

YERYUVARININ MANTOSU (*)

PETER J. WYLLIE

Yeryuvarının mantosu yeryuvarının metalik ve bir bölümü ergimmiş çekirdeğini yeryuvarının ince kabuğunun soğuk kayalarından ayıran, kor kayalardan yapılmış kalın bir katmandır. Yeryüzeyinin ortalama 35-45 km altında başlayan ve 2.900 km lik derinliğe uzanan manto yeryuvarı yarıçapının yaklaşık yarısını, hacminin yüzde 83'ünü ve kütlelerinin yüzde 67'sini oluşturur. Mantonun kabuk üzerindeki etkisi büyüktür; gerçekten de kabuk ve onun ince okyanus ve havayüvar zarları mantonun damıtıklarıdır. Yeryuvarının yüzeyinde kıtaları ağır ağır devindiren sürücü güçler de manto içinde oluşmaktadır. Bu nedenle, manto hakkındaki bilgiler yeryuvarının yapısının ve devimsel (dinamik) davranışının anlaşılmasında çok önemlidir. Mantonun ulaşılmazlığına karşın, manto ile ilgili çok sayıda veri, çok ya da az dolaylı yollarla, toplanmıştır.

Yüzeydeki koşulları etkilemede mantonun payı çok yüksektir. Örneğin, yeryuvarının güneş nebulasında oluşmasından bu yana 4.6 milyar yılda, mantonun kolay ergir bileşimlerinin ergimesi lavları oluşturmuş; bu lavlar yüzeye yükselerek katılıp kabuğa yeni kayalar eklemiş ve aynı zamanda havayüvara ve okyanuslara karışan su buharı ve başka gazlar sağlamışlardır. Mantodan gelen gaz halindeki karbon karışımları organik moleküller için ham madde sağladıklarından, yeryuvarı üzerindeki yaşam öyküsünü başlatmışlardır.

Ayrıca, mantonun sürücü güç olarak çeşitli etkileri vardır. Yeryuvarının yüzeyi, kabuk altında çok yavaş olarak devinen mantonun etkisi ile biçimlenmektedir. Dağlar bu devinimler nedeniyle yükselir ve yükselmelerini sürdürürler. Bu yükselmeler olmadığında, 100 milyon yılda ya da o dolayda bir sürede erozyonla deniz düzeyine dek aşınacaklar.

Manto devinimleri volkanik püskürmelere, depremlere ve kıtasal sürüklenmeye de neden olurlar.

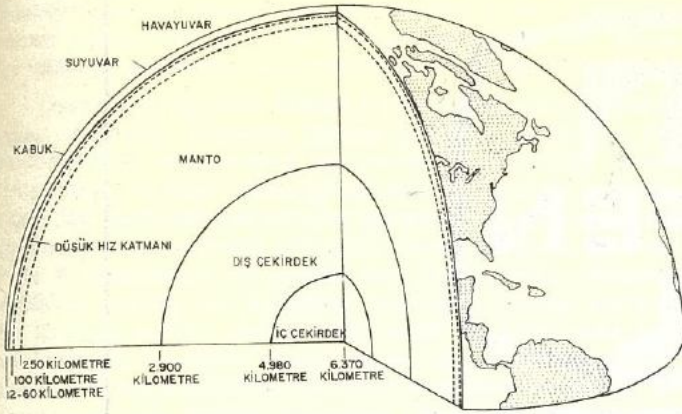
Yeryuvarının enine bir kesiti eşmerkezli çekirdek - manto - kabuk katmanlarını gösterir (Şekil 1). Bu katmanlar bileşim ya da fiziksel durum, ya da her ikisi bakımından birbirinden değişiktir. Manto, peridotit kayasının kine karşılık gelen ortalama bileşimli magnezyum ve demirce zengin silikat minerallerinden oluşmaktadır (Peridotit adı, peridot denilen saydam, yeşil renkte bir mücevher taşı olarak bilinen olivin, peridotitde en bol bulunan mineral olmasından gelir). Manto katıdır; ancak, yüzeyden aşağıda 100 ile 250 km ler arasındaki ince zonda kayalar, mineral taneleri arasına dağılmış sıvı zarlar oluşturacak biçimde tikel olarak ergiyebilir. Bu zon aşağıda açıklanacak nedenlerden dolayı, düşük hız katmanı olarak adlandırılmıştır.

Mantonun yoğunluğu derinliğe bağlı olarak, yüzeye yakın yerlerde yaklaşık 3.5 gr/cm³ den çekirdeğe yakın yerlerde 5.5 gr/cm³ e dek artar. Artış sürekli değildir; yoğunluk eğrisi belirgin basamaklar taşır (Şekil 3). Bunlar 400 ve 650 km ye yakın derinliklerdeki manto kayalarında oluşan önemli değişimleri gösterirler. Yoğunluk dağılımı, mantonun yeryuvarı kütlelerinin yüzde 67 sini oluşturduğunun hesaplanmasında çıkış noktaları sağlar.

Levha tektoniği

Eşmerkezli, katmanlı yeryuvarının bu duruk (statik) görünümü taşıyıcı levhalarının devinimini konu alan levha tektoniği kuramıyla değiştirilmektedir. Taşıyıcı üst mantonun bir bölümünü ve kabuğu kapsar ve daha soğuk ve bu nedenle de berk olmasıyla altındaki enezyuvardan (astenosferden) ayırtlanmaktadır. Levha tektoniği kuramı enezyuvar

(*) P. J. WYLLIE'nin Scientific American, 1975, 232/3, 50-63'deki "The Earth's Mantle" adlı yazısından M. Yılmaz KATI tarafından çevrilmiştir.



Şekil 1: Yeryuvarının dış biçimi içte süren etkin işlemlere bağlanmaksızın yalnızca katmanlar aracılığıyla betimlenmektedir. İnce kabuğun kayaları soğuk ve berktir. Sıcak manto kayası yavaş devinime elverişlidir. Deprem dalgalarındaki veriler dış çekirdeğin erimiş metalden oluştuğunu gösterir. Suyuvarı yüzey ve havayuvarı sularının birikmesinden oluşur.

üstünde yanal olarak yer değiştiren, yaklaşık 100 km kalınlığındaki taşıyıcı levhaları ile, akışkan mantonun devinsel görünümünü canlandırır. Yeryuvarı yüzeyi birkaç tane büyük ve çok sayıda küçük taşıyıcı levhasıyla örtülüdür. Bu kabuk benzeri levhalar birbirlerine göre yer değiştirirler. Depremler ve volkanlar şeklindeki jeolojik etkinlikler levha sınırları boyunca toplanmıştır.

Levha sınırları iraksayan ve yakınsayan türleri kapsar. Okyanus sırtı doruğu altında, enezyuvardaki malzeme yükselir, yükselirken bir yandan da ergir. Böylece oluşan lav yeni bir kabuk oluşturmak üzere sırtın orta rift çukuru boyunca püskürür. Mantonun konveksiyon devinimleri, yeni taşıyıcı levhaların birbirinden ayrılmasına neden olur.

Yakınsayan sınırlarda levhalar dağları oluşturacak biçimde kabuğu yukarıya iterek çarpışabilir ya da bir levha diğerinin altına taşıyıcı malzemesini manto içine geri taşıyarak girebilir. Bu nedenle, yeni taşıyıcının büyümesi başka yerlerdeki taşıyıcının yokoluşuyla dengelenmektedir. Böylece sınırlar okyanus hendekleriyle ve volkanik ada yayları ve etkin dağ dizilerindeki volkanları da kapsayan volkanlar dizisiyle birlikte bulunmaktadırlar.

Yeryuvarının bir bütün olarak birçok ortalama fiziksel özelliği saptanmıştır. Gezegenin boyutu, biçimi ve kütlesi duyarlı olarak ölçülmüştür. Bilinen hacmi ve kütlesi, ulaşılabilen kabuğu oluşturan kayaların yoğunluğundan çok daha yüksek, 5.5 gr/cm³ lük ortalama yoğunluk verir. Bu nedenle, yeryuvarı için büyük bölümü 5.5 gr/cm³ den daha yüksek yoğunlukta malzemenin oluşmuş olmalıdır. Yerçekimi alanı ile ilgili araştırmalar ve yeryuvarının bir eksen çevresinde dönmesine bağlı fiziksel özellikler, kütlelerin merkeze doğru yoğunlaşmakta olduğunu göstermektedir.

