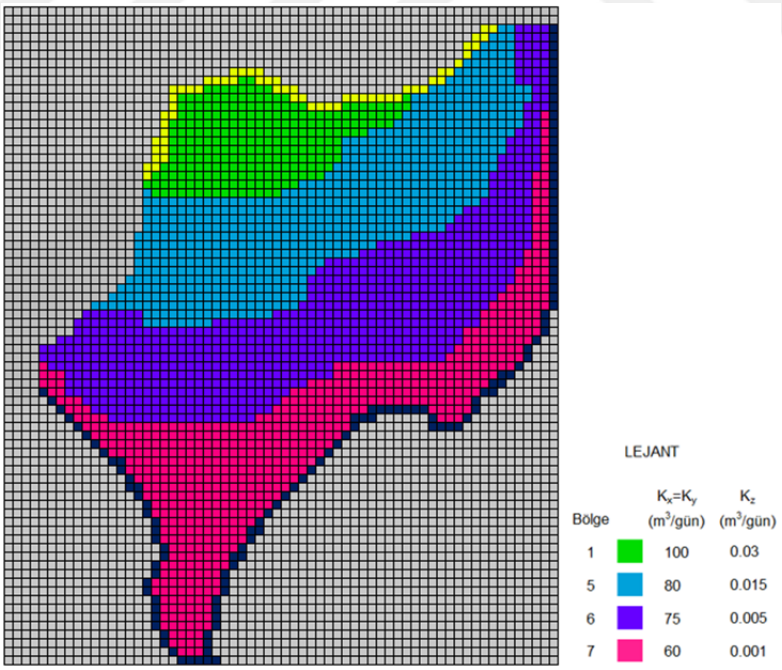
Şekil 4.5. Kalibrasyon sonrası, 1,4,6 ve 7. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler



Şekil 4.6. Kalibrasyon sonrası, 2,3 ve 5. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler



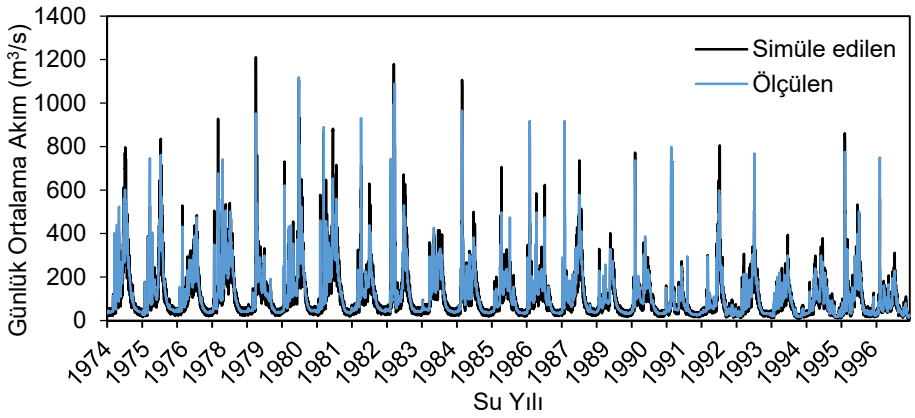
Şekil 4.7. Kalibrasyon sonrası, 8. tabakaya ait hidrolik iletkenlikler



Şekil 4.8. Kalibrasyon sonrası, 9-20. tabakalara ait hidrolik iletkenlikler

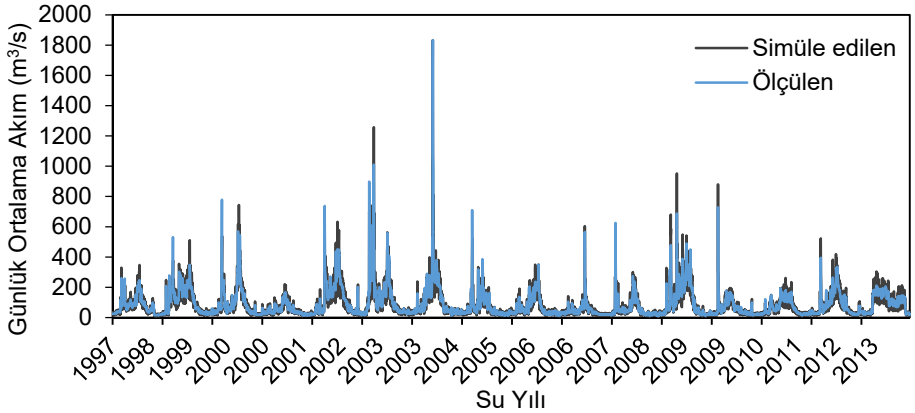
4.2.3. GSFLOW

GSFLOW kalibrasyon periyodu için NSE katsayı 0.88 olarak elde edilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen akımlar Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Hidrografa bakıldığında akımlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. GSFLOW kalibrasyon periyodu için simüle edilen ve ölçülen günlük ortalama akımlar

Ölçülen ve simüle edilen hidrografların Şekil 4.10'da gösterildiği doğrulama işlemi için NSE katsayısı 0.84 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10. GSFLOW doğrulama periyodu için simüle edilen ve ölçülen günlük ortalama akımlar

4.3. Su Bütçesi

Simülasyon sonucu hesaplanan yıllık su bütçesi, hacim değişimleri, hata miktarları ve yüzde cinsinden fark değerleri, kalibrasyon periyodunun son sekiz yılı için Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Göksu Deltası 1990-1997 su yılları su bütçesi

Su Yılı	Giren (10^6 m^3)			Çıkan (10^6 m^3)				Giren-Çıkan (10^6 m^3)
	Yağış	Nehir ve Kanal	Sınır Akımı	Buharlaşma	Nehir ve Kanal	Sınır Akımı	Pompaj	
1990	87.32	3413.57	40.72	373.09	3029.85	12.59	24.90	101.20
1991	49.70	2296.87	33.91	143.73	2301.86	9.47	24.90	-99.45
1992	79.22	3071.97	41.36	163.46	3075.48	11.20	24.90	-82.50
1993	83.52	2778.12	36.21	151.29	2782.43	10.35	24.90	-71.12
1994	59.18	2342.41	34.57	166.25	2313.86	9.67	24.90	-78.52
1995	97.07	2827.24	35.12	192.50	2762.19	11.81	24.90	-31.96
1996	83.51	3040.99	39.43	153.78	3050.83	10.84	24.90	-76.43
1997	93.87	2330.16	35.47	181.03	2289.11	9.10	24.90	-44.64

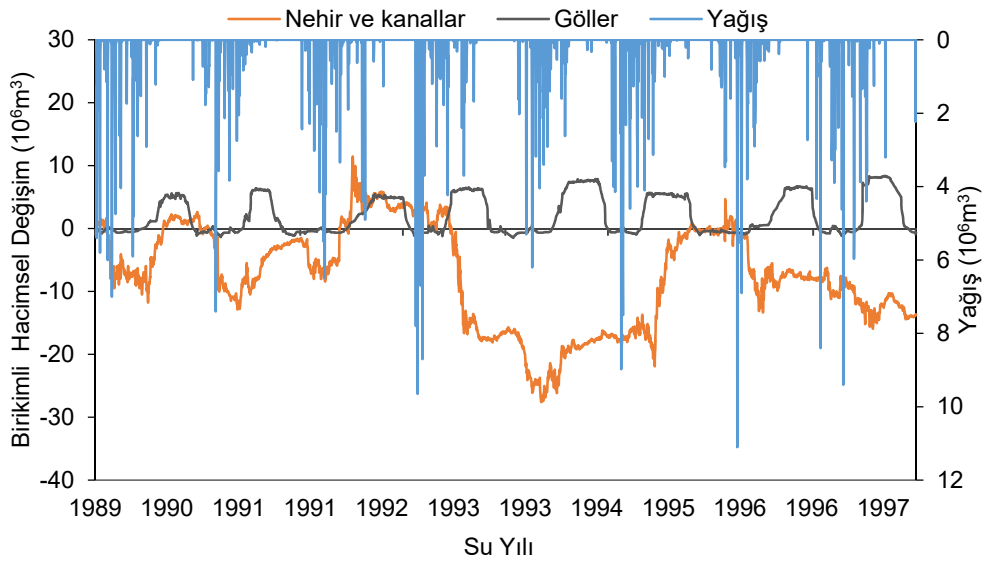
Çizelge 4.3. Göksu Deltası 1990-1997 su yılları hacim değişimi

Su Yılı	Hacim değişimi (10^6 m^3)					Hata (m^3)	Fark (%)
	Yer Üstü	Zemin tabakası	Doymamış	Doymuş	Toplam		
1990	4.92	3.36	-3.90	96.48	100.85	345214.00	0.01
1991	-2.89	14.53	11.40	-122.92	-99.88	426452.00	0.02
1992	17.97	18.04	15.05	-134.06	-83.00	496827.00	0.02
1993	-40.89	22.36	-1.32	-50.97	-70.82	-291083.00	-0.01
1994	0.28	12.78	-6.68	-84.72	-78.33	-184453.00	-0.01
1995	35.12	15.61	-17.42	-65.10	-31.79	-164483.00	-0.01
1996	-10.79	14.52	-14.13	-66.14	-76.54	112317.00	0.00
1997	-13.31	16.24	-12.47	-35.26	-44.80	162775.00	0.01

4.4. Göksu Deltası Su Hacimleri

GSFLOW akım modelinde, toplam su hacmindeki değişim 4 ana hacim bileşeninin toplamı olarak hesaplanmıştır. Bunlar yer üstü su hacmi, zemin tabakası su hacmi, doymuş ve doymamış tabaka hacimleridir.

