

JEOTERMAL SİSTEMLERİN YÜZEY BELİRTEÇLERİ

Bir jeotermal sistemin yüzey belirteçleri jeotermal aramalarında oldukça kullanışlı olan unsurlardır. Bundan dolayı bu özelliklerin tanımlanması, haritalanması ve değerlendirilmesi jeotermal potansiyelin ele alındığı fizibilite aşamasında büyük önem taşır. Fizibilite safhası, hidrojeokimyasal teknikler ile hidrotermal çözeltilerin sıcaklık ve bileşimlerinin tahmin edilmesi için gerekli olan akışkan ve gazların örneklenmesini kapsar. Akışkanların geçirgen kayaç birimleri boyunca fay veya çatlakları kullanarak yüzeye ulaşması jeotermal rezervuarın en belirgin belirteçlerindedir. Rezervuar sıcaklığı ve akış hızına bağlı olarak, bu tür yüzey belirteçleri **sızıntı, fümerol, kaynak, kaynayan kaynak (boiling springs), gayzer, feratik patlama krateri (phreatic explosion crater) ve asit alterasyon zonları** şeklinde görülür. Bununlar birlikte, feratik kraterlerin etrafında silika sinter, traverten ve/veya katmanlı breş çökelleri bulunabilir.

Sıcak su kaynakları ısıyı yeryüzüne ileten jeotermal sistemlerin en belirgin göstergesidir. Bazı kaynaklar jeotermal sistemi doğrudan üzerinde olup sondaj lokasyonlarının belirlenmesinde oldukça kullanışlıdır. Ancak kaynaklar yeraltında hidrotermal rezervuardan onlarca km öteye akarak daha sonra yeryüzüne ulaşırlar. Bu tür su çıkışları soğuk yeraltı suyunun üzerinde olabilmesi nedeniyle aramalarda yanlış yönlendirici olabilir. Sıcak su rezervuarlarını kesen sondajlar üst kısımlarda derinlikle artan sıcaklık değerleri vermesine karşın tabana doğru sıcaklıkta ani bir düşüş ile karşılaşılabilir.

Kaynak sulara ait kimyasal analizler, saha gözlemleri ve hidrolojik rejim ile birlikte değerlendirilerek, soğuk yeraltı suyu ile rezervuardan çıkarak yüzeye ulaşan sıcak su arasındaki karışım derecesini belirlemek üzere önemli veri sağlar. Su analizleri soğuk yeraltı suyu ile çok az derecede karışımı gösterdiğinde veya jeolojik gözlemler sıcak suların termal bir kaynak üzerinde olduğunu veya sondaj yoluyla maksimum rezervuar sıcaklığının elde edileceğini vurgularsa, sıcak sular jeotermal sondaja yönelik mükemmel kılavuzluk yapabilir.

Sıcak su sistemlerinde, rezervuar sıcaklıkları geniş bir aralıkta olabilir: <90°C (düşük sıcaklık), 90-150°C (orta derecede sıcaklık) ve 150-240°C (yüksek sıcaklık). Sıcak suyun sıcaklığı suyun ilgili rakımdaki (yükseklik) kaynama sıcaklığından fazla olamaz (deniz seviyesindeki kaynama sıcaklığı 100°C). Sıcak suların tuzluluk değerleri (toplam çözünmüş madde miktarı=total dissolved solid-TDS) %0.1 ile 3 arasındadır.

Buhar-baskın rezervuarlar (%85'den fazlası buhar) ideal jeotermal kaynaklardır ancak bu sistemler ne yazık ki sıcak-su sistemlerine göre sayıları çok azdır. Bu tür sistemler dünyanın birçok yerinde geliştirilmiş olsa da (örneğin, Kaliforniya'daki Gayzerler jeotermal sahası), bunların altında ne tür bir yapı olduğuna yönelik çok az şey bilinmektedir. Yüksek-klor içerikli bir salamura en muhtemel adaydır. Bu rezervuarlar yüksek ısı akışının olduğu ancak su beslenmesinin düşük olduğu alanlarda görülür.

Su-baskın rezervuarlardan kaynaklanan ve yüzeye yakın kısımdaki gazlar asit oluşturmak üzere yoğuşurlar ve bu süreç alandaki kayaçların çözünmesine yol açar. Bu alanlarda, kayaçlar alterasyon nedeniyle açık renkli olup asit-sülfat su kaynakları oldukça yaygındır. Klorürce zengin suların görülmez ve asit kaynaklara **çamur havuzları**, gayzerler ve fümeroller eşlik eder.

Feratik patlama krateri, Otake volkanı, Japonya. Bu tür patlamalar magma yeraltı veya yüzey suyunu ısıttığı zaman görülür. Magmanın yüksek sıcaklığı suyun buharlaşarak buhara dönüşmesine neden olur. Böylece buhar-su karışımından akışkan kraterden püskürür.





Çamur havuzu: Bir tür asidik sıcak su kaynağı veya fümerol. Su çok az miktarda bulunur. Çamur volkanı da denir. Asit ve mikroorganizmalar çevredeki kayaları kil ve çamura dönüştürür. Kaynayan çamurun tekrar tekrar fişkirmasıyla bir tür mini çamur volkanı ortaya çıkar (bazen 1.5 yüksekliğinde).

