

# Kayalarda Basınç ve Sıcaklığın Sağladığı Başkalaşım Metamorfizma



*Yerkabuğunun oluşumundan beri, kayalar, yerin derinliklerinde belirli basınç ve sıcaklık aralığında katı hallerini bozmadan başkalaşım gösterirler. Bu durum, katı kabuğu oluşturan üç büyük anakaya grubundan biri olan metamorfik (başkalaşım) kayaların oluşumunu sağladı, sağlıyor...*

**U**zerinde yaşadığımız katı yerkabuğunu oluşturan anakayalar, oluşumları bakımından birbirinden farklı magmatik (magma kökenli), sedimanter (tortul) ve metamorfik (başkalaşım) olarak adlandırılan gruplardan oluşmaktadır. Sıcaklığı 600°C-1300°C arasında, gaz ve su buharı gibi uçucu bileşenlerce doygun bir silikat (SiO<sub>2</sub>) çözeltisi olan magmanın soğuyarak katılaşması ve kristalleş-

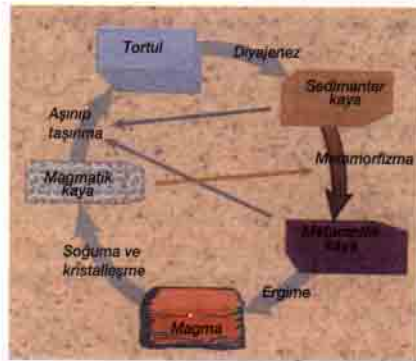
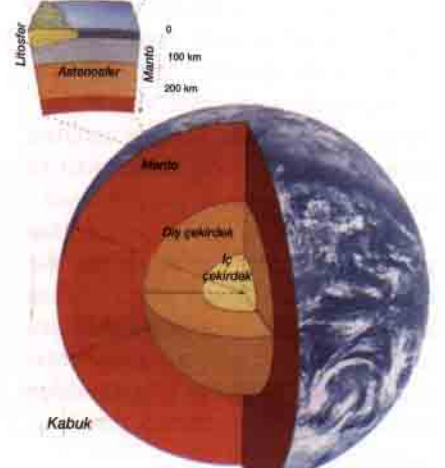
mesi sonucu oluşan magmatik kayalar, doğrudan magma kökenli oldukları için birincil kayalar olarak nitelendirilirler. Magmanın yeryüzünde veya yeryüzüne çok yakın derinliklerde ani soğuması sonucu magmatik kayaların bir türü olan volkanik kayalar oluşurken, bu soğuma ve katılaşmanın daha derinlerde ve bu yüzden de daha yavaş gerçekleşmesi sonucu, magmatik kayaların diğer bir türü olan plütonik kayalar oluşur. İkincil olarak nitelenebilecek sedimanter kayalar ise, yeryüzündeki kayaların, sıcaklık değişimleri, yağış gibi atmosfer etkileriyle parçalanıp; akarsu, rüzgar gibi araçlarla uygun ortamlara taşınıp depolanmasıyla oluşur. Sediman (tortul) kalınlığı altında gömülme ve buna bağlı olarak artan basınç ve sıcaklığın etkisiyle diyajenez (taşlaşma) gelişir. Taşlaşmadan önce birbirinden bağımsız olan ve tortul yapıyı oluşturan tortul taneler, diyajenezden sonra birbirlerine bağlanırlar. Oluşum şekli bakımından, bu yazının ana konusunu oluşturan ve sedimanter kayalar gibi ikincil olan metamorfik kayalar ise, gerek magmatik, gerek sedimanter gerekse metamorfik kayaların katı durumlarını ve toplam kimyasal bileşimlerini koruyarak mineral bileşimlerinin ve dokusal özelliklerinin değişmesi sonucu oluşurlar.

arasında da rahatlıkla kurulabilir. Yerkabuğunun, üzerinde yaşanan en üst bölümü, farklı yoğunluklara sahip okyanusal (~2.9 kg/cm<sup>3</sup>) ve kıtasal kabuklardan (~2.7 kg/cm<sup>3</sup>) oluşmaktadır. Bunlar da yoğunluğu yaklaşık 3.3 kg/cm<sup>3</sup> ve kalınlığı daha fazla olan litosfer (taş küre) içine gömülü olarak bulunurlar.

