

YERİSİL DİZGELERDE "HİDROTHERMAL ALTERASYON"

TAHİR ÖNGÜR, MTA Enstitüsü, ANKARA

GİRİŞ

Biryandan hidrotermal kökenli cevher yatakları, öteyandan jeotermal kaynaklarla birlikte görülen yankaya alterasyonları ötedenberi yer bilimcilerin ilgisini çekmiştir. Konuya duyulan ilginin bilimsel boyutunun yanında, cevher oluşum süreçlerini aydınlatma, cevher yataklarının saptanması ve geliştirilmesinde bir araç edinme, jeotermal depolarla ilgili uygulamaya katkılı yaklaşımlar gibi kılıfsal bir temeli de vardır. Bu eleştirili derleme konuya hidrotermal dizgeler ve yerisil (metinde jeotermal'in yerine kullanılacaktır) araştırmalar açısından yaklaşacak ve gerekmedikçe hidrotermal cevher oluşum süreçleriyle bunlara ilişkin alterasyonlara değinilmeyecektir.

TANIM

Yerkabuğunun görece sığ kesimlerindeki kayaların içlerinde dolaşan ısı yüklü akışkanlar (hidrotermal)'la etkileşmesi sonucu kayalarda oluşan kimyasal ve mineralojik faz değişimleri topluca HİDROTHERMAL ALTERASYON olarak adlandırılmaktadır. Felspatların kaolenleşmesi bunun bir örneğidir. Ayrıca hidrotermal akışımın kattığı ya da çektiği gereçlerle kayada oluşan değişimler de (örneğin silisleşme) bu kapsamda düşünülebilir.

KAVRAMIN VE ARAŞTIRMALARIN GEÇMİŞİ

Hidrotermal alterasyonlara yerisil dizgeleri araştıranlarca ancak yüzyılımızın ikinci yarısında yaklaşılmışsa da, cevher yataklarıyla alterasyonlar arasındaki ilginin anlaşılmasının örneklerini 19. yüzyılın başlarına değin izleme olanağı vardır. Schwartz (1959)'-

in sergilemesine göre 1819 tarihli Carl Martini'nin bir yayımında, bir granit stokunun üst kesimlerindeki demirli bir damarla çevredeki kaolenleşme arasında ilişki kurulmaktaydı. Çeşitli değinmelerin dışında ilk ayrıntılı inceleme Mişigan bakır yöresinde 1873 ve 1878'de Pumpolly'nin çalışmaları. Çeşitli cevher yataklarıyla birlikte görülen alterasyonlara ilişkin Lindgren, Spurr, Ransome ve birçok başka araştırmacının çalışmasından sonra ilk derli toplu yayım Creasey (1959)'in porfiri bakır yataklarındaki alterasyonların bazı faz ilişkilerini inceleyen yazısıdır. Yine aynı yıl Schwartz (1959) hidrotermal alterasyonlar üstüne bilinenleri derleyip yayınlamış bulunuyor.

Hidrotermal alterasyon türleri ve fasiyeslerini ilk sınıflama çabası Burnham (1962)'da görülüyor. Burnham, Creasey (1959)'ün üçlü sınıflamasını ikili bir sınıflamayla değiştirip killi ve mikali fasiyesler kavramlarını geliştirmiştir. Silikat kayalarında hidrotermal alterasyonları en belirgin olarak denetleyen süreç, hidrojen ornatımı (metasomatizmi) na ilk düzenli yaklaşımla Hamley ve Jones (1964)'un yayımında karşılaşılmaktadır. Bu birikim hertür ortamda karşılaşılabilecek hidrotermal alterasyonları en kapsamlı bir biçimde inceleyen "Yan Kaya Alterasyonu" başlıklı bir metinle noktalanmaktadır (Meyer ve Hemley, 1967). Sözü edilen bu araştırma demetine yaygın deneysel çalışmalar ve çeşitli cevher yatakları ve çevresinde uygulanmış durum çalışmaları eşlik etmiş ve hidrotermal alterasyonları oluşturan temel süreçler üstüne dizgesel bilgi derlenmiştir.

Bu bilgi birikimine koşut olarak güncel hidrotermal dizgelerin izlenebildiği yerisil alanlarda yankaya alterasyonu incelemeleri başlamıştır. Bu tür çalışmaların ilk ve en yaygın örnekleri Yeni Zelanda yerisil alanlarında yer almaktadır (Steiner, 1953, 1955, 1963, 1968; Browne ve Ellis, 1970; Grindley ve Browne, 1975; Clayton ve Steiner, 1975; Ellis ve Mahon, 1977). Japonya'daki Matsukawa (Sumi, 1968; Sumi 1969; Nakamura vö., 1970), Otake (Yamasaki vö., 1970; Hayashi, 1973; Yamasaki ve Hayashi, 1975), Kirishima (Hayashi ve Fujion, 1975), Hachimantai (Shimazu ve Yajima, 1973) ve Onikobe (Seki vö., 1969) yerisil alanlarında benzeri incelemeler yapıldı. ABD'ndeki Steamboat Springs, Geysir, Salton Sea, Dunes vb alanlarda (Schoen ve White, 1965; Muffler ve White, 1969; Honda ve Muffler, 1970; Bird ve Elders, 1975; McLaughlin ve Stanley, 1975), İzlanda'da Reykjavik ve Hveragerdi alanlarında (Sigvaldason ve White, 1962; Ksitmannsdottir, 1975), Şili'de El Tatio, Endonezya'da Kwah Kamajang, Filipinler'de Tongonan lanlarında da hidrotermal alterasyonlar incelenmiştir. Hemen tüm sözü edilen alanlarda sondalama kırıntı ve karotlarının incelenmesiyle yapılan araştırmalar sonucu alterasyon kuşakları ayrılmış ve termodinamik koşullar ile alterasyon fasiyeslerinin ilişkileri irdelenmiştir.

Günümüzde hidrotermal alterasyonların incelenmesi yerisil alanların araştırılmasının olmazsa olmaz bir bölümü durumuna ulaşmış ve bu öncelemelerden elde edilen bilgiler alan geliştirmede uygulamaya katkıda bulunur olmuştur.

ALTERASYON SONUCU FİZİKSEL DEĞİŞİMLER

Hidrotermal alterasyon süreci yankayanın kimyasal ve mineralojik faz değişimine neden olurken ortamın fiziksel özelliklerinin değişimine de neden olur. Kayaların renk, sertlik, gözeneklilik, geçirimsizlik vb. özellikleri alterasyonla değişime uğrar (Schwartz, 1959).