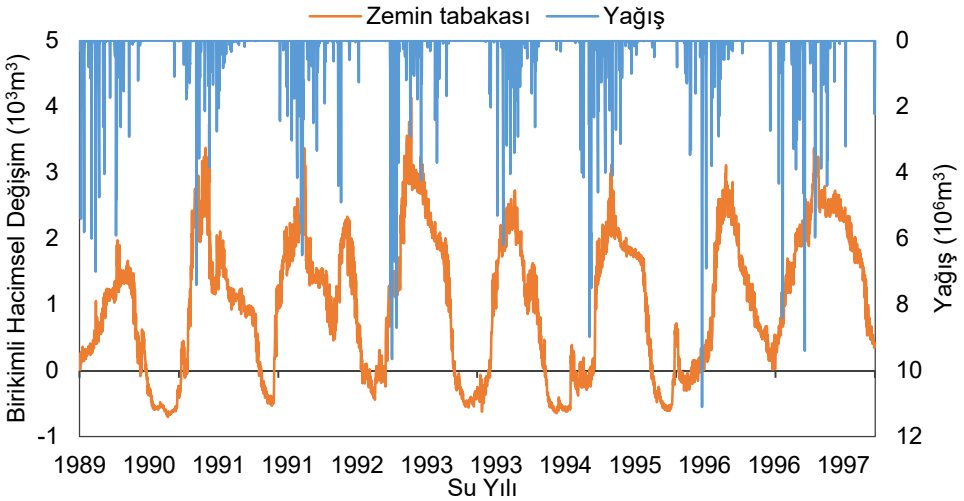
Yer üstü su hacmi kar örtüsü, geçirimsiz yüzey hacmi, bitkiler tarafından tutulan yağış, nehir, göl ve kanallardan oluşur. Kar örtüsü ve geçirimsiz yüzey hacmi çok küçük olduğundan bu çalışmada hesaba katılmamıştır. Bitkilerce tutulan yağış toplam yağışa göre çok düşük seviyede olduğundan Şekil 4.11'de belirtilmemiştir. Tutulan yağış, hacim değişimi çizelgesine dahil edilmiştir. Şekil 4.11'de GSFLOW kalibrasyon periyodunun son 8 yılı olan 1990-1997 su yılları boyunca yer üstü su hacmindeki birikimli değişim gösterilmektedir. Görüldüğü üzere drenaj kanallarını da kapsayan nehir hacmi, yağışın yoğun olduğu kış aylarında artış göstermektedir.



Şekil 4.11. Yer üstü suyu birikimli hacim değişimi

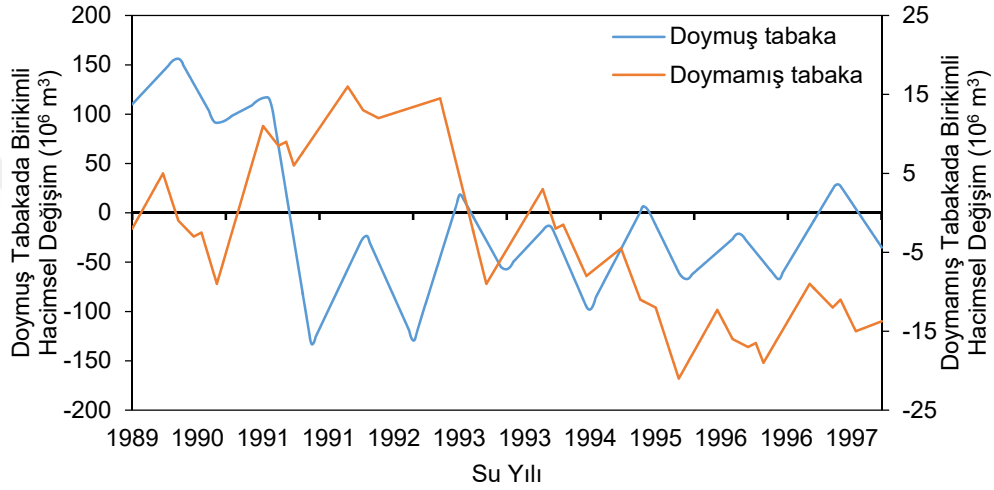
Deltanın güneyinde bulunan Akgöl, Paradeniz, ikisi arasındaki Kuğu Gölü ve Paradeniz'in doğusundaki aşırı tuzlu Arapalanı Gölü'nün toplam hacimleri yağışın aksine yaz aylarında artış göstermektedir. Bunun nedeni, yaz aylarında yapılan arazi sulamasıyla sulamadan dönen suların, drenaj kanallarına oradan da Akgöl ve Paradeniz'e dökülmesidir. Buradan göllerin asıl beslenme kaynağının drenaj kanalları olduğu söylenebilir.

Göksu Deltası zemin tabakası, yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olmasından dolayı sığ sayılabilecek bir kalınlıktadır. Deltanın kuzeyinde yaklaşık 1-2 m civarında olan tabaka kalınlığı, güneye inildikçe daha da azalmaktadır. Dolayısıyla zemin tabakasındaki su miktarı yağış ve buharlaşma-terleme değişimlerinden çabuk ve yüksek oranda etkilenir. Şekil 4.12 tüm çalışma alanı için ortalama değerleri temsil etmektedir. Bu depolama bileşenindeki su genel olarak yağışın yüksek olduğu kış aylarında daha fazladır. Yağışın azaldığı ve buharlaşma-terlemenin yüksek olduğu yaz aylarında ise en düşük seviyelerine inmektedir.



Şekil 4.12. Zemin tabakası birikimli hacim değişimi

Doymamış tabaka zemin tabakası gibi yer altı suyunun arazi kotuna yakın seviyelerde olmasından dolayı büyük bir hacme sahip değildir. Bu depolama bileşeni genellikle Ocak-Şubat aylarında en yüksek seviyelerine ulaşırken doymuş tabakada bu durum Şubat-Mart aylarında gerçekleşir (Şekil 4.13).

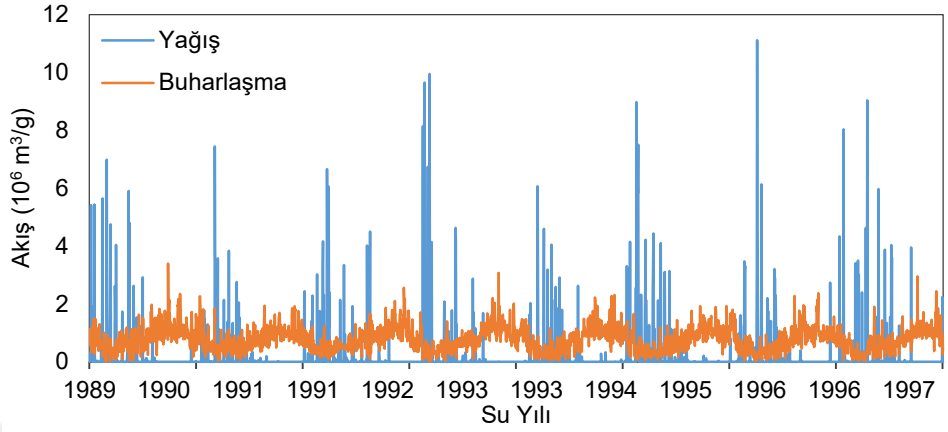


Şekil 4.13. Doymuş ve doymamış tabakalarda birikimli hacim değişimi

4.5. Göksu Deltası Su Akışları

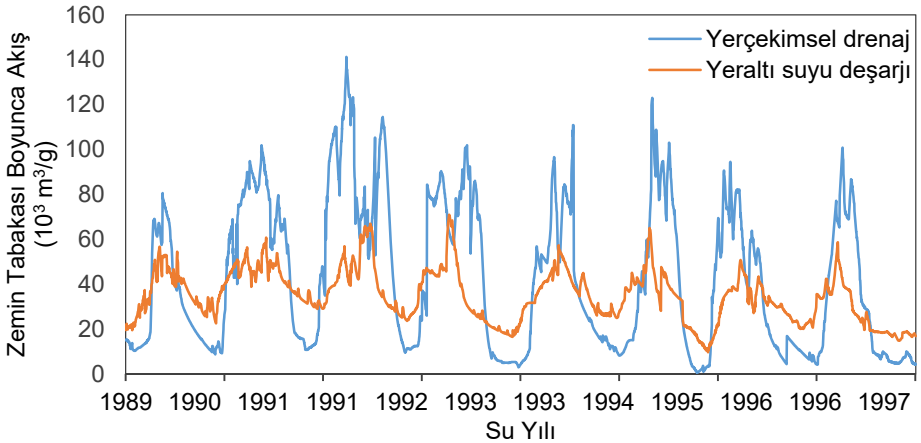
GSFLOW modeliyle arazi boyunca oluşan yer üstü akışı, zemin tabakası ile doymuş ve doymamış tabakalar arasındaki akışlar, Göksu nehri ile drenaj kanalları ve lagünlere olan akışlar simüle edilmiştir.