Manto hakkındaki veriler

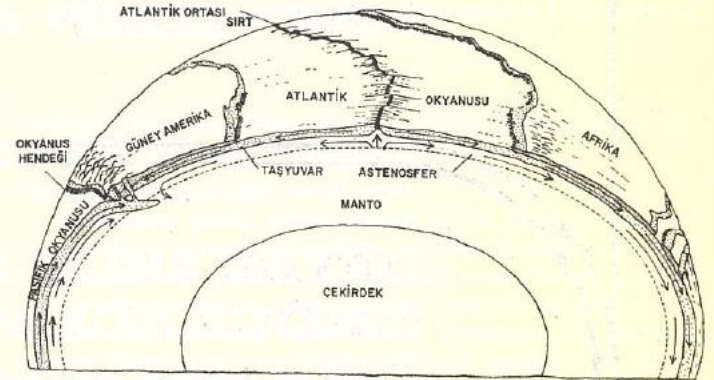
Yeryuvarının fiziği ile ilgili bilgilerin büyük bölümü deprem dalgaları ile ilgili çalışmalardan elde edilir. Bunlar yeryuvarı için X ışını görüntülerinin eşdeğeri sayılabilir. Yeryuvarı büyük depremlerle sallandığında, zil gibi çalabilir. Zilin titreşimleri yeryuvarının biçimine ve fiziksel niteliklerine bağlıdır; buna benzer olarak, yeryuvarının duyarlı gereç-

lerle saptanan titreşimleri yeryuvarının kimi nitelikleri ile açıklanabilmektedir.

Bir deprem odağındaki enerjinin serbestleşmesi çeşitli dalga türleri oluşturur. Birincil (P) dalgalar ve daha yavaş yol alan ikincil (S) dalgalar yeryuvarının içinden geçerler. Kısaltmalar enerjinin değişik olaylarla ışın yolu boyunca taşınmakta olduğunu anımsatacak biçimde de kullanılır: P dalgaları sıkıştırma ya da itme-çekme dalgalarıdır; S dalgaları ise makaslama ya da "sarsma" dalgalarıdır (Şekil 4). P dalgaları katı ve sıvıların her ikisi içinde de taşınabilmektedir; S dalgaları yalnızca, makaslama gerilimleri oluşmasına olanak sağlayan, yani biçimi bozulabilen, ya da bükülebilen malzemelerde taşınabilmektedir. Bir S dalgası sıvı içinde taşınmaz, çünkü kolayca akabilen sıvılarda makaslama gerçekleşemez.

Eğer yeryuvarı bütünüyle tekdüze nitelikli malzemenin oluşmuş olsaydı, bir deprem odağındaki dalgalar düz çizgisel yollar izleyecek ve herbir dalga türü, değişmez bir hızla yol alacak, P ve S dalgalarının odaktan belli uzaklıktaki özel kayıt istasyonuna ulaşma zamanları herbir dalga türünün hızını verecekti. Oysa yeryuvarı içinde, yüzey kayalarından kestirilebilen belirli hızlarından daha hızlı yol aldıkları anlaşılmaktadır. Sonuçlar bundan başka, dalgaların daha büyük uzaklıklara gittiklerinde daha hızlı yol aldıklarını da göstermektedir. Bu bulgular, derinlerde deprem dalgalarının hızının yüzeye yakın olanlardan daha yüksek olduğunu ve hızın derinliklerle giderek arttığını ortaya koyar.

Bu ve diğer gözlemlerden, deprem dalgalarının yeryuvarı içinde kırıldığı ve yansıdığı bilinmektedir. Kırınma, dalgaların yukarıya doğru iç bükey olan yollar izlemelerine neden olur. Işımlar katmanlar arasındaki fiziksel niteliklerde belirgin bir değişimin olduğu düzeylerde yansımaktadır. Bu nedenle yansıma kabuk ve manto, manto ve çekirdek, iç ve dış çekirdek arasındaki sınırlarda oluşur. Bu dalga örneği



Şekil 2: Devinsel yeryuvarı levha tektoniği kuramında düşünülmekte olduğu gibi, enine kesitte betimlenmektedir. Üst mantonun bir bölümünü ve kabuğu kapsayan taşıyıcı levhaları sıcak ve belki de mantonun tikel erimiş katmanı olan enezyuvar üstünde yanal olarak taşınırlar. Enezyuvardaki malzeme okyanus sırtı zirvesi altından yükselerek, okyanus tabanında yeni kabuk oluşturmak için püskürmekte olan lavı oluşturmak için erir. Taşıyıcı levhalarına yükselen malzemenin oluşmakta olan yeni taşıyıcı eklenerek iraksar. Yeni taşıyıcının gelişmesi, taşıyıcı katmanının manto içine girdiği yerdeki yakınsayan levha sınırlarında taşıyıcısına eşdeğer toplamı yitirmesiyle dengelenmektedir. Bu sınırlar okyanus hendekleri ve volkanik çizgilerle birlikte düşünülmektedirler.

yeryuvarının eşmerkezli yapısını ortaya koyar. S dalgaları çekirdek-manto sınırına dek derine inen yollar izleyebilir, ancak bu dalgalar çekirdek içinden geçemezler. Bu bulgu, en azından çekirdeğin dış bölümünün sıvı olduğunu kanıtlar.

Dalgaların mantoda değişik yollarda yol alma zamanlarının ölçülmesi, dalgaların içinden geçtikleri mantonun her derinliğindeki malzemedeki hızı kestirme yöntemini verir. Dalga hızı derinlikle artış göstermektedir, ancak yaklaşık 1.000 km derinliğe dek artışlar sıçramalar biçimindedir. Bu gözlemler, üst mantonun katmanlı yapıda olduğunu gösterir. P ve S dalgalarının her ikisinin hızı, üst mantoda, yüzeyden yaklaşık 100-250 km aşağıdaki katmanda azalma gösterir. Bu katman, yazarın sözünü ettiği düşük hız katmanıdır, levha tektoniği örneğinin enezyuvarına karşılıktır. Katmanın dalga hızı değişimlerinden ve diğer jeofiziksel verilerden çıkarılmış olan fiziksel nitelikleri, katman içinde kayanın ergimmiş bölümü olarak düşünülen taneler arası sıvının varlığı ile genellikle bağdaşık olarak düşünülür.

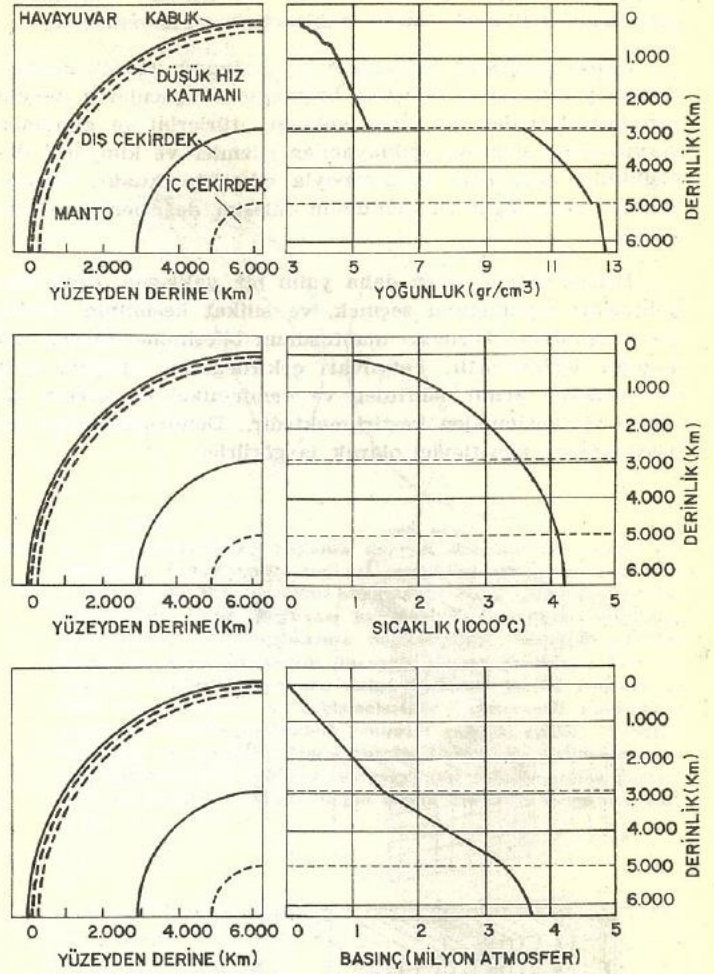
Levha sınırları

Depremler yalnızca, eşmerkezli katmanlı yeryuvarının bu duruk görünümünü değil, levha tektoniğinin devimsel görünümünün kimi yanlarını da ortaya koyarlar. Depremler yalnızca soğuk ve kırılabilir denli berk kayalarda oluşabildiğinden, deprem odaklarının dağılımı duraylı levhaların sınırlarını belirler. Okyanus sirtlarından geçen levha sınırları boyunca odakların derinlikleri 100 km den daha azdır, bu derinlik taşıyıcı altındaki mantonun sıcak olduğunu gösterir.