Renk Değişimleri

Hemen tüm alterasyon örneklerinde renk değişimleri gözlenmektedir. Bu yüzden alterasyonların ilk saptanmalarında yol göstericidir.

Serisit, kil mineralleri, alunit, kuvars ve karbonatlar gibi açık renkli minerallerin bolluğundan ötürü kayanın altere olmuş kesimleri olmamış kesimlerine oranla ağarmıştır. Alterasyon ürünlerinin oksitlenmesi ise ters yönde renk değişimi yaratır. Klorit, epidot vb. minerallerin sonuçlandığı alterasyonlarla kaya yeşilin tonlarında renkler kazanmaktadır.

Alterasyon sonucu farklı bileşimli, farklı renkli kayalar aynı alterasyon kuşağında aynı rengi almaya yönelirken, farklı alterasyon kuşakları farklı renkleri ile ayrılabilirlerdir.

Matsukawa'da dört kuşağa ayrılan altere alanın az altere kesimi koyu yeşilimsi, killi kesimi beyaz ya da mavimsi gri, son silisli kesimi gri-beyaz ve gözenekli silisli kesimi ise kahverengi bulaşıklı beyaz renklerle ayrılabilir (Sumi, 1968).

Sertlik

Alterasyona uğrayan kayalar genellikle sertliklerinde azalma sergilerler. Bu durum dokunun incelmeye ve düşük sertlikli mika ve kil minerallerinin çoğalması ile açıklanabilir. Aşırı durumlarda kayanın iç tutunma özelliği tümüyle yitirilir ve gevşek, dağılgan bir kütle doğar. Ters durumlar da söz konusudur. Özellikle silisleşmiş kayalarda sertlik çok artar.

Doğu

Alterasyon sonucu kayanın dane boyu küçülür. İri kristallerin ya da kırıntıların yerlerini daha ufak alterasyon minerallerinden kurulu bir mozaik alır. Felspatların yerini kil, alunit, serisit vb. ne bırakması dane boyunu çok küçültür. Dörtüzyüde bir oranında küçülmeler ölçülmüştür. Fa-

kat dane boyu ne denli küçülürse küçülürse ilkel doku tümü ile kaybolmaz, izleri seçilebilir.

Karbonat kayalarının alterasyonu çokluk yeniden billurlaşma ile sonuçlanır. Dane boyu artar, birincil doku yiter (Schwartz, 1959).

Gözeneklilik-Geçirimsizlik

Hidrotermal akışkanlarla yankayanın ektimsel ilişkisi kayaların gözeneklilik ve geçirimsizliklerinde farklı yönlerde değişiklikler oluşturabilmektedir. Bilinen bir çok yerisil alanda geçirimsizleşmenin geliştiği izlenmektedir. Akiferde ya da yüzeye yakın kesimlerde çökelen kuvars ya da opal geçirimsizleşmenin sorumlusu olmaktadır (Grindley ve Browne, 1975). Tuzla Yerisil Alanı'nda birincil olarak aşırı gözenekli süngertaşı tüfleri alterasyon sonucu camın killeşmesi ile gözenekliliği ve geçirimsizliğini tümü ile yitirmiştir. Kuvars ve killerin dışında zeolitler, kalsit ve ikincil kayayı daha yoğun ve sert kılan alterasyon kırılma dayanımının azalması ve dolayısıyla ikincil geçirimsizliğin oluşumunun kolaylaşmasını doğurmaktadır.

Birincil felspatların ya da yüksek sıcaklıkta silisin kemirildiği durumlar-

da ise kayanın gözenekliliği artmaktadır (Grindley ve Brope, 1975).

ALTERASYON SONUCU MİNERALOGİK DEĞİŞİMLER

Hidrotermal alterasyonlar akışkan-Yankaya arasında gelişen kimyasal süreçler sonucu yankayada mineralojik faz değişimlerini sonuçlamaktadır. Oluşan yeni minerallerin sayısı çoktur. Fakat kil mineralleri, serisit, klorit, kuvars ve felspatlar en bol bulunanlardır.

Felspatlar genel olarak serisit, kil mineralleri, alunit vb. ne dönüşürken, kendileri de alterasyon ürün 5 albit, ortoklaz, adulanya olabilir.

Piroksen, amfibol ve biyotit çoğun klorite dönüşür. Epidot, karbonat, pirit, serpentin ve lökoksene de sık görülen ürünlerdir.

Bazı alterasyon mineralleri her alterasyon ortamında bulunabilirken bazıları sınırlı koşulların ürünüdürler ve bu nedenle alterasyon koşullarının belirlenmesinde kullanılırlar.

Alterasyon minerallerinin tam bir listesini yapmak olanaksızdır. Yaklaşık bir liste şöyle derlenebilir (Schwartz, 1959; vö. belgelerden):

Adulanya	Kasiterit	Serisit
Aktinolit	Kaolinit	Serpentin
Albit	Klorit	Sfen
Allofan	Kloritoyit	Siderit
Alunit	Kordiyerit	Spekülarit
Analsim	Kristobalit	Spinel
Anataz	Kuvars vb.	Sülfürler
Andaluzit	Lavmontit	Talk
Anhidrit	Lökoksene	Topaz
Ankerit	Magnezit	Tremolit
Antigorit	Magnetit	Turmalin
Anoksit	Mangano Kalsit	Wayrakit
Apatit	Manganosiderit	Yugovaratit
Barit	Mariposit	Zinabr
Beydellit	Montmorillonit	Zeolitler
Dikit	Mordenit	Zoyizit-Klinozoyizit
Diyaspor	Muskovit	Zunyit
Dolomit	Nakrit	
Epidot	Natroalunit	
Fluorit	Nontronit	
Fuhsit	Otrellit	
Gedrit	Ortoklaz	
Gröna	Prifillit	
Hallozyit	Pirit	
Hematit	Prehnit	
Hidromika (İllit)	Ptilolit	
Hromblend (Uralit)	Rodokrozit	
Jips	Rutil	
Kalsit	Saponit	

ALTERASYON ETKENLERİ

Yeralan alterasyon sürecinin türü ve şiddeti ile oluşacak yeni fazlar ve dağılımı bir dizi etken ile belirlenir. Bunlar: 1) Alterasyonun oluştuğu sıcaklık ve basınç; 2) Akışkanın bilemişi; 3) Yan kayanın bilemişi; 4) Tepkime süresi; 5) Akışkanın akış hızı; 6) Geçirimsizliğin çatlak mı, yoksa tüm gözeneklilik geçirimsizliği mi olduğu (Schwartz, 1959; Browne ve Ellis, 1970; Ellis ve Mahon, 1977). Ayrıca sudaki karbondioksit ve hidrojen sülfür derişimi de ikincil mineralerin türünü etkiler.