Fümerol Latince “*fumus*” (*duman tütme*) anlamında olan bu terim çoğunlukla yer kabuğu sıcaklığının çok yüksek olduğu, yakın dönemde aktif yanardağların yer aldığı bölgelerde, karbondioksit, sülfür dioksit, hidroklor ve hidrojen-sülfür gibi gazların salındığı yer kabuğundaki açıklıklardır (ağızlar). Püskürme öncesinde, sırasında ya da püskürmeden sonra, lavların krater merkezinden itibaren yayılmadığı durumlarda ortaya çıkarlar.

Bazen yanardağların eteklerindeki veya yamaçlarındaki çatlakları kullanmak, magma ve kaçan gazlar için çok daha kolay olmaktadır. Bu şekilde ana volkanın yamaçlarından ya da eteklerinden itibaren devam eden volkanik etkinlik sonucunda meydana gelen çıkış yapıları parazitik koni olarak adlandırılır. Bu bacalardan sadece gaz çıkışı mevcutsa bunlar fümerol olarak tanımlanır.

Aşırı basınçlı ve sıcak akışkanlar yeryüzüne çıkarken basınç ferahlaması etkisiyle su buharına dönüşür.

Solfatar terimi, sülfürlü gaz salan fümerollere denir. Bu terimin aslı İtalyancada *solfo* ya da sülfürden (Sicilya lehçesi) gelmektedir. Sıcaklığına bakılmaksızın püskürmelerden sonra oluşan ve uzun zaman devam eden bütün *ekshalasyonlar* ([gaz çıkışı](#)) fümerol adı altında toplanır. *Solfataralar* kükürtlü gaz yayan fümerollerdir.

Fümeroller kalıcı ısı kaynağında yıllarca devam edebilir. Volkan yüzeyinde haftalar veya aylar boyunca hızlı soğuma gösterirler. Örneğin, Alaska'daki Novarupta yanardağının 1912'deki püskürmesiyle On bin Dumanlar Vadisi (Ten Thousands Smokes Valley) ortaya çıkmıştır. Patlama sonucunda bu alandaki fümeroller başlangıçta hızlı soğumayla oluşmuş ve daha sonra da çoğu ortadan kalkmıştır. Dünya genelindeki fümerollerin dağılımı ve etkileri anlaşılabilir. Örneğin, Yellowstone Ulusal Parkı sınırları içinde dört bin adet fümerol olduğu tahmin edilmektedir.