Bir levhanın bir diğerinin altına battığı ve mantoya geri döndüğü yerdeki yakınsayan sınırlarda, deprem odakları 700 km ye dek bulunabilmektedir. Bu derin odakların dağılımı batan taşıyıcı katmanlarını haritalamaya olanak sağlar. Bu bölgelerdeki ayrıntılı dalga hızı çalışmaları manto içinde büyük derinliklere uzanan soğuk kalın taşıyıcı parçalarının varlığı ile bağdaşır.

Deprem dalgalarından sağlanan, yeryuvarının yapısı ve fiziksel nitelikleri hakkındaki bilgiler oldukça dolaysız yollarla elde edilmiştir. Buna karşın, yeryuvarının derindeki iç bölümünün kimyasal nitelikleri hakkında bilgi sağlama çabaları çoğunlukla dolaylı verilere başvurmayı gerektirir. Eldeki kimyasal örnekler yalnızca, mantonun en üst katmanlarından yukarıya taşınmış olan, kabukta yer alan birkaç kayaya aittir. Yeryuvarının tümünü ve çekirdek ile mantonun bileşimini kestirme yöntemi şimdilik, yıldızların, güneşin ve göktaşlarının oluşturduğu, yeryuvarı dışındaki kütlelerin kimyasal bileşimine dayandırılmak zorundadır. Böylesi kütlelerin zorunlu olarak yeryuvarına benzer bileşimli olmaları olasıdır. Bu yaklaşım güneş dizgesinin ve yeryuvarının kökeni için fiziksel ve kimyasal örneklerin kurulmasını kapsar.

Güneş dizgesinin genellikle, daha önceden yıldızlar arası uzayda dağılmış maddenin yerçekimine yenik düşmesiyle yaklaşık 4.6 milyar yıl önce oluştuğu düşünülür. İlk güneş toz taneleri ve gazların oluşturduğu ince, disk biçimli bir nebula çevrelenmişti. Dönen nebula içindeki yersel taneler kümeleri ve gaz yoğunlaşması gezegen kütlelerini oluşturmak üzere bir araya gelerek küçük nesnelere oluşturmuştur. Göktaşlarının malzemesi de bu devrede oluşmuştur. Güneş, güneş dizgesi kütesinin yüzde 99.6 sından daha büyük bölümünü kapladığından, bileşimi gerçekte tüm dizgenininki ile aynıdır. Herbir element kendine özgü elektromanyetik ışınlarıyla



Şekil 3: Yeryuvarının fiziksel nitelikleri yüzeyden derine doğru değişir. Yoğunluk, sıcaklık ve basınç çizgileri üstündeki derinlikler soldaki enine kesit çizgileri üstündeki derinliklere karşılık gelir. Bir atmosfer deniz düzeyindeki 14.7 libre/inç² lik hava basıncıdır.

saptanabildiğinden, güneş ve diğer yıldızlardaki element bollukları spektroskopik yöntemlerle ölçülmüştür.

Göktaşlarının getirdiği açıklamalar

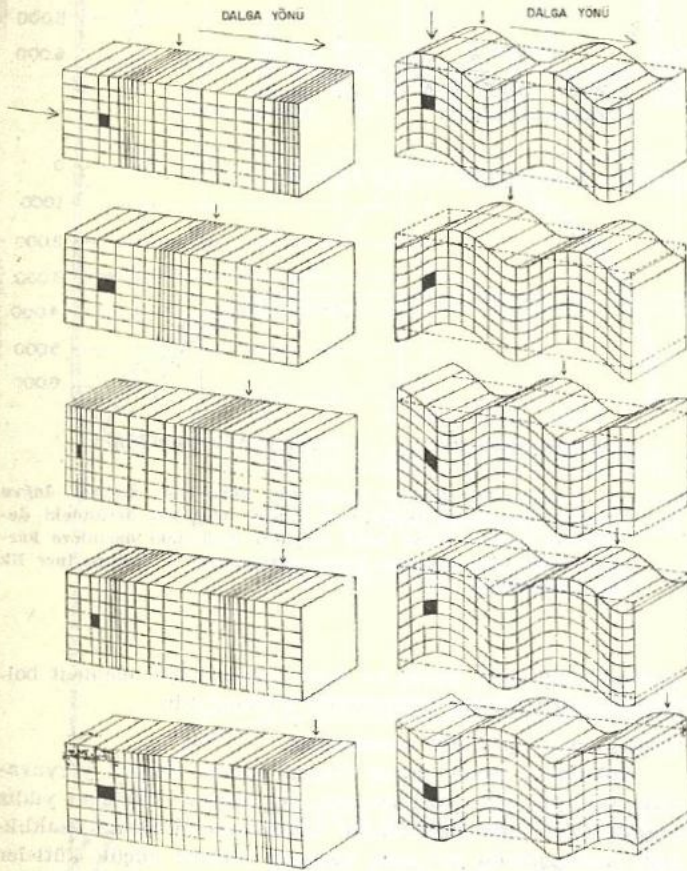
Göktaşları şimdi, güneş dizgesi içinde, arasıra yeryuvarıyla birleşen elips yörüngelerde yol alırlar. Bunların yıldız kuşağından —güneşten 2.2 ile 3.2 astronomi birimi uzaklıktaki yörüngelerde yol alan gezegen benzeri küçük kütleler kümesi— geldiklerinin kanıtı vardır. Göktaşları kimyasal ve mineral bileşimi ve yapı bakımından çok değişiktirler, ancak bu tartışmanın amacı için, iki ana topluluk arasındaki ayrılıkları belirtmek yeterlidir: demir-göktaşları ve taş-göktaşları. Demir göktaşları başlıca, yüzde 4-20 arasında nikel içeren demir-nikel alaşımından oluşurlar; bunlar az olarak demir sülfid de içerirler.

Taş göktaşları çoğunlukla, değişik nitelikli metal alaşımı ve demir sülfitle birlikte silikat minerallerinden oluşmuş bulunmaktadırlar. Magnezyum, silisyum, alüminyum, kalsiyum ve demir gibi uçucu olmayan elementlerin göreceli bolluğu, güneş ve diğer yıldızlarda olduğu gibi birçok taş göktaşı türlerinde hemen hemen aynıdır. Bu nedenle, bu bollukların

yeryuvarı ve diğer gezegenlerdeki tüm element bolluklarını kestirmede kullanış ilkeler sağladığı savunulmaktadır.

Güneş dizgesinin kökeninin ve evriminin bileşik maddelerinde yeryuvarının bileşimi, başlangıçta uçucularca zengin taş-göktaşlarından, ve diğer göktaşı türlerini ve günümüz yeryuvarının yapısını açıklayabilen işlemler ve kimyasal değişiklikler dizgesinin kurulmasıyla çıkartılmaktadır. Hesaplamalar çekirdeğin ve mantonun bileşim değerlerini ortaya koyar.

