

Jeotermal Su Tiplerinin Sınıflandırılması

- **Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramı**
- **Anyon ve Katyon Bazlı Sınıflamalar**

Jeotermal Su Tiplerinin Sınıflandırılması

Jeotermal sular

- **Toplam çözünmüş madde (TDS) içeriğine**
- **Sıcaklıklarına**
- **Kimyasal bileşimlerine**

göre sınıflandırılırlar.

Jeotermal Su Tiplerinin Sınıflandırılması

Su içinde çözünmüş iyonların toplam miktarına göre:

Tatlı sular	0 – 1000 mg/l
Hafif tuzlu sular	1000 – 10,000 mg/l
Tuzlu sular	10,000 – 100,000 mg/l
Çok tuzlu sular (Salamura)	> 100,000 mg/l

Doğal Sulardaki Majör Bileşenler (> 5 mg/L)

- **Kalsiyum**
- **Magnezyum**
- **Sodyum**
- **Potasyum**
- **Silika**
- **Bikarbonat**
- **Klor**
- **Sülfat**
- **pH**
- **Alkalinite**
- **TDS**
- **Elek. İletkenlik**
- **Toplam Sertlik**

Ölçülen Diğer Parametreler

- Hidrojen iyon konsantrasyonunu ($-\log[H^+]$) ifade eden **pH** rutin olarak ölçülür.
- **Elektriksel İletkenlik** (Conductivity) ($\mu\text{S/m}$) ve **Sıcaklık** ($^{\circ}\text{C}$) rutin olarak ölçülen diğer parametrelerdir.
- **TDS** (Toplam Çözünmüş Madde) içeriği buharlaşma sonrası kalıntı olarak bulunur veya iyon konsantrasyonları toplanarak elde edilir.
- **Toplam alkalinite** (mg/l CaCO_3 olarak) su örneğinin asit-nötrleştirme kapasitesini ifade eder. Karbonat, bikarbonat ve hidroksit içeriklerinin toplamından elde edilir.
- **Toplam Sertlik** (mg/l CaCO_3 olarak) farklı iyon konsantrasyonlarının (Ca ve Mg gibi) göz önüne alındığı su örneğinin bir diğer özelliğidir.

Minör Bileşenler (0.01 ile 10 mg/L arası)

- Potasyum
- Demir
- Amonyak
- Alüminyum
- Lityum
- Bor
- Karbon dioksit
- Oksijen
- Stronsiyum
- Flor
- Bromür
- Nitrat/Nitrit

İz Bileşenler (< 100 mg/L)

- Be 4
- Al 13
- Sc 21
- Ti 22
- Cr 24
- Mn 25
- Co 27
- Ni 28
- Cu 29
- Zn 30
- Zn 30
- Ga 31
- Ge 32
- As 33
- Se 34
- Rb 37
- Yt 39
- Zr 40
- Nb 41
- Mo 42
- Ru 44
- Ag 47
- Cd 48
- In 49
- Sn 50
- Sb 51
- Cs 55
- Ba 56
- La 57
- Ce 58
- W 74
- Pt 78
- Au 79
- Tl 81
- Pb 82
- Bi 83
- Ra 88
- Th 90
- U 92

ppb veya ppt (REE) olarak

- İyot
- Fosfat

Organik Bileşenler

- Hümik asit
- Karbohidratlar
- Amino Asitler
- Taninler
- Ligninler
- Hidrokarbonlar
- Asetat

Tipik konsantrasyonlar oldukça düşüktür.

İzotoplar

Duraylı izotoplar

- $\delta^{18}\text{O}$
- δD
- $\delta^{13}\text{C}$
- $\delta^{34}\text{S}$
- ^3H
- CFC

Örnek Rutin Analiz AF-1 Kuyusu (Afyon)

	<u>mg/l</u>		<u>mg/l</u>
• Kalsiyum	215	• Sülfat	494
• Magnezyum	30	• Bikarbonat	1628
• Sodyum	1600	• Klor	1754
• Potasyum	144		
• Demir	1	• SiO ₂	142
		• <u>TDS</u>	<u>6018</u>
• pH	6.7		
• T = 88°C		• Denge*	1.00

*Denge = katyonların anyonlara oranıdır (meq/L olarak).

Yük Dengesi

	<u>mg/l</u>	<u>meq/l</u>		<u>mg/l</u>	<u>meq/l</u>
• Kalsiyum	215	10.75	• Sülfat	494	10.3
• Magnezyum	30	2.47	• Bikarbonat	1628	26.7
• Sodyum	1600	69.56	• Klor	1754	49.48
• Potasyum	144	3.68			
• Demir	1	0.03			
• Toplam		86.49	• Toplam		86.47
			• Katyon/Anyon		1.0002

Analiz Hataları

- İyon dengesinin denetlenmesi analizdeki önemli hataların ortaya çıkmasına olanak tanır.
- Başlıca analiz hataları:
 - Arazide hızlı değişen bir takım parametrelerin (pH ve alkalinite gibi) ölçülmemesi,
 - Örneklerin filtre edilmemesi (askıda katı maddelerin uzaklaştırılmaması),
 - Örneklerin uygun olmayan ortamlarda saklanması (basınç, sıcaklık, asit ilavesi, kapak)

Hidrojeokimyasal Fasiyes Kavramı

Jeotermal suların Hidrokimyasal Fasiyesi (tip veya grup) içerdikleri baskın iyonlar (anyon ve kationlar) göz önüne alınarak belirlenir.

Yüksek sıcaklığa sahip jeotermal sular önemli miktarda nadir alkaliler (lityum, rubidyum ve sezyum gibi) ile birlikte silika, bor, arsenik, flor ve amonyak içerebilirler. Asidik sular dışında, demir, magnezyum, ağır metaller ve sülfat/klor oranları düşüktür.

Sıcaklık ve yerel kayaç türüne bağlı olarak, klor konsantrasyonu jeotermal suların kimyasını belirleyen en temel unsurdur.

Jeotermal sulardaki ana element konsantrasyonları (Na ve K gibi) suyun pH değeri tarafından kontrol edilmektedir.



Jeotermal akışkanın pH değeri sistemin tuzluluğunun bir fonksiyonu olarak değişir. Düşük sıcaklıklarda ise, pH diğer Al-silikat mineralleri arasında gerçekleşen reaksiyonlar tarafından denetlenir. CO₂ ve H₂S gibi gazların buhar fazına geçmesi nedeniyle, yüzeyde (atmosferik koşullarda) örneklenen suların pH değerleri derin suların pH değerlerinden daha yüksektir.

Kalsiyum konsantrasyonu sistemdeki CO₂ içeriği ve pH ile yakından ilişkilidir. Sudaki kalsit çözünlüğü artan sıcaklık ile düşer ve bu nedenle, düşük sıcaklık, yüksek tuzluluk ve düşük CO₂ konsantrasyonuna sahip suların kalsiyum içeriği oldukça fazladır (Henley ve Ellis, 1983).

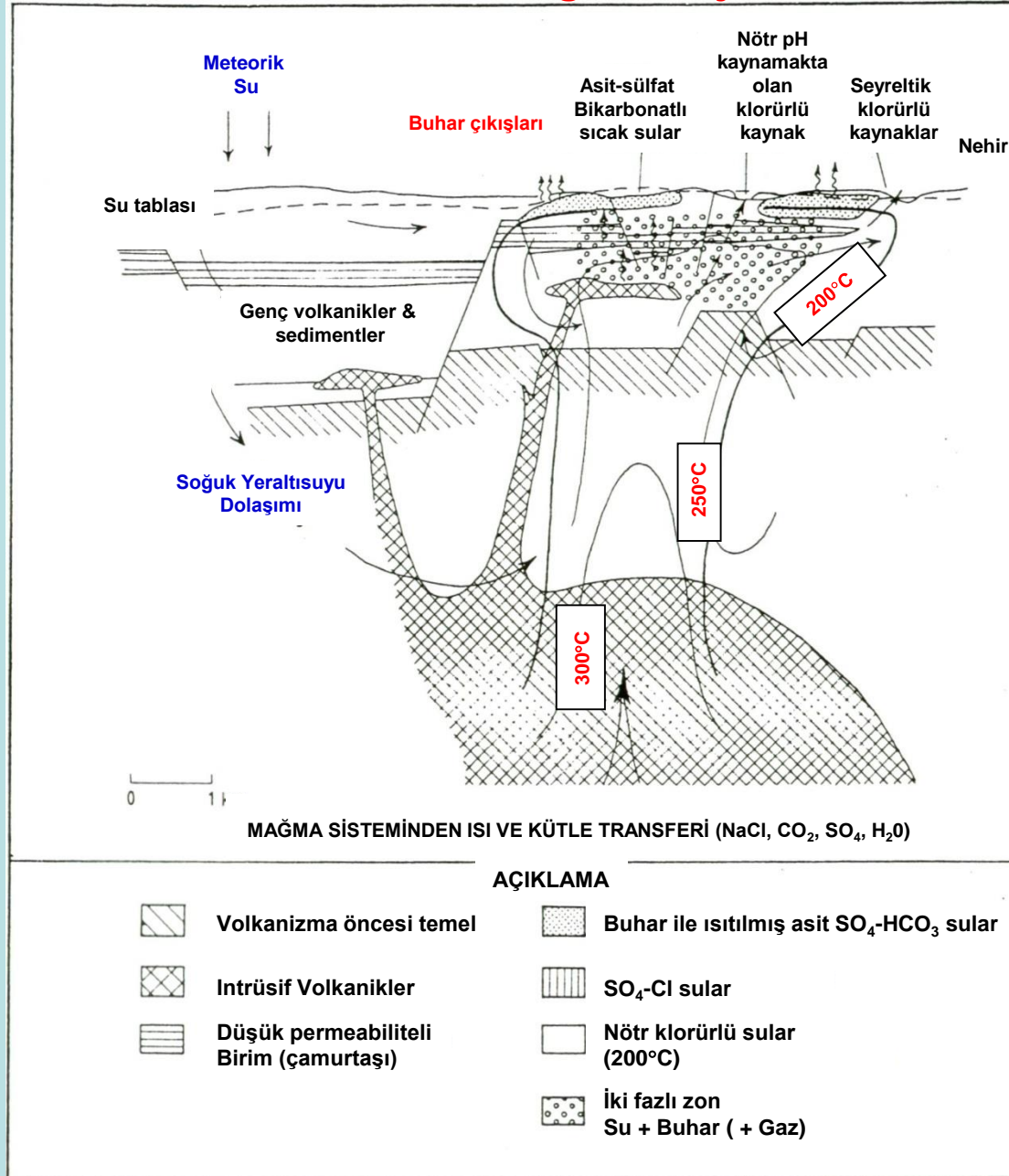
Yüksek sıcaklıklı sular çoğu kayalardaki flor ve sülfatı kolaylıkla çözer. Yüksek F ve SO₄ konsantrasyonları, anhidrit ve flüorit çözelti dengesi ve sulardaki Ca miktarı ile yakından ilişkilidir. Anhidritin sıcak sulardaki çözünlüğü oldukça düşüktür (250°C'de 24 ppm, 300°C'de 8 ppm), bu nedenle, nötr pH değerine sahip yüksek sıcaklıklı sulardaki SO₄ konsantrasyonu çok düşüktür. Ancak, buhar ile ısıtılmış asidik sular ise çok yüksek SO₄ konsantrasyona sahiptir.

Su ile etkileşim sonucunda, bor ve arsenik kayalardan kolaylıkla çözümlenirler. Jeotermal suların Cl/B oranları soğuk su akiferlerinin Cl/B oranlarına oldukça benzerdir (Mahon, 1967). Organikçe zengin çökel kayalar veya borat yatakları ilişkili suların bor içerikleri çok yüksektir.

Yüksek sıcaklıklı, derin akışkanlarda sıkça gözlenen bir bileşen olan arsenik sığ dolaşimli sularda oldukça nadir bulunmaktadır.

Silika fazlarının çözümlülüğü sıcaklık artışı ile doğru orantılıdır. 180°C'nin üzerinde sıcaklığa sahip sularda kuvars dengede olmasına karşın amorf ve diğer duraysız silika formları doygun değildirler. Bu nedenle, özellikle yüzeye çabuk yükselen ve rezervuar kayaları ile minimum derecede etkileşime giren jeotermal suların silika konsantrasyonları jeotermometre olarak kullanılmaktadır.

Silisik bir volkanik ortamda gelişen jeotermal sistemde ortaya çıkan farklı su tipleri



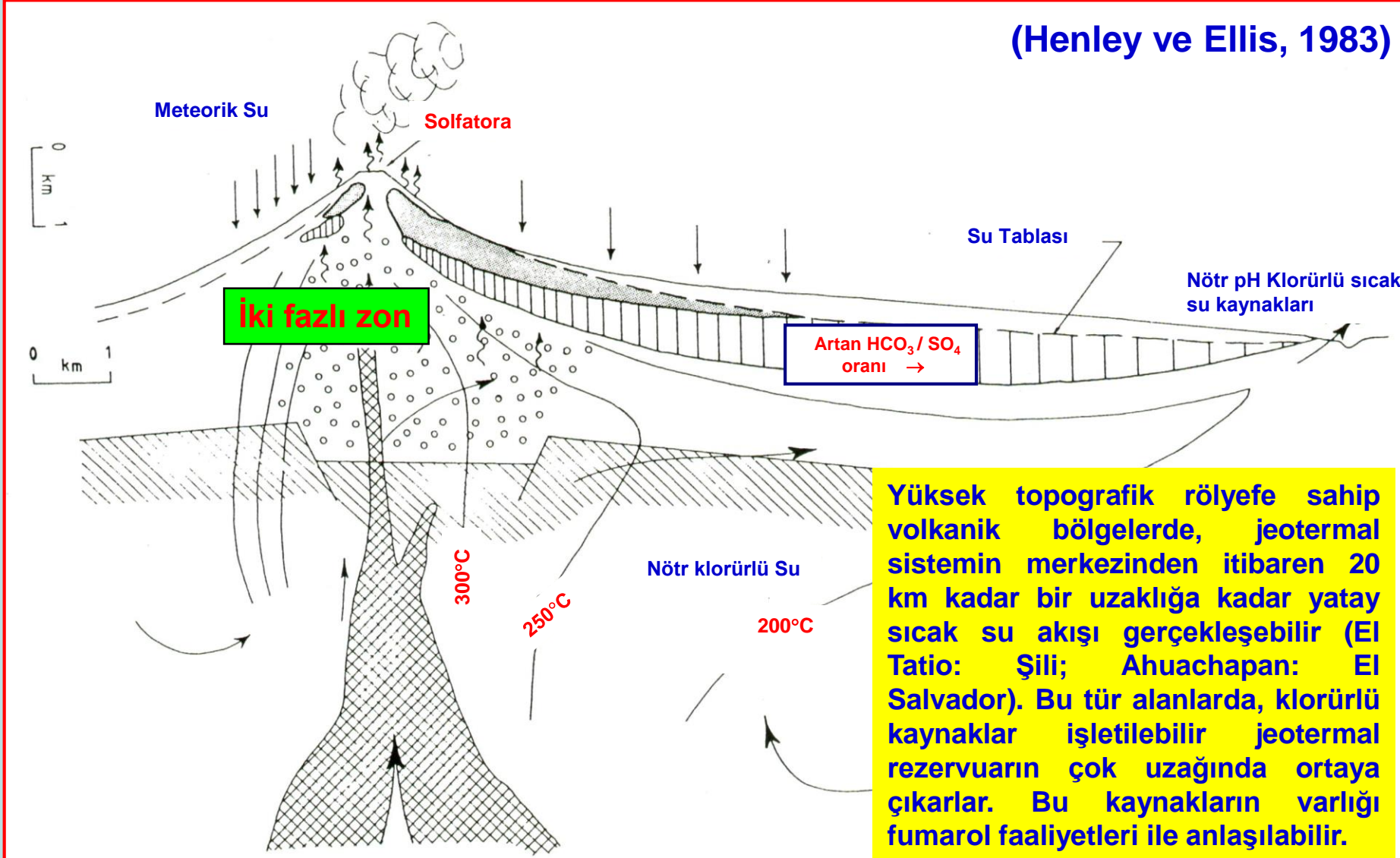
Silisik bir volkanik ortamda gelişen jeotermal sistemde ortaya çıkan farklı su tipleri yandaki şekilde gösterilmiştir (Henley ve Ellis, 1983).

Derin sıcak su sisteminden kaçan buhar ve gazlar yüzeyde fumarol şeklinde kendini gösterirler. Buna alternatif olarak, bu uçucular sığ yeraltı suyu tarafından tutularak düşük Cl-İçerikli sülfat-bikarbonat veya düşük pH'lı sülfatlı suları oluştururlar.

(Henley ve Ellis, 1983)

Yüksek topografik rölyefe sahip volkanik bölgelerde ortaya çıkan farklı su tipleri

(Henley ve Ellis, 1983)



Anyon ve Katyon Bazlı Sınıflamalar

Back (1966)'ya göre, bir sudaki anyon ve katyonlardan ağırlık olarak (mek/l) %50'yi aşanlar o suyun **Hidrokimyasal Fasiyes** tipini ortaya koymaktadır. İyonlardan hiçbirinin %50'yi geçmediği sular ise **Karışık Su Tipine** karşılık gelmektedir.