Yer üstü akışı, yağış, kar erimesi ve buharlaşma-terlemeye bağlı olarak oluşmaktadır. Göksu Deltasında kar şeklindeki yağış neredeyse hiç olmadığından sıfır kabul edilmiştir. Dolayısıyla araştırma alanında yağış, sadece yağmur şeklinde gerçekleşir. Buharlaşma-terleme, bitkilerden ve göllerden buharlaşma ile zemin tabakasından gerçekleşen buharlaşma-terlemenin toplamını ifade eder. Göksu Deltası için buharlaşma-terleme Temmuz-Ağustos aylarında en üst seviyelerine ulaşmaktadır. En fazla yağış genellikle Aralık-Ocak aylarında gerçekleşir (Şekil 4.14).



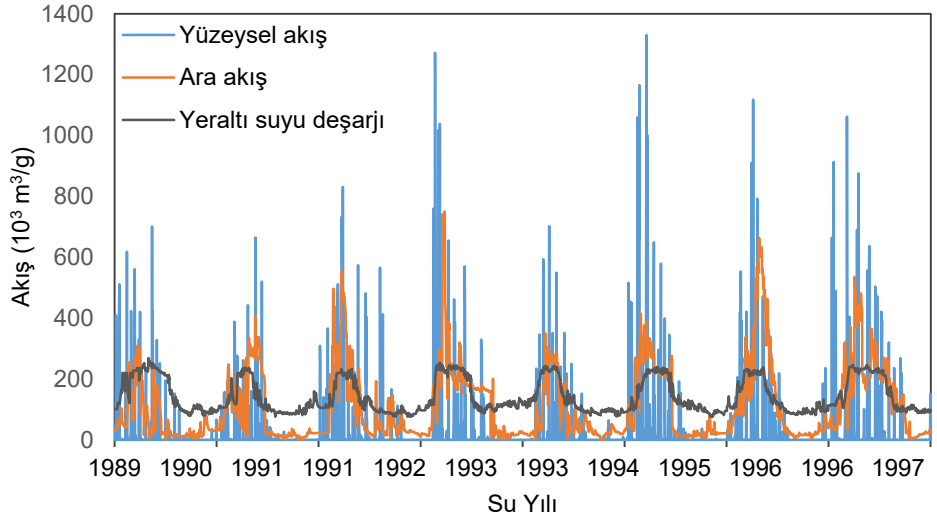
Şekil 4.14. Yer üstü akışı

Simüle edilen diğer başlıca akışlar, suyun zemin tabakasından doymamış tabakaya doğru yerçekimsel drenajı ve doymuş tabakadan zemin tabakasına yer altı suyu deşarjını kapsamaktadır. Şekil 4.15, tüm çalışma alanını kapsayan ortalama değerleri temsil etmektedir. Görüldüğü gibi, yerçekimsel drenaj kış ve bahar aylarında yer altı suyu deşarjından fazladır. Bununla beraber yağışın en az ve buharlaşma-terlemenin en fazla olduğu yaz aylarında ise yer altı suyu deşarjı yerçekimsel drenajı aşmaktadır.



Şekil 4.15. Suyun zemin tabakasından doymamış tabakaya yerçekimsel drenajı ve zemin tabakasına yer altı suyu deşarjı

Suyun diğer bir akışı Göksu Nehri, drenaj kanalları ve göllere doğru gerçekleşen yüzeysel akış, ara akış ve net yer altı suyu deşarjını kapsar (Şekil 4.16). Akım değerleri alansal ortalamaları ifade etmektedir. Şekle bakıldığında yüzeysel akışın özellikle yağışlı aylarda baskın olduğu açıkça görülmektedir. Ara akış da benzer bir profil çizmekle beraber yüzeysel akışa göre yaz aylarında az da olsa devamlılık göstermiştir. Göksu Nehri, drenaj kanalları ve Akdeniz'e doğru gerçekleşen yer altı suyu deşarjı yıl boyunca istikrarlı bir şekilde devam etmiştir. Özellikle kış aylarında, yer altı suyunun en üst seviyelerde, göl sularının ise en düşük seviyelerde olması ve nehir akımının bahar aylarında eriyen karların da etkisiyle ulaştığı maksimum debiye henüz ulaşmamış olmasından dolayı yer altı suyu deşarjının diğer zamanlara göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Deltanın kuzey kesimlerinde yer altı suyu yıl boyunca birkaç metre değişkenlik gösterebilmektedir. Ancak güneye inildikçe bu fark azaldığından ve su seviyesi yüzeye yakın kalmaya devam ettiğinden alansal olarak bakıldığında ortalama yer altı su seviyesinin düşük olduğu yaz döneminde de yer altı suyu deşarjı devam etmiştir.

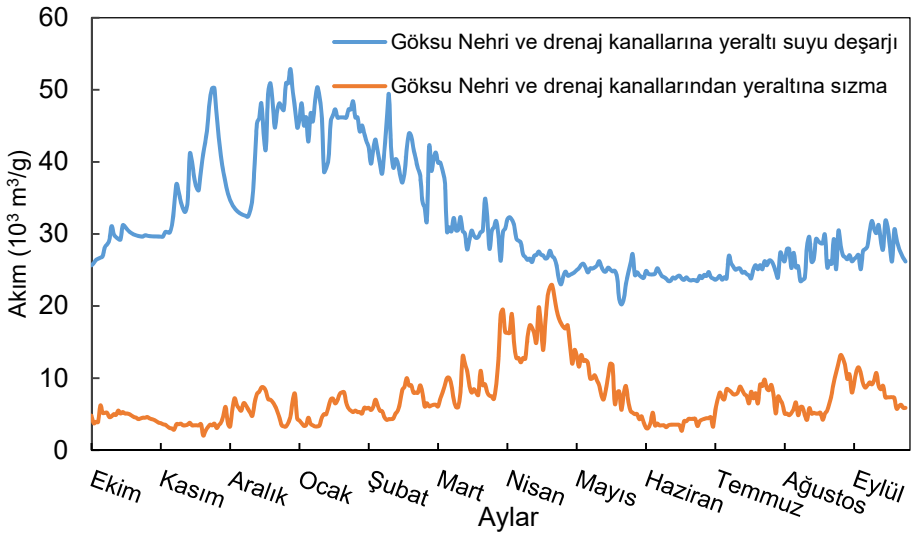


Şekil 4.16. Göksu Nehri, drenaj kanalları, Akdeniz ve göllere akış

4.6. Yer altı Suyu-Yer üstü Suyu Etkileşimi

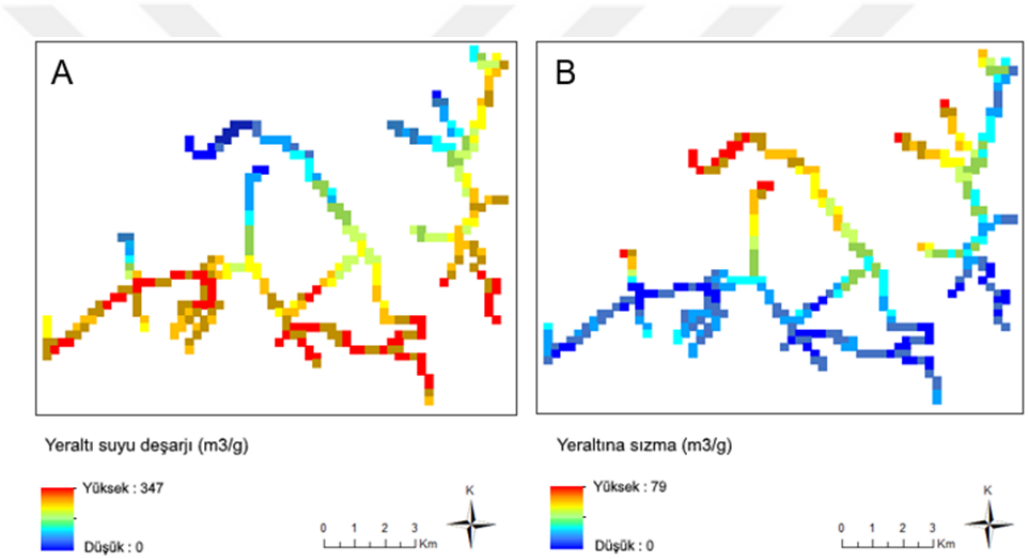
4.6.1. Yer altı Suyu-Göksu Nehri ve Drenaj Kanalları Etkileşimi