Benzer sonuç veren daha yalın bir yaklaşım, özgül taş-göktaşları topluluğunu seçmek, ve silikat kesiminin ortalama bileşiminin yeryuvarı mantosunun bileşimine eşdeğer olduğunu düşünmektir. Yeryuvarı çekirdeğinin bileşimi aynı göktaşındaki demir sülfitten ve demir-nikel alaşımının elverişli bir kesiminden kestirilmektedir. Demir-göktaşları bu hesaplamada denetleyici olarak iş görürler.



Sekil 4: İki tür deprem dalgası enerjinin serbestlediği yerdeki bir deprem odağından yeryuvarının içinde yayılır. Bunlar burada kaya bloğu boyunca geçerek betimlenmektedir. Soldaki, dalga yolunun yönünde aniden itme ya da çekmeye başlayan, sıkıştırma (ya da P) dalgasıdır. Devinim kayayı sıkıştırır, ve yarındaki partiküller ileriye doğru yer değiştirir. Daha ileri bir aşamada, eski durumlarına geri döner ve sonra, bu yolla salınımını sürdürür. Maddenin her bir birim hacmi (siyah) kaya içindeki sıkıştırma devinimlerinin zirvesi olarak daralır ve genişler. Sağdaki makaslama (ya da S) dalgası, dalga yoluyla acı yapan bir basınçla başlamaktadır. Kaya partikülleri düşey yönde salınımlıdır. Maddenin küçük bir parçası (siyah) makaslama biçim bozulmasına uğrar. Dalga zirvesi enerji gönderir. Çizge O.M. Phillips'in "The Heart of the Earth" (Freeman, Cooper, and Company)'den uyarlanmıştır.

Aşağıdaki noktalarda uyuşan manto bileşiminin kestirmelerinde herhangi bir yöntem izlenmektedir: (1) Manto ağırlığının yüzde 90'ından çoğu silisyum, mangnezyum ve demir oksitlerden (SiO_2 , MgO ve FeO) oluşmaktadır. Diğer oksitlerin hiçbiri yüzde 4'ü aşmaz. (2) Alüminyum (Al_2O_3), kalsiyum (CaO) ve sodyum (Na_2O) oksitler yüzde 5-8 arasındadır. (3) Mantonun yüzde 98'inden çoğu bu altı oksitten oluşur. Bunların dışındaki oksitlerin hiçbiri yüzde 0.6 yoğunluğa ulaşamaz. İz olarak bulunan diğer elementlerin yoğunlaşmaları saptanamamaktadır. Oksitler manto kayası içindeki çeşitli minerallerde bir araya gelmektedir.

Kabukdaki bu kayalardan yalnızca, manto kayalarının bileşim kestirmelerine karşılık gelen peridotitler yeryuvarı dışındaki kütlelerden oluşmuştur. Mantoya ilgili çalışmalar yapan jeologlar, bu nedenle böylesi peridotitler için, iz element yoğunlaşması kapsayan ayrıntılara başvurmuşlardır. Sorun kuşkusuz, incelenen bir peridotit türünün kabukdan çok manteda kaynaklanmış olduğuna güven duymadadır. Bu nedenle, kimberlit bacalarında (belirli bölgelerde mantedan gelip kabuğu delen, birkaç yüz metre çaplı yuvarlak girmeler) bulunan yuvarlak kaya parçalarına ve yumrulara özel ilgi gösterilir.

Kimberlitler ve lavlar

Kimberlitler yeryuvarı yüzeyine elmas getiren kayalar olarak tanınırlar. Elmas yalnızca çok yüksek basınçlarda duraylı olan bir karbon biçimidir. Bu nedenle kimberlitlerin yüzeyin altında 150-300 km ler arasındaki derinlikte (üst manteda) oluştuğuna inanılmaktadır.

Veriler kimberlit bacasının ilksel olarak, kısa volkanik püskürmedeki büyük patlama ile yüzeyi yaran katı, ergimiş kaya ve gazların akışkan dizgesi olarak kabuk boyunca hızlı olarak yükseldiğini gösterir. Peridotit yumruları ve diğer bir manto kayası olan eklojitin ikincil yumrularını kapsayan kaya parçaları bacanın duvarlarından koparılmış ve yukarıya taşınmıştır. Bu parçalar patlama bacasındaki, gazla süriklenen diğer parçalarla yinelemeli olarak çarpışarak yuvarlanmakta ve parlatılmaktadır.

Kimberlitlerdeki buna benzer yumrular topluluğu belirli volkanik lavlarda da bulunmaktadır. Genellikle bunlar kimberlitteki yumruların daha sık manto düzeylerinden türemektedirler. Manto bileşiminin birçok kestirmeleri kimberlitlerdeki ve lavlardaki yumru topluluklarının mineral ve kimyasal bileşimlerine dayandırılmıştır. Diğer jeolojik yörelerdeki peridotit kayaları bu amaç için de yararlı olmaktadır. Bunlarla birlikte, kabukdaki olaylardan çok, mantoya çok sıkı ilişkili kayalardaki verilerin temelini oluşturan sonuçlara güvenmek için, jeolojik işlemlerin etkisini ve diğer kayalarla jeolojik ilişkinin niteliğini göz önünde tutmak özellikle önemlidir.

Üçüncü bir yaklaşım, yeryuvarı dışındaki kütleler ve manto kayaları çalışmalarına ek olarak, mantonun tikel ergimesiyle türemekte olan volkanik lavları oluşturmaya elverişli kimyasal bileşime sahip varsayımsal peridotiti hesaplamak içindir. Ergime, volkanlardan yüzeye bol olarak püskürer. Bazalt magmasının yükselmesini sağlar ve geride manteda ergimiş ve magmadan dışarı taşınmış erime yeteneği yüksek elementleri eksik olabilen kalıntı peridotit bırakır. Kalıntı peridotite uygun kimyasal bileşimi saptama üst mantonun varsayımsal bileşiminde gerçekleşir. Pirolit (piroksen-olivin kayası) bu varsayımsal peridotitlerin birisine verilmiş addır.

Heterojen manto

Üst mantonun bileşim bakımından homojen oluşu, yalnız fiziksel örnekler ilkesine göre düşünülmekte idi. Oysa görüldüğü üzere, son yıllardaki ayrıntılı jeofiziksel çalışmalar katmanlı yapıyı göstermektedir. Gerçekten, incelenen yumrular üst mantonun kimyasal ve mineral bileşimi bakımından tümüyle heterojen olduğu kavramını doğurur. Bugüne kadar bilinen türler, 250 km ye ulaşabilen derinlik aralığına ait olup, manto-kabuk sınırından kimberlit bacası kaynaklarına dek, mantoyu örneklerler. Bu yumru örnekleri: hiç ergimemiş olan özgün manto peridotiti türlerine; mantonun kısmi ergimesi sonucu eriyik kısmın taşınması ile oluşmuş kalıntı peridotit türlerine; eriyik kısmın yüzeye çıkamayıp derinlerde yeniden kristalleşerek oluşturduğu eklojite; eklojit oluşumu için mantoda yüksek basınçtaki kristallenme yerine, bu türler arasındaki geçiş türlerine; ve aynı mineral topluluğunu kapsayan, ancak buradaki düşünüş için çok karmaşık başka işlemlerle oluşmuş türlere aittir.

Yeryuvarı dışındaki kütlelerin sınıanmasına dayanan tüm manto bileşiminin kestirmeleri üst mantodan kaynaklanan kayaların çalışmalarından elde edilmiş olanlara benzer değerler verir. Kestirmeler savı desteklemekle birlikte, mantonun kimyasal bileşimi yukarıdan aşağıya doğru çok değişmez. Oysa karşılaştırılan kestirmelerde, varsayımsal pirolite göre üst mantonun potasyum içeriği mantodan türemiş peridotit kayalarında bulunan potasyum toplamından önemli ölçüde daha yüksektir ve bunların her ikisi de potasyum bakımından yeryuvarı dışındaki kütlelerin çalışmalarından çıkarılmış kestirmeden çok daha düşüktür.

Su ve karbondioksit gibi uçucu bileşenlerin ve diğer iz elementlerin birikimi ve dağılımı ile ilgili büyük belirsizlikler şimdi de geçerlidir. Örneğin bu bileşenler aşağıdaki olaylarda etkindirler: uranyum, toryum ve potasyum radyoaktif isotopu olan potasyum 40 gibi elementlerin radyoaktif çürümesiyle su oluşur; mantonun ergime ısı suyun varlığına bağlı olarak susuz kayaya karşı daha düşüktür; az oranda ergimmiş maddenin veya gaz kabarcıklarının varlığı mantonun direncini önemli oranda azaltır.

