

## Afyon Ovası Yeraltısuyu Akım Modeli

### *Groundwater Flow Model of Afyon Plain*

**A. Özlem ATILLA**

*Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, 06532 Ankara*

### ÖZ

Afyon Ovasında geçtiğimiz bir kaç oo yıl içinde artan gereksinime bağlı olarak git-tikçe •artan miktarlarda yeraltısuyu çekilmiş ve bu uygulamaya- paralel olarak piyezometrik seviyede düşümler ve su kalitesinde bozulmalar gözlenmiştir. Bu koşullar altında ovada yoğun olarak çekimin artması sonucu meydana gelecek etkilerin öngörül-mesi, ovadaki yeraltısuyu konumunun bugünkü durumunun ortaya konması ile mümkün olabilecektir.. Bu amaca yönelik olarak, ovadaki yeraltısuyu akımı MODFLOW (Modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model) matematiksel modeli aracılığıyla benzeştirilmiş, ovadaki hidrolik yük dağılımının yer ve zaman içindeki yayılımı belirlenmiştir. Ova. genelinde hidrolik yük dağılımı ovanın KB kısmından GD kısmına doğru •azalmaktadır. Benzeşim, sonuçlarında, özellikle çekimin yoğun olarak başladığı. 1976 yılından sonra ve önemli ölçüde arttığı 1990 yılından sonra piyezometrik sevi yer-deki düşüş dikkat çekmektedir,. 1965 yılından 1998 yılına kadar ovanın bazı kesimlerinde 5 - 10 m'lik düşümler olduğu belirlenmiştir, Bu koşullar' altında ovada yeraltısuyu kulla-nımının doğal hidrolik denge koşullarını bozmayacak şekilde düzenlenmesi ve kontrolsüz, çekimlerin durdurulması gerekmektedir,.

Anahtar Sözcükler: Afyon, model, MODFLOW, yeraltısuyu

### **ABSTRACT**

- . Extensive groundwater exploitation over the last two decades has resulted in piezo-metric level decline and- water quality degradation in the fresh water aquifer in the Afyon Plain., Under these conditions, the prediction of the consequences of the overexploitation requires the identification of the current head distribution. For this purpose, the spatial and temporal extent of the hydraulic head over the plain is simulated by MODFLOW (Modular -three-dimensional-finite-difference ground-water flow model). The hydraulic ' head distribution declines from NW to SE over the plain. The model shows that there is an increase in the decline of the piezometric levels after the year 1976 when an intensive groundwater exploitation is started, and after 1990 when the exploitation is considerably increased.. It is .simulated that the-hydraulic head is decreased 5 to 10 m in some parts of the plain front the year 1965 to 1998. Under these conditions, groundwater usage In the

*Plain should be regulated to\* establish the natural hydraulic balance and, the termination of ike uncontrolled groundwater exploitation.*

*Key Words: Afyon, groundwater, model, MOD FLOW*

## Giriş

Tarım ve hayvancılık açısından önemli bir konuma sahip olan Afyon ilinde so« yıllarda sulanan arazi miktarında artış gözlenmektedir, Ovada soğuk su akiferinden özellikle yaz aylarında sulama ve kullanma amaçlı olarak önemli miktarlarda su çekilmektedir.. Afyon\* da yeraltı suyu kol lamı ağırlıklı olarak 1990 yılından itibaren artmaya başlamıştır. Ayrıca yoğun çekimin bir sonucu olarak da piyezometrik seviyede 60 m<sup>1</sup> ye varan düşümler gözlenmiştir. Özellikle 100 m'den daha derin işletme kuyularının bulunduğu alanlarda piyezometrik seviyedeki düşümlerin yanısıra sulama suyu kalitesinin de bozulduğu görülmektedir. Termal akifer sisteminden kaynaklandığı düşünülen bu kalite bozulmaları,, sıcak suları karakterize eden Na, Cl,, Li, Br vb. kimyasal parametrelere soğuk su kuyularında da yüksek oranlarda rastlanması ile belirlenmiştir (Atila, 2002)..

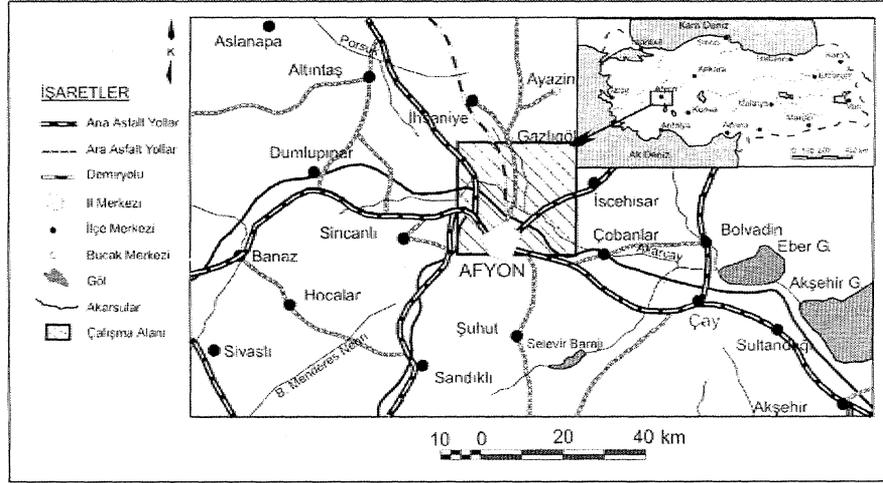
Ovada yoğun olarak çekimin artması sonucu meydana gelecek etkilerin öngörülmesi amacı ile, ovadaki yeraltısuyu akımı McDonald and Harbaugh (1988) ve Harbaugh and McDonald (1996) tarafından geliştirilen MODFLOW model programının geliştirilmiş sürümü olan MODFLOW-2000 (Harbaugh et al.,, 2000) ile benzeştirilmiştir. Beslenme - boşalım ilişkileri, sınır koşulların etkileri bu model ile ortaya konmuştur., Mo-

del süresi yeraltısuyu kullanımının başladığı 1966 yılından 1 yıl öncesinde (1965) başlatılmış,, seviye ve kalite gözlemlerinin yapıldığı 1998 yılına kadar sürdürülmüştür., Modelde zaman, birimi gün olarak seçilmiştir. Modelin kalibrasyonunda evrik model leine yöntemi uygulanmıştır., Model kalibre edildikten sonra hassasiyet analizleri yapılmıştır.