Yılın farklı dönemlerinde farklı miktarlarda olmak üzere Göksu Nehri ve drenaj kanalları yer altı suyunu beslemektedir. Aynı şekilde yer altı suyu da deltanın farklı bölgelerinde değişen oranlarda Göksu Nehri ve drenaj kanallarını beslemektedir. Yer altı suyu ile yer üstü suları arasındaki bu ilişki, GSFLOW akım modeli ile ortaya konmuştur. Şekil 4.17'de kalibrasyon periyoduna ait yıllık ortalama yağışın en düşük olduğu 1991 su yılı için hesaplanan akımlar gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yer altı suyunun Göksu Nehri ve drenaj kanallarına deşarjı kış aylarında en üst seviyelerine ulaşırken, yaz aylarında minimum seviyelerine inmektedir. Göksu Nehri ve drenaj kanallarından yer altına sızan su, özellikle ilkbahar aylarında Toroslardan eriyerek gelen kar sularının da etkisiyle, nehir seviyesinin yükselmesine bağlı olarak artış göstermiştir. Şekil 4.17'ye göre yer altı suyu deşarjının sızmadan yüksek olmasıyla, nehir ve kanallar boyunca su tablasının çoğunlukla nehir seviyesinin üzerinde olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.17. Yer altı suyu-Göksu Nehri ve drenaj kanalları etkileşimi (1991 su yılı)

Modellenen yer altı suyu-nehir etkileşimi, delta boyunca değişiklik göstermektedir. Şekil 4.18 yıllık ortalama yağışın en düşük olduğu 1991 yılı temmuz ayına ait dağılımları temsil etmektedir. Deltanın neredeyse tamamında etkileşim gerçekleşmekte, Göksu Nehri ve drenaj kanallarına yer altı suyu deşarjı, deltanın güney ve güney batısında fazla, kuzey kesimlerinde ise daha az olduğu görülmektedir (Şekil 4.18A). Göksu Nehri ve drenaj kanallarından yer altına sızan su miktarı ise Deltanın kuzeyine doğru artmakla beraber güney ve doğu kesimlerinde azalmıştır (Şekil 4.18B).

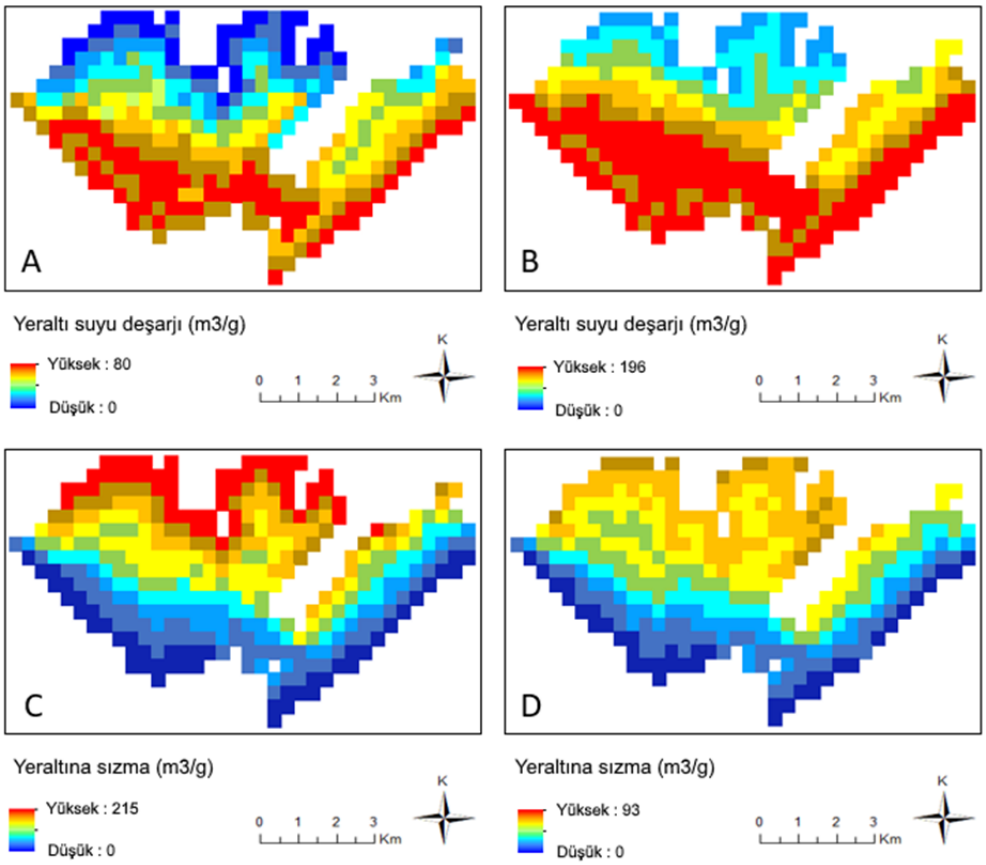


Şekil 4.18. Nehir ve drenaj kanalları boyunca; (A) yer altı suyu deşarjı, (B) yer altına sızma

4.6.2. Yer altı suyu-Akgöl ve Paradeniz Etkileşimi

Yer altı suyu ile lagünler arasında yıl boyunca devam eden dinamik bir etkileşim söz konusudur. İlkbaharın gelmesiyle sulama kanallarına bırakılan su miktarı artmakta ve birincil beslenme kaynağı sulamadan dönerek drenaj kanallarına akan su olan Akgöl ve Paradeniz'deki su seviyesi yükselmektedir. Buna bağlı olarak göllerden yer altına sızan su hacmi de artmaktadır (Şekil 4.19C). Kış aylarında ise göllerdeki suyun azalması ve yer altı su seviyesinin

yükselmesiyle birlikte göllerden yer altına sızan su da azalış göstermektedir (Şekil 4.19D). Yaz aylarında mevsime ve kaçak kullanımlara bağlı olarak yer altı su seviyesinin düşmesi ve göl su hacminin en fazla olduğu dönem olmasından dolayı lagünlere olan yer altı suyu deşarjı (Şekil 4.19A) kış mevsimine (Şekil 4.19B) oranla oldukça düşüktür.



Şekil 4.19. Yer altı suyu-göl etkileşimi; yer altı suyu deşarjı, (A) temmuz 1991, (B) ocak 1991. yer altına sızma, (C) temmuz 1991, (D) ocak 1991

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Göksu Deltası'nın yer altı suyu-yer üstü suyu etkileşimi araştırılmıştır. Bu etkileşimi belirleyebilmek için yer altı ile yer üstü sularını eş zamanlı olarak modelleyebilen GSFLOW birleşik akım modeli kullanılmıştır. GSFLOW, yağış-akış modelleme sistemi PRMS ile yer altı suyu akım modeli MODLFOW-2005'in birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Entegrasyon öncesinde PRMS ile MODFLOW-2005 modelleri kurulmuş ve kalibrasyonları yapılmış daha sonra GSFLOW modeli kalibre edilmiştir. Hidrolojik modellerin tahmin gücünü belirlemede kullanılan Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE) kullanılmış olup, PRMS kalibrasyon periyodu için 0.82, MODFLOW-2005 için 0.95 ve GSFLOW kalibrasyon periyodu için 0.88 olarak hesaplanmıştır.

GSFLOW modeli ile her bir tabakadaki su hacimleri, hidrolojik akışlar ve yer altı suyu-yer üstü suyu arasındaki etkileşimin belirlenmesi mümkün olmuştur.

