

Sonlu Elemanlar Modelinin Erzin Ovası (Hatay) Serbest Âkiferine Uygulaması

Application of a Finite Element Model to the Un confined Aquifer of the Erzin Plain (Hatay)

VEDAT DOYURAN, ODTÜ, Jeoloji 'Mühendisliği Bölümü, Ankara
FONGSAWARD SUVAGONDHA, Chiang Mai Üniversitesi, Tayland
NURKAN KARAHANOĞLU, ODTÜ, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZ: Bu yazıda sonlu elemanlar modelinin Erzin ovası serbest âkiferine uygulanışı tartışılmakta ve GRWM bilgisayar programının algoritması tanıtılmaktadır. Duyarlılık analizleri ağ boyutunu, hidrolik iletkenliği, depolama katsayısını, sınır koşullarını ve beslenme-boşalım miktarlarını içermektedir. Model kalibrasyonu 1978 sulama mevsimi için yapılmıştır. Modelin saha koşulları için gerçekleşmesi 1978-1982 dönemini kapsamaktadır. Önerilen model akiferin davranışını başarılı bir şekilde yansıtmaktadır.

ABSTRACT : In this paper application of a finite element model to the unconfined aquifer of the Erzin plain is discussed and the algorithm of the computer program known as GRWM is described. The sensitivity analyses include the mesh size, hydraulic conductivity, storage coefficient, boundary conditions, and recharge-discharge rates. Model calibration is achieved for the irrigation season of 1978. Verification of the model is accomplished for the period 1978 thru 1982. The proposed model simulates the behaviour of the aquifer successfully.

GİRİŞ

Yeraltısuyu işletmesinde en önemli husus, akiferin hidrolik dengesini korumak koşulu ile, verimin en üst düzeyde tutulmasıdır. Yeraltısuyu havzalarında yürütülen ayrıntılı hidrojeolojik incelemeler akiferin gerçek potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Beslenme ve boşalım arasındaki dengenin korunması, seçilecek işletme stratejisinin temelini oluşturur. Endüstriyel, tarımsal ya da içme suyu amaçlı kullanımların özellikle yeraltısuyu kaynaklarına bağımlı olduğu yerlerde bu denge daha da önem kazanmaktadır.

Akiferin üretimden (pompaj) etkileşimini belirlemede seçilecek en gerçekçi yol, yeraltısı düzeyi değişmelerinin sürekli olarak izlenmesi ve bunların yorumlanmasıdır. Yeraltısuyu havzasının dış etmenlerden etkileşimini yansıtabilecek herhangi bir sistem olarak tanımlanan model, özellikle karmaşık hidrolojik ortamların değerlendirilmesinde en etkili araçtır.

Bu incelemede, İskenderun körfezinin kuzeydoğusunda yer alan Erzin ovası serbest akiferi için geliştirilen sonlu eleman modeli kısaca tanıtılmakta ve modelin sahaya uygulanışı ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Çeşitli hidrolojik veriler model çalışmalarında temel girdileri oluşturmakta ve modelin, güvenilirliği, ise benzeşim süresinin uzunluğuna bağımlı kalmaktadır. ;

Erzin ovasının hidrojeolojik özellikleri Doyuran (1982 ve 1983) de ayrıntılı olarak verilmektedir. Tekrardan kaçınmak amacı ile bu yazıda ovanın jeolojik ve hidrolojik özelliklerine değinilmemiştir. Bu hususta ayrıntılı bilgiler ilgili kaynaklardan sağlanabilir.

MODEL

Serbest akiferlerde suya doygun zonun kalınlığı yeraltısı düzeyi ile değişmekte ve bu nedenle gözenekli ortamlardaki akışı tanımlayan denklemler doğrusal özelliklerini kaybetmektedir. Basıncı akiferlerde sabit girdi olarak kullanılan transmissivite değerleri serbest akiferlerde çözümü amaçlanan yeraltısı düzeyine bağımlı duruma gelmektedir. Bu ise sayısal çözüm aşamasında, sabit girdi olarak seçilen transmissivite değerlerinin, çözümden elde edilen yeraltısı düzeyine bağımlı olarak düzenlenmesini gerektirmektedir.

Erzin ovası serbest akiferi için önerilen modelde, Dupuit varsayımları kullanılarak hidrolik iletkenlik cinsinden ifade edilen doğrusal olmayan yeraltısuyu akış denklemi oluşturulmuştur. Yeraltısuyu akışının yatay ve hidrolik eğimin serbest yüzeyin eğimine eşit olduğu kabulü ile, akiferin çok küçük bir dilimi için yürütülen süreklilik analizi sonucunda Darcy kanunu da kullanılarak aşağıdaki kısmî diferansiyel denklem elde edilmiştir.

$$\frac{K}{2} \left(\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R(x,y,t) \quad (1)$$

Burada h , hidrolik yükü; K , hidrolik iletkenliği; S , depolama katsayısını ve R ise akifere üst yüzeyden süzülme ile beslenmeyi göstermektedir. İki boyutlu ortamda ve dengesiz koşullardaki yeraltısuyu akışını kontrol eden bu denklem, çözüm kolaylığı sağlamak amacı ile ($V = h^2$) ilişkisi kullanılarak

$$\frac{K}{2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = \frac{S}{2\sqrt{V}} \frac{\partial V}{\partial t} - R(x,y,t) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Serbest akiferde yeraltısuyu akışını kontrol eden (2) nolu denklem, değişik beslenme ve boşalım koşullarında akiferdeki yeraltısı düzeyi değişimlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Benzeşim çalışması olarak da bilinen bu yöntem, akış denkleminin zaman ve yer boyutuna göre çözülmesini gerektirir. Analitik çözümlerin yetersiz kaldığı bu tür denklemlerde sayısal yaklaşım genellikle tek seçenektir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak (2) nolu denklem, V bilinmeyen x,y ve t boyutunda değişimi çözülmüştür.

Sonlu elemanlar yöntemi, model denklemini olarak bilinen (2) nolu kısmi diferansiyel denklemin integral denklemine dönüştürülmesini gerektirir (Zienkiewicz, 1977). Bu aşamada, çözüm ortamındaki ağırlıklı farkların integralini en düşük seviyeye indirmek için Galerkin yöntemi kullanılmıştır. Böylece aşağıdaki integral denklemini elde edilmiştir:

$$\int_{\Omega} N_j \left\{ \frac{K}{2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{S}{2\sqrt{V}} \frac{\partial V}{\partial t} + R \right\} d\Omega = 0 \quad (3)$$

Bu denklemde (f_i) çözüm ortamının alanını, N_j ise elemanlar için kullanılan şekil fonksiyonlarını göstermektedir. Herbir eleman için yazılan integral denklemleri, bağımlı değişkenin elemanların düğüm noktalarındaki bilinmeyenler cinsinden ifade edilmeyle ve Green teoremi kullanılarak

$$[G] \{V\} + [P] \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} \right\} = \{F\} \quad (4)$$

matris denklemine dönüştürülmektedir. Bağımlı değişkenin kendisi ve zaman türevi cinsinden yazılan bu denklem sisteminde $[G]$ ve $[P]$ matrisleri ile $\{F\}$ vektörünün birim elemanları

$$G_{ii} = \int_{\Omega_e} \frac{K}{2} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) d\Omega \quad (5)$$

