

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ (Alkali Jeotermometreler)

□ Alkali elementlerin katı ve sıvı fazlar arasındaki dağılımını temel almaktadır.

e.g.  $K^+ + Na\text{-feldspat} = Na^+ + K\text{-feldspat}$

□ Başlıca alkali jeotermometreleri

- Na/K jeotermometresi

- Na-K-Ca jeotermometresi

- Na-K-Ca-Mg jeotermometresi

- Diğerleri (Na-Li, K-Mg, ..) jeotermometreleri

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na/K Jeotermometresi

Jeotermometre	Eşitlik	Kaynak
Na-K	$T = [855.6 / (0.857 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Truesdell (1976)
Na-K	$T = [833 / (0.780 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Tonani (1980)
Na-K	$T = [933 / (0.993 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$ (25-250 °C)	Arnorsson vd. (1983)
Na-K	$T = [1319 / (1.699 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$ (250-350 °C)	Arnorsson vd. (1983)
Na-K	$T = [1217 / (1.483 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Fournier (1979)
Na-K	$T = [1178 / (1.470 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Nieva ve Nieva (1987)
Na-K	$T = [1390 / (1.750 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Giggenbach (1988)

Na, K derişimleri ppm cinsinden

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na/K Jeotermometresi

- Rezervuar sıcaklıklarının  $180^{\circ}\text{C}$ 'den yüksek olduğu sahalarda için uygundur.
- Düşük sıcaklıktaki sahalarda/sistemler için yanlış sonuçlar verebilir.
  - ❖ Feldspat mineralleri ile jeotermal sular arasındaki sıcaklığa bağımlı (alkali) alış-veriş tepkimeleri düşük sıcaklıklarda denge durumuna ulaşmamakta,
  - ❖ Jeotermal sulardaki Na/K oranları, kimyasal dengeden çok yan kayalardan katyon yıkanması süreci ile kontrol edilmektedir.
- Yüksek Ca içeriğine sahip sularda çok yüksek değerler (sıcaklıklar) vermektedir.

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na-K-Ca Jeotermometresi

Jeotermometre	Eşitlik	Kaynak
Na-K-Ca	$T = [1647 / (\log (Na/K) + \beta (\log (\sqrt{Ca/Na}) + 2.06) + 2.47)] - 273.15$ <p>a) <math>[\log \sqrt{Ca/Na} + 2.06] &lt; 0</math> için <math>\beta = 1/3</math> b) <math>[\log \sqrt{Ca/Na} + 2.06] &gt; 0</math> için <math>\beta = 4/3</math> c) <b>(b) de hesaplanan</b> <math>T &gt; 100^\circ\text{C}</math> ise <math>\Rightarrow \beta = 1/3</math> kullanarak yeniden <math>T^\circ\text{C}</math> hesabı</p>	Fournier ve Truesdell (1973)

Na, K, Ca içerikleri ppm cinsinden

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na-K-Ca Jeotermometresi

- CO2 veya Ca açısından zengin sistemlerde (*akışkan rezervuarı terk ettikten sonra kalsit çökeline uğramamışsa*) uygundur

kalsit çökeli mi durumunda

Ca ↘

$$T = \left[ \frac{1647}{\log (Na/K) + \beta (\log (\sqrt{Ca/Na}) + 2.06) + 2.47} \right] - 273.15$$

Ca içeriği ↘ (Ca su < Ca rezervuar akışkanı)

eşitlikteki payda ↘

(hesaplanan) sıcaklık ↗

- Yüksek Mg içeriğine sahip sular için, Na-K-Ca yanlış sonuçlar vermektedir. Bu tür sular için, Mg düzeltmesi gerekmektedir.

# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na-K-Ca-Mg Jeotermometresi

Jeotermometre	Eşitlik	Kaynak
Na-K-Ca-Mg	$T = T_{\text{Na-K-Ca}} - \Delta t_{\text{Mg}} \text{ } ^\circ\text{C}$ $R = (\text{Mg} / \text{Mg} + 0.61\text{Ca} + 0.31\text{K}) \times 100$ $R = 1.5 - 5$ $\Delta t_{\text{Mg}} \text{ } ^\circ\text{C} = -1.03 + 59.971 \log R + 145.05 (\log R)^2 - 36711 (\log R)^2 / T - 1.67 \times 10^7 \log R / T^2$ $R = 5 - 50$ $\Delta t_{\text{Mg}} \text{ } ^\circ\text{C} = 10.66 - 4.7415 \log R + 325.87 (\log R)^2 - 1.032 \times 10^5 (\log R)^2 / T - 1.968 \times 10^7 (\log R)^3 / T^2$ <p><math>\Delta t_{\text{Mg}}</math> değerinin negatif olması veya <math>R &lt; 1.5</math> durumunda Mg-düzeltilmesi uygulanmamaktadır.</p> <p><math>R &gt; 50</math>, sıcaklık = kaynaktan ölçülen sıcaklık kabul edilmektedir.</p> <p><math>\Delta t_{\text{Mg}}</math> hesaplaması için kullanılan eşitliklerde, T (sıcaklık) parametresi Kelvin cinsindedir</p>	Fournier ve Potter (1979)