Deltadaki yer üstü su akışı, zemin tabakası, doymuş ve doymamış tabakalar arasındaki akışlar ile Göksu nehri ve drenaj kanallarına doğru gerçekleşen akışlar model yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda bu akışların alansal ve zamana bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Zemin tabakasından yer altına doğru oluşan akış, kışın daha fazlayken yaz aylarında yer altı suyu deşarjı zemin tabakasından beslendiği miktarı aşmaktadır. Ayrıca Göksu Nehri ve drenaj kanallarına doğru gerçekleşen akışlar yıl içerisinde yağışın yoğun olduğu dönemlerde artış göstermiş, yer altı suyundan beslenmesi yaz aylarında azalmakla beraber istikrarlı bir şekilde devam etmiştir.

GSFLOW akım modeli kullanılarak Göksu nehri ve drenaj kanalları ile yer altı suyu arasındaki etkileşim değerlendirilmiştir. Sızma ve beslenme, nehir ve kanalların farklı bölgelerinde eş zamanlı olarak gerçekleşmiştir. Bununla beraber, yer altı suyu deşarjının nehrin büyük bir bölümünde sızma miktarından fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Göksu Deltası için geliştirilen GSFLOW akım modeli ile elde edilen sonuçlar başarılı sayılabilse de, aşağıda önerilen bazı güncelleme ve iyileştirmeler yapıldığında model sonuçlarının güvenilirliği artırılabilir.

- ✓ GSFLOW MODFLOW-2005'te en azından kararlı akım şartlarında kalibrasyon yapılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada sadece kararlı akım durumu için kalibrasyon yapılmıştır. Zamana bağlı değişen akım şartlarında yapılacak kalibrasyon sonucu olumlu yönde etkileyebilir.
- ✓ Çalışmadaki tüm kalibrasyonlar manuel olarak yapılmıştır. Manuel kalibrasyon uzun zaman alır ve istenmeyen hatalara sebebiyet verebilir. Dolayısıyla manuel kalibrasyon sonrası otomatik kalibrasyon metotlarının kullanılması sonuçları iyileştirilebilir.
- ✓ Arazide belirlenen gözlem kuyuları, fiziki şartlar göz önünde bulundurularak ölçüme elverişli olanlar seçilebilmiştir. Daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için alanı homojen olarak temsil edecek şekilde ve daha fazla sayıda kuyudan ölçüm alınabilir.
- ✓ Arazinin jeolojik enkesitleri ayrıntılı olarak belirlenmeli, daha hassas ve yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli oluşturulmalıdır.
- ✓ Bu çalışma yapıldıktan sonra Deltada faaliyete geçen II. Merhale Sulama Projesinin de modele dahil edilerek önerilen geliştirmelerle beraber uygulanmasıyla çalışma güncelleştirilebilir.

KAYNAKLAR

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., Oconnell, P.E., Rasmussen, J., 1986. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, She.1. History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modeling System. Journal of Hydrology, 87:45-59.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., Oconnell, P.E., Rasmussen, J., 1986. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, She.2. Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. Journal of Hydrology, 87:61-77.

American National Standards Institute, 1992. American National Standard for Programming Language-Fortran-Extended: X3.198-1992, 369s.

Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater. New York, McGraw-Hill, 569s.

Bencala, K.E., 1984. Interactions of solutes and streambed sediment. 2. A dynamic analysis of coupled hydrologic and chemical processes that determine solute transport. Water Resources Research, 20(12):1804-1814.

Bencala, K.E., Mcknight, D.M., Zellweger, G.W., 1990. Characterization of transport in an acidic and metal-rich mountain stream based on a lithium tracer injection and simulations of transient storage. Water Resources Research, 26:989-1000.

Bencala, K.E., Walters, R.A., 1983. Simulation of Solute Transport in a Mountain Pool-Andriffle Stream-a transient storage model. Water Resources Research, 19:718-24.

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett, H.M., 1998. The Functional Significance of the Hyporheic Zone in Streams and Rivers. Annual Review of Ecology and Systematics, 29:59-81.

Brunke, M., Gonser, T., 1997. The Ecological Significance of Exchange Processes Between Rivers and Groundwater. Freshwater Biology, 37:1-33.

Buldur, A.D., Pınar, A., Başaran, A., 2007. 05-07 Mart 2004 Tarihli Göksu Nehri Taşkını ve Silifke'ye Etkisi. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 17:139-160.

Carter, V., 1996. Wetland Hydrology, Water Quality, and Associated Functions in National Water Summary on Wetland Resources. U.S. Geological Survey Water Supply. Paper 2425, 35-48.

Charbeneau, R.J., 1984. Kinematic Models for Soil Moisture and Solute Transport. Water Resources Research, 20(6):699-706.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W., 1988, Applied Hydrology. New York, McGraw-Hill, 572s.

Colbeck, S.C., 1972. A Theory of Water Percolation in Snow. Journal of Glaciology, 2(63):369-385.

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

Çobaner, M., 2009. Kıyı Akiferlerinde Tuzlu Su Girişiminin Üç Boyutlu Simülasyonu: Göksu Deltası Örneği. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Adana, 156s.

Dahm, C.N., Grimm, N.B., Marmonier, P., Valett, H.M., Vervier, P., 1998. Nutrient Dynamics at the Interface Between Surface Waters and Groundwaters. Freshwater Biology, 40:427-51.

Elliott, A.H., Brooks, N.H., 1997. Transfer of Nonsorbing Solutes to a Streambed with Bed Forms: Theory. Water Resources Research, 33:123-36.

ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2012. ArcGis Version 10.1. Redlands, CA.

Ford, L.R., and Fulkerson, D.R., 1956. Maximal Flow Through a Network. Canadian Journal of Mathematics, 399-404.

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

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.

Gorelick, S.M., 1986. Conjunctive Water Use: Understanding and Managing Groundwater-Surface Water Interactions. International Association of Hydrologic Sciences, Wallingford, 547s.

Grimm, N.B., Fisher, S.G., 1984. Exchange Between Interstitial and Surface Water: Implications for Stream Metabolism and Nutrient Cycling. Hydrobiologia, 111:219-28.

Haar, B.L.H., Heunks, E., 1992. Use It or Loose It: A Hydrological Inventarisation of the Goksu Delta, Turkey. Interfaculty of Environmental Studies, State University of Utrecht, the Netherlands, 91s.

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-modularization concepts and the ground-water flow process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121s.

Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water Model-the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., and Konikow, L. F., 2017. MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017, http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G

Harbaugh, A.W., McDonald, M.G., 1996, User's Documentation for MODFLOW-96, and Update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-difference Ground-water Flow Model: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485, 56s.

Henson, W.R., Medina, R.L., Mayers, C.J., Niswonger, R.G., and Regan, R.S., 2013. CRT-Cascade Routing Tool to Define and Visualize Flow Paths for Grid-based Watershed Models. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D2, 28s.

Henson, W.R. and Niswonger, R.G., 2016. CRT version 1.3.1-Cascade Routing Tool to Define and Visualize Flow Paths for Grid-based Watershed Models. U.S. Geological Survey Software Release, 30 March 2017, http://dx.doi.org/10.5066/F7HT2MG1

Hill, A.R., 1990. Ground-water Flow Paths in Relation to Nitrogen Chemistry in the Nearstream Zone. Hydrobiologia, 206:39-52.

Hubbert, M.K., 1940. The Theory of Groundwater Motion. Journal of Geology, 48:785-944.

Hunt, R.J., Walker, J.F., and Krabbenhoft, D.P., 1999. Characterizing Hydrology and the Importance of Ground-Water Discharge in Natural and Constructed Wetlands. Wetlands, 19(2):458-472.

Jobson, H.E., Harbaugh, A.W., 1999. Modifications to the Diffusion Analogy Surface-water Flow Model (DAFLOW) for Coupling to the Modular Finite-difference Ground-water Flow Model (MODFLOW). U.S. Geological Survey, Open-file report 99-217.

Jackman, A.P., Walters, R.A., Kennedy, V.C., 1984. Transport and Concentration Controls for Chloride, Strontium, Potassium and Lead in Uvas Creek, a Small Cobble-bed Stream in Santa-Clara County, California, USA.2. Mathematical-modeling. Journal of Hydrology, 75:111-41.

Jones, J.P., Sudicky, E.A., McLaren, R.G., 2008. Application of a Fully-integrated Surface-subsurface Flow Model at the Watershed-scale: a Case Study. Water Resources Research, 44(3).

Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M., 2006. Measuring Methods for Groundwater - Surface Water Interactions: a Review. Hydrology and Earth System Sciences, 10:873-887.

Kollet, S.J., Maxwell, R.M., 2006. Integrated Surface-Groundwater Flow Modeling: a Freesurface Overland Flow Boundary Condition in a Parallel Groundwater Flow Model. Advances in Water Resources, 29(7):945-958.