Okyanusal kabuklara oranla daha büyük hacimli ve kalınlıkları yaklaşık 30-35 km olan, litosfer içindeki durumları çok büyük bir aysberge benzetilebilecek kıtasal kabukların altındaki litosfer kalınlığı yaklaşık 70 km kadardır. Kıtasal kabuklara göre daha küçük hacimde, yaklaşık kalınlığı 8-10 km olan okyanusal kabukların altındaki litosfer kalınlığı ise 60 km'yi bulmaktadır. Kıtasal ve okyanusal kabuklar ve bunların altında bulunan litosferden oluşan yer-

**Yeryuvarının katı bölümünü oluşturan litosfer (taşküre), yeryuvarının diğer bölümlerine oranla ince bir zar kalınlığındadır.**

Kıtasal kabuk Okyanusal kabuk



**Magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaların yer kabuğundaki döngüsü.**

## Yerkabuğunun Yapısı

Yeryuvarı yarıçapının 6371 km olduğu göz önüne alınırsa, iri bir elmanın kalınlığı ile büyüklüğü arasında kurulacak oransal ilişki, yerkabuğunun kalınlığı ile yeryuvarının büyüklüğü



yuvarının katı kısmı, özetle yerkabuğu, tek parça halinde değildir ve plaka ya da levha olarak adlandırılan, yedi sekizi büyük, geri kalanı küçük olmak üzere yirmiye yakın parçadan oluşmaktadır. Sadece okyanusal veya sadece kıtasal kabuk içerebildiği gibi, her ikisini de içerebilen bu plakaların, litosfer altında plastik ve akıcı olduğu düşünülen astenosfer (üst manto) üzerinde yüzdüğü düşünülmektedir. Durumları, su üzerinde aralarında boşluk olmadan yüzer durumdaki tahta parçalarına benzetilebilecek bu plakaların, litosferin altındaki akıcı ve plastik malzemenin, zayıf bulunduğu plaka sınırlarından (genellikle iki okyanus plakası sınırı) yeryüzüne çıkması sırasında, her iki plakayı iterek bunlar arasındaki boşluğu doldurması sonucu değişik şekillerde hareketleri söz konusudur.

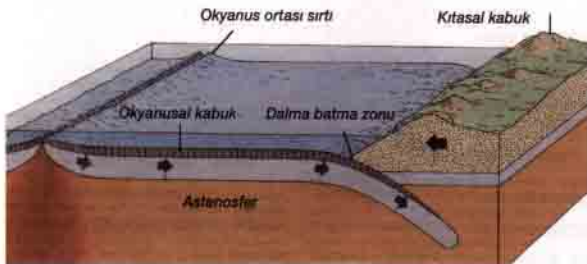
Plaka hareketleri olarak adlandırılan bu hareketler, okyanus tabanı yayılması (birbirinden uzaklaşma), birbirine yaklaşması (okyanusal ve kıtasal plakaların çarpışması, iki okyanusal plakanın çarpışması ve dağ oluşumlarına neden olan iki kıtasal plakanın çarpışması) ve sınırları boyunca birbirlerine oranla kaymaları şeklinde özetlenebilir. Büyük ölçekli yer kabuğu hareketlerinin açıklanmasında, tanımlanmasında kullanılan ve plaka tektoniği teorisi olarak bilinen bu yaklaşımın, ortaya çıktığı 1960'lı yıllar ve sonrasında birçok soruya sağlıklı açıklamalar getirdiği söylenebilir.

## Sıcaklık... Basınç... Metamorfizma.

Metamorfik kayaların oluşumunu sağlayan metamorfizma; kayaları oluşturan minerallerin, farklı sıcaklık ve basınç koşullarında, toplam kimyasal bileşimleri aynı kalmak koşuluyla, optik özellikleri, kristalleştikleri kristal sistemleri gibi fiziksel özelliklerinin

değişmesidir. Başka bir deyişle, mineraller belirli sıcaklık ve basınç aralıklarında oluşup korunurlar; bu aralıklar dışında kalan basınç ve sıcaklık değişimleri söz konusu olduğunda ise, aynı toplam kimyasal bileşimde olan farklı bir minerale dönüşürler ki, metamorfizma böyle de tanımlanabilir. Örnek vermek gerekirse,  $Al_2SiO_5$ , kimyasal bileşimi farklı sıcaklık ve basınç aralıklarında farklı fiziksel (optik, mineralojik vb.) özelliklere sahip andaluzit (kristal sistemi: ortorombik, özgül ağırlık:  $3.14 \text{ gr/cm}^3$ ), disten (kristal sistemi: triklinik, özgül ağırlık:  $3.59 \text{ gr/cm}^3$ ), sillimanit (kristal sistemi: ortorombik, özgül ağırlık:  $3.29 \text{ gr/cm}^3$ ) minerallerinin oluşumunu sağladığı gibi, bunların dışında yüksek sıcaklıklarda eriyik halde de bulunabilir.