$$P_{ii} = \int_{\Omega_e} \frac{S}{2\sqrt{V}} N_j d\Omega \quad (6)$$

$$F_i = \int_{\Omega_e} N_i R d\Omega \quad (7)$$

integral ifadeleri kullanılarak hesaplanmaktadır. (6) nolu ifade ile verilen $[P]$ matrisi sabit olmayıp, bilinmeyen bağımlı değişken V 'yi içermektedir. Bu da (3) nolu denklemin doğrusal olmayan (nonlinear) bir denklem olmasından kaynaklanmaktadır. V 'ye sabit bir değer vererek denklemin doğrusallaştırıldığını varsayalım. Bu sabit değer ne olduğu daha sonra açıklanacaktır. Herbir eleman için yazılması gereken (4) nolu denklem sisteminde, eleman düğüm noktalarındaki (V) değeri ile onun zaman türevi bilinmeyenler olarak gözükmektedir. Ancak sayısal çözümün gerçekleştirilmesi için $OV/3t$ teriminin (V) cinsinden ifade edilmesi gerekir. Bu amaçla Wilson ve Clough (1962; Aral, 1974'de) yöntemi uygulanarak, zaman türevi (V) bilinmeyeninin (t) ve ($t-\Delta t$) deki değerleri ile ifade edilmiştir. Bu uygulama sonucu (4) nolu denklem sistemi, sadece (V) nin bilinmeyen olarak kaldığı aşağıdaki şekle dönüştürülmüştür:

$$[G]^* \{V\}^* = \{F\}^* \quad (8)$$

Bu denklem sisteminde $[G]^*$ matrisi,

$$[G]^* = [P] \frac{2}{\Delta t} + [G] \quad (9)$$

şeklinde; $\{F\}^*$ vektörü ise,

$$\{F\}^* = \{F\} + \frac{2}{\Delta t} [P] \{V\}_{t-\Delta t} \quad (10)$$

eşitliği kullanılarak oluşturulmaktadır. Böylece elemanlar için saptanan $[G]$ ve $[P]$ matrisi ile $\{F\}$ vektörü kullanılarak (8) nolu denklem sistemi sadece (V)^{*} bilinmeyeni için çözülebilecektir. Buradan elde edilen çözüm değerleri aşağıdaki eşitlikte yerine konularak,

$$\{V\}_t = 2 \{V\}^* - \{V\}_{t-\Delta t} \quad (11)$$

düğüm noktalarındaki bilinmeyenler yeni zaman değerinde hesaplanmaktadır. Buradan anlaşılacağı gibi bu işlemler yapılırken her bir zaman seviyesinde $[P]$ matrisinin bilinmesi gerekmektedir. $[P]$ matrisi ise bilinmeyen V 'yi ihtiva etmektedir. Bu nedenle $[P]$ hesaplanırken bir önceki zaman seviyesinde hesaplanan V değerleri kullanılmıştır. Bu nokta bilgisayar programında PMODIF Altprogramında biraz daha açıklığa kavuşacaktır.

GRWM BİLGİSAYAR PROGRAMI

Eleman seviyesinde değerlendirilen (5), (6) ve (7) nolu integral denklemleri kullanılarak $[G]$ ve $[P]$ eleman matrisleri ile $\{F\}$ eleman vektörü oluşturulmaktadır. Bu matris ve vektörler daha sonra eleman bağlantı ilişkileri kullanılarak sahadaki tüm düğüm noktalarının içerildiği genel matris ve genel yük vek-

törü içerisine yerleştirilmektedir. Sımr koşullarının bu genel sisteme işlenmesinden sonra cebirsel denklem sistemi çözülerek düğüm noktalarındaki bilinmeyenler elde edilmektedir.

Çok sayıda işlem gerektiren bu yöntemin uygulanabilmesi ancak bilgisayar yardımı ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle Erzin ovası için geliştirilen yeraltısuyu modelinde kullanılmak üzere bir bilgisayar programı (GRWM) geliştirilmiştir (Suvagondha, 1985). Bunun için Aral (1974) tarafından hazırlanan FEMAC programı Erzin modeli için gerekli düzenlemelerle GRWM şekline dönüştürülmüştür.

Hazırlanan bilgisayar programının çeşitli fiziksel parametrelere tepkisini araştırmak amacı ile duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bu analizler için ağ boyutu, hidrolik iletkenlik, depolama katsayısı ve beslenme-boşalm değerleri başlıca değişkenler olarak seçilmiştir.

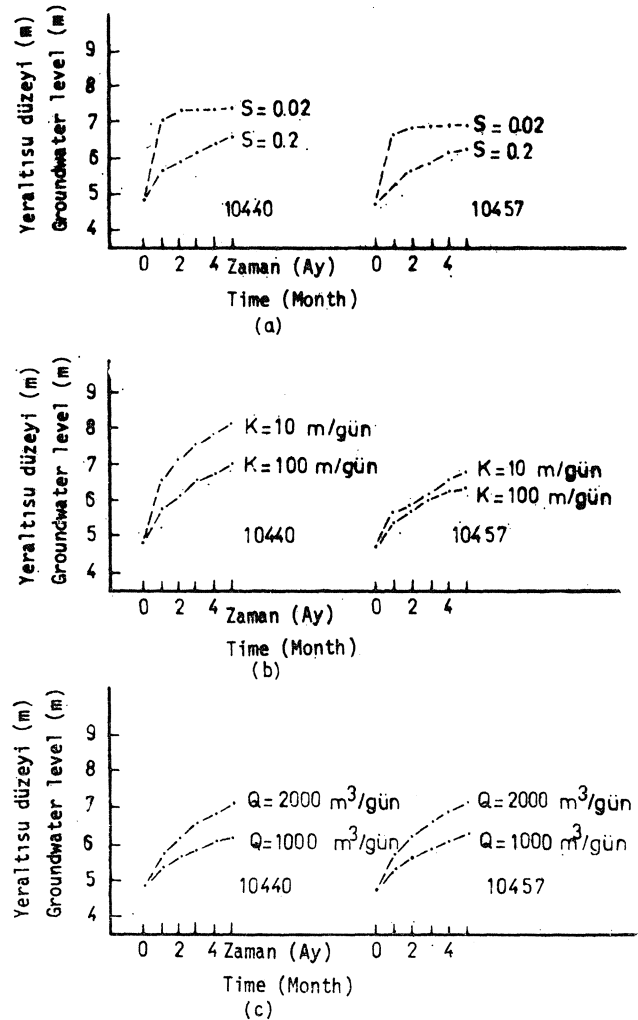
Öncelikle ağ boyutunun sonuçlar üzerine etkisi araştırılmış ve bu amaçla iki değişik ağ boyutu denenmiştir. Programlama gereği olarak her bir elemana ait ortalama hidrolik yük değerlerinin saptanması nedeniyle küçük eleman boyutlarına sahip bir ağın daha sağlıklı, sonuç vereceği açıktır. Bu nedenle ilk olarak 1025 eleman ve 563 düğüm noktasından oluşturulan sonlu eleman ağı ile çözüm yapılmıştır. Bu çalışmadan olumlu sonuç alınmasına karşın gerek eleman ve gerekse düğüm nokta sayısının çok oluşu, bilgisayar işlem süresini fazlaca artırmıştır. Örneğin, bu ağ kullanılarak çalıştırılan programda 150 günlük benzeşim için 1335 saniyelik bilgisayar zamanı kullanılmıştır. Bu nedenle ikinci aşamada daha az sayıda düğüm noktası içeren bir ağ oluşturulmuştur. Toplam 258 eleman ve 157 düğüm noktası içeren bu ağın benzeşim çalışmaları için yeterli duyarlılığı sağladığı anlaşılmıştır. İşlem süresinden sağlanan ekonomi nedeniyle ikinci seçenek benimsenmiştir.

GRWM bilgisayar programının değişik hidrolik iletkenlik, depolama katsayısı ve beslenme değerlerine tepkisini belirlemek amacı ile yürütülen duyarlılık analiz sonuçları Şekil 1 de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bu parametrelerde yapılan herhangi bir değişiklik programda gerektiği şekilde algılanmakta ve sonuçlandırılmaktadır.

FORTTRAN IV ile hazırlanan GRWM bilgisayar programı ana program ve yedi alt programdan oluşmaktadır. Şekil 2, ana programın akış şemasını ve çağrılan altprogramları göstermektedir.