Krause, S., Hannah, D.M., Fleckenstein, J.H., 2009. Hyporheic Hydrology: Interactions at the Groundwater-Surface Water Interface Preface. Hydrological Processes, 23(15):2103-2107.

Krause, S., Hannah, D.M., Fleckenstein, J.H., Heppel, C.M., Kaeser, D., Pickup, R., et al., 2011. Interdisciplinary Perspectives on Processes in the Hyporheic Zone. Ecohydrology, 4(4):481-499.

Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F., 2005. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. Advances in Geosciences 5:89-97.

Leavesley, G.H., Lichty, L.W., Troutman, B.M., Saindon, L.G., 1983. Precipitation-Runoff Modeling System—User's manual. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 83-4238, 207s.

Leavesley, G.H., Restrepo, P.J., Markstrom, S.L., Dixon, M., and Stannard, L.G., 1996b. The Modular Modeling System (MMS): User's manual. U.S. Geological Survey Open-File Report, 96-151, 142s.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., 1975. Hydrology for Engineers: New York, McGraw-Hill, 482s.

Lohman, S.W., and others, 1972. Definitions of selected ground-water terms-revisions and conceptual refinements. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 21s.

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.

Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., and Barlow, P.M., 2008. GSFLOW-Coupled Ground-water and Surface-water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005). U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 6-D1, 240s.

McBride, M.S., Pfannkuch, H.O., 1975. Distribution of Seepage within Lakebeds. Journal of Research US Geological Survey, 3(5):505-512.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1988. A Modular Three-dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques of WaterResources Investigations, 6-A-1, 586s.

Meinzer, O.E., 1923. Outline of Ground-water Hydrology, with Definitions: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 494, 71s.

Menengiç, M., 1998. Göksu Deltası Yer altı Suyu Kirliliği. Yuksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 77s.

Merritt, L.M. and Konikow, L.F., 2000. Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-water Flow Model and the MOC3D Solute-transport Model. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4167, 146s.

Mohammed, G.A., 2009. Modeling Groundwater-Surfacewater Interaction and Development of an Inverse Groundwater Modeling Methodology. Ph.D. Thesis. Vrije Universiteit Brussel, Brussels.

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.

Motz, L.H., Sedighi, A., 2009. Representing the Coastal Boundary Condition in Regional Groundwater Flow Models. Journal of Hydrologic Engineering, 14(8):821-831.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part I, a Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10: 282–290.

Niswonger, R.G., and Prudic, D.E., 2005. Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to Include Unsaturated Flow Beneath Streams-A Modification to SFR1. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A13, 50s.

Niswonger, R.G., Prudic, D.E., and Regan, R.S., 2006a, Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZF1) Package for Modeling Unsaturated Flow between the Land Surface and the Water Table with MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A19, 74 p

Oude Essink, G.H.P., 2001. Improving Fresh Groundwater Supply - Problems and Solution. Ocean&Coastal Management, 44: 429-449.

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

Packman, A.I., Brooks, N.H., 2001. Hyporheic Exchange of Solutes and Colloids with Moving Bed Forms. Water Resources Research, 37:2591-2605.

Panday, S., Huyakorn, P.S., 2004. A Fully Coupled Physically-based Spatially-distributed Model for Evaluating Surface/Subsurface Flow. Advances in Water Resources, 27(4):361-382.

Prudic, D.E., 1989. Documentation of a Computer Program to Simulate Stream-Aquifer Relations Using a Modular, Finite-difference, Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey, Open-File Report 88-729, 113s.

Rorabaugh, M.I., 1964. Estimating Changes in Bank Storage and Groundwater Contributions to Streamflow. International Association of Scientific Hydrology, 63:432-441.

Runkel, R.L., McKnight, D.M., Rajaram, H., 2003. Modeling Hyporheic Zone Processes-Preface. Advances in Water Resources, 26:901-905.

Smith, R.E., 1983. Approximate Sediment Water Movement by Kinematic Characteristics: Soil Science Society of America Journal, 47:3-8.

Sophocleous, M., 2002. Interactions Between Groundwater and Surface Water: The State of the Science. Hydrogeology Journal, 10:52-67.

Stanford, J.A., Ward, J.V., 1988. The Hyporheic Habitat of River Ecosystems. Nature, 335:64-66.

Sun, R.J., ed., 1986. Regional Aquifer-System Analysis Program of the U.S. Geological Survey—Summary of projects, 1978-84. U.S. Geological Survey Circular 1002, 264s.

Swain, E.D., Wexler, E.J., 1993. A Coupled Surface-water and Ground-water Flow Model for Simulation of Stream-Aquifer Interaction. U.S. Geological Survey, Tallahassee, FL, Open-file Report 92-138.

Toth, J., 1962. A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada. Journal of Geophysical Research, 67:4375-4388.

Toth, J., 1963. A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. Journal of Geophysical Research, 68:4795-4812.

Triska, F.J., Kennedy V.C., Avanzino R.J., Zellweger G.W., Bencala K.E., 1989. Retention and Transport of Nutrients in a 3rd-Order Stream in Northwestern California-Hyporheic Processes. Ecology, 70:1893-905.

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

Vander Kwaak, J.E., Loague, K., 2001. Hydrologic-Response Simulations for the R-5 Catchment with a Comprehensive Physics-based Model. Water Resources Research, 37:999-1013.

Viger, R.J., Leavesley, G.H., 2007. The GIS Weasel Users Manual: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-B4, 201s.

Winston, R.B., 2009. ModelMuse-A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52s.

Winter, T.C., 1978. Numerical-Simulation of Steady-state 3-Dimensional Groundwater Flow Near Lakes. Water Resources Research, 14:245-254.

Winter, T.C., 1983. The Interaction of Lakes with Variably Saturated Porous-media. Water Resources Research, 19:1203-18.

Winter, T.C., 1999. Relation of Streams, Lakes, and Wetlands to Groundwater Flow Systems. Hydrogeology Journal, 7:28-45.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998. Ground Water and Surface Water: A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139.

Woessner, W.W., 2000. Stream and Fluvial Plain Ground Water Interactions: Rescaling Hydrogeologic Thought. Groundwater, 38(3):423-429.

Wroblicky, G.J., Campana, M.E., Valett, H.M., Dahm, C.N., 1998. Seasonal Variation in Surface-subsurface Water Exchange and Lateral Hyporheic Area of Two Stream-Aquifer Systems. Water Resources Research, 34:317-28.

Yurtal, R., Motz, L.H., Gördü F., 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. 54s.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlkokulu Diyarbakır, ortaokulu Bingöl, lise eğitimini Van'da tamamladı. 2000 yılında Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlayarak 2007 yılında mezun oldu. Bir süre kamuda ve özel sektörde çalıştıktan sonra 2009 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2013 yılında Yükseköğretim Kurulu Doktora Araştırma Bursu ile Amerika Birleşik Devletleri'ne giderek, Florida Üniversitesi İnşaat ve Kıyı Mühendisliği Bölümünde bir yıl süreyle çalışmalarına devam etti. Halen Yüzüncü Yıl Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmakta olan yazar evli ve 3 çocuk babasıdır.

EKLER

Ek Çizelge 1. GSFLOW'da kullanılan PRMS ve GSFLOW modülleri ile MODFOW-2005 paketleri. (1 ile 7 arasında parantez içinde gösterilen her grupta, modül veya paketlerden yalnızca biri seçilir. G birleştirilmiş simülasyonu, P sadece-PRMS simülasyonunu, M sadece-MODFLOW simülasyonunu temsil eder)

