

JEOTERMAL SAHALARDA MODELLEME

Doç. Dr. Zeynel DEMİREL

Modeller, gerçek-karmaşık sistemlerin özetlenmiş temsilleri olarak düşünülebilir. Modeller herhangi bir sistemin etki-tepki davranışlarını simule eden (benzeştiren) araçlardır. Model, gerçek dünyanın olağanüstülüğüne, öngörölmüş varsayımlar ve algıların idealize edilmesi ile bir yaklaşım olarak tanımlanabilir (*Despotakis et al. 1993*) Sayısal modellerin jeoloji mühendisliğinde kullanılmaları son yıllarda hızla gelişerek, özellikle jeohidrolik sorunların çözümünde geleneksel olarak kullanılan araçlardan biri haline gelmiştir.

Jeoloji Mühendisliğinde Modeller;

- doğal sistemlerinin nasıl davrandığının anlaşılması,
- doğal sistemin gelecekte nasıl davranacağını anlaşılması amaçlarıyla kullanılırlar.

Modelleme; herhangi bir sistemin etki-tepki davranışlarını simule etmek yani benzeştirmek için yapılan bir çalışmadır. Modellemede sistem 2 ya da 3 boyutlu olarak benzeştirilir ve sistem içindeki dinamik koşullar analiz edilir. Modelleme bir düşünsel prosesler zinciridir; Öncelikle problemler formüle edilir ve modelleme uygulamalarının hedefleri tanımlanır. Bu aşamada araştırılacak sistemin kavramsal tanımı yapılmalıdır ve eldeki modellerden hangisinin uygun olduğuna, ya da yeni bir yazılımın gerekliliğine karar verilmelidir. Model yazılımları ayrıca saha verilerinin toplanmalarına da kılavuzluk ederler ve model yazılımları, ölçüm değerleriyle-teorik olarak hesaplanan değerlerin referans noktalarında karşılaştırılmalarıyla, modellerin kalibrasyonun yapılmasına olanak tanırırlar, ayrıca model yazılımları sonuçlanan bilgilerin kolaylıkla yorumlanabilecek şekilde sunumunu sağlarlar.

Bir sistemin modellemesindeki aşamalara göz atacak olursak;

KAVRAMSAL MODEL

Problemin tam anlamıyla kavranması ve sistemin fiziksel davranışlarının öngörülmesi “Bir akiferde açılmış kuyudan su pompalandığında kuyuda su seviyesinde düşme-akiferde düşüm konisi oluşur” gibi,



MATEMATİKSEL MODEL

Kavramsal modelin bir matematiksel modele adapte edilmesi “yukarıdaki düşünsel kavramsal modelin matematiksel benzeşimi akifer karakteristikleri bilindiğinde THEİS eşitliği ile başarılı.



MODELE KARAR VERME

Araştırma yada sorun bilgisayar modelini gerektiriyormu?



ANALİTİK MODELLER

SAYISAL MODELLER

Model, herhangi bir gerçek sistemin etki tepki davranışlarını benzeştiren ve sistemi yaklaşık olarak yansıtan basitleştirilmiş halidir. Model çeşitlerine bakacak olursak

Modellerin bir çok sınıflaması mevcuttur, en başta modelleri Fiziksel, Matematiksel ve Benzeşim modelleri olarak ayırabiliriz.

1. Fiziksel Model

Laboratuvar ortamında gerçeğe yakın bir sistem kurularak oluşturulan modele, fiziksel model denir (Anderson and Woessner, 1992). Darcy deneyi.

2. Matematiksel Model

Matematiksel modeller sistem içerisinde meydana gelen fiziksel süreçleri göstermek için tanımlanan eşitliklerden dolayı olarak faydalanıp, yeraltı suyu akımını benzeştirirler. Matematiksel modeller analitik ya da nümerik olarak çözülebilir (Leigh, 1983). Analitik çözümler genellikle homojen ve gözenekli ortam koşulları gibi çok kompleks olmayan hidrojeolojik sistemlerde uygulanmaktadır.

Yer altı suyu modelleri

Jeotermal modellerin temelinde yeraltısuyu modelleri bulunmaktadır. Yeraltı suyu modelleri; sundukları fiziksel-kimyasal seçeneklere, boyutlarına, kullanılan çözüm yöntemlerine ve zaman boyutunda davranışlarına göre şöyle sınıflandırılırlar;

1. FİZİKSEL-KİMYASAL SEÇENEKLERE GÖRE;

Akım modelleri → piyezometrik seviyeleri (böylelikle ortalama su akımını) benzeştirirler.

Transport Modelleri → suda çözülmüş maddelerin konsantrasyonlarını hesaplarlar.

Akışkan sadece su olabilir, ancak bazen su-hava (vadoz zonda), su-petrol karışımları da olabilir

2. BOYUTLARINA GÖRE SINIFLAMA

Tüm modellemeler öncelikle global bir bilançodan yola çıkmalıdır (Ø-boyutlu model). Böyle kutu modellerinde bölgesel büyüklükler dikkate alınır. Yeraltı suyundaki izotop değerlendirmeleri de kutu modelleri tekniğine hizmet verirler. Tek boyutlu modeller sütunsal denemelerin değerlendirilmesinde uygulanırlar.

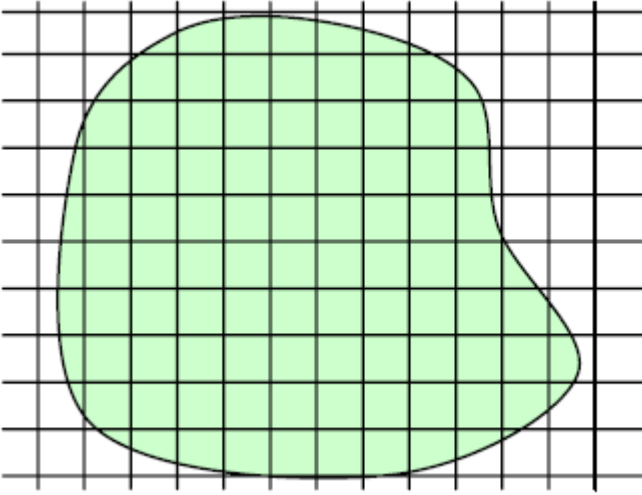
3. ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNE GÖRE SINIFLAMA

Sayısallaştırmada değişik çözüm yöntemleri söz konusu olur. Akım ve transport eşitliklerinin analitik çözümleri kapalı formüsel ifadelerdir. Bunlar ortamın homojenitesini ve basit akım koşulları ile sınır koşullarını ön koşul olarak gerektirirler.

Sayısal modeller, ortamı homojen kısmı parçacıklara ayırırlar (hücre yada elementler). Kavramsal olarak basit yöntem sonlu farklar yöntemidir. Bu yöntemde ortam dörtgenlere ayrılır. Dezavantajı sınırlarda düzensizlik olduğunda tam olarak ayrırtlanamaz. Sonlu elemanlar yöntemi daha flexible'dır. Transport eşitliklerinde ihtiyacı gidermek üzere Karakteristik-Yöntemi ve Random-Walk yöntemleri de diğer yöntemlere katılır.

Finite Differences (Sonlu farklar)

İşlemin gerektirdikleri: Grid ve Eşitlik. Grid – fiziksel çevrenin bir temsilidir ve sınırların ve içsel özelliklerin hesaba katılmasına imkan verir.

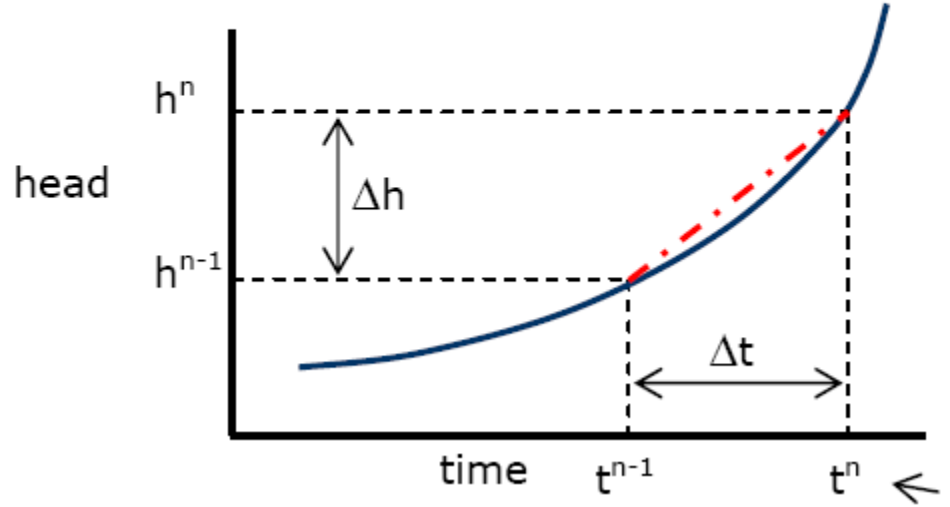


$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{2D flow equation}$$

Zaman türevine yaklaşım :

Backward Difference:

$$\left(\frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} \right)_{n\Delta t} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} \approx \frac{h_{i,j,n} - h_{i,j,n-1}}{\Delta t}$$



4. ZAMANSAL DAVRANIŞLARLA İLGİLİ SINIFLAMA

Düzenli ve düzensiz akım rejimleri için modeller ayırtlanır. Dengeli (düzenli akım) modellerinde bir denge durumu dikkate alınır. Bu modellerde piyezometrik seviye veya konsantrasyon değişmezken, dengesiz akım modellerinde zaman adımlarıyla belirlenmiş zamansal bir gelişim söz konusudur.

Yeraltı suyu akımı için yönlendirici kuvvet yerçekimi ve bununla oluşan basınç kuvvetleridir. Hidrostatik basınç ve referans düzlemine göre konumdan kaynaklanan büyüklük piyezometrik seviyedir h:

$$h = \frac{P}{\delta \cdot g} + z$$



P : basınç

z : rakım

g : yerçekimi ivmesi

δ : suyun yoğunluğu

Piyezometrik seviyelerdeki farklılıklar yeraltısuyu hareketlerini sonuçlandırır.

Akım eşitlikleri;

- Süreklilik eşitliğinden ve
- Darcy yasasından çıkartılmışlardır.

Burada yapılan kabullenme akımın ağırlıklı olarak horizontal olduğudur, yani, düşey yönlü akım komponenti yoktur (Dupuit kabullenmesi) ve akiferde yeraltı suyunun yoğunluğunun da sabit olduğudur.