Duragan dizgelerde kuşkusuz sıcaklık, geçirimsizlik ve kaya bilemişi en önemli etkenler olmaktadır. Bir mineralin ilk oluştuğu sıcaklığın kuyudan kuyuya değişmesi (Browne ve Ellis, 1970) öteki etkenlerin de çalışmasıyla oluşmaktadır.

Basınç ancak kaynama derinlik ve sıcaklığını belirlediği oranda alterasyon sürecini etkilemektedir. Çünkü kaynama durumunda akışkanın bileşimi değişmektedir.

Yoğun ve geçirimsiz kayalar yüksek sıcaklıklarda bile az altere olmaktadır. Çünkü mineralojik değişimler izokimyasal olduğundan kayalar bileşenlerin eklenmesi ya da taşınmasına açık olmak zorundadır. Bu da geçirimsizliği alterasyonun önkoşulu kılmaktadır. Birçok başka alanda olduğu gibi Tuzla-Çanakale alanında da sert-som kaynağın ignimbrit altere olmazken, kaynaklanmamış ignimbritik süngertaşı breşinin bütünüyle altere olduğu gözlenmiştir.

ALTERASYONDA KİMYASAL SÜREÇLER

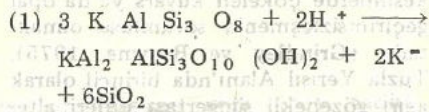
"Yayınlanmış kimyasal analizlere bakarak alterasyonlarda bazı farklı çeşit tepkimelerin yeraldığı kabul edilebilir: hidrasyon ya da dehidrasyon (sululanma ya da suyitirme), katyon ornatımı ve anyon ornatımı. Ornatma değişiklikleri hem kayaya bir iyon eklenmesini hem de sıvı fazda taşınmasını kapsayabilir."

"Yankaya alterasyonlarının çoğu türlerindeki en önemli ornatma süreci ise minerallerin hidrolizi, ya da hidrojen ornatmasıdır. Kayaya hidrojen iyonları eklenmekte, moleşdeğer bir baz metal katyonu salınmakta ve çözeltideki hidroksil/hidrojen iyon oranı artmaktadır." (Meyer ve Hemley, 1967).

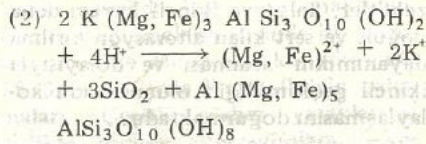
Kullanılan hidrojen iyonlarının kaynağı önemsizdir, arı su da olabilir, çözeltideki asit bir bileşen de (Hemley ve Jones, 1964).

Hidrotermal alterasyon yalın bir süreç değildir. Aynı anda birçok mineral çözülebilir ve hidrasyon ve hidroliz dışında tepkimeler de yeralabilir. Önemli alterasyonların gözlemlendiği alanlarda sisikatların hidrolizle çözümleri en önemli süreç olarak saptanmaktadır (Hamley ve Jones, 1964).

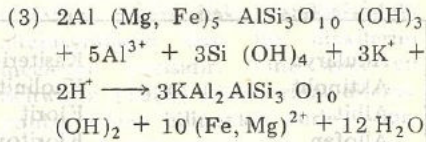
Ortoklazın sulu bir çözeltide serisitleşmesi hidrolizin bir örneğidir:



Biyotitin kloritleşmesi de başka bir örnekler:



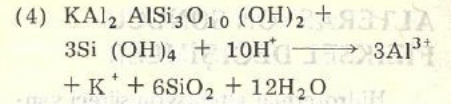
Kloritin serisitleşmesi de H^+ 'nu gerektirmektedir:



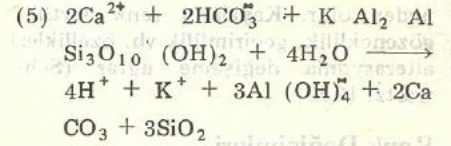
Tersine albitin kloritleşmesi ya da andezinin klinozoyizite dönüşmesi tepkimelerinde hidrojen iyonu çözeltiye salınır.

Alterasyon tepkimelerinde yeralan temel metal katyonları sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, demir ve alüminyumdur. Bu katyonlar hidroliz olmadan da baz değişim tepkimeleriyle birbirlerinin yerlerine geçebilirler (Meyer ve Hemley, 1967). Alterasyon sırasında akışkan alkalileri taşıyan ve alkali iyon değişimini sağlayan etkin bir aracı rolü oynar. Alkalilerin oranı sıcaklık, basınç, toplam bileşim ve kristalli fazların yapısal durumuyla belirlenir (Orville, 1963).

Silisleşme ve karbonatlaşmada olduğu gibi anyon ornatması da çok önemli bir süreçtir. Yüksek hidrojen etkinliği koşullarında serisit silisleşmesi oluşabilir:

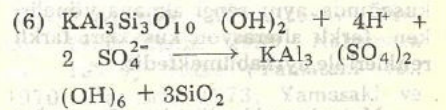


Serisit kalsit ve kuvarsa dönüşmesinin olası tepkimesi ise:



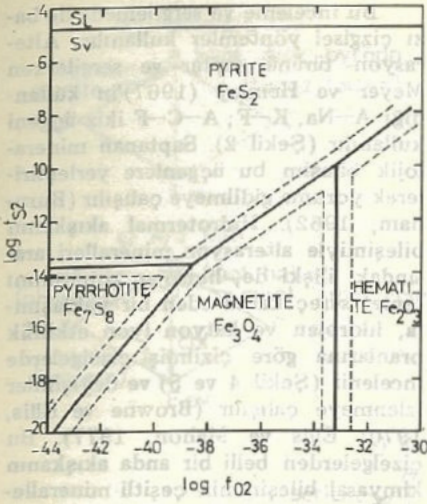
Ne denli farklı da görünse tüm alterasyon ve ornatma tepkimeleri temel olarak fazlar arasındaki çözümlülük ilişkilerinin anlatımıdır. Termodinamik olarak silisin çökeldiği ortamdaki etkinliği yüksek, çözeltiye salınan öteki bileşenlerin etkinlikleri katı fazın duraylılığını koruyamayacak denli düşük olmalıdır. Doğal bir ortamda devinen çözeltiler ve yayın (difüze eden) bileşenlerle ornatma tepkime fırsatları sık ve sürekli olarak gelişir (Meyer ve Hemley, 1967).