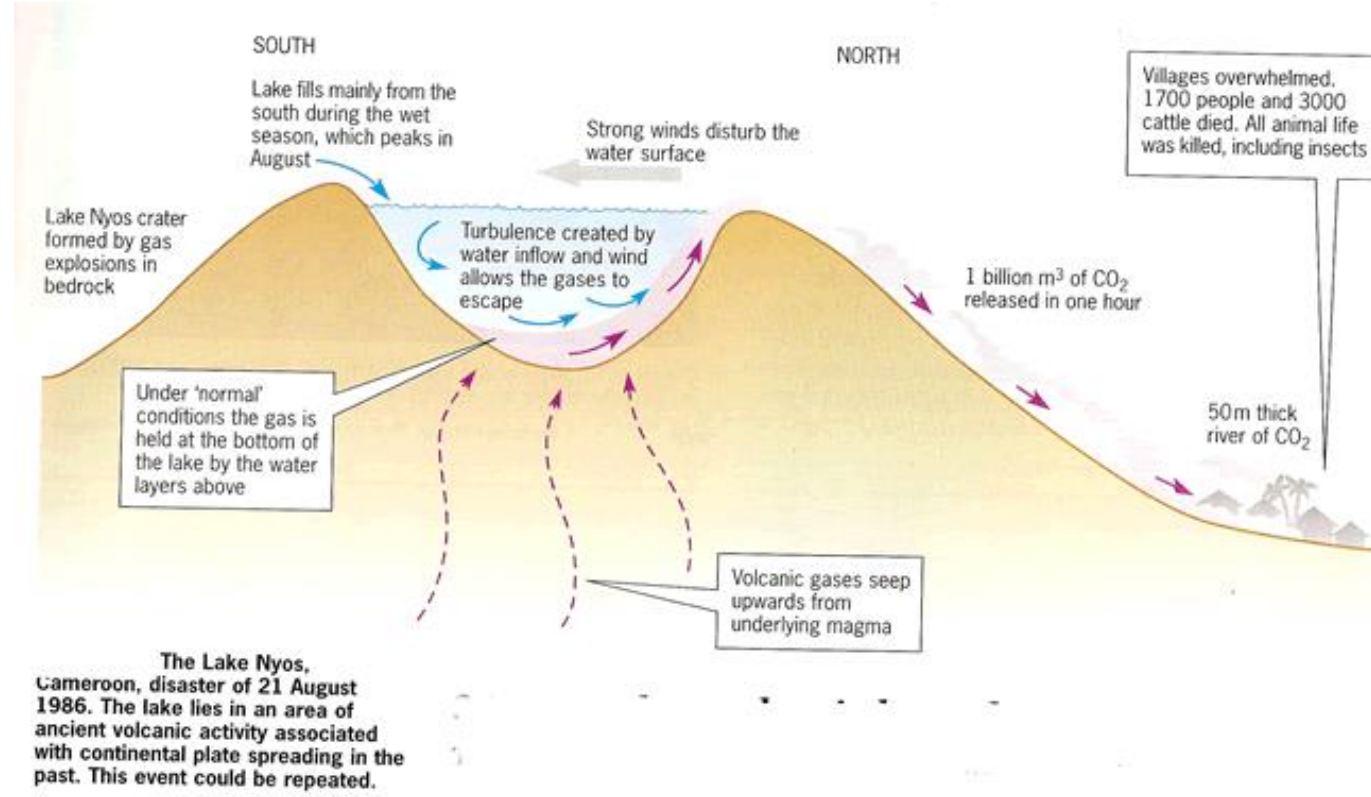


On bin Dumanlar Vadisi, Alaska, Novarupta volkanının 1912'deki faaliyeti ile ortaya çıkmış ancak 1 yıl sonra bu fümeroller yok olmuştur.



SOLFATARA örnekleri

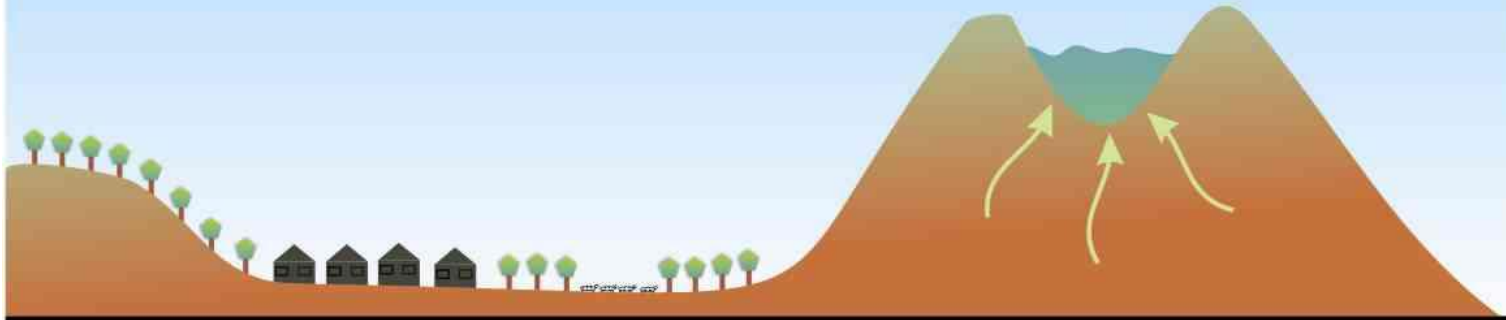




Mazuku (*evil wind*) insan veya hayvanları öldürecek ölçüde CO₂'ce zengin hava cebi. Mazuku karbondioksitin yüzeye yakın kısımlarda birikmesi ile oluşur. CO₂ havadan daha ağır olduğundan yüzeye yakın yerlerde birikir ve ayrıca kokusuz olup çoğu durumda görsel olarak fark edilmesi de imkansızdır. Mazuku volkanik faaliyetler veya gösel püskürme olarak bilinen doğal afet sonucu da ortaya çıkar. Çok nadir ve ansızın gelişmesi nedeniyle sınırlı sayıda mazuku kaydedilmiştir. Ancak tarihsel ve fosil kayıtlar incelenerek nasıl ortaya çıktıkları halen araştırılmaktadır.

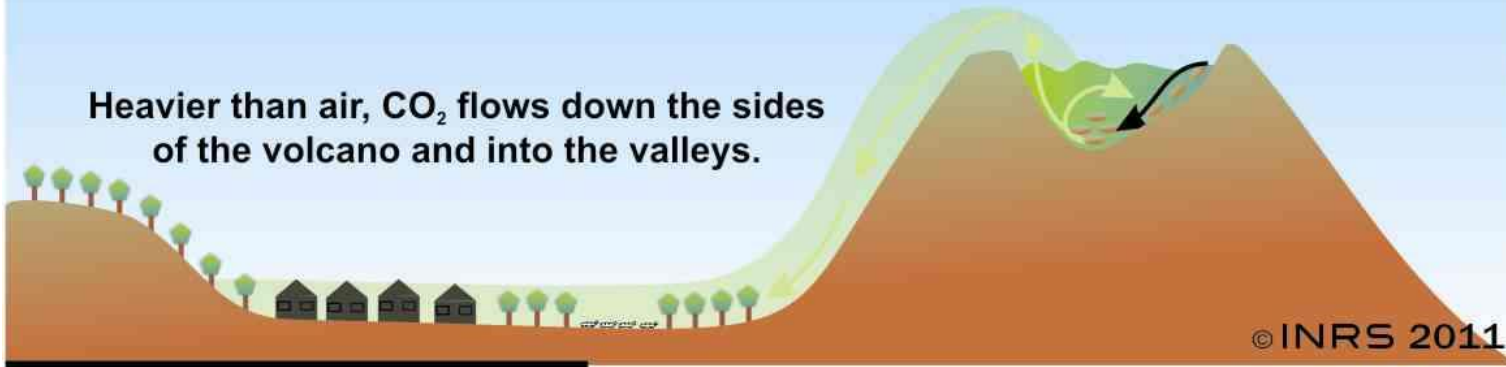
①

CO₂ from underground volcanic chimneys is dissolved and concentrated at the bottom of the lake.