Hidrolojik veya hesaplama süreci	**Modül veya paket**	**Tanım**	**Yeni veya değiştirilmiş**	**Model modu**
PRMS modülleri				
Havza	basin_prms	Tüm havzadaki ve her bir HTB için fiziksel parametre ve değişkenleri tanımlar		G,P
Akış yönü	cascade_prms	Akımı mansaba doğru yönlendirmek için HTB'ler ve yer altı suyu rezervuarlarının hesaplama sırasını belirler.	yeni	G,P
Ölçülen veri	obs_prms	Tüm ölçüm istasyonlarından gözlenmiş verileri okur ve depolar.		G,P
Güneş tablası	soltab_HTB_prms	Her bir HTB için potansiyel solar radyasyonu hesaplar (soltab_prms'nin değiştirilmesi).	değiştirilmiş	G,P
Sıcaklık (1)	temp_1sta_prms	Tahmini bir aylık hata payı ve bir istasyonda ölçülmüş sıcaklık verisi kullanarak maksimum ve minimum sıcaklıkları her bir HTB'ye dağıtır.		G,P
	temp_laps_prms	Farklı seviyelerdeki geçici ölçüm istasyonları ile ana istasyonlarda ölçülen sıcaklık verileri kullanılarak maksimum ve minimum sıcaklıkları her bir HTB'ye dağıtır.		G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devamı				
	xyz_dist	Bir grup ölçüm istasyonu veya atmosferik model sonuçlarından elde edilen ölçüm verilerinin çoklu doğrusal regresyon analiziyle yağış, maksimum ve minimum sıcaklıkları her bir HTB'ye dağıtır. Yağış için de kullanılan modülün seçimi gereklidir.		G,P
	temp_dist2_prms	Uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma planı (inverse distance weighting scheme) kullanarak bir veya daha fazla istasyonda ölçülen sıcaklıkları her bir HTB'ye dağıtır.		G,P
Yağış (2)	precip_prms	Bir veya daha fazla istasyonda ölçülen yağışları her bir HTB'ye dağıtır. Rakım, uzaysal varyasyon, topoğrafya ve ölçme etkisi gibi etmenlerdeki farkların hesaba katılması ile aylık düzeltme faktörlerini kullanarak yağış şeklini belirler.		G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devamı				
	precip_laps_prms	Bir veya daha fazla istasyonda ölçülen yağışları her bir HTB'ye dağıtır. Her bir ölçüm istasyonuna nisbetle her HTB'nin kot farklarını hesaba katmak için aylık hata payı düzeltmelerini kullanarak yağış şekillerini belirler.		G,P
	xyz_dist	Bir grup ölçüm istasyonu veya atmosferik model sonuçlarından elde edilen ölçüm verilerinin çoklu doğrusal regresyon analiziyle yağış, maksimum ve minimum sıcaklıkları her bir HTB'ye dağıtır. Sıcaklık için de kullanılan modülün seçimi gereklidir.		G,P
	precip_dist2_prms	Uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma planı (inverse distance weighting scheme) kullanarak bir veya daha fazla istasyonda ölçülen yağışları her bir HTB'ye dağıtır.		G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devam				
Güneş radyasyonu (3)	ddsolrad_HTB_prms	Solar radyasyonu her bir HTB'ye dağıtır ve derece-gün ilişkisine göre maksimum sıcaklığı kullanarak kayıp solar radyasyon verilerini tahmin eder. ddsolrad_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P
	ccsolrad_HTB_prms	Solar radyasyonu her bir HTB'ya dağıtır ve bulutlu günler ile solar radyasyon arasındaki ilişkiyi kullanarak kayıp solar radyasyon verilerini tahmin eder; ccsolrad_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P
Potansiyel buharlaşma-terleme (4)	potet_jh_prms	Geçerli zaman periyodunun aktif terlemeye ait olup olmadığını belirler ve Jensen-Haise formulasyonunu kullanarak (Jensen and others, 1969) her bir HTB için potansiyel buharlaşma-terlemeyi hesaplar.		G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devamı				
	potet_hamon_HTB_prms	Geçerli zaman periyodunun aktif terlemeye ait olup olmadığını belirler ve Hamon formulasyonunu kullanarak (Hamon, 1961) her bir HTB için potansiyel buharlaşma-terlemeyi hesaplar; potet_hamon_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P
	potet_epan_prms	Geçerli zaman periyodunun aktif terlemeye ait olup olmadığını belirler ve buharlaşma tavası kullanarak her bir HTB için potansiyel buharlaşma-terlemeyi hesaplar.		G,P
Tutma	intcp_prms	Tutulan yağış miktarı, tutulan yağış kaynaklı buharlaşma ve toprak veya kar örtüsüne ulaşan ara yağışı (yapraklardan süzülen yağış) hesaplar.		G,P
Kar	snowcomp_prms	Bir kar örtüsünün gelişimini başlatır ve enerji bütçesi yaklaşımını kullanarak kar birikimini ve tükenme süreçlerini simüle eder.		G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devamı				
Yüzeysel akış ve sızma (5)	srunoff_smidx_casc	Kademeli akıma izin veren doğrusal olmayan değişken kaynaklı alan metodu kullanarak her bir HTB için yüzeysel akış ve sızmayı hesaplar; srunoff_smidx_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P
	srunoff_carea_casc	Kademeli akıma izin veren doğrusal değişken kaynaklı alan metodu kullanarak her bir HTB için yüzeysel akış ve sızmayı hesaplar; srunoff_carea_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P
Zemin bölgesi	soilzone_gsflow	Her bir HTB'nun zemin bölgesine giren ve çıkan akımları hesaplar. Sızma, yer altı suyu ve daha yukarıdaki HTB'lardan kaynaklı giren akımlar ile, yerçekimsel drenaj, ara akış ve daha aşağıdaki HTB'lara doğru çıkan akımları kapsar. Sadece-PRMS modu kullanırken yer altı suyu kaynaklı giren akıma izin verilmez; smbal_prms ve ssflow_prms modüllerinin geliştirilerek birleştirilmesi.	yeni	G,P

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
PRMS modülleri devamı				
Yer altı suyu	gwflow_casc_prms	PRMS yer altı suyu rezervuarına giren ve çıkan akımı hesaplar; çıkan akım daha aşağıdaki yer altı suyu rezervuarlarına, nehir bölümlerine ve su çukurlarına yönlendirilebilir; gwflow_prms modülünün değiştirilmesi.	değiştirilmiş	P
Nehir akışı	strmflow_prms	Yüzeysel akış, ara akış ve yer altı suyu akımının toplamı olarak günlük nehir akımını hesaplar.		P
Özet	HTB_sum_prms	Her bir HTB için günlük, aylık, yıllık ve toplam hacim ve akımların akış özetlerini hesaplar.		G,P
	basin_sum_prms	Tüm HTB'lar için günlük, aylık, yıllık ve toplam hacim ve akımların akış özetlerinin toplamını hesaplar.		G,P
MODFLOW paketleri				
Havza	BAS	Bir dizi temel idari görevi yerine getirir.		G,M
Blok-merkezli akım (6)	BCF	Bir blok merkezli akım paketi kullanarak yer altı suyu akım denklemleri için iletkenlik katsayılarını hesaplar.		G,M
Tabakalı akım (6)	LPF	Bir tabakalı akım paketi kullanarak yer altı suyu akım denklemleri için iletkenlik katsayıları hesaplar.		G,M

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
MODFLOW paketleri devamı				
Hidrostratigrafik birim akımı (6)	HUF	Hidrostratigrafik birimleri kullanarak model tabakaları için etkili hidrolik özellikleri hesaplar.		G,M
Yatay akım sınırı	HFB	Yatay iletkenliği azaltarak akım sınırlarını simule eder.		G,M
Kuyu	WEL	Kuyuları temsil etmek için akım denklemlerine terimler ekler.		G,M
Çok düğümlü kuyu well	MNW	Birden fazla hücrede su alınan veya verilen kuyular için akım denklemine terimler ekler.		G,M
Genel yük sınırı	GHB	Genel hidrolik yük-bağımlı sınır şartlarını temsil etmek için akım denklemine terimler ekler.		G,M
Sabit yük sınırı	CHD	Sabit hidrolik yük sınır şartlarını temsil etmek için akım denklemine terimler ekler.		G,M
Akım ve yük sınırı	FHB	Akım ve hidrolik yük sınır şartlarını temsil etmek için akım denklemine terimler ekler.		
Akım yönü	SFR	Yer altı suyu ve nehir etkileşimini temsil etmek için akım denklemine terimler ekler; SFR2 paketinin değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,M

