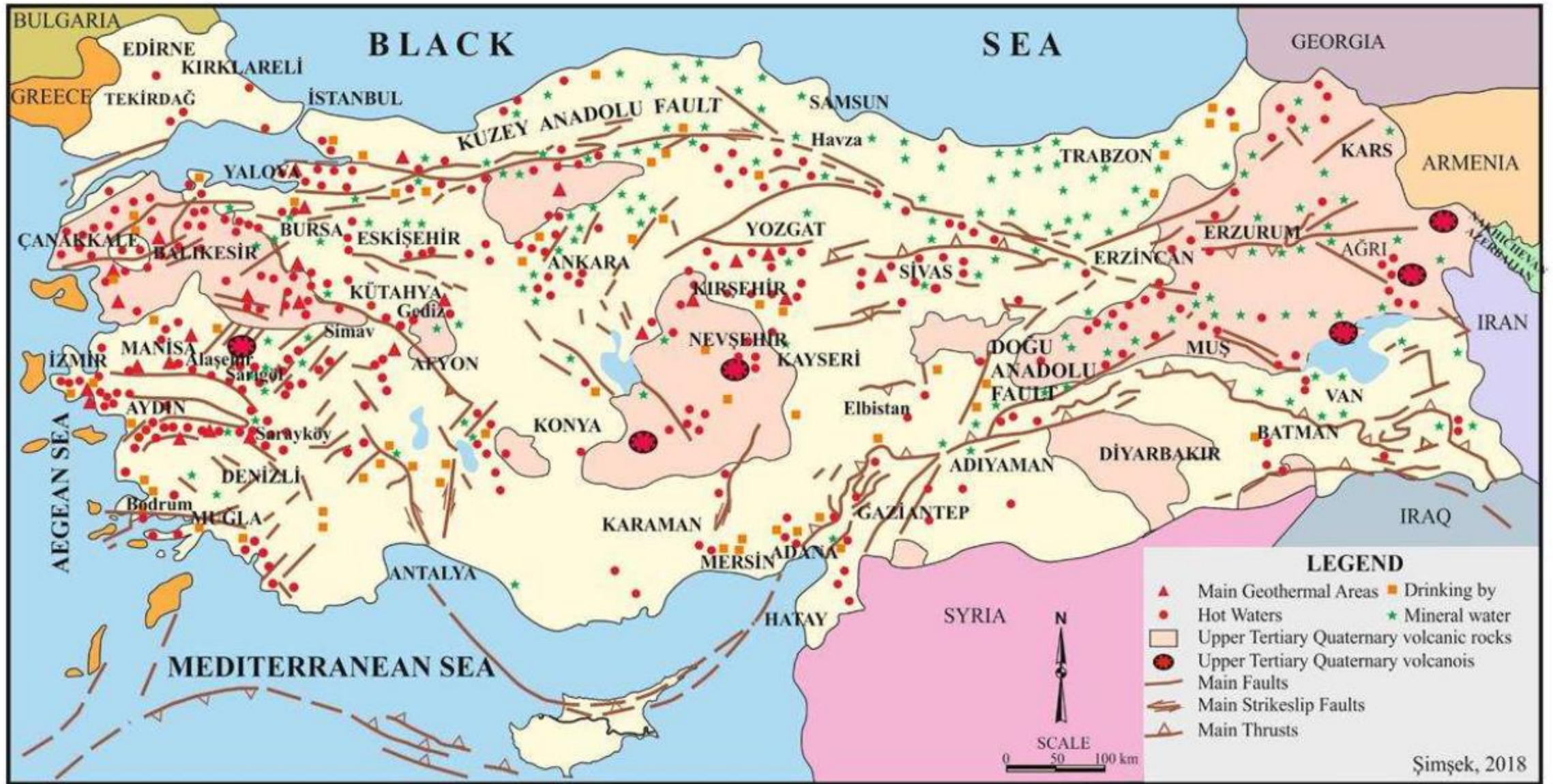
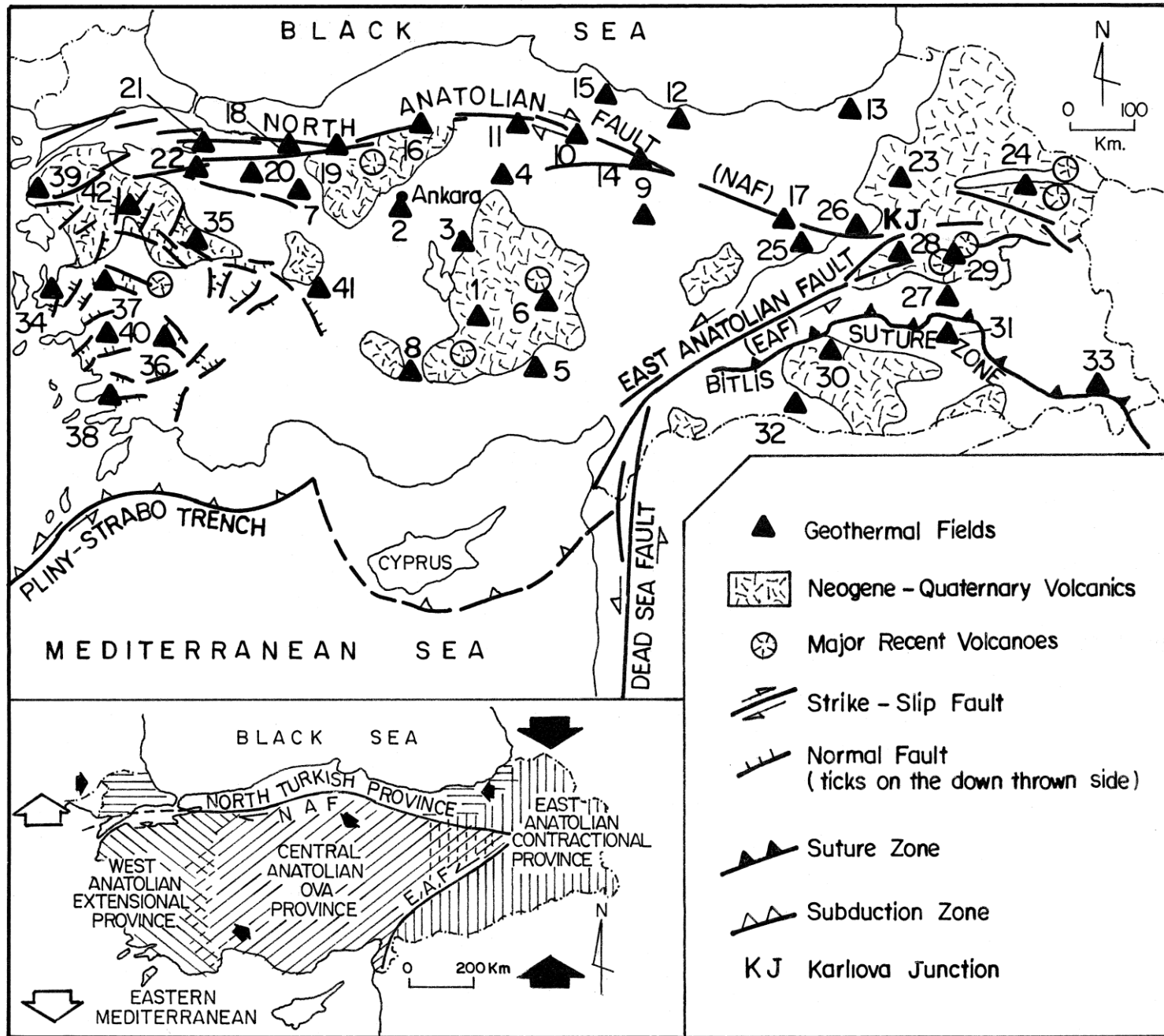


# TÜRKİYE'NİN JEOTERMAL POTANSİYELİ



Tektonik olarak aktif Alp-Himalaya dağ kuşağında yer alması nedeniyle, Türkiye'de geniş yayılımlı bir jeotermal aktivite mevcuttur. Bu potansiyel çok sayıda sıcak su kaynağı, fmerol ve güncel mineralizasyon şeklinde kendini gösterir. Türkiye'nin jeodinamik tarihçesi Mesozoik'ten itibaren başlayan Avrasya ve Arap plakalarının hareketi ve buna bağlı olarak çevredeki mikro kıtasal plakaların ayrılma, çarpışma ve deformasyonu süreçleri ile şekillenmiştir. Bu plakaların sınırları genç volkanikler ve aktif faylar (su ve ısı sirkülasyonunu sağlayan) ile çevrelenmiş sismik kuşaklardan oluşmuştur. Türkiye'deki sıcak suların dağılımı büyük ölçüde fay sistemlerin ve Tersiyer-Kuvaterner volkaniklerinin yayılımı ile örtüşür. Debi sıcaklıkları 100°C'ye ulaşan 500'den fazla sıcak su kaynağının varlığı Türkiye'de önemli bir jeotermal potansiyel olduğuna işaret etmektedir. Bu durum Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünün (MTA) 1960'lı yıllardan itibaren yürütmekte olduğu sondaj çalışmaları ile de doğrulanmıştır. MTA ile birlikte özel sektör kuruluşlarının delmiş oldukları jeotermal kuyu sayısı 500'e ulaşmıştır. Türkiye'deki ilk jeotermik elektrik üretimi 1984 yılında Denizli-Kızıldere'de kurulan 20 Mwe kapasiteli santraldan yapılmıştır.