Toplanan veriler (jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik, hidrojeokimyasal vb.,) yardımıyla sayısal modele çevrilen bu çatışma ile mevcut yeraltı suyu işi eti m koşul I arı n n akifer üzerindeki etkisi araştırılmıştır..

## Çalışma Alanının Yeri ve Özellikleri

Afyon. Ovası, 38° - 39° kuzey enlemleri ile 30° - 31° doğu boylamları, arasında yer almaktadır. Ova, yaklaşık olarak 230 km<sup>2</sup>'lik bir alan kaplamakta olup, 818.5 kırıllık bir yüzey drenaj alanına sahiptir (Şekil 1).. Ova kötü hemen hemen tüm ova boyunca 1010-1020 inlerde bulunmaktadır. Ovayı çevreleyen yükseltiler ise 1400-1700 m'ye kadar ulaşmaktadır. Bölgede karasal iklim hüküm sürmektedir, Afyon Devlet Meteoroloji İstasyonundan elde edilen verilere göre yıllık ortalama yağış miktarı 417.7 mm, buharlaşma miktarı ise 1170 mm'dir. İnceleme alan içerisinde yer alan en önemli akarsu, ovayı yaklaşık olarak KB-GD yönlü kateden Akarçay'dır.



Şekil 1. Afyon Ovası yer buldum haritası  
Figure 1. Location map of Afyon Plain

Afyon Ovası ve yakın civarının jeolojik yapısı Metin vd. (1987), Erkan vd. (1996), Metin vd. (1988), Aydar vd. (1996) ve Tezcan vd., (2002) tarafından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Alanda en yaşlı birimi Paleozoyik yaşlı Iscehisar Mermerleri (Pz-Mrm) ve Metakonglomera Üyesi'nden (Pz-Mkg) oluşan Afyon Metamorfileri (Pz-Sst) oluşturmaktadır. İnceleme alanında geniş alanlar kaplayan Senozoyik yaşlı birimler Miyosen (Mi-Dtr), Pliyosen (Pl-Dtr) ve Kuvaterner (Q-Alu) ile temsil edilmektedir.. Pliyosen yaşlı birimler Mam Üyesi (Pl-Mrn), Kireçtaşı Üyesi (Pl-Kct), Şeydiler Tüf ve Aglomeralan (Pl-Tuf), Trakit (Pl-Tra) ve Bazalt (Pl-Baz)'tan oluşmaktadır. Senozoyik yaşlı birimler Paleozoyik yaşlı kayalar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir.

inceleme alanım da içine alan bölge hidrojeolojisi Tezcan vd. (2002) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Afyon Ova-

sı'nda yeraltısuyu Neojen yaşlı kayaların kumlu ve çakıllı seviyelerinde bulunmaktadır. Bu seviyeler yüksek iletkenlik ve depolama özelliğine sahiptirler. Neojen yaşlı volkanik kayalar da çatlak ve eklem sistemleri boyunca yeraltısuyu taşımaktadırlar.. Bu kayalar, geçirimsizliği çok düşük ( $K < 0.01$  m/gün) ve genel olarak yüzeyden itibaren 10-20 m derinliğe ulaşan Kuvaterner yaşlı alüvyon ile örtülmüştür. Bu örtüde yer alan Kuvaterner killeri ile Neojen'in maralı seviyeleri ova alanında akiferlerin basınçlı bir özellik kazanmasına neden olmaktadır. Ovada, Neojen'in altında yer alan Paleozoyik yaşlı kayalar ise sıcak su akiferini oluşturmaktadır.

#### Su Bütçesi

Afyon Ovası için su bütçesi Tezcan,, vd. (2002) tarafından Akarçay Havzası için ya-

pılan su bütçesi çalışmaları kapsamında bir yüzey su bütçesi modeli olan "abcd" modeli (Thomas, 1981) ile hesaplanmıştır "abcd" modelinin uygulanması sırasında havzada bulunan akım gözlem, istasyonlarının drenaj alanları esas alınmış ve her akım. gözlem istasyonunun gerisinde kalan alanın model parametreleri akım değerleri ile kalibre edilmiştir. Her hücre için "abcd" modeli ile üretilen yüzeysel akış değerleri toplanarak akım gözlem istasyonunun bulunduğu noktadaki toplam akım değeri belirlenmiş ve istasyonda gözlenen değerlerle karşılaştırılmıştır. Gözlenen akış değerleri ile hesaplanan değerler arasındaki farkı minimize edecek şekilde model parametreleri (a,b, c, d) her bir hücre için evrik olarak hesaplanmıştır.