Metamorfizmanın gerçekleşmesi için gerekli olan sıcaklığın yaklaşık  $250^\circ\text{C}$  ile  $800^\circ\text{C}$  arasında olması gerekir,  $250^\circ\text{C}$ ' den daha düşük sıcaklık derecelerinde yalnızca tortul kayaların oluşumunu sağlayan diyajenezden,  $800^\circ\text{C}$ 'den daha yüksek sıcaklıklarda ise, kayaların kimyasal bileşimleri değişip katı halleri bozulacağından, ancak eriyik halinde bir malzemeden söz edilebilir. Metamorfizma gelişiminin bağlı olduğu söz konusu sıcaklık aralığındaki değerlerin yerkabuğu içinde oluşumunu sağlayan etkenlerden biri, jeotermik gradyan adıyla bilinen; yerkabuğunda yaklaşık 28 m'den derinlere doğru inildikçe kilometre başına  $5^\circ\text{C}$  ile  $60^\circ\text{C}$  arasında değişen değerlerdeki sıcaklık artışıdır. Yerkabuğunun farklı bölgelerinde farklı değerlerde gözlenen jeotermik gradyandaki bu farklılığın nedenleri, yer içinde, yani katı yerkabuğunun üzerinde bulunduğu sıcaklığı çok yüksek olan manto; özellikle kıtasal kabuk içinde gerçekleşen radyoaktif parçalanmalar; yüksek sıcaklıklara sahip olan magmanın yerkabuğunun zayıf zonlarından yükselimi sırasında çevresindeki kayalara aktardığı sıcaklık olarak sıralanabilir.



**Okyanus ortası sirtlar boyunca birbirinden ayrılan okyanusal plakalar, kıtasal plakalarla olan sınırları boyunca, daha yoğun olmaları nedeniyle kıtasal plakalar altına dalarlar.**



**Sıcaklık ve basıncın farklı değerleri metamorfik kayaların farklı dokularına ve şekillere sahip olmalarını sağlıyor.**

Bu arada, ısı iletkenlikleri düşük olan kayaların bu derece yüksek sıcaklıklara ulaşabilmeleri için milyonlarca yıllık oldukça uzun zaman dilimlerine gereksinim olduğunu; bunun yanında okyanusal ve kıtasal kabuklar için farklı bileşimlere sahip olmaları nedeniyle, farklı jeotermik gradyanların söz konusu olduğunu belirtmek gerekir. Örnek olarak 60 km derinlikte kıtasal kabuk içindeki sıcaklık  $800^\circ\text{C}$  iken, okyanusal kabuk içinde  $950^\circ\text{C}$ ' dir.

Yerkabuğunun herhangi bir derinliğindeki bir noktaya uygulanan basınç, o noktanın üzerinde bulunan kaya blokunun ağırlığından kaynaklanır. Bu anlamda 10 km kalınlığındaki bazalt (Fe ve Mg zengin) bir kaya blokunun uyguladığı düşey yönlü basınç yaklaşık 3,2 kilobar' dir. Ancak yer kabuğunun derinliklerinde herhangi bir noktaya uygulanan basıncın aynı şiddette bütün yönlerden (litostatik basınç P) etkimesi, bu yüksek basıncın etkisi altında kalan kayaların kırılıp parçalanmasını önler. Herhangi bir doğrultudaki basıncın diğerlerine göre biraz daha fazla olduğu durumlarda ise (yönlü basınç), metamorfizmaya uğrayan kayaların dokusal özelliklerinde değişiklikler gözlenmesine (minerallerin uzun eksenleri boyunca yönelmeleri vb.) ve birtakım deformasyon yapılarının gelişmesine neden olur.

