

4.1.2 Yer İçerisinde Yayılan Cisim Dalgaları

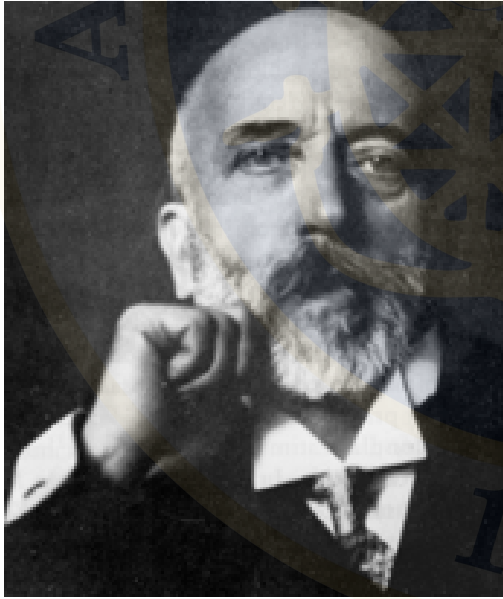
Bir deprem kaynağından çıkan cisim dalgaları, küresel yerküre içerisinde bütün yönlere doğru yayılırlar. Kimileri yerin derinliklerine doğru ilerlerken kimileri de sadece yer kabuğu içerisinde yayılır. Böylece bir deprem odağından çıkan dalgalar, ulaştıkları istasyona daha doğrusu kat ettikleri uzaklığa göre fazlara ayrılarak isimlendirilirler. Cisim dalgası fazları, yayıldıkları ortam ve uzaklığa göre ikiye ayrılabilir.

- Yer kabuğunda ilerleyen dalga fazları (yakın depremler)
- Manto ve çekirdekte ilerleyen dalga fazları (uzak depremler)

4.1.2.1 Yer Kabuğunda İlerleyen Dalga Fazları

Bir odak noktasından çıkan sismik dalgalar, yaklaşık 150 km'ye kadar yerel uzaklıkta ve 15°'ye ($1^\circ = 111.11$ km) kadar bölgesel uzaklıkta bulunan istasyonlara doğrudan yer kabuğunda veya kabuk manto sınırında ilerleyerek ulaşırlar (Şekil 1). Kabuk, bugüne kadar geçirmiş olduğu tektonik olaylardan dolayı, kendi içerisinde kalınlık, petrolojik bileşim ve yapısal özellikler bakımından farklılıklar gösterir. Bu farklılıklar sismik dalgaların kabuk içerisinde yansıma, kırılma ve saçılmalarına neden olur. Bu da kayıtlar üzerinde farklı dalga fazlarının gözlenmesi demektir.