Mg, K, Ca içerikleri ppm cinsinden

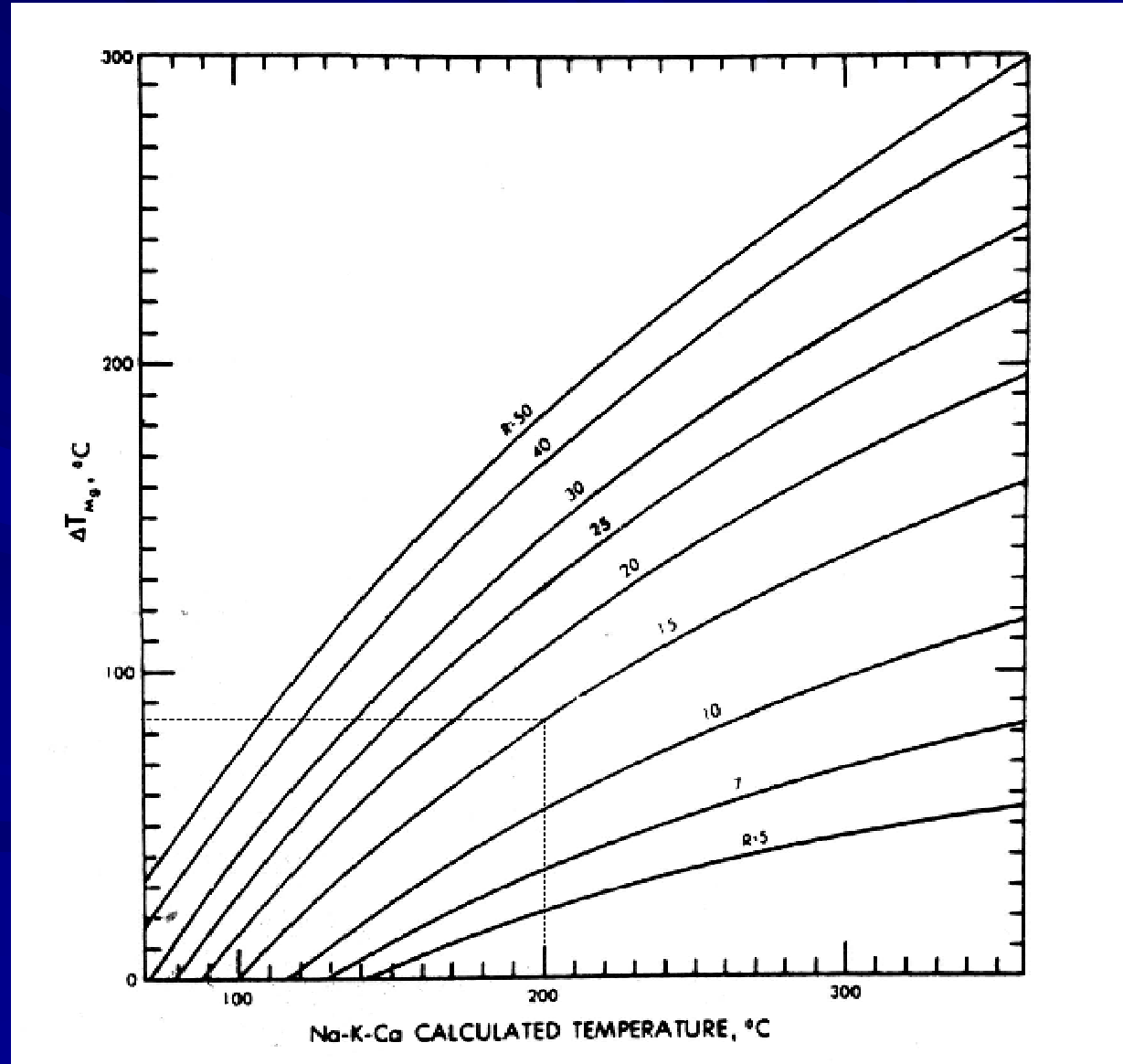
# KATYON JEOTERMOMETRELERİ

## Na-K-Ca-Mg Jeotermometresi

### ŞEKİL 4.

$\Delta t_{Mg}$   
parametresinin  
grafiksel olarak  
belirlenmesi  
(Fournier, 1981)

$$R = (Mg/Mg + 0.61Ca + 0.31K) \times 100$$



# SİLİKA-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

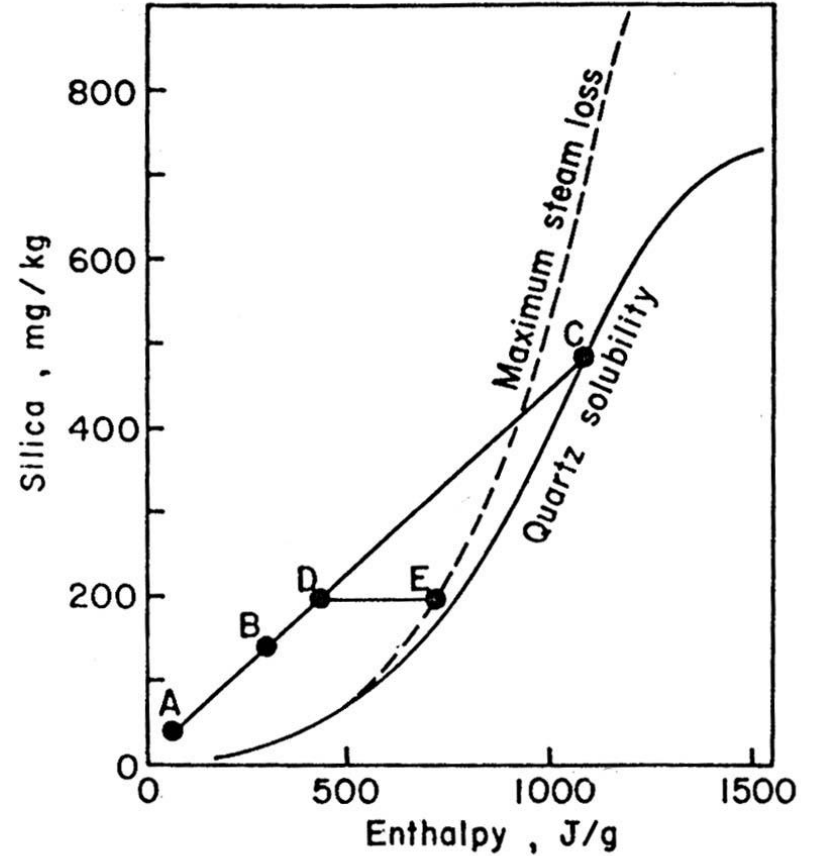
- Karışım sularının çözünmüş silika içerikleri, sıcak-su bileşeninin sıcaklığını belirlemede kullanılabilir.
- Çözünmüş silika içeriğinin, suyun entalpi değerine karşı çizildiği bir grafik oluşturulur.
- Entalpi değerleri, ölçülen sıcaklıklar kullanılarak, Buhar Tabloları'ndan bulunur.



# SİLİKA-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

## ŞEKİL 5.

Silika-entalpi karışım modelini gösterir diyagram (Fournier, 1981).