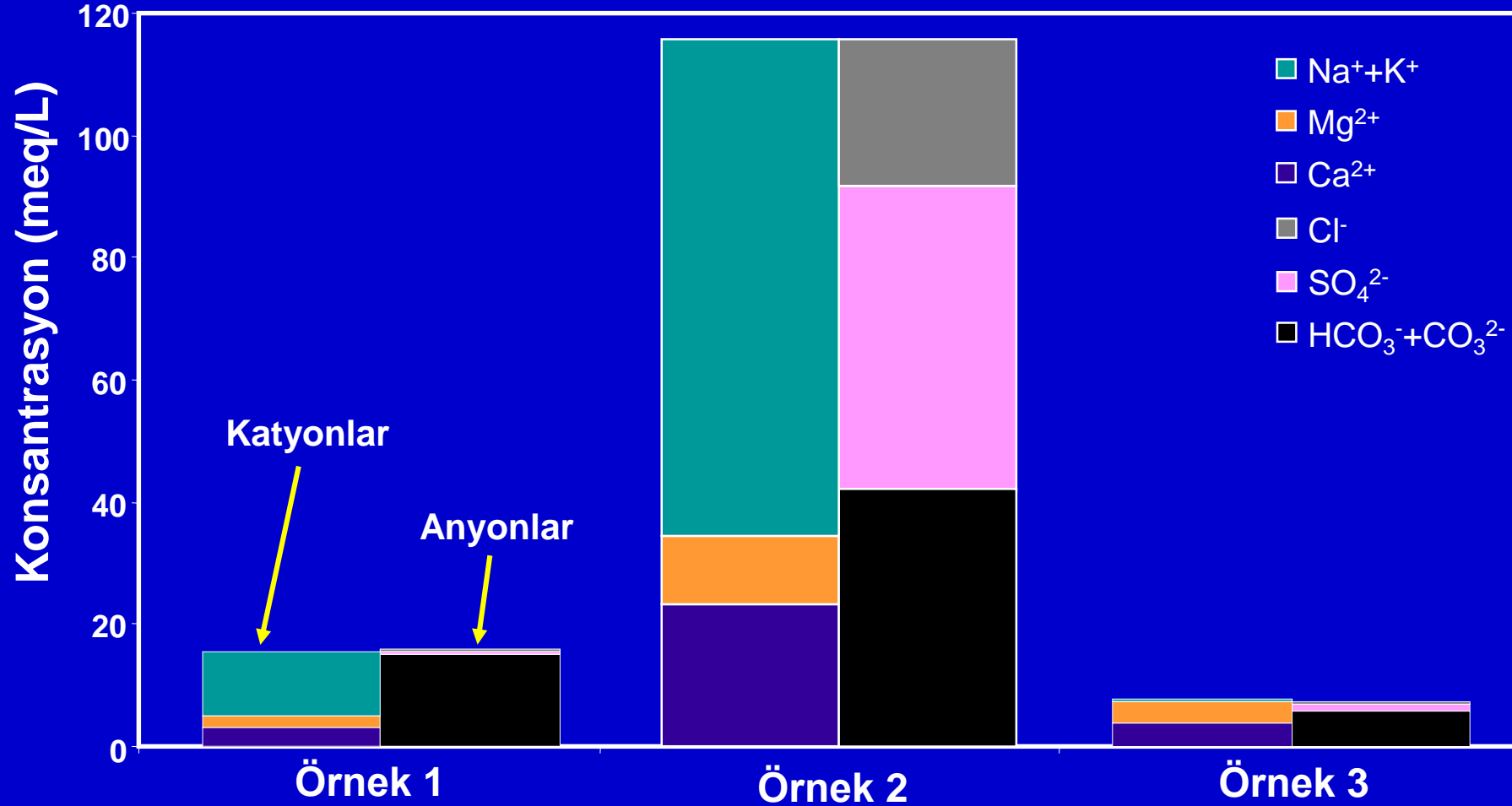
Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979)'nin öngördüğü sınıflamada ise, suda çözünmüş ana anyon ve katyonlardan bollukları %20'yi aşanlar sırasıyla önce katyonlar sonra anyonlar yazılarak su tipi belirlenmektedir (örneğin, **Na-Cl veya Ca-HCO₃**).

Kimyasal Verilerin Görselleştirilmesi

- İyon bolluklarının görsel hale getirilmesinde kullanılan çok sayıda grafik ve diyagram bulunmaktadır:
 - Collins Diyagramı (Kolon Diyagram)
 - Dairesel Diyagram
 - Stiff Diyagramı
 - Işınsal Diyagram
- Diğer diyagramlar ise suların gruplandırılması veya kökenlerinin yorumlanmasında kullanılır:
 - Kare Diyagram
 - Düşey Logaritmik Diyagram (Schoeller Diyagramı)
 - Üçgen Diyagramlar
 - Piper Diyagramı
 - Çit Diyagramı

Collins (Kolon) Diyagramı

(meq/l) olarak



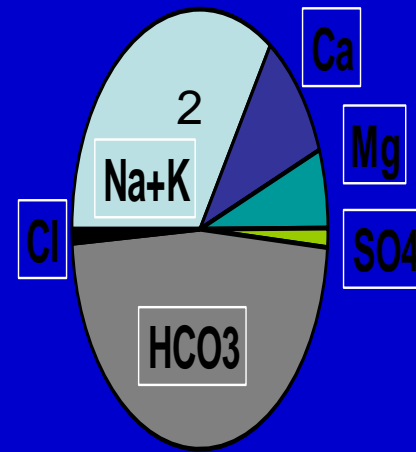
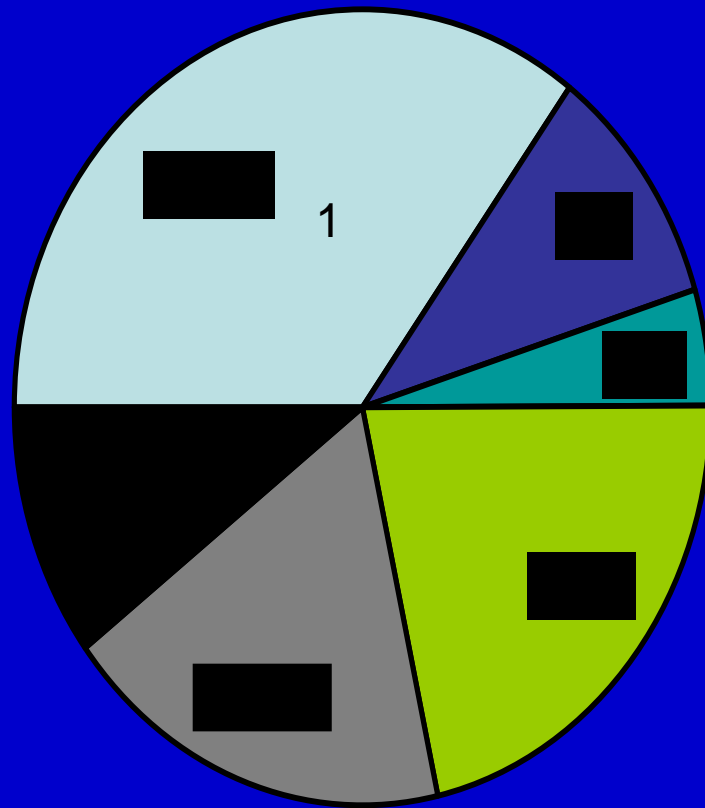
Collins (Kolon) Diyagramı

r (%)	K	Cl
	Na	
	Mg	HCO ₃
	Ca	

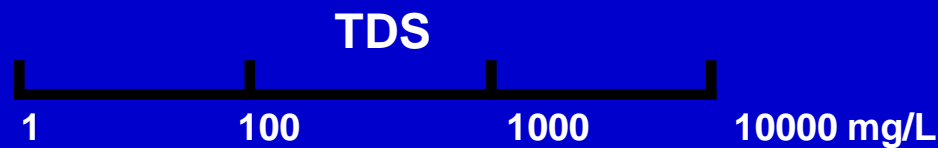
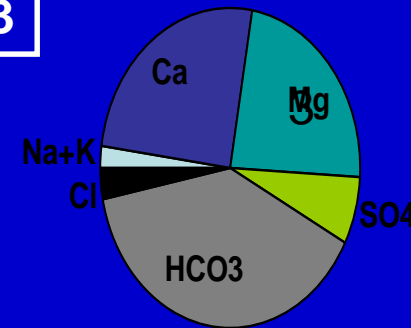
(%) olarak

Her bir örnek için ayrı bir diyagram hazırlanması en büyük dezavantaj

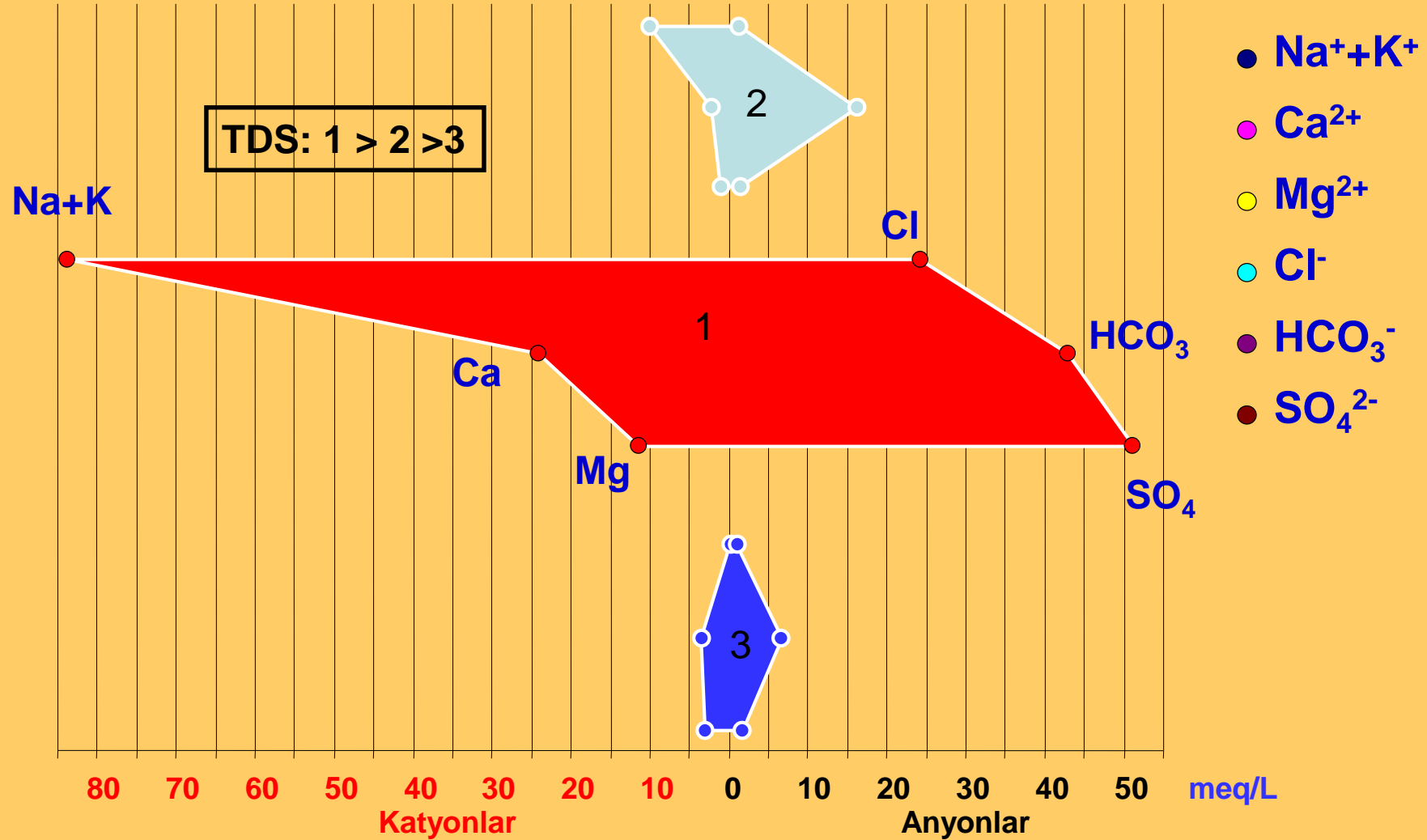
Dairesel Diyagramlar



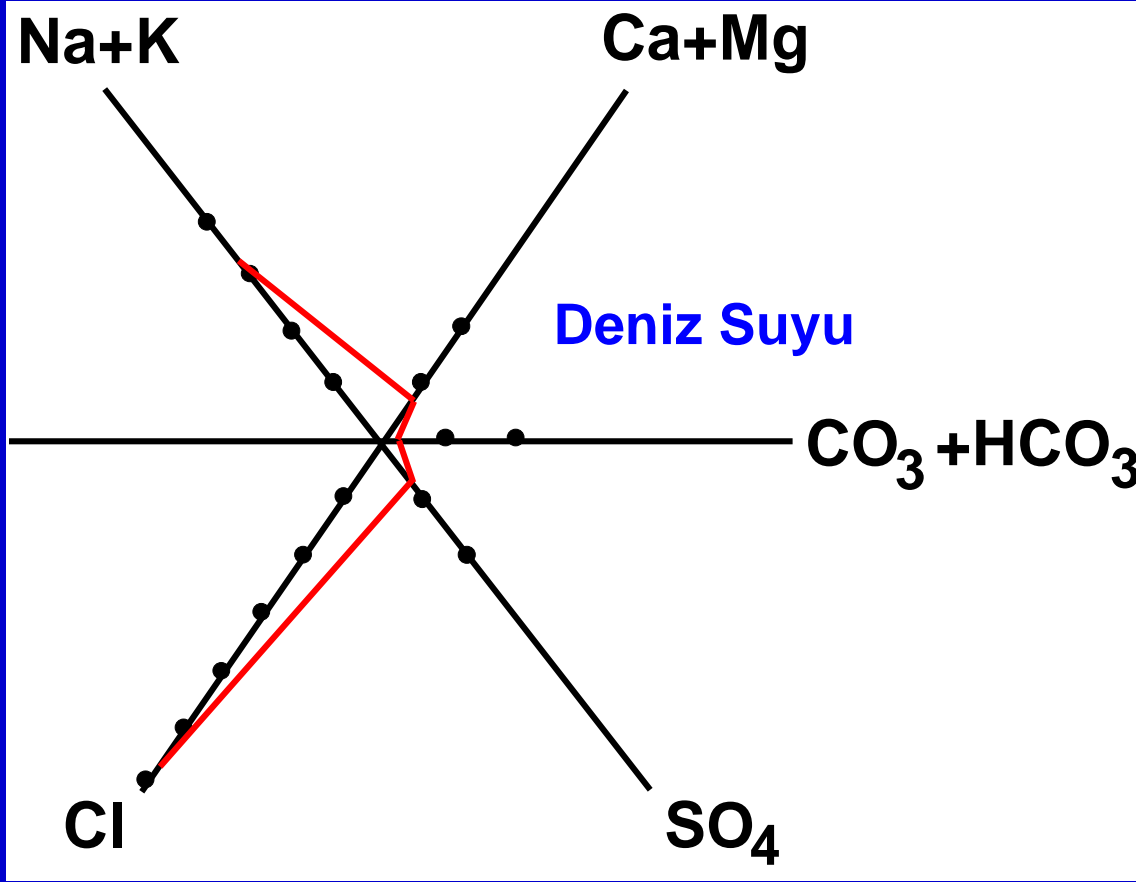
TDS: 1 > 2 > 3



Stiff Diyagramı



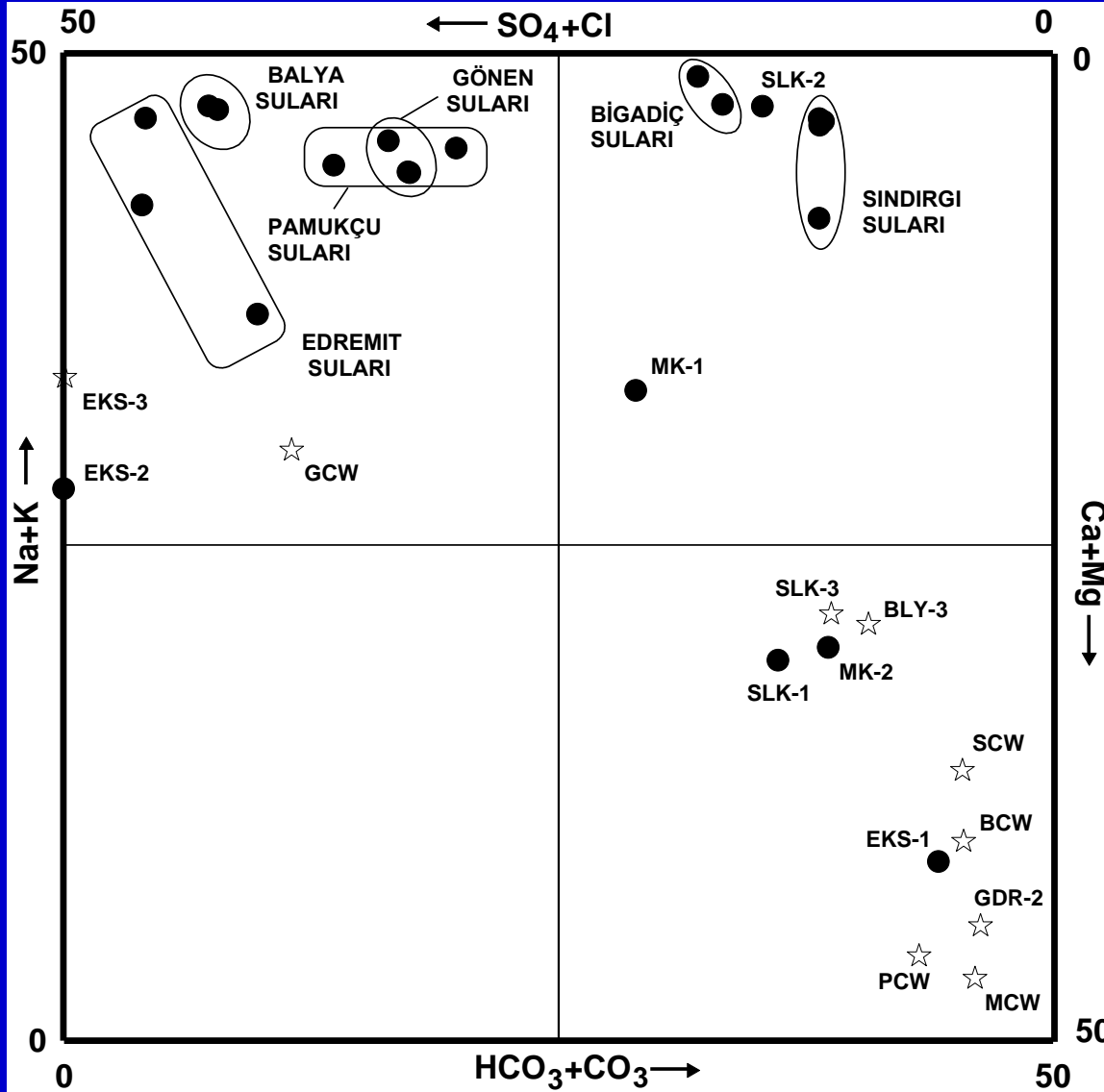
Işınsal Diyagram



- Eksen sayısı 6 ile 8 arasında
- Eksenler üzerinde işaretlenen iyon konsantrasyonları (yüzde olarak) poligon oluşturacak şekilde birleştirilir
- Her örneğin kendine has bir deseni vardır (avantaj)
- Çok sayıda örnek tek bir grafik üzerinde gösterilemez

Kare Diyagramı

(Langelier – Ludwig Diyagramı)