İki boyutlu yeraltı suyu akımı için Darcy yasası;

$$\vec{V} = -k_f \vec{V} h$$

$$\vec{V} = (V_x, V_y) \quad \vec{V} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_x}, \frac{\lambda}{\lambda_y} \right)$$

Orantı katsayısı, k_f - değeri olarak isimlendirilir.

Poroz bir ortam, yerel iletkenlik yöne bağlı olmadığında izotropdur. Buna karşın anizotrop bir ortamda iletkenlik yine bağlı olarak değişir.

İletkenlik k_f bir matris ile, iletkenlik tesiri ile değiştirilir.

$$\vec{V} = -K \vec{V} h$$

$$K \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix}$$

Zaman ve yerin (x,y,t) fonksiyonu olarak bilinmeyen piyezometrik seviye dağılımı için akım eşitlikleri (serbest, basınçlı ve yarı basınçlı akiferler için) ikinci dereceden kısmi diferansiyel eşitliklerdir. Bunların çözümü için başlangıç ve sınır koşullarının bilinmesi gerekir. Stasyonere problemler için sadece sınır koşulları gereklidir.

Başlangıç Koşulları $\rightarrow t_0$ zamanı için piyezometrik seviye dağılımından ibarettir, simülasyonun başlangıç zamanı

Sınır koşullarının bir çok çeşidi mevcuttur.

- Birinci Çeşit Sınır Koşulları (Dirichlet-Koşulları):

Piyezometrik seviye $h = \delta(t)$. Sınır koşullarının özel bir durumu zamandan bağımsız piyezometrik seviye $h = \text{sabit}$ ile sabit seviyeli sınır koşuludur. Akifer ile doğrudan hidrolik ilişkide olan bir göl veya nehir genelde birinci çeşit sınır koşulunu oluşturur.

- İkinci Çeşit Sınır Koşulları (Neumann Koşulları):

Sınırdaki içe veya dışa akımı (V_y 'nin normal komponentini) gerektirir. Bu sınır koşulunun özel bir durumu geçirimsiz sınırdır. ($\lambda h/\lambda n = \Phi$). Eğer kenar akım çizgileri model sahasını sınırlıyorsa, bu sınır geçirimsiz sınır olarak dikkate alınır. Kuyular pompaj veya enjeksiyon durumunda sınır koşulu olarak değil sınırlı alanlar olarak tanımlanır.

- Üçüncü Çeşit Sınır Koşulları (Cauchy- Koşulları):

Bir ve ikinci sınır koşullarının bir kombinasyonudur. Sınırdaki lineer bir kombinasyonu ($\alpha h + \beta \lambda h/\lambda n$) oluşturur. Bu sınır koşulları yarı geçirimli sınırlarda kullanılırlar, yani tavan ve tabandan sızıntılarda, yüzeysel sızılardan sızıntılardan ve drenajlarda kullanılırlar. Bu sınır koşulunda dıştaki potansiyel bir direnç ile akiferdeki etkisi yumuşatılır.

BASINÇ SINIR KOŞULU ($p = \emptyset$) :

Yeraltı su tablası aynı bir sızıntı yüzeyi gibi atmosferik basınçla bir sınır koşulu gösterir. 2 boyutlu düşey ve 3 boyutlu modellerde rol oynar. Atmosferik basınçla, yani $p = \emptyset$ geçerlidir. Piezometrik seviye sınırın jeodezik seviyesine eşittir. Bu sınır koşulu ile yeraltı su tablası ve sızıntı çizgileri izafi olarak belirlenir.

HAREKETLİ SINIRLAR

Değişen yeraltı su seviyelerinde $p = \emptyset$ basınçlı sınır koşulu aynı zamanda hareketli sınırdır. Stasyoner akımda, model sahasının en azından bir noktasında birinci veya ikinci çeşit sınır koşulu olmalıdır. Bu çözümün sağlanabilmesi için gereklidir. Stasyoner olmayan durumlarda ise çözümün anlamlığı başlangıç koşullarına bağlıdır.

AKIM EŞİTLİĞİNİN ÇÖZÜMÜ

Analitik ve numerik yöntemler vardır.

1. Akım Eşitliğinin Analitik Çözümü

Çok basit durumlar için akım eşitliği kapalı olarak çözülebilir. Kapalı (analitik) çözümlere örnek olarak THEIS ve HANTUSH fonksiyonları verilebilir, bunlar pompaj testlerinin değerlendirilmelerinde kullanılır. Birçok kabullenmeler vardır, örneğin sonsuz yayımlı akifer, izotropi, homojenite vb. bunlar çözümün uygulanmasını çok sınırlarlar ve doğal koşulların tam olmayan bir tasviri ortaya çıkar.

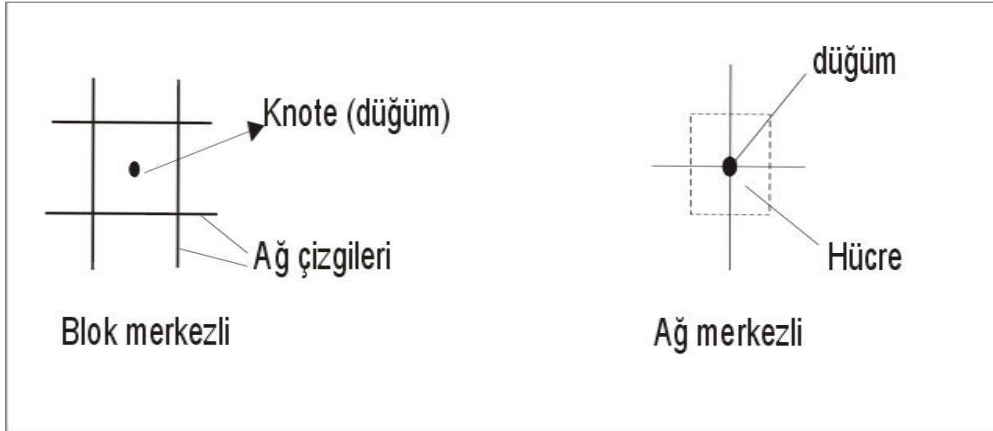
2. Akım Eşitliğinin Numerik Çözümü

Numerik bir akım modeli bir sahanın mekansal ve zamansal bölümlendirilmiş su bilançosunu sunar. Differenz modelleri ve Finite-Element modelleri en çok kullanılan numerik yöntemlerdir. Göze çarpan farklılığı model sahasının bölümlendirilmesindeki farklılıklardır. Differenz yönteminde dörtgen hücrelerle, Finite-Element yönteminde ise istenen şekilde yapılan bölümlendirmeler söz konusudur.

DİFFERENZ YÖNTEMİ

Numerik yöntemler mekansal ve zamansal bölümlendirmeyi gerektirirler. Differenz yönteminde diffransiyel bölümlerin yerine differenz bölümleri getirilir. Bunun için akifer dörtgen şeklinde hücrelere ayrılır, iki türlü ağ söz konusudur.

- Blok merkezli ve
- Ağ merkezli



Birinci durumda, piyezometrik seviyenin hesaplanacağı knote hücrenin merkezindedir. İkincide ise, çizgilerin kesim noktasında.

Ayrımlamada (bölümlendirmede) x ve y yönünde Δx ve Δy merkezleri farklı seçilebilir. Zaman ise zaman aralıklarıyla değişen Δt ile gösterilir. Akım eşitliğinin numerik çözümünün anlamı, t_0 zamanında verilen bir piyezometrik seviye dağılımından çıkarılarak, daha sonraki t_1, t_2, \dots, t_n zamanları için knotelerdeki piyezometrik seviyelerin hesaplanmasıdır.

Differenz eşitliklerinin çıkarılması iki yoldan yapılabilir. Formül tamamen matematiksel yoldan, diferansiyel bölümlerin yerine differenz bölümler konulur. Elde edilen knoten eşitliklerin de süreklilik eşitliği ve Darcy yasası her hücre için bir zaman aralığı süresince (Δt) uygulanır, burada yapılan kabullenme yatay yönde hücredeki su değişimi sadece dört komşu hücre ile yapılmalıdır. Sonuçlanan eşitlikler sistemi, zaman aralığının sonunda $[t, t + \Delta t]$ piyezometrik

yüksekliğin hesaplanmasına izin verir, koşul zaman aralığının başında piyezometrik yüksekliğin ve sınır koşullarının biliniyor olmasıdır.

Toplam olarak 4 adet içeri (dışarı) akı 4 komşu hücre ile birde hücrenin tavanı ile içeri (dışarı) akım söz konusu olur. Bunlar Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ve Q ile gösterilir.

Süreklilik eşitliğine uygun olarak $[t, t + \Delta t]$ zaman aralığında içe ve dışa çekim farkı, hücrede bu zaman aralığında depolanan su hacmine eşittir.

$$\Delta t (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q) = [h_0 (t + \Delta t)] - [h_0 (t) S_0 \Delta x \Delta y]$$

Darcy yasasından da;

$$Q_1 = \Delta x T_{10} \frac{h_1(t') - h_0(t')}{\Delta y}$$

$$Q_2 = \Delta x T_{20} \frac{h_2(t') - h_0(t')}{\Delta x}$$

$$Q_3 = \Delta x T_{30} \frac{h_3(t') - h_0(t')}{\Delta y}$$

$$Q_4 = \Delta x T_{40} \frac{h_4(t') - h_0(t')}{\Delta x}$$

Burada kabul edilen; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ortalama akımları $[t, t + \Delta t]$ zaman aralığı içindeki bir t' zamanında piyezometrik seviyeler ile yaklaşık bulunulabilir.

İçeri akımlarda pozitif, dışarı akımlarda negatiftir.

$T_{10}, T_{20}, T_{30}, T_{40} \Rightarrow 0$ düğüm noktası ile 1

$\Rightarrow 0$ düğüm noktası ile 2

$\Rightarrow 0$ düğüm noktası ile 3

$\Rightarrow 0$ düğüm noktası ile 4 arasındaki ortalama transmisivitelendir.

$$T_{10} = \frac{T_1 + T_0}{2} \text{ ya da } T_{10} = \frac{2T_1T_0}{T_1 + T_0}$$

harmonik ortalamadır.