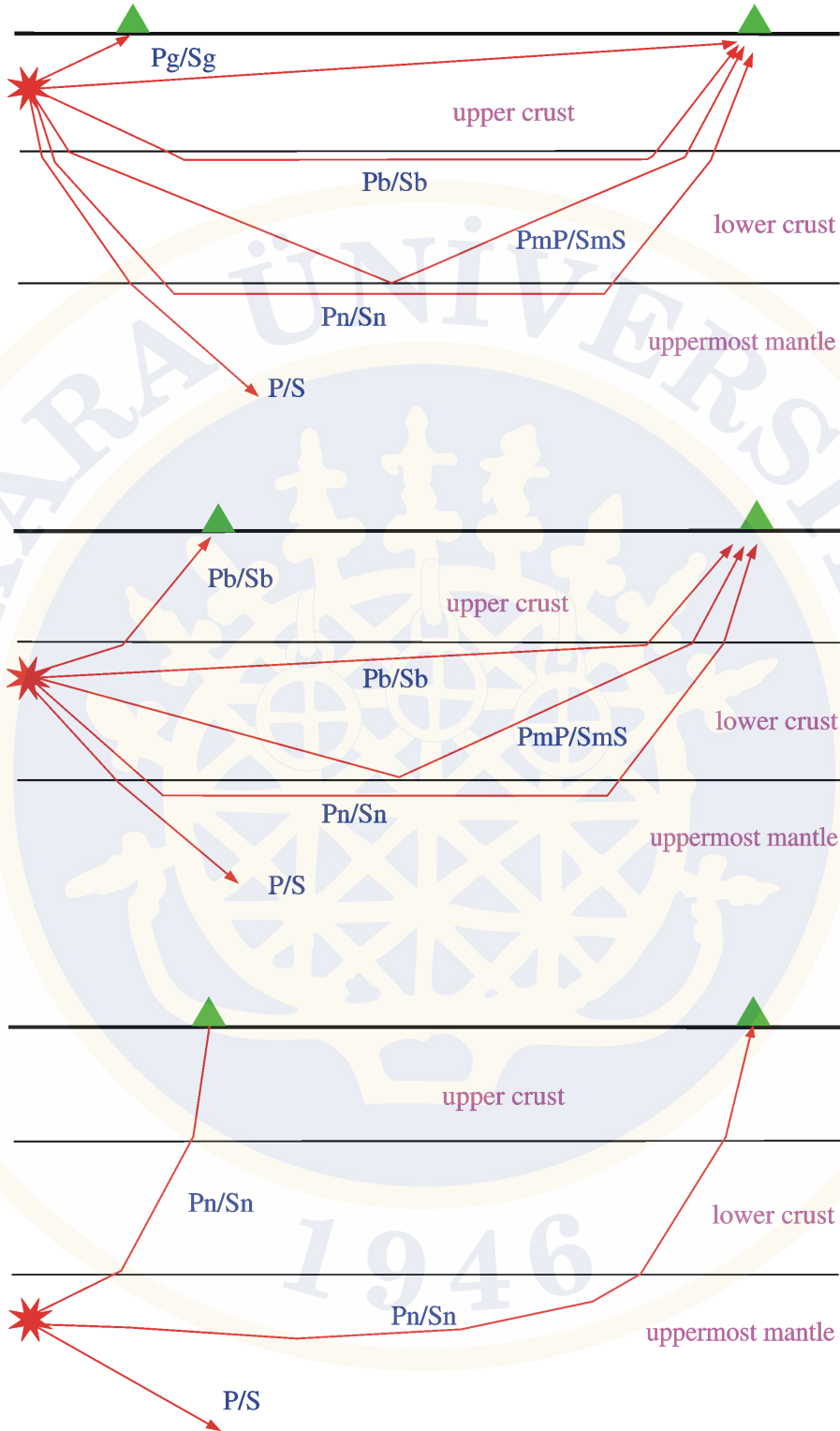
Sismoloji ve meteoroloji alanında çalışan Andrija Mohorovičić adlı bir bilim adamı, 8 Ekim 1909 yılında Yugoslavya'daki Pokuplje (Kupa Valley) depremine ait kayıtları incelerken iki P ve iki S dalgasının kaydedildiğini görmüş ve bunlardan bir P ve S çiftinin yeryüzüne yakın bir süreksizlik sınırından yansıyıp geldiğini ve bu sınırın 35-40 km derinde olması gerektiğini



Andrija Mohorovičić

ileri sürmüştür. O tarihten bu yana yer kürenin 35-40 km'lik üst kısmına *kabuk* ve bu kabuk ile mantoyu ayıran sınıra ise *Mohorovičić* ya da kısaca *Moho* süreksizliği denilmektedir (Şekil 4.18). Daha sonra Andrija Mohorovičić ve diğer bilim adamları bu süreksizliğin tüm kıtalar ve okyanuslar altında bulunduğunu doğrulamışlardır. Bu kabuğun kıtaların düz bölgelerinin altında yaklaşık 20-40 km, büyük dağ sistemlerinin altında yaklaşık 50-70 km, okyanuslarda ise 5-15 km arasında değiştiği bilinmektedir. Kabuğun altındaki kısım ise yer kürenin mantosunu oluşturmaktadır. Kıtasal kabuk içerisinde bazı hız süreksizliklerinin olduğu bilinmektedir. Bu süreksizlik sınırına *Conrad süreksizliği* denilmektedir (Şekil 4.18). Bir deprem esnasında ortaya çıkan ve kabuk içerisinde ilerleyen belli başlı dalga fazları şunlardır;