Program, modele girdi olarak verilen düğüm nokta koordinatları; eleman bağlantıları; eleman hidrolik iletkenlik ve depolama katsayıları; sımr ve başlangıç koşulları ve beslenme/boşalm değerlerini okuyarak işleme başlamaktadır. Genel matrisi ve yük vektörünü sıfırladıktan sonra, eleman döngüsüne girmekte ve burada SET alt programını çağırarak her bir eleman için eksen değişikliğini gerçekleştirerek düğüm noktalarının yerel koordinatlarını saptamaktadır. Daha sonra ELEM altprogramı çağ-

olarak her bir eleman için [G] ve [P] matrisleri ile {F} vektörü oluşturulmaktadır. Bunların birleştirilme işlemi ana program içerisinde gerçekleştirildikten sonra, yukarıda açıklanan sayısal çözüm yöntemi kullanılarak en genel katsayı matrisi elde edilmektedir. BOUND altprogramı yardımı ile sımr koşulları bu genel denklem sistemine işlenerek cebirsel denklem sistemi çözüme hazırlanmaktadır. Bu aşamada DECOM altprogramı çağrılarak genel katsayı matrisi kullanılan cebirsel denklem çözüm yönteminin gerektirdiği şekle sokulmaktadır. Bundan sonra program zaman döngüsüne girmektedir. Burada PMODIF çağrılarak her bir zamanda (birinci zaman dilimi hariç) eleman [P] matrisi güncelleştirilerek genel [P] matrisine yerleştirilmektedir. Bu işlem için tekrar çağrılması gereken BOUND ve DECOM altprogramlarından sonra VEC çağrılarak genel [P] matrisinin bir önceki zaman çözüm vektörü ile çarpılması gerçek-

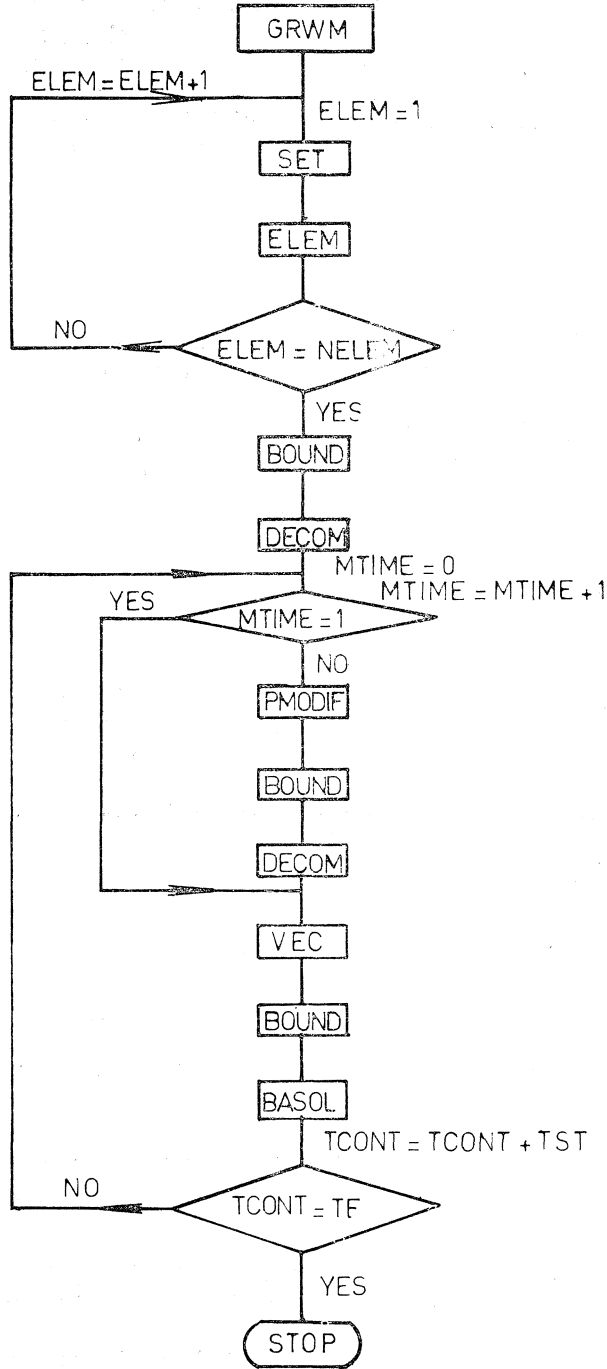


Şekil 1 : Model duyarlılık analizleri (a) depolama katsayısı; (b) hidrolik iletkenlik; (c) beslenme.

Figure 1 : Sensitivity analyses of the model: (a) storage coefficient; (b) hydraulic conductivity; (c) recharge rate.

leştirilmektedir. BOUND altprogramının çağrılarak genel yük vektörünün güncelleştirilmesinden sonra BASOL altprogramı kullanılarak çözüme ulaştırılmaktadır. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra programın akışı zaman döngüsünün başına yöneltilmekte ve böylece bu işlemler her bir zaman dilimi için tekrarlanmaktadır.

GRWM bilgisayar programında yer alan altprogramların temel işlevleri aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 2 : GRWM programı akış şeması.
Figure 2 : Flow chart of GRWM program.

SET Altprogramı :

Bu altprogram her bir eleman için eksen değişikliğini gerçekleştirerek elemanların düğüm noktaları için yerel koordinatları saptamaktadır.

ELEM Altprogramı :

ELEM altprogramı SET'de oluşturulan yerel koordinatları kullanarak çağrıldığı eleman için [G] ve [P] matrisleri ile eleman yük vektörünü {F} oluşturmaktadır. Bu matrisler ve vektör eleman döngüsünden çıktıktan sonra ana program içerisinde birleştirilmektedir.

BOUND Altprogramı :

Ana programda oluşturulan genel denklem sisteminin sınır koşullarının işlenmesi bu alt program kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca BOUND altprogramı genel yük vektörünün güncelleştirilmesini sağlamaktadır.

PMÖDIF Altprogramı :

Sayısal çözüm yöntemi oluşturulurken (6) nolu denklemde yer alan V' terimi bir önceki zaman (V) değerleri cinsinden ifade edilmiştir. Bu nedenle bu terimin zaman çözümü içerisindeki değişkenliği PMODIF altprogramı çağrılarak sağlanmaktadır. Bu iş için PMODIF, SET ve ELEM altprogramlarını çağırarak ve eleman [P] matrisini güncelleştirerek genel [P] matrisine yerleştirmektedir.

YEC Altprogramı :

Bu altprogram dikdörtgen bir şekilde yerleştirilen simetrik matris ile bir vektörün çarpım işlemini yapmaktadır.

DECOM Altprogramı :