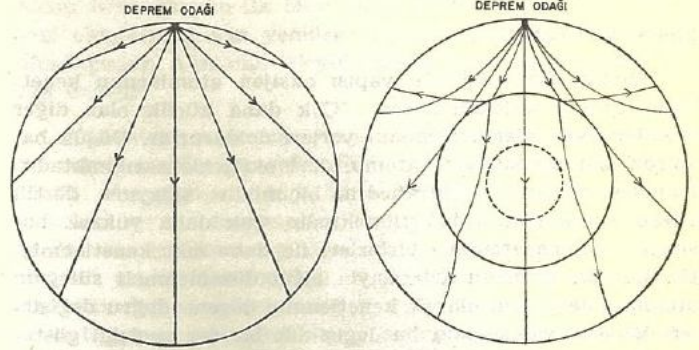
Su ve karbondioksit

Kimi peridotit yumrularında bileşiminde su bulunduran flogopit ve amfibol mineralleri bulunur. Bu bulgu üst mantonun en azından kimi bölümlerinde suyun varlığı için kanıt olarak benimsenmektedir. Su toplamının, tüm ağırlığın yüzde 0.1 ini aşabilmesi kuşkuludur ve suyun dağılımının düzensiz olması olasıdır.

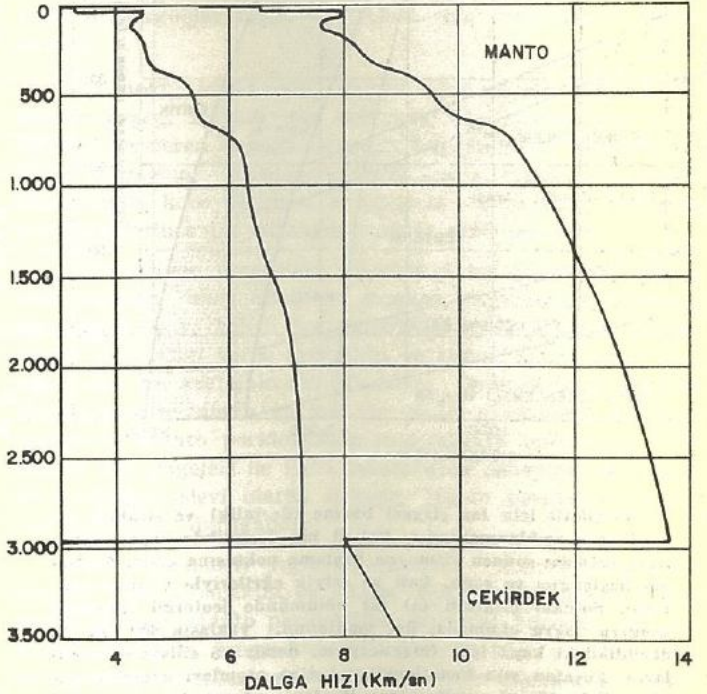
Mikroskop altındaki incelemelerde, kimberlitlerdeki ve lavlardaki kimi peridotitlerde olivin ve piroksen kristallerinin, çapı beş mikrometreye ulaşan küçük boşluklarla dolu olduğu görülür. Bunların birçoğu yüksek basınçta yakalanmış yoğun, eriyik karbondioksitle doludur. Bu bulgu üst mantoda çeşitli biçimlerdeki karbondioksitin varlığını gösterir.

Son zamanlarda, yüksek gerimli elektron mikroskobisi çok ayrıntılı kristal bozukluğu görüntüleri vermiştir. Örneğin, herbir mineral tanesi içinde oluşan kristal yapıdaki süreksizlikler, bozukluklar küçük büyütme mikroskoplarla görülemez. Elektron mikroskop görüntülerinde, küçük karbondioksit kabarcıkları kimi peridotit yumrularının olivin ve piroksenindeki süreksizlikler boyunca boldur. Bu veriler, karbondioksitin ilksel olarak katı minerallerde eridiğini ve kristal bozukluğuna yakın elastik gerilme nedeniyle gaz kabarcıkları olarak tümüyle çözüldüğünü ve çökeldiğini gösterir.

Mantonun fiziksel nitelikleri ve kimyasal bileşiminin birbirinden ayrı yapılan saptamaları birbirleri ile tutarlı olmalıdır. Bunların tutarlılıklarını sınamak için, mantodaki ba-



Şekil 5: Yeryuvarının içi boyunca deprem dalgalarının yolları eşmerkezli katmanlarının fiziksel nitelikleri ve yapısı hakkında bilgiler verir. Bir depremin odağındaki enerji her yöne gönderilmektedir. Eğer yeryuvarı her yerinde tekdüze özellikler gösterseydi, dalga yollarının düz çizgiler izlemesi (soldaki şekil) ve dalga hızlarının durağan olması gerekirdi. Yer değiştirme zamanı ölçümleri, dalga hızlarını ve bu nedenle de kimi düzeylerdeki ani değişimleriyle eşmerkezli katmanları açıklayan fiziksel özellikleri gösterir (sağdaki şekil). P dalgaları katı ve eriyikler içinde yayılabilmektedir. Eriyikler içinden geçemeyen S dalgalarının yeryuvarı çekirdeğinden geçemeyişi, en azından, dış çekirdeğin eriyik durumda olduğunu gösterir.



Şekil 6: Manto içinden geçen deprem dalgalarının hız profilleri S dalgaları (solda) ve P dalgaları (sağda) için çizilmiştir. Hızlar derinlikle (basınç) ve sıcaklıkdaki artmayla etkilenmektedirler, ancak arasıra yaklaşık 1.000 km derinliğe dek görülen sıramalar mantonun fiziksel özelliklerindeki değişikliklere karşılık gelir. 100-250 km ler arasında azalan hız, olasılıkla, levha tektoniği modelinin akışkan eneyuvarı için uygun bir özellik olan, tikel erimmiş kayanın varlığına uygundur.

sınc ve sıcaklık alanı boyunca mantonun kestirilen bileşiminin fiziksel niteliklerini bilmek gerekir. Eğer mineral bileşiminin basıncın ve sıcaklığın işlevi olarak değiştiğini gösteren bir yöntem saptanabilirse, kayanın oluştuğu derinlikteki sıcaklığı ve kaya örneğinin geldiği derinliği kestirmenin bir yöntemi bulunmuş demektir.