- Pg ve Sg
- Pb ve Sb
- Pn ve Sn
- PmP ve SmS



Şekil 4.18 İki katmanlı kabuk modeli için a) üst kabuktaki b) alt kabuktaki c) üst mantodaki kaynaktan çıkan sismik dalgaların yakın ve uzak istasyonlarda ($0^\circ < X < 15^\circ$) kaydedilen fazları.

Pg ve Sg Dalga Fazları

Kısa mesafelerde (2° - 3° 'ye kadar), üst kabuk içerisinde ilerleyerek doğrudan istasyonlara ulaşan dalgalardır (Şekil 4.18). Uzun mesafelerde ise yaklaşık 5.8 km/s'lik bir grup hızına sahip kabuk içerisinde P-dalgasının tekrarlı yansımaları şeklinde istasyonlara ulaşmaktadır. Bu dalgaların, odaktan istasyona gelmeleri için geçen zaman (T_g) aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T_g = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{V_g} \quad (1)$$

Burada h , odak derinliği, x dış-odak ile istasyon arası uzaklık, V_g ise üst kabuğun P ya da S dalga hızıdır. Kıtasal kabuktaki Pg dalgasının hızı, 5.5-6.2 km/sn, Sg dalgasının hızı ise 3.2-3.7 km/sn'dir. Sismogramlarda Pg dalgası genliğinin büyük olması nedeniyle diğer P dalgası fazlarından kolayca ayırt edilebilir.

Pb ve Sb Dalga Fazları

1923 yılında Conrad, Avrupa'daki bir depremin yakın kayıtlarını incelerken, Pg ve Pn dalgaları arasında bir başka dalganın daha kaydedilmiş olduğunu gözlemlemiş ve bu dalganın üst kabuktaki granit ile alt kabuktaki bazaltı ayıran süreksizlik sınırından geldiğini ileri sürmüştür. Daha sonraları bu süreksizlik *Conrad süreksizliği* olarak adlandırılmıştır. Bu dalgalar ya alt kabuktaki bir deprem odakından yukarı giden ya da alt kabuğa inerek süreksizlik sınırı boyunca ilerleyen ve tekrar yer yüzüne ulaşarak istasyonlarda kaydedilen dalgalardır. (Şekil 4.18). P* ve S* simgeleri ile de gösterilmektedir. Pb dalgasının hızı 6.5-7.2 km/sn, Sb dalgasının hızı ise 3.7-3.8 km/sn kadardır.