Kayanın gözeneklerinde bulunan gaz ve sıvılardan kaynaklanan sıvı ba-





**Kayaların mineral bileşimleri, bu kayalardan alınan örneklerin inceltilerek mikroskop altında incelenmesiyle belirlenir.**

sıncı (Ps) ise (iç basınç), litostatik (Pl) basınca ters yönlü olarak gelişir. Bu durumda bir gerçek basınçtan söz etmek ancak, litostatik basınç (Pl) ve sıvı basıncı (Ps) arasındaki farkı nitelikle için gereklidir. [Gerçek basınç = litostatik basınç (Pl) - sıvı basıncı (Ps)] Bu arada, kayanın gözeneklerinde bulunan bu sıvı ve gazın yüksek basınç altında minerallerin birbirlerine dönüşmesinde (genel anlamda metamorfizmanın gerçekleşmesinde) oldukça önemli bir rol üstlendiğini söylemek gerekir.

Genel olarak bu şekilde özetlenebilecek metamorfik kayaların oluşumunu sağlayan sıcaklık ve basıncın, metamorfizma süreci içindeki beraberlikleri; düşük basınç yüksek sıcaklık,

yüksek basınç düşük sıcaklık, yüksek basınç yüksek sıcaklık, düşük basınç düşük sıcaklık gibi farklı düzenlerde gözlenebilir. Bu farklı basınç ve sıcaklık düzenlerinde, daha önce de belirtildiği gibi, aynı kayaların toplam kimyasal bileşimlerinde bir değişiklik olmazken, kayacı oluşturan minerallerin türlerinde farklılıklar gözlenmesine neden olur. Bu sayede belirli basınç ve sıcaklık aralığında duraylı olan (oluşup korunabilen) mineral ve mineral grupları, başkalaşım geçiren kayanın hakim mineral bileşimini oluştururlar. Metamorfizma sürecinin bu özelliği kullanılarak, metamorfizma geçirmiş bir kayanın mineral bileşimi laboratuvar çalışmalarıyla belirlendikten sonra, bu minerallerin duraylı oldukları basınç ve sıcaklık aralıkları rahatlıkla belirlenebilir. Bu durum da, kayanın oluşum koşulları hakkında doğrudan bilgi edinilmesini sağlar.

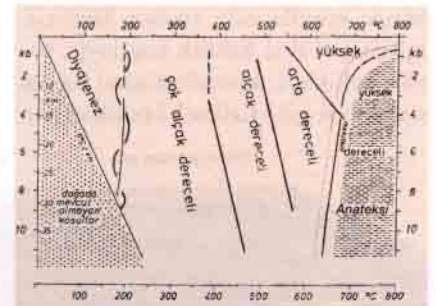
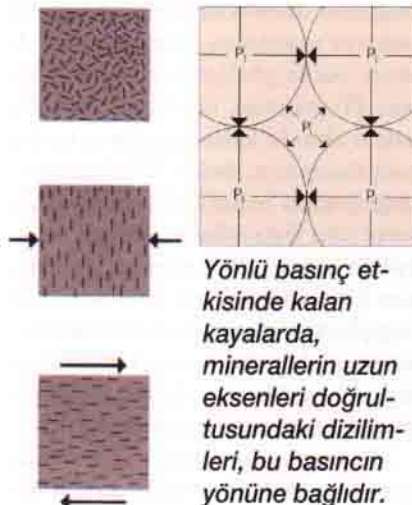
## Metamorfizma Türleri

Basınç, sıcaklık koşullarına ve oluşum şekillerine göre, metamorfizma türleri, yersel metamorfizma ve bölgesel metamorfizma olmak üzere iki büyük gruba ayrılabilir. Bölgesel metamorfizmaya oranla daha küçük alanları etkisi altına alan ve yersel metamorfizmanın bir türünü oluşturan kontakt

metamorfizma, magma kütlelerinin yer kabuğunun içinde yükselmesi ve intrüzyonu sırasında (yerleşme/sokulum) sahip olduğu yüksek sıcaklığın yan kayalara olan etkisi sonucu oluşur. Kayalarda özellikle çok yüksek sıcaklıkların etkisiyle gözlenen pirometamorfizma ve yerkabuğundaki faylar boyunca genellikle kırılma ezilme ve ufalanma sonucu meydana gelen dinamik metamorfizma ise, yersel metamorfizmanın diğer türlerini oluştururlar.