Alunitleşme hem H^+ hem de SO_4^{2-} bağlanmasını içeren bir süreçtir. Örneğin muskovitin alterasyonunda:



Ornatmanın hidrotermal alterasyon süreçlerindeki önemi bilinirken indirgeme (redox) tepkimeleri, elektron ornatmasını içeren tepkimeler üstünde çok az durulmaktadır. Hidrotermal süreçlere katılan indirgeme tepkimelerinin sayısı çoksa da yalnızca demir ve kükürtle ilgili olanları önemlidir. Magnetitin piritleşmesi ya da biyotit ve ferromagnezyen minerallerin demir sülfürlerle ornatılmalarıyla sık karşılaşılır. Yan kaya alterasyon kuşaklarında demir sülfür—demir oksit minerallerinin dizilim bir yandan (farklı oksijen etkin basınçlı ve oksitlenmiş ya da indirgenmiş kükürt türlerinin farklı derişimlerine iye) çözeltilerdeki toplam başlangıç çözeltilmiş kükürt derişimine bağlıdır (Şekil 1) (Raymahashay ve Holland, 1969).

Sululanma H_2O 'nun başka bir özdekle kimyasal bileşimidir. Hidrojen ya da hidroksil iyonu sululanmada seçilerek kullanılmaz. Dolayısıyla çözeltiye başka bir iyon salınmaz. Örneğin: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{Al (OH)}_3$ (Jibsit).



Şekil 1. 250°C sıcaklıkta Pirotit, Pirit, Magnetit ve Hematitin duraylılık alanları; kesikli çizgi alan sınırlarının yerlerindeki hesaplanmış belirsizlikleri göstermektedir.

ALTERASYONDA KİMYASAL DEĞİŞİM

Alterasyon süreci sırasında yan kayada yer alan faz değişimleri ile birlikte çözelti yan kayaya bazı öğeleri eklerken bazılarını da çözmektedir. Kimyasal değişimlerdeki karmaşık genellemeleri güçleştiriyorsa da bazı genel olgulara değinilebilir.

Hidrotermal çözeltiler altere kayalara başta su, silis, kükürt, karbondioksit, potasyum, sodyum, kalsiyum, magnezyum, bor, fluor, klor, fosfor ve asıl olarak sülfür ve oksit biçiminde çökelen metalleri katar. Altere kayalar, fümeroller ve sıcaqsu kaynaklarından sağlanan kanıtlar CO₂, H₂S, H₂SO₄, HCl, HF'in hidrotermal çözeltilerde etkin olan önemli bileşenler olduğunu göstermektedir.

Potasyum magmatik ve metamorfik kayalara alterasyonda asıl olarak eklenirken, killi alterasyonlarda eksilir. Serisitleşmede, özellikle serisit K-felspatları bozulmadan plajyoklazın yerine oluşması durumunda potasyum eklenmektedir (Schwartz, 1959; Meyer ve Hemley, 1967).

Sodyum albitleşme dışında şiddetle azalmaktadır.

Kalsiyum da karbonatlaşma dışında benzer bir eğilim göstermektedir.

Magmatik kayaların alterasyonunda magnezyum genellikle eksilir. Kloritleşmede ise artmaktadır.

Demir değişkendir. Karbondioksit önemli oranda artmaktadır.

Silis killeşmede yitirilirken, serisit kesimlerde kazanılmaktadır.

Altere kuşaklar baz eşdeğerlerde net bir kayıp propilitik ve K, silikat alterasyonlarında çok azdan, serisit ve ileri killi topluluklarla, silisleşmede büyük miktarlara değişmektedir. Kloritik ve karbonat alterasyonlarında baz içerikleri çok kayıplarla büyük kazançlar arasında değişiklik sergiler (Meyer ve Hemley, 1967).

ALTERASYON VE METAMORFİZMA

Hidrotermal alterasyonda gelişen mineral topluluklarının oluşumlarının basınç-sıcaklık koşulları tipik sıcaqsu kaynağı ortasında klorit ya da yeşilist metamorfizmasının üst basınç-sıcaklık sınırlarına dek değişir. Hidrojen ornatımı ve kilce zengin mineral topluluklarının baskınlığı gibi birçok etken hidrotermal alterasyonların yorum ve sınıflanmasına, metamorfizmanıninkinden farklı yaklaşımları gerektirmektedir. Hidrotermal alterasyon mineral topluluklarını metamorfizmanın alışımlı şemaları içinde incelemenin temel zorlukları duraysız fazların varlığının belirtileri ve duraylı dengeye yönelmiş tamamlanmamış tepkimelerdir (Hemley ve Jones, 1964).

HİDROTERMAL ALTERASYONLARIN SINIFLANMASI

Hidrotermal alterasyonlara ilişkin verileri dizgeleştirmek ve süreçleri daha anlaşılır kılmak için çeşitli sınıflama denemeleri yapılmıştır. Bunlarda ya türümsel ya betimsel yaklaşımlar seçilmiştir. İlkinde alterasyonun türediği koşulları anlatan bir sınıflama amaçlanmıştır. Çeşitli çalışmalarda yaygınlaşmamış terimlerle denenen bu sınıflamalar gerçekte betimsel yaklaşımlarla çakışmaktadır. Asıl dizgeli sınıflamalarla da alterasyon ürünü mineral toplulukları temel alınarak yapılan bu denemelerde karşılaşılmaktadır.

Schwartz (1959) çeşitli kuşaklaşma örneklerini sıralamasına karşın bir sınıflama önermezken, Burnham (1962) hidrotermal olarak altere olmuş kayaları iki ana gruba ayırmıştır: killi (arjilik) ve mikalı (fillik) fasi-

yesler. Killi fasiyesler propilitik, montmorillonitik ve kaolenitik, mikalı fasiyede de muskovitik ve biyotitik türleri yer almaktadır.