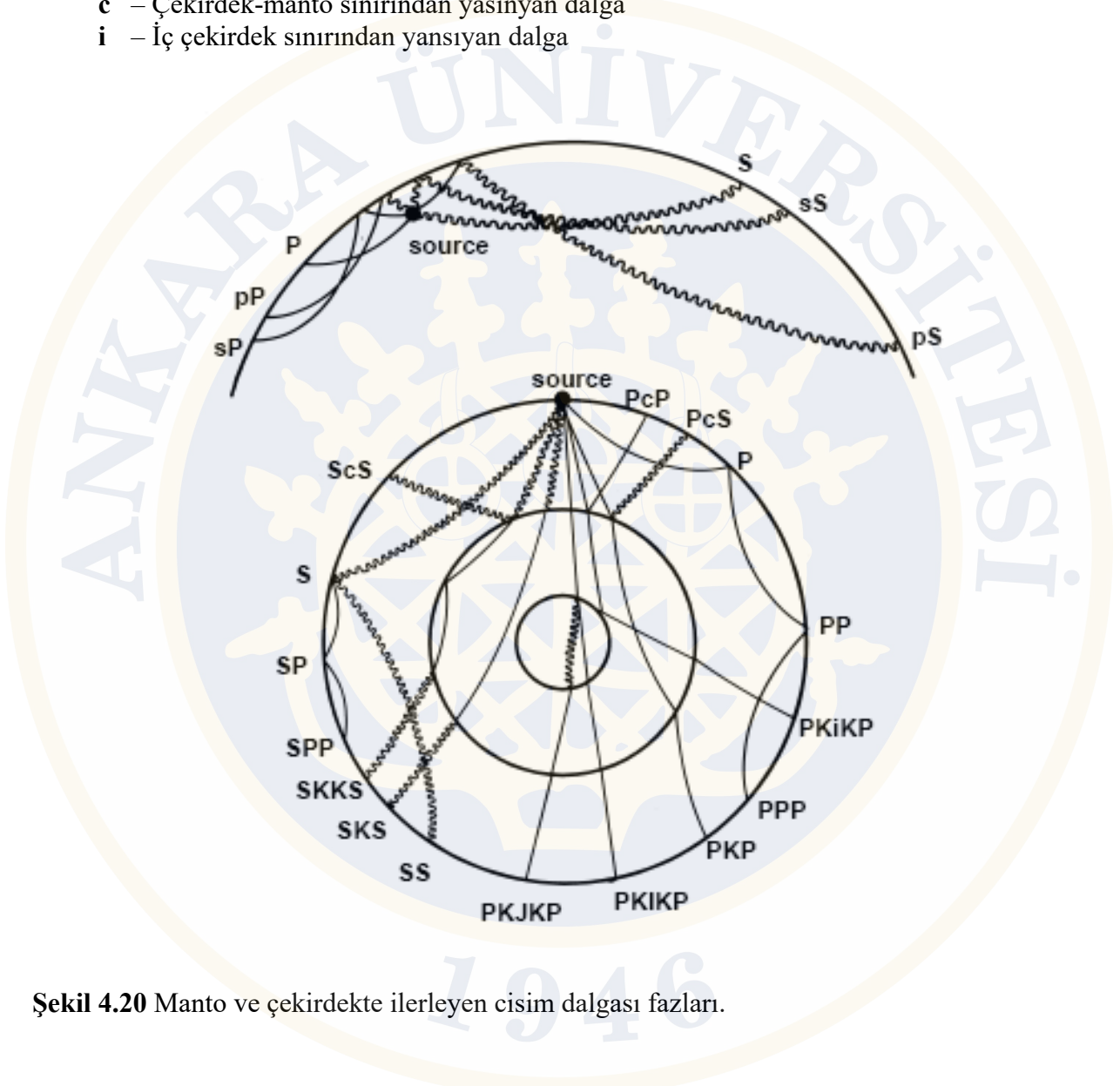
Pn ve Sn Dalga Fazları

Moho boyunca seyahat eden baş dalgalarıdır. Yani Moho süreksizlik yüzeyine kritik açı ile gelen ve bu süreksizlik sınırı boyunca mantodaki hız ile ilerleyerek tekrar kabuğa geçip yeryüzünde kaydedilen dalgalardır (Şekil 4.18). Deprem odağının üst manto içerisinde yer aldığı durumda yukarı giden dalga da Pn ve Sn dalgaları olarak adlandırılır (Şekil 4.18). Pn ya da Sn dalgalarına ait seyahat zamanı şu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$T_n = \frac{x}{V_2} + \frac{(2H - h)\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1V_2} \quad (2)$$