EŞİTLİK SİSTEMLERİNİN EXPLİZİT (Kesin) ÇÖZÜMÜ

Eşitlik sistemlerinin çözümü piyezometrik seviyelerin $h_{ij}(t_0)$ başlangıçtaki dağılımlarından başlamak suretiyle başarılıdır. Buradan doğrudan piyezometre seviyelerinin olarak $h_{ij} [t_0 + \Delta t]$ seviyeleri her hücre için hesaplanır. Eşitlikte sonuçların yeniden başlangıç değeri olarak konulmasıyla istenen zaman süresine ulaşılır. Bu yöntem kolaylıkla programlanabilir. Dezavantajları büyük Δt zaman adımları için çözüm stabil değildir. Stabillliği garantilemek için Δt küçük seçilmelidir ve böylelikle NEUMANN Kriteri yerine getirilir.

$$\frac{T}{S} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right) \leq \frac{1}{2}$$

Bu kriterin fiziksel anlamını kavramak için su durumu dikkate alınmalıdır; (i,j) knotesi (piyezometrik seviyesi H olan) t zamanında ve dört komşu knote ile çevrelendiğinde, hepsi aynı piyezometrik seviye $H + \Delta H$ sahiptir (Bear, 1979). (i,j) knotesinde ve komşu knotelerde transmisivite T ve q_{ij} sıfır olacaktır.

EŞİTLİK SİSTEMİNİN KESİN ÇÖZÜMÜ

CRANK-NICOLSON yaklaşımı birleştirilmiş lineer eşitlik sistemine götürür. Bu eşitlik sistemi genelde doğrudan veya iteratif olarak çözümlenebilir, bazı yöntemlerde bunların hepsini bir arada kullanılır. Doğrudan yöntemler eşitlik sistemini bir adımda çözer ve “doğru bir sonuca ulaştırır. İteratif yöntemde çözüm suksessiftir (ardıl, birbirini takip eden) ve bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Doğrudan yöntemin dezavantajı çok büyük hafızaya gereksinim duyulması ve çok yüksek hesap zamanıdır. Doğrudan yöntemlerden en iyi bilineni GAUB-JODAN Yöntemidir. İteratif yöntemin avantajı az hafızaya gereksinim duyulması ve bu nedenle kısa hesap süresidir. İteratif prosesleri hızlandırmak için faktörler kullanılabilir. Bilinen iteratif yöntem (yeraltısu modellemeleri eşitliklerinin çözümünde) GAUSS-SEIDEL yöntemidir.

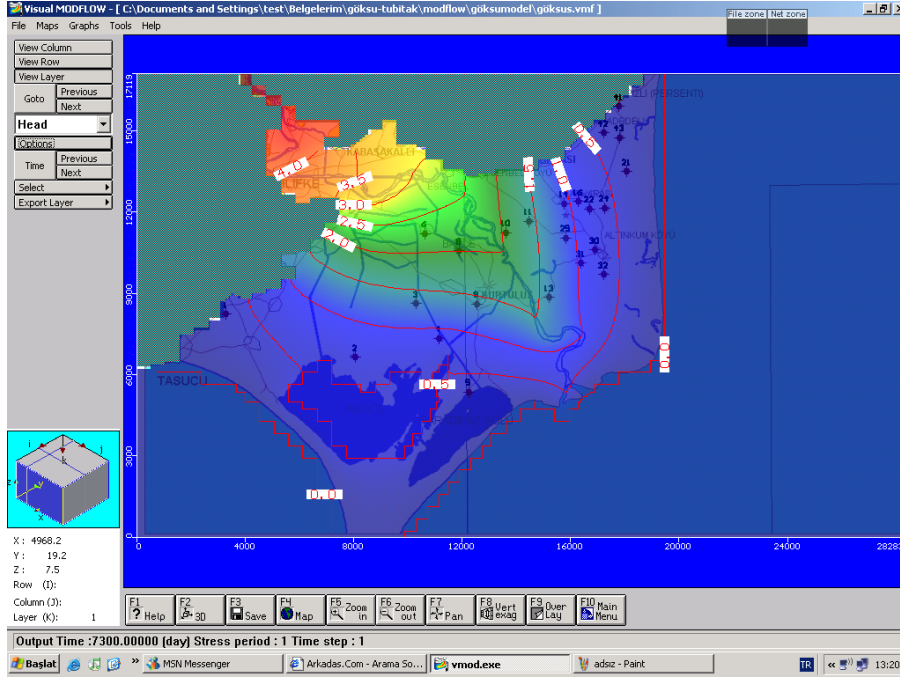
GAUSS-SEIDEL yönteminde piyezometre seviyeleri dağılımı için yapılmış bir tahminden çıkılır. Bunlar akım eşitliğine uygun değildir. Adım adım iyileştirilir, her knote komşu knote ile blanço eşitliği ile yapılır. Birçok adım sonunda matrix doğru bir şekilde çözüme ulaşır. Kullanılan diğer yöntemler ise;

1. IADI - Yöntemi (Iterate ve Alternating Direction Implicit Procedure) PEACEMAN & RACHFORD, 1955

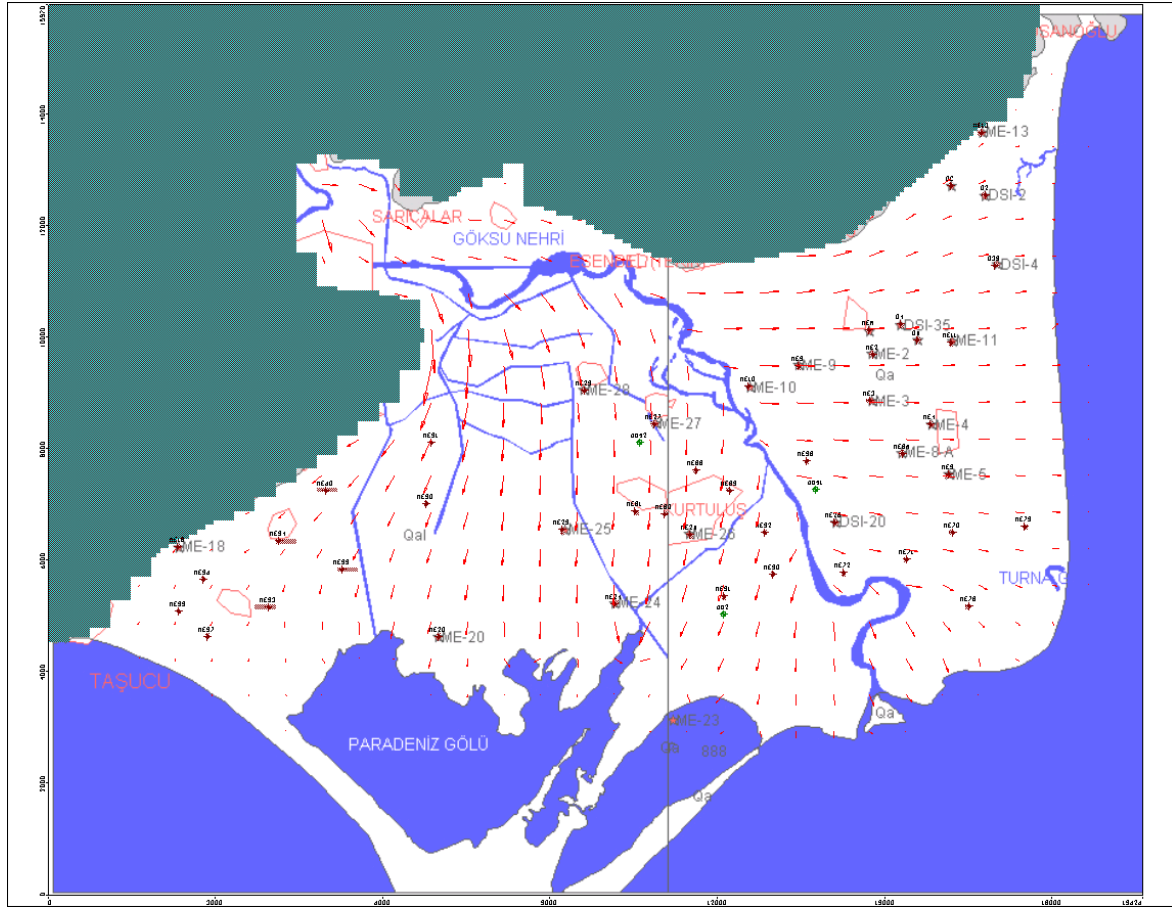
2. PCG - Yöntemi (Preconditioned Conjugate Gradient Method)

Bir yeraltısu akım modeline örnek olarak Göksu Deltasının Visual Modflow ile yapılmış yer altı akım suyu modelini verebiliriz.

Yeraltısu akım simülasyonları için çok sayıda ticari model mevcuttur, bunlardan dünyada yaygın olarak kullanılanlardan biri de Visual Modflow'dur. Şekik ve 'de Mersin Göksu deltasında Visual Modflow ile yapılmış bir simülasyon sonuçları görülmektedir.



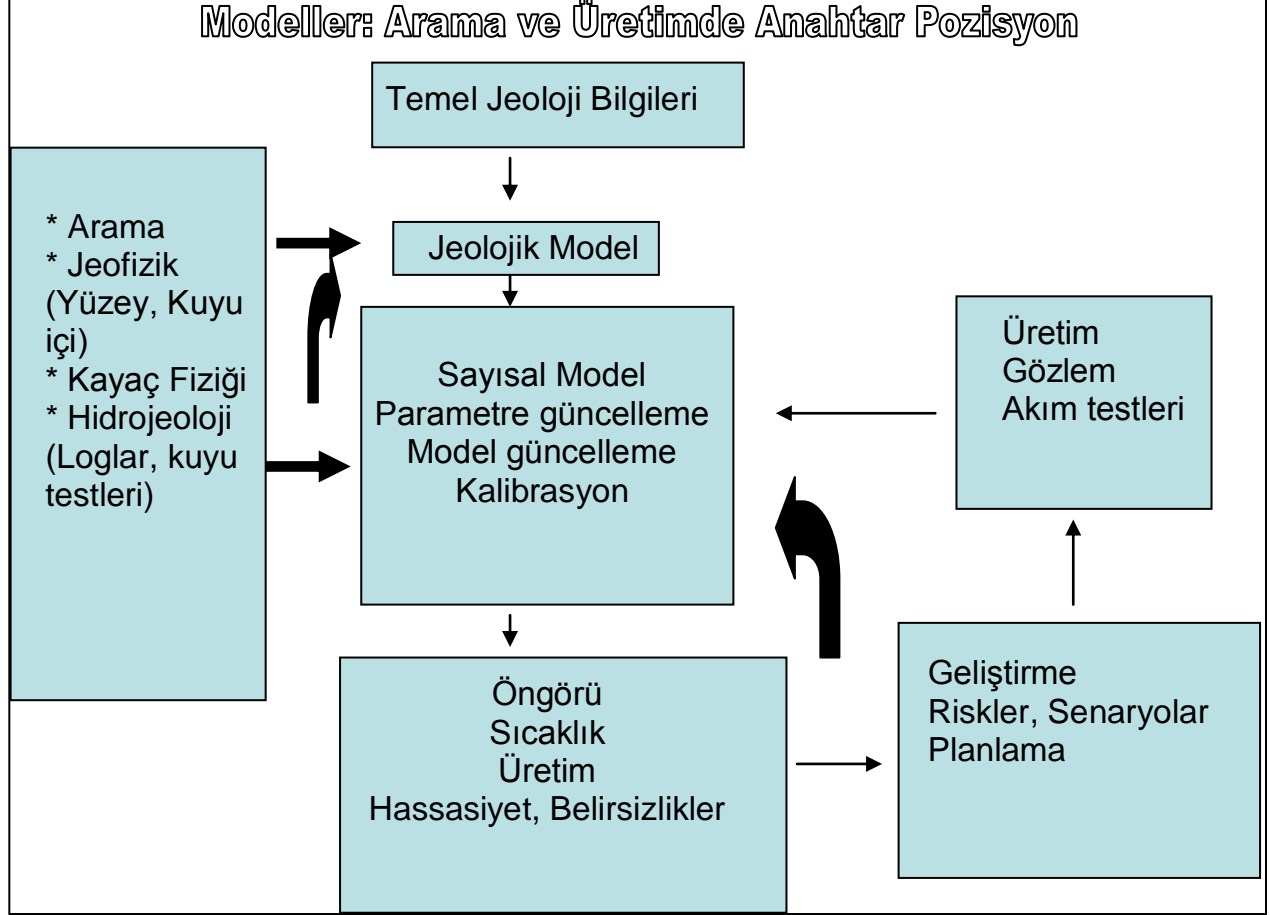
Şekil : Göksu deltasında yer altı su seviyesi simülasyon sonucu