Burnham'ın her alterasyon türü belirli fizikokimyasal koşulları belirlemektedir. En dış propilit askuşağı genel olarak CaO, MgO, Na₂O, H₂O ve CO₂ ile zenginleşmiştir. Ara, nontmorillonit askuşağında bileşim çok az değişirken, iç, kaolenit askuşağı propilit askuşağına eklenen çeşitli bileşenlerden yoksullaşmasıyla özgündür. Eniç mikalı kuşak da CaO, MgO ve Na₂O'ca yoksullaşır fakat K₂O artmıştır. Bununla birlikte dış kesimleri (muskovit askuşağı) iç kesimlerine göre (biyotit askuşağı) CaO, MiO ve Na₂O'ca daha çok yoksullaşmıştır. 1000 bar su basıncı altında farklı fasiyeslerin ısl duraylıklarının üst sınırları tekçe minerallerin bozulma sıcaklıklarıyla saptanmaktadır. Killi fasiyes için 460°C ta epidot, 400°C ta kaolenit ve 440°C'ta nontmorillonit ve mikalı fasiyes için 620°C'ta muskovit.

Meyer ve Hemley (1967) alterasyon türlerini azalan hidrojen ornatımının şiddetine göre sıraladıkları ve mineral topluluklarına göre sınırladıkları beş gruba ayırmıştır: a) İleri killi topluluklar; b) Serisitli topluluklar; c) Ara killi topluluklar; d) Propilitik topluluklar; e) Potasyum silikat toplulukları (Şekil 2).

İleri Killi Topluluklar. Bunlar dicit, kaolenit, pirofillit, serisit, kuvars, çoğun da alunit, pirit, turmalin, topaz, zünyit ve amorf killerle özgündür. Bu tür alterasyonlarla asit sıcaqsu kaynaklı ortamlarda karşılaşılmaktadır.

Serisitli Alterasyon. Bunlarda serisit, kuvars ve pirit belirleyicidir. En yaygın bulunan alterasyon türüdür.

Ara Killi Alterasyon. Kaolen ve nontmorillonit grubu mineraller egemendir. Amorf killer yerel olarak önemlidir. K-felspatı varolabilir.

Propilitik Alterasyon. Epidot (zoyizit), albit, klorit, septeklorik, karbonat, çokluk serisit, pirit ve demir oksitler, bazan da zeolit ve nontmorillonit içerirler. Kimyasal bileşim pek değişmez. Baskın ya da önemli faza göre albitleşme, kloritleşme, zeolitleşme, karbonatlaşma izlenebilir.

Potasyum Silikat Alterasyonu. Potasyum felspatı ve mikalar asıl mine-

rallerdir. Kil yoktur. Klorit çok az anhidrit yaygındır. Pirit yaygın olarak görülür. Sıcaksu dizgelerinde K, felspatı, adularyadır.

Yerisil alanlarda yapılmış olan çalışmalarda bu sınıflama çerçevesinde anlaşılabilir alterasyon kuşaklarından söz edilmektedir. Steamboat Springs'te (Schoen ve White, 1965) K-felspat, serisitli ve ara killi alterasyonlar sözkonusu edilmektedir. Waira-

kei'de (Steiner, 1953) sülfürik asit yıkama, killeşme, zeolitleşme ve felspatlaşma kuşakları ayrılmıştır. Matsukawa'da (Sumi, 1968; 1969) saponit, klorit, montmorillonit, kaolen, alunit ve pirofillit kuşakları tanımlanmaktadır (Şekil 3).

Bu tür alanlar için Hayashi (1979) çeşitli çalışmalardan yola çıkarak aşağıdaki sınıflamayı önermektedir:

Alterasyon türü	Alterasyon derecesi	Akışkan	Özgün mineral
I Silis minerali türü	En şiddetli	Asidik— Alkalen	Tridimit Kristobalit Kuvars
II Hegzagonal Sülfat türü	Şiddetli	Sülfürik Asit	Alunit
III Aluminyum silikat türü	Ara	Asidik	Kaolen Pirofillit
IV Yaprak Alum. silikat türü	Zayıf	Zayıf Asidik	Montmorillonit Klorit Mika
V Çatı Alum. silikat türü	Çok zayıf	Nötr— Alkali	Zeolit Felspat
VI Kısmen altere olmuş tür	Çok zayıf	Asit—Alkali	—
VIII Altere olmamış tür			

Bazı betimsel kolaylıklara da yönelse yerisil alanlarda yapılmış olan alterasyon incelemelerinin yeterince düzenli sınıflamaları kullanmadığı saptanabilir. Bununla birlikte varolan karışık görüntünün ardında tüm yaklaşımların Meyer ve Hemley sınıflaması ışığında anlaşılabilirliği de görülmektedir. Bu bağlamda yerisil alanlarda sergilenen değişik kuşakların Meyer ve Hemley'in beş fasiyesinden birine, bunların geçiş bölümlerine ya da asbölümlerine karşı geldiği vurgulanmalıdır.

HİDROTERMAL ALTERASYONLARIN İNCELENMESİ

Hidrotermal alterasyona uğramış alanlar incelenirken ilk adımda göze görünür özelliklerin izlenmesi yararlıdır. Bu çerçevede renk, sertlik, çatlaklılık, boşlukluluk, doku gibi bazı fiziksel özelliklerin dağılımı saptanır.

Bunun yanında gözle ayırdedilebilen mineralojik bileşim de haritalanır ve birbirleriyle ilişkileri tanımlanır. Örneğin silisli, killi kuşaklar ayrılabilir.

Daha ayrıntılı incelemeler yüzeylemelerden, karot ve kuyu kırıntılarında alınan örneklerde mikroskopla X-ışınlarıyla yapılan mineralojik belirlemeler ve kimyasal analizlere dayanılarak, Hidrotermal akışkanın kimyasal analizleri de yorumlanan verilere katılır.

Saptanan mineral toplulukları ve taze kaya ile altere kaya arasında görülen kimyasal kazanç ve yitkiler alterasyon türünü ve dolayısıyla alterasyonun olduğu fizikokimyasal koşulları yorumlamaya yararlı olur. Alterasyon mineralleri topluluklarının çatlaklardan dışa ve derinden sığa dağılım düzenlerinin incelenmesiyle de hidrotermal akışkanın bileşimindeki güncel ya da geçmiş değişimler izlenir.