Burada H , kabuk kalınlığı; h , deprem odağının derinliği; V_1 ve V_2 ise sırasıyla kabuk ve mantodaki P veya S dalga hızlarına karşılık gelmektedir. Pn dalgasının hızı 7.8-8.3 km/sn arasında değişirken, Sn dalgasının hızı 4.3-4.7 km/sn arasında yer almaktadır. Bu tür dalgalar belirli bir uzaklıktan (kritik uzaklık) sonra kayıtlarda görülmeye başlanır. Pn dalgasının genlikleri Pg ve Sg dalgalarının genliklerinden daha küçüktür. Pn dalgası, genellikle gürültü seviyesinin hemen üzerinde bir genliğe sahip olduğundan sadece ilk gelen dalga olduğu zaman belirlenebilir. Daha uzak mesafelerde, üst kabuk Pg ve Sg dalgalarının yüksek soğurulmasından dolayı buna karşılık Pn ve Sn dalgalarının daha az soğurulması, Pn ve Sn dalgalarının ilk gelen P ve S dalga fazları olduğu bilinmektedir.

- P** – Odaktan derinlere doğru yayılan P–dalgası
- S** – Odaktan derinlere doğru yayılan S–dalgası
- p** – Odaktan yüzeye doğru yayılan P–dalgası
- s** – Odaktan yüzeye doğru yayılan S–dalgası
- K** – Dış çekirdekten geçen P–dalgası
- I** – İç çekirdekten geçen P–dalgası
- J** – İç çekirdekten geçen S–dalgası
- c** – Çekirdek-manto sınırından yansıyan dalga
- i** – İç çekirdek sınırından yansıyan dalga