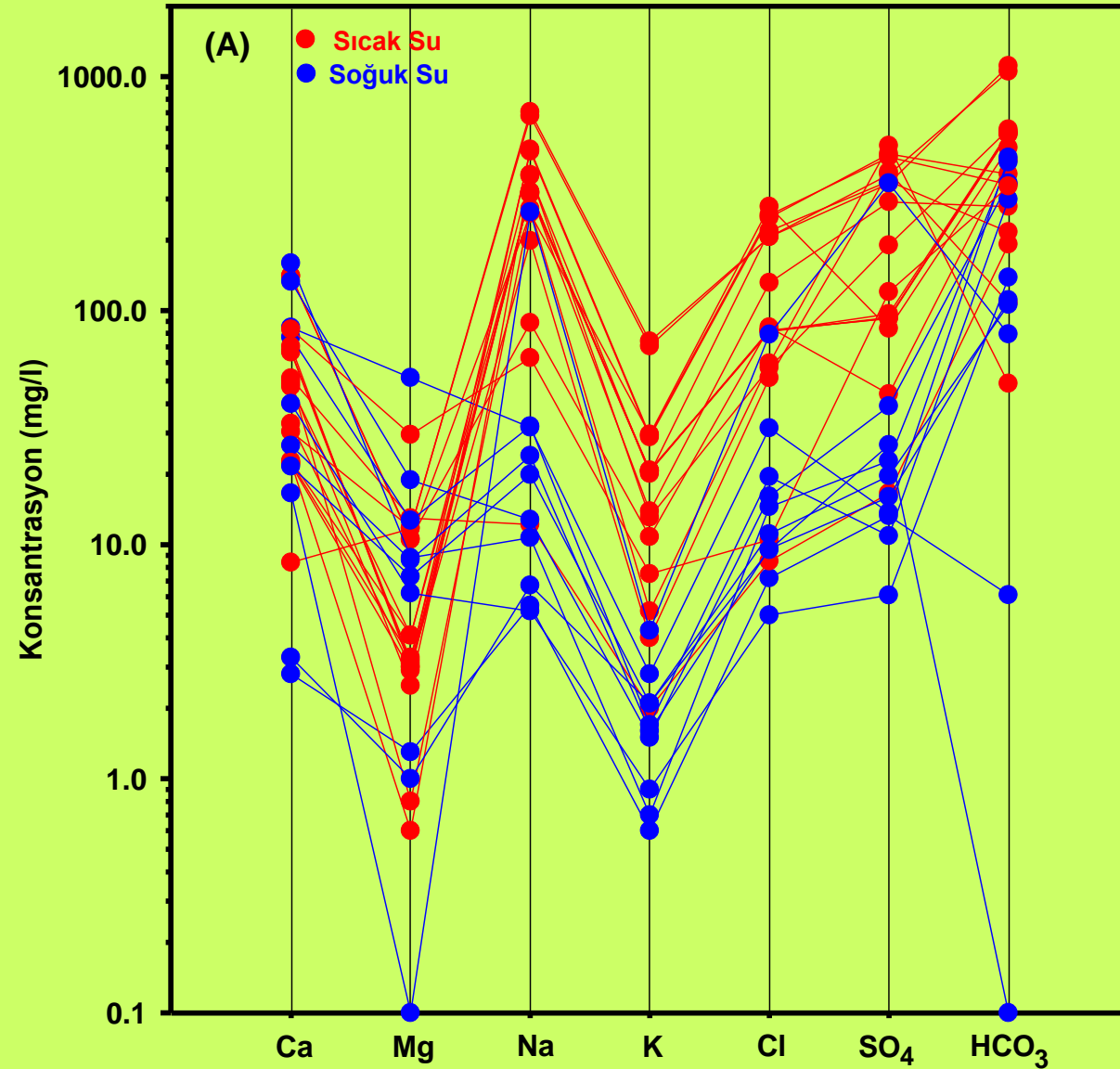


•Her kenar 50 veya 100 eşit parçaya ayrılır

•Karşılıklı iki kenar üzerinde, iki kation (Ca+Mg ve Na+K) ve iki anyon grubuna ait (Cl+SO₄ ve HCO₃+CO₃) konsantrasyonlar yüzde olarak işaretlenir

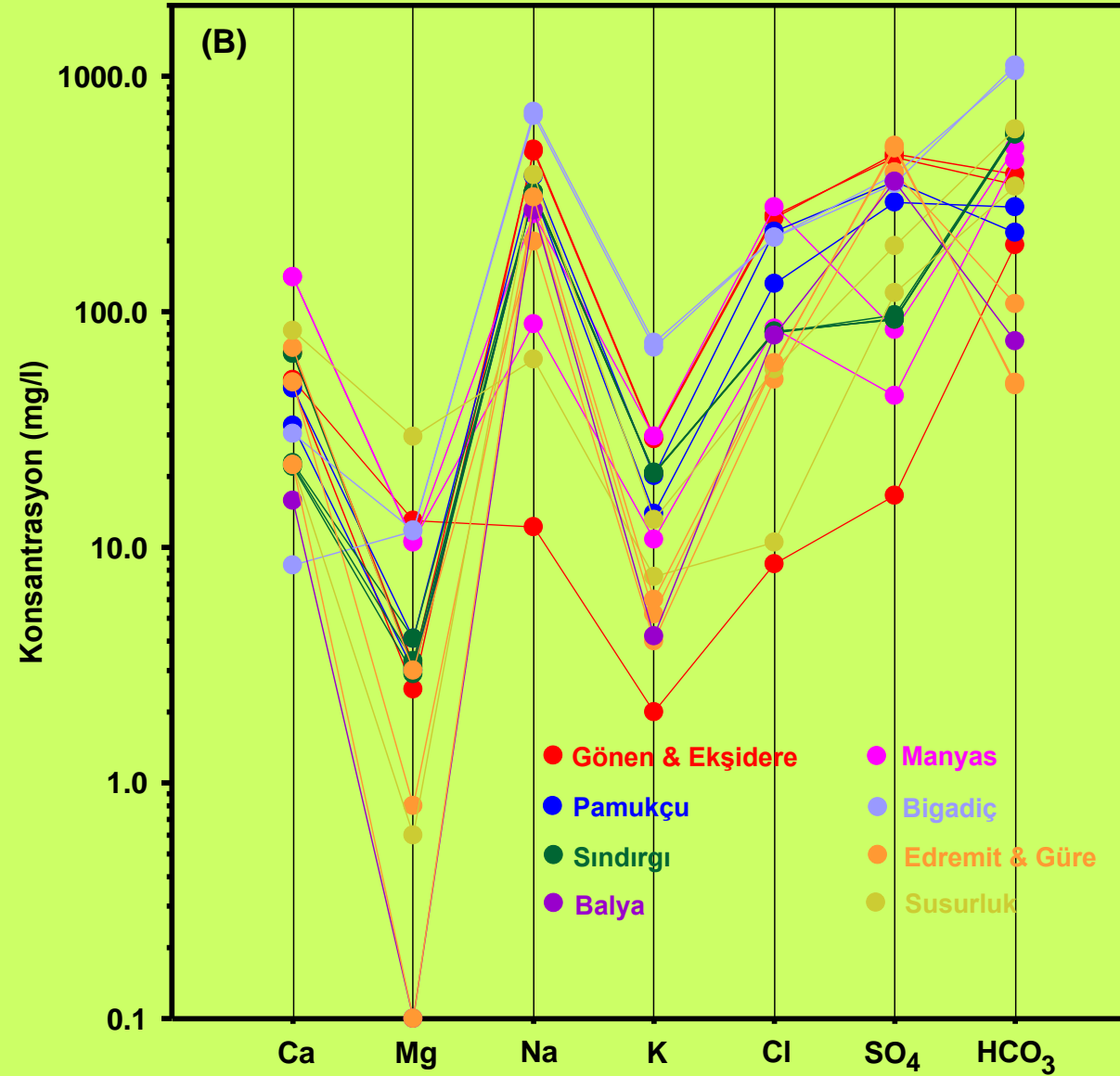
Mutlu, 2007

Schoeller Diyagramı



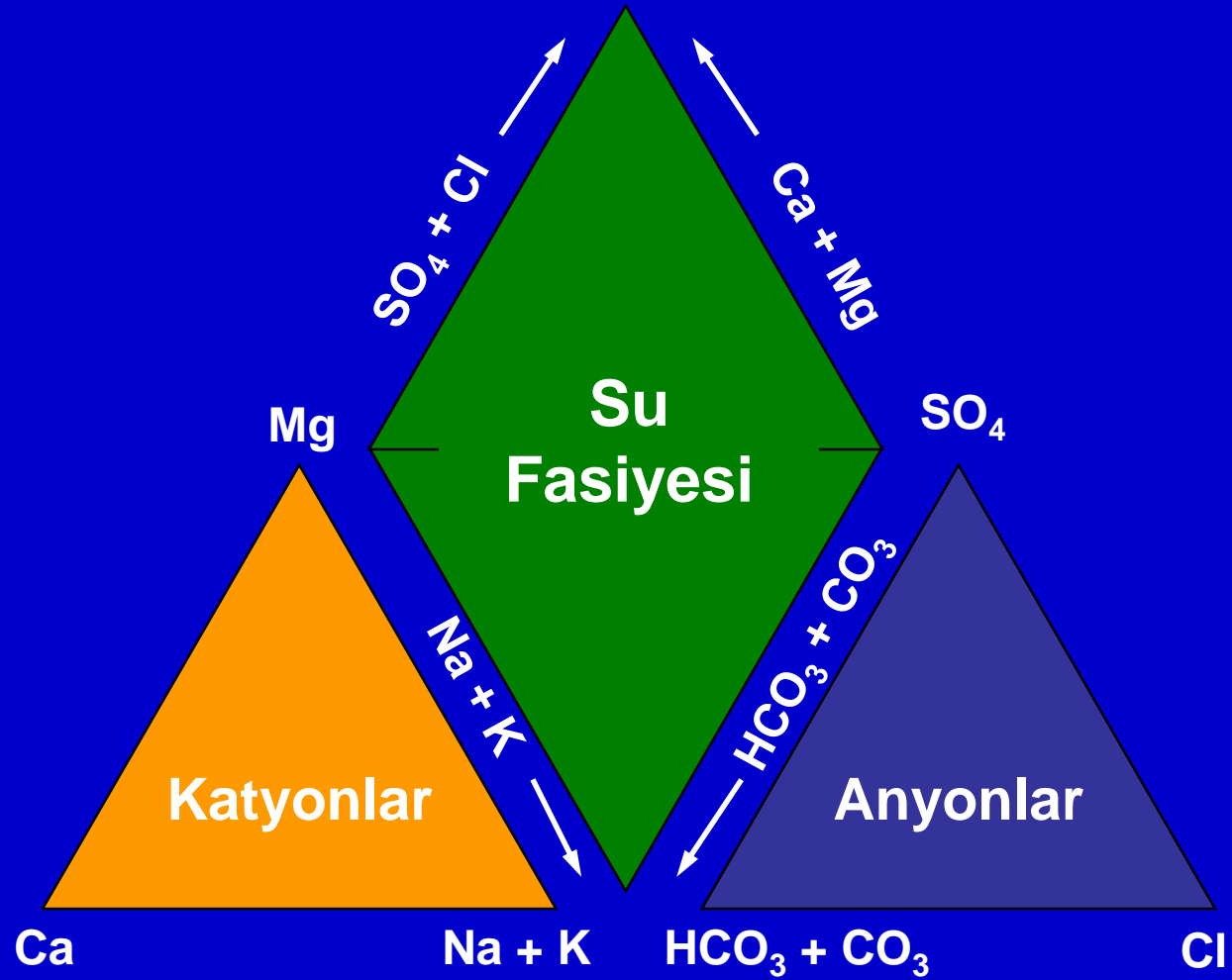
Mutlu, 2007

Schoeller Diyagramı



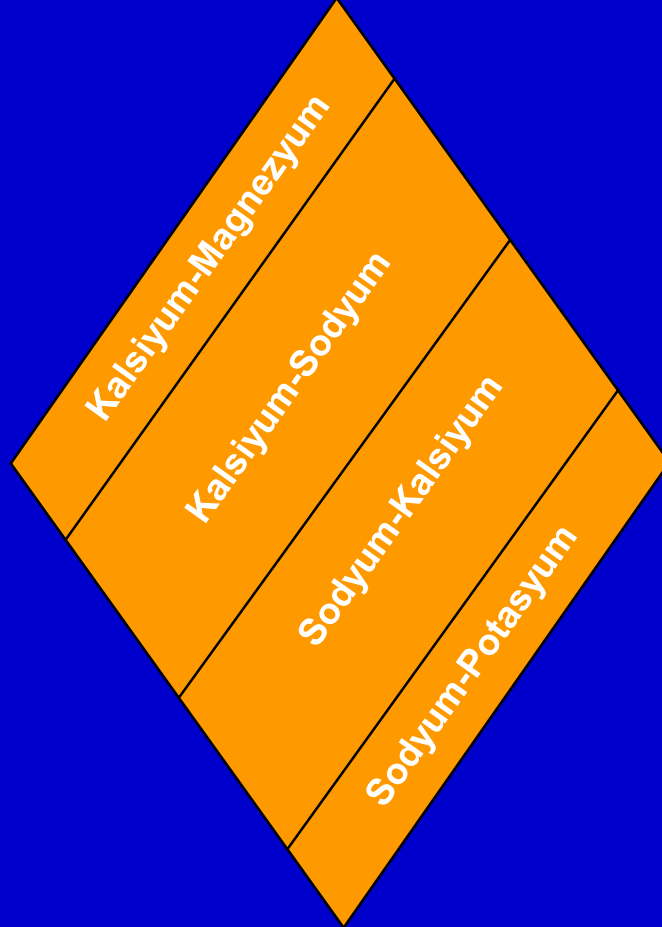
Mutlu, 2007

Piper Diyagramı

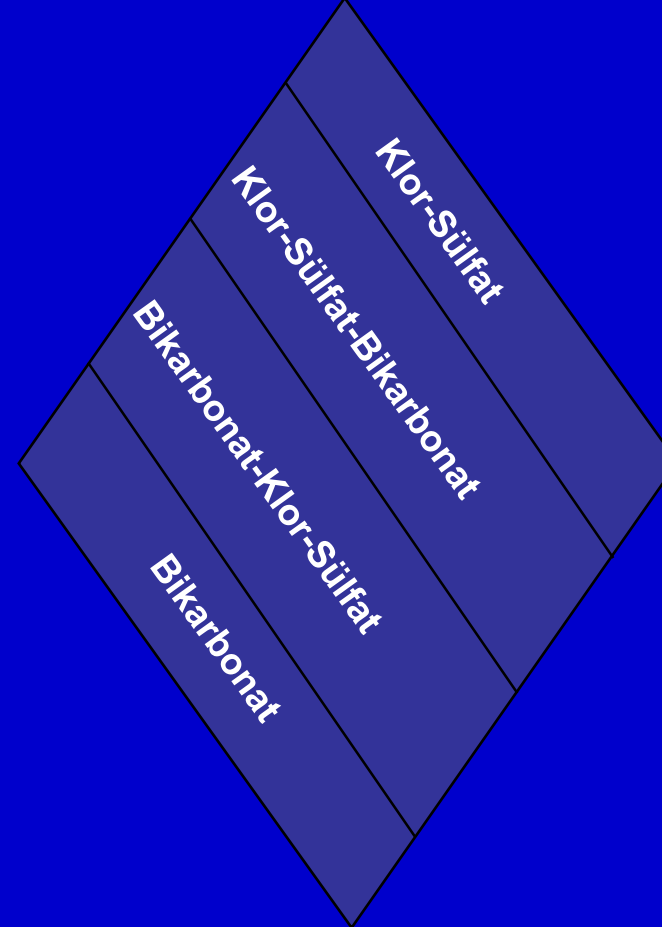


Su Fasiyesi

Katyonlar



Anyonlar



Sınıflama

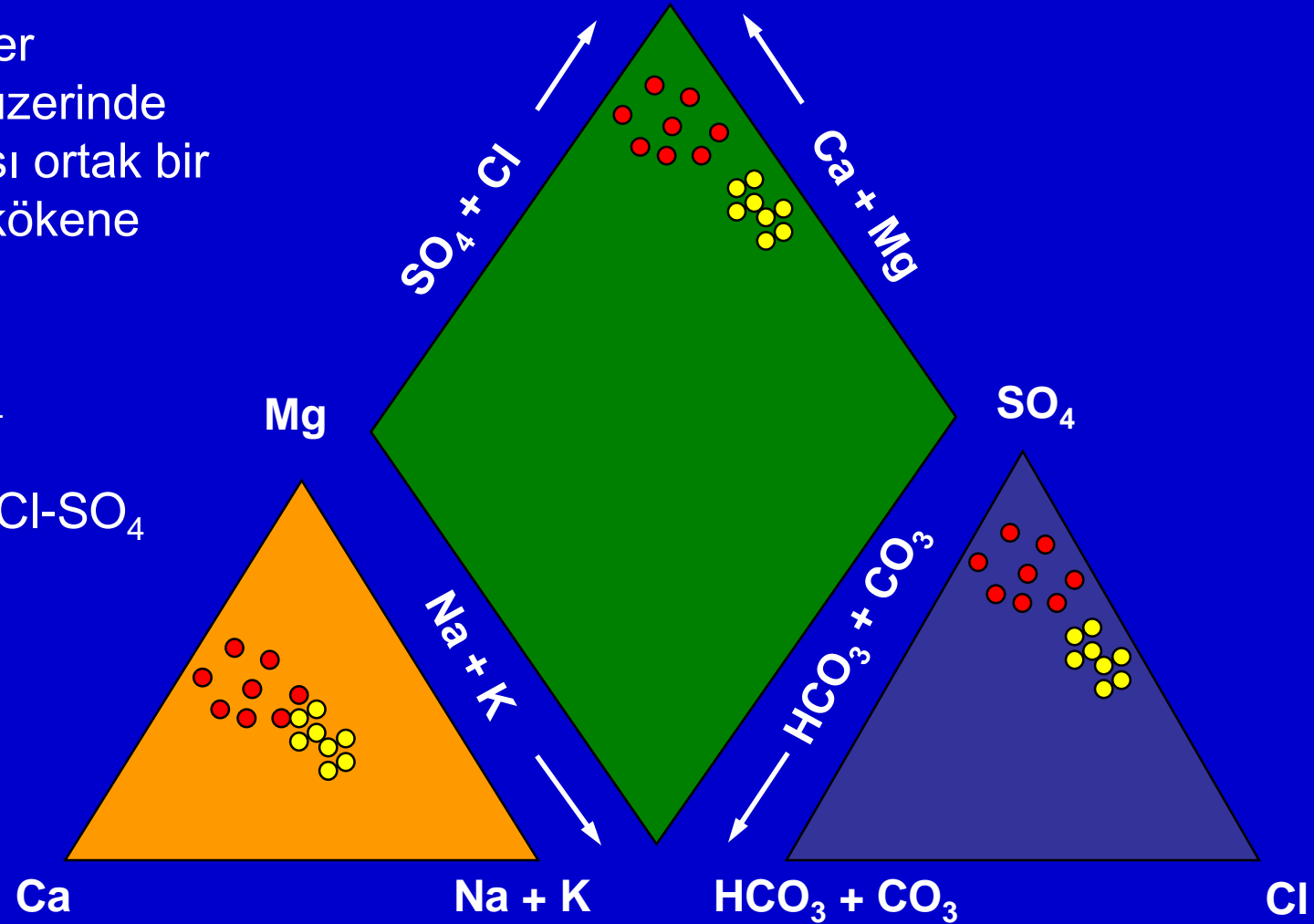
Suların Piper diyagramı üzerinde gruplanması ortak bir bileşim ve kökene işaret eder.