Ana tektonik hatlar ve volkanik kuşaklar ile ilişkili olarak Türkiye'deki jeotermal alanların dağılımı (MTA, 1993). Ek haritada gösterilen Türkiye'deki ana Neotektonik provensleri göstermektedir (Şengör vd., 1985).

Türkiye'nin tektonik evriminde iki ana faz öneli rol oynamıştır:

- **Paleotektonik dönem:** Bu dönem, Afrika ve Avrasya plakalarının birbirlerine yaklaşması ve orta Miyosen'de Bitlis kenet zonu boyunca çarpışması ile sonuçlanan levha hareketlerini kapsar.
- **Neotektonik dönem:** Bu dönem, bu plakaların çarpışma sonrası dönemde sıkışmaları ve buna bağlı olarak çeşitli neotektonik bölgelerin oluşması ile ilişkilidir.

Bitlis Kenet Zonu (BSZ): Afrika-Arabistan plakasının orta Miyosen'de Avrasya plakası ile çarpışması sonucu oluşmuştur. Bu çarpışma günümüzde halen devam etmektedir. Kuzey Anadolu Faz Zonu (KAF, sağ-yanal doğrultu atımlı fay) ve Doğu Anadolu Faz Zonu (DAF, sol-yanal doğrultu atımlı fay) Arabistan plakasının kuzey yönlü hareketi sonu oluşmuşlardır. Tek bir kırıktan meydana gelmeyen bu faylar küçük fay segmentlerinden oluşmuş dar zonlar şeklindedir. Doğudaki Karlıova kavşak noktasından başlayarak DAF GB'ya doğru uzanır ve Ölü Deniz fayı ile birleşir. NAF ise batıya devam eder ve doğrultu atım bileşenli normal faylanma olarak çeşitli kollara ayrılır. Bu faylarla ilişkili olarak Türkiye'de dört temel neotektonik bölge tespit edilmiştir:

1. KAF ve DAF faylarının birleştikleri Karlıova kavşağının doğusunda yer alan doğu Anadolu sıkışma provensi, bu bölge halen BSZ boyuna devam eden sıkışma nedeniyle K-G yönlü bir kısalma ile temsil edilir.
2. NAF fayının kuzeyinde yer alan ve sınırlı ölçüde D-B kısalma gösteren kuzey Anadolu provensi,
3. Anadolu plakasının KAF ve DAF boyunca B-GB yönlü kaçış hareketi nedeniyle ortaya çıkan K-G yönlü açılmanın görüldüğü batı Anadolu açılma provensi,
4. KD-GB yönlü kısalma ve KB-GD yönlü açılma ile temsil edilen orta Anadolu 'ova' provensi, bu provens içinde karasal sedimanlar tarafından doldurulmuş havzalar (ovalar) yaygındır.

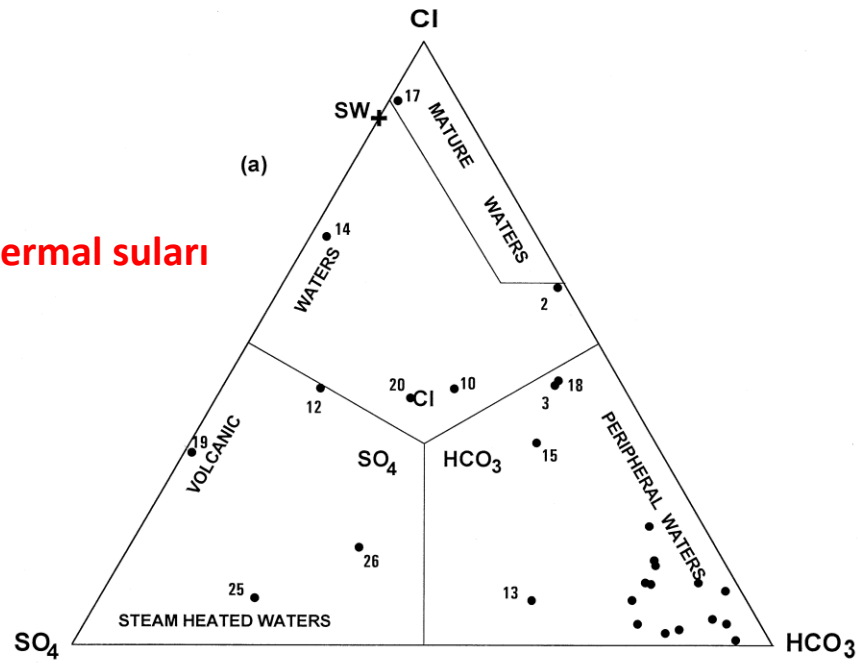
## ***İç Anadolu suları***

Doğu Anadolu'daki sıkışma rejiminin batı Anadolu'daki açılma rejimine dönüştüğü iç Anadolu bölgesinde, Mesozoyik karbonatlar ve Mesozoyik-öncesi metamorfikleri üzerleyen kalın Neojen volkanosedimanter seriler ile tarihsel püskürme kayıtları bulunan genç volkanlar karakteristik jeolojik birimlerdir. Neojen volkanosedimanter birimler, Kırşehir masifine ait Mesozoyik-öncesi metamorfikler ve Mesozoyik karbonatlar İç Anadolu bölgesindeki başlıca rezervuar kayalardır. volkanosedimanter serilere ait tüfler ile geçirgenliği düşük sedimanter kayalar (kiltaşları) ve volcanosedimentary kayalar (marn) bu bölgedeki jeotermal sistemlerin örtü kayalarıdır. İncelenen suların sıcaklıkları 28-98°C arasındadır. Suların pH değerleri 6.10-9.63 ve TDS ise 359-7982 ppm'dir. Termal sular Ca-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub> ve Na-Cl tipte olup nadiren Na- ve Ca-SO<sub>4</sub> karakterli olanları da mevcuttur.

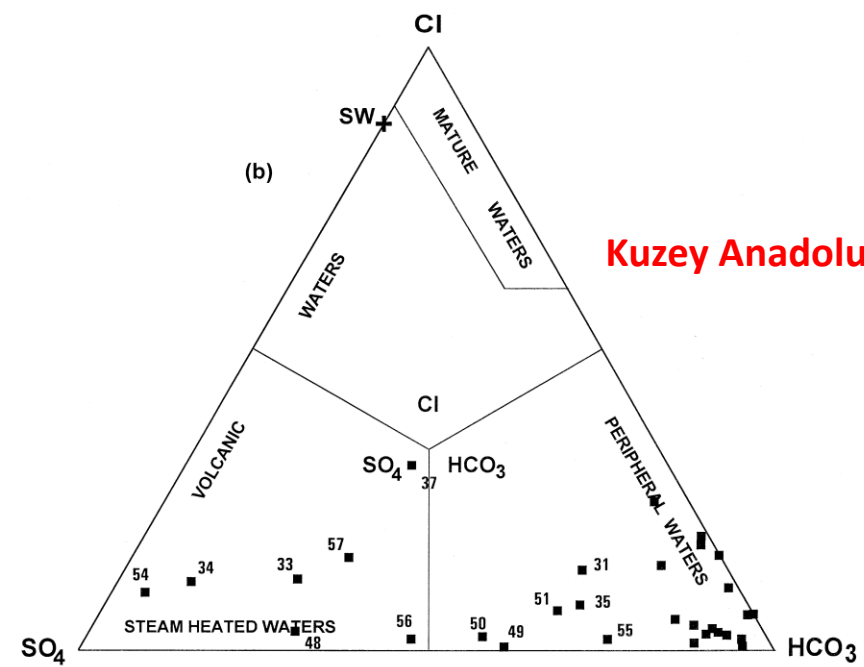
Bikarbonatça zengin olan sular Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> diyagramında çevresel (peripheral) alanda yer alır. Bu suların bileşimi sığ derinlerde kayaç çözünmesi yoluyla ortaya çıkan yüksek P<sub>CO2</sub> varlığı (derin kökenli CO2) ve ayrıca etkileşimde buldukları silisiklastik kayalardan Na-Ca iyonlarını kazanmaları ile şekillenmiştir. Klorürce zengin sular çoğunlukla yüksek sıcaklıklı olup diyagramda olgun (mature) sular alanına düşerler. Bu sular muhtemelen derin sıcak suların dolaşımında olduğu litolojilerden türeyen fosil sulardır.