#### Çizelge L Afyon Ovası su bütçesi

Table L Water budget for Afyon Plain

Beslenme ( $m^3/yıl$ )	Boşalım ( $m^3/yıl$ )		
Sincanlı ve İhsaniye Ovala-	$2.5 \times 10^6$	$10 \times 10^6$	
Neojen ve Paleozoyik.	$12.5 \times 10^6$	Kuyular	$4.5 \times 10^6$
		Diğer	$0.5 \times 10^6$
Toplam	$15 \times 10^6$	Toplam	$15 \times 10^6$

Bu model aracılığı ile 1965-1998 yılları arasında hesaplanan beslenme değeri Afyon Ovası için ortalama  $15 \times 10^6 m^3/yıl$  olarak belirlenmiştir (Çizelge 1).. Bu değer  $2.5 \times 10^6 m^3/yıl$  içe akış ile Sincanlı ve

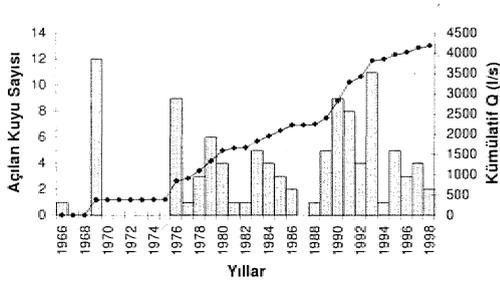
İhsaniye Ovaları'ndan gelmektedir. Geri kalan kısmı ise ağırlıklı olarak ovayı çevreleyen volkanik kayalardan, Neojen ve Paleozoyik kayalardan gelmektedir;. Ova yüzeyinden herhangi bir beslenme olmadığı varsayılmıştır. Afyon Ovası'nda yılda ortalama  $10 \times 10^6 m^3$  hacminde yeraltı suyunun ovanın güney sınırından dışarıya akış yoluyla ovayı terk ettiği belirlenmiştir.

Ovada açılmış sulama kuyularından yapılan çekim değerlerinin kaydı bulunmamaktadır. 1993 yılı sonu itibarıyla ovada açılmış kuyuların toplam çekim kapasiteleri  $4000 l/s$ 'nin üzerine çıkmıştır. Ancak ovada bulunan sulama, kooperatiflerinin kuyu çekimleri için harcadığı elektrik tüketimlerinden yola çıkılarak yapılan hesaplamada bu kuyuların yılda 500 saat çalıştıkları belirlenmiştir (Tezcan vd., 2002). Yıllara göre çekim debileri ele alınarak yapılan değerlendirmede 1966 yılından itibaren açılan sulama kuyuları ile ortalama  $4.5 \times 10^6 m^3/yıl$  çekim yapıldığı hesaplanmıştır. Ova için hesaplanan beslenme ve boşalım değerleri arasındaki  $0.5 \times 10^6 m^3/yıl$  farkın, ovada ruhsatsız kuyularla yapılan çekimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### Kuyularla çekimi.

Ovada, daha çok sulama amaçlı olmak üzere 1966-1998 yılları arasında soğuk su akiferi içinde Devlet Su İşleri tarafından açılmış olan 105 adet sondaj kuyusu yer almaktadır. Bu kuyulara ait genel özellikler Atilla (2002) tarafından özetlenmiştir. Kuyu debileri  $6-75 l/s$  arasında değişmekte-

dir. Bu kuyuların hepsi Neojen çökelleri içinde açılmıştır. Kuyularla, çekim, Mayıs ayından başlayarak Ekim ayına kadar devam etmektedir. Ovada açılan kuyu sayılarının yıllara göre dağılımları ve çekim miktarları Şekil 2'de verilmiştir. Bu şekilden çekim, miktarının açılan kuyu sayısına bağlı olarak 1976 yılından sonra artış gösterdiği ve özellikle 1990 yılından sonra da ovada önemli ölçüde yeraltısuyu kullanımının gerçekleştiği görülmektedir.



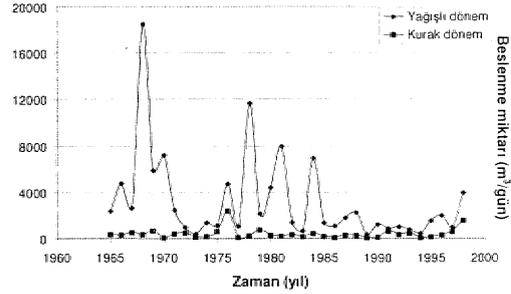
Şekil 2.. Kuyu sayılarının yıllara göçe dağılımları ve çekim miktarları

Figure 2. Annual distribution of the number of the wells and discharge rates

### Beslenme

Model alanında yeraltısuyu beslenimini sağlayan en önemli birim Pliyosen yaşlı volkanik kayalardır. Bunun yanı sıra,, Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden, de fay yüzeyleri aracılığı ile bir beslenme gerçekleşmektedir. Tezcan vd. (2002) tarafından Akarçay Havzası için oluşturulan hidrolojik model sonucu elde edilen beslenme değerleri Afyon Ovası için ayrılanarak modele aktarılmıştır. 1965-1998 yılları arasında ova akiferine olan beslenme miktarları Şekil 3'de verilmektedir. Ovanın üst kıs-

mında yer- alan alüvyon örtünün geçirimsiz olması nedeni ile ova yüzeyinden ve Akarçay nehrinden bir beslenme meydana gelmemektedir. Buharlaşma kaybı da aynı nedenle göz önüne alınmamıştır.