Kırmızı:

Ca-Mg-SO₄

Sarı:

Ca-Mg-Na-Cl-SO₄

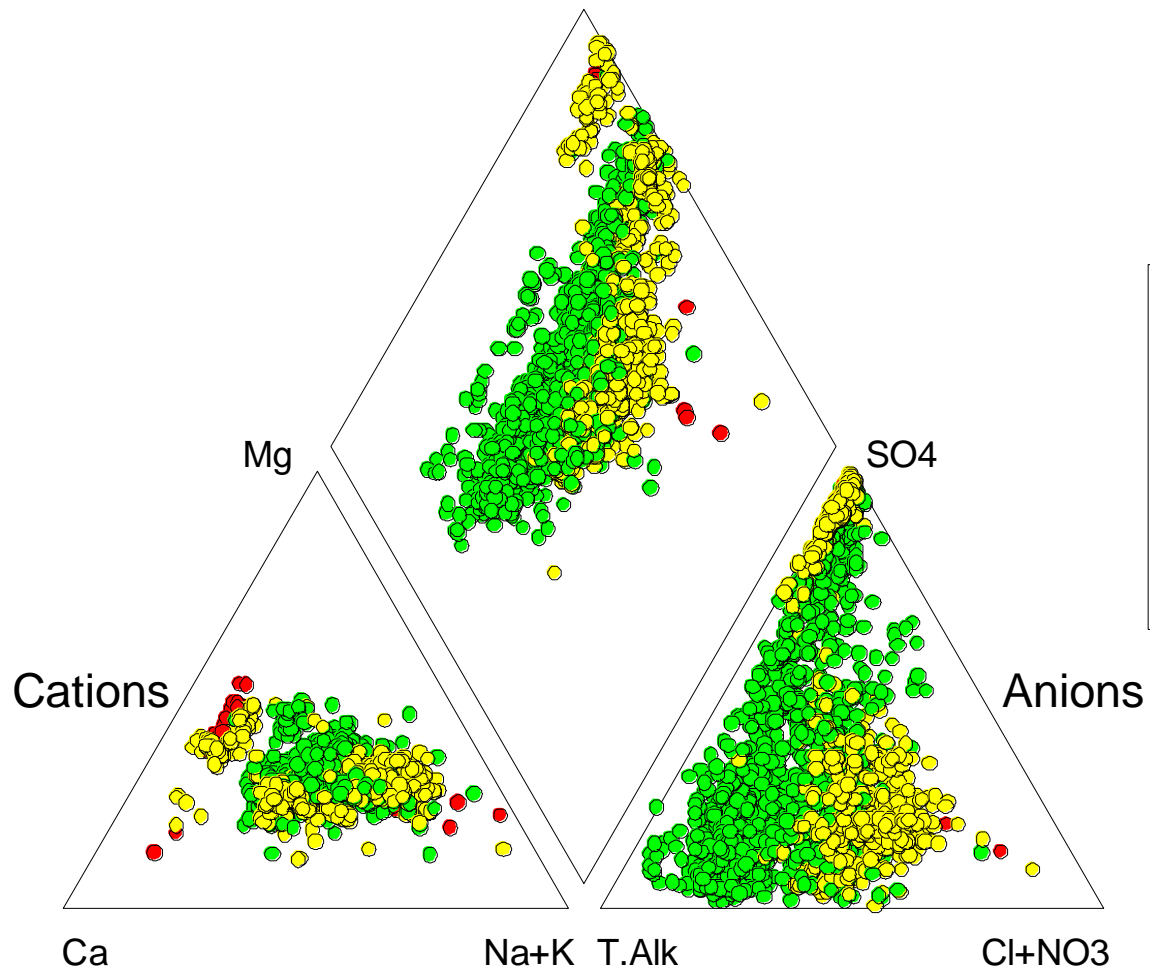


Piper Diagram

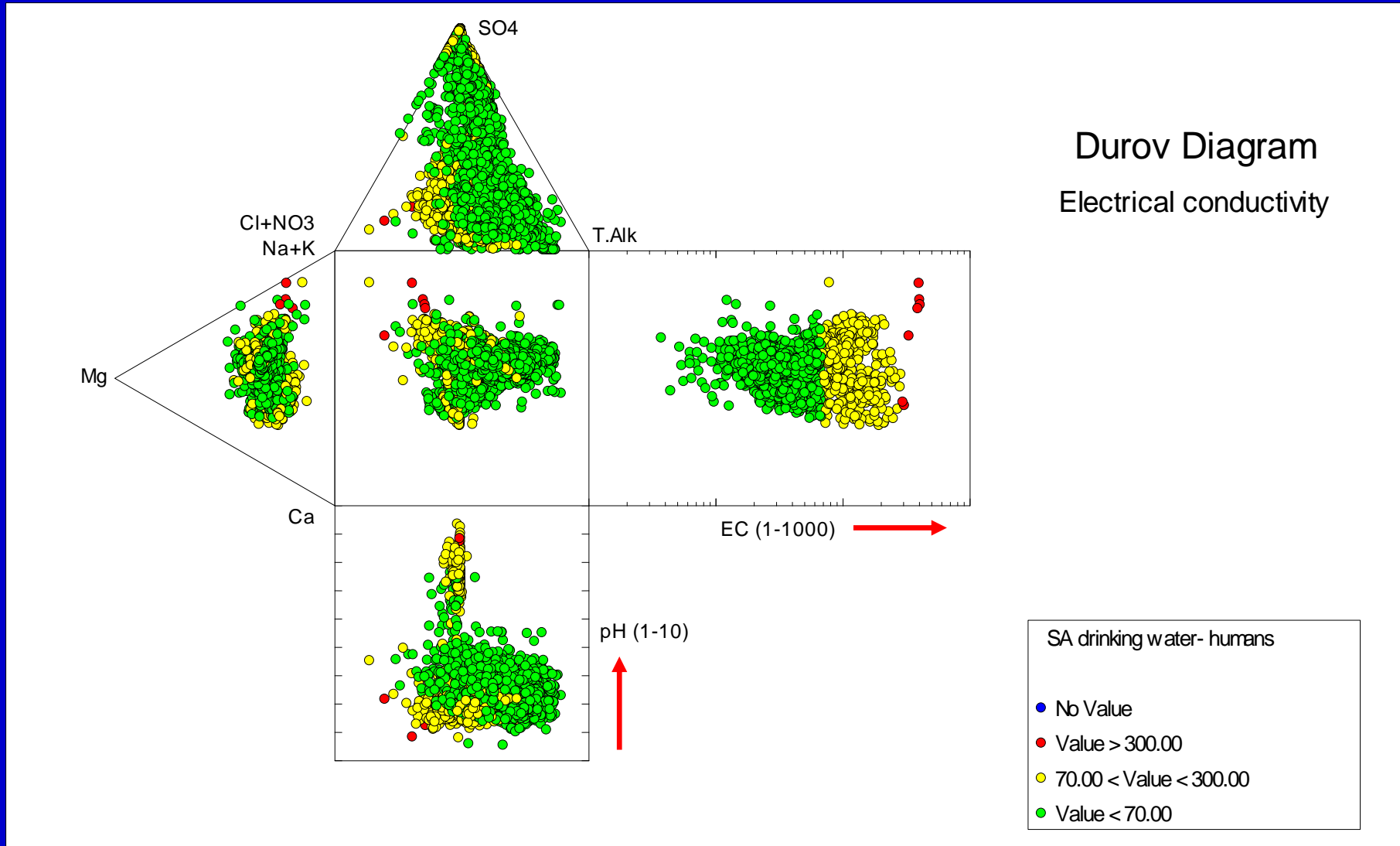
Electrical conductivity

SA drinking water- humans

- No Value
- Value > 300.00
- 70.00 < Value < 300.00
- Value < 70.00



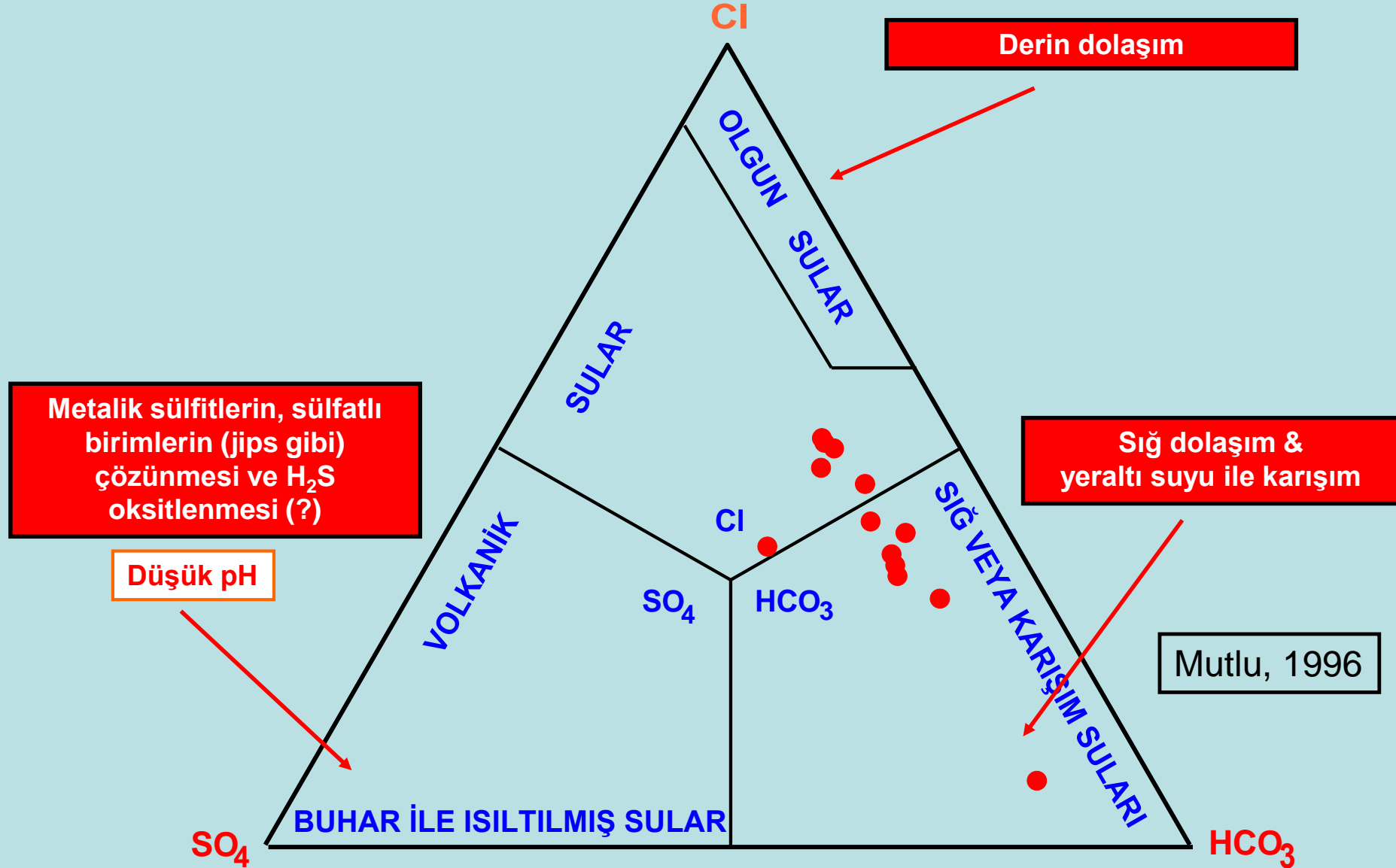
Durov Diyagramı



Üçgen Diyagramlar

- Üçgen diyagramlarda, iyon konsantrasyonları (mg/l veya $\mu\text{g/l}$ cinsinden) her kenarı 100 eşit parçaya ayrılan eşkenar üçgen üzerinde yüzde olarak ve tek bir nokta şeklinde gösterilir.
- Bu tür diyagramlar termal suların içerdikleri majör iyon bolluklarına göre sınıflandırılması ile iz element kökenlerinin ve karışım işlevinin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Cl-SO₄-HCO₃ Diyagramı



Jeotermal sulardaki ana element konsantrasyonları (Na ve K gibi) suyun pH değeri tarafından kontrol edilmektedir.



Jeotermal akışkanın pH değeri sistemin tuzluluğunun bir fonksiyonu olarak değişir. Düşük sıcaklıklarda ise, pH diğer Al-silikat mineralleri arasında gerçekleşen reaksiyonlar tarafından denetlenir. CO₂ ve H₂S gibi gazların buhar fazına geçmesi nedeniyle, yüzeyde (atmosferik koşullarda) örneklenen suların pH değerleri derin suların pH değerlerinden daha yüksektir.

Kalsiyum konsantrasyonu sistemdeki CO₂ içeriği ve pH ile yakından ilişkilidir. Sudaki kalsit çözünlüğü artan sıcaklık ile düşer ve bu nedenle, düşük sıcaklık, yüksek tuzluluk ve düşük CO₂ konsantrasyonuna sahip suların kalsiyum içeriği oldukça fazladır (Henley ve Ellis, 1983).

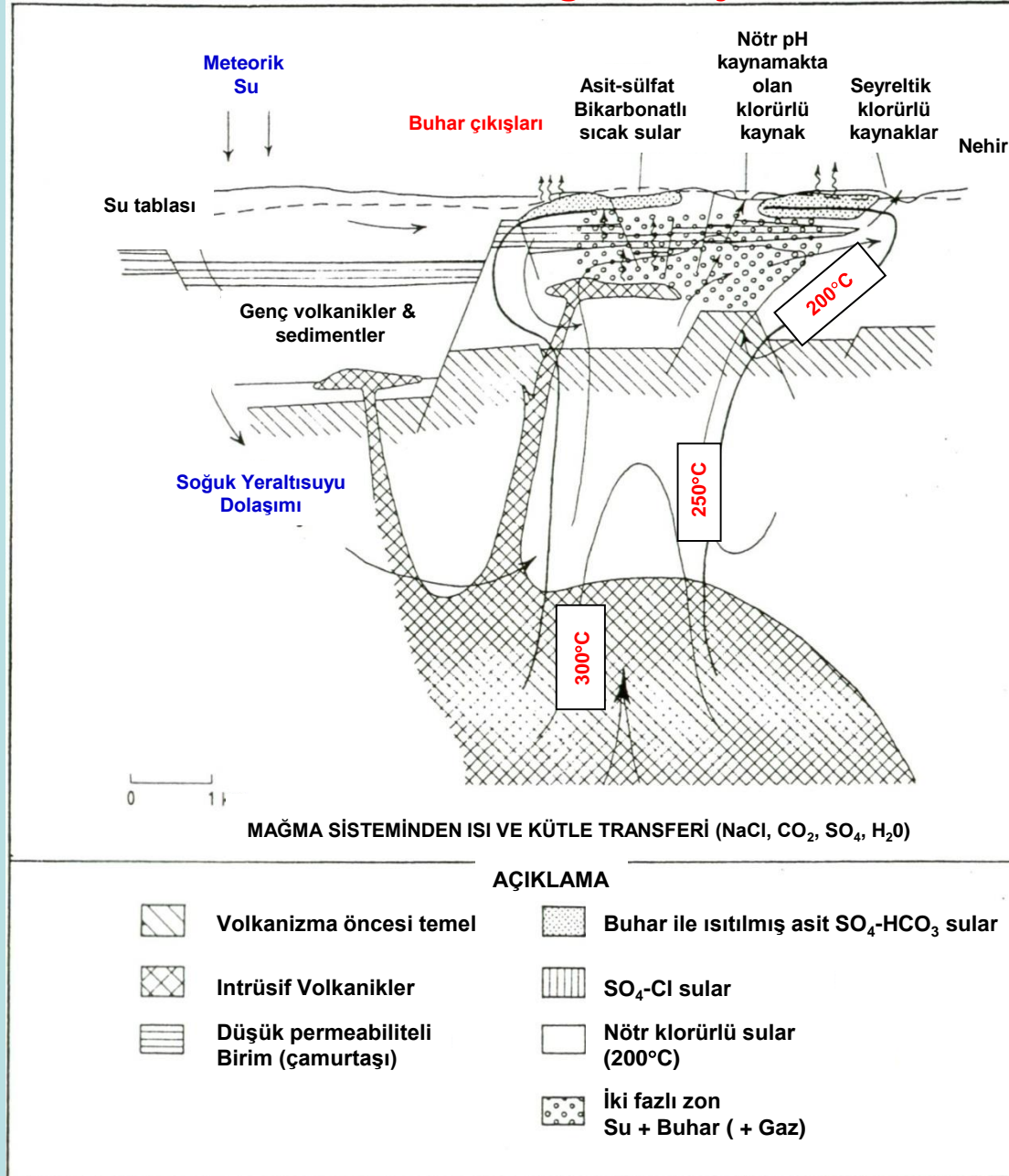
Yüksek sıcaklıklı sular çoğu kayalardaki flor ve sülfatı kolaylıkla çözer. Yüksek F ve SO₄ konsantrasyonları, anhidrit ve flüorit çözelti dengesi ve sulardaki Ca miktarı ile yakından ilişkilidir. Anhidritin sıcak sulardaki çözünlüğü oldukça düşüktür (250°C'de 24 ppm, 300°C'de 8 ppm), bu nedenle, nötr pH değerine sahip yüksek sıcaklıklı sulardaki SO₄ konsantrasyonu çok düşüktür. Ancak, buhar ile ısıtılmış asidik sular ise çok yüksek SO₄ konsantrasyona sahiptir.

Su ile etkileşim sonucunda, bor ve arsenik kayalardan kolaylıkla çözünürler. Jeotermal suların Cl/B oranları soğuk su akiferlerinin Cl/B oranlarına oldukça benzerdir (Mahon, 1967). Organikçe zengin çökel kayalar veya borat yatakları ilişkili suların bor içerikleri çok yüksektir.

Yüksek sıcaklıklı, derin akışkanlarda sıkça gözlenen bir bileşen olan arsenik sığ dolaşimli sularda oldukça nadir bulunmaktadır.

Silika fazlarının çözünürlüğü sıcaklık artışı ile doğru orantılıdır. 180°C'nin üzerinde sıcaklığa sahip sularda kuvars dengede olmasına karşın amorf ve diğer duraysız silika formları doygun değildir. Bu nedenle, özellikle yüzeye çabuk yükselen ve rezervuar kayaları ile minimum derecede etkileşime giren jeotermal suların silika konsantrasyonları jeotermometre olarak kullanılmaktadır.