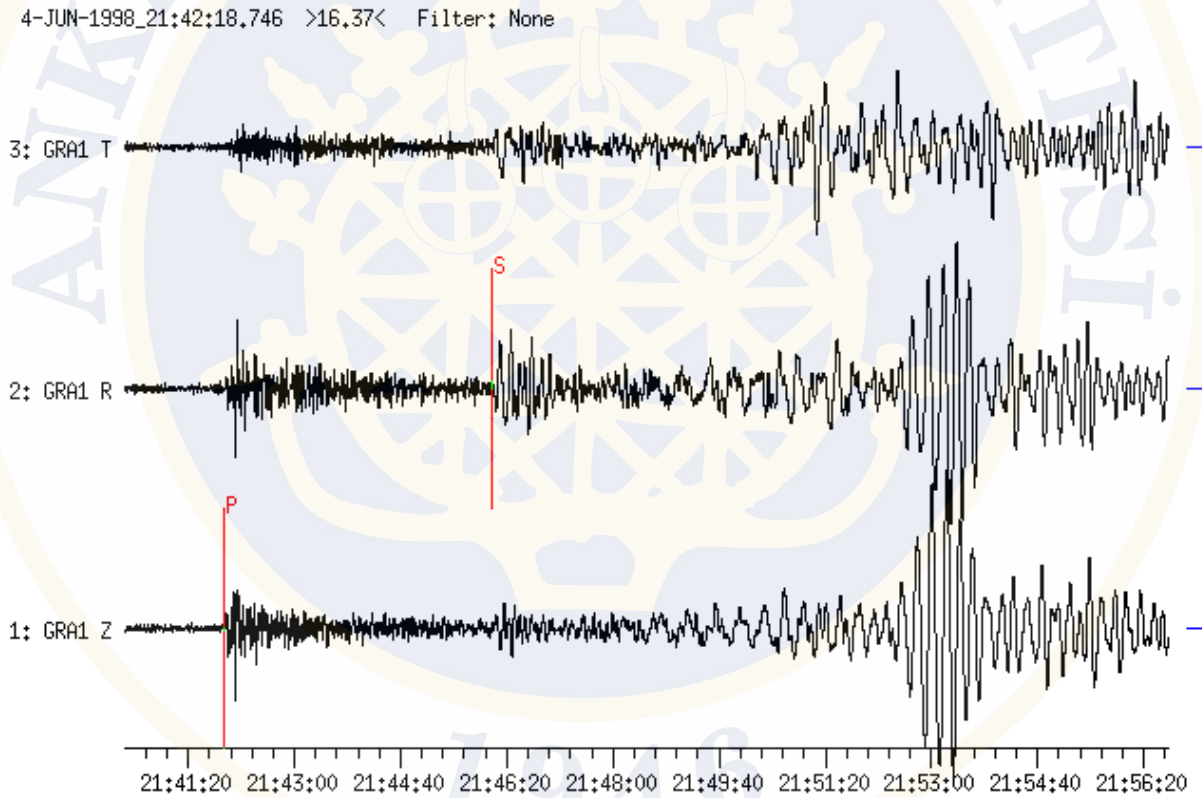


Şekil 4.20 Manto ve çekirdekte ilerleyen cisim dalgası fazları.

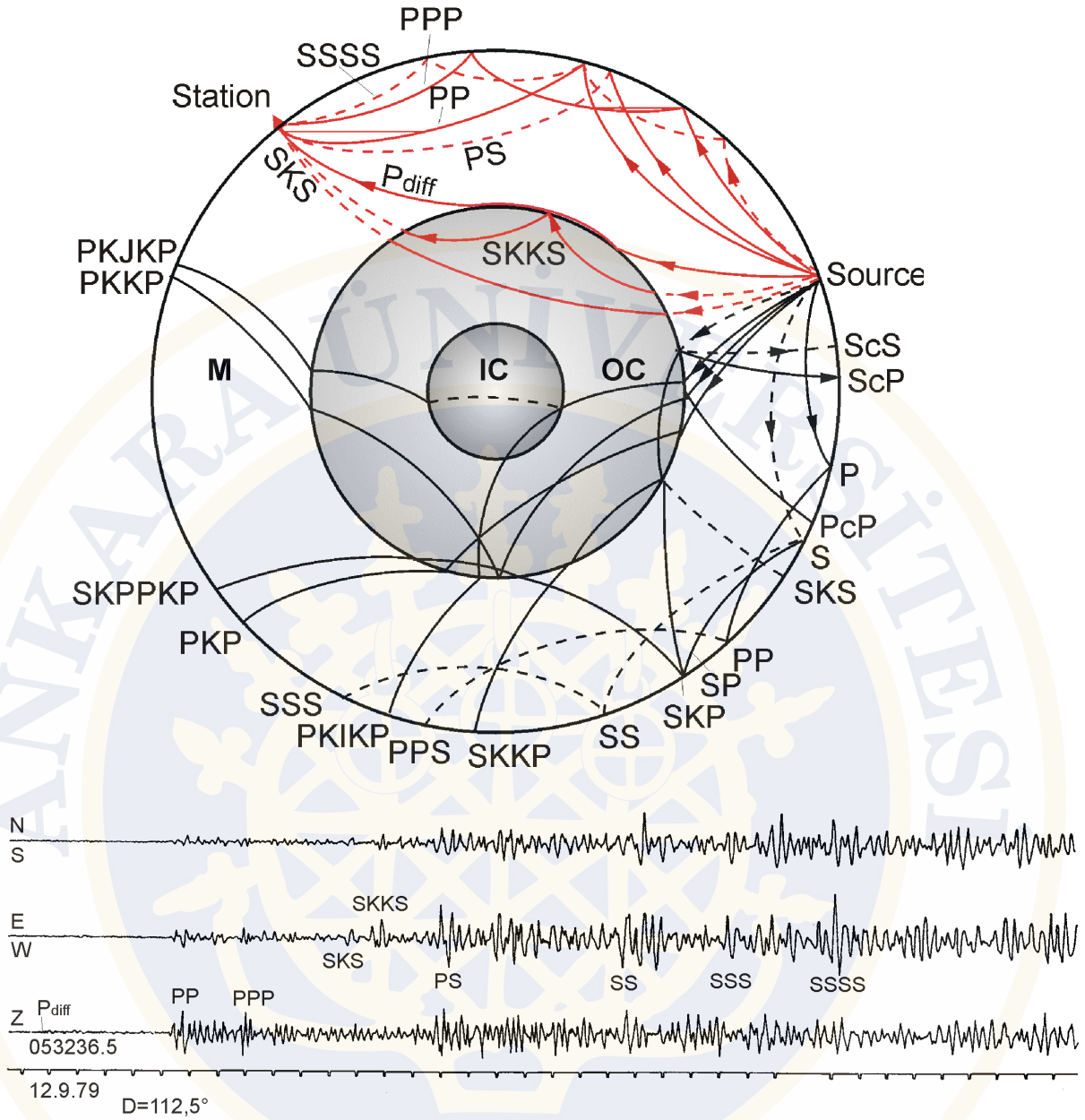
“Uzak alan” olarak da tanımlanan, 15° ’den daha uzak mesafelerde meydana gelen bir depremin odağından yayılan sismik dalgalar genelde yerkürenin manto ve çekirdeği gibi daha derin noktalarından geçerek istasyonlara ulaşırlar. Deprem uzaklığının $15^\circ < \Delta < 30^\circ$ olduğu bölgelerde cisim dalgaları, üst manto (Moho’dan 410 km derinliğe kadar) ve alt manto üzerindeki geçiş zonu (410-660 km arası) içerisinde ilerleyerek istasyonlara varırlar. Mantodaki geçiş zonunun alt ve üst sınırlarını belirleyen süreksizlik, sismik empedanstaki belirgin artışlarla ilişkilendirilmiştir. 15° uzaklığa kadar P_n ve S_n dalgalarının genlikleri uzaklıkla birlikte giderek küçülür ve bu dalgaları gözlemlemek zor bir hale gelir. Bu durumda