Sülfatça zengin olanlar diyagramda buharla-ısıtılmış (steam-heated) ve volkanik sular alanında yer alır. Orta Anadolu'daki volkanik faaliyetler tarihsel dönemlere kadar etkinliğini sürdürmüştür. Bu kapsamda, sulardaki sülfat zenginliği yeraltında halen soğumakta olan magma gövdelerinden kaçan H<sub>2</sub>S gazının oksitlenmesi ile olabilir. Ancak düşük suların B içerikleri volkanik bir sistemden beklenecek kadar yüksek olmadığından, örneklerdeki sülfat baskınlığı muhtemelen bölgedeki sülfatça zengin kayalarla (evaporit-jips) etkileşimle açıklanabilir.

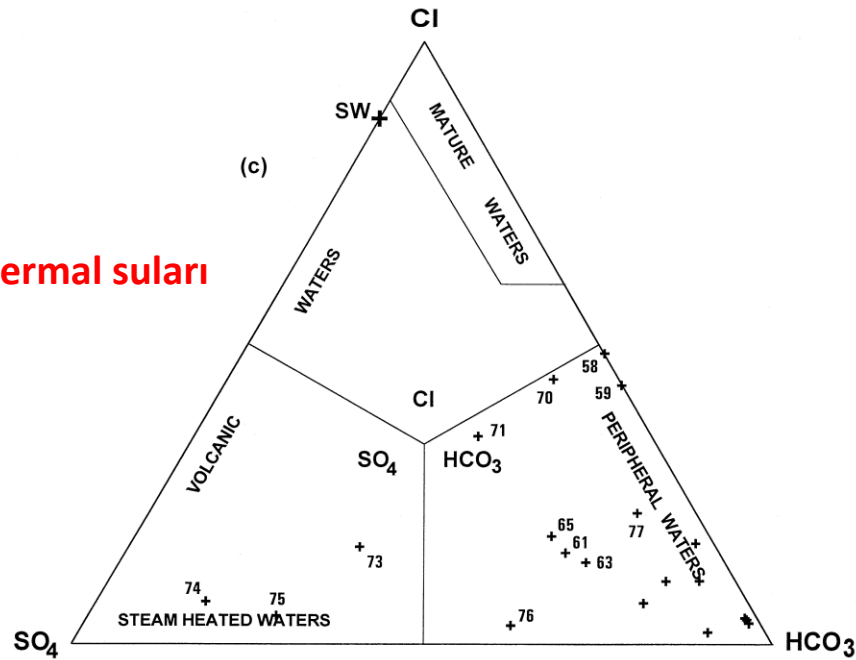
**İç Anadolu termal suları**



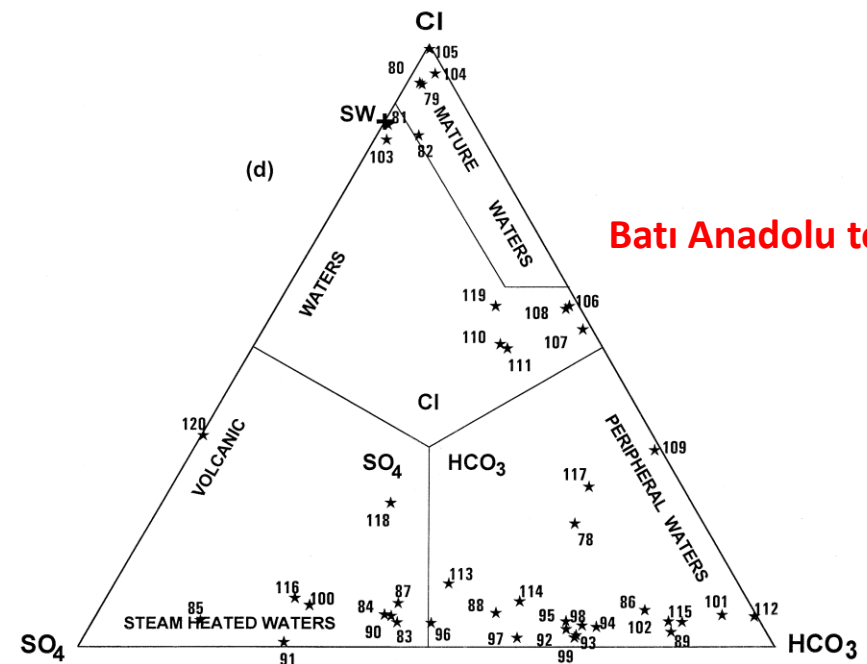
**Kuzey Anadolu termal suları**



**Doğu Anadolu termal suları**



**Batı Anadolu termal suları**



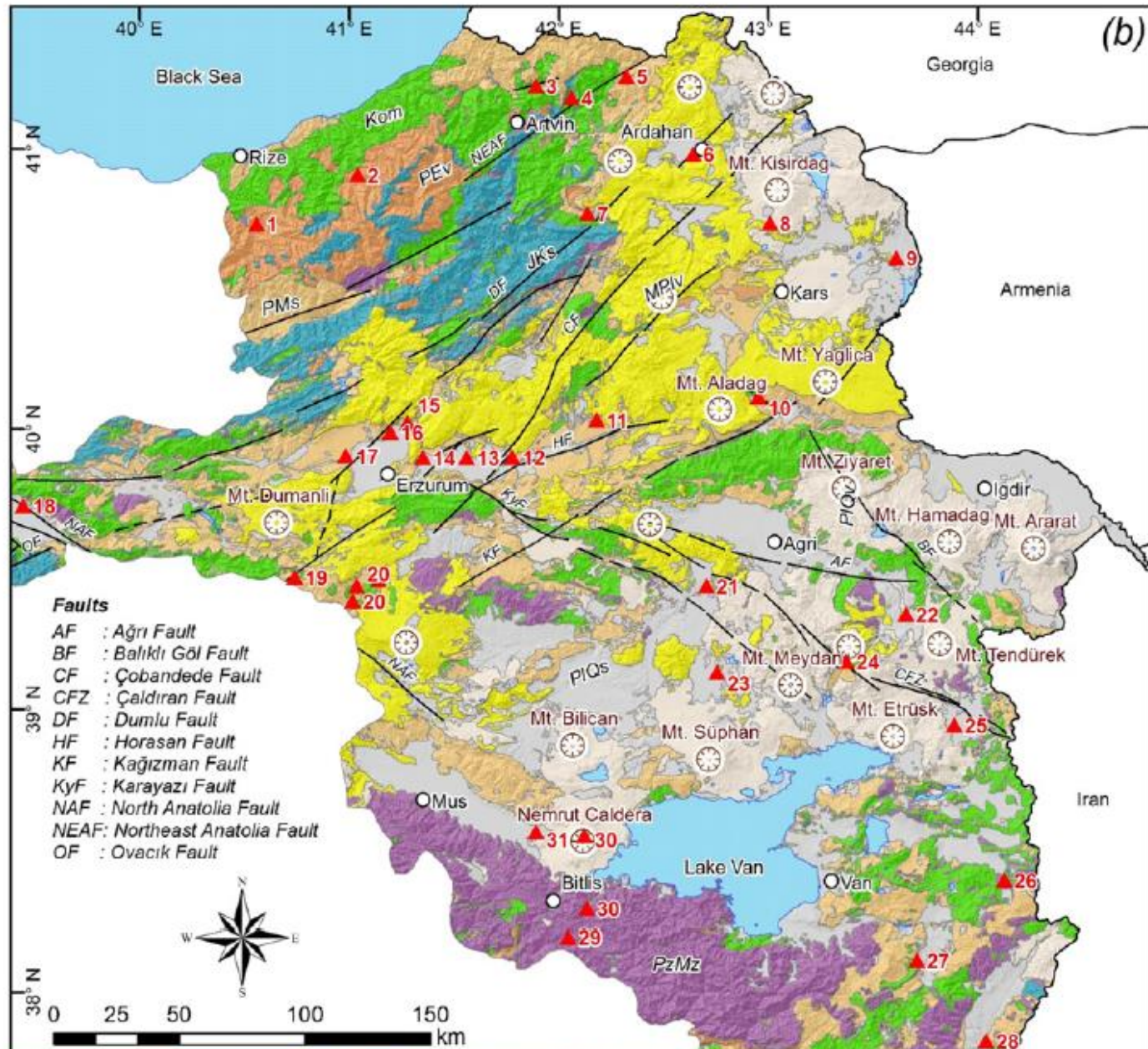
### ***Kuzey Anadolu suları***

Kuzey Anadolu bölgesindeki önemli jeotermal alanlar çoğunlukla sismik olarak aktif Neotektonik yapılar (KAF) üzerinde yer alır. Mesozoyik yaşlı rekristalize kireçtaşları ve Mesozoyik-öncesi metamorfikleri ile Mesozoyik-Senozoyik granitik kayalar ve Neojen volkanikleri bölgedeki en önemli rezervuar kayalarındır. Sıcak sular KAF boyunca tektonik hareketler ile ilişkili olarak oluşmuş kırık zonları ve faylardan yüzeye çıkarlar. En yüksek sıcaklık (82°C) Sakarya-Kuzuluk bölgesinde açılan bir kuyudan alınmıştır. 6.30-9.72 arasında olan pH değerleri nötr-alkalin karaktere işaret eder. TDS değerleri 250-10384 ppm arasında olan sular esas olarak Na- ve Ca-HCO<sub>3</sub> tiptedir. Ancak Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> diyagramında bazıları Na- ve Ca-SO<sub>4</sub> özelliği gösterir. KAF ile ilişkili çek-ayır havzalarla (pull-apart basins) sınırlanmış genç volkanizma bölgedeki sıg dolaşımli suları ısıtan buhar salınımlarından sorumludur. Bununla birlikte, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gazlarının emisyonu da suların bikarbonat ve sülfat zenginliğine işaret edebilir. Tokat, Çankırı, Erzincan ve