Silisik bir volkanik ortamda gelişen jeotermal sistemde ortaya çıkan farklı su tipleri



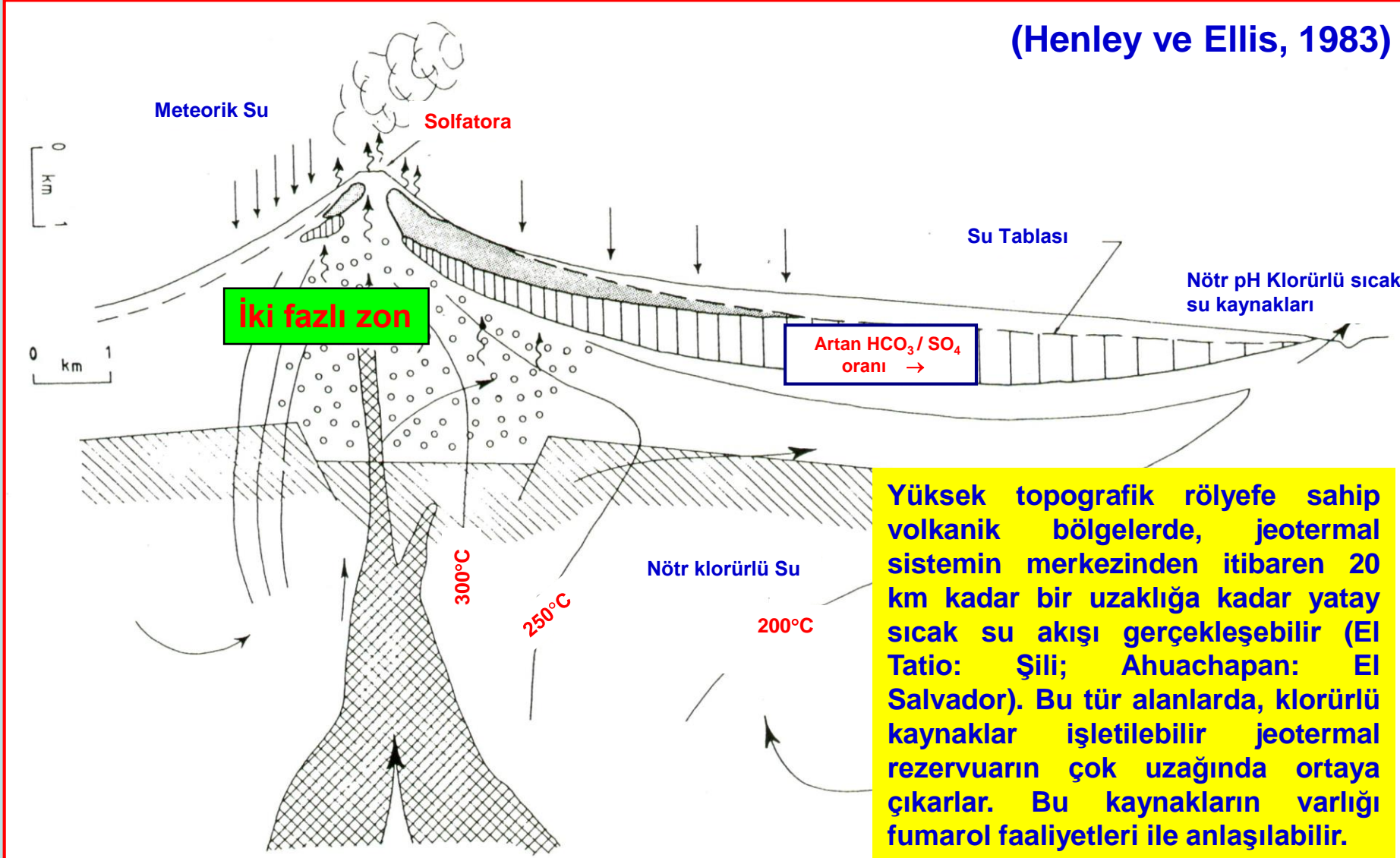
Silisik bir volkanik ortamda gelişen jeotermal sistemde ortaya çıkan farklı su tipleri yandaki şekilde gösterilmiştir (Henley ve Ellis, 1983).

Derin sıcak su sisteminden kaçan buhar ve gazlar yüzeyde fumarol şeklinde kendini gösterirler. Buna alternatif olarak, bu uçucular sığ yeraltı suyu tarafından tutularak düşük Cl-İçerikli sülfat-bikarbonat veya düşük pH'lı sülfatlı suları oluştururlar.

(Henley ve Ellis, 1983)

Yüksek topografik rölyefe sahip volkanik bölgelerde ortaya çıkan farklı su tipleri

(Henley ve Ellis, 1983)



Yüksek topografik rölyefe sahip volkanik bölgelerde, jeotermal sistemin merkezinden itibaren 20 km kadar bir uzaklığa kadar yatay sıcak su akışı gerçekleşebilir (El Tatio: Şili; Ahuachapan: El Salvador). Bu tür alanlarda, klorürlü kaynaklar işletilebilir jeotermal rezervuarın çok uzağında ortaya çıkarlar. Bu kaynakların varlığı fumarol faaliyetleri ile anlaşılabilir.

Anyon ve Katyon Bazlı Sınıflamalar

Back (1966)'ya göre, bir sudaki anyon ve katyonlardan ağırlık olarak (mek/l) %50'yi aşanlar o suyun **Hidrokimyasal Fasiyes** tipini ortaya koymaktadır. İyonlardan hiçbirinin %50'yi geçmediği sular ise **Karışık Su Tipine** karşılık gelmektedir.

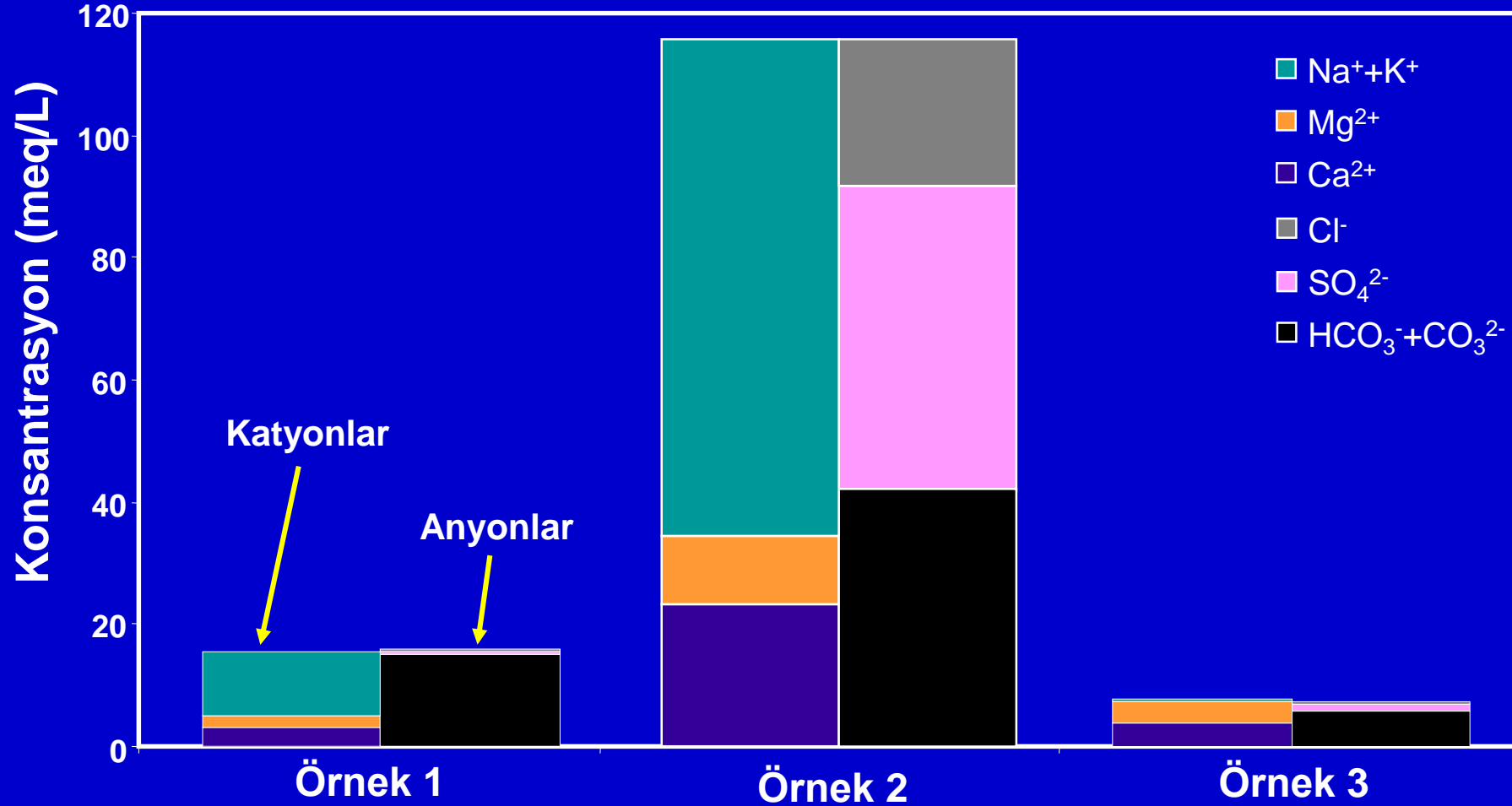
Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979)'nin öngördüğü sınıflamada ise, suda çözünmüş ana anyon ve katyonlardan bollukları %20'yi aşanlar sırasıyla önce katyonlar sonra anyonlar yazılarak su tipi belirlenmektedir (örneğin, **Na-Cl veya Ca-HCO₃**).

Kimyasal Verilerin Görselleştirilmesi

- İyon bolluklarının görsel hale getirilmesinde kullanılan çok sayıda grafik ve diyagram bulunmaktadır:
 - Collins Diyagramı (Kolon Diyagram)
 - Dairesel Diyagram
 - Stiff Diyagramı
 - Işınsal Diyagram
- Diğer diyagramlar ise suların gruplandırılması veya kökenlerinin yorumlanmasında kullanılır:
 - Kare Diyagram
 - Düşey Logaritmik Diyagram (Schoeller Diyagramı)
 - Üçgen Diyagramlar
 - Piper Diyagramı
 - Çit Diyagramı

Collins (Kolon) Diyagramı

(meq/l) olarak



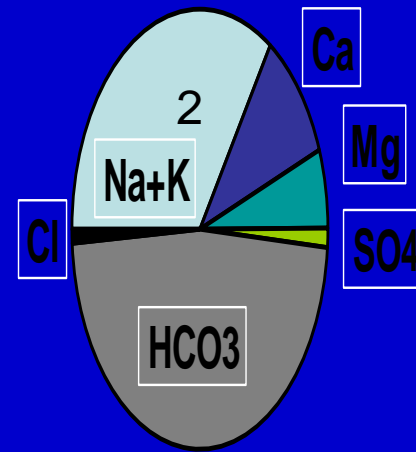
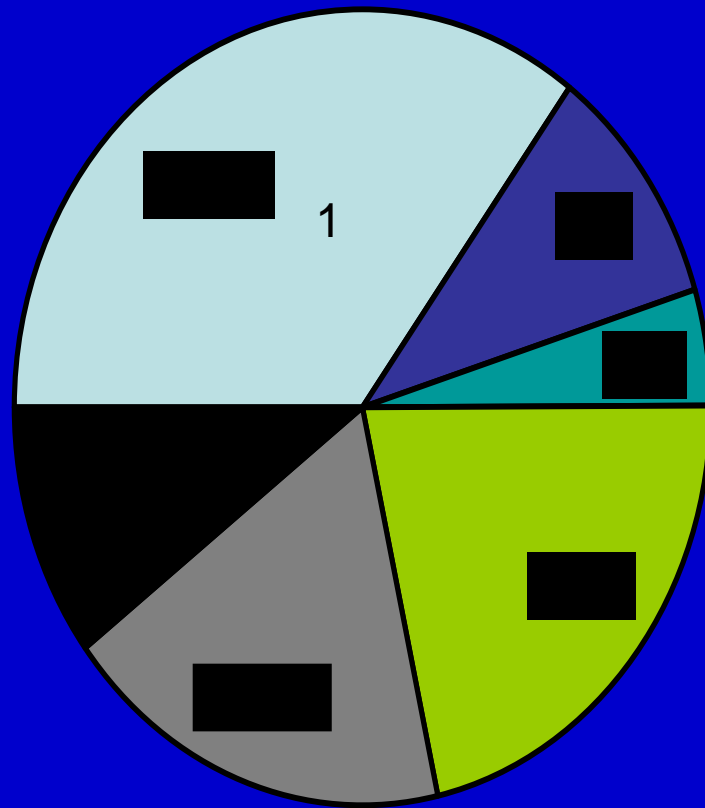
Collins (Kolon) Diyagramı

r (%)	K	Cl
	Na	
	Mg	HCO ₃
	Ca	

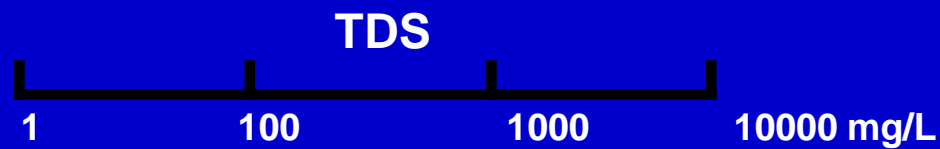
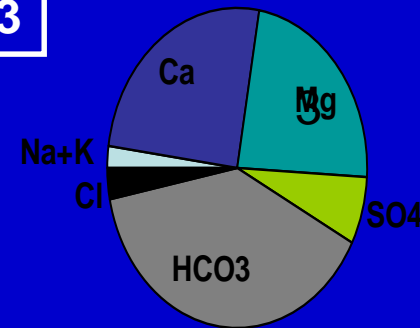
(%) olarak