# SİLİKA-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

A = soğuk su bileşeni

B, D = karışım suları (ılık sular)

C = rezervuar koşullarındaki sıcak su bileşeni

(karışımдан önce **buhar kaybı olmadığı** varsayımına göre)

E = rezervuar koşullarındaki sıcak su bileşeni

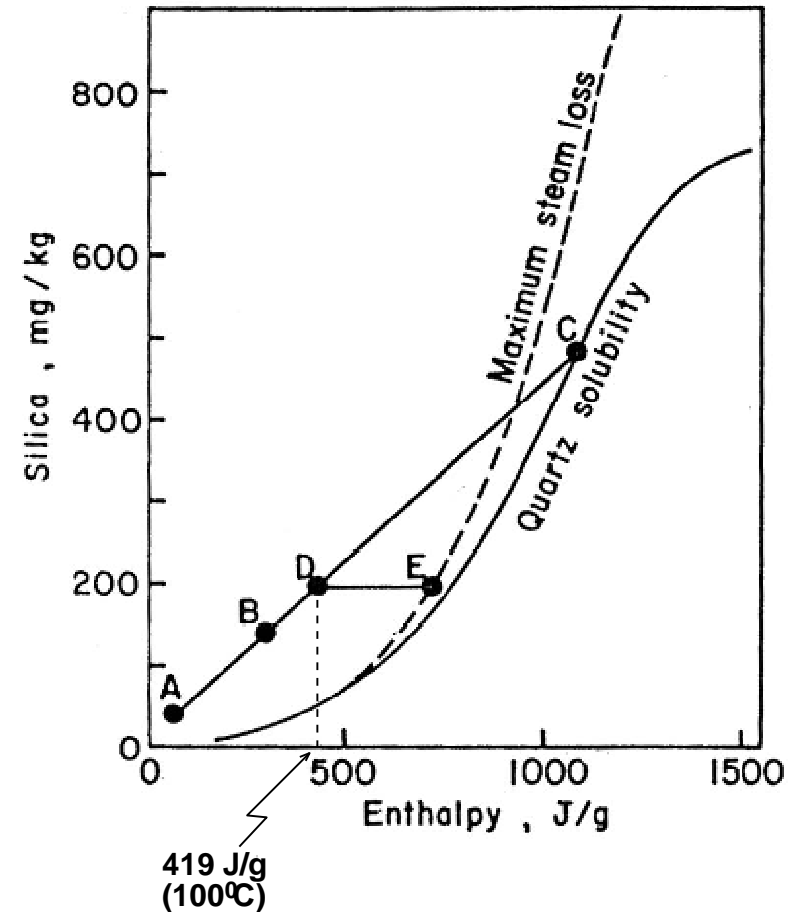
(karışımдан önce **buhar kaybı olduğu** varsayımına göre)

**Kaynama**

**T = 100 °C**

**Entalpi = 419 J/g**

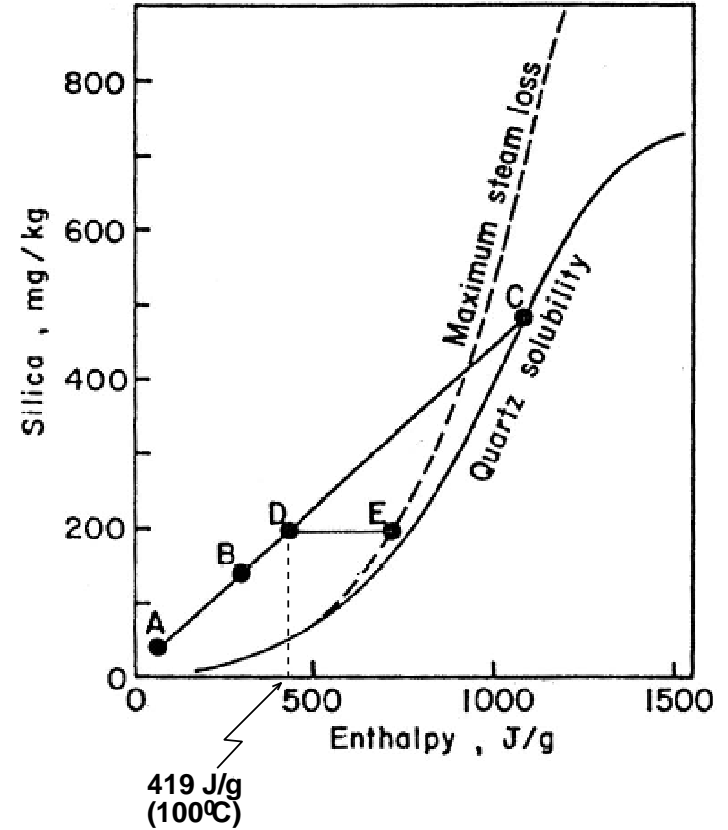
**(D noktası)**



# SİLİKA-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

## Karışımdan önce buhar kaybı olmadığı varsayımı

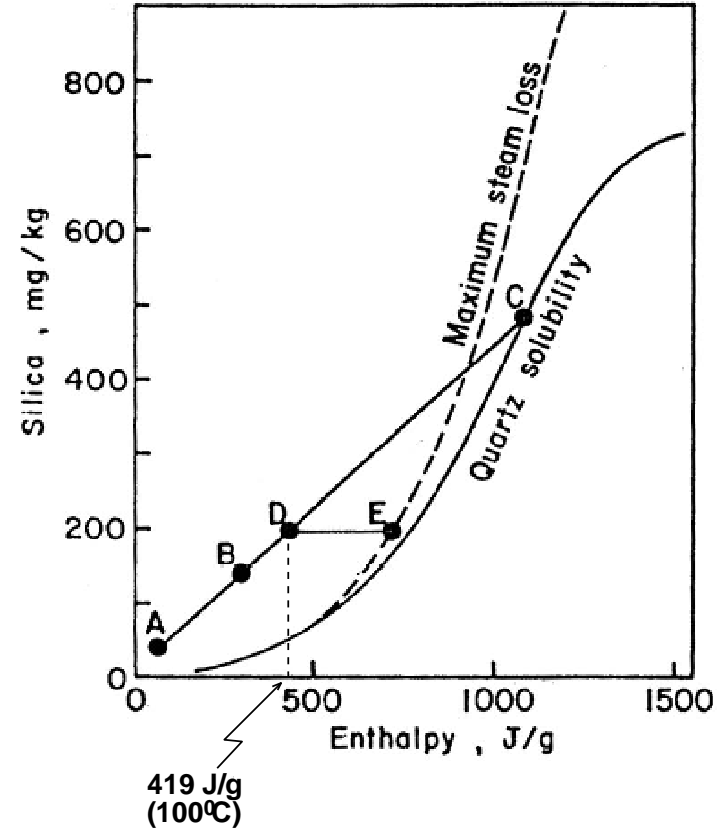
- Su örneklerinin silika içerikleri ve entalpi değerleri diyagrama yerleştirilir.
- Karışım sularını (B, D), soğuk su bileşeni (A) ile birleştirecek bir karışım doğrusu oluşturulur.
- Karışım doğrusunun kuvars çözünürlük eğrisini kestiği nokta (C), rezervuar koşullarındaki sıcak su bileşenini verir.
- C noktasındaki entalpi değerine karşı gelen sıcaklık, Buhar Tabloları'ndan bulunur ve bu sıcaklık rezervuar sıcaklığı olarak kabul edilir.