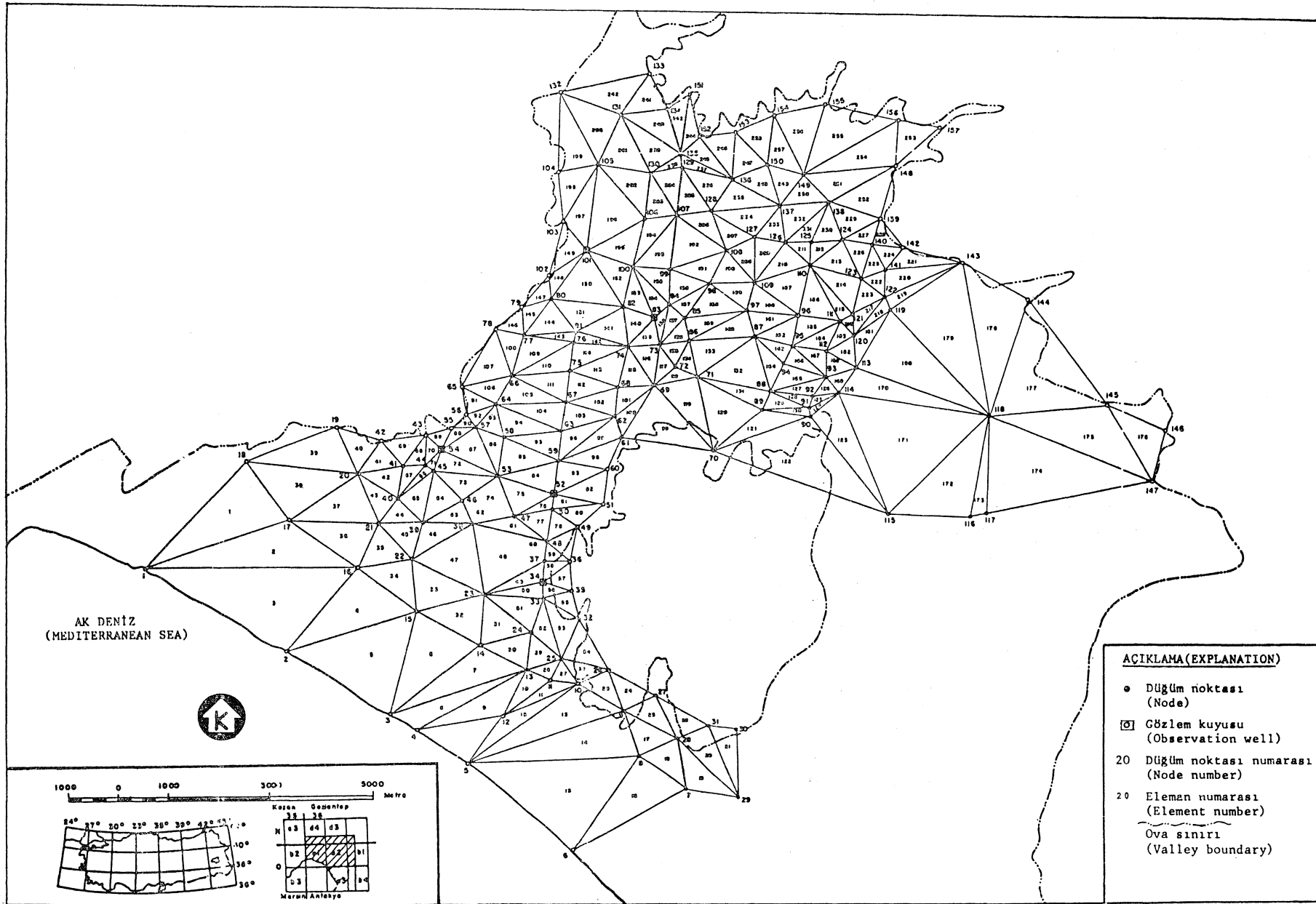
DECOM altprogramı Cholesky çözüm yönteminin gerektirdiği, dikdörtgen şekilde yerleştirilmiş simetrik bir matrisi alt ve üst üçgensel matrislere ayırmakta ve üst kısmı dikdörtgen şekilde saklamaktadır.

BASOL Altprogramı :

Sayısal çözüm aşamasında bahsedilen genel cebirsel denklem sisteminin çözümü BASOL altprogramı kullanılarak yapılmaktadır. Bu program DECOM ile oluşturulan değiştirilmiş matrisleri kullanmaktadır. Sonuçlar bir vektör şeklinde programda tutulmaktadır.

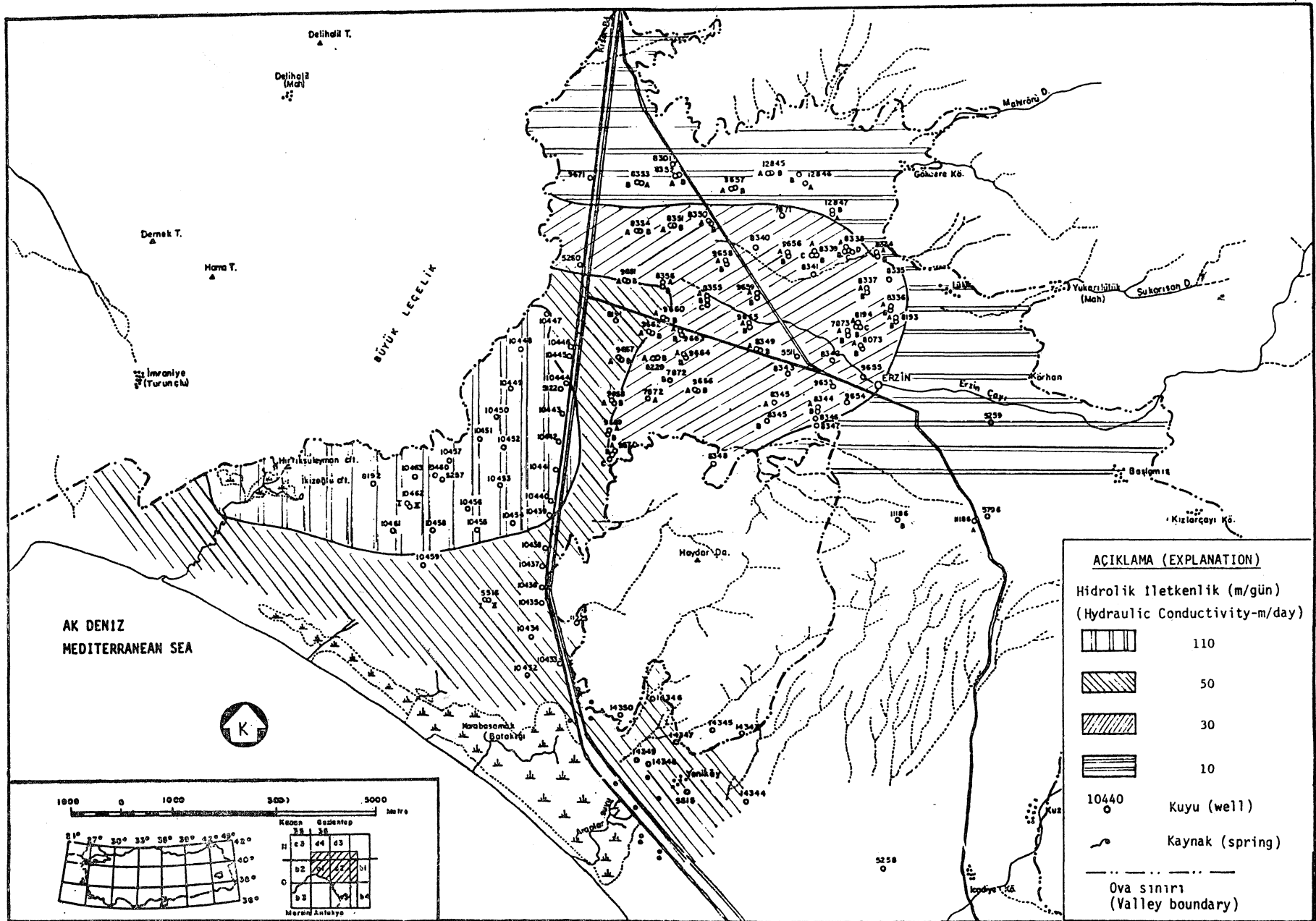
MODEL UYGULAMASI

Geliştirilen bilgisayar programı duyarlılık analizlerine olumlu tepki göstermiş, Erzin ovasına ait hidrojeolojik ve fiziksel parametreler temel girdiler olarak alınarak serbest akifere uyarlanmıştır. Model uygulaması için Erzin ovasındaki işletme kuyularının yoğunlaştığı sahayı içeren 110 km² lik bir alan seçilmiştir. Saha sonlu elemanlar yöntemine göre üçgen elemanlara bölünmüştür (Şekil 3).



Şekil 3 : Erzin ovası sonlu eleman ağı.

Figure 3 : Finite element mesh of the Erzin plain.



Şekil 4 : Hidrolik iletkenlik dağılım haritası.

Figure 4 : Map showing the distribution of hydraulic conductivity.

Oluşturulan sonlu eleman ağı 258 doğrusal (üç noktalı) üçgen eleman ve 157 düğüm noktasını içermektedir. Bu noktalarından 106 tanesi ovadaki işletme kuyularına, 51 tanesi ise işletme kuyuları dışında kalan alanın üçgen elemanlarına aittir.