Basınc ve sıcaklık

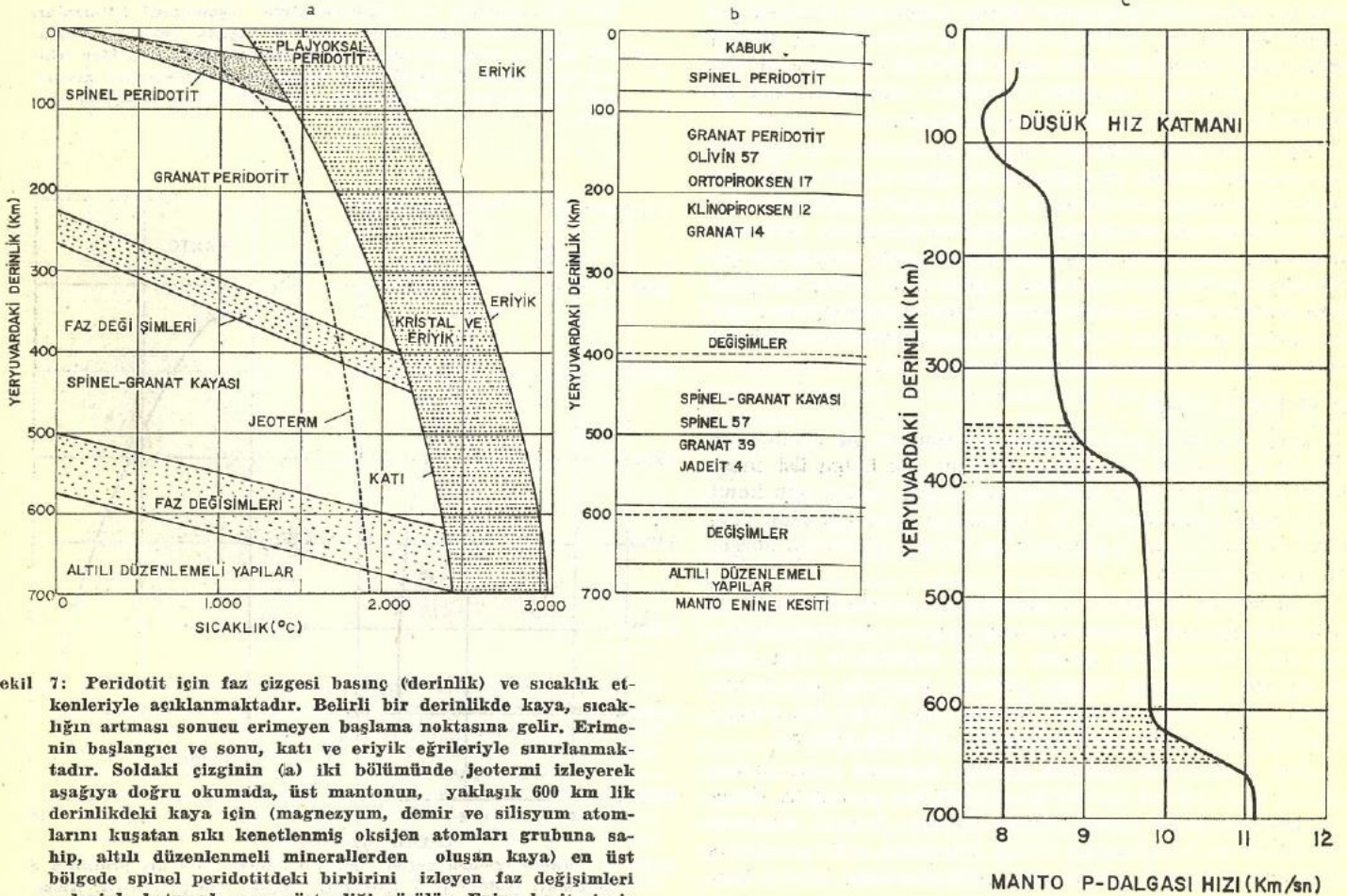
Silikat minerallerinin yapısı oksijen atomlarının kenetlenmesiyle denetlenmektedir. Çok daha küçük olan diğer atomlar oksijenler arasındaki yerleri doldururlar. Düşük basınçta, her bir silisyum atomu, dört oksijenle sarılmaktadır, bunların merkezleri tetrakedral biçimlidir; silisyum, dörtlü düzenlenmeli olarak belirtilmektedir. Çok daha yüksek basınçta, oksijen atomları birbirleri ile daha sıkı kenetlenmiştir. Bunlar, basıncın artmasıyla altılı düzenlenmeli silisyum atomları ile yoğun olarak kenetlenmiş düzene doğru değişirler. Mineral yapısındaki bu değişiklik bir faz geçişini gösterir. Mantoda fiziksel niteliklerin değerindeki dereceli değişiklikler, birbirini izleyen bu faz geçişlerine bağlıdır.

Belirli bileşenli malzemeye başlayan peridotitin mantodaki varlığı faz geçişleri, basınç ve sıcaklığa bağlıdır. Peridotit için faz geçiş çizgesi 200 kilobar basınca (yeryuvarı yü-

zeyinin 600 km altındaki basınca karşılık gelen, 200.000 atmosfer basınç) dek taşınan laboratuvar deneyleriyle saptanmıştır. Çizge dolaylı yöntemlerle daha yüksek basınçlara dek uzatılabilmektedir.

Mantodaki peridotitin en azından üç farklı mineral topluluğunda (plajyoklas peridotit, spinel peridotit, granat peridotit) kristallenebildiği, kimberlitlerdeki ve lavlardaki yumrularından çıkarsanmaktadır. Yüksek basınç deneyleri, farklı mineral topluluğunun faz geçişlerine bağlı olduğunu ortaya koyar. Basıncın artması ile, plajyoklas-peridotit önce spinel granat peridotite dönüşmektedir (Şekil 7).

Deneyisel araştırmalar, çok yüksek basınçta granat peridotitin yaklaşık yüzde 10 luk bir yoğunluk artışı gerektiren faz geçişine uğramakta olduğunu, üst mantonun başat olivininin spinel benzeri malzemeye dönüşmekte olduğunu, ve alüminyumlu piroksenin granatla katı eriyik içinde birleşerek, granat yapısına dönüşmekte olduğunu gösterir. 200 kilobara yakın basınçlarda mineraller, yeryuvarı yüzeyindeki bilinmeyen mineralleri ortaya çıkaran, altılı düzenlenmeli silisyum atomlu yapılar içinde daha sıkı kenetlenmiştir. Bu tür kenetleme yüzde 10 luk başka bir yoğunluk artışıyla sonuçlanır. Faz geçişinde geçerli olan basınç daha yüksek sıcaklıklarla artışlar gösterir.



Şekil 7: Peridotit için faz çizgesi basınç (derinlik) ve sıcaklık etkileriyle açıklanmaktadır. Belirli bir derinlikte kaya, sıcaklığın artması sonucu erimeyen başlama noktasına gelir. Erimeyin başlangıcı ve sonu, katı ve eriyik eğrileriyle sınırlanmaktadır. Soldaki çizginin (a) iki bölümünde jeotermi izleyerek aşağıya doğru okumada, üst mantonun, yaklaşık 600 km lik derinlikteki kaya için (magnezyum, demir ve silisyum atomlarını kuşatan sıkı kenetlenmiş oksijen atomları grubuna sahip, altılı düzenlenmeli minerallerden oluşan kaya) en üst bölgede spinel peridotitdeki birbirini izleyen faz değişimleri nedeniyle katmanlı yapı gösterdiği görülür. Enine kesit çizgisindeki (b) sayılar kayalardaki mineral yüzdelere tanımlar. P dalgası hızının profili (c) mantodaki gerçek değişiklik derinliğinin, faz çizgesi ve jeotermden anlaşıldığı gibi, faz değişimi derinlikleri ile deprem dalgalarının hemen hemen uyduğunu ortaya koyar.

Belirli bir derinlikde, sıcaklıkdaki artış, sonunda kayayı ergimeye başladığı noktaya getirir. Faz çizgesinde katıların çizdiği sınırlarla gösterildiği üzere, bu sıcaklık basınçla artar (Şekil 7). Çeşitli minerallerden oluşan kaya, eriyikle birlikte bulunan katı kristallerdeki sıcaklık aralığında giderek ergir. Yetkin ergime, eriyiklerin çizdiği sınırlarla belirtilmektedir.

Sıcaklığın etkisi yeryuvarındaki her bir derinlikdeki sıcaklığı veren çizginin oluşturduğu jeoterm yöntemleriyle araştırılabilmektedir. Eğer bu çizgi peridotitin faz çizgesi üstünde çiziliyse, çizgi üstündeki her bir nokta faz alanlarından birisini kaplar ve böylece her bir derinlikdeki peridotitin mineral topluluğu da saptanır. Peridotitten oluşmuş varsayımsal manto boyunca enine kesit faz çizgesi boyunca jeotermi izleyerek düzenlenmektedir. Her bir katman özel mineral topluluğundan oluşur.

Manto katmanları arasındaki sınırlar olasılıkla, faz sınırlarını kesen jeotermi bulduğu derinliklerde dir. Bu sınırların hemen hemen sismik dalga hızının değiştiği derinliklere karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Bu bulgu, üst mantonun bileşiminin varsayımsal peridotitinkine yakın olduğunu ve üst mantonun katmanlı yapısının bileşimdeki değişikliklerden çok, faz geçişleriyle ortaya çıkmakta olduğunun iyi bir kanıtı olarak benimsenmektedir.