②

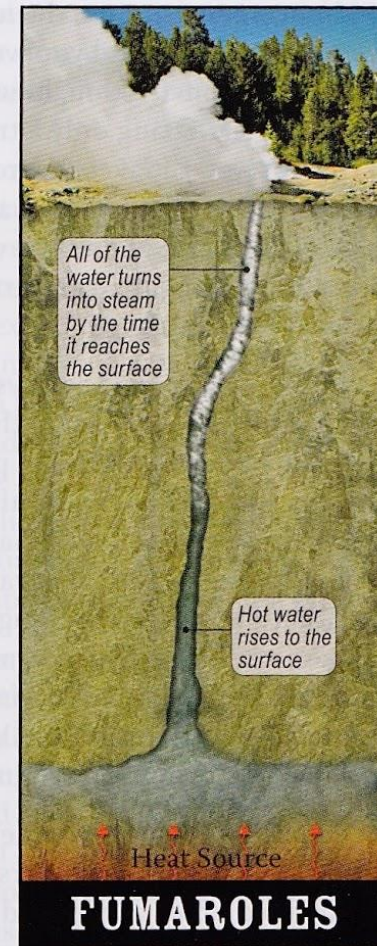
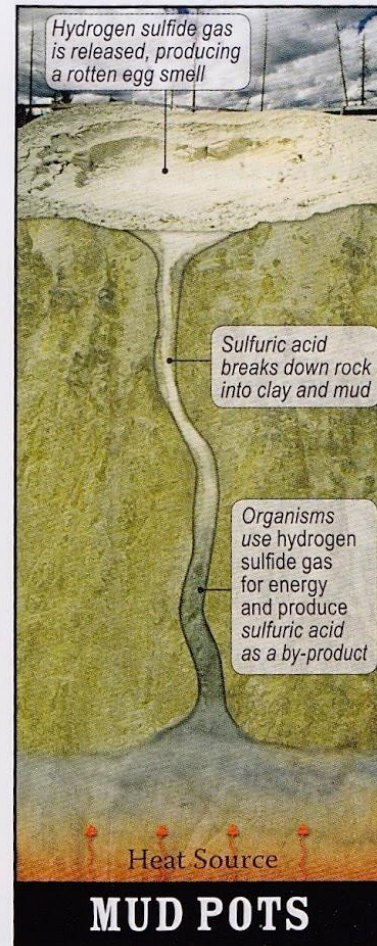
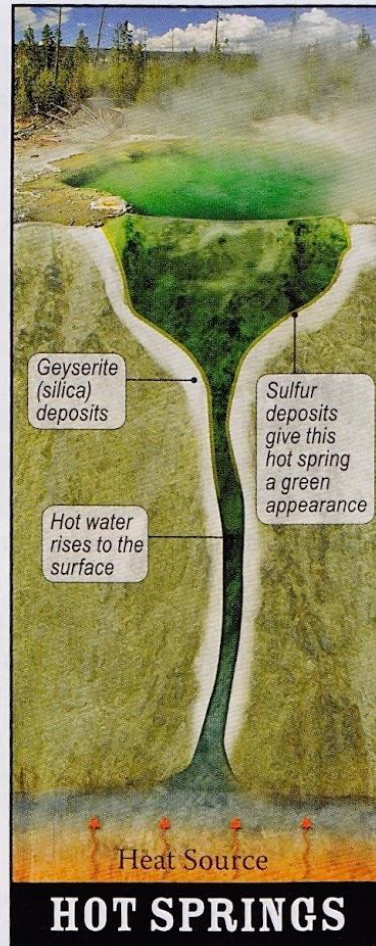
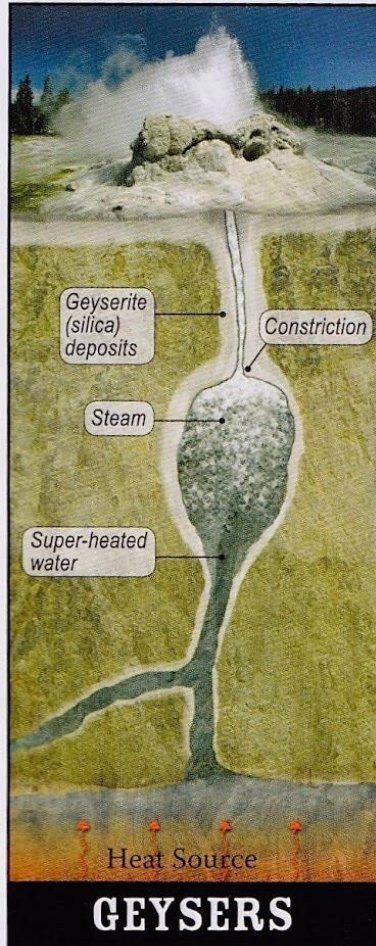
An earthquake triggers a landslide, which disrupts the lake water layers. The deeper waters rise to the surface and CO₂ bursts out.