Düzce-Bolu bölgelerindeki sularda yüksek sayılabilecek B içerikleri (10 ppm) SO<sub>4</sub> veya HCO<sub>3</sub> zenginleşmesini destekler niteliktedir. Bursa bölgesindeki sülfat zenginleşmesi bu bölge KAF'ın batı ucunda yer alması nedeniyle volkanik bir kökenden kaynaklanmış olabilir. Çamlıhemşin-Rize ve Fatsa-Ordu sıcak sularının sülfat bakımından zengin karakter sergilemeleri, bu alanların KAF'dan uzak oluşları da dikkate alındığında, Kuzey Anadolu bölgesinin doğu tarafında oldukça yaygın olan masif sülfid yataklarındaki sülfid minerallerinin oksitlenmesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak, çoğu jeotermal sahada rezervuar kayacı olan karbonatlı birimlerin çözünmesi sonucu sularda bikarbonat baskın hale gelmiştir.



## Doğu Anadolu suları

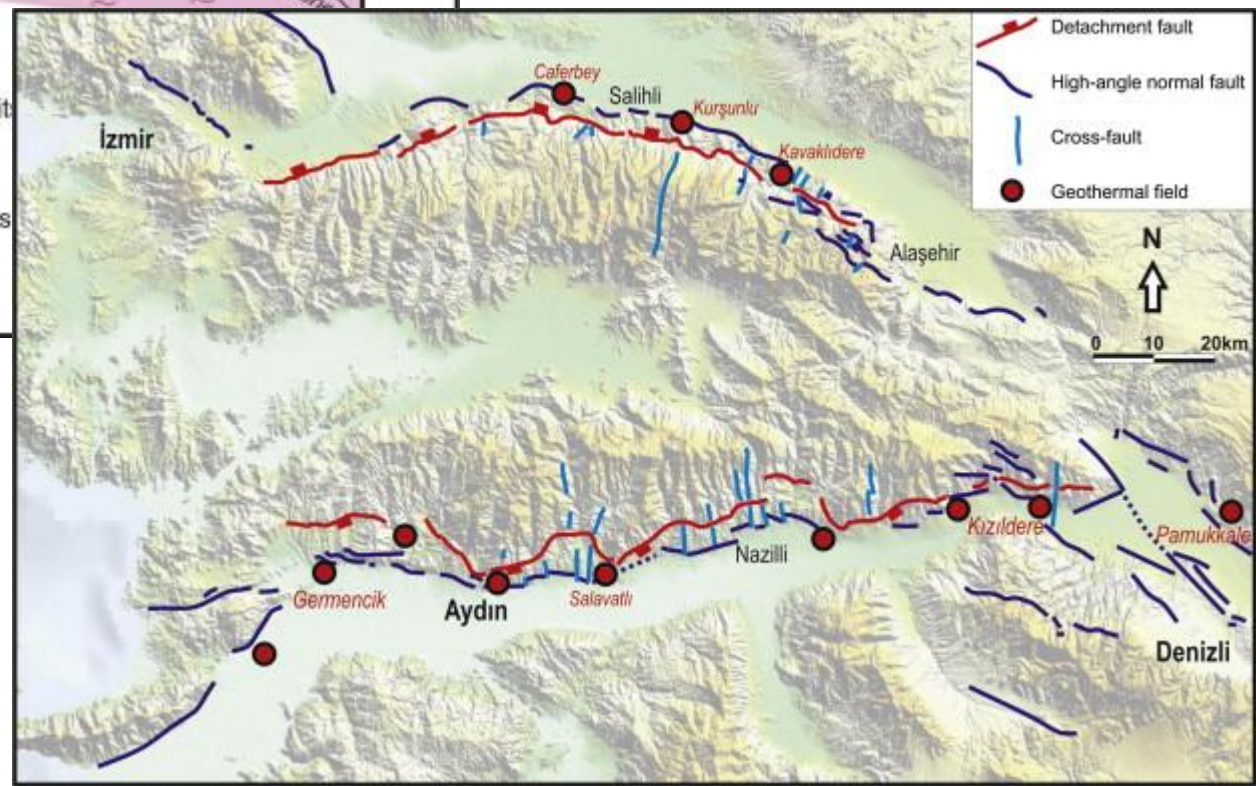
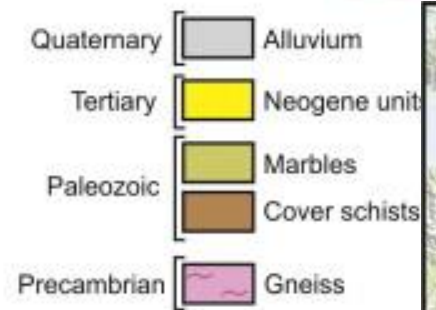
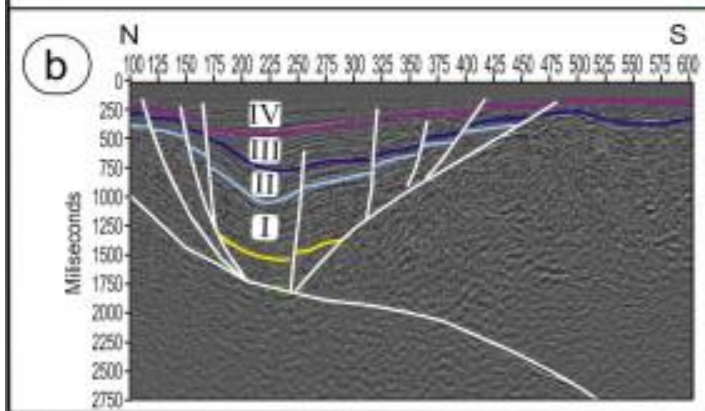
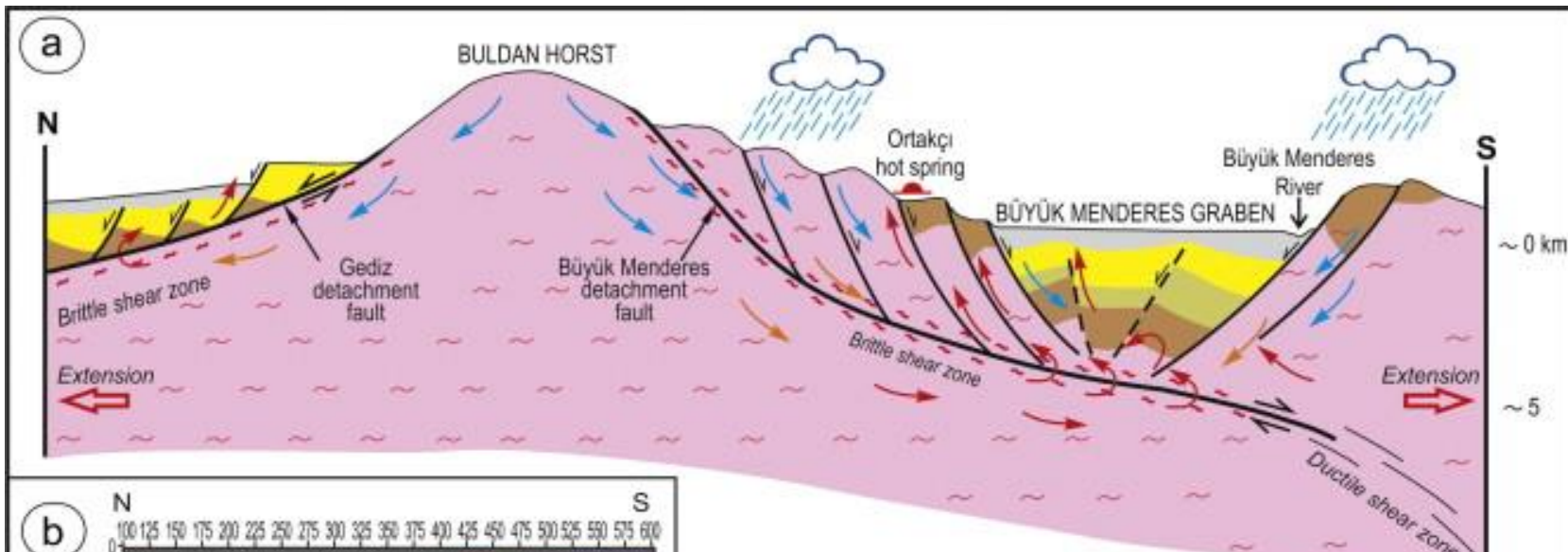
Doğu Anadolu daralma provensi D-B yönlü kıvrımlar, K-G yönlü kısalma ve KD-GB yönünde uzanan ve gaz salınımı yapan çok sayıda genç yanardağın oluşturduğu yaygın bir volkanizma ile temsil edilir. Bölgenin en önemli jeotermal sahaları (Ağrı, Van, Muş, Bitlis ) bu genç volkanların çevresinde veya Karlıova kavşak noktasına yakın alanlarda (Bingöl ) yer alır. Mesozoyik-öncesi metamorfiklere ait gnays, şist ve mermerler, Mesozoyik-Senozoyik kireçtaşları ve volkaniklere ait bazaltlar bölgedeki jeotermal sistemlerin ana rezervuar kayaçlarıdır. Suların sıcaklıkları 29.5-78°C arasında, pH değerleri ise 6.40-7.90 arasındadır. TDS 366'dan 5641 ppm'e kadar değişir. Siirt bölgesindeki Na-Ca-SO<sub>4</sub> tip suların dışında, diğer tüm sular Na-Ca-HCO<sub>3</sub> karakterlidir. Bu bileşimi sağlayan CO<sub>2</sub> derin kökenli gaz salınımı veya Mesozoyik-öncesi metamorfikler veya karbonatlı kayaçların çözünmesi sonucu ortaya çıkmıştır. SO<sub>4</sub>'ça zengin sular ise bölgedeki Senozoyik çökelleri içindeki jips katmanlarının yıkanması ile sulara katılmıştır.