Her bir örnek için ayrı bir diyagram hazırlanması en büyük dezavantaj

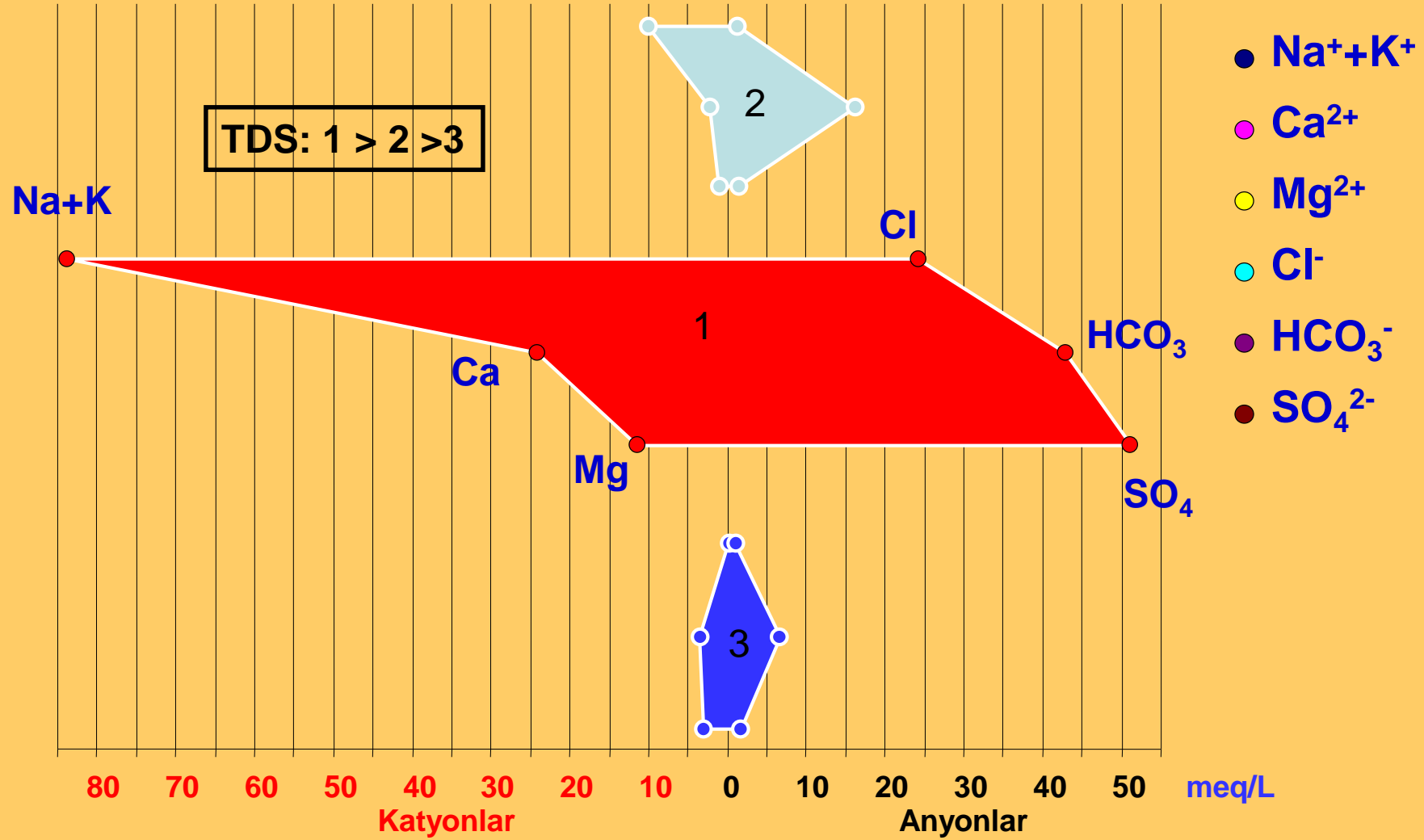
Dairesel Diyagramlar



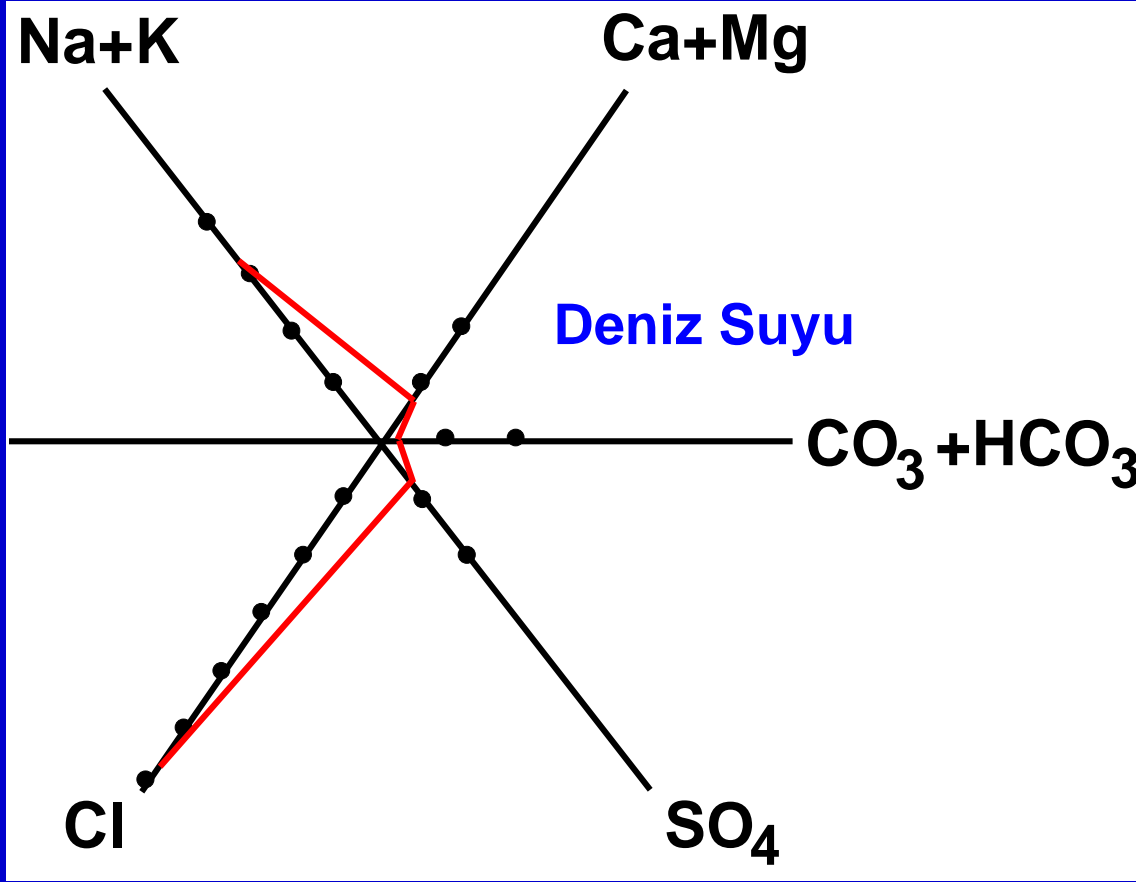
TDS: 1 > 2 > 3



Stiff Diyagramı



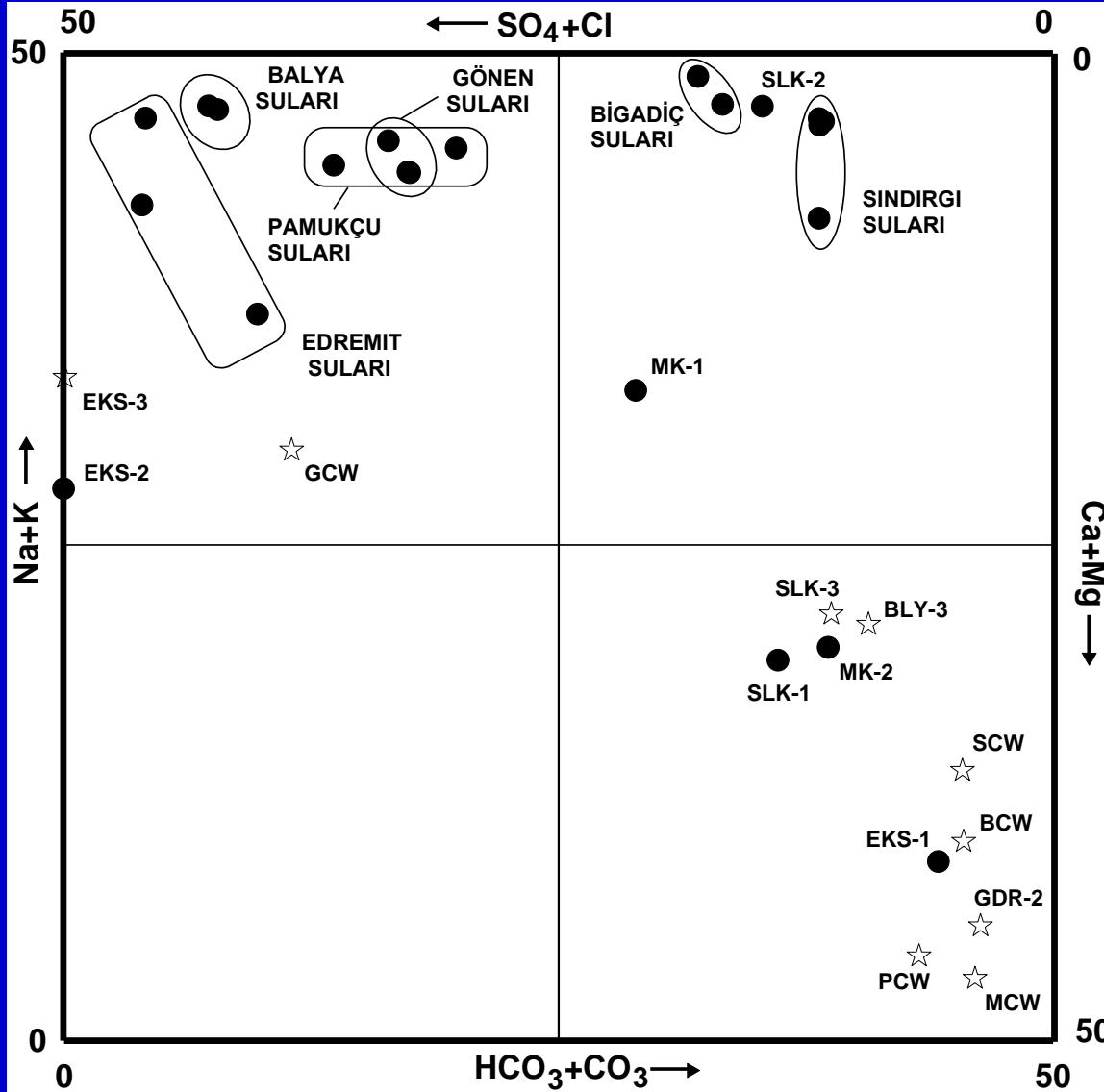
Işınsal Diyagram



- Eksen sayısı 6 ile 8 arasında
- Eksenler üzerinde işaretlenen iyon konsantrasyonları (yüzde olarak) poligon oluşturacak şekilde birleştirilir
- Her örneğin kendine has bir deseni vardır (avantaj)
- Çok sayıda örnek tek bir grafik üzerinde gösterilemez

Kare Diyagramı

(Langelier – Ludwig Diyagramı)

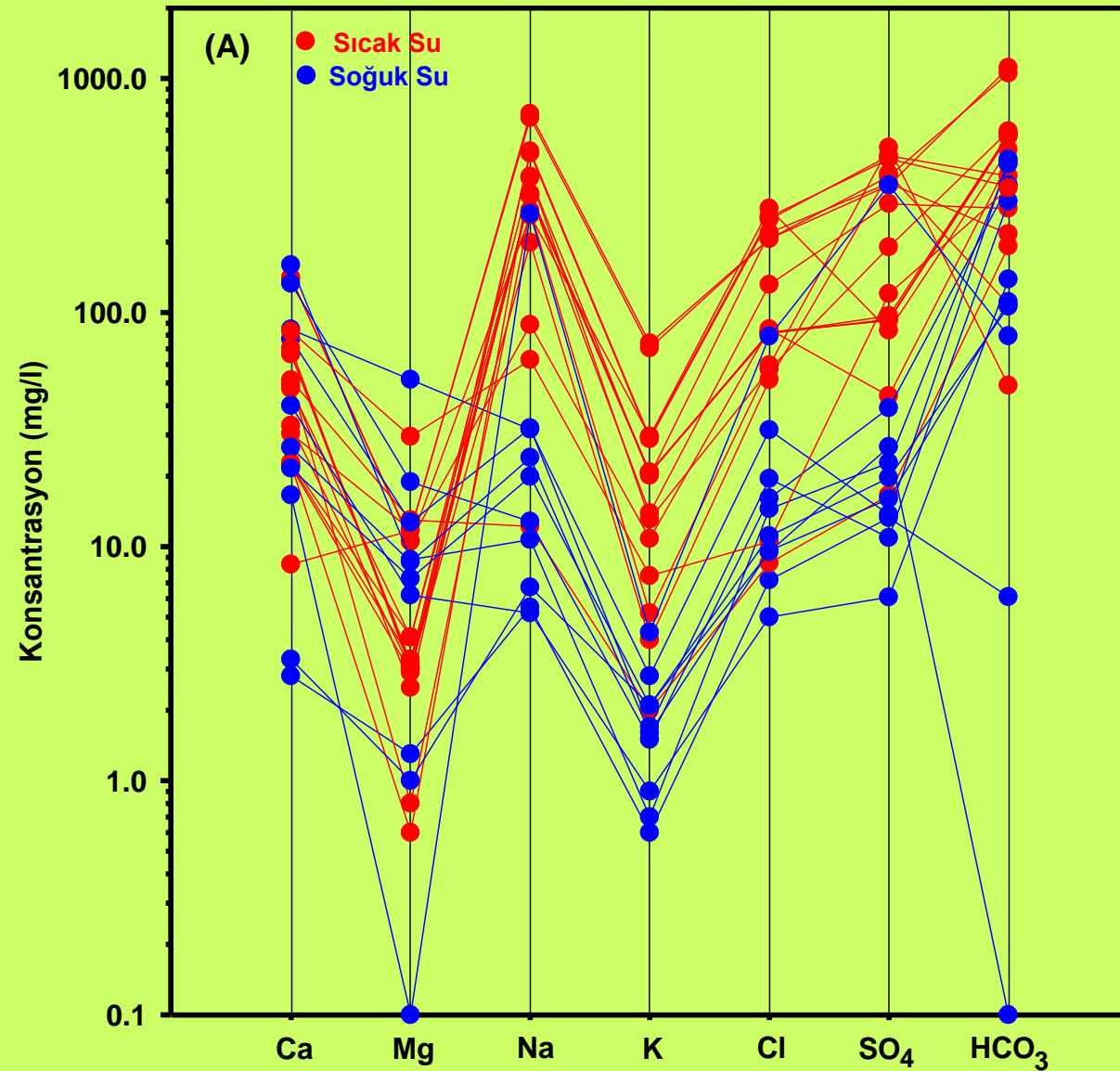


•Her kenar 50 veya 100 eşit parçaya ayrılır

•Karşılıklı iki kenar üzerinde, iki kation (Ca+Mg ve Na+K) ve iki anyon grubuna ait (Cl+SO₄ ve HCO₃+CO₃) konsantrasyonlar yüzde olarak işaretlenir