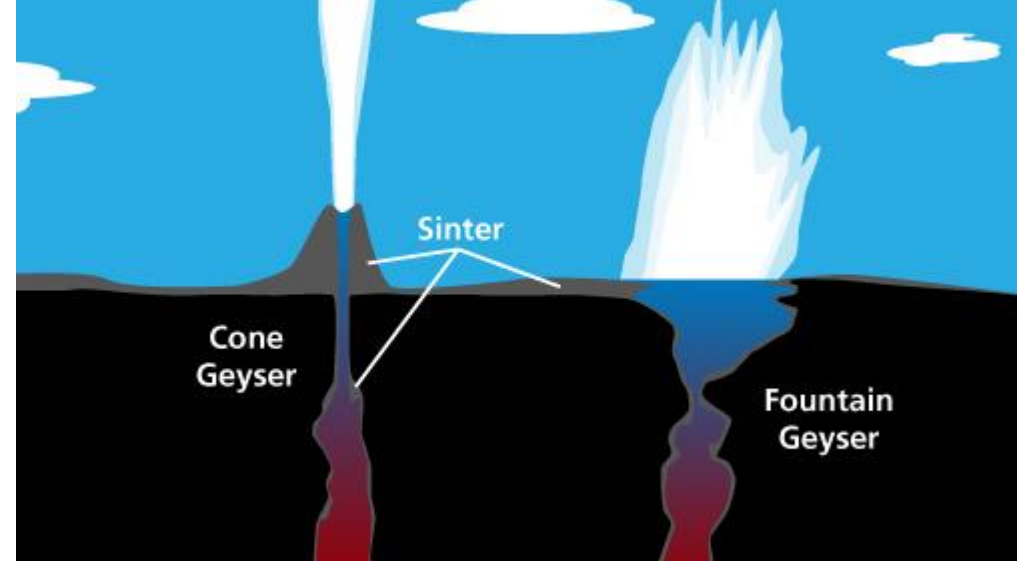


© INRS 2011



A Guide to Yellowstone's Geothermal Features





Koni ve fıskiye tip gayzerler

Gayzer suyun buharla birlikte periyodik ve türbülanslı şekilde fıskırdığı kaynak olarak tanımlanabilir. Oldukça nadir bir süreç olan gayzer oluşumu yeryüzünde sadece sınırlı sayıda jeotermal sahada görülür. Çoğunlukla tüm gayzer sahaları aktif volkanik bölgelerde yer alır ve gayzer etkisi magma kütesine yakınlık nedeniyle ortaya çıkar. Yeraltına yaklaşık 2 km kadar süzülen sular sıcak kayalarla temas eder ve ısınır. Basıncılı suyun kaynaması sıcak suyun gayzer oluşturmasına yol açar. Yukarı ani olarak yükselen sıcak su soğuyarak yeryüzündeki bir çıkış ağzından sprey şeklinde buhar olarak fıskırır (hidrotermal patlama). Isınan sıcak suyun yeraltındaki boşluğu doldurması bir sahadan diğerine değişir ancak her saha için değişmez bir zaman içinde gerçekleşir.

Sıcak su kaynakları ve gayzerler

Gayzerler fıskiye (havuz) ve koni (sütun) tip olmak üzere iki gruba ayrılır. Fıskiye tip gayzerlerde, süper ısıtılmış su ani olarak yüzeye ulaşarak patlamalı şekilde fıskırır. Koni tip gayzerler silika sinter çökellerinin üzerinde koni veya tümsek oluşturarak dar yeraltı yarıkları (tüpleri) boyunca yüzeye yükselirler. Bu tüpler, periyodik olarak dolan ve belirli bir zaman sonra buhara dönüşen su ile dolarlar. Suyun yüzeyde buhar şeklinde patlamasıyla boşalan tüpler daha sonra tekrar sıcak su ile doldurulur. Hidrotermal patlamalarda da gözlenen bu süreç gayzerlerde döngüsel olması ile farklılık arz eder. Yellowstone Ulusal Parktaki (Wyoming) Old Faithful gayzeri patlama mekanizması ve mikro-depremsellik açısından incelenmiştir (Kieffer, 1989).



Yellowstone (Wyoming) Old Faithful gayzeri

Old Faithful'daki patlamalar 50 m yüksekliğe kadar ulaşan ve 1.5-5.5 dakika kadar devam eden su ve buhar sütunu üretmiştir. Her 40 ile 100 dakika arasında gerçekleşen bu patlamalar 1.5x0.6 m ebadındaki bir açıklıktan atmosfere çıkar. Bu kırık 4 m yüksekliğinde ve 50-70 m genişliğinde bir silika sinter çökeli ile kuşatılmıştır. Su rezervuarı yüzeyden yaklaşık 20 m derindedir. Sıcak su patlamadan önce yüzeyden 6 m'ye kadar bu açıklığı doldurur. Kanal içindeki suyun hidrostatik basıncı kaynama derecesini düşürmesine rağmen buhar kabarcıklarının genişmesi ve çökmesi neticesinde akustik bir gürültü ortaya çıkar. Kanalın üst kısmında gerçekleşen güçlü kaynama etkisiyle suyun çıkış noktasından etrafa saçılmasıyla patlama başlar. Kaynama ile alttaki su boşalarak buharlaşmaya neden olur. Buhar atmosfere salındıkça, kanalın alt kısımlarında boşalan su yenisi ile takviye olunur.