Yersel metamorfizmaya göre daha geniş alanlarda etkileri gözlenen bölgesel metamorfizmanın dinamotermal metamorfizma adıyla bilinen türü, kıta plakalarının çarpışması sonucu gözlenen orojenez (dağ oluşumları) sırasında, binlerce kilometre karelik alanlarda basınç ve sıcaklığın etkisiyle gelişir. Diğer bir bölgesel metamorfizma türü ise gömülme metamorfizmasıdır. Bu tür metamorfizmada, sedimanter (kıvrımlı tortul) malzemenin uygun bir depolanma ortamında birikmesi sırasında, yerkabuğundaki fayların (kırıklı zonların) düşey doğrultudaki hareketi sonucu depolanma alanı derinleşir. Bunun sonucunda, daha büyük miktarlarda tortulun birikmesi ile oluşan çok kalın tortul yapıların altında, basınç ve jeotermik gradyandan kaynaklanan sıcaklığın etkisiyle metamorfizma gelişir.

Yersel ve bölgesel metamorfizmanın yanı sıra, redregresif metamorfizma (gerileyen metamorfizma) olarak adlandırılacak bir oluşum ise yüksek basınç ve/veya sıcaklık koşullarında metamorfizmaya uğramış kayaların, daha düşük basınç ve/veya sıcaklık koşullarında tekrar metamorfizmaya uğraması sonucu gelişir.



**Metamorfizmanın şiddeti, farklı basınç ve sıcaklık derecelerinde farklı derecelerde gerçekleşir.**



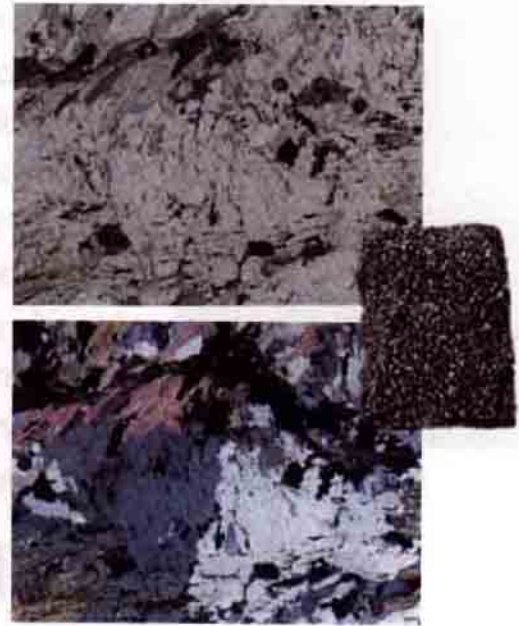
## Metamorfizma Zonları ve Fasiyesleri

Metamorfizmadan etkilenmiş kayalardan oluşan alanlar içinde, birbirinden farklı basınç ve/veya sıcaklık derecelerinde metamorfizma geçirmiş "metamorfik zon" olarak adlanan bölümler bulunur. Metamorfik zonlar, aynı basınç ve sıcaklık koşullarında metamorfizmaya uğramış bölgelerdir ve altı farklı türdedir. Metamorfik alanlar ise bu zonlardan oluşurlar. Oluşumları, sıcaklık ve basıncın belirli değerlerine karşılık gelen minerallerin adlarıyla anılan bu zonlar, birinci zondan altıncı zona doğru artan basınç ve sıcaklık koşullarının, bir başka deyişle, artan metamorfizma şiddetinin göstergesidirler.

Bu zonlar sırasıyla, Klorit zonu; Biotit zonu; Granat zonu; Disten zonu; Stavrolit zonu; Sillimanit zonu şeklindedir.

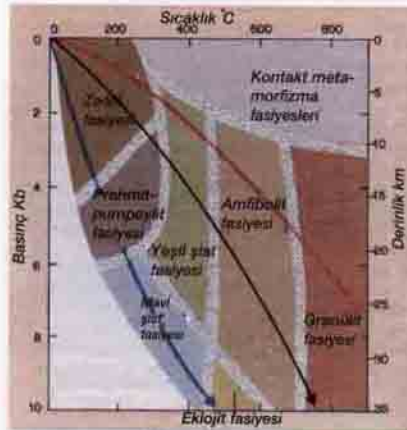
Klorit, Biotit ve Granat zonu, ilk kez 1893'de İskoçyalı yerbilimci George Barrow tarafından ayırılmıştır. Daha sonraki dönemlerde yapılan çalışmalarla da Stavrolit, Disten ve Sillimanit zonları eklenerek, bugün, metamorfik kayaların geçirdikleri metamorfizmanın derecesini (şiddetini) gösteren bir kriter olarak Barrow zonları adıyla kullanılmaya başlanmış ve bu tür kayaların sınıflamalarında önemli rol oynamışlardır. Genel anlamda Klorit zonu düşük metamorfizma derecesini gösterirken, Biotit, Granat, Stavrolit ve Disten orta derecede metamorfizmanın etkili olduğunu göstermektedir. Sillimanit zonu ise yüksek derecedeki metamorfizmanın göstergesidir. Ayrıca metamorfizmanın gerçekleşebileceği yaklaşık bütün basınçlarda, sıcaklık değerinin aşırı yükselmesi (650-800 °C) metamorfizmaya uğrayan kayaların, bazı bölümlerinin ergimesiyle sonuçlanır (kısmi ergime) ve bu tür kayalar da migmatit olarak adlandırılır.