Şekil 3. Afyon Ovası yeraltı suyu besleniminin yıllara göre değişimi

Figure 3. Annual variation of groundwater recharge rates

### Yeraltısuyu Akım Modeli

Bu çalışmada yeraltısuyu akım denklemini çözmek için, USGS (United States Geological Survey) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı olan modüler sonlu-farklar akım modeli MODFLOW-2000 kullanılmıştır., MODFLOW, dünyada çok geniş kullanım alanına sahip bir yeraltısuyu akımı benzeşim programı olup,, yeraltısuyu akımı kısmi diferansiyel eşitliğini hidrolik yük için çözmektedir (McDonald and Harbaugh, 1988):

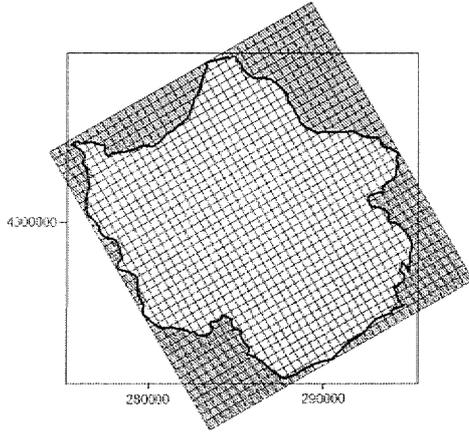
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Burada,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  = Hidrolik iletkenlik katsayısının x, y, z koordinat eksenlerin-

deki bileşenleri ( $L T^{-1}$ ),  $h$  = Hidrolik yük ( $L$ ),  $W$  = Hacimsel su katkısı/kaybı ( $T^{-1}$ ),  $S_s$  = Özgül depolama ( $L^{-1}$ ),  $t$  = Zaman ( $T$ )'dir.

#### Grid tasarımı ve model katmanları

Sonlu farklar gridlerinin yaratılması, sınır koşulları ve başlangıç koşullarının tanımlanması ve uygulanması, grid ağları için gerekli parametrelerin tanımlanması ve MODFLOW'a bu bilgilerin taşınması için Argus Interware, Inc. (1997) tarafından geliştirilen Argus-ONE (Argus-Open Numerical Environments) coğrafi bilgi sistemi programından faydalanılmıştır. Bu program kullanılarak,, yaklaşık olarak 230 km<sup>2</sup>'lik bir alan kaplayan Afyon Ovası 357 kolon, 381 satır ve toplam 136017 adet bloktan oluşan sonlu farklar gridlerine bölünmüştür. Grid eksenleri, Afyon Ovası'nda yeraltısuyu akım yönü ile çakıştırılacak şekilde seçilmiştir (Şekil 4).. Her bir hücre 50 m x 50 m'lik bir alan temsil etmektedir.,



Şekil 4. Afyon Ovası için oluşturulan sonlu farklar gridleri

Figure 4, Finite difference grids for Afyon Plain

Model katman sayısı ne kadar fazla olursa hesaplamalar o kadar hassas olmakta, ancak sayının fazla tutulması model çalışma süresini artırmaktadır.. Bu nedenle bu çalışmada en fazla 7 model katmanı oluşturulabilmiştir. Kuyularla çekimin yoğun olduğu ilk 6 model katmanı kalınlığı 50 m, 7. katmanın kalınlığı 100 m olarak alınmıştır. Kuyu çekimleri, ovada açılmış tüm kuyuların filtrelendiği derinliklere uygun olarak ilgili model katmanlarından yapılmıştır (Atilla, 2002). Afyon Ovası üstten geçirimsiz bir örtü ile kaplı olduğundan tüm model katmanları basınçlı akifer olarak değerlendirilmiştir.

#### Hidrolik parametrelerin dağılımı

Afyon Ovası akiferinin hidrolik parametreleri ( $K$ ,  $S$ ) ovada açılmış kuyu logları ile sabit debili pompalama denemesi sonuçlarının Tezcan vd. (2002) tarafından değerlendirilmesi ile elde edilmiştir, Model alanına ait parametreler adı geçen çalışmadan değiştirilmeden aynen alınmıştır. Tüm model katmanları için farklı hidrolik iletkenlik katsayısı ( $K$ ) değerleri kullanılmıştır. Hidrolik iletkenlik katsayısı parametrelerinin ova soğuk su akiferindeki dağılımları 0.1-18 m/gün arasında değişmektedir. İnceleme alanında düşey yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısı mfr-dönük hiçbir veri bulunmamaktadır. Anderson and Woessner (1991) ve Spitz and Moreno (1996) yaptıkları literatür taramasında düşey yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısının yatay yöndeki hidrolik iletkenlik katsayısına oranının 1/1 - 1/10 arasında değiştiğini,, ancak bazı model çalışmalarında bu oranın 1/1000'e kadar çıktığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada bu oran kalibrasyon sırasında belirlenerek,, 1/5 olarak alınmıştır (Atilla, 2002).



### Sınır koşulları

Atila (2002) yaptığı çalışmada Afyon Ovası'nda beslenmenin, model sınırlarından içe akış yolu ile meydana geldiğini belirtmiştir. En önemli beslenme alanını ovanın B, GB kesiminde yer alan ve yüksek bir topografyaya sahip olan Pliyosen yaşlı volkanik kayalar oluşturmaktadır. Bu kesimden olan beslenme mevsimlere göre değişiklik gösterdiği için "değişken akım sınırı" olarak modele aktarılmıştır (Bkz. Şekil 5). Bu sınırdan olan beslenme, tüm model katmanlarına, sınır boyunca açılmış bir dizi kuyu ile her stres periyodu için ayrı değerler olarak verilmiştir.