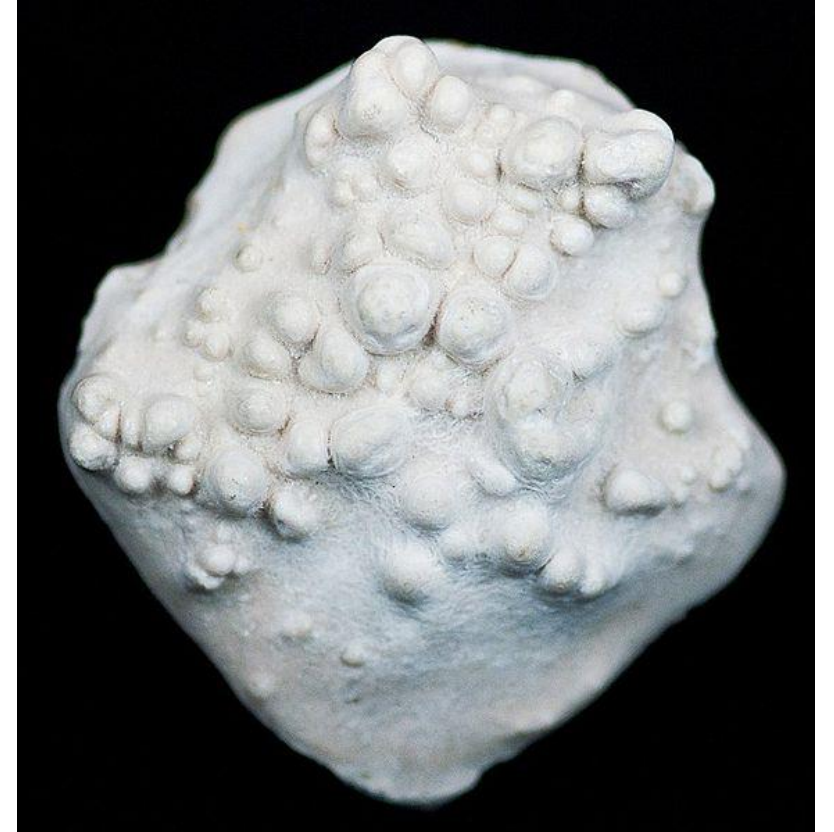
Silika Sinter çökelleri

Silika sinter çökelleri yüksek-sıcaklıklı jeotermal sahaların karakteristik belirteçleri arasında yer alır. Bu tür tepe-benzeri veya teras çökelleri kaynamakta olan sıcak sular ile ilişkili olup rezervuar sıcaklığının $>175^{\circ}\text{C}$ olduğunun mükemmel bir göstergesidir. Silika sinter çökelleri alkali sıcak sulardan itibaren oluşurlar. Silika sinter oluşumu 3 aşamada gerçekleşir:

(1) Kuvarsa doygun hidrotermal akışkanlar rezervuardan yeryüzüne yükselerek soğur ve amorf silikaya göre aşırı doygun hale gelirler, (2) amorf silika partikülleri koloidal süspansiyon oluştururlar ve (3) amorf silika partikülleri amorf silika çökeli olarak topaklanırlar ve çimentolanırlar. Silika sinter çökellerinin büyüklüğü birkaç m^2 alan kaplayan tepeciklerden birkaç km^2 alan kaplayan teraslara kadar değişir.