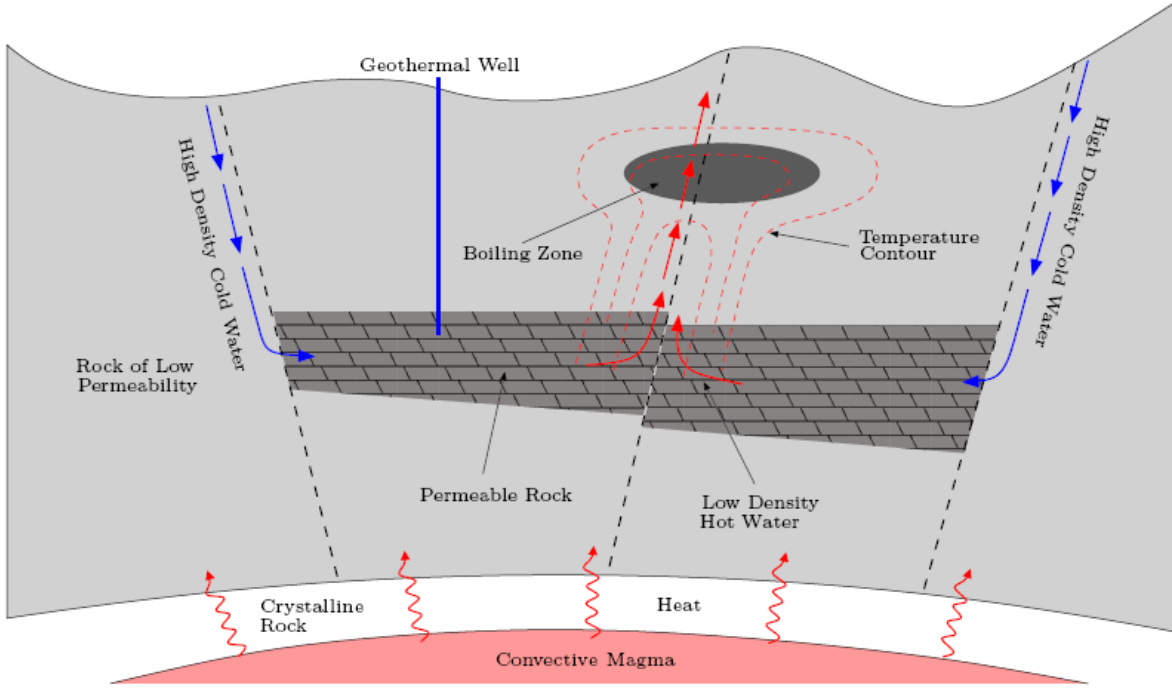
Şekil : Göksu deltasında yeraltısuyu akım hızı vektörleri

JEOTERMAL REZERVUARLARIN MODELLENMESİ

Jeotermal sahalarda modelleme aşamaları aşağıda özetlenmiştir.



Jeotermal rezervuar modelleme bakış açısıyla sıcak su ve/veya buhar içeren geçirimli bir kayaç zonedur (Şekil).



Şekil 1: Bir jeotermal rezervuarın şematil gösterimi

Jeotermal bir rezervuarın içinde modellemeye söz konusu olacak akışkan ve enerjinin hareketi kütle ve enerjinin korunumu ve Darcy yasası ile yönetilir. Bir rezervuarın performansını yeterince güvenilir bir şekilde öngörebilmek için, hidrotermal özellikleri, enerji ve kütle girdi/çıktılarını temsil eden bir bilgisayar modeli gereklidir. Böyle bir bilgisayar modeliyle ilişkili birçok parametre vardır, bunlardan bazıları kayacın porozite ve permeabilitesi, başlangıç koşulları ve sınır koşullarıdır.

Rezervuarda kayaç özelliklerinin homojen olmaması ve yönetici eşitliklerin lineer olmamaları nedeniyle jeotermal rezervuarların modellenmesi yeraltısularında olduğu gibi rezervuarların diskretizasyonu ile yapılır. Daha sonra model entegre edilmiş sonlu farklar ya da sonlu elemanlar yöntemleri ile sayısal olarak çözümlenir.

Rezervuarın performansının öngörülebilmesi için aşağıdaki parametrelerin tahmin edilmesi gerekir:

1. Rezervuarın permeabilite ve porozitesi
2. Başlangıç koşulları, başlangıçtaki sıcaklık ve basınç,
3. Sınır koşulları, kütle ve sıcaklık girdisi
4. Akışkan hareketini etkileyen diğer faktörler, örneğin relatif permeabilite

Günümüzde dünya üzerindeki bir çok jeotermal saha TOUGH2 sayısal modeliyle çözülüyor. TOUGH2 simülasyonunun çok uzun süren bir hesap süresi vardır, bunun nedeni lineer olmayan çok sayıda eşitlik Newton-Raphson iterasyon yöntemini kullanarak çözülmektedir.

Jeotermal bir rezervuarda akışkan ve ısı kütle ve enerji dengesi eşitliklerinin yönetiminde akar. Yönetici eşitlik yeraltındaki bir kontrol hacminde kütle ve enerjinin korunumunu dikkate alarak elde edilir;

$$\frac{\partial M_m}{\partial t} + \nabla \cdot Q_m = q_m,$$
$$\frac{\partial M_e}{\partial t} + \nabla \cdot Q_e = q_e.$$

Bu eşitliklerde;

$M_m, M_e \rightarrow$ birim hacimde kütle ve enerji

$Q_m, Q_e \rightarrow$ birim alandan kütle ve enerji akışı

$q_m, q_e \rightarrow$ bir kuyudan alınan yada kuyuya enjekte edilen kütle ve enerji miktarı

Yukarıda verilen eşitlikler kütle ve enerji korunum eşitliklerinin çok genel bir formudur, yeraltında jeotermal akışkan akımı için;

$$M_m = \phi (\rho_l S_l + \rho_v S_v),$$

$$M_e = (1 - \phi) \rho_r c_r T + \phi (\rho_l u_l S_l + \rho_v u_v S_v).$$

$\Phi \rightarrow$ porozite

$\rho_l, \rho_v, \rho_r \rightarrow$ akışkan, buhar ve kayaç yoğunlukları

S_l ve $S_v \rightarrow$ akışkan ve buhar doygunlukları

u_l, u_v ve $c_r \rightarrow$ buhar ve sıvı için spesifik içsel enerjiler, kayacın özgül ısı

$T \rightarrow$ sıcaklık

$S_l + S_v = 1$

Boşluklu ortamda akışkanın akımı Darcy yasası ile yönetilir. Jeotermal bir rezervuarda Darcy yasasının 2 fazlı versiyonu kullanılır, zira genelde su ve buhar karışımı söz konusudur. Bu eşitlikler;

$$Q_{ml} = -\frac{kk_{rl}}{\nu_l}(\nabla p - \rho_l \underline{g}),$$

$$Q_{mv} = -\frac{kk_{rv}}{\nu_v}(\nabla p - \rho_v \underline{g}),$$

$$Q_m = Q_{ml} + Q_{mv}.$$

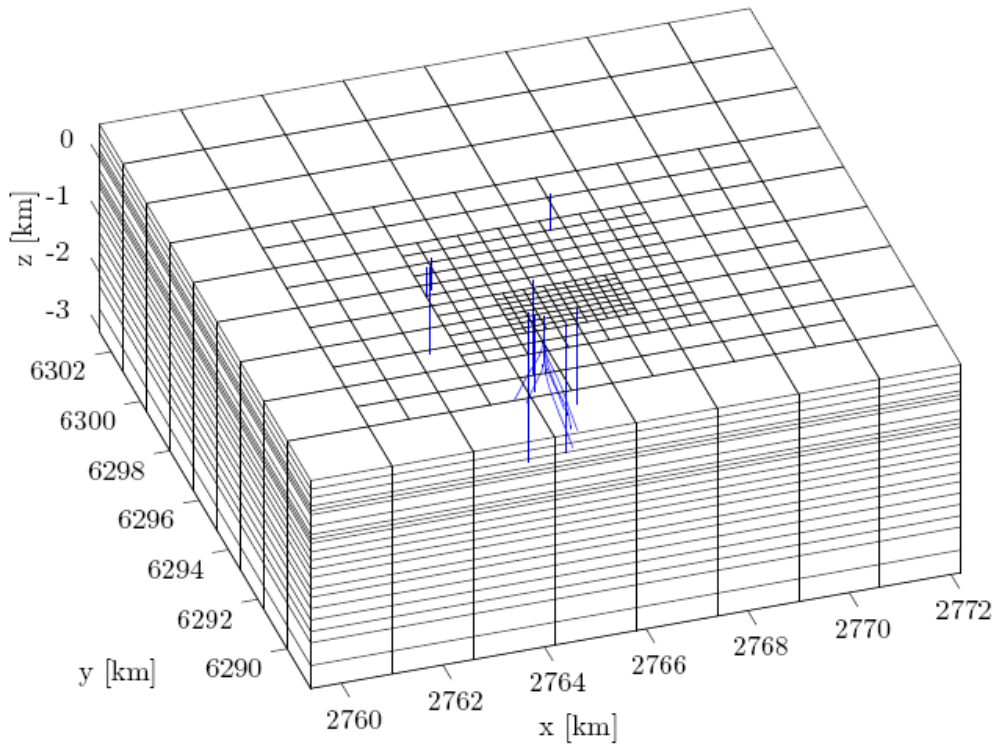
$k \rightarrow$ 3 boyutlu ortamda, diyagonal, 2. dereceden permeabilite tensörü. Bu bir k vektörü ile temsil edilir