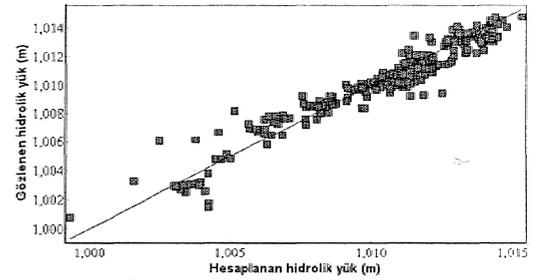
Ovanın K ve KD sınırında geniş yüzey alanına sahip Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden süzülen sular da fay yüzeyleri aracılığı ile "değişken akım sınırı" koşulu ile benzeştirilmiştir (Bkz. Şekil 5). Ovanın kuzey sınırında İhsaniye Ovası'ndan, KB sınırında ise Sincanlı Ovası'ndan iç akışla meydana gelen yeraltısuyu besleniminin, bu ovalar ile model alan arasındaki hidrolik gradyana bağlı olarak değişeceği göz önüne alınarak her stres periyodu için "değişken yük sınırı" olarak benzeştirilmiştir. Model benzeşiminin başladığı 1965 yılı ile 1998 yılları arasında bu yükün sabit kalmadığı düşünülmektedir 65 yılından 98 yılına kadar ovanın KD'sunda sabit hidrolik yükün 1020 m'den KB'sında ise 1019 m'den 1015 m'ye düştüğü gözlem kuyularındaki seviye değişiminden belirlenmiş ve her stres periyodu için ayrı değerler girilmiştir.

Ovanın G, GD sınırında meydana gelen havza dışına akış da "sabit yük sınırı" ile benzeştirilmiştir (Bkz. Şekil 5). Buradaki yük değeri ova dışında kalan Salar belesindeki kuyularda ölçülen değerler dikkate

alınarak 1002 m olarak verilmiştir. Ovanın GD'sunda yer alan Pliyosendin marnlı ve killi kireçtaşı seviyelerinden ise bir beslenme gerçekleşmediği varsayılmıştır.

### Model kalibrasyonu

Bu çalışmada kalibrasyon için akifer hidrolik iletkenlik katsayıları evrik modellerne tekniğini kullanan "MODFLOW" programı ile kalibre edilmiş ve sonuçlar Afyon Ovası'nda yer alan 5 adet gözlem kuyusunda ölçülen hidrolik yük değerleri ile karşılaştırılmıştır. Gözlem kuyuları, ovanın B'sında yer alan Sadıkbey, K'inde yer alan Fethibey, D'sonda yer alan Kumartaş (Erenler) ve Beyyazı ile GD'sında yer alan Susuz köylerinde bulunmaktadır (Bkz. Şekil 5). Hesaplanan ve gözlenen hidrolik yükler arasındaki ilişkiyi görmek amacıyla 50 m x 50 m'lik grid aralıkları için elde edilen kalibrasyon grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri arasında iyi bir uyum gözlenmektedir.

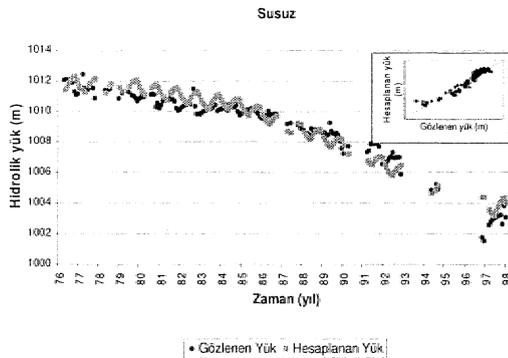


Şekil 6. 50x50 m'lik grid aralıkları için elde edilen kalibrasyon grafiği

Figure 6. Calibration graph obtained for 50 x 50 m grid interval

Grafiklerin dikey ekseninde yer alan "gözlenen hidrolik yük" değerleri, ovada, yer

alan 5 adet gözlem kuyusundan elde edilen değerlerin tümüdür. Gözlenen hidrolik yük değerleri ile kalibrasyon sonucu hesaplanan hidrolik yük değerlerinin karşılaştırılması amacıyla her bir kuyu için elde edilen değerler Atilla (2002) tarafından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada gözlem sayısı fazla olan Susuz kuyusu için elde edilen grafik Şekil 7'de sunulmuştur. Bu grafikten de görüldüğü üzere, gözlenen hidrolik yük değerleri ve hesaplanan değerler arasında iyi bir uyum gözlenmektedir. Şekil 7'de gözlenen ve hesaplanan hidrolik yük dağılımlarının zamana göre değişimi ile gözlenen hidrolik yük değerleri ve hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki ilişki de görülmektedir. Grafikten elde edilen sonuçlara göre, yeraltı suyu kullanımına bağlı olarak hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri birbirine uyumlu olarak zamanla azalmaktadır. Susuz kuyusunda gözlenen ve hesaplanan değerler arasındaki maksimum fark 2.8 m'dir. Bu değerlendirme göz önüne alındığında, gözlenen ve hesaplanan değerlere bağlı olarak model kalibrasyonu iyi bir sonuç vermiştir.

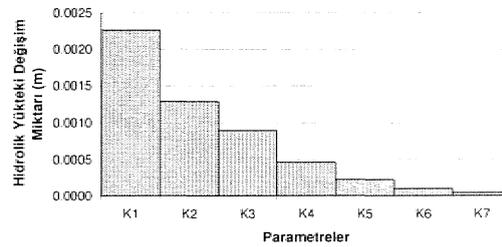


Şekil 7. Susuz kuyusunda model kalibrasyonu sonucunda gözlenen ve hesaplanan hidrolik yükler (m) arasındaki ilişkiler

Figure 7. The relation between observed and calculated hydraulic heads in Susuz well (m)

### Hassasiyet analizi

Bu çalışmada yapılan hassasiyet analizinde, hassasiyet katsayısı, model parametrelerinde yapılacak bir değişikliğin hidrolik yük değerinde oluşturacağı değişimi temsil etmektedir. Afyon Ovası yeraltı suyu akım modeli kalibrasyonu yapıldıktan sonra sınırlardan olan beslenme değerleri {Q1, Q2, Q3 (Bkz. Şekil 5)} ile her bir model katmanındaki hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7) kullanılarak MODFLOW-2000 model programı altında hassasiyet analizi yapılmıştır. Yapılan bu analiz sonucu hesaplanan maksimum hassasiyet katsayısı değerleri Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Hassasiyet, katsayıları.