Düşük hız zonunda deprem dalgalarının hızındaki azalma, üst mantoda su ya da karbondioksitin bulunmasıyla açıklanabilmektedir. Su ya da karbondioksitin bulunması, üst manto peridotitinde ergimenin görülmesini açıklayabilir. Kayanın fiziksel niteliklerine göre sonuç değişebilir. Eğer su yoksa, aynı sonuç taneler arası karbondioksitle de oluşturulabilir.

Bu yüzyılın ilik yarısında jeofizikçiler, sıcak malzemenin yukarıya, daha soğuk malzemenin ise aşağıya doğru yer değiştirmesi demek olan konveksiyonun katı, berk mantoda oluşmadığını benimsenmişlerdir. Bu düşünüş, kıtasal sürüklenme kuramının uzun süre benimsenmemesinin nedenlerinden birisidir. Oysa son zamanlarda, örneklerin büyük bölümü, taşıyıcı levhalarının taşınmasındaki sürükleyici güç olarak, mantodaki konveksiyonu ortaya atmaktadır. Mantodaki devinimlerin ayrıntıları ve konveksiyonun ölçüğü belirsizdir, ancak hızların çok aşırı ölçüde yavaş —manto gerçekten— olağan insan yaşamı süresince devinimsizdir— olduğu biraz kuşkuludur.

Taşıyıcı levhaları ve bunların üstündeki kıtalar yılda birkaç cm lik bir hızla sürüklenirler. Mantodaki sürüklenen malzemenin saatte yaklaşık 0.005 mm lik hızla karşılık gelen, yılda beş cm lik bir hızla yer değiştirdiğini düşünelim. Saat akrebinin ucu saatte beş cm yer değiştirir ve devinim insan gözüne açıkça çarpmaz. Hız şimdilik, mantodaki düşünülen devinimden 10.000 zaman daha büyüktür. Böyle olsa bile, yılda beş cm lik devinim jeolojik zaman üstüne eklenir; kaya yığına 4.6 milyar yıllık yeryuvarı yaşamın yalnızca küçük bir bölümünü oluşturan 58 milyon yıl içinde, mantonun altından üstüne doğru yer değiştirir.

Manto devinimleri

Katı kayanın yavaş bile olsa akması nasıl gerçekleşebilir? Demirci soğuk çelik çubuğu eline aldığı anda onu bükmez, ancak kızıl kor durumuna dek ısıtıldığında çubuğu bükebilir. Manto kayaları da yüksek sıcaklıklarda, katı durumda olsalar bile biçim bozulmasına uğrayabilmektedirler.

Olivin, piroksen ve peridotit laboratuvar deneylerinde yüksek basınç ve sıcaklık gerilimlerine uğratılmışlardır. Böylece biçim bozulmasına uğrarlar. Biçimleri bozulmuş ürünler son zamanlarda, plastik akış işleyişlerini kurmak için yapılan çalışmalarda yüksek gerilim elektron mikroskopunda incelenmişlerdir. Bu çalışmalarda ortaya çıkan düşünce, biçim bozulmasının ilk önce, daha sonradan yeni tane mozaığı oluşturmak için yeniden kristallenen her bir kristalde olduğudur. Akmanın işleyişi basınç ve sıcaklığın işlevi olarak değişir.

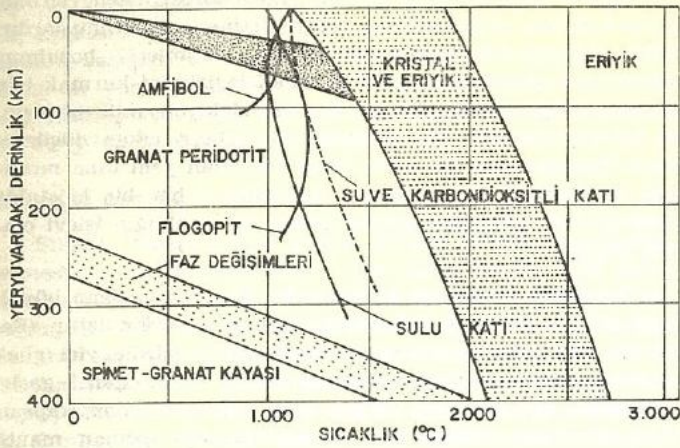
Taslaklar mantonun iç kalınlığı boyunca uzanan büyük konveksiyon gözeleri (hücreleri) için ileri sürülmüştür (Şekil 9). Faz geçişlerinde ısının emilmesinin sürükleyici gücü azalttığı savına dayanan seçenek model, olivin-spinel geçişi üstündeki, üst mantoya doğru olan konveksiyonu kapsar. Üçüncü model, 100-300 km lik derinliklerde uzanan manto katmanları olan enezyuvara doğru olan konveksiyonu içine alır. Oysa taşıyıcı malzemesinin mantoya geri döndüğü ve böylece konveksiyon güçleri bakımından karmaşık olan yitim zonları 700 km derinliğe dek uzanır görünürler. Levhaları sürükleyici işleyiş için bir başka model, mantodaki ısıl sorgucları kapsar. Bu düşünüşe göre, manto malzemesinin yukarıya doğru toplam devinimi yaklaşık 20 sorguçla sınırlanmaktadır. Çekirdek - manto sınırlarından yükselen bu sorgucların her birisinin çapı birkaç yüz km dolayındadır. Geriye akma manto kalıntısının aşağıya doğru yavaş devinimiyle oluşmaktadır.

Sorgucun taşıyıcıya ulaştığı yerde, akma her doğrultuda ışınal olarak yatay yayılır. Sorguclar yüzeydeki volkanik etkinliğe sahip kor noktaları oluşturur ve taşıyıcının yukarıya doğru kubbeleşmesine neden olabilirler. Böylesi yollarla, sorguclar taşıyıcı levhalarının devinmesine neden olurlar.

Kor nokta varsayımı geçerli olan en son düşünüşdür. Birçok jeolog, Hawaii gibi volkanik ada zincirlerinin özelliklerini gösteren çeşitli olayların kapsamlarını araştırmaktadır. Sorgucun, mantonun 2.800 km si içinde yükselerek düzenliliğini koruyabilmesi konusunda kuşkuvarı belirten yerbilimcilerince bu varsayım karşı çıkmaktadır.

Konveksiyon dizgesinin herhangi bir çeşidinde, manto malzemesinin dikey devinimi sıcaklık dağılımında değişimlere neden olur; belirli bir derinlikte, sıcaklık sıcak malzemenin yükseldiği yerde artmakta ve soğuk malzemenin battığı yerde ise azalmaktadır. Devinim, konveksiyon ürünleri olarak zaman zaman ve yer yer jeoterm eğrisinin biçimini değiştirir. Manto peridotitinde minerallerin bileşimleri peridotitin faz çizgeleri ile ilgili laboratuvar deneyleri ile basınç ve sıcaklığın işlevi olarak değişir. Manto peridotini oluşturan mineraller durağandır.

Manto peridotiti yığını mantodaki konveksiyon devinimleri sonucu, sıcaklık ve basınç bakımından değişikliklere uğramaktadır. Manto peridotitinin mineral bileşimi, faz değişimi yöresinde denge kurmağa yardım eden yeniden kristallenmeyle düzenlenecektir. Yeniden kristallenme genellikle tam olarak gerçekleştiğinden, konveksiyon devinimlerinin oldukça yavaş olduğu ortaya çıkar. Eğer kaya, kimberlit püskürmesinde olduğu gibi yüzeye birdenbire çıkıyorsa, mineral bileşiminin düzenlenmesi için yeterli zaman yoktur ve kaya, model mantoda son kurulan dengedeki sıcaklık ve basınca uygun mineral dizisi ile yüzeye çıkar.



Şekil 8: En üst mantodaki düşük hız katmanının su ve karbondioksit varlığıyla açıklanmış olan daha düşük sıcaklık ve basınçta erimekte. Görüldüğü gibi, kaya daha düşük sıcaklık ve basınçta erimekte. Sulu (ya da su bulunduran) amfibol ve flogopit mineralleri sınırlı sıcaklık aralığı (siyah) boyunca durmaktadır. Bu çizge susuz manto kayası çizgesi ile karşılaştırıldığında, jeoterm eğrisinin, en üst mantoda gözlenen düşük hız kuşağının yukarısı ile hemen hemen uygun olan, yaklaşık 100 km derinlikte katı peridotit aşamasından tikel erimiş peridotit aşamasına geçtiği görülür.