Yellowstone Ulusal Park silika sinter çökelleri



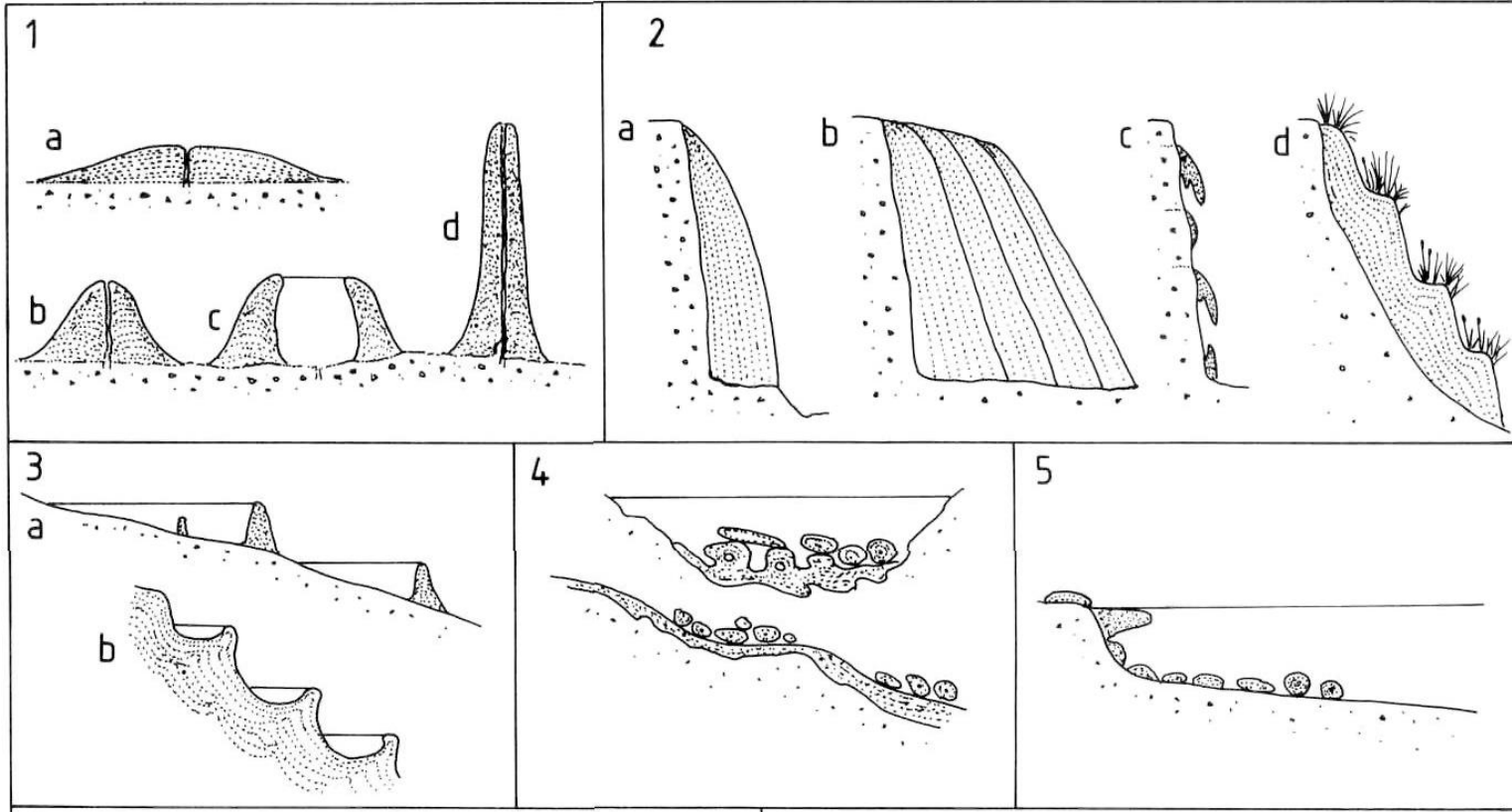
Traverten

Magma gövdesi etrafında veya fay düzlemleri boyunca derin sirkülasyon sırasında ısınan meteorik su karbonatlı kayalar ile tepkiyerek CO_2 açığa çıkarır. Sıcak sular soğuk yeraltı suyu ile karıştığında ve rezervuar kayaları ile yaklaşık $\sim 70^\circ\text{C}$ 'de kimyasal dengeye ulaştıklarında soğurlar. Su kırıklar boyunca yeryüzüne ulaştığında, CO_2 sudan ayrılır ve su CaCO_3 'a göre doymun hale gelir. Yüzeyde veya yüzeye yakın kesimlerde karbonat çökmesi traverten oluşturur.



Traverten çökelleri elektrik enerjisi üretecek ölçüde yüksek olmayan rezervuar sıcaklıklarına işaret eder, ancak sera veya konut ısıtması şeklinde doğrudan kullanım uygulamalarına uygun jeotermal rezervuarların varlığını gösterir. Traverten çökeltten akışkanlar, sıcak su üretiminde kabuklaşma gibi birtakım teknik sorunlara neden olmaktadır.

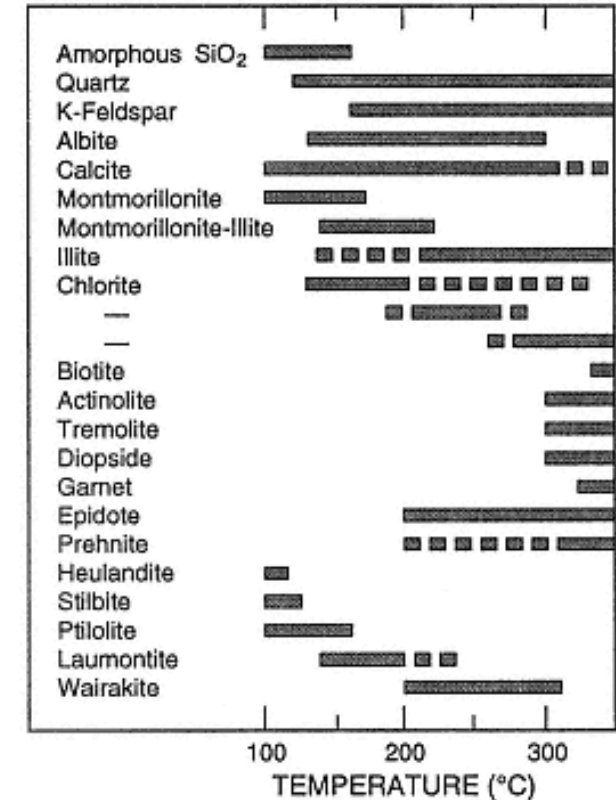
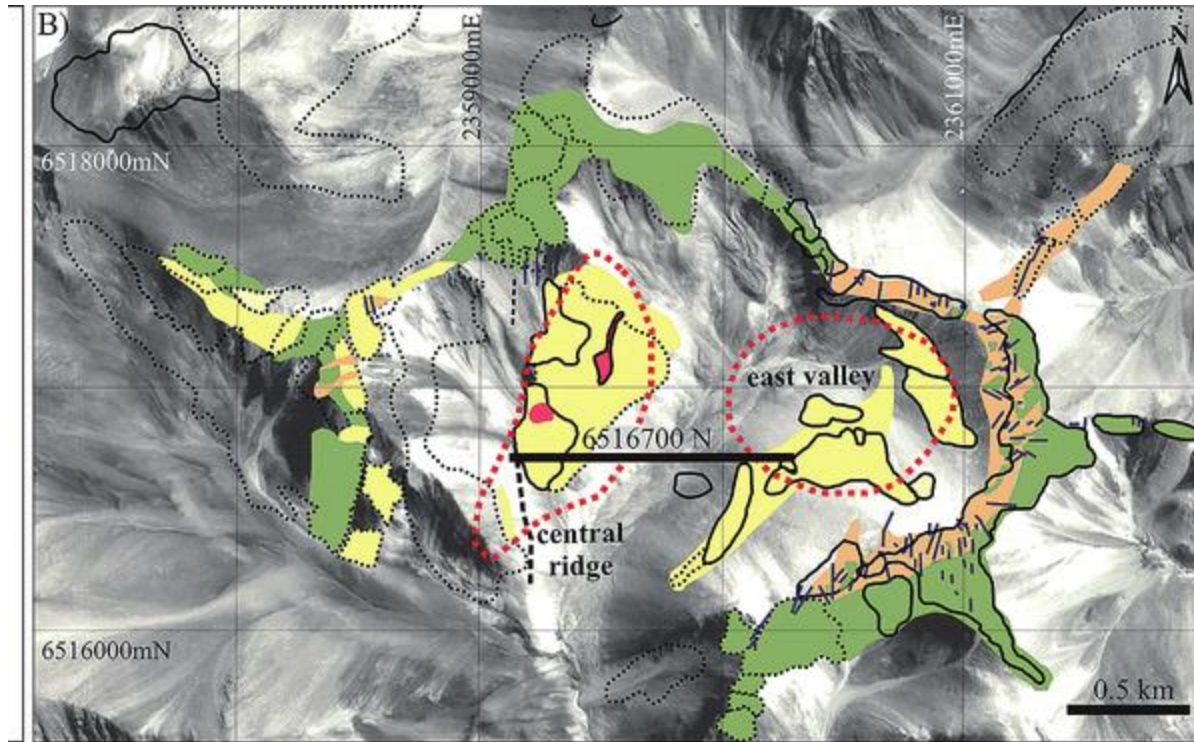
Traverten çökelleri sismik faaliyetler sonucu gelişen fay ve çatlaklar boyunca yeryüzüne çıkan akışkanlardan çökeler. Birçok çeşitleri bulunur.