ilk gelen dalgalar olarak Pn ve Sn yerine daha uzun periyotlu P ve S fazları rapor edilir (Şekil 4.21). Sonraki 15° mesafe için ise kayıtlar daha anlaşılır ve üç ana dalga grubu (P, S ve yüzey dalgaları) daha belirgindir.

Dış odak uzaklığının $30^\circ < \Delta < 100^\circ$ olduğu bölgelerde P ve S dalgaları, daha yumuşak ve pozitif hız ve yoğunluk gradyenti ile karakterize edilen alt manto içerisinde seyahat ederler. Bu aralıkta sismogramlar üzerindeki P ve S dalgalarına ait ilk varışlar, nispeten daha belirgindir. Bu bölgelerde P ve S dalgalarını çok sayıda artan ikincil dalgalar takip eder. Bu dalgalar, ardışık yüzey ve çekirdek-manto sınırı (ÇMS) yansımaları ya da PP, PS, SS ve PcP, ScP vb gibi P ve S fazı dönüşümleridir. İlk P varışından 15-35 dakika içerisinde ÇMS'nin iç tarafından (PKKP, P3KP gibi) ya da yüzeyden (PKPPKP = P'P') PKP'nin tekrarlı yansımaları kısa periyotlu sismik kayıtlarda gözlenebilir. Bu dalgalar Şekil 4.22'de görülmektedir. Artan dış-odak istasyon uzaklığı ile birlikte sismik dalga yolları eğilerek yerin merkezine doğru bükülme eğilimi gösterirler. Dış odak uzaklığının yaklaşık 100° olduğu noktada ise eğrisel bir yol izleyen P dalgasının ışın yolu yer kürenin çekirdeğine dokunur.