Bu inceleme ve sergilemede de bazı çizgisel yöntemler kullanılır. Alterasyon türünü saptar ve sergilerken Meyer ve Hemley (1967)'in kullandığı A—Na, K—F; A—C—F ikiz üçgeni kullanılır (Şekil 2). Saptanan mineralojik bileşim bu üçgenlere yerleştirilerek yoruma gidilmeye çalışılır (Burnham, 1962). Hidrotermal akışkanın bileşimiyle alterasyon mineralleri arasındaki ilişki de, hidrojen ornatımını temel süreç kabul eden bir yaklaşımla, hidrojen ve katyon iyon etkinlik oranlarına göre çizilmiş çizelgelerde incelenir (Şekil 4 ve 5) ve değişimler izlenmeye çalışılır (Browne ve Ellis, 1970; Ellis ve Mahon, 1977). Bu çizelgelerden belli bir anda akışkanın kimyasal bileşiminin çeşitli minerallerin duraylılık alanlarına göre durumu ve beklenebilecek mineral topluluğu çıkarılabilir.

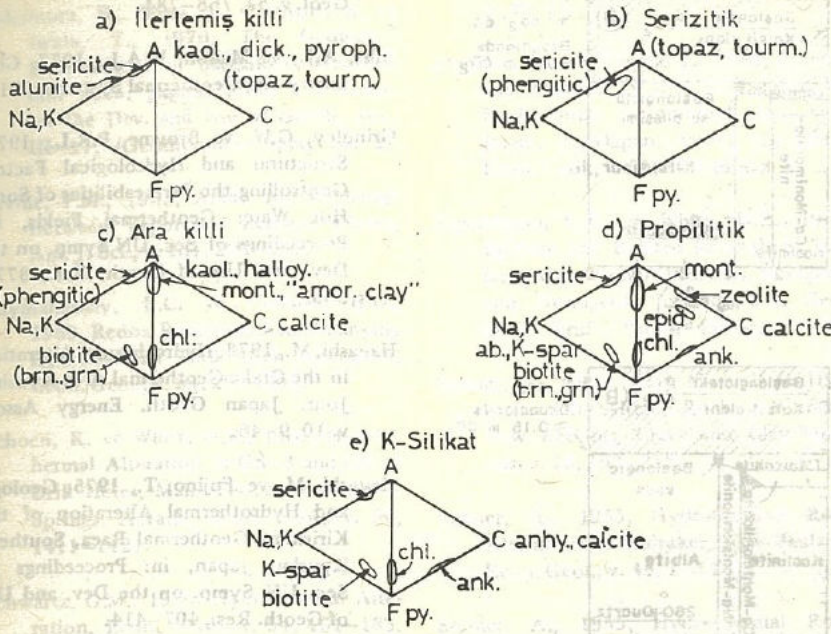
Bunların dışında Hayashi (1979) niceliksel betimleme için bir dizi yöntem önermektedir. Buna göre örneklerin renk ve sertliği nesnel ölçütler kullanılarak betimlenecektir. Kırıklık için bir kırık indisi (CI) kullanılacaktır. Kayanın modal analizi statistik yollarla belirtilecektir. Bir "alterasyon oranı" cetveli ve "alterasyon derecesi" sınıflaması uygulanacaktır. X-ışınları difraksiyonu sonuçlarıyla bir Kuvars İrdisi (OI) uygulanacaktır. Zirkon renkleri bulunup yaş saptanacaktır. Alterasyon minerallerindeki sıvı kapanımları incelemek sıcaklık hesaplanacaktır.

İNCELEMENİN YARARLARI

Hidrotermal alterasyonların incelenmesi için yapılan çalışmalar başta bilimsel olmak üzere bir dizi amaca yöneliktir. Bu tür araştırmalar her şeyden önce doğal olgu ve süreçlerle ilgili anlayışımızı geliştirmeye katkılarıdır. Bunun dışında bazı kılışal yararlar da söz konusudur.

Oluşmuş hidrotermal minerallerin saptanması, geçirimli kesimlerin saptanması, olası üretim zonlarının bulunması ve üretime geçmeden kuyu veriminin hesaplanmasını sağlayabilmektedir (Browne, 1970).

Alterasyon kuşaklarının incelenmesi kuvarsit, alunit, zeolit, kaolen gibi endüstriyel hammaddelerin bilinmesine katkıları olabilmektedir. Broadlands (Yeni Zelanda) alanını araştıran Browne (1970) 150000 lb/saat'in üzerinde verimi olan kuyulardaki bas-



Şekil 2. Ana yan kaya alterasyonu türlerindeki mineral toplulukları (Silisün etkinliğinin kuvarsla denetlenmesi zorunlu değil). Herbir çizelgede adlandırılan mineraller o tür alterasyonun dışında bunlar geniş sıcaklık-basınç aralıklarına iyedirler. Aluminyumlu killi toplulukların yüksek sıcaklık eşdeğerleri andalusitli bir topluluk olabilir. ab.: Albit, ank.: Ankerit, chl.: Klorit, dick.: Dikit, epid.: Epidot, halloy.: Halloysit, hem.: Hematit, K-spar: K-Feldspatı, kaol.: Kolenit, mag.: Magnetit, mont.: Montmorillonit, po.: pirotit, py.: Pirit, pyroph.: Pirofilit, sid.: Siderit, tourm.: Turmalin.

km felspatın adularya, 40000-150000 lb/saat arasında adularya ve albit, 40000 lb/saat'in altında andezin ve albit olduğunu, üretken zonlarda adularyanın geliştiğini saptamıştır.

ARAŞTIRMA ÖRNEKLERİ

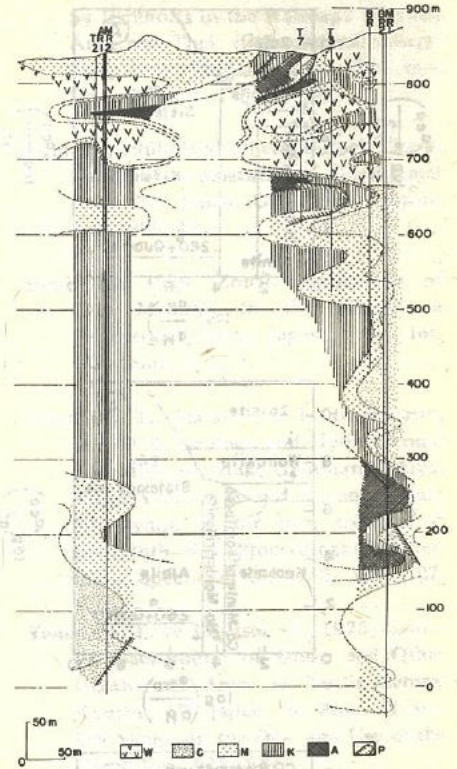
Yerisil alanlarda yapılmış en ayrıntılı alterasyon incelemeleri Yeni Zelanda'da Broadlands ve Wairakei, Japonya'da Matsukawa alanlarındakilerdir.