- 1) sırt tipi
- 2) şelale tip
- 3) teras tip
- 4) flüvyal kabuklar
- 5) gölsel (lakustrin) traverten

Hidrotermal alterasyon

Hidrotermal alterasyon sıcak su, buhar veya gaz etkisinde değişen termal ve kimyasal koşullara karşı kayaç ve minerallerin gösterdikleri mineralojik, dokusal ve kimyasal tepkidir. Yüzeydeki alterasyon mineral parajenezinin haritalanması (varsa sondaj karot verilerinin kullanılması) ile yüksek sıcaklık, basınç ve gözenekli zonların belirlenmesi mümkündür. Aynı yöntem epitermal cevherleşme ile ilişkili fosil hidrotermal sistemlerin haritalanması için de kullanılmaktadır.



ALTERASYON MİNERAL BİRLİKTELİĞİ İÇİN TERMINOLOJİ

Terminoloji	Alterasyon özellikleri	Yaygın eş anlamı	Notlar
Silisik	Characterized by introduced silica	Silisleşme	Konak kayaç silisleşmiş, damarlarda ametist veya kalsedon mevcut
Potasyum-Feldispat	Introduced K-feldspar present as veins	Adularya, potasik zonlar	Tipik olarak adularya
Potasyum-Feldispat-Serizitik	K-feldspar and white mica-type minerals ± pyrite	Serizitik, potasik, K-silikat	Yapısal kontrollü, damarların yakınında saçınımlı
Serizitik	Mica-type mineral (for example, illite + quartz + pyrite; includes mixed-layer illite in which illite layers are dominant)	Fillik, kuvars-serizit, illitik	
Serizitik arjilik	Both white mica-type and kaolin-smectite-group minerals	Arjilik, orta derecede arjilik, serizitik, fillik	
Arjilik	Kaolin- and smectite-group minerals (for example, montmorillonite); does not typically include mica-type minerals	Orta derecede arjilik	Sıklıkla zonlu, damarların yakınında kaolinit, damarlardan uzaklaştıkça montmorillonit
İleri arjilik	Minerals representing extreme base leaching (for example, kaolinite) and sulfate or halogen fixation (for example, alunite, zunyite)	Arjilik, alünitik, kuvars+alünit	
Kloritik	Introduction of a chlorite component (usually Fe-rich) into the vein; may occur alone or with hematite, quartz, and pyrite or other sulfides; occurs sparsely as a replacement of phenocrysts or pumice fragments in wallrock	Kloritik	Damar minerali veya zonu, konak kayaçta nadiren saçınımlı
Propilitik	Characterized by chlorite, albite, epidote, carbonate ± pyrite, Fe-oxides, and minor sericite	Kuvars-klorit- pirit	Tipik bir bölgesel alterasyon
Potasyum metasomatizması	Introduced potassium, resulting in recrystallization of wall rocks to K-feldspar- and biotite-rich assemblages	Potasyum silikat	Bölgesel alterasyon