Benzeşim çalışmaları ile modelin sahaya uygulanması, saha verilerinin bilgisayar programına girildiği olarak yerleştirilmesini gerektirmektedir. Gerçekten başarılı bir model uygulaması, ovadaki hidrojeolojik koşulların çok iyi bir şekilde modele aktarılması ile mümkün olabilmektedir. Elemanlarla ilgili bilgilerin, sınır ve başlangıç koşullarının girdi olarak verilmesi yanı sıra, model sonuçlarının saha gözlemleri ile denştirilmesi zorunludur. Bu nedenle Erzin ovasında beş adet gözlem kuyusu seçilmiştir. Gözlem kuyularının seçiminde uzun süreli yeraltı su düzeyi ölçümlerinin bulunması koşulu aranmıştır. Sonlu elemanlar ağında 34, 52, 54, 83 ve 101 nolu düğüm noktaları ile gösterilen bu kuyular sırası ile 10436, 10440, 10457, 9662B ve 5260 nolu su kuyularıdır.

Modelde Kullanılan Fiziksel Parametreler Hidrolik İletkenlik

Modelde kullanılan hidrolik iletkenlik (K) değeri Türkmen ve diğerleri (1974) tarafından derlenen transmissivite (T) değerlerinden türetilmiştir. Bunun için ($T = K.m$) ilişkisinden yararlanılmıştır. Burada (m), transmissivitenin hesaplandığı sırada akiferin suya doymun kalınlığının ortalamasıdır. Bu şekilde belirlenen hidrolik iletkenlik değerleri baz harita üzerine yerleştirilmiş ve bunların saha içindeki genel dağılımı incelenmiştir. Böylece Erzin ovasında dört bölge ayırılmıştır. Bu bölgeler için ortalama hidrolik iletkenlik değerleri 100 m/gün, 50 m/gün, 30 m/gün ve 10 m/gün olarak belirlenmiştir (Şekil 4).

Model uygulaması sırasında birim eleman için de değişmez kabul edilen hidrolik iletkenlik değerleri, sonlu elemanlar ağı ile hidrolik iletkenlik dağılım haritasının karşılaştırılması ile bulunmuştur. Böylece ağ içerisindeki tüm elemanlar için hidrolik iletkenlik değerleri elde edilmiştir.

Depolama Katsayısı

Depolama katsayısı akiferin birim hidrolik yük değişimine karşılık, birim yatay alana sahip bir akifer kolonunun depoladığı ya da dışarı verdiği su miktarı ile ifade edilir. Serbest akifer koşullarında özgül verim olarak bilinen depolama katsayısının değeri genelde 0.02 ile 0.3 arasında değişmektedir (Walton, 1970). Türkmen ve diğerleri (1974) tarafından hazırlanan raporda Erzin ovası serbest akiferi için sadece üç depolama katsayısı değeri bulunmaktadır. Bunlar 7873A, 8334B ve 8336B nolu kuyular için hesaplanmış olup sırası ile 0.028, 0.01 ve 0.2 olarak verilmiştir. Bu nedenle tüm akifer için ortalama değer olarak 0.2 seçilmiştir. Benzeşim çalışmaları sırasında seçilen bu değer akifer için yeterli olduğu görülmüştür.

Beslenme-Boşalım

Erzin ovasında beslenme yağıştan, akarsu yatağından, sulama kanallarından, tarımsal sulamadan süzülme ve yeraltından yanal akış ile gerçekleşmektedir. Boşalım ise işletme kuyuları, kaynaklar, buharlaşma-terleme ve yeraltından denize akış şeklindedir. Beslenme mevsimi olarak kabul edilen Kasım-Nisan döneminde yağıştan süzülme başlıca beslenme kaynağıdır. Sulama mevsiminde ise (Mayıs - Ekim) işletme kuyularından çekim en önemli boşalım kaynağıdır. Yeraltı su tablasının yeterince sığ olmayışı nedeniyle buharlaşma-terleme kayıpları pompaja kıyasla oldukça azdır. Yeraltından akifere, akiferden ise denize boşalım kabaca eşit kabul edilmiştir. Bu nedenle model uygulamaları sırasında başlıca beslenme kaynağı olarak yağıştan süzülme, boşalım için ise işletme kuyularından pompajlar dikkate alınmıştır.

Erzin ovasında yıllık ortalama yağış 995,2 mm dir (Doyuran, 1982). Beslenme döneminde bu yağışın % 25 inin akifere süzüldüğü kabulü ile yağıştan beslenme 41 mm/ay olarak saptanmıştır. Bu değer tüm akifere dağıtılarak herbir düğüm noktası için 1000 m³/gün elde edilmiş ve böylece bütün akifer için 157 000 m³/günlük bir beslenme hesaplanmıştır.

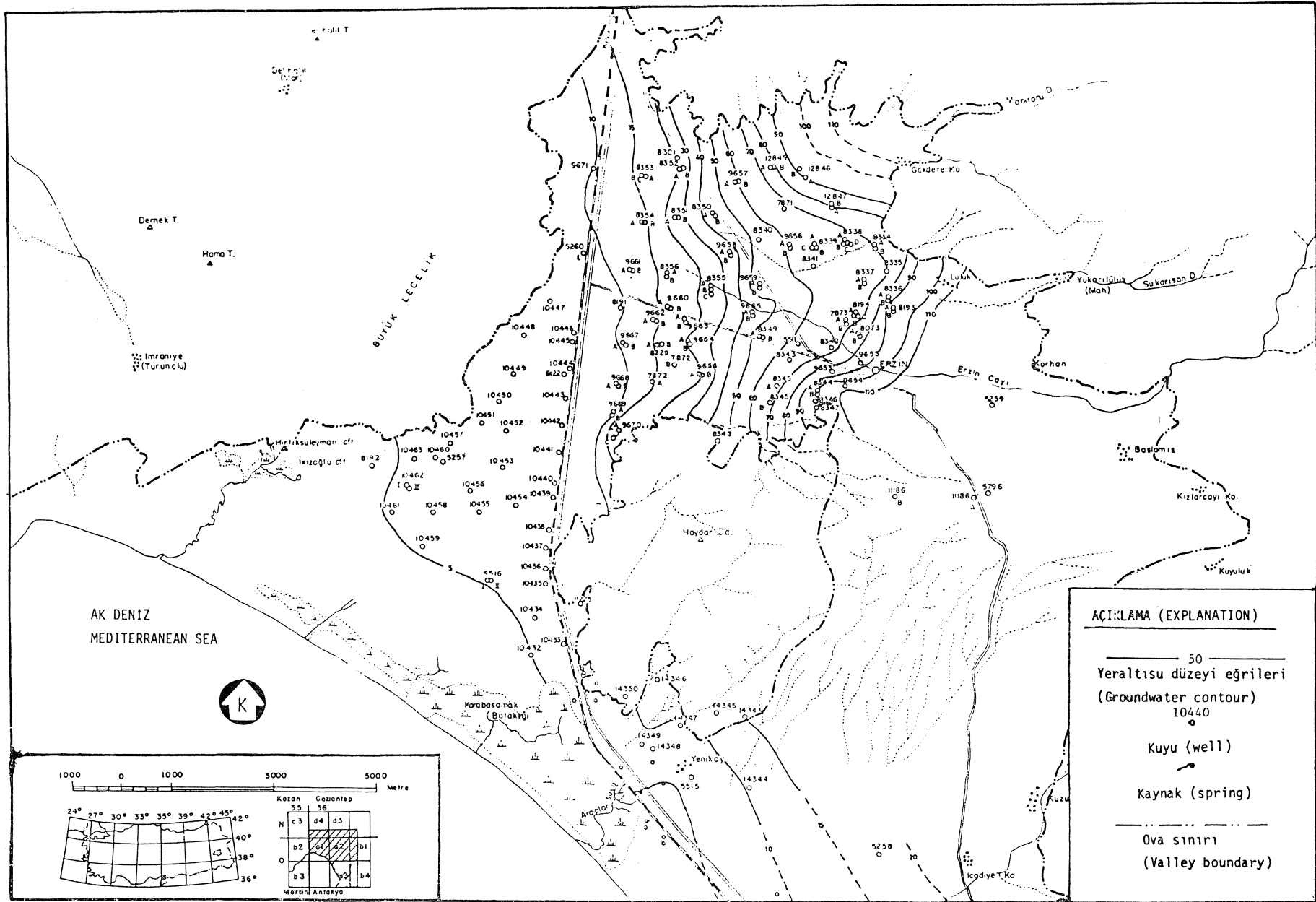
Boşalım değerleri hesaplanırken Erzin ovasındaki işletme kuyuları için önerilen ortalama çekim değeri 60 lt/sn (Türkmen ve diğerleri, 1974) esas alınmıştır. Sulama döneminde işletme kuyularının günde ortalama 8 saat çalıştığı göz önüne alınarak herbir düğüm noktası için 1800 m³/gün lük bir boşalım değeri bulunmuştur. Ancak modelleme aşamasında bu değer yuvarlatılarak 2000 m³/gün değeri programda girdi olarak kullanılmıştır. Ovada 78 kuyudan aktif olarak pompaj yapılmaktadır. Bu nedenle modellenen alan için 156 000 m³ lük boşalım değeri hesaplanmıştır.