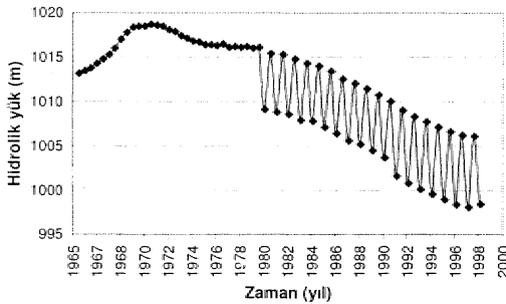
Figure 8. Sensitivity coefficients

Şekil 8 incelendiğinde, K5, K6, K7 parametreleri ndeki değişimin model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi olmadığı, diğer bir deyişle model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerlerimin bu parametrelere göre hassas olmadığı belirlenmiştir. Aynı şekilde hidrolik yük değerleri, Q1, Q2 ve Q3 parametrelerine göre hiç hassasiyet göstermediğinden grafikte yer almamaktadır. Model

sonuçlarının K1, K2, K3 ve K4 parametrelerine göre çok küçük bir oranda hassasiyet göstermesi ise bu parametrelerin bulunduğu model katmanlarında kuyularla yoğun bir çekimin olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu hassasiyetin derecesi sonuçlarda çok önemli bir etkiye sahip olmayacaktır.

#### Benzeşim, sonuçları

Afyon Ovası yeraltısuyu akım modelinde kalibrasyon analizi yapıldıktan sonra elde edilen hidrolik yük dağılımına bağlı olarak kuyularla çekimin yoğun olduğu ve civarın orta-doğu kesiminde yer alan Kumataş (Erenler) çevresi için çizilen hidrolik yük-zaman grafiği Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'dan da görüldüğü gibi yaklaşık olarak 1978 yılından sonra Kumataş çevresinde kuyularla çekimin artmasına bağlı olarak zamanla hidrolik yük değerleri azalmaya başlamıştır. Bu yıldan sonra grafikte görülen dalgalanma Kumataş ve çevresinde kuyuların çalıştığı ve çalışmadığı dönemlerde meydana gelen hidrolik yük değerlerindeki değişimi göstermektedir..