# SİLİKA-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

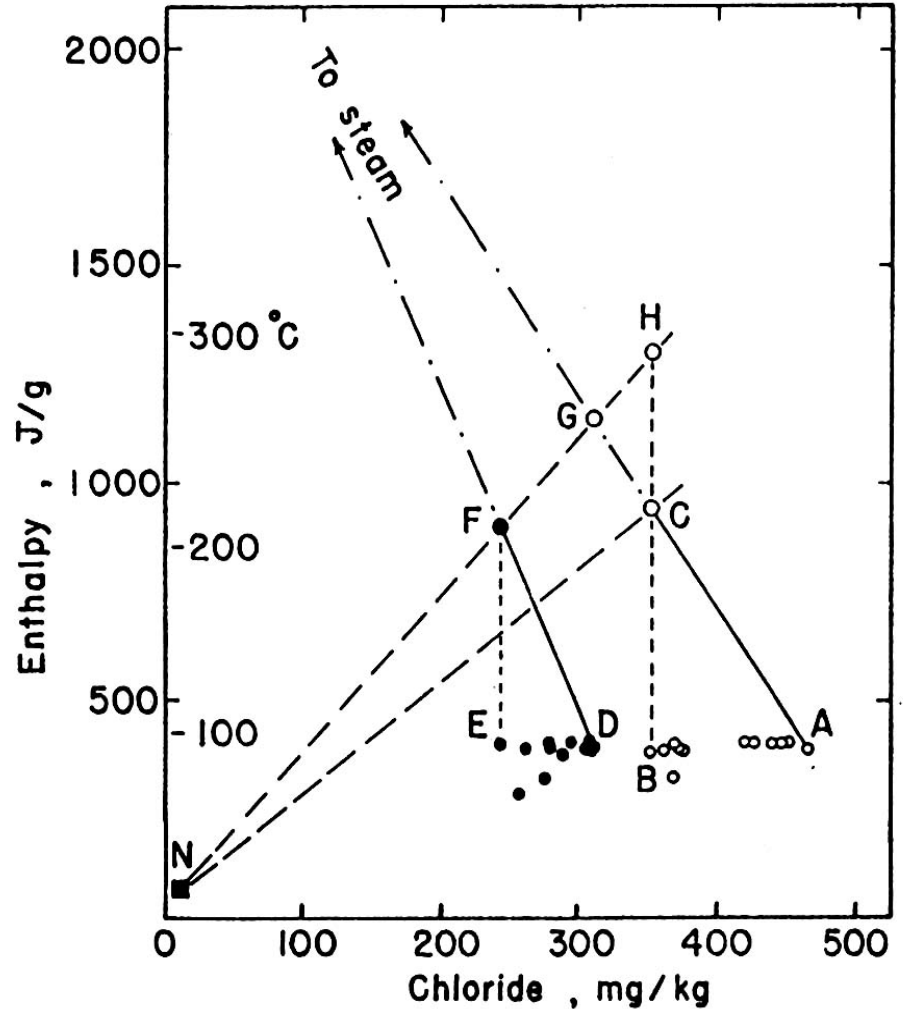
## Karışımın önce buhar kaybı olduğu varsayımı

- Kaynama noktasındaki ( $100^{\circ}\text{C}$ ) entalpi değeri ( $419 \text{ J/g}$ ) Buhar Tabloları'ndan bulunur.
- $419 \text{ J/g}$  entalpi değerinden düşey bir doğru çizilir.
- Bu doğrunun, karışım doğrusu (AD) ile kesiştiği noktadan (D) yatay bir doğru çizilir (DE).
- Yatay doğrunun (DE) buhar kaybına uğrayan kuvars çözünürlük eğrisini kestiği nokta (E), rezervardaki sıcak su bileşeninin entalpisini verir.
- Söz konusu entalpiye karşı gelen rezervuar sıcaklığı Buhar Tabloları kullanılarak bulunur.



# KLOR-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

■ **Şekil 6.** A.B.D.'de Yellowstone Milli Parkındaki suların entalpi-klor diyagramları. İçi boş ve dolu daireler, sırasıyla, *Geyser Hill* ve *Black Sand* tipi suları göstermektedir (Fournier, 1981).



# KLOR-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

## REZERVUAR SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ

### ■ Geyser Hill-tipi sular

A = max. Cl

B = min. Cl

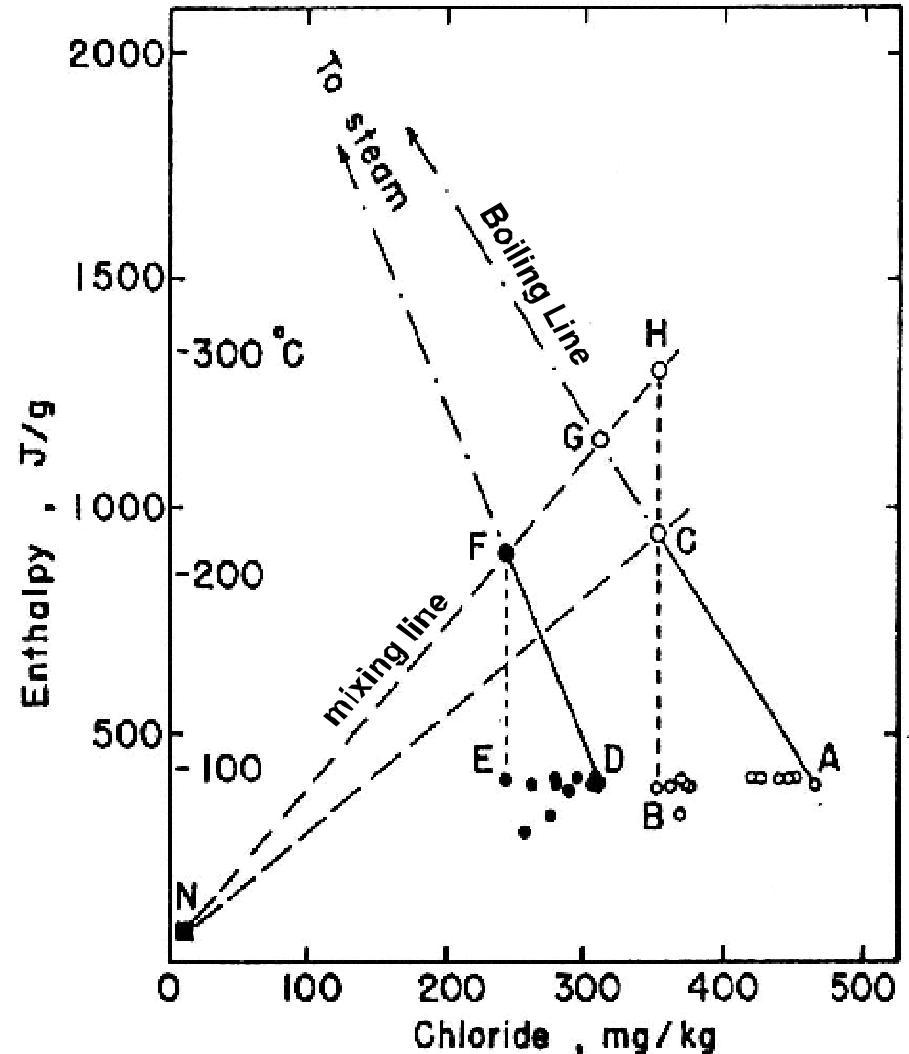
A noktasını 100 °C'deki buhar entalpisine (2676 J/g) birleştiren kaynama doğrusu ile B noktasından çizilen düşey doğrunun kesişim noktası C = rezervuar koşullarındaki min. entalpi