Başlangıç Değerleri ve Sınır Koşulları

Modelde girdi olarak verilen başlangıç, yeraltı su düzeyi değerleri, Dooyuran (1983)'m 1978 Mayıs ayı ölçümlerini esas alarak Erzin ovası için hazırladığı yeraltı su tablası haritasından (Şekil 5) alınmıştır.

Sınır koşulları, akifer sınırını beş ayrı parçaya ayırarak incelenmiştir. Bunlar sırası ile güneybatı (6 ile 1 nolu düğüm noktaları arası), kuzeybatı (1 ile 133 nolu noktalar arası), kuzeydoğu (133 ile 157 nolu noktalar arası), güney (147 ile 61 noktaları arası) ve doğu (157 ile 147 ve 61 ile 6 nolu noktalar arası) parçaları olarak belirlenmiştir.

1978 sulama mevsimi için gerçekleştirilen model kalibrasyonu aşamasında Dirichlet sınır koşulu seçilmiş ve böylece sınır düğüm noktalarında sabit hidrolik yük kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesi aşamasında ise, kuzeybatı sınırının bir kısmı ile (65-19 noktalar arası) doğu sınırın 61-6 noktalar arasında Neumann sınır koşulu seçilmiştir. Böylece bu kısımlarda geçirimsiz sınır koşulu alınarak benzeşim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5 : Mayıs 1978 yeraltısı tablası haritası.

Figure 5 : Groundwater contour map for May 1978.

Akiferin kuzeydoğu sınırı (133-157 arası) ile doğu sınırı (157-147 arası) hidrojeolojik verilerin ışığı altında geçirimsiz olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu sınırlar boyunca gözlenen birikinti koni çökeltileri genelde çok geçirimli olup ovaya ulaşan akarsular sularım bu bölgede kaybetmektedirler. Bu nedenle, geçirimsiz sınır koşulu (Neumann sınır koşulu) yerine, bu sınırlar için Dirichlet sınır koşulu kullanılmıştır. Böylece bu sınırlar boyunca düğüm noktalarına sabit hidrolik yük değerleri verilerek akarsulardan süzülme ile beslenme modellenmiştir.

147 ile 61 nolu düğüm noktaları arasında yeralan sınır boyunca, akiferin güneye doğru devam etmesine rağmen, Dirichlet sınır koşulu kullanılmıştır. Bu Kesimde Şekil 5'den görüleceği gibi yeraltısuyu akış yönü sınıra paraleldir. Bu nedenle, gerçek sınır koşullarının sabit yük koşulu ile modellenmesi daha gerçekçi olmuştur .

Doğu sınırında da (61 ve 6 nolu noktalar arası) güney sınırında gözlenen koşullar yeralmaktadır. Burada tek farklılık sınırın genel yeraltısı akım yönüne dik olmasıdır. Böyle bir durumda bu sınırdan yeraltısuyu beslenimi beklenmesine rağmen sınıra yakın bölgede yeralan Yeniköy kooperatif kuyularından fazla miktarda su çekilmekte; bu nedenle yeraltısuyu eş düzey eğrileri güneye doğru kıvrılmaktadır. Böylelikle Yeniköy kooperatif kuyularının kuzeybatısında bir yeraltısı bölüm çizgisi oluşmuştur. Bu nedenle sadece bu bölgeye ait olmak üzere 61 ve 6 numaralı noktalar arasında yanıl akış beklenmemektedir. Bunun için bu kesimde geçirimsiz sınır koşulu benimsenmiştir.

Güneybatı kesimi, sonsuz beslenme alanı olarak tanımlayacağımız Akdeniz ile sınırlanmıştır. Bu sınır boyunca düğüm noktalarında sabit yük sınır koşulu kullanılmıştır.

1 ile 133 nolu düğüm noktaları arasında yeralan güneybatı sınırı aşırı derecede gözenekli ve geçirimli, bazaltik lav akıntılarında (Doyuran, 1982) geçmektedir. Çok fazla depolama kapasitesi olan bu ortamda, işletme kuyularından yapılan çekimler bu sınır boyunca yeralan noktalarda yeraltısı tablasını etkilememektedir. Bu nedenle bu sınır boyunca Dirichlet sınır koşulu kullanılmıştır. Ancak 65 ve 19 nolu noktalar arasındaki kısımda Neumann koşulu kullanılmıştır. Buna neden olarak 54 nolu düğüm noktasında, sınıra çok yakın olması nedeniyle, yeraltısı düzeyinde bir değişiklik yapılamaması gösterilebilir. Yapılan benzeşim çalışmaları sonucunda geçirimsiz olarak kabul edilen bu kısım modellenme açısından başarılı sonuç vermiştir. Şekil 5'de görüldüğü gibi yeraltısuyu akışı genellikle denize doğru olup bu kısımda eş su düzeyi eğrisi sınıra paralel konumdadır.

Kalibrasyon

Benzeşim çalışmalarının önemli bir kısmını oluşturan kalibrasyon aşaması, önerilen modelin sahaya uyarlanmasını amaçlamaktadır. Oluşturulan modelde sahanın fiziksel ve hidrojeolojik özellikleri gir-

di olarak kullanılır ve modelden elde edilen sonuçlar, sahada gözlenen değerlere yaklaştırılmaya çalışılır. Bu aşamada model denklemi ilk olarak dengeli ortamda çözülerek, ileri aşamalarda başlangıç değerleri olarak kullanılmak üzere akifer içerisinde yeraltısı düzeyi dağılımı saptanır.

Erzin ovası yeraltısı havzası için yürütülen kalibrasyon çalışması 1978 sulama mevsimi için amaçlanmış ve tüm akifer sınırında Dirichlet sınır koşulu kullanılmıştır. Sınır boyunca yeralan noktalardaki hidrolik yük değerleri Şekil 5'de verilen haritadan alınmıştır. Bu değerlere, akifer tabanının deniz düzeyinden 50 m aşağıda olması nedeniyle, 50 şer metre ilave edilmiştir. Elemanlar için girdi olarak verilen hidrolik iletkenlik değerleri ise Şekil 4'deki haritadan alınmıştır.