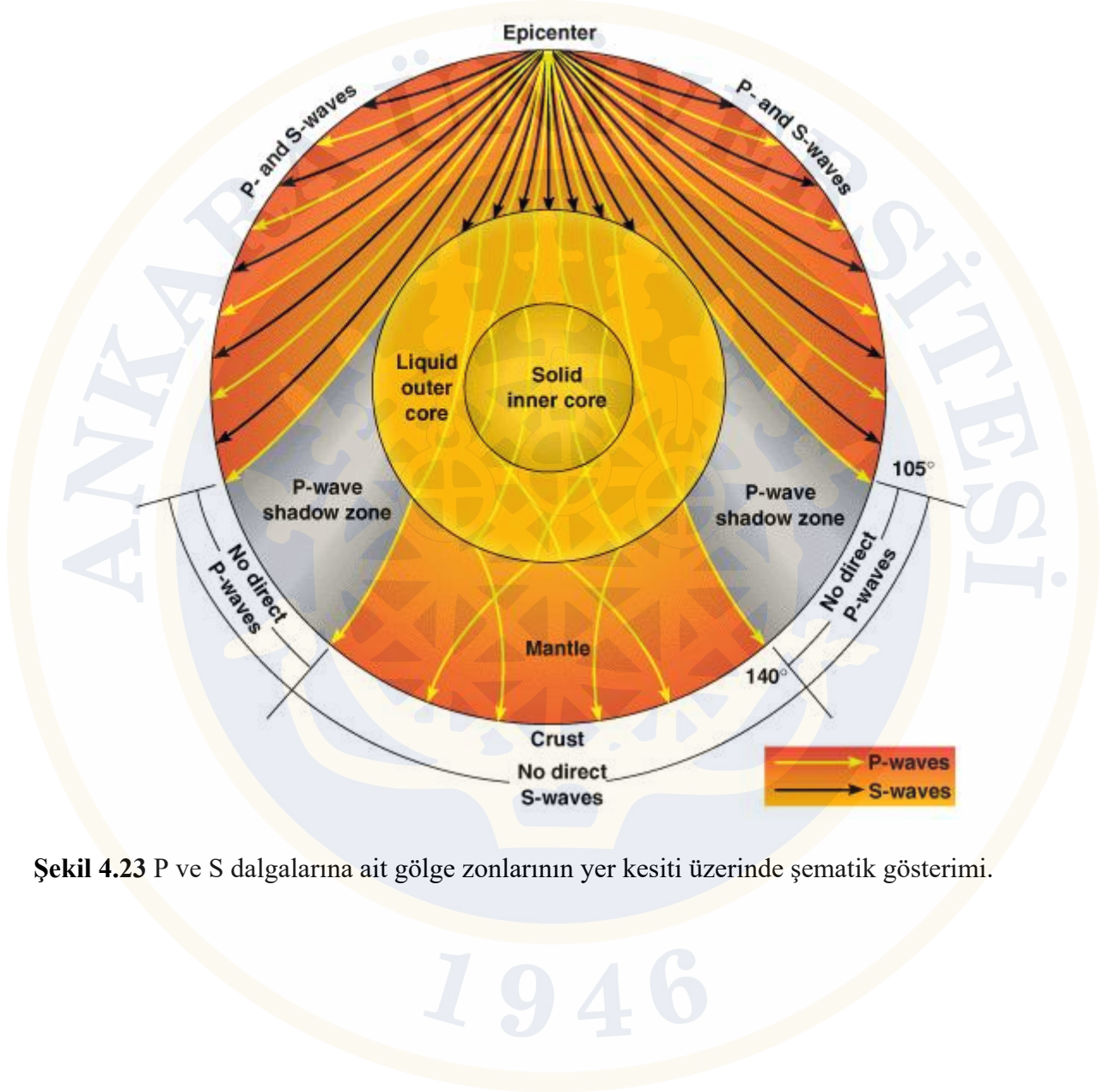
Şekil 4.21 4 Temmuz 1998 tarihinde olmuş İzlanda'daki bir depremin GRF deprem ağındaki GRA1 istasyonundaki ($\Delta = 22.5^\circ$) üç bileşenli broad-band kaydı. P, S ve yüzey dalgaları anlaşılabilir. Yatay bileşenler kaynak yönüne doğru R ile döndürülmüştür (R = Radial, T = Transversal). Kaydın tüm süresi yaklaşık 15 dakikadır.