### ■ Black Sand-tipi sular

D = max. Cl

E = min. Cl

D noktasını 100 °C'deki buhar entalpisine (2676 J/g) birleştiren kaynama doğrusu ile E noktasından çizilen düşey doğrunun kesişim noktası F = rezervuar koşullarındaki min. entalpi



# KLOR-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

## SULARIN KÖKENSEL İLİŞKİLERİ

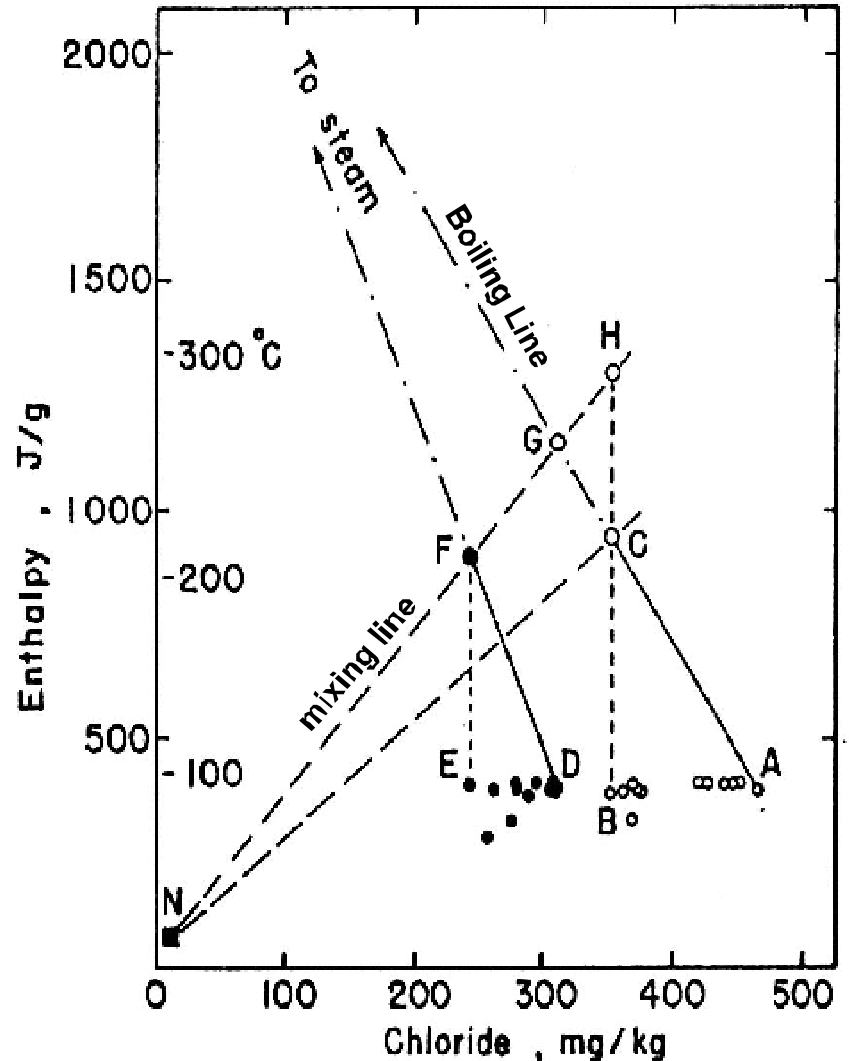
- N = soğuk su bileşeni
- C, F = sıcak su bileşenleri

F, C'den daha seyreltik ve biraz daha soğuk

F ile C bileşenleri arasındaki kökenel ilişki bir karışım süreciyle açıklanamaz

(F bileşeni, sıcak su (C) ve soğuk su (N) bileşenleri arasındaki karışım doğrusunun (CN) üzerinde yer almamaktadır)

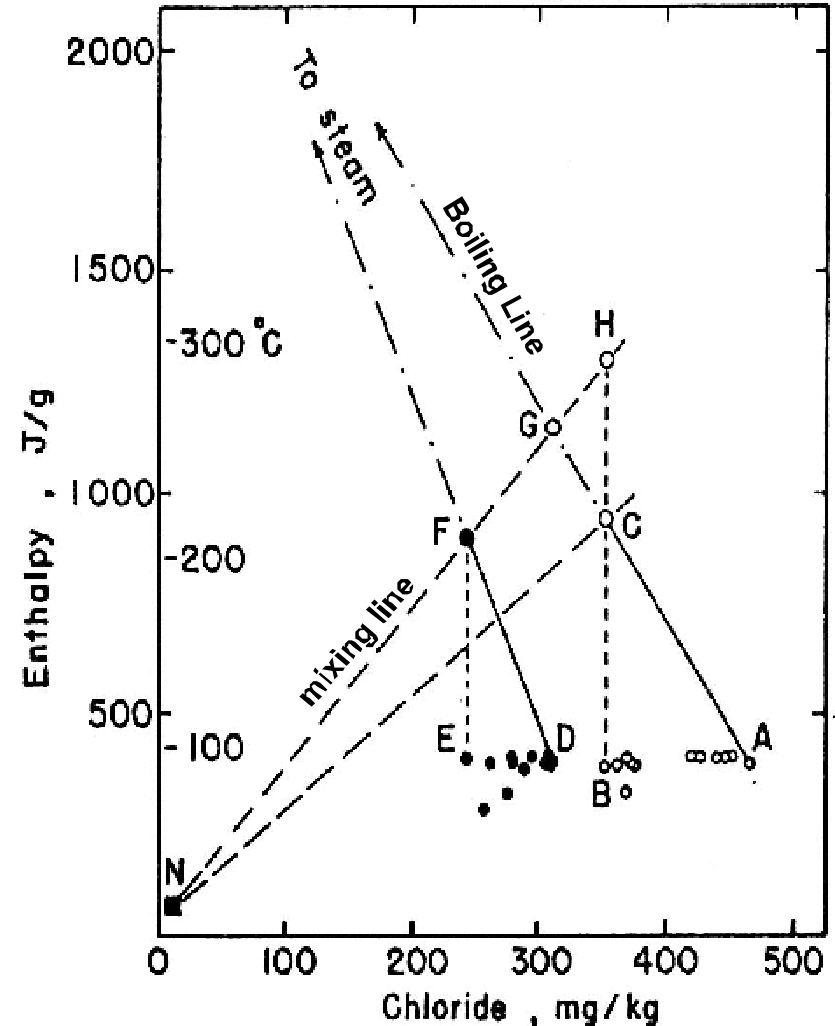
C ve F, olasılıkla, daha yüksek entalpiye sahip (G veya H) sularla kökenel ilişki içindedirler.