$g \rightarrow$ gravite nedeniyle yerçekimi

$\Delta p \rightarrow$ basınç gradyanı

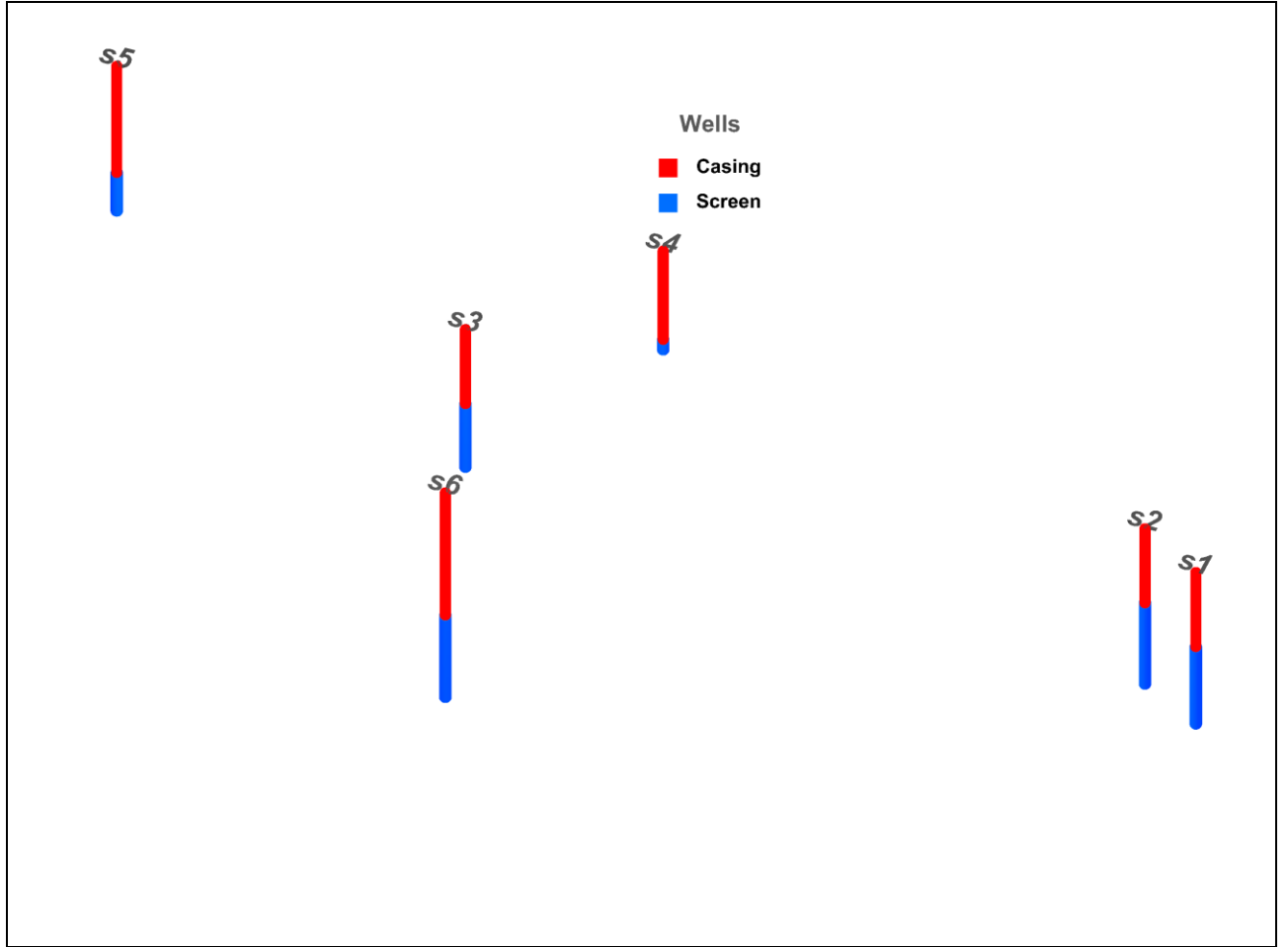
$\rho_l, \rho_v \rightarrow$ akışkan ve buhar için kinematik viskoziteler

Sayısal modellemede çok sayıda hacim bloku bir jeotermal alanın sayısal modelini kapsar, yukarıda verilen eşitlikler her blok için çözülür, bu çözümde komşu bloklardan söz konusu bloka girdi ve çıktılar dikkate alınır. Şekil Fushime kuyu test simülasyonunda kullanılan radyal simetrik gridleri göstermektedir.

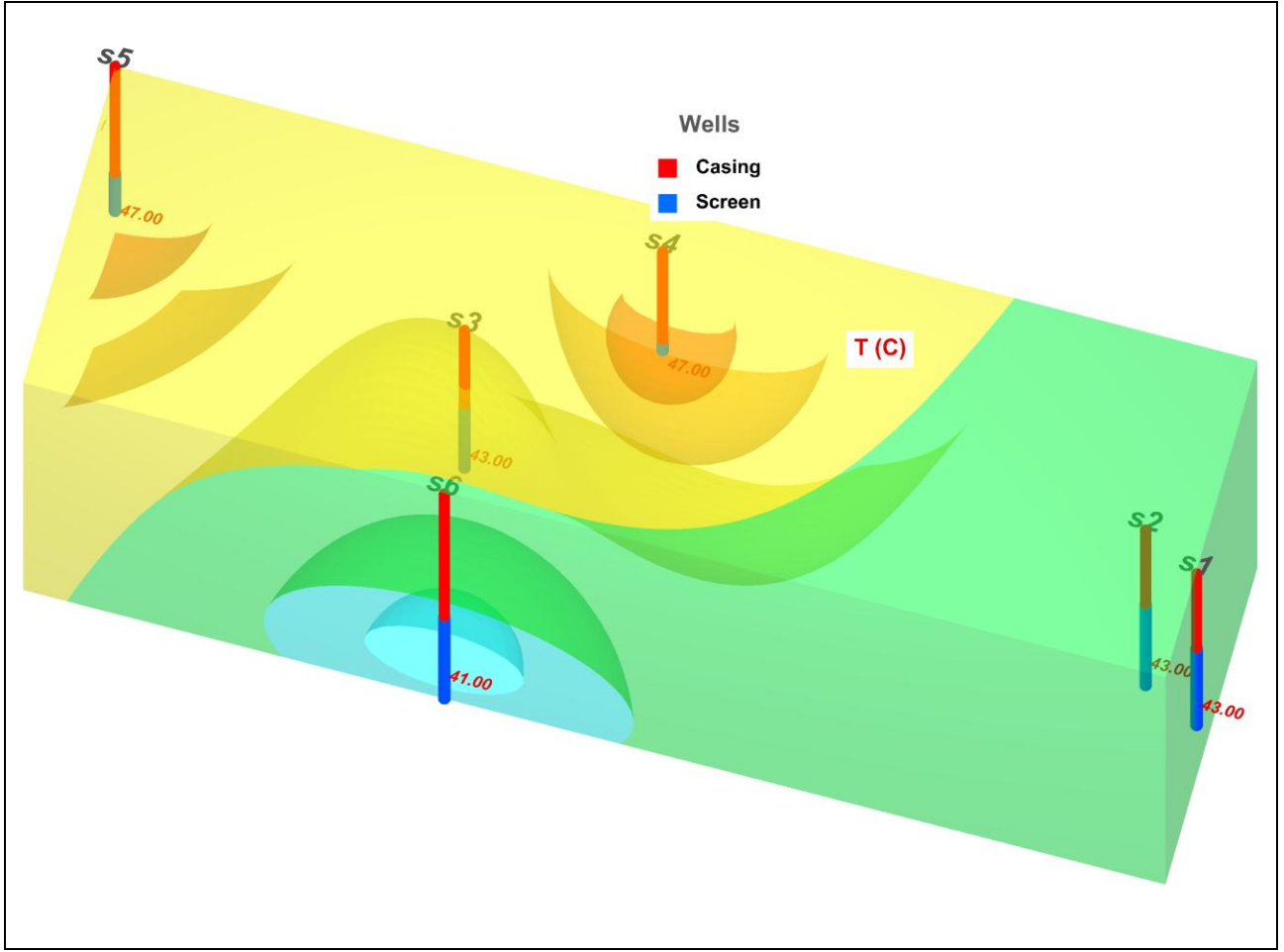


Şekil: Mokai sahasında doğal durum modellemesi. Ortadaki düşey yönlü çizgiler rezervuarda açılan kuyuları göstermektedir.

Günümüzde modeller jeotermal araştırmaların hemen her safhasında uygulanan araçlar haline gelmiştir. Daha çalışmaların başlangıcında Kavramsal Modelin kurulması sırasında sahanın 3 Boyutlu modeli oluşturulurken kullanılan bir çok ticari model mevcuttur. Enviro Insite, RockWorks ve Visual Modflow3D Explorer bunlardan bazılarıdır. Örneğin Enviro Insite ile sahada açılan kuyuların 3B dağılımları görülebileceği gibi rezervuarda sıcaklık 3B olarak izlenebilmektedir (şekil).