Wairakei'de yüzeydeki asitle yıkanmış bir kuşağın altında 100-120°C sıcaklıklarda altere riyolit tüflerinde ptilolit ve kalsiyum montmorilloniti görülür. Artan derinlik ve sıcaklıkla, ara katmanlı illit-montmorillonit belirir. En derin düzeylerde 240°C dolayında bir sıcaklığın üzerinde illit görülür. Her derinlikte mikali fazlarla birlikte demirce zengin klorit ve pirit ya da pirotin bulunur. Bir dizi susuzlaşma tepkimesi sonucu artan sıcaklıkla ptilolit'ten lavmontit, wayrakit ve epidota değişen zeolit

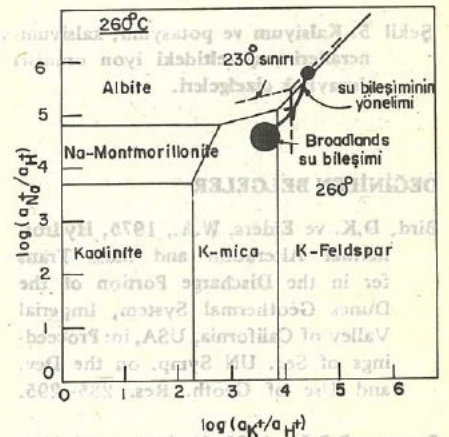
fazları oluşur. Kuvars, K-feldspatı, klorit, K, mikası, albit, epidot ve wayrakit en yüksek sıcaklıklar için tipiktir. Akma kanallarında suyun kaynadığı kesimlerde kuvars, K, felspatı ve wayrakit ana minerallerdir.

Broadlands'taki durum ana çizgileriyle Wairakei'dekine benzemekle birlikte önemli ayrımlar vardır. Broadlands'ta Wairakei'nin tersine kalsit bol, wayrakit ve demirce zengin epidot enderdir. Genel olarak zeolitler yaygın değildir. Farkların kaynağı hidrotermal akışındaki CO₂ içeriğindeki ayrılıktır. Broadlands'ta CO₂ 0.12; Wairakei'de m CO₂ 0.01'dir (Şekil 5).

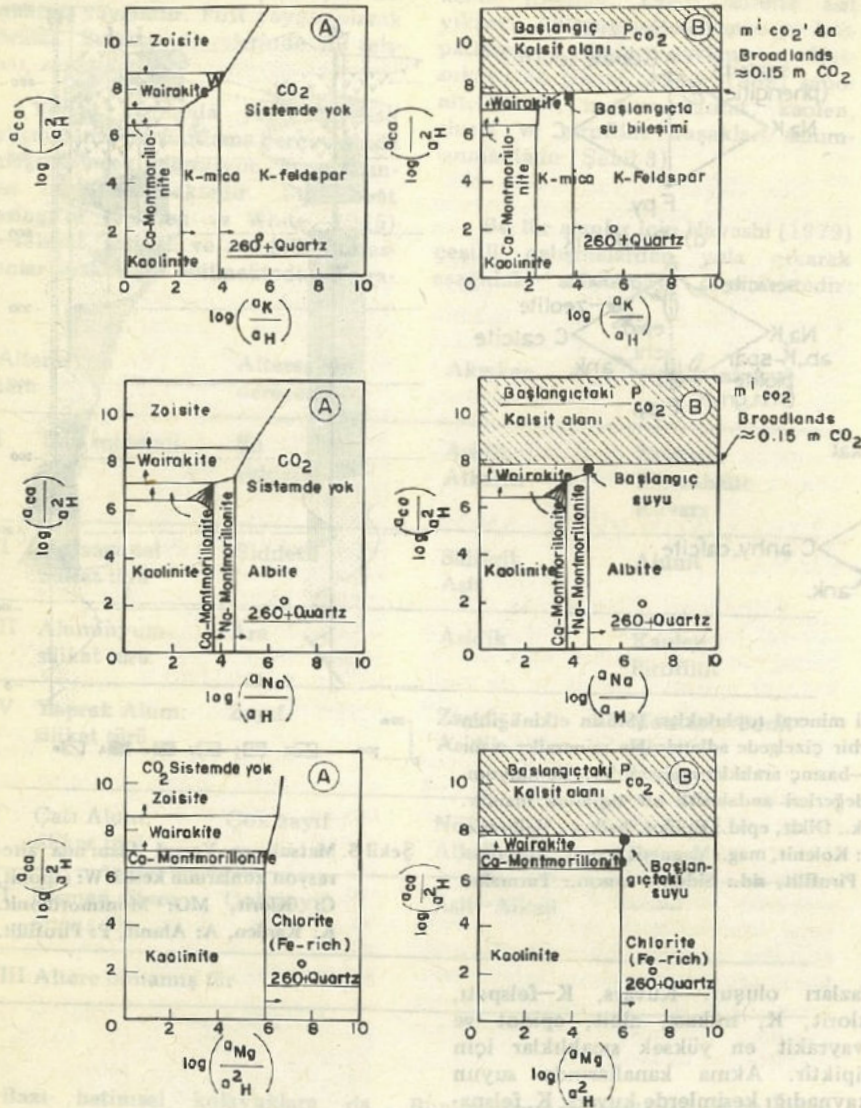
Matsukawa'da alterasyon kuşakları düzey kanallardan asit sülfat çözeltilerinin yanal yayılmasıyla oluşmuştur (Şekil 3). Yüzey yakınında saponit, montmorillonit ve alterasyon kuşakları düzey dağılmaktadır. Ayrıca Matsukawa'da başlangıçta oluşan zeolitler daha sonra parçalanmaktadır (Ellis ve Mahon, 1977; Sumi, 1968).



Şekil 3. Matsukawa Yerisil Alanı'nda alterasyon zonlarının kesiti. W: saponit, C: Klorit, MO: Montmorillonit, K: Kaolen, A: Alunit, P: Pirofilit.



Şekil 4. 260°C'ta çözeltideki iyon derişimi oranlarına göre sodyum ve potasyumlu minerallerin duraylılık çizelgesi (Kesik çizgi 230°C'taki durumu göstermektedir).



Şekil 5. Kalsiyum ve potasyum; kalsiyum ve sodyum; ve kalsiyum ve magnezyumlu minerallerin, çözeltideki iyon oranları ve çeşitli CO₂ değerlerine göre 260°C'taki duraylılık çizelgeleri.