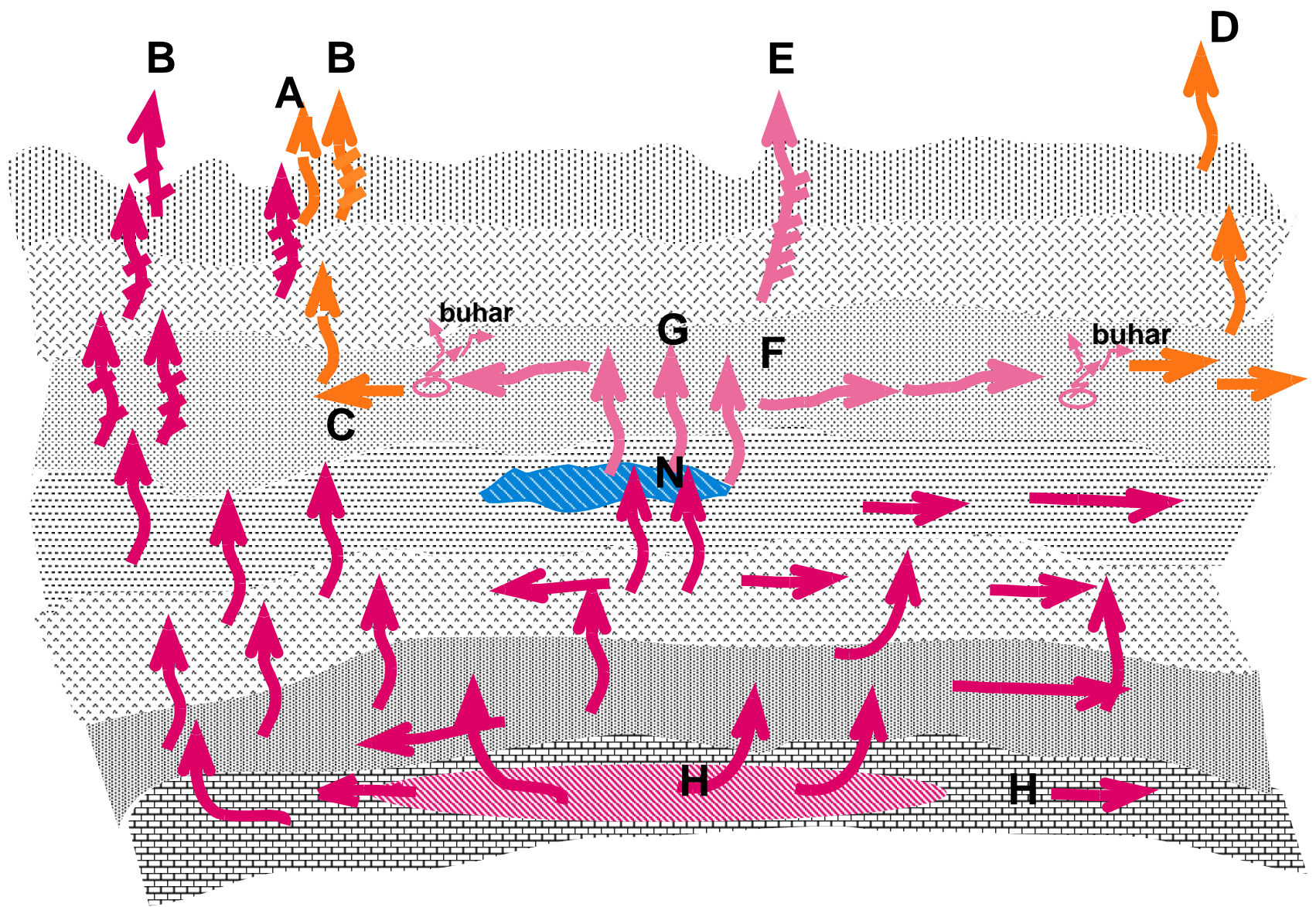
# KLOR-ENTALPİ KARIŞIM MODELİ

## SULARIN KÖKENSEL İLİŞKİLERİ

- **C** ve **G** bileşenlerinin kökenisel ilişkisi  $\Rightarrow$  **kaynama süreci**
- **C** ve **H** bileşenlerinin kökenisel ilişkisi **kondaktif soğuma**
- **F** ve **G** veya **F** ve **H** bileşenlerinin kökenisel ilişkisi  $\Rightarrow$  **soğuk su (N) ve sıcak su (G veya H) arasındaki karışım süreci**







 Sıcak su

 Karışım suyu

 Kaynamadan geri kalan artık sıvı



Buhar



Soğuk su rezervuarı



Sıcak su rezervuarı



Kondaktif soğumaya maruz kalan sıcak su



Kondaktif soğumaya maruz kalan karışım suyu



Kondaktif soğumaya maruz kalan artık sıvı

$$R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$$

# (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)

İzotopik oran,  $R$ , bir elementin belirli bir izotopu ile aynı elementin en bol bulunan bir diğer izotopu arasındaki oran olarak tanımlanır. Örneğin, karbon elementi için bu oran aşağıdaki şekilde yazılır.

$$R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$$

Herhangi bir örnekteki izotop kütle oranı ( $R_{\text{Örnek}}: ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) tam olarak belirlenemez ancak, referans veya standart olarak alınan bir maddenin ( $R_{\text{Std.}}$ ) aynı izotop oranı ile karşılaştırılabilir. Böylece, örneğe ait izotop oranının standart malzemenin izotop bileşiminden olan sapması  $\delta$  notasyonu şeklinde ifade edilir.