Özel bir basınç ve sıcaklıktaki peridotitte bir arada bulunan minerallerin bileşimleri doğrudan doğruya laboratuvar deneylerinde ölçülmüştür. Bu verileri düzenleme amacıyla kullanarak, kimberlitteki yumrular gibi manto peridotiti örnekleri almak, her bir örnekdeki minerallerin bileşimini ölçmek ve böylece bunların mantodaki kaynaklardaki basınç (ya da derinlik) ve sıcaklığı kestirmek olanaklıdır.

Eski Jeoterm

Bu yöntemleri kimberlitteki yumrulara uygulama son bir ya da iki yıldır ilginç sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Tek bir kimberlit bacasından toplanmış yumrular topluluğu, her birisi püskürme öncesi dengenin kestirilmiş basınç ve sıcaklığıyla, belirli bir yumru için belirtilmiş olan noktalar dizisi verir. Derinlik (basınç) ve sıcaklık çizgesi üstündeki bu noktaların yeri kimberliten püskürme zamanında oluşan jeotermeye uygundur. Başka bir deyişle, her bir kimberlit yumrusunun içeriği, birdenbire yukarıya taşınmasından önceki, mantodaki denge basınç ve sıcaklığının göstergesi olan dengelenmiş mineral bileşimi içinde anlatılmıştır. Bu çalışmayla ilgilenen mineraloglar Güney Afrika'daki kimberlit bacasından elde edilen sonuçların, 150 km ya da daha derinlere inen olağan gradyanlı, ancak daha derin düzeylerde daha dik gradyanlı olan fosil jeotermeleri verdiğini ortaya çıkarmışlardır. Görünüşte sıcaklık, kimberlit bacalarının yaklaşık 100 milyon yıllık püskürmelerinden önceki kimi zaman aralıkları için aynı derinliklerde olağandan daha yüksekti.

Bu sonuçlar yeryuvarının ısısız geçişini, mantonun devimselliğini ve dolayısıyla levha tektoniğinin sürükleyici güçlerini ortaya çıkarmaya çalışan jeofizikçiler için çok ilginçtir. Verilerin bir açıklaması, fosil jeotermdeki değişim noktasının, Afrika taşıyıcı levhasının Atlantik Okyanusu'nun açılması ile hızlı olarak yukarıya doğru yer değiştirmeye başladığı, yaklaşık 120 milyon yıl öncesindeki enezyuvarın üst kesimine karşılık geldiğidir. Bu açıklamaya göre, devinimin sonucu olan enezyuvardaki sürtünme ısınması, je-

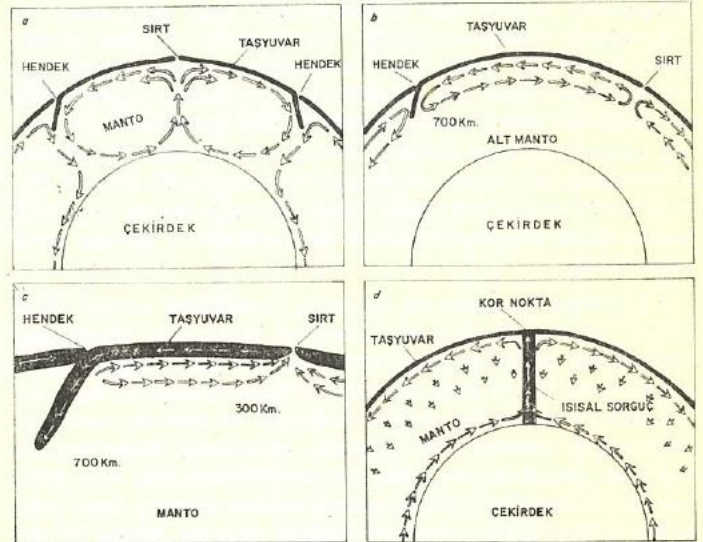
otermi, taşıyıcı-enezyuvar sınırındaki değişim noktasını oluşturan daha yüksek sıcaklıklara taşır. Oysa kayalar arasındaki ısınma hızı çok yavaştır, öyle ki, taşıyıcıdaki ilksel jeoterm gerçekte değişmeden kalmıştır. Başka bir açıklama, jeofizikçilerce sunulmuştur. Buna göre, enezyuvardaki sürtünme böylesine büyük bir ısıl etki oluşturmaya elverişli değildir. Bunlar, değişim noktası altındaki fosil jeotermi daha dik kesiminin, kimberlit püskürmesini başlatan yersel ısıl sorgucun yukarıya doğru konveksiyonuyla oluşabildiğini savunurlar.

Bu örnek, mantoya yakından bağlı levha tektoniğinin, bilimsel toplantılarda, daha önceleri birbirinden çok değişik alanlarda çalışan araştırmacıları nasıl aynı simpozyum odalarında biraraya getirdiğini çok güzel göstermektedir. Saha jeologları, mineraloglar, jeofizikçiler, denel kimyacılar ve denel fizikçiler, kimberlit yumrularındaki minerallerde, mantonun günümüzde, ve yeryuvarının varolduğu 4.6 milyar yıl boyunca nasıl devindiğini anlamaya çalışan kuramcıların işlerine çok yarıyacak bilgileri, birlikte ortaya çıkarmışlardır.

Uydudan alınmış yeryuvarı içinin görüntüsü, bilardo topu gibi düzenli, dönen büyük yuvarı gösterir. Yüzeyde açılmış en derin delik yalnızca 9 km lik derinliğe ulaşır, yeryuvarının yarıçapının yüzde 0.15 inden daha az içeri girer. Bu nedenle, ulaşılamayan manto hakkında bilinenler çok ilginçtir.

Modellerin belirsizliği

Hemen hemen, eldeki bilgilerin toplamı birçok jeofiziksel ve jeolojik olay için açıklamalar getiren mantonun devimsel davranışının tümüyle anlaşılması için yeterli değildir. Mantodaki gerçek olgunun ne olduğu konusunda belirsizliğin derecesi Hawaii volkanik ada zinciri ile ilgili varsayımın karşılaştırılmasıyla açıklanabilir. Her bir ada, enez-



Şekil 9: Konveksiyon modelleri taşıyıcı levhalarını sürükleyen mantodaki etkinliğin nasıl açıklanacağını sunmaktadır. Konveksiyonda daha ılık malzeme yukarıya doğru ve daha soğuk malzeme aşağıya doğru yer değiştirir. İlk model (a) konveksiyon gözlemlerinin iş manto boyunca uzanmasını kapsar. İkinci modele (b) göre, bu gözlemler spinelden olivine dek olan faz değişimi üstündeki derinliklerde sınırlanmaktadır. Üçüncü model (c) enezyuvara doğru olan manto devinimlerini sınırlar. Isısız sorguç modelinde (d) tümüyle yukarıya yönelik devinin kimi ısısız sorguçlarda sınırlanmaktadır ve aşağıya yönelik akma manto kalıntısının yavaş devinimleriyle oluşmaktadır.

yuvardaki durağanlaşmış ergime bölgesi üstündeki püskürmenin sonucunda oluşmuştur. Bu durumda, yer değiştiren taşıyıcı levhası, uzun bir süre sonra bir ada zinciri oluşturacak olan adayı uzağa taşımıştır.

Bu olguların bir açıklamasına göre, ergime ısısal sorgucun üstündeki kor noktada oluşmaktadır. Başka bir açıklamaya göre, ergime, enezuyardan manto içinden aşağıya doğru yer değiştiren kolon içine akan kayalardaki sürtün-

meyle oluşmaktadır. Kolon, yerçekimi etkisiyle gelişmiş bir aşağıya doğru akma bölgesidir.

Bu birbirine karşı varsayımlar saygın yer bilimcilerince geliştirilmektedir. Hawaii, yükselen sorgucla mı, yoksa batan yerçekimsel sürüklenmeyle mi açıklanabilir? Yazar, uzun yıllar önce ek verilerin toplanmasına geçildiğine ve varsayımın inceliğinin, mantonun yapısının ve devimselliğinin ortaya konmuş görünümünü üstüne çok sıkı zorlamalar getireceğine inanmaktadır.