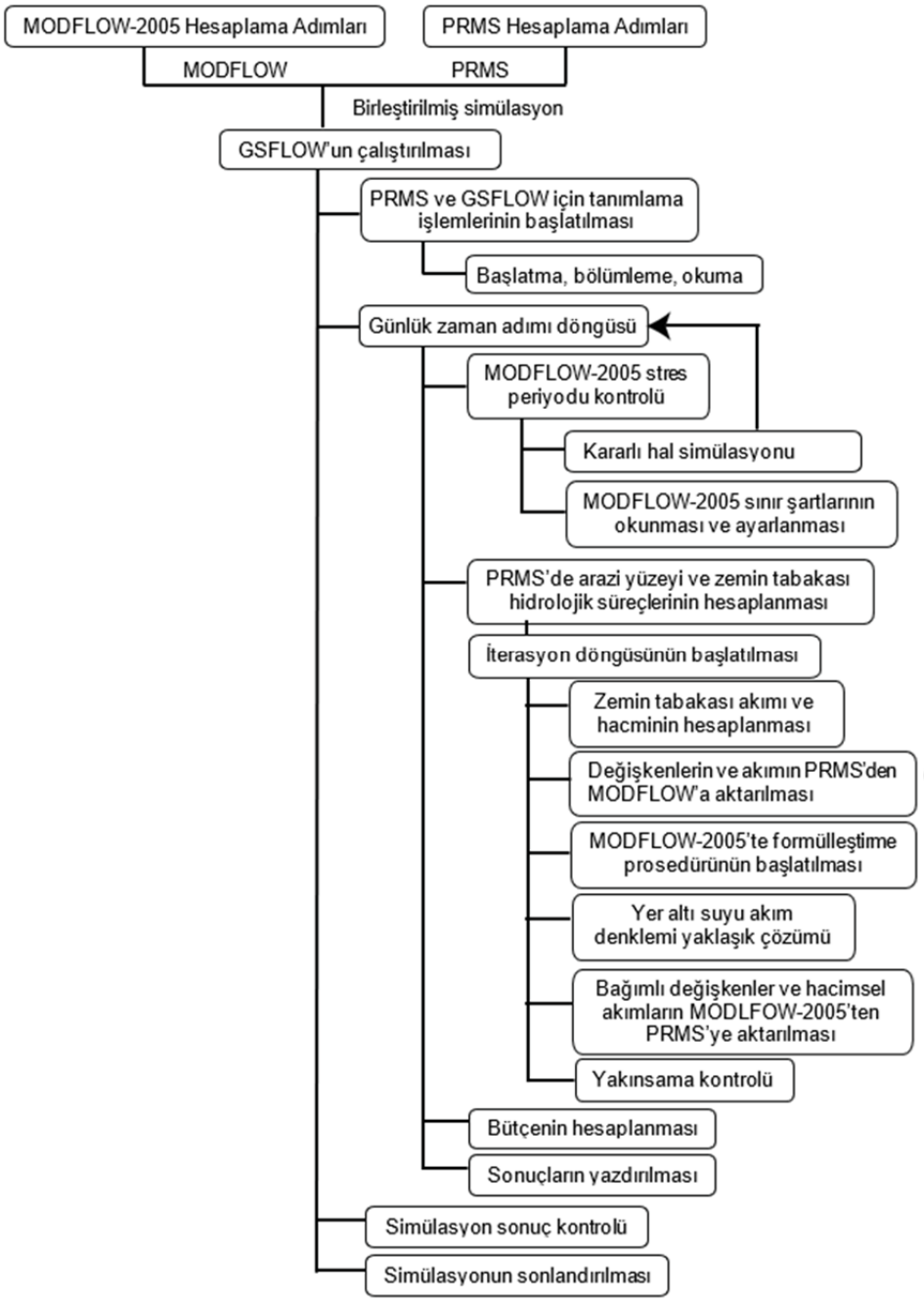
Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
MODFLOW paketleri devamı				
Göl	LAK	Yer altı suyu ve göl etkileşimini temsil etmek için akım denklemine terimler ekler; LAK3 paketinin değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,M
Doymamış bölge akımı	UZF	Doymamış bölge ve buharlaşma-terleme kaynaklı beslenim ile yer yüzeyine yer altı suyu boşalımını temsil etmek için akım denklemine terimler ekler.	değiştirilmiş	G,M
Ölçüm	GAG	Seçilen nehir uzantıları ve göller için zaman serisi ölçüm çıktılarını yazdırır.	değiştirilmiş	G,M
Çözücü (7)	SIP	Son derece kapalı prosedürleri (strongly implicit procedure) kullanarak sonlu fark yaklaşımından kaynaklanan eş zamanlı denklemleri çözer.	değiştirilmiş	G,M
	PCG	Önceden koşullandırılmış bir eşlenik gradyan prosedürü (preconditioned conjugate-gradient procedure) kullanarak sonlu fark yaklaşımından kaynaklanan eş zamanlı denklemleri çözer.	değiştirilmiş	G,M

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
MODFLOW paketleri devamı				
	DE4	Direk çözüm prosedürü kullanarak sonlu fark yaklaşımı eş zamanlı denklemleri çözer.		G,M
	GMG	Önceden koşullandırılmış eşlenik gradyan prosedürüne ait geometrik çoklu ağ kullanarak sonlu fark yaklaşımından ait eş zamanlı denklemleri çözer.		G,M
GSFLOW modülleri				
Hesaplama sırası	gsflow_prms	Her bir zaman aralığı için PRMS ve GSFLOW hesaplama sırası ve model modunu kontrol eder.PRMS call_modules.c altprogramının değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,P,M
	gsflow_modflow	Zamana bağımlı giriş verilerini okumak için ardışık sıralamayı kontrol eder. Ayrıca MODFLOW'a giren ve çıkan akımlara bağlı olarak MODFLOW-2005 paketleri ile PRMS ve GSFLOW modülleri için zaman aralığı ve iterasyon döngülerindeki hesaplamaların sıralamasını kontrol eder; MODFLOW-2005 ana programının değiştirilmesi.	değiştirilmiş	G,M

Hidrolojik veya hesaplama süreci	Modül veya paket	Tanım	Yeni veya değiştirilmiş	Model modu
GSFLOW modülleri devamı				
Dönüşüm	gsflow_setconv	PRMS ve MODFLOW 2005 birimleri arasında çeviri yapabilmek için kullanılan değişkenleri tanımlar.	yeni	G
Entegrasyon	gsflow_prms2mf	PRMS zemin tabakası yerçekimsel rezervuarından MODFLOW-2005 sonlu fark hücrelerine yerçekimsel drenajı dağıtır. Aynı zamanda HTB'lerden MODFLOW-2005'deki nehir bölümleri ve göllere doğru olan yüzeysel akış ve ara akışı dağıtır.	yeni	G
	gsflow_mf2prms	MODFLOW-2005 sonlu fark hücrelerinden PRMS zemin tabakası yerçekimsel rezervuarına doğru olan yer altı suyu deşarjını dağıtır.	yeni	G
Özet	gsflow_budget	Her bir zaman adımı sonunda, sonlu fark hücrelerine giren ve çıkan akımları kullanarak yerçekimi rezervuarındaki son hacmi düzeltir, GSFLOW için bütçesiyi hesaplar.	yeni	G
	gsflow_sum	Her bir zaman aralığının sonunda tüm akım bileşenleri için detaylı su bütçelerini hesaplar.	yeni	G

Ek Çizelge 2. Göksu Deltası için kullanılan manuel kalibrasyon parametreleri

Parametre	Aralık		Açıklama
	Minimum	Maksimum	
gwflow_coef	0.002	0.7	Yer altı suyu rezervuarındaki suyu nehre yönlendiren doğrusal katsayı
soil2gw_max	0	0.7	PRMS yer altı suyu rezervuarına yönlendirilen zemin suyu fazlalığı maksimum değeri
ssr2gw_rate	0.03	0.7	PRMS yer altı suyu rezervuarına veya MODFLOW sonlu fark hücresine yerçekimsel drenajı hesaplamak için kullanılan denklemde doğrusal katsayı
soil_moist_max	2	11	Bir HTB'de zemin tabakasının maksimum kullanılabilir kapiler su tutma kapasitesi
soil_rechr_max	1	6	Kapiler rezervuardaki maksimum su miktarı (soil_moist_max parametresine eşit veya daha küçük olmalıdır)
fastcoef_lin	0.01	0.7	Hızlı ara akış için doğrusal akım yönlendirme katsayısı
slowcoef_lin	0.01	0.3	Yavaş ara akış için doğrusal akım yönlendirme katsayısı
sat_threshold	2.7	11.5	Zemin tabakasındaki birim alandaki maksimum su hacmi
smidx_coef	0.001	0.072	Doğrusal olmayan yardımcı alan algoritmasında katsayı
rain_adj	0.5	1.8	HTB'deki yağmuru ayarlamak için kullanılan aylık düzeltme faktörü
epan_coef	0.3	2.1	Değeri potansiyel buharlaşma-terlemeye dönüştürmek için kullanılan aylık tava buharlaşma katsayısı
covden_sum	0.58	0.91	HTB alanının ondalık kesri olarak yazlık bitki örtüsü yoğunluğu
covden_win	0.27	0.65	HTB alanının ondalık kesri olarak kışlık bitki örtüsü yoğunluğu
tmax_adj	-1.04	1.65	Eğim ve bakıya bağlı olarak tahmin edilen maksimum günlük HTB sıcaklık düzeltme faktörü
tmin_adj	-1.04	1.65	Eğim ve bakıya bağlı olarak tahmin edilen minimum günlük HTB sıcaklık düzeltme faktörü
tmax_allrain	30	60	Bir gün boyunca bütün yağışların yağmur olduğu HTB'de aylık minimum hava sıcaklığı,
pref_flow_den	0.1	0.3	Tercihli akış için mevcut toprak tabakasının ondalık kesri



Ek Şekil 1. Birleştirilmiş GSFLOW simülasyon modeli için hesaplama adımları