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{Örnek}} - R_{\text{Std.}}}{R_{\text{Std.}}} \times 1000$$

# (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)

Ayrışma faktörü,  $\alpha$ , iki farklı bileşikte (I ve II gibi) yer alan bir elemente ait izotop kompozisyonlarının oranı olarak tanımlanır (*karbon örnek olarak alınır*).

$$\alpha_{\text{I-II}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{I}} + 1000}{\delta^{13}\text{C}_{\text{II}} + 1000}$$

Sıcaklık bağımlı olan ayrışma faktörü,  $\alpha$ , aşağıdaki denklem ile de ifade edilebilir:

$$1000 \ln \alpha_{\text{II}}^{\text{I}} = \Delta_{\text{I-II}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{I}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{II}}$$

$$\ln \Delta_{\text{I-II}} = \ln \frac{R_{\text{I}}}{R_{\text{II}}} = A + \frac{10^3 B}{T} + \frac{10^6 C}{T^2} \text{‰}$$

Böylece, bir elementin iki farklı bileşikte tespit edilen izotop kompozisyonları ( $\Delta_{\text{I-II}} = \delta_{\text{I}} - \delta_{\text{II}}$ ) denge sıcaklığının belirlenmesinde kullanılabilir.

# GAZ JEOTERMOMETRELERİ (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)

Jeotermal akışkanlar başta karbondioksit olmak üzere, metan, hidrojen ve su buharı gibi çeşitli gazlar içermektedir. İzotopların jeotermal akışkandaki bileşikler arasındaki nispi dağılımı sadece sıcaklık tarafından denetlenmektedir. Böylece, bu bileşiklerden herhangi ikisi arasında gerçekleşen izotop dengesi jeotermometre olarak kullanılabilir. Bu kapsamda, aynı elementi içeren iki farklı bileşikte söz konusu elementin izotop oranları (örneğin,  $\delta_I$  ve  $\delta_{II}$ ) analiz edilerek  $\Delta$  bulunur ( $\Delta_{I-II} = \delta_I - \delta_{II}$ ) ve aşağıda verilen genel jeotermometre denkleminde yerine konularak sıcaklık hesaplanır (T Kelvin olarak).

$$\ln \Delta_{I-II} = \ln \frac{R_I}{R_{II}} = A + \frac{10^3 B}{T} + \frac{10^6 C}{T^2} \text{‰}$$

# GAZ JEOTERMOMETRELERİ (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)

Tüm gaz jeotermometrelerinde, iki farklı gaz bileşiği arasında (I ve II bileşikleri) genel bir sıcaklık ilişkisi mevcuttur. Bu denklemde yer alan A, B ve C katsayıları, aralarındaki denge göz önüne alınarak sıcaklık hesaplanacak her bileşik çifti için farklıdır. Jeotermal akışkanlarda en sık gözlenen CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> çifti için katsayıların esas alındığı denklemin yanı sıra, doğrudan  $\Delta$  değerinin kullanıldığı eşitlikler de geliştirilmiştir.

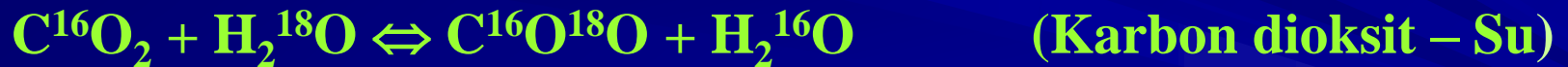
$$\ln \Delta_{I-II} = \ln \frac{R_I}{R_{II}} = A + \frac{10^3 B}{T} + \frac{10^6 C}{T^2} \text{‰}$$

# **GAZ JEOTERMOMETRELERİ (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)**

**Bileşiklerin izotopik olarak dengede olabilmeleri için:**

- Belirli bir sıcaklıkta farklı kökenli benzer bileşikler ile karışım olmadığı;**
- Rezervuarda sağlanan izotopik dengenin örnekleme noktasında da devam ettiği;**
- Örnekleme ile analiz arasında geçen süre boyunca izotopik değişim hızının bir başka izotopik dengenin kurulmasına olanak tanımayacak kadar yavaş olduğu kabul edilmelidir.**

Rezervuar sıcaklığı hesaplamalarında kullanılan bileşik çiftleri ve bunlar arasında gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda listelenmiştir. Bu reaksiyonlarda, bileşikler arasındaki izotop değişimleri ayrıca gösterilmiştir.



## İzotop jeotermometre eşitliklerinde kullanılan A, B ve C katsayıları

Jeotermometre	İzotop	Kaynak	A	B	C
CO <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	δ <sup>13</sup> C	Bottinga (1969) Richet et al. (1977)	-9.560	15.25	2.432
		Ohmoto and Rye (1979)	$\Delta_{I-II} = 4.194 \times 10^8 T^3 - 5.21 \times 10^6 T^2 - 8.93 \times 10^3 T^1 + 4.36$		
		Lyon and Hulston (1984)	$T = [15790 / (\Delta_{I-II} + 9.0)] - 173$ (°C)		
		Giggenbach (1982) Bottinga (1969)	$T = [22166 / (\Delta_{I-II} + 13.86)] - 273.15$ (°C)		
H <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	δD	Bottinga (1969) Richet et al. (1977)	-238.28	288.9	31.86
		Craig (1975)	$\ln \Delta_{I-II} = 181.27 \times 10^6 T^2 - 8.95 \times 10^{12} T^4 - 90.9$		
H <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	δD	Richet et al. (1977)	-217.3	396.8	11.76
CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	δ <sup>18</sup> O	Richet et al. (1977)	-8.87	7.849	2.941
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -H <sub>2</sub> O	δ <sup>18</sup> O	Lloyd (1968)	-5.60	0	3.251
		Mizutani and Rafter (1969)	-4.10	0	2.880
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -H <sub>2</sub> S	δ <sup>34</sup> S	Kusakabe (1974)	2.6	0	6.04



# GAZ JEOTERMOMETRELERİ (İZOTOPIK JEOTERMOMETRELER)

Gaz jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıklarının kimyasal jeotermometrelerden (silika ve katyon jeotermometreleri) elde edilen sıcaklıklardan yüksek çıkması sıkça rastlanılan bir durumdur.

- Gazlar arasındaki izotopik dengenin kimyasal dengeye göre daha yavaş gelişmesi,
- Yeraltı suyu ile karışım sonucunda termal akışkanın kimyasal kompozisyonun değişmesi,
- Akışkandaki bileşikler arasında kurulan izotopik dengenin diğer farklı kökenli bileşikler tarafından bozulması

gibi faktörler gaz ve kimyasal jeotermometreleri ile hesaplanan rezervuar sıcaklıklarının farklı çıkmasına neden olmaktadır.