DEĞİNİLEN BELGELER

Bird, D.K. ve Elders, W.A., 1975, Hydrothermal Alteration and Mass Transfer in the Discharge Portion of the Dunes Geothermal System, Imperial Valley of California, USA, in: Proceedings of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res. 285-295.

Browne, P.R.L., 1970, Hydrothermal Alteration as an Aid in Investigation Geothermal Fields, UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., 1-7, (Geothermics, Spec. Iss.) 2.

Browne, P.R.L. ve Ellis, A.J., 1970, The Ohaki-Broadlands Hydrothermal Arc-

a, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry, Am. J.Sci., v. 269, 97-131.

Burnham, C.W., 1962, Facies and types of hydrothermal alteration, Econ. Geol., v. 57, 768-784.

Clayton, R.N. ve Steiner, A., 1975, Oxygen isotope studies of the geothermal system at Wairakel, New Zealand, Geochim. Cosmochim. Acta, 39, 1179.

Creasey, S.C., 1959, Some Phase Relations in Hydrothermally Altered Rocks of Porphyry Copper Deposits, Econ.

Geol. v. 54, 768-784.

Ellis, A.J., ve Mahon, W.A.J., 1977, Chemistry and Geothermal Systems, 391 s.

Grindley, G.W. ve Browne, P.R.L., 1975, Structural and Hydrological Factors Controlling the Permeabilities of Some Hot Water Geothermal Fields, in: Proceedings of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., 377-386.

Hayashi, M., 1973, Hydrothermal Alteration in the Otake Geothermal Area Kyushu, Jour. Japan Geoth. Energy Assoc. v. 10, 9-46.

Hayashi, M. ve Fujino, T., 1975, Geology and Hydrothermal Alteration of the Kirishima Geothermal Raca, Southern Kyushu, Japan, in: Proceedings of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., 407-414.

Hayashi, M., 1979, Quantitative Descriptions of Cores and Cuttings from Geothermal Wells, J. Geoth. Research Soc. Jap., v. 1, 103-116.

Hemley, J.J. ve Jones, W.R., 1964, Chemical Aspects of Hydrothermal Alteration With Emphasis on Hydrogen Metasomatism, Econ. Geol., v. 59, 538-569.

Honda, S. ve Mffler, L.J.P., 1970, Hydrothermal Alteration in Core from Research Drill Hole Y-1, Upper Gyscr Basin, Yellowstone National Park, Wyoming, Am. Min., v. 55, 1714-1737.

Kristmannsdottir, H., 1975, Hydrothermal Alteration of Basaltic Rocks in Incelandic Geothermal Areas, in: Proceedings of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., 441-445.

McLaughlin, R.J. ve Stanley, W.D., 1975, Pre-Tertiary Geology and Structural Control of Geothermal Resources, The Geysers Steam Field, California, in: Proceedings of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., 475-485.

Meyer, C. ve Hemley, J.J., 1967, Wall Rock Alteration, in: Hydrothermal Ore Deposits, Ed. Barnes, 166-235.

Muffler, L.J.P. ve White, D.E., 1969, Active Metamorphism of Upper Cenozoic Sediments in the Salton sea Geothermal Field and Salton Through, SE California, Geol. Soc. Am. Bull., v. 80, 157-182.

Nakamura, H., Sumi, K., Katagiri, K. ve Iwata, T., 1970, The Geological Environment of Matsukawa Geothermal Area, Japan, Proc. UN Symp. on the Dev. and Use of Geoth. Res., III-17, (Geothermics, Spec. Iss. 2).

Orville, P.M., 1963, Alkali Ion Exchange Between Vapor and Feldspar Phases, Am. J. Sci., v. 261, 201-237.

Raymahashay, B.C. ve Holland, H.D., 1969, Redox Reactions Accompanying Hydrothermal Wall Rock Alteration, Econ. Geol., v. 64, 291-305.

Schoen, R. ve White, D.E., 1965, Hydrothermal Alteration in GS-3 and GS-4 Drill Holes, Main Terrace, Steamboat Springs, Nevada, Econ. Geol., v. 60, 1411-1421.

Schwartz, G.M., 1959, Hydrothermal Alteration, Econ. Geol., v. 54, 161-183.

Seki, Y., Onuki, H., Okumura, K. ve Takashima, I., 1969, Zeolite Distribution in the Katagama Geothermal Area, Onikabe, Japan, Jpn, J. Geol. Geogr.,

v. 40, 63.

Shimazu, M. ve Yajima, J., 1973, Epidote and Wairakite in Drill Cores of at the Hachimantai Geothermal Area, NE Japan, J. Öapan Assoc. Min. Petr. Econ. Geol., v. 68, 363-371.

Sigvaldason, G.E. ve White, D.E., 1962, Epidote and Related Minerals in Two Deep Geothermal Drillholes, Reykjavik and Hveragerdi Iceland, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 450-e, 77-79.

Steiner, A., 1968, Clay Minerals in Hydrothermally Altered Rocks at Wairakii, New Zealand, Clays and Clay Minerals, v. 16, 193-213.

Steiner, A., 1955, Hydrothermal Rock Alteration at Wairakei, New Zealand, Econ. Geol., v. 48, 1-13.

Steiner, A., 1955, Hydrothermal Rock Alteration at Wairakei, in: Geothermal Steam for Power in New Zealand, 21-26.

Steiner, A., 1963, The Rocks Penetrated

by Drillholes in the Waiotapu Thermal Area and Their Hydrothermal Alteration, New Zealand, Dept. Sci. Ind. Research Bull., 155, 26-34.

Sumi, K., 1968, Hydrothermal Rock Alteration of the Matsukawa Geothermal Area, NE Japan, Geol. Surv. Japan. Rep., 225, 42.

Sumi, K., 1969, Zonal Distribution of Clay Minerals in the Matsukawa Geothermal Area, Japan, Proc. Int. Clay Conf., v. 1.

Yamasaki, T., Matsamoto, L. ve Hayashi, M., 1970, Geology and Hydrothermal Alteration of Otake Geothermal Area, Kujyu Volcano Group, Kyushu, Japan, UN Symp. on the Dev. and Use of the Geoth. Res., Proceedings (Geothermics, Spec. Iss. 2), v. 2, 197-207.

Yamasaki, T. ve Hayashi, M., 1975, Geological Background of Otake and Other Geothermal Areas in North-Central Kyushu, SW Japan, in: Proc. of Sec. UN Symp. on the Dev. and Use of the Geoth Res., 673-684.