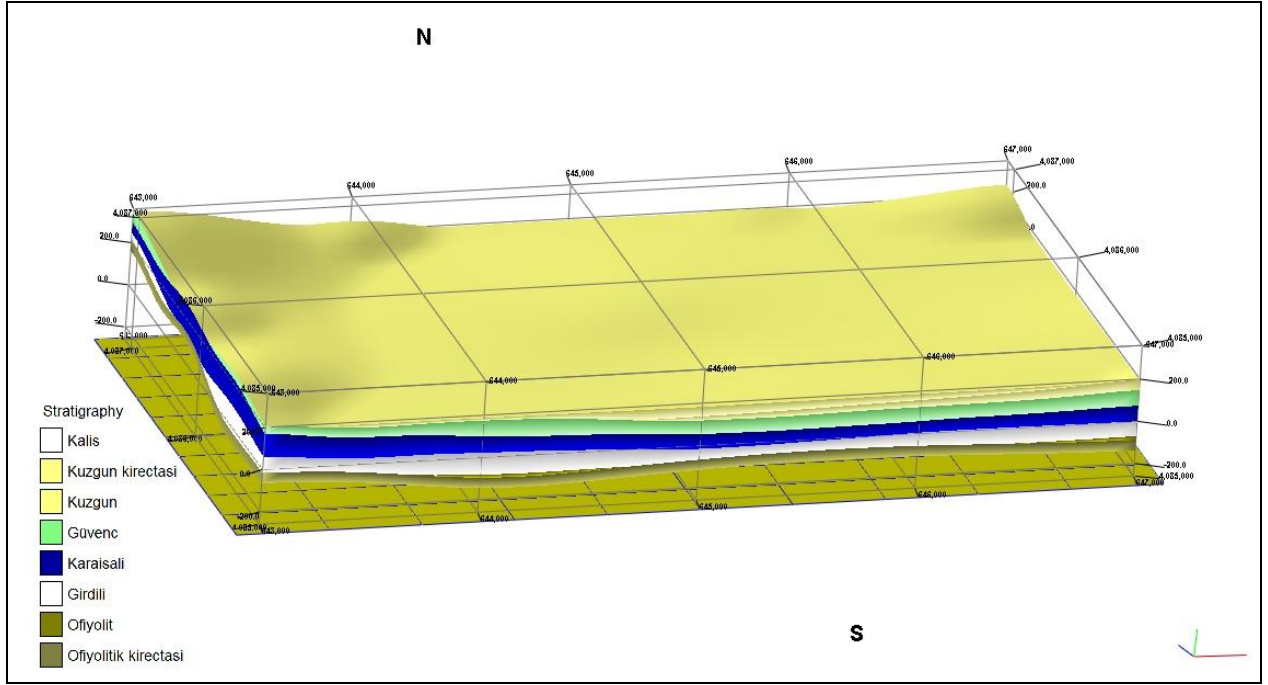


şekil 7: Ilıca jeotermal alanında kuyuların derinliklerini ve fitre seviyelerini gösterir 3 boyutlu harita

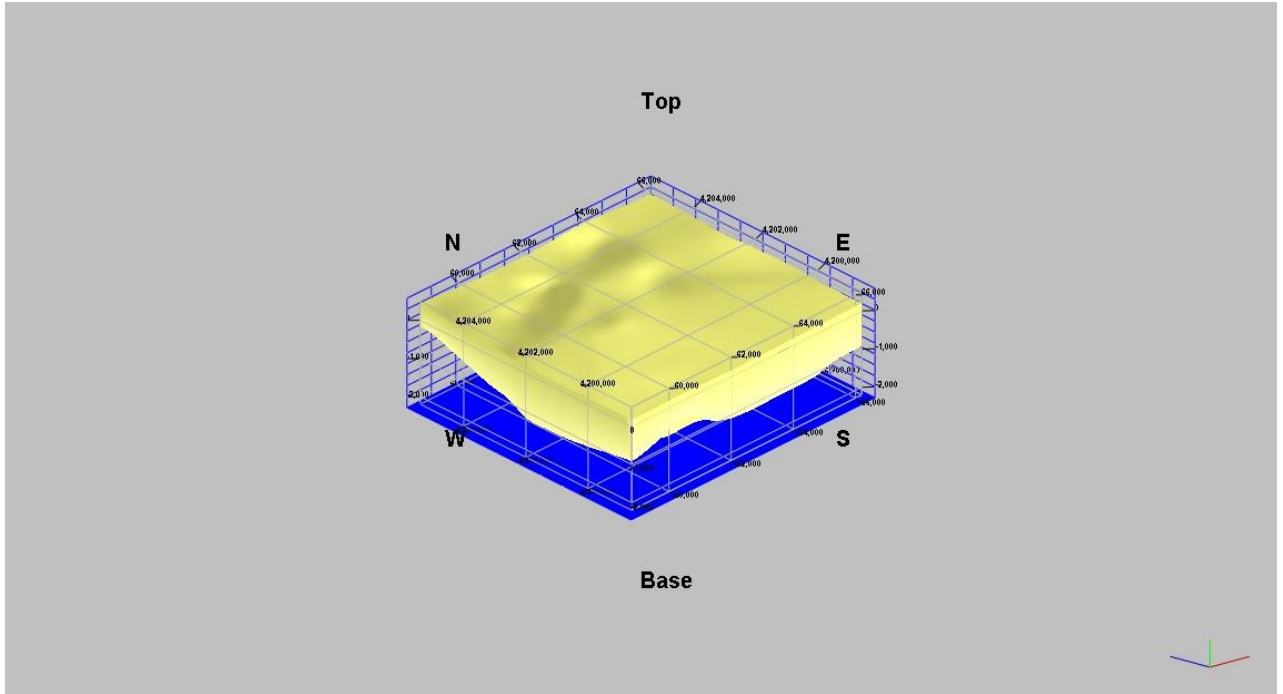


Şekil 8: Ilıca jeotermal sahası kuyuları ve üretim sıcaklıklarının 3 boyutlu dağılımı

Aşağıda da Rock Work ile yapılmış bazı jeotermal alanlara ait kavramsal jeolojik modeller görülmektedir (Şekil)



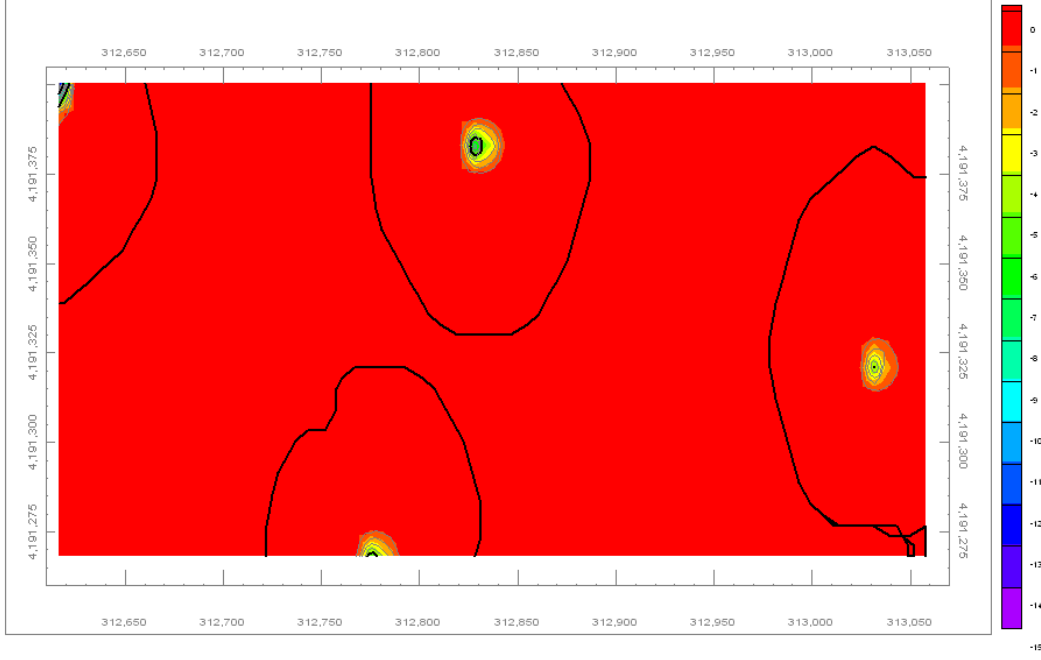
Şekil Bir jeotermal alanın jeoloji modeli



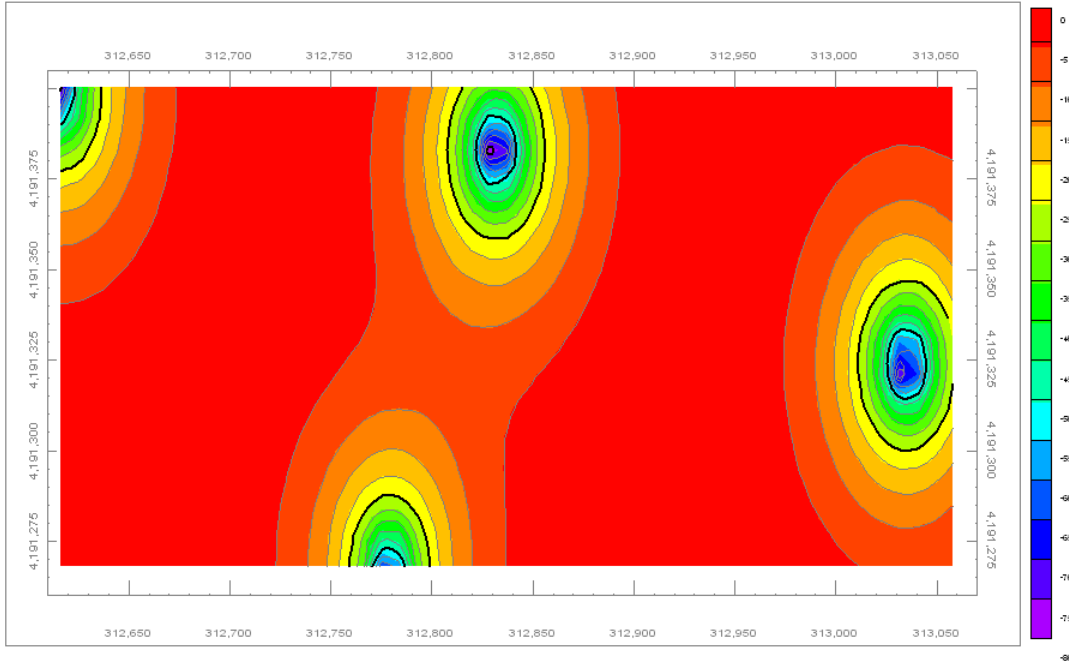
Şekil : Kızıldere jeotermal alanı kavramsal jeoloji modeli

Aynı rezervuarda açılmış kuyuların birbirini etkilemesi ya da reenjeksiyon kuyularının üretim kuyularına olan etkileri bir çok model ile simule edilebilir. Wellz ve RockWorks bunlardan

bazılarıdır ve çok sayıda model mevcuttur. Aşağıda Ilıca jeotermal alanında açılan kuyuların etkileşimi RockWork içindeki bir modül ile simüle edilmiştir.