# **BÖLÜM II.**

# **UYGULAMALAR**

# PROBLEM 1

Rezervuar sıcaklıkları (°C)

Kuvars	Kuvars-buhar kaybı	Kalsedon	Na/K	Na-K-Ca
179.27	167.58	158.05	184.79	206.17

Ömer-Gecek sahasında traverten oluşumlarının gözlenmesi demek, su bileşimine ilişkin olarak ölçülen Ca içeriğinin, rezervuar şartlarındaki içerikten düşük olması demektir.

Bu durumda, jeotermometre eşitliğindeki payda gerçek değerden daha düşük olacaktır. Bu ise elde edilen sıcaklığın, gerçek sıcaklıktan daha yüksek (overestimated) olmasına neden olacaktır.

Dolayısıyla Na-K-Ca jeotermometresi ile elde edilen sıcaklık yüksektir. Başka bir deyişle, rezervuar sıcaklığının 206°C'den düşük olması gereklidir. Sonuç olarak, 158-185 °C aralığı olası rezervuar sıcaklığını temsil etmektedir.

# PROBLEM 2

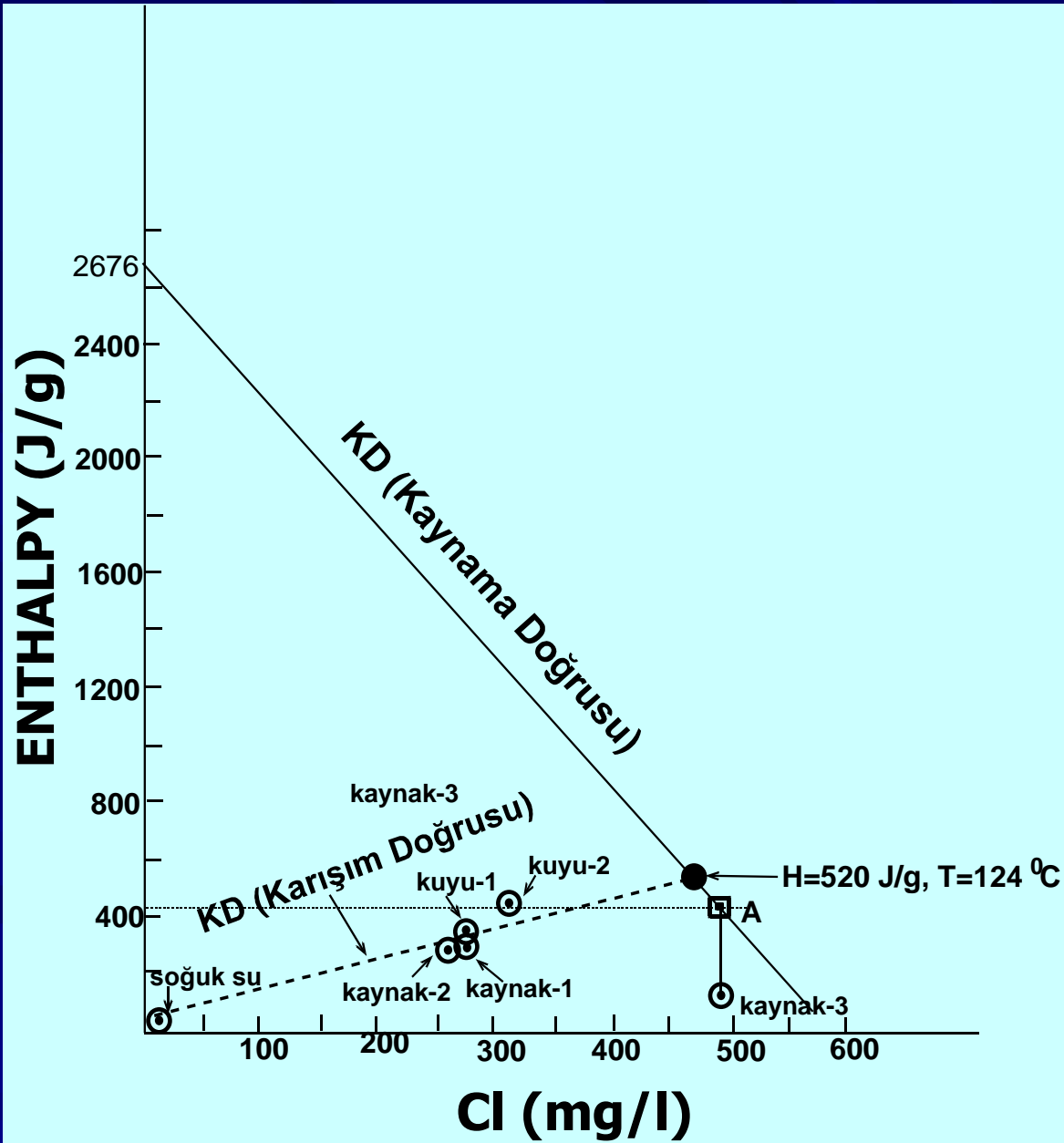
<b>K<sup>+</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>Na<sup>+</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>Ca<sup>++</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>Mg<sup>++</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b> <b>(ppm)</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b> <b>(ppm)</b>	<b>Na/K</b> <b>Jeoterm.</b> <b>(°C)</b>	<b>Na-K-Ca</b> <b>Jeoterm.</b> <b>(°C)</b>	<b>Kuvars</b> <b>Jeoterm.</b> <b>(°C)</b>
24	240	111	27	830	143	20	32	195	171	82

Sahada traverten oluşumları gözleendiği için Na-K-Ca jeotermometresi rezervuar koşullarındaki sıcaklıktan daha yüksek çıkacaktır. Bu bağlamda, rezervuar sıcaklığının, Na-K-Ca jeotermometresi ile hesaplanan 171 °C'den düşük olması gereklidir. Na/K jeotermometresi 171 °C'den de yüksek bir sıcaklık (195 °C) verdiği için, kuvars jeotermometresi ile elde edilen 82 °C, temsili rezervuar sıcaklığıdır.

# PROBLEM 3

- a) Kaynama-buhar kaybı (buhar fazının ayrılması sonucu artık sıvı hacmi azalıyor ve derişimler artıyor; aynı zamanda adyabatik soğuma gerçekleşiyor)
- b)** 1. Bkz. Grafik  
2. Bkz. Grafik  
3. Bkz. Grafik  
4. 124 °C

# PROBLEM 3



# PROBLEM 3

c)

gradyan =  $0.38 \text{ }^{\circ}\text{C} / 10 \text{ m}$

$124 - 106 = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$0.38 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots 10 \text{ m}$

$18 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots 421 \text{ m}$

$421 + 1556 = 1977 \text{ m.}$