Modelde girdi olarak verilen tüm bu bilgiler yardımı ile, akifer içerisinde yeralan her bir düğüm noktasında yeraltısı düzeyi hesaplanmıştır. Çözümün sağlıklı olabilmesi için çözüm değerlerinin gözlem değerleri ile uyandırılması gerekir. Ovada yeralan kuyulardan 61 tanesinde yeraltısı düzeyi ölçümleri bulunmasına rağmen bunların sadece 15 tanesine ait güvenilir ölçümler elde edilmiştir. Bu nedenle kalibrasyon çalışmaları zorunlu olarak 15 kuyuya ait ölçümlere göre yürütülmüştür. Kalibrasyon çalışmaları sırasında sadece sınırdaki yeraltısı düzeyi değerlerinde değişiklik yapılarak içerdeki noktalarda gözlenen değerlere yaklaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Kalibrasyon sırasında elemanlar için kullanılan hidrolik iletkenlik değerleri sabit tutulmuştur. Bu değerler pompaj deneyleri ile belirlenmiş olup akiferin özelliklerini yeterli duyarlılıkta yansıtmaktadır.

Kalibrasyon çalışmalarına modelden elde edilen sonuçlar ile gözlem değerleri arasındaki fark 1 m düzeyine indirilinceye kadar devam edilmiştir. Esas olarak 61 düğüm noktası ile başlanan bu çalışma bazı ölçümlerin hatalı olması nedeniyle 15 kuyuya ait veriler kullanılarak sonuçlandırılmıştır.

Model Gerçekleme Çalışması

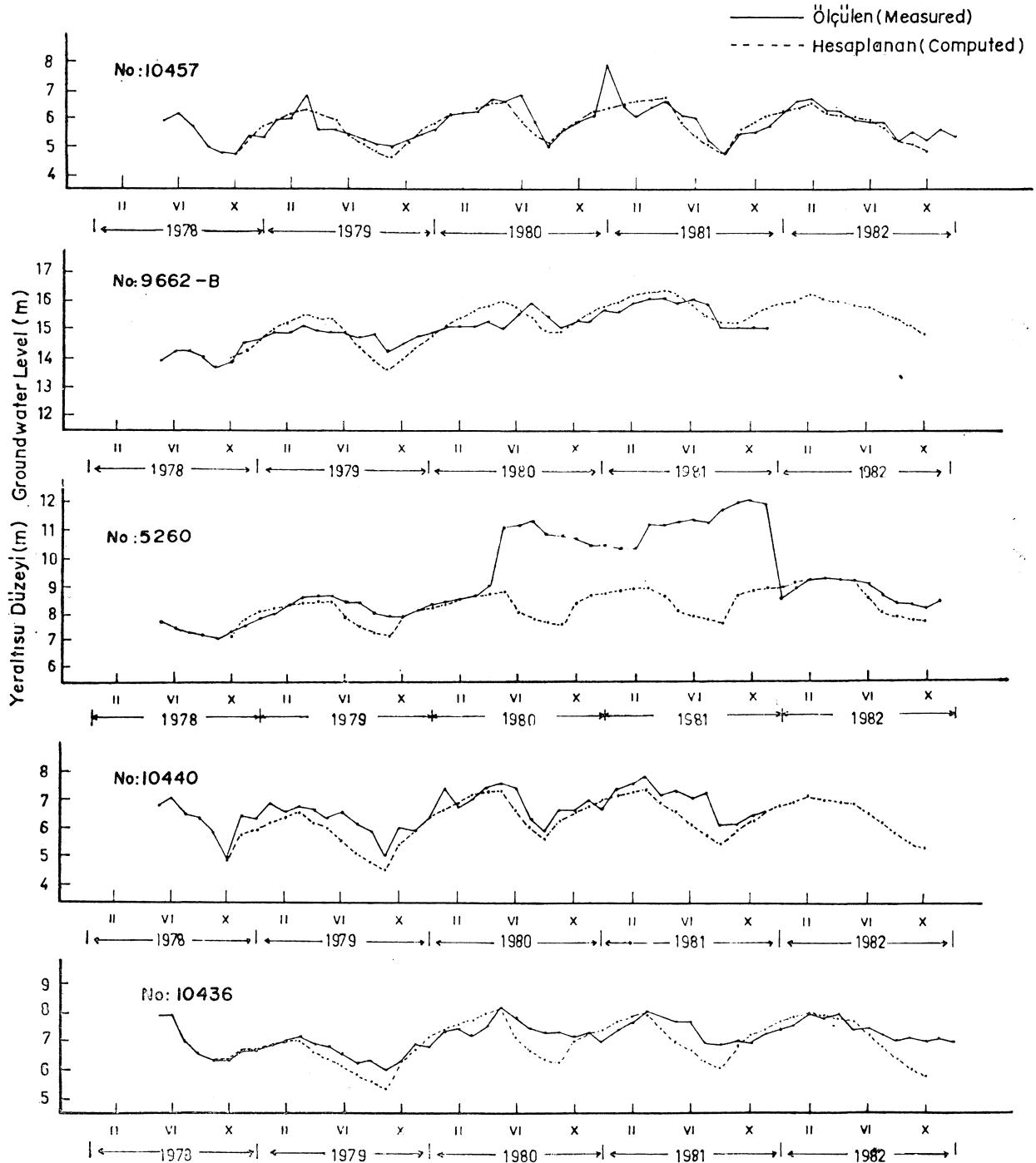
Yeraltısuyu model çalışmaları başlıca üç aşamayı gerektirmektedir. Bunlardan birincisi kalibrasyon çalışmaları olup modelleme için gereksinilen başlangıç değerlerinin belirlenmesine yöneliktir. Duyarlılık analizleri bu safhanın önemli bir kısmını içerir. İkinci aşamada modelin sahaya uyarlanması gerçekleştirilir. Benzeşim (simulation) ya da modelin sağlanması (verification) olarak bilinen bu aşama akiferin doğal ve yapay koşullardan etkileşiminin geçmiş veriler yardımı ile modellenmesidir. Başka bir ifade ile bu aşamada tarihsel eşleme (history matching) gerçekleştirilmektedir. Modelin güvenilirliği bu uyarlama süresi ile doğru orantılıdır. Genellikle üç yıl yada daha uzun süreli benzeşim çalışmaları tercih edilmelidir. Son aşamada saha koşullarına uyarlanan model ile ileriye yönelik tahminler (prediction) yapılmaktadır. Yeraltısuyu işletmeciliği yönünden son derece yararlı olan bu çalışmalar değişik

beslenim ve boşalım koşulları altında akiferin davranışını ortaya koymaktadır.

Rushton ve Redshaw (1979) özellikle serbest akiferlerin dış etmenlere genellikle uzun sürede tepki gösterdiğini belirtmektedir. Bu çalışmada 1982 yılı sonrasına ait yeraltı suyu ölçümleri bulunmayışı nedeniyle model gerçekleştirme çalışmaları zorunlu olarak 1978-1982 yılları arasındaki dört yıllık dönem için yürütülmüştür. Diğer taraftan yine aynı neden-