## Batı Anadolu suları

Batı Anadolu açılma provensi çok sayıda graben, Neojen yaşlı yaygın volkanizma, sadece Kula alanı ile sınırlı Kuvaterner volkanizması, kabuksal incelme ile dünya ortalamasının ( $80 \text{ mW m}^{-2}$ ) üzerinde ( $164 \text{ mW m}^{-2}$ ) ısı akısı karakteristiktir. Sıcak sular ana grabenleri sınırlayan faylar boyunca yeryüzüne çıkarlar. Rezervuar kayalar Mesozoyik-öncesi metamorfik mermerler, gnays ve kuvarsitler, Mesozoyik kireçtaşı ve neojen volkanosedimanter birimlerden oluşur.

Termal suların sıcaklıkları  $100^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ulaşır. Ömerbeyli-Germencik (Aydın) sahasındaki kuyu tabanı sıcaklığı  $232^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür.  $6.10-9.61$  pH değerleri ile sular genellikle alkalin bir karakter sergiler. TDS ise  $550-54884$  ppm arasındadır. Sıcak suların büyük çoğunluğu Na-HCO<sub>3</sub> veya Na-Cl tipindedir ancak sınırlı sayıda da olsa SO<sub>4</sub>-tipinde sular da mevcuttur. Klorürce zengin sular genellikle sahilde boyunca yer alan (deniz suyu ile karışım) jeotermal sahalarda görülür (Çeşme, Seferihisar, Doğanbey-İzmir; Kestanbol, Tuzla-Çanakkale; Köyceğiz-Muğla) ve bu suların Cl/Na oranları deniz suyundaki orana oldukça benzerdir. Bununla birlikte, Balıkesir ve Afyon gibi bölgelerdeki (sahilden uzak) suların Na-Cl tipte olması deniz suyu ile karışımdan ziyade fosil sular ile etkileşim (karışım-katkı) ile açıklanabilir. Batı Anadolu'daki en önemli jeotermal sahalar olan Kızıldere-Denizli ve Ömerbeyli-Germencik-Aydın sahalarındaki suların sırasıyla Na-HCO<sub>3</sub> ve Na-Cl-HCO<sub>3</sub> tipte olmaları rezervuar kayalarda fosil suların katkısına işaret eder. Kızıldere-Denizli sahasındaki HCO<sub>3</sub> zenginleşmesi ise karbonatlı kayalar ile etkileşim nedeniyledir. Bu sulara Ca yerine Na'un baskın olması silikalı kayaların CO<sub>2</sub> eşliğinde bozunarak Na'un sulara katılmasına yol açmıştır. Traverten çökelleri ile ünlü Pamukkale-Denizli suları ise Ca-HCO<sub>3</sub> karakterdedir. Dikili-İzmir, Simav-Kütahya, Gediz-Kütahya ve Balıkesir alanlarındaki hidrotermal cevherleşmelerde yer alan sülfatların oksitlenerek sülfat oluşturması bu suların SO<sub>4</sub> bakımından zengin olmasına neden olmuştur.