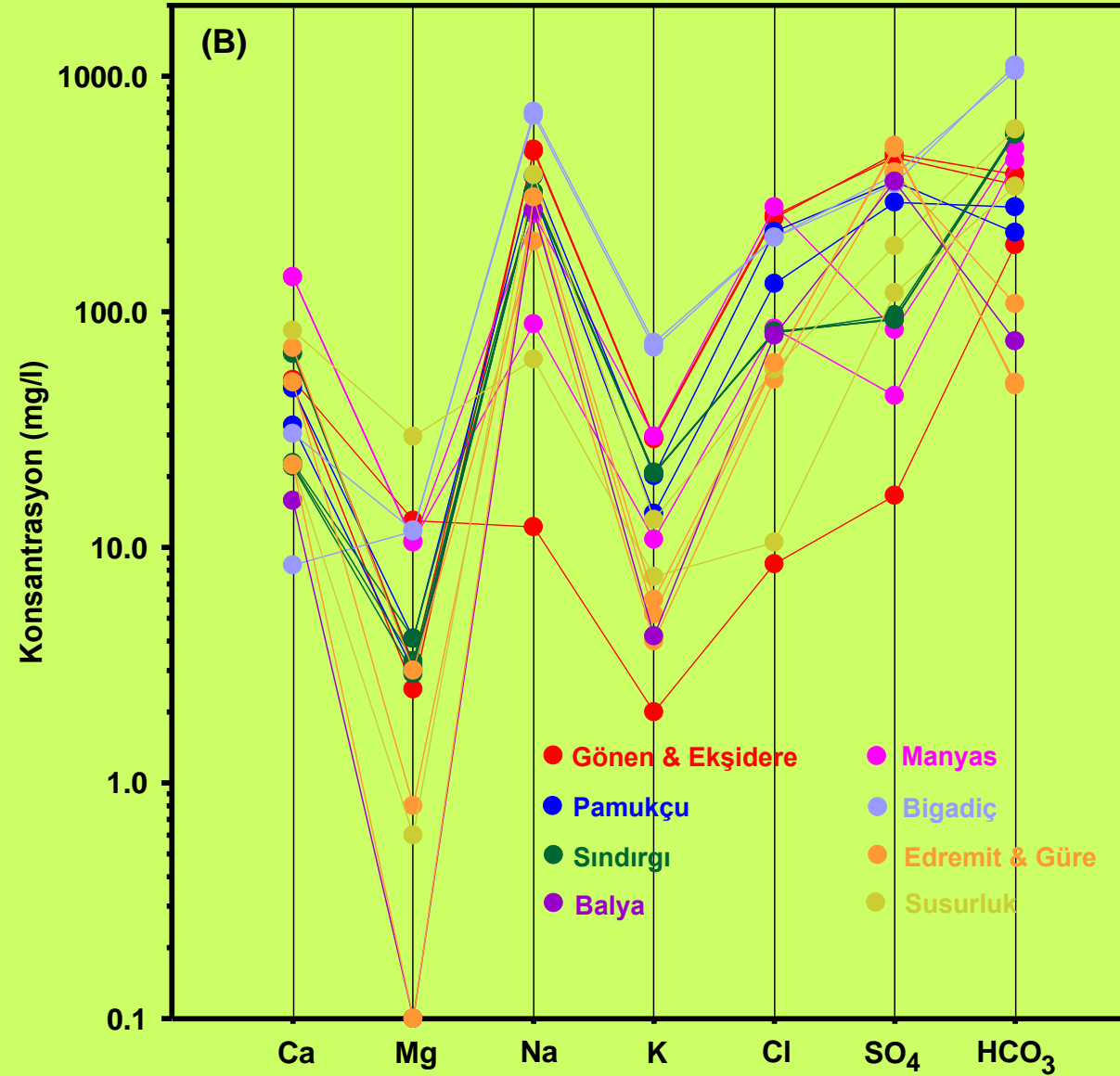
Mutlu, 2007

Schoeller Diyagramı



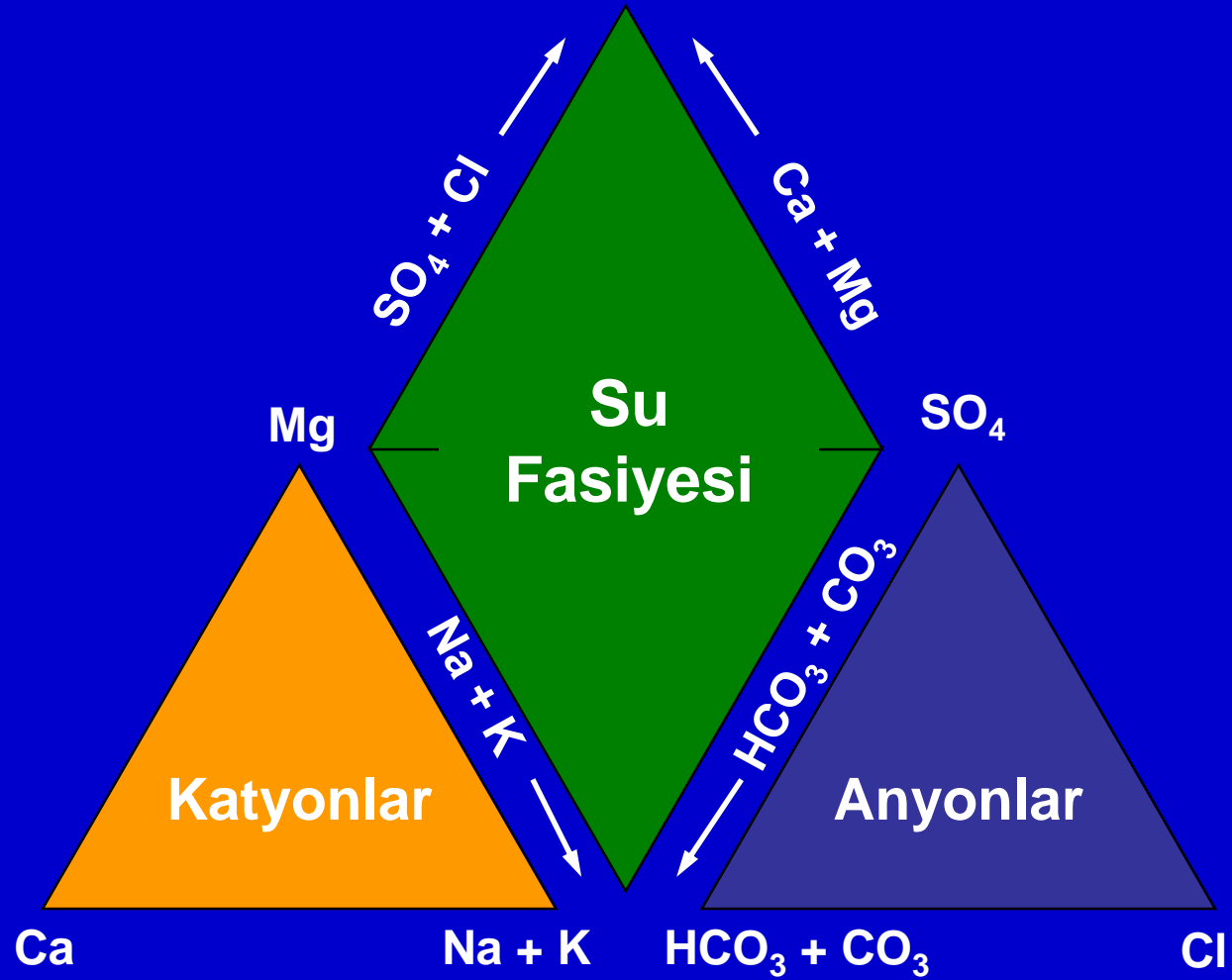
Mutlu, 2007

Schoeller Diyagramı



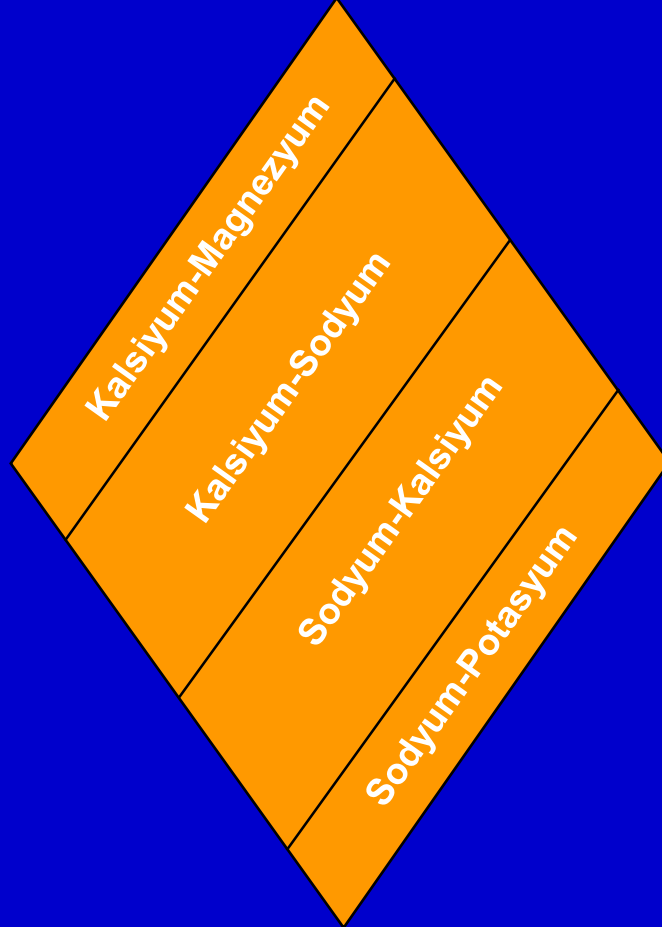
Mutlu, 2007

Piper Diyagramı

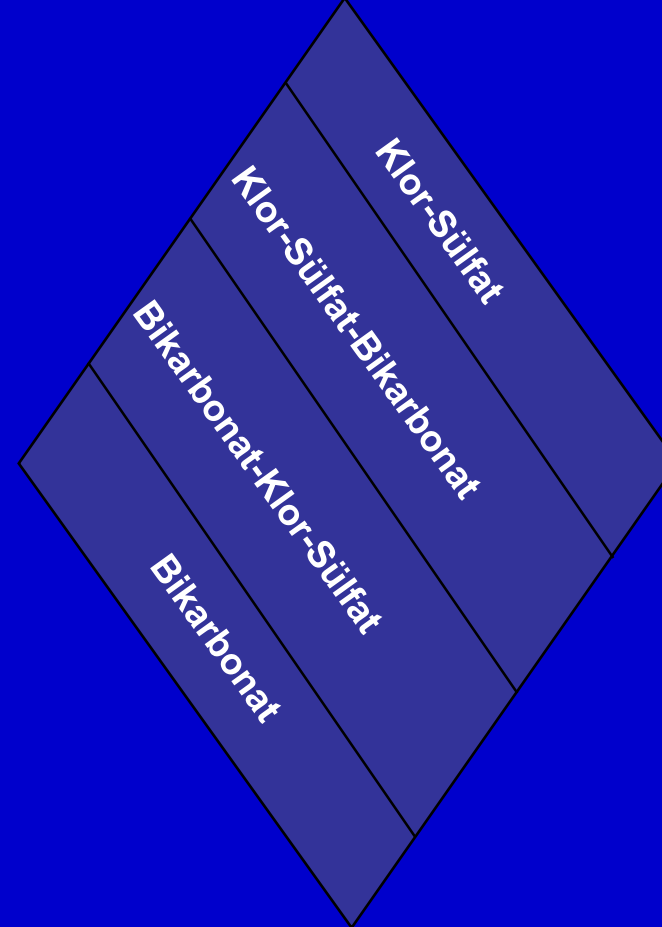


Su Fasiyesi

Kasyonlar



Anyonlar



Sınıflama

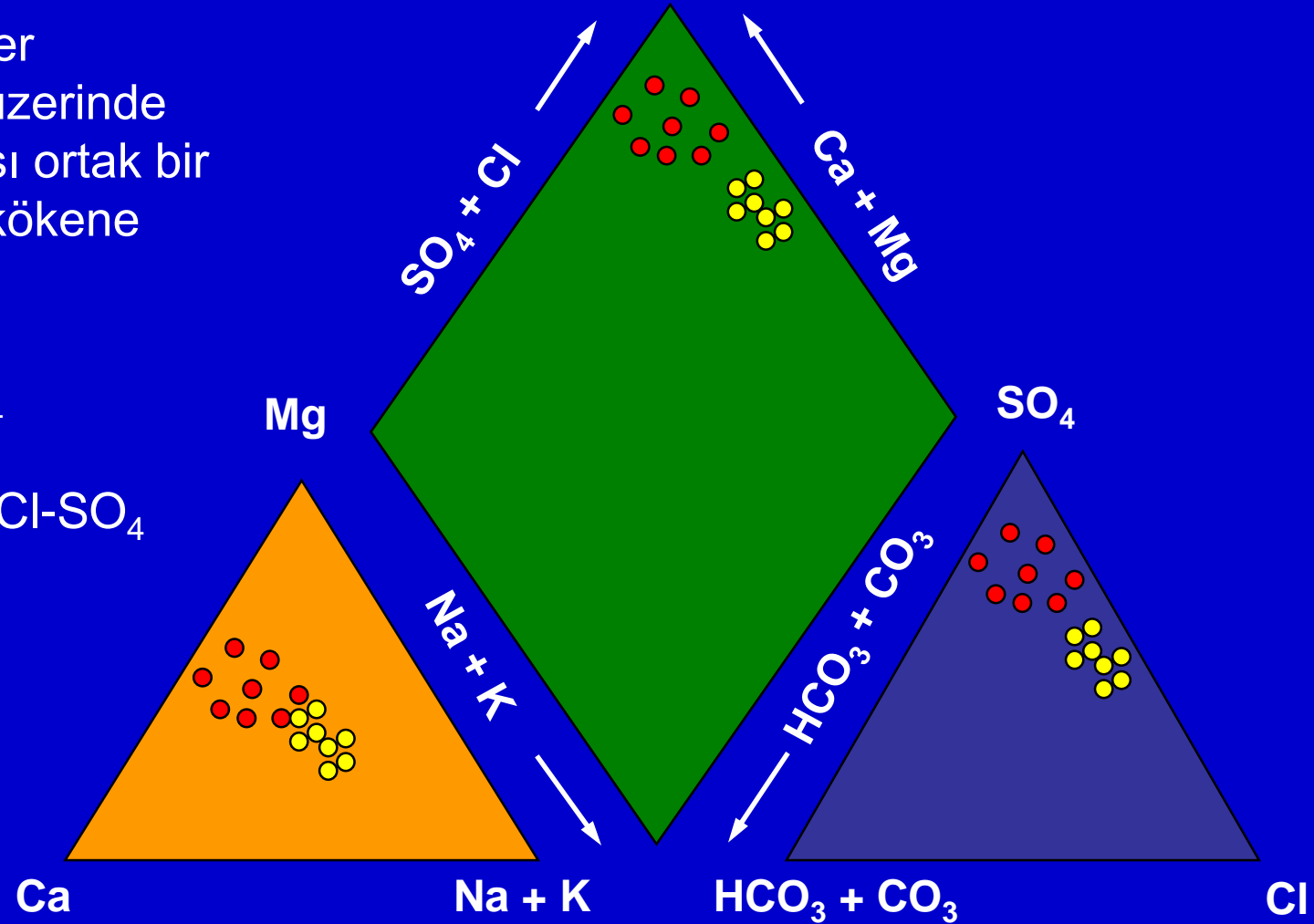
Suların Piper diyagramı üzerinde gruplanması ortak bir bileşim ve kökene işaret eder.

Kırmızı:

Ca-Mg-SO₄

Sarı:

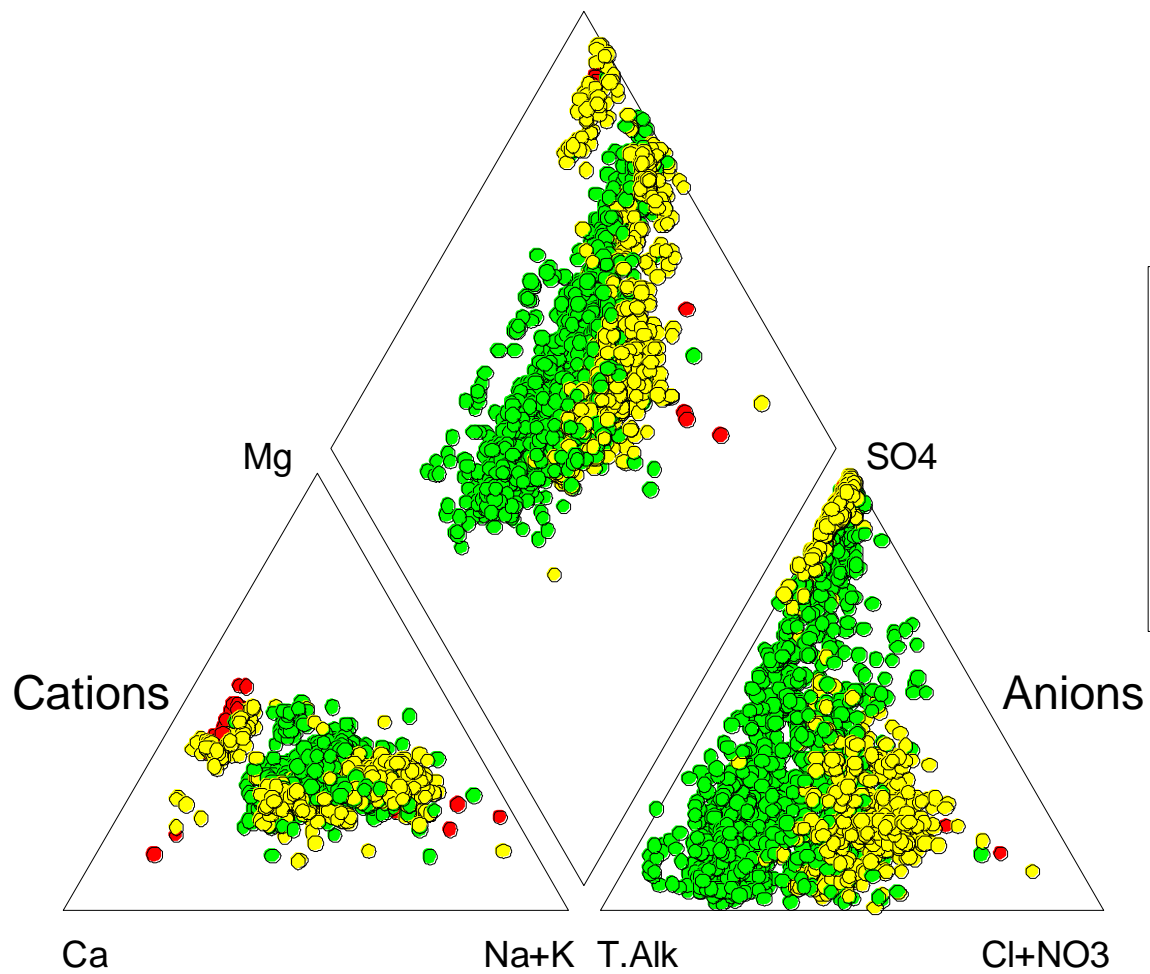
Ca-Mg-Na-Cl-SO₄



Piper Diagram

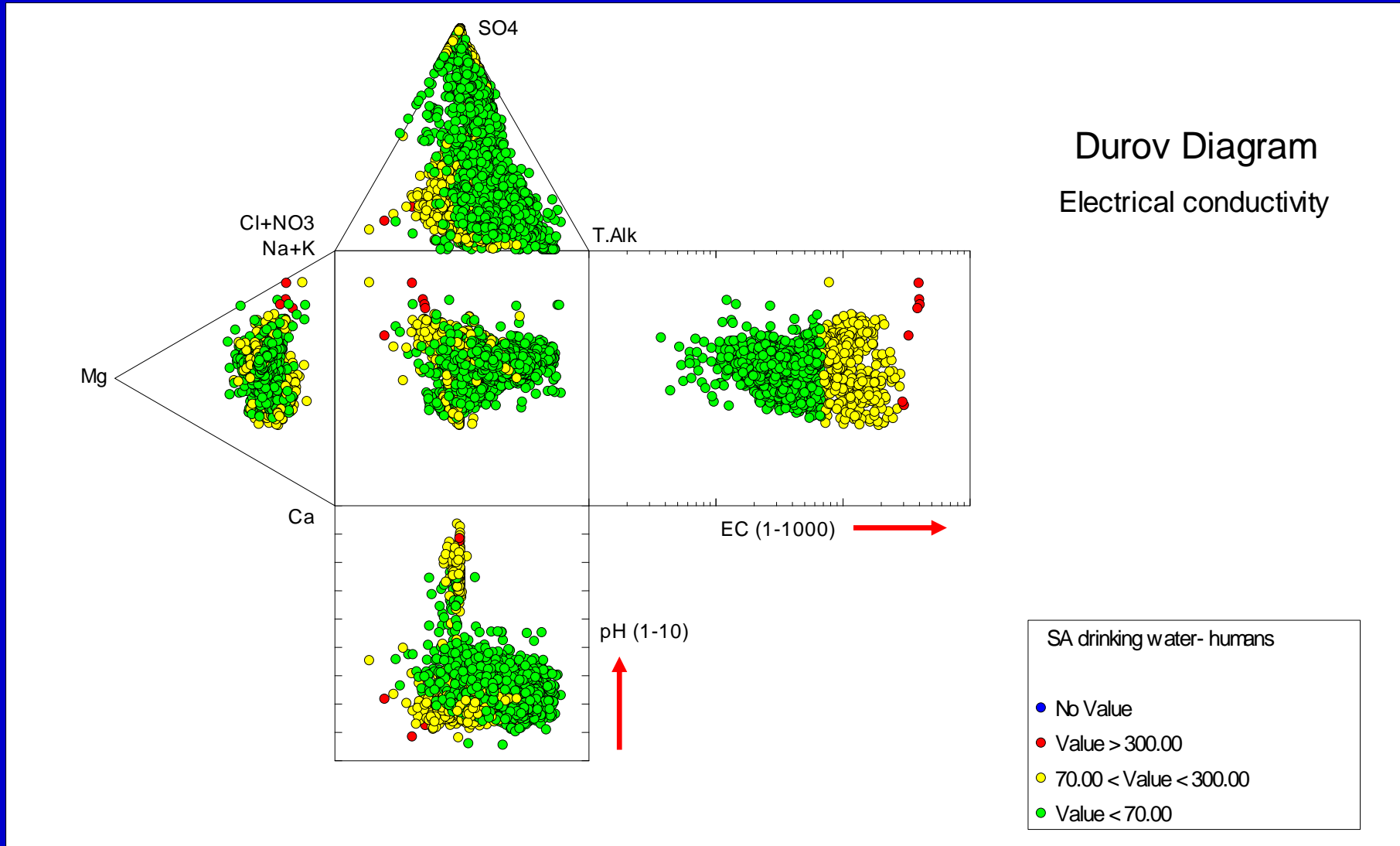
Electrical conductivity

SA drinking water- humans



- No Value
- Value > 300.00
- 70.00 < Value < 300.00
- Value < 70.00

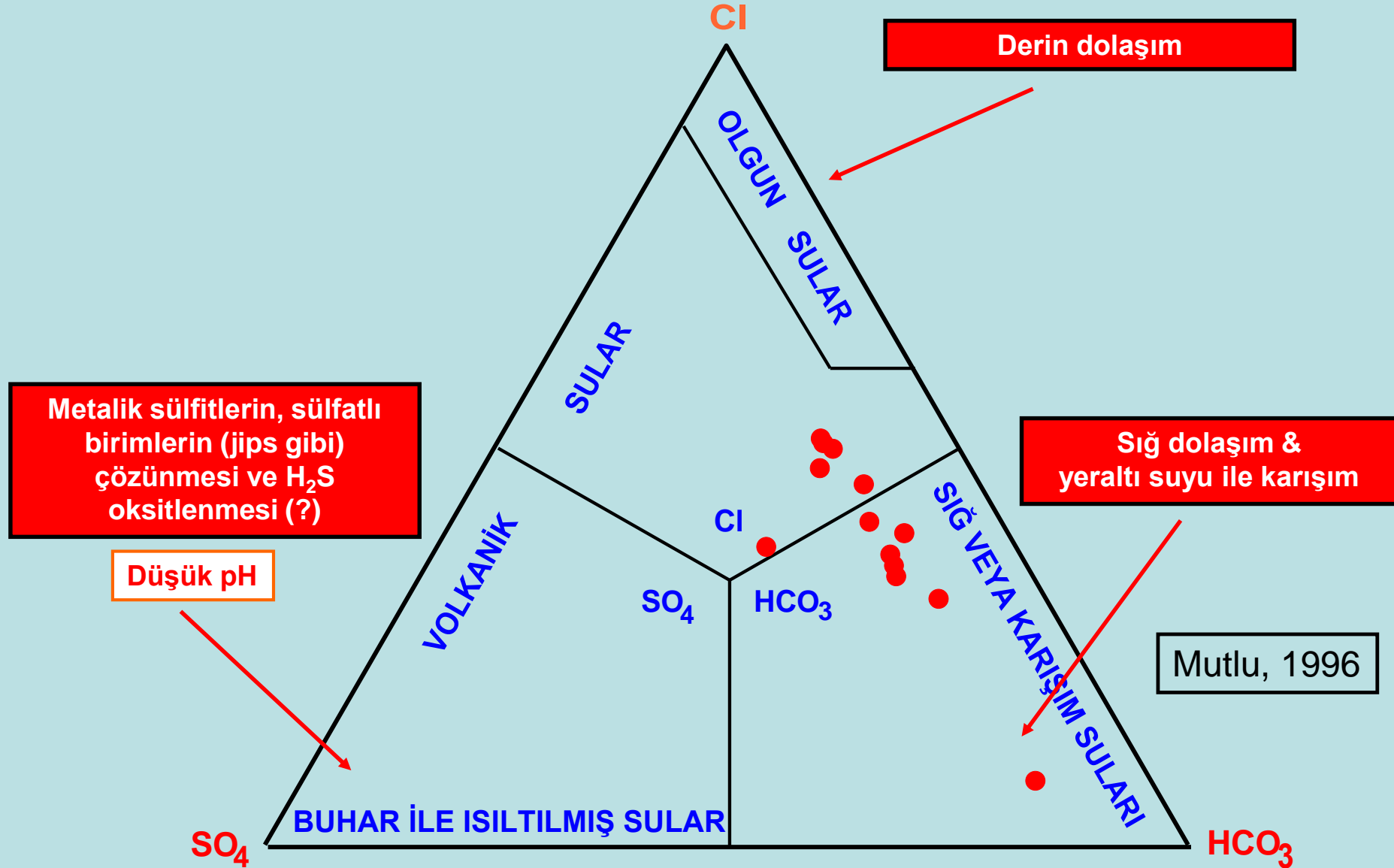
Durov Diyagramı



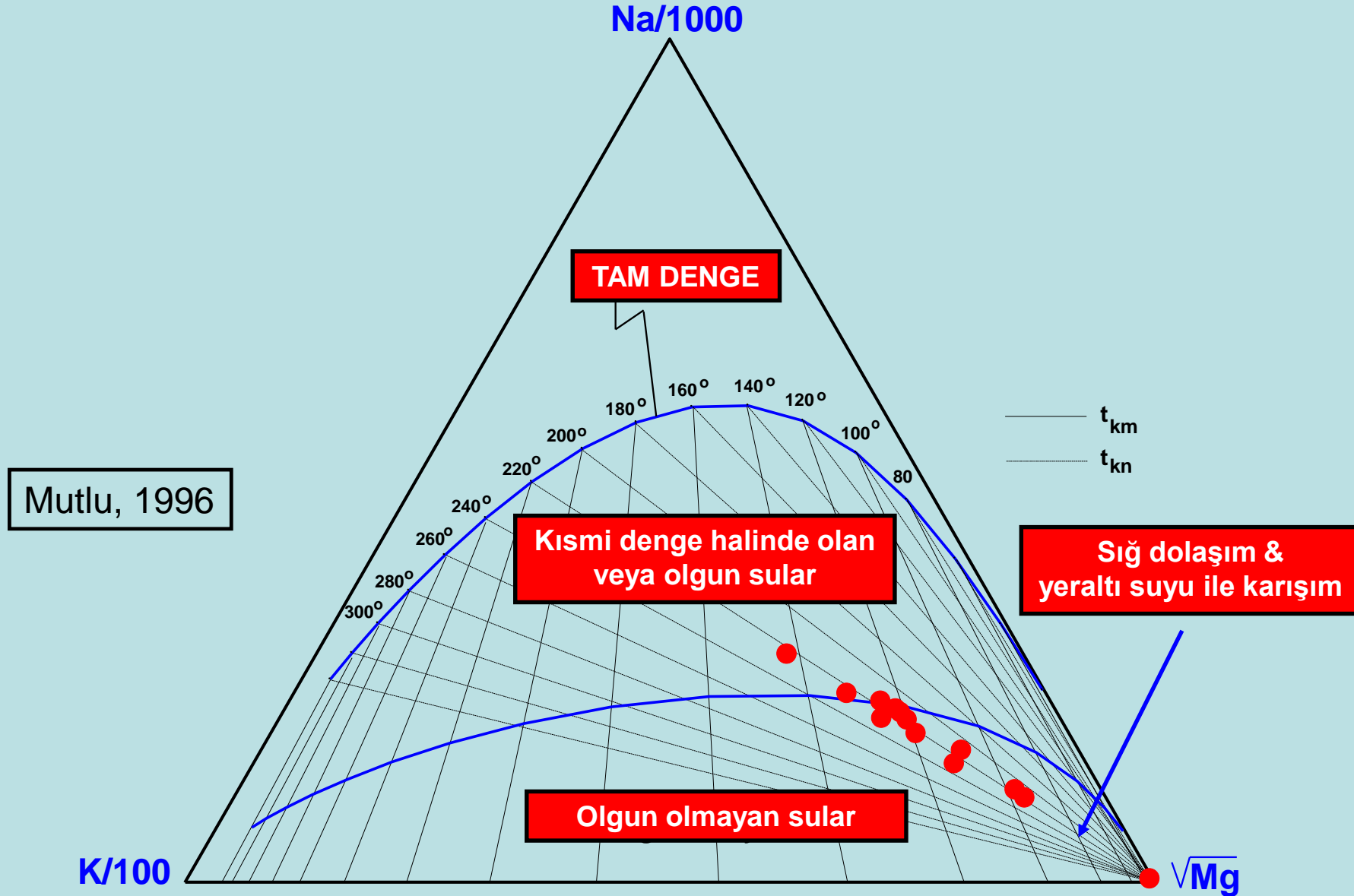
Üçgen Diyagramlar

- Üçgen diyagramlarda, iyon konsantrasyonları (mg/l veya $\mu\text{g/l}$ cinsinden) her kenarı 100 eşit parçaya ayrılan eşkenar üçgen üzerinde yüzde olarak ve tek bir nokta şeklinde gösterilir.
- Bu tür diyagramlar termal suların içerdikleri majör iyon bolluklarına göre sınıflandırılması ile iz element kökenlerinin ve karışım işlevinin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

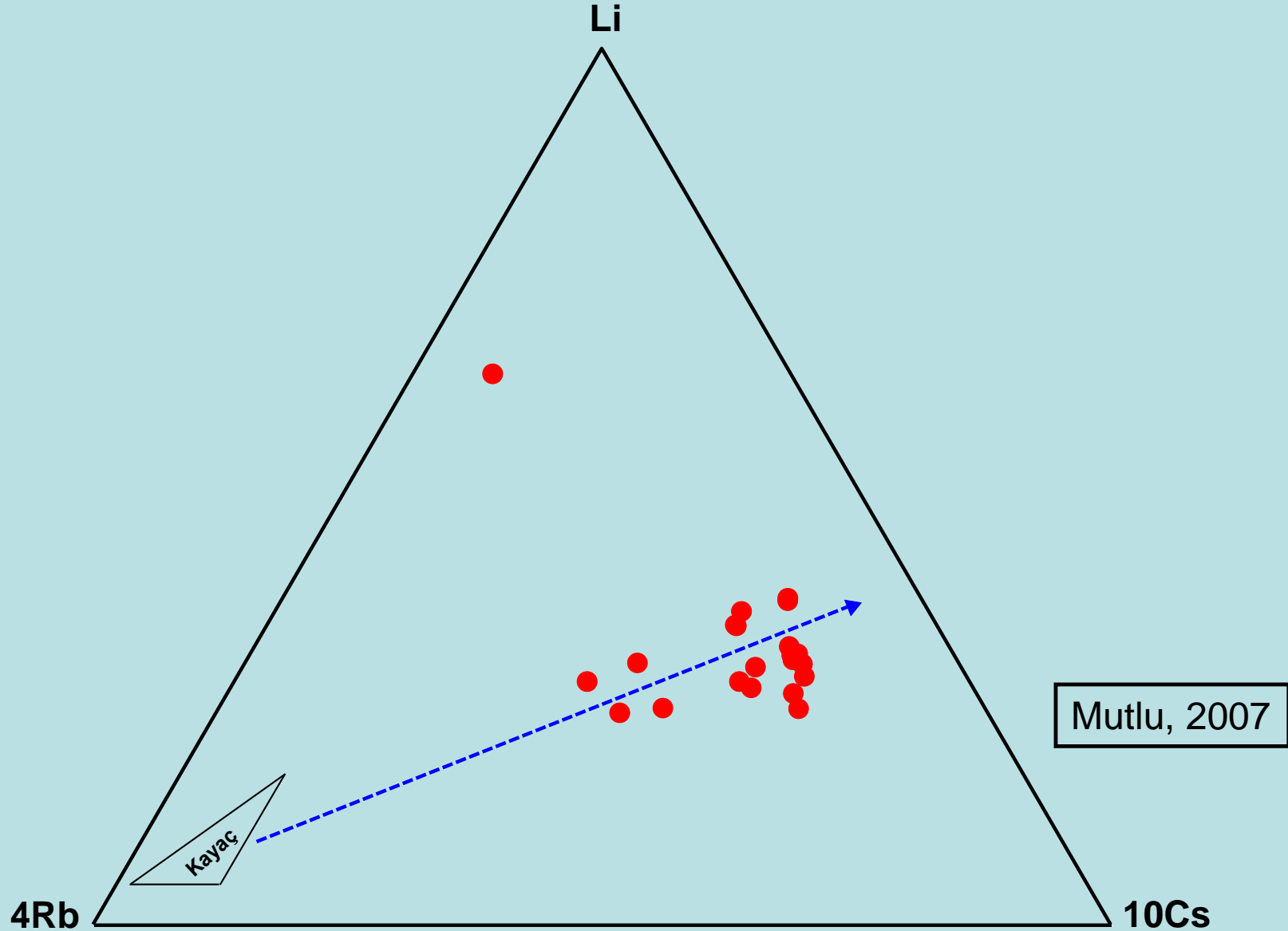
Cl-SO₄-HCO₃ Diyagramı



Na/1000–K/100– \sqrt{Mg} Diyagramı

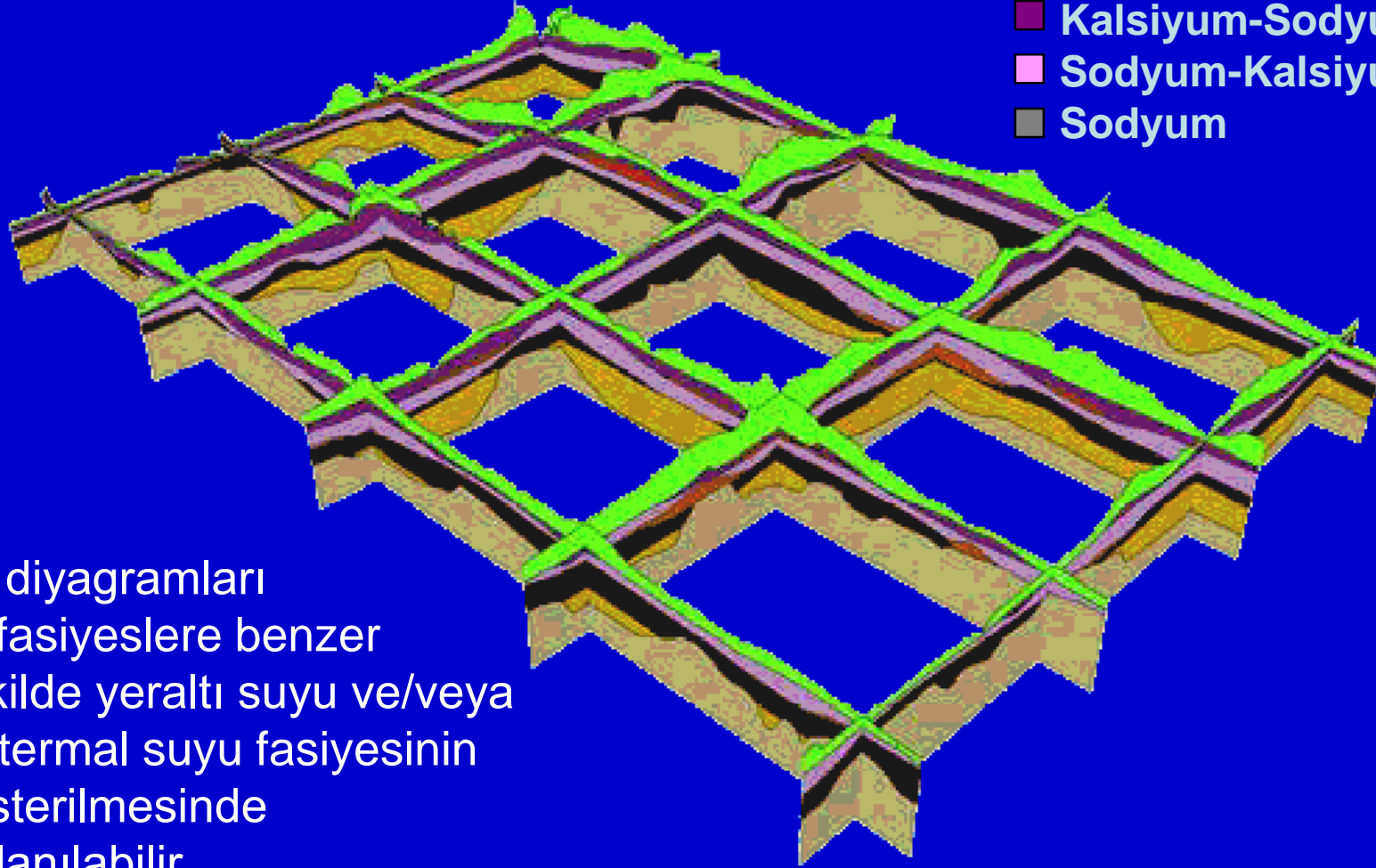


Li-4Rb-10Cs Diyagramı



Çit Diyagramı

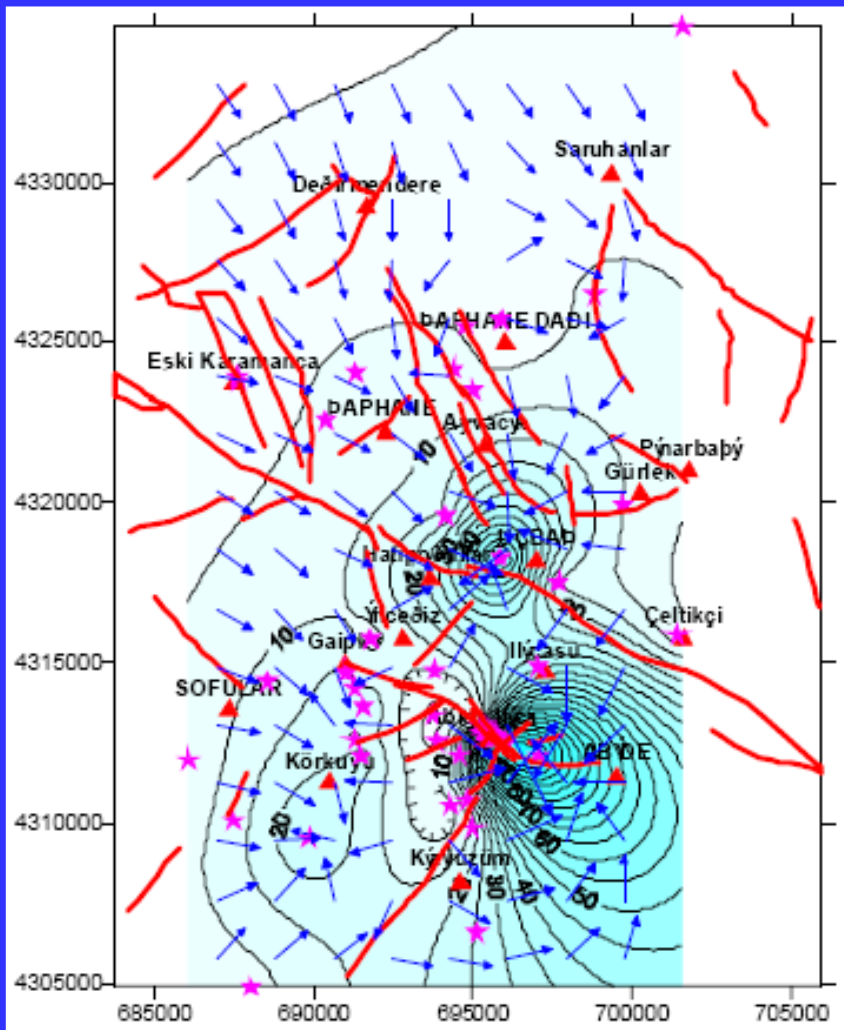
- Kalsiyum-Magnezyum
- Kalsiyum-Sodyum
- Sodyum-Kalsiyum
- Sodyum



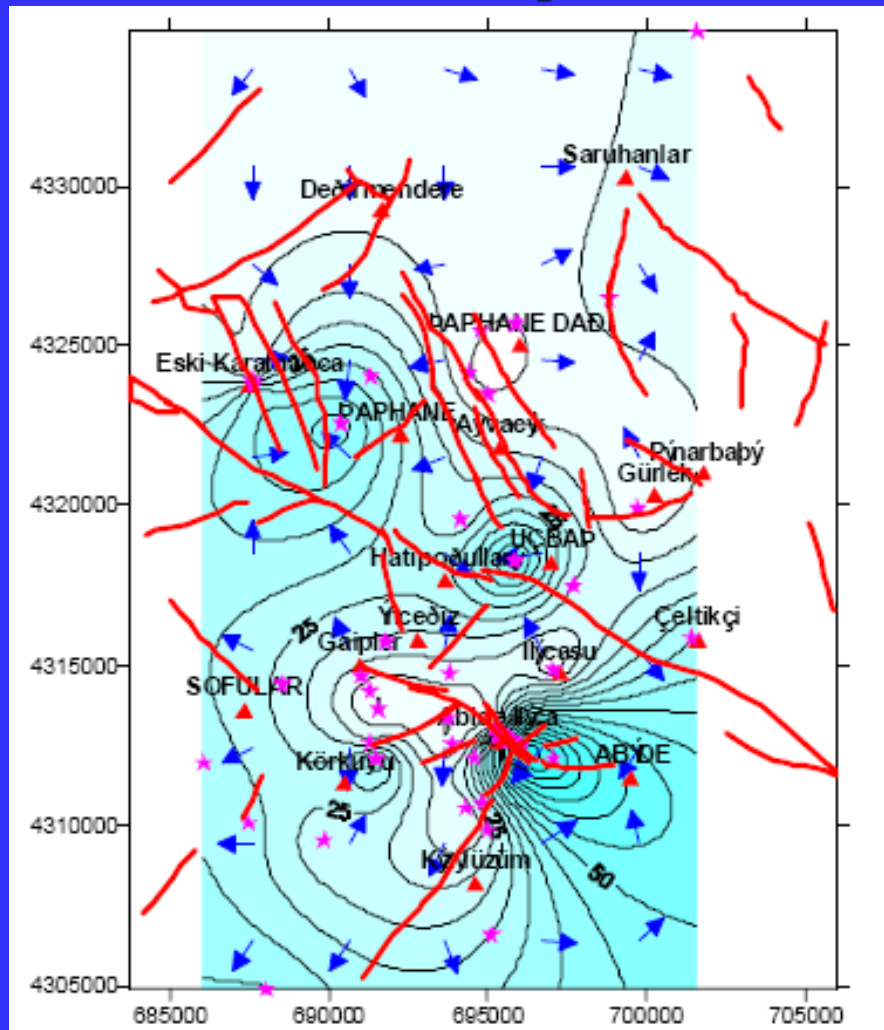
Çit diyagramları litofasiyelere benzer şekilde yeraltı suyu ve/veya jeotermal suyu fasiyesinin gösterilmesinde kullanılabilir.

Eş Konsantrasyon haritaları

Cl



SiO₂



İSTATİSTİKSEL ARAÇLAR

1. ORTALAMA

2. STANDART SAPMA

3. VARYASYON KATSAYISI

4. KORELASYON KATSAYISI