Şekil 10: MTA tarafından belirlenen kritik debilerle üretim yapıldığında 24 saat içinde oluşan düşüm konileri ve kuyuların etki sınırları



Şekil 11: MTA tarafından belirlenen kritik debilerle üretim yapıldığında 5 yıl sonra oluşacak düşüm konileri ve kuyuların etki sınırları

Derin jeotermal sistemlerde modelleme çalışmalarında bir çok zorluklar da ortaya çıkar, bunlar şu şekilde sıralanabilir;

Derin jeotermal projelerde zorluklar;



Yer altı yapısının doğru belirlenmesi;
(Tabakalanma, seriler, faylar ve çatlaklar)



Hidrolik akım yollarının belirlenmesi;
(Porozite, permeabilite, hidrolik iletkenlik)

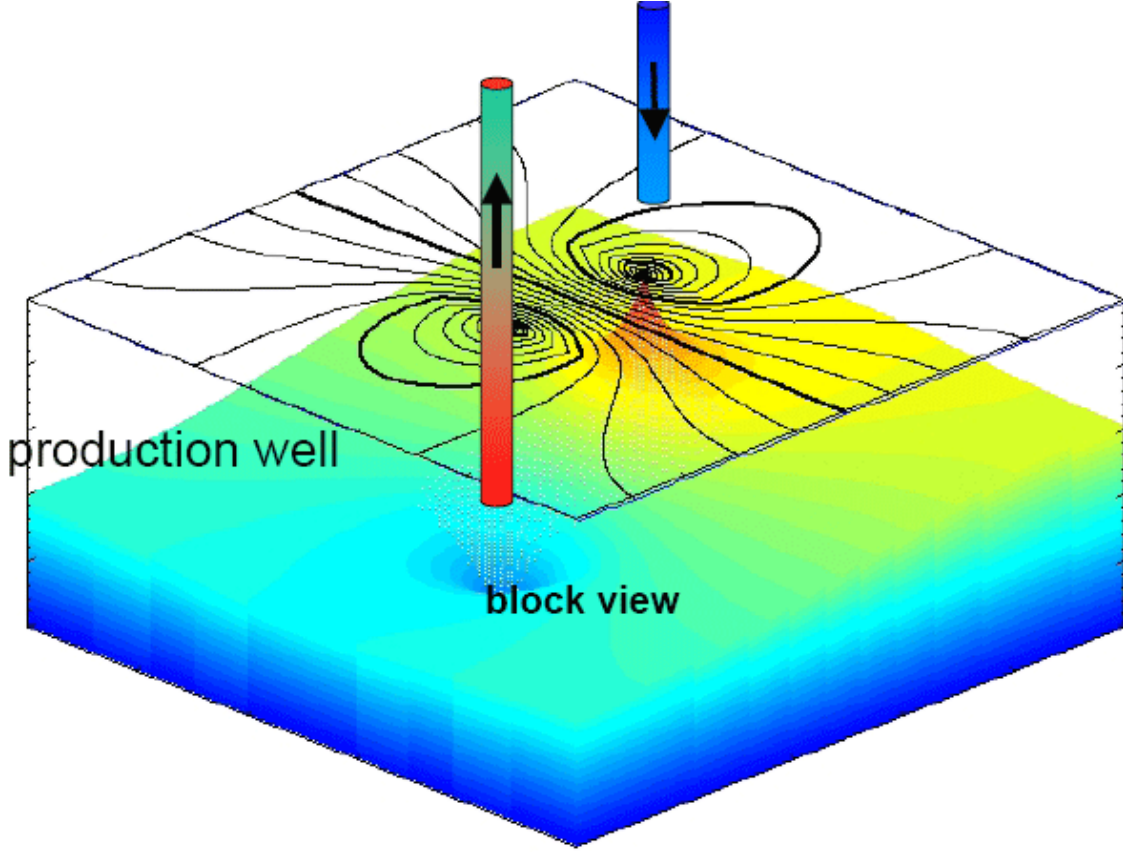


Rezervuar sıcaklığının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi;
(Sıcaklık gradyanı, termal iletkenlik, ısı üretimi)

Rezervuar simülasyonu için çok sayıda yazılım mevcuttur, bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

	Code	Discretisation	GUI	Flow processes	Transport	Mechanics	Global Feat.
1	COMSOL Multiphys.	FE unstructured	Yes	Any Physical Process			A.
2	FEFLOW	FE 2D/3D unstructured	Yes	Darcy laminar Faults (Darcy)	Heat Transport Multicomponent transport		A., B., D.
3	FEHM	FE 2D/3D unstructured FV 2D/3D Faultzones and Dual-Porosity	Yes	Darcy laminar Faults (Darcy)	Heat Transport Multicomponent transport Multiphase transport	Elasticity	A., B., D.
4	Fracas	FV Stochastic Fracture Network	No	Darcy laminar Faults (turbulent)	Heat Transport Multiphase transport	Deformation and Mohr Coulomb	D., E.
5	FRACTure	FE 2D/ 3D unstructured Faultzones and Stochastic fractures	Yes	Darcy laminar Darcy non linear Faults (Darcy)	Heat Transport Multicomponent transport	Deformation and Mohr Coulomb	A., B., C., D.
6	GeoCrack 3D	FE 2D/ 3D unstructured Faultzones and Dual-Porosity		Darcy laminar	Heat Transport Heat diffusion in porous media	Deformation	A., B., C., D.
7	HST3D	FD Regular	Yes	Darcy laminar	Heat Transport		A.
8	ROCKFLOW	FE 2D/ 3D unstructured Adaptive Mesh Faultzones	Yes	Darcy laminar Darcy non linear Faults (turbulent)	Heat Transport Multiphase transport Multicomponent transport	Deformation	A., B., D.
9	SHEMAT	FD Regular	Yes	Darcy laminar	Heat Transport Multicomponent transport		A., B.
10	Sutra3D	FE 2D/ 3D regular	Yes	Darcy laminar	Heat Transport Multicomponent transport		A., B., D.
11	THOUGH2	FV Regular Faultzones and Dual-Porosity	Yes	Darcy laminar	Heat Transport Multicomponent transport		A., B., C., D.

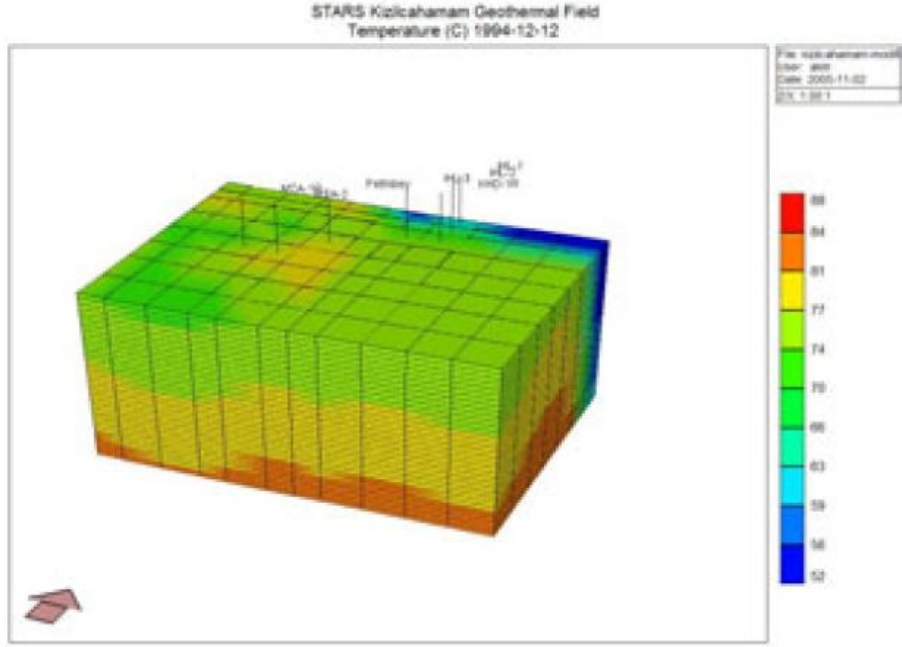
Örnek Rockflow (Zimmermann) yazılımı ile Schönebeck sahasında yapılan bir simülasyonda üretim ve reenjeksiyon kuyusu etkileşimi araştırılmıştır (Şekil).



Şekil : Üretim-reenjeksiyon kuyusu etkileşimi

Günümüzde reenjeksiyon kuyularının lokasyon seçimi ve enjeksiyon debisi gibi operasyonel parametrelerinin optimizasyonu sayısal rezervuar simülatörleri aracılığıyla yapılmaktadır. Çoğunlukla bir kaç lokasyon ve enjeksiyon debisi denenerek sistemin basınç ve sıcaklık tepkisi görülmektedir.

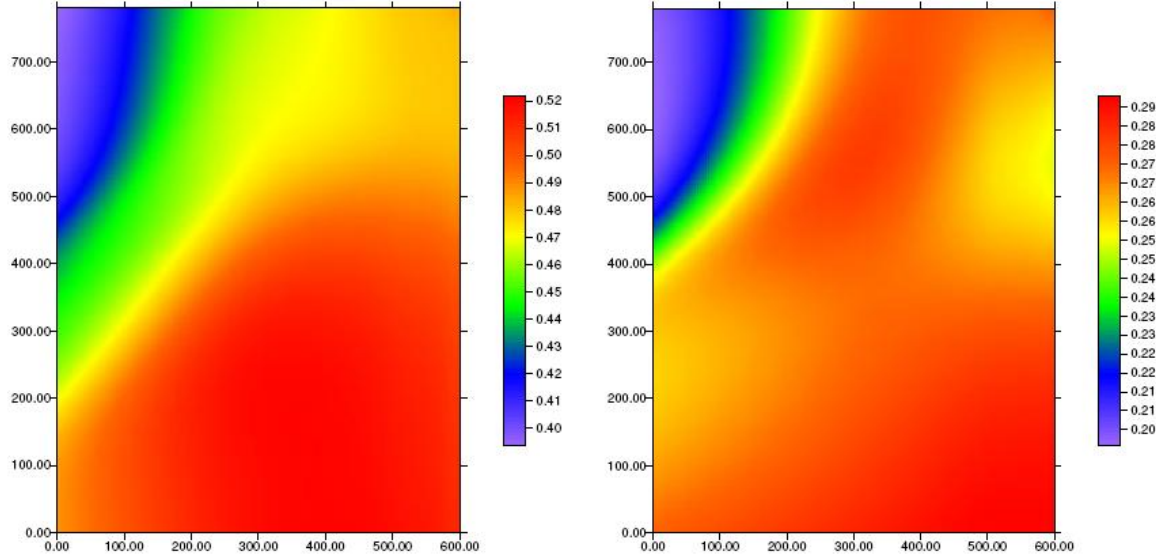
Örneğin bir simülasyon modeli ile yapay sinir ağı geribasım noktası optimizasyonu çalışmaları sırasıyla yüksek sıcaklıklı Kızıldere ve düşük sıcaklıklı Kızılcahamam jeotermal sahaları için yapılmıştır(Şekil).



Şekil 1. Kızılcahamam sahası sayısal modeli blok yapısı ve ilk sıcaklık dağılımı .