Metamorfik kayaların sınıflandırılmalarını ve adlandırılmalarını etkileyen önemli bir faktör de, bu tür kayaların bileşimsel, yapısal ve dokusal olarak farklı özelliklere yani fasiyeslere göre farklı basınç ve sıcaklık aralıkları göstermeleridir. Bu fasiyeslerin



**Mikroskop altındaki incelemelerde minerallerin ayırıldığını onların farklı özelliklere sahip olmaları sağlıyor.**

belirlenmesinde izlenen yol ise, farklı alanlara ve farklı bileşimlere sahip metamorfik kayaların metamorfizma derecelerinin karşılaştırılmasıdır. Oluşum şekillerine göre, dört gruba ayrılabilen metamorfik fasiyesler, kendilerine özgü mineral adlarıyla anılırlar. Bu fasiyes gruplarından biri olan kontakt (değme, dokunma) metamorfizma fasiyesleri; magmanın yeryüzüne doğru hareketi sırasında, yüksek sıcaklığı nedeni ile yankayalarda oluşan metamorfik fasiyes grubudur. Bu grup içindeki fasiyesleri, oluşum sıcaklıklarına göre, düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklıklara doğru; albit-epidor-hornfels fasiyesi, hornblend-hornfels fasiyesi, Piroksen-hornfels fasiyesi, sanidinit fasiyesi şeklinde sıralayabiliriz.



**Metamorfik kayaların adlandırılmasında ve sınıflanmasında kullanılan metamorfizma fasiyeslerini, sıcaklık ve basıncın farklı değerleri belirler.**

Gömülme metamorfizması fasiyesleri grubundan biri olan zeolit fasiyesi, düşük basınç ve sıcaklık etkisiyle gelişirken, diğer bir fasiyesi oluşturan premit-pumpeylit fasiyesi ise daha yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle gelişir.

Yerkabuğunda çok geniş alanlarda gözlenen ve bir diğer grubu oluşturan yaygın bölgesel metamorfizma fasiyesleri de; yeşil şist fasiyesi, amfibolit fasiyesi ve granülit fasiyesi şeklinde sıralanabilir. Orta derecede basınç ve orta-yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle gelişen bu fasiyesler, yerkabuğunun 5-45 km derinlikleri arasında oluşurlar.

Bu fasiyes gruplarından sonuncusu ise, yüksek basınç ve düşük sıcaklıklarda gelişen mavi şist fasiyesi ile yüksek basınçlarda ve yüksek sıcaklıklarda gözlenen eklojit fasiyesini içeren, yüksek basınç metamorfizması fasiyesleridir.

Basıncın ve sıcaklığın yerkabuğunu oluşturan kayalar üzerindeki etkilerinden yalnızca biri olan metamorfizma ve metamorfizma süreci yerkabuğunu oluşturan ve farklı şekillerde birbirine dönmüş ana kaya gruplarından metamorfik kayaların oluşumunu sağlamaktadır.

Murat Dirican

### Kaynaklar

- Erikan, Y., Metamorfik Petrografi H.C. Müh. Fak. 1994.
- Ketin, I., Genel Jeoloji, İ.T.Ü. Maden Fak. 1982.
- Koç, Ş., Maden Yatakları Giriş, A.Ü.F.F. Jeo. Müh. Böl. 1989.
- Tekeli, O., Metamorfik Petrografi, (Basılmamış Ders Notu), A.Ü.F.F. Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Çnlü, T., Jeokimya, (Basılmamış Ders Notu), A.Ü.F.F. Jeoloji Mühendisliği Bölümü.