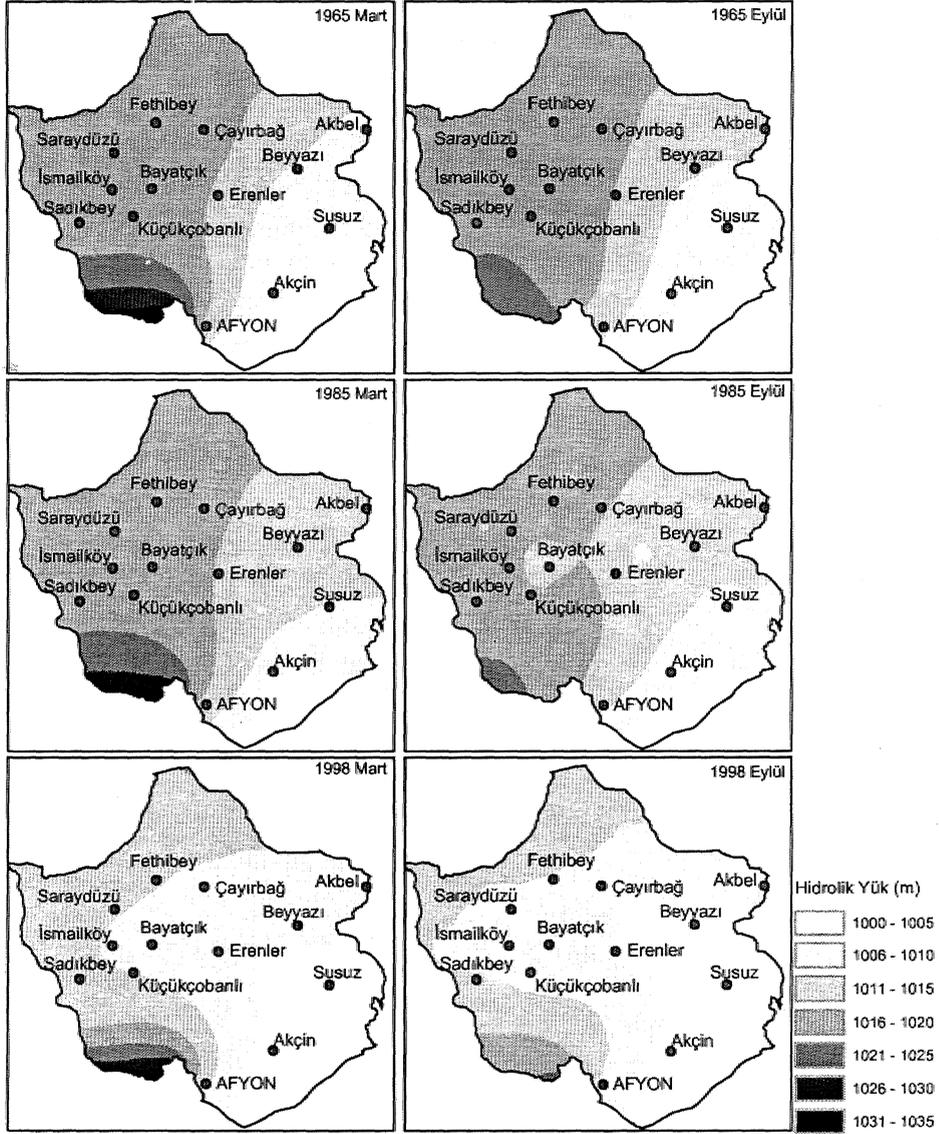


Şekil 9. Kumataş çevresinde hesaplanan hidrolik yük değerleri

Figure 9.. Calculated hydraulic head values of Kumartaş region

Hidrolik yük değerlerinde çekime ve zamana bağlı olarak meydana gelen değişim dikkate alınarak ova geneli için değişik zaman adımlarında model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri Şekil 10'da verilmektedir. Bu değerler 1965, 1985 ve 1998 yılları Mart ve Eylül ayı sonları için model tarafından hesaplanan değerlerdir..

Kuyularla çekimin sona erdiği sulama mevsimi sonları için (Eylül ayı sonu) çizilen grafikler incelendiğinde; ova genelinde hidrolik yük dağılımının zamana bağlı olarak ovanın KB kısmından GD kısmına doğru azaldığı görülmektedir. 1965 yılı sulama mevsimi sonunda ovanın K ve orta bölgelelerinde model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri 1020-1015 m arasında değişmekte iken bu değerler ovanın orta ve D kısmında yer alan Erenler (Kumataş), Bey yazı ve Akbel çevresinde 1015-1010 m arasına,, Susuz ve Akçin çevrelerinde 1010-1005 m arasına ve ova G'inde ise 1000 m'lere düşmektedir., 1985 yılı Eylül ayı sonunda, kuyularla yapılan yoğun çekime bağlı olarak özellikle ova ortasında yer alan Bayatçık ve Erenler çevresinde bir düşüm olduğu gözlenmektedir. 1998 yılı Eylül ayı sonunda, ise artan kuyu sayısı ve çekime bağlı olarak ova geneli için hidrolik yük değerlerinin Beyyazı, Susuz ve Akçin çevrelerinde 1005-1000 m, ovanın orta kesimlerinde 1010-1005 m, B'sında ise 1020-1015 m'ler arasında değiştiği gözlenmektedir..



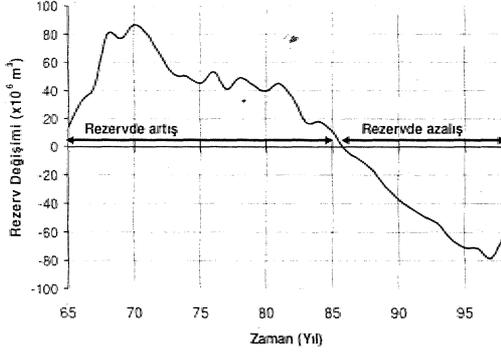
Şekil. 10. Model tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri (1965, 1985, 1998 yılları için)

Figure 10. Calculated hydraulic head values for the years 1965, 1985, 1998

İnceleme alanının B, GB'sında yüzeylenen Pliyosen yaşlı volkanik kayalar en önemli beslenme alanını oluşturmaktadırlar.. Bu sınırdan olan beslenme etkisi grafiklerde belirgin bir şekilde gözlenmekte ve

zamana bağlı olarak değişmektedir. Afyon Ovası yeraltısuyu akım modeli sonuçlarına göre 1965-1998 yılları arasında ovada yeraltı suyu rezervindeki değişim incelenmiş ('Şekil 11) ve ovada yeraltı suyu rezervindeki

azalma. 1998 yılı sonu için 80 milyon m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11. Afyon Ovası yeraltı suyu rezervinin zamana bağlı değişimi (1965-1998)

Figure 11« Temporal variation of groundwater reserve in the Afyon Plain (1965-1993)

#### Sonuçlar ve Tartışmalar

Yeraltı suyu kullanımının artan yoğunlukta gerçekleştiği Afyon Ovası'nda soğuk yeraltı suyu sisteminde meydana gelecek etkilerin öngörülmesi amacı ile ovadaki yeraltı suyu akımının MODFLOW matematiksel modeli ile zamana ve konuma bağlı gelişimi belirlenmiştir.

Model sınır koşulları için ovanın B, GB kesiminde yer alan ve yüksek bir topografyaya sahip olan Pliyosen yaşlı volkanik kayalardan olan beslenme değerleri ile ovanın K ve KD sınırında geniş yüzey alanına sahip Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden süzülen sular aracılığı ile olan beslenme değerleri mevsimlere bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden "değişken akım sınırı" olarak modele aktarılmıştır.

Ovanın kuzey sınırından iç akışla meydana gelen, yeraltı suyu beslenimi "değişken yük sınırı", ovanın G, GD sınırında meydana gelen boşalım "sabit yük sınırı" olarak verilmiştir. Ovanın GD'sunda yer alan Pliyosenin marnlı ve killi kireçtaşı seviyelerinden ve ova yüzeyini oluşturan alüvyon malzemenin ise bir beslenme gerçekleşmemektedir. Başlangıç koşulları için, yeraltı suyu işletmeciliğinin öncesindeki su seviyelerinin tahmin edilmesi amacı ile model, çekim olmaksızın dengeli akım koşullarında çalıştırılmıştır. Kuyu çekimleri, ovada açılmış tüm kuyuların filtrelendiği derinliklere uygun olarak ilgili model katmanlarından yapılmıştır. Model zaman birimi gün olarak seçilmiştir. 1965-1998 yılları içerisinde yağışlı ve kurak dönemler altışar aylık (180 gün) stres periyodları olarak belirlenmiştir. Her stres periyodu içerisinde toplam kuyu çekimleri ve beslenme değerleri her gün için eşit olarak modele aktarılmıştır.