(M. Parlaktuna'dan alınmıştır)

İkinci örnek ise Kızıldere Jeotermal Sahası olarak seçilmiştir. Rezervuar formasyonu (İğdecik) 8x12x6 adet eşit kalınlıkta 60 metrelik bloklara bölünmüştür. En son katman kalın (5000 m) olarak tasarlanmış ve termal akifer katmanı olarak düşünülmüştür. Matriks geçirgenliği sabit 1 md alınmıştır. Öte yandan matriks blok boyutları 20 metre ve bu de_ere uyumlu olarak çatlak geçirgenliği alansal olarak dikey geçirgenliğin 10 katı ve sabit (2 Darcy) olarak tanımlanmıştır. Çatlak gözenekliliği ise sabit, 0.08 olarak varsayılmıştır. Çatlak görel geçirgenlikleri doymuşluğun üssel fonksiyonu olarak ($n=2.8$) alınmıştır. Bir önceki örnekte olduğu gibi tarihsel çakışma elde edilmesi için alansal çatlak yoğunluğu, çatlak gözenekliliği ve geçirgenliği değiştirilmiştir.



Şekil : 2500 m³/gün enjeksiyon debisi için elde edilmiş sonuçlar (sol boyutsuz entalpi, sağdaki ise boyutsuz basınç) (M. Parlaktuna'dan alınmıştır)

Bir başka araştırmada araştırmada, Kızıldere Jeotermal Sahası'nın güncel problemlerine kabul edilebilir çözümler getirmek amacıyla sahanın gelecek durumunu öngörmek amaçlanmıştır. Jeotermal sahanın eşitsiz olmayan mekanizması, basınç ve sıcaklık değişkenleri için simüle edilmiştir. Bu amaçla, jeolojik durum ve alanda daha önceden açılmış bulunan kuyular dikkate alınarak, sahanın bir sonlu elemanlar modeli (750 nod ve 696 dört-nodlu eleman) formüle edilmiştir. Daha sonra, uygun fiziksel özellikler, sınır ve başlangıç koşulları kullanılarak model, doğal hal için sahaya kalibre edilmiştir. Simüle edilen ve gözlenen basınç ve sıcaklıklar çok başarılı bir kalibrasyon çalışmasını vurgulamaktadır. Kalibrasyondan sonra, 1984–2006 zaman aralığında sahanın üretim ve enjeksiyona tepkisi tarihsel eşleştirme çalışması uygulanarak simüle edilmiştir. Tarihsel eşleştirme çalışması, basınç ve sıcaklık değişkenlerinin gözlenen ve hesaplanan değerleri arasında çok iyi korelasyon sağlamıştır. Kalibre edilen ve tarihsel eşleştirmesi yapılan model, sahanın değişik üretim ve enjeksiyon senaryolarındaki gelecek performansını simüle etmek için sahaya uygulanmıştır. Birinci senaryoda saha, halen devam eden üretim koşulu sonraki on yıllık üretim sürecinde de sürdürülerek simüle edilmiştir. Daha sonra, yeni iki kuyunun üretimlerinin etkisi iki değişik senaryoda araştırılmıştır. Dördüncü senaryoda, üretim kuyularından birinden uygulanan enjeksiyonun etkisi simüle edilmiştir.

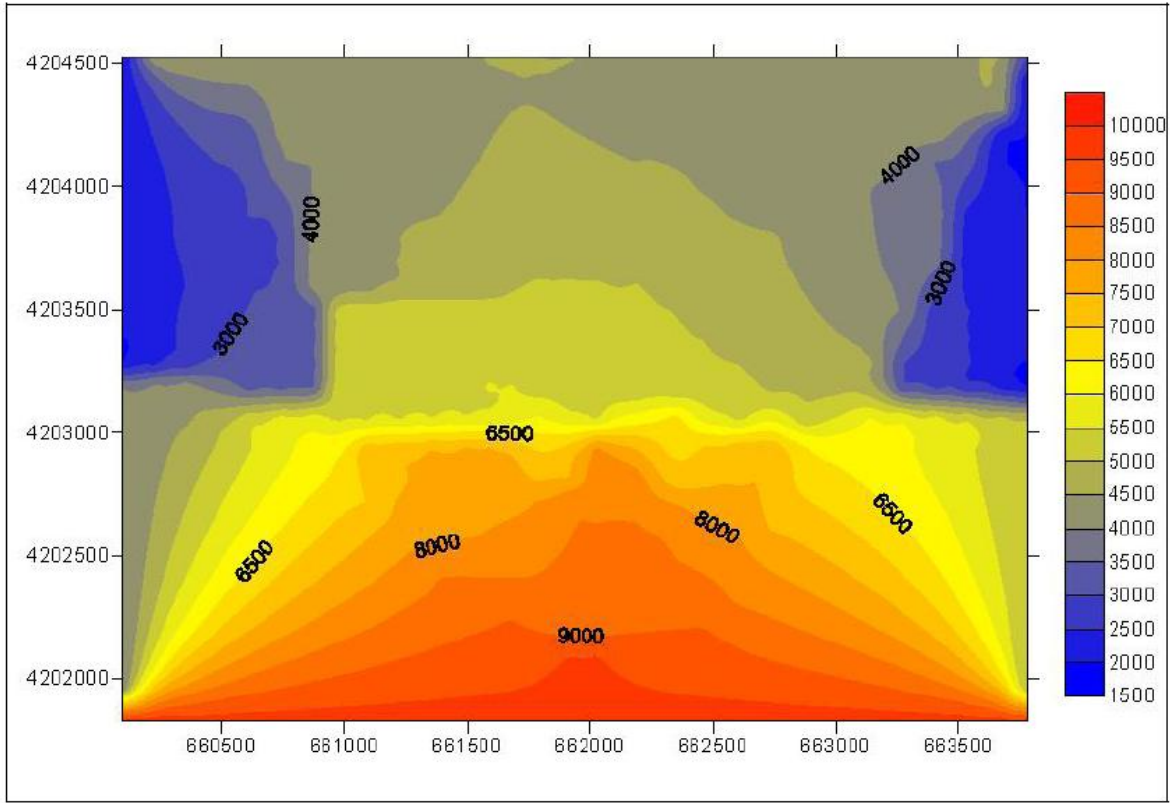


Figure 3.7 Kızıldere jeotermal alanında doğal basınç dağılımı (M. Özkaya, 2007'den alınmıştır)

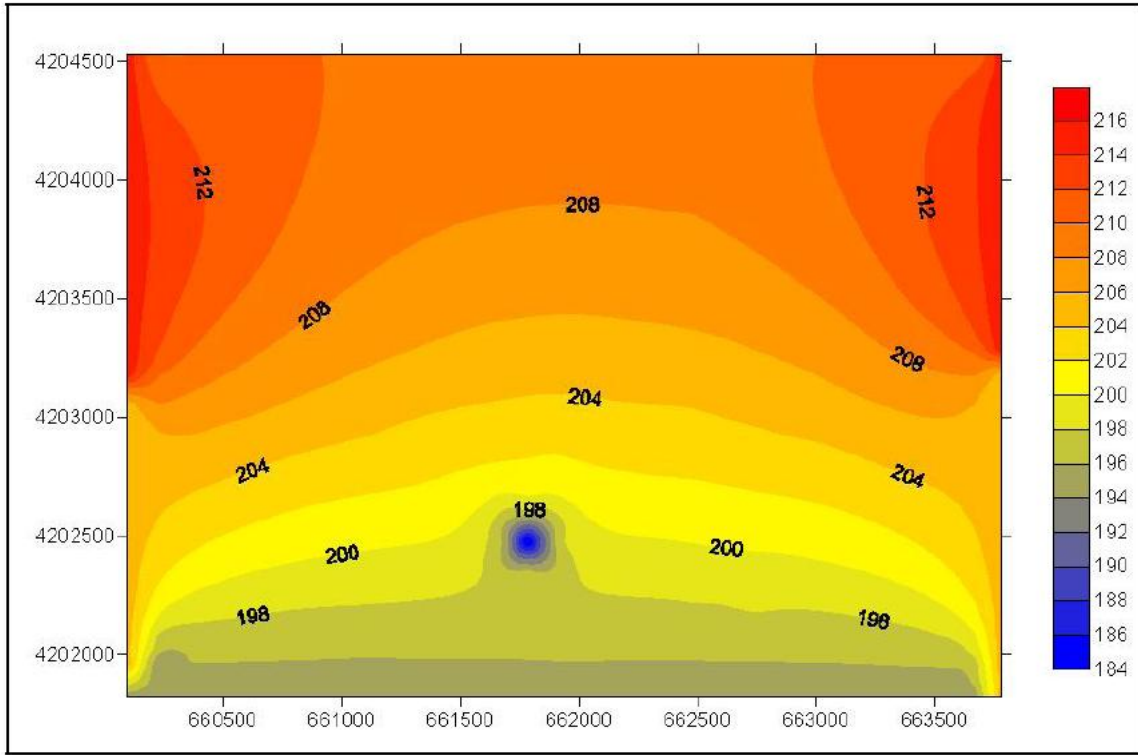


Figure 3.21 Sıcaklık dağılımı (M. Özkaya, 2007'den alınmıştır)

Kaynaklar

Akın Serhat, Parlaktuna Mahmut; Jeotermal Sahalarda Yapay Sinir Ağları Kullanılarak En Uygun Ger_Basım Lokasyonunun Bulunması, Jeotermal Enerji Semineri

Alcaraz S., Lane R., Spragg K, Milicich1 S., Sepulveda F. and Bignall G., 3D GEOLOGICAL MODELLING USING NEW LEAPFROG GEOTHERMAL SOFTWARE; PROCEEDINGS, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 - February 2, 2011 SGP-TR-191

Cerit, Orhan; Modellemeye Giriş.Tanımlar, Kavramlar, Model Sınıflandırmaları, Ders notu

Demirel Zeynel; Çevresel Modelleme Ders Notları, Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

Despotakis, V., Giaoutzi, M., and P. Nijkamp, (1993); Dynamic GIS models for regional sustainable development. In: Fischer. M. And P. Nijkamp [Eds.]: *Geographic Information Systems: Spatial Modelling and Policy Evaluation*. (Berlin:Springer) 235-261

Kohl Thomas, Baujard Clement ve Zimemmermann Günter; Modelling of Geothermal Reservoirs, ENGINE-ENhanced Innovative Network for Europe. Mid term Conference

Özkaya Melike; Numerical Modeling Of Kızıldere Geothermal Field A Master Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University December 2007

Pechnig Renate and Mottaghy Darius; Geothermal Reservoir Characterization and Modelling, GEOPHSICA, Beratungsgesellschaft, Freiburg 2010

Speranza A. et al; Geothermal modelling Modelling of geothermal reservoirs; Modelling week 2009, Madrid