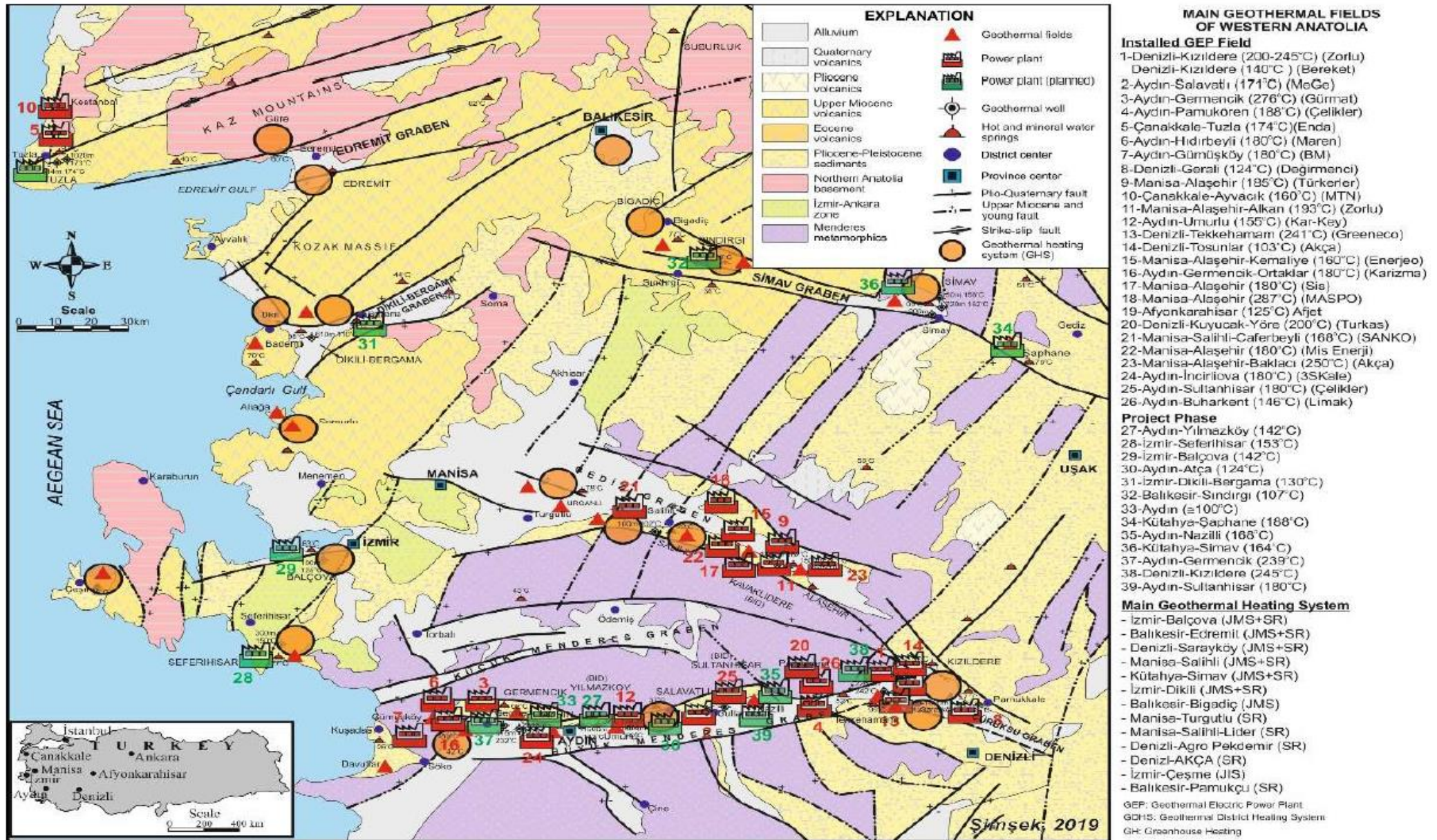
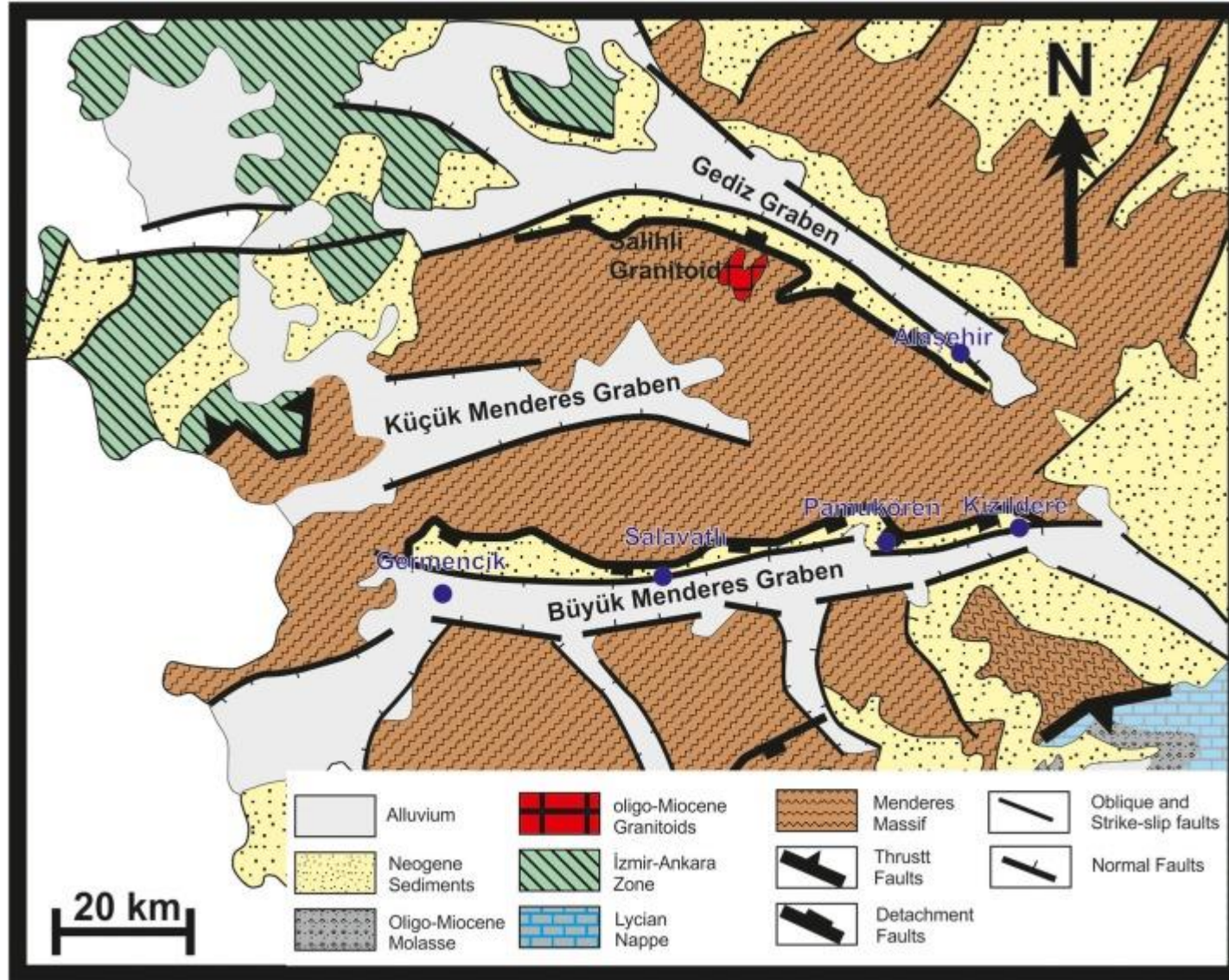
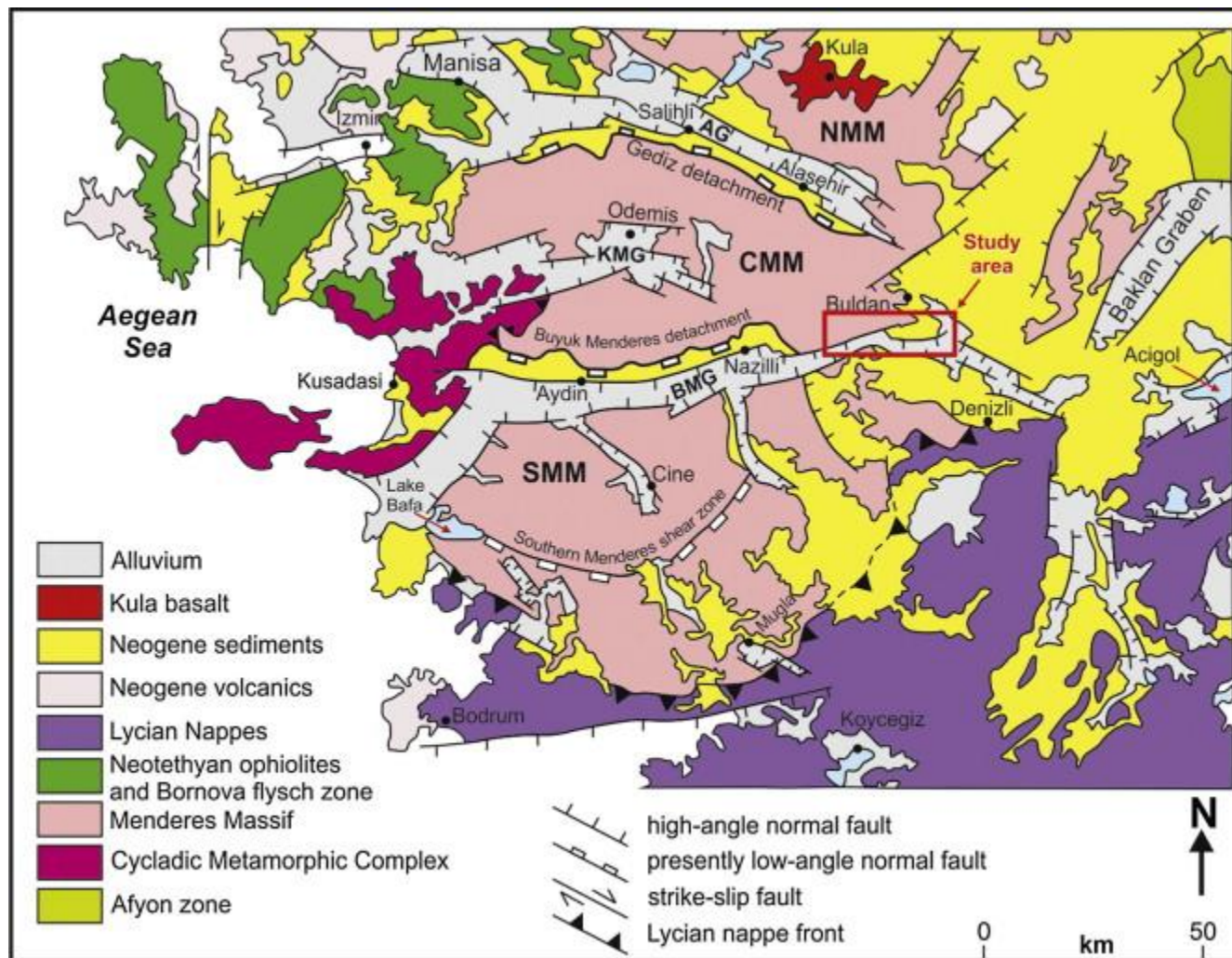