Bu çalışmada akım süreçlerinin kalibrasyonunda hidrolik iletkenlik katsayıları evrik olarak kalibre edilmiştir. Ova alanının değişik kesimlerinde yer alan gözlem kuyularında gözlenen yük değerleri ile hesaplanan, değerler arasında oldukça iyi bir uyum yakalanmıştır. Kalibrasyonun kalitesini kontrol eden bir diğer kriter ise parametre hassasiyetidir. Modelin parametrelere karşı çok duyarlı olmaması gerekir. Afyon Ovası'nda çekimin en yoğun olduğu model katmanında hidrolik iletkenlik katsayısına olan hassasiyet literatür ve standartlarda (ASTM, 1999) verilen değerlere göre çok küçük çıkmıştır. Bu durum, akım modelinin

sistem hakkındaki gözlem ve ölçülmüş verilere başarılı bir uyum sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte,, bu alana ait kavramsal modelin farklı bir tasarımının da başarılı bir kalibrasyon sağlayabileceği unutulmamalıdır.

Ova geneli için değişik yıllara ait model tarafından hesaplanan hidrolik yük değişimi grafikleri çizilmiş ve hidrolik yük değerlerinin zamanla kuyularla çekimin artmasına bağlı olarak 1998 yılı sonunda ova K'inde 1010 m'lere, ova Cinde özellikle çekimin yoğun olduğu bölgelerde ise 1000 m'lere düştüğü belirlenmiştir. Ovada yeraltı suyu rezervindeki azalma 1998 yılı sonu için 80 milyon m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.

Bu model çalışmasının sonuçları, gelecekte soğuk su akiferinden daha fazla yeraltı suyu çekilmesi halinde, termal yeraltı suyu sisteminden kaynaklanan kalite bozulmalarının çok daha fazla olabileceğini göstermektedir. Ancak bu durum, sıcak su kullanımının ve beslenme şartlarının bugünkü düzeyinde olması halinde mümkün olabilir. Günümüzdeki durum göz önüne alındığında,, kalite bozulmaları ve piyezometrik seviyedeki düşümlerin önlenmesi için tatlı yeraltı suyu kullanımının doğal hidrolik denge koşullarını bozmayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir;. Ova soğuk su akiferinin günümüzdeki durumunun belirlendiği bu çalışma,, bölgede gelecekte planlanan yeraltı suyu işletim projelerinin, akifer üzerinde yaratacağı etkilerin belirlenmesine bir temel oluşturacaktır.

#### Katkı Belirtme

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi - Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) ile Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, arasında yürütülen. "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltı suyu Akım Modeli." Projesine paralel olarak yürütülmüştür. Yazar, adı geçen kurum, ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür eder.

#### Değinen. Belgeler

- Anderson, M., Woessner, W.W., 1991. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Inc., Sao Diego, 381 p.,
- Argus Interware, Inc., 1997. User's Guide Argus ONE™, Argus Open Numerical Environments - A GIS Modeling System,, Version. 4.0. Jerico, NY, Argus Holdings, Limited, 506 p.,
- ASTM, 1999. ASTM Standards on Determining Subsurface Hydraulic Properties and Ground Water Modeling, ASTM 0-18 on Soil and Rock (2<sup>nd</sup> Edition). ISBN 0-8031-2717-0, 320 p.
- Atilla, A. Ö., 2002,. Afyon Ovasının yeraltı suyu kütle taşıma modeli. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,, Doktora Tezi,, 78 s (yayımlanmamış).
- Aydar, E., Bayhan, H./ve Zimitoğlu, O., 1996. Afyon stratovolkanının volkanolojik. ve petrolojik gelişiminin incelenmesi,. Yerbilimleri, 18,87-107.
- Erkan, Y., Bayhan, H., Toliuoğlu, Ü. ve Aydar, E., 1996.. Afyon yöresi metamorfik ve

volkanik kayaçlarının jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelemesi., TÜBİTAK, YBAG/0044-DPT Projesi Raporu, 210 s (yayımlanmamış)..

- .....
- Harbaugh, A.W., and McDonald, M.G., 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model.. U.S. Geological Survey Open-File Report, 96-485, 56 p.,
- Harbaugh,, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald,, M.G., 2000.. MODFLOW-2000,, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process.. U.S. Geological Survey Open-File Report,, 00-92, i 21 p..
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W., 1988.. A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, 586 p.
- Metin, S., Genç, Ş, ve Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının, jeolojisi., MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No: 8103, Ankara (yayımlanmamış).
- Metin, S., Genç, Ş., Bulut, V., Ölmez, M., Kılıç, L, Akıncı, A., Umut, M- ve Kurt, Z., 1988.. Bolvadin (Afyon.) - Yunak (Konya) dolayının jeolojisi.. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No: 8522, Ankara (yayımlanmamış).
- Spitz, K., Moreno, J., 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport

Modeling.. John Wiley & Sons,, Inc.,, New York,, 461 p.

- Thomas,, H.A., 1981, Improved methods for National Water Assessment Report Contract No: WR15249270, US Water Resources Council., Washington.
- Tezcan, L., Meriç,, B,T,, Dođdu,, N., Akan, B., Atilla, A. Ö. ve Kurttaş, T., 2002. Akarçay Havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli., Final Raporu, Hacettepe Ün i versitesi - Ul uslararası Karst Su Kaynakları Uygulanıı ve Araştırma Merkezi (ÜKAM)-Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara,, 339 s (yayımlanmamış).