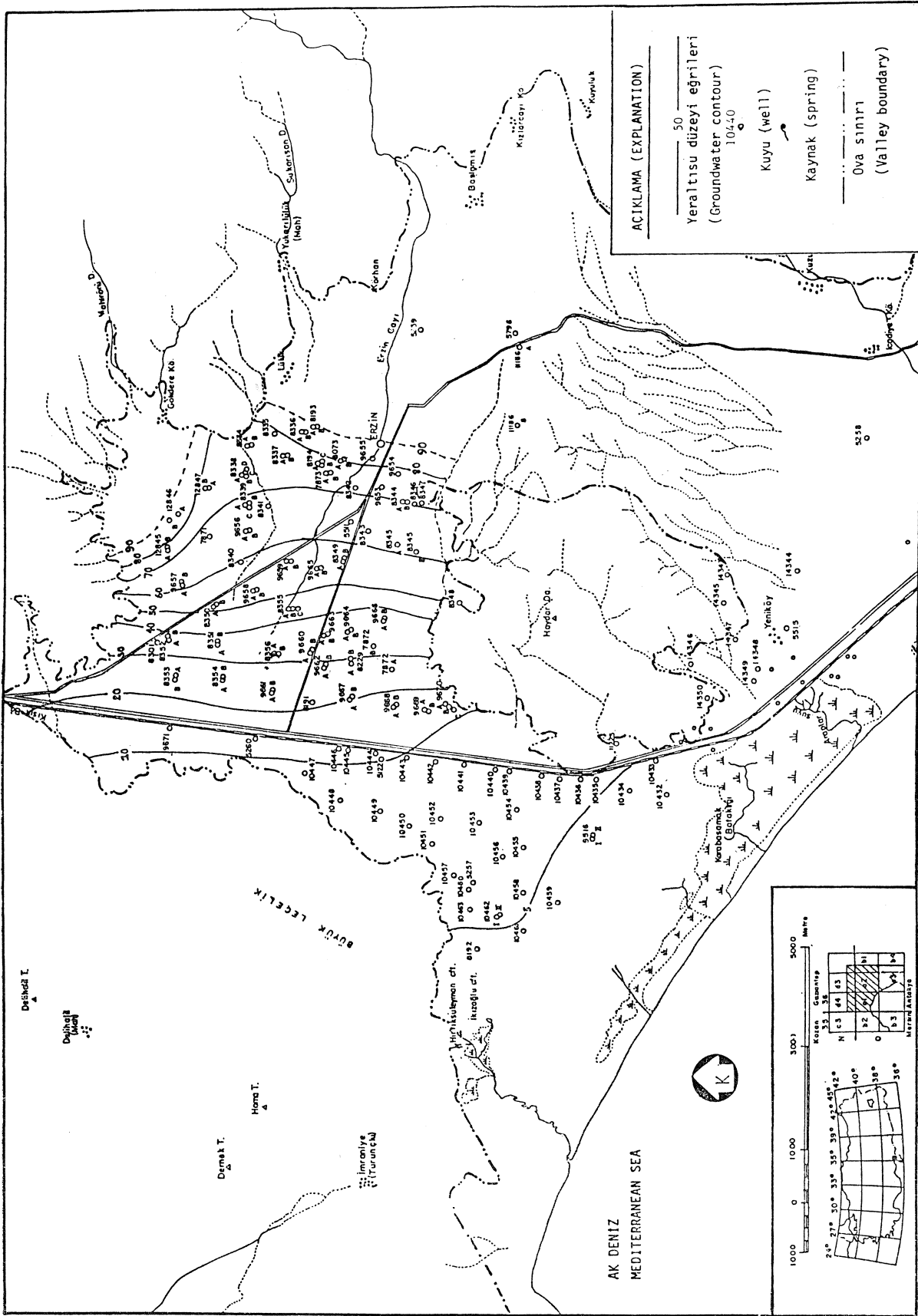
lerden dolayı ileriye yönelik tahmin yapılmamıştır. Bunun için öncelikle modelin 1985'e kadar geliştirilmesi ve tahminlerin bundan sonraki dönemler için yapılması gerekmektedir.

Model geliştirme aşamasında dört değişik beslenim ve boşalım değerleri kullanılmıştır. Çizelge 1'de verilen beslenim ve boşalım dönemleri seçilen beş gözlem kuyusu hidrograflarındaki alçalım ve yükselimler yardımı ile belirlenmiştir.



Şekil 6 : Seçilmiş kuyulara ait hidrograflar.

Figure 6 : Hydrographs of selected wells.



Şekil 7 : Mayıs 1982 yeraltısu tablası haritası. Figure 7 : Groundwater contour map for May 1982.

Çizelge 1 : Benzeşim dönemi için beslenme ve boşalım miktarları.

Beslenme Dönemi Recharge Period	Zaman(Gün) Time (Day)	Beslenme(m ³ /gün) Recharge(m ³ /day)	Boşalım Dönemi Discharge Period	Zaman(Gün) Time (Day)	Boşalım(m ³ /day) Discharge(m ³ /day)
Ekim 1978-Mart 1979 (October 1978-March 1979)	150	168,000	Mart 1979-Eylül 1979 (March 1979-September 1979)	180	146,000
Eylül 1979-Mayıs 1980 (September 1979-May 1980)	240	179,000	Mayıs 1980-Eylül 1981 (May 1980-September 1980)	120	132,000
Eylül 1980-Mart 1981 (September 1980-March 1981)	180	177,000	Mart 1981-Ağustos 1981 (March 1981-August 1981)	150	126,000
Ağustos 1981-Şubat 1982 (August 1981-February 1982)	180	179,000	Şubat 1982-Ekim 1982 (February 1982-October 1982)	240	124,000

Table I : Recharge and discharge rates for the simulation period.

GRWM programı ile gerçekleştirilen benzeşim çalışması herbir dönem için en az on değişik beslenme /boşalım değerinin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Burroughs 1056-A9 bilgisayar sisteminde çalıştırılan GRWM programı 120, 150, 180 ve 240 günlük benzeşimleri 90, 108, 143 ve 176 saniyede gerçekleştirmiştir.

SONUÇLAR

Erzin ovası için geliştirilen serbest akifer modeli kullanılarak gerçekleştirilen benzeşim çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Geliştirme aşamasında yararlanılan kuyuların hidrografları ile modelden hesaplanan yeraltısu düzeyleri şekiller üzerinde birlikte verilmiştir.

Bu şekillerden de görüleceği gibi modelden elde edilen sonuçlar gözlenen değerlerle çok iyi bir uyum sağlamaktadır. Bazı hidrograflarda görülen sapmaların, örneğin 5260 nolu kuyuda, 1980 Aralık ayma ait ani yükselme gibi, modellenemeyeceği açıktır. Böyle bir değişikliğin diğer kuyularda gözlenmediği düşünülürse, bunun ölçüm hatasından kaynaklandığı görülür.

Akiferin heterojen oluşu da benzeşim çalışmalarını güçleştiren diğer bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bu durumda çok sayıda ve güvenilir saha verilerine gereksinim vardır.

Benzeşim çalışmalarından elde edilen sonuçların saha genelinde uyumluluk derecesini belirlemek amacıyla 1982 yılı Mayıs ayma ait yeraltısu tablası eğrileri (Şekil 7), başlangıç değeri olarak alınan Mayıs 1978 dönemine ait eğrilerle (Şekil 5) karşılaştırılmıştır. Şekillerden görüleceği gibi yeraltısu tablasının ova içinde genel dağılımı ve yeraltısu akış

yönleri mükemmel bir uyum göstermektedir. Elde edilen sonuçlar modelin Erzin ovası serbest akiferinin benzeşimi için yeterli duyarlılıkta olduğunu kanıtlamaktadır.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Aral, M.M., 1974, Finite element solution of selected partial differential equations. FEMAC computer program: METU Publication, No. 28, Ankara, 99 p.
- Doyuran, V., 1982, Erzin ve Dörtöl ovalarının jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri: Türkiye Jeol. Kur. Bült., 25, 151-160.
- Doyuran, V., 1983, Erzin ve Dörtöl ovalarında yeraltısu düzeyi değişmelerinin yorumu: Türkiye Jeol. Kur. Bült., 26, 49-58.
- Rushton, K.R. ve Redshaw, S.C., 1979, Seepage and Groundwater Flow: John Wiley and Sons, New York, 339 p.
- Suvagondha, F., 1985, Finite element modelling of the Erzin plain groundwater basin, Hatay, Turkey: METU, Engineering Faculty, Geological Engineering Department, Ankara, PhD Thesis, (unpublished) 104 p.
- Türkmen, G., Ertürk, A. ve Türkmen, M., 1974, Dörtöl-Erzin ovası hidrojeolojik etüd raporu: DSİ, 42 s.
- Walton, W.C., 1970, Groundwater resource evaluation: McGraw Hill, Kogakusha, 664 p.
- Zienkiewicz, O.C., 1977, The finite element method: McGraw Hill, Berkshire, 787 p.

Yazının Geliş Tarihi: 12.10.1985

Düzeltilmiş Yazının Geliş Tarihi : 26.12.1985

Yayıma Verildiği Tarih : 25.1.1986