Figure 3: Main geothermal fields of Western Anatolia (Simsek, 2019)





## Jeotermometre sonuçları (rezervuar sıcaklıkları)

### Silika jeotermometreleri

Kuvars (Fournier and Potter, 1982)

Kristobalit, kalsedon ve amorf silika (Fournier, 1977)

### Katyon jeotermometreleri

Na–K (Giggenbach, 1988)

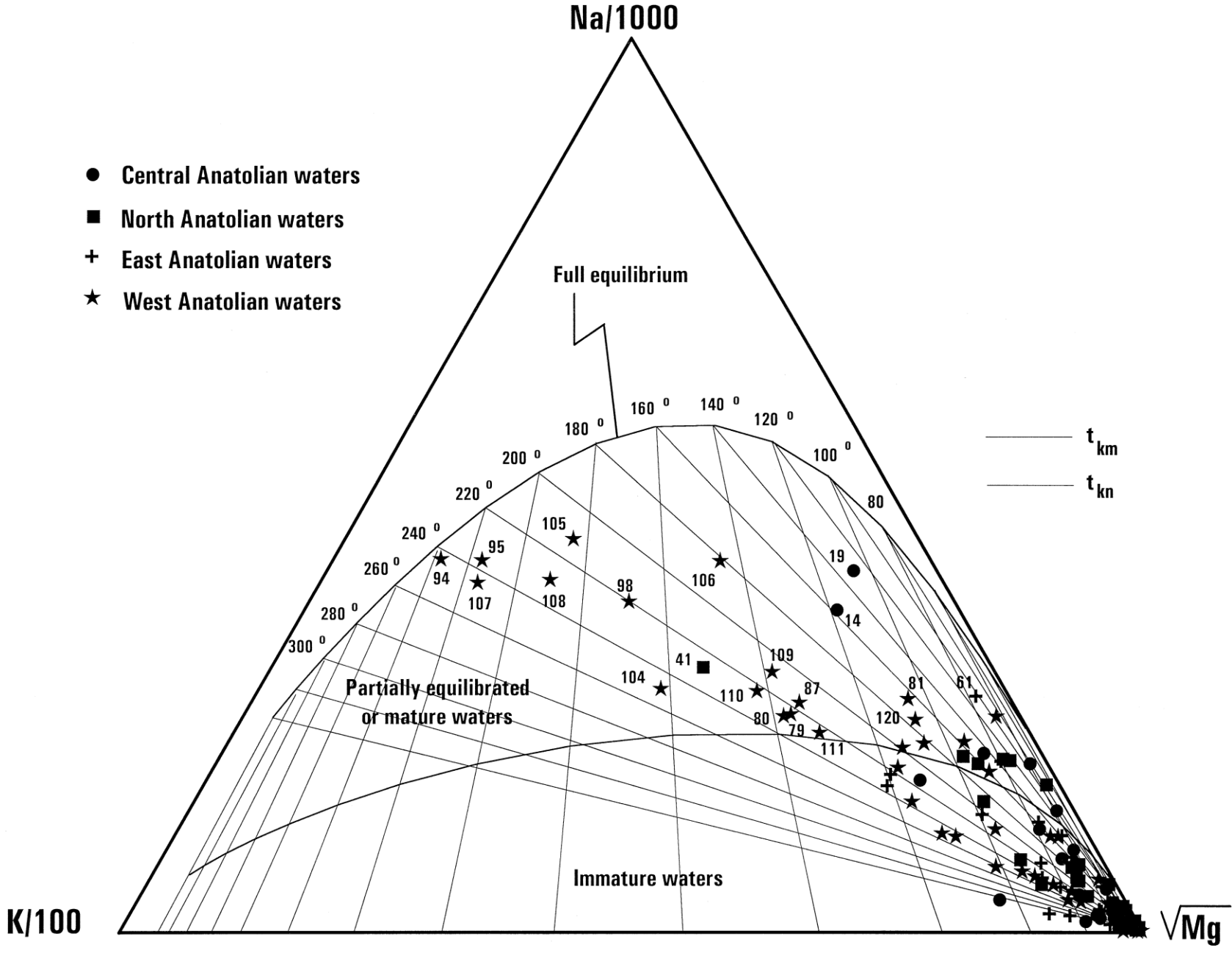
Na–K–Ca (Fournier ve Truesdell, 1973)

Mg-düzeltilmeli Na–K–Ca (Fournier and Potter, 1979)

K–Mg (Giggenbach, 1988)

Kristobalit ve amorf silika jeotermometreleri silika çözünürlüğünü düşük sıcaklıklarda (<150°C) kontrol etmelerinden dolayı çoğu suyun ölçülen sıcaklıklarının altında rezervuar değerler vermektedir. Bu nedenle, bu jeotermometreler rezervuar sıcaklıklarının hesaplanması için uygun değildir. Sıcaklıkları >150°C olan sistemler için uygulanabilir olan kuvars ve kalsedon jeotermometreleri ise sıcaklık farkı birbirlerinden 30°C olacak şekilde sonuçlar vermişlerdir (ancak kuvars jeotermometresinden elde edilen sıcaklıklar kalsedondan hesaplanandan daha fazladır). Su kaynaklarının sıcaklıkları 100°C'den düşük olduğundan soğuk su ile karışım söz konusudur ve bu da silika jeotermometrelerini etkileyebilir. Bundan dolayı, elde edilen sonuçlar güvenilir değildir. Kuyu tabanı sıcaklıkları 232°C'ye ulaştığından ve 180°C'den yüksek sıcaklıklarda silika çözünürlüğünü kuvars tarafından kontrol edildiğinden dolayı, kuvars jeotermometresinden elde edilen sıcaklık değerleri batı Anadolu için daha uygundur. Ancak bu jeotermometreden bulunan sıcaklıkların debi sıcaklıkları özellikle <100°C olan kaynaklar için temkinle yaklaşılmalıdır.





Kasyon jeotermometreleri içinde, Na–K jeotermometresi suların büyük çoğunluğu için 400-500°C arasında oldukça yüksek sıcaklık değerleri vermiştir. İyonların mutlak değerlerinden ziyade oranların kullanıldığı Na–K jeotermometresi kaynama ve karışım gibi ikincil süreçlere karşı daha az duyarlıdır. Bundan dolayı, bu jeotermometre düşük sıcaklıklı kaynak sularına uygulandığında hatalı sonuçlar verir. Bunun nedeni, suların Na/K oranının kimyasal dengeye dayalı değil çözünme kontrollü olmasıdır. Yüksek sıcaklıklı derin kuyu suları rezervuar özelliklerini daha iyi yansıtmaktadır. Bu tür sular 200–250°C arasında değişen daha kabul edilebilir sıcaklık değerleri sunmuşlardır (özellikle batı Anadolu bölgesi örnekleri). Anomali derecesinde yüksek olan Na–K jeotermometre sonuçları yüksek Ca konsantrasyonları nedeniyledir. Yüksek Ca içeriklerinin etkisini ortadan kaldırmak için geliştirilen Na–K–Ca jeotermometresi Na–K jeotermometresine göre daha düşük sıcaklık değerleri vermiştir. Bazı örnekler için bu jeotermometreden bulunan sıcaklıklar yüzeyde ölçülen değerlerden daha düşük olması derinde dengenin gerçekleşmemiş olduğunu ve azalan sıcaklıkla Ca çözünürlüğünün arttığını göstermiştir.

Yüksek Mg içerikli sular için önerilen Mg-düzeltilmeli Na–K–Ca jeotermometresi suların çoğu için uygulanabilir değildir. Bu da suların Mg içeriklerinin Na–K–Ca sıcaklıklarını etkilemediğine işaret eder.

K–Mg jeotermometresinden yüzeyde ölçülen sıcaklıklara yakın veya daha düşük değerler elde edilmiştir. Bunun nedeni, azalan sıcaklıkla Mg çözünürlüğünün artması ve suların yeryüzüne yükselmesi sırasında Mg'un kayalardan yıkanarak ayrılmasıdır. Böylece, K–Mg jeotermometre denklemi  $K/\sqrt{Mg}$  oranına bağlı olduğundan, rezervuar koşullarındakinden daha yüksek Mg konsantrasyonları bu jeotermometre ile düşük sıcaklık değerlerinin hesaplanmasına neden olmuştur.

Diğer deyişle, Mg sığ derinlerdeki dengeyi yansıttığından K–Mg jeotermometresi derin koşullardaki sıcaklıkların iyi bir göstergesi değildir. Na–K ve K–Mg jeotermometrelerinin kombinasyonu olarak geliştirilen  $Na/1000-K/100-\sqrt{Mg}$  üçgen diyagramı (Giggenbach, 1988) rezervuar sıcaklıklarının tahmin edilmesinde daha güvenilir bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu diyagramda, olgun suların kısmi denge halindeki alana yakın düşmesi maksimum 250°C'lik bir rezervuar sıcaklığı öngörmüştür. Aslında her bir alandaki rezervuar sıcaklığı için tek bir jeotermometrenin uygun olduğu söylemek doğru olmaz. Bu nedenle, olası rezervuar sıcaklıklarını değerlendirirken birbirine yakın değer elde edilen en az üç jeotermometre göz önüne alınmıştır. Bu şekilde seçilmiş jeotermometrelerden hesaplanmış maksimum değerler kullanılırsa; bölgesel bazda elde edilen sıcaklıklar:

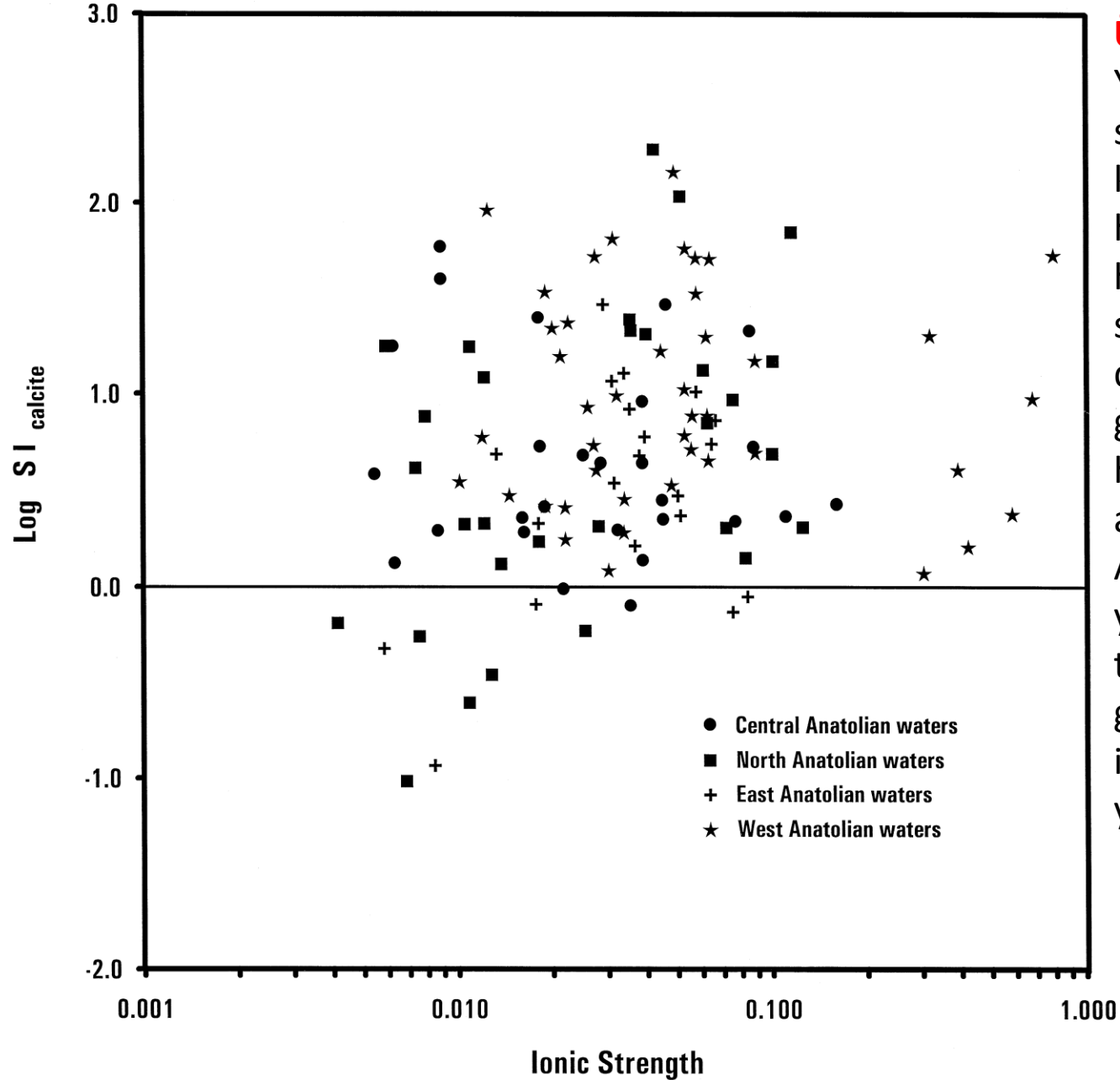
İç Anadolu: 125°C

Kuzey Anadolu: 110°C

Doğu Anadolu: 136°C

Batı Anadolu: 251°C

En yüksek rezervuar sıcaklıklarının Batı Anadolu bölgesinden elde edilmiş olması bu bölgedeki sıcak suların kaynama ve karışım gibi ikincil süreçlerden en az ölçüde etkilendiklerine işaret eder.  $Na/1000-K/100-\sqrt{Mg}$  üçgen diyagramında da, Batı Anadolu bölgesi sularının büyük bir bölümü kısmi denge halindeki alana ve hatta belirli bir bölümü de tam denge çizgisi üzerine düşmüştür. Diğer bölge sularının çok azı kısmi denge halindeki alanda yer alırken büyük bir kısmı da olgun olmayan sular alanına düşmüştür. Bu bakımdan, katyon jeotermometrelerinin özellikle orta, doğu ve kuzey Anadolu bölgesi suları için dikkatle kullanılması gerekir. Bununla birlikte, ılık ve düşük sıcaklıklı kaynak suları da bu kapsamda değerlendirilmelidir.



## Üretim sırasında kabuklaşma (scaling) problemi

Yüksek CO<sub>2</sub> içeren termal suların üretilmesi/kullanılması sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri de kalsit/karbonat kabuklaşmasıdır. Bu sularda çözülmüş halde bulunan karbondioksit suların kalsite göre doymun hale gelmesine yol açar. Türkiye'deki termal suların çıkış sıcaklıkları ve kimyasal bileşimlerine göre hesaplanan kalsit doymunluk indeks ve iyonik güç değerleri şekilde görülmektedir. Suların büyük bir kalsite göre doymun haldedir. Tuzluluğun bir göstergesi olarak seçilen iyonik güç arttıkça doymunluk değerleri de artmaktadır. Batı Anadolu'daki Denizli, Aydın ve İzmir sahalarındaki sular en yüksek doymunluk değerlerine sahiptir. Aynı sahalardaki traverten çökelleri bu durumun göstergesidir. Bu sorunun giderilmesi için çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Özellikle inhibitör olarak ferrophosphorus kullanımı en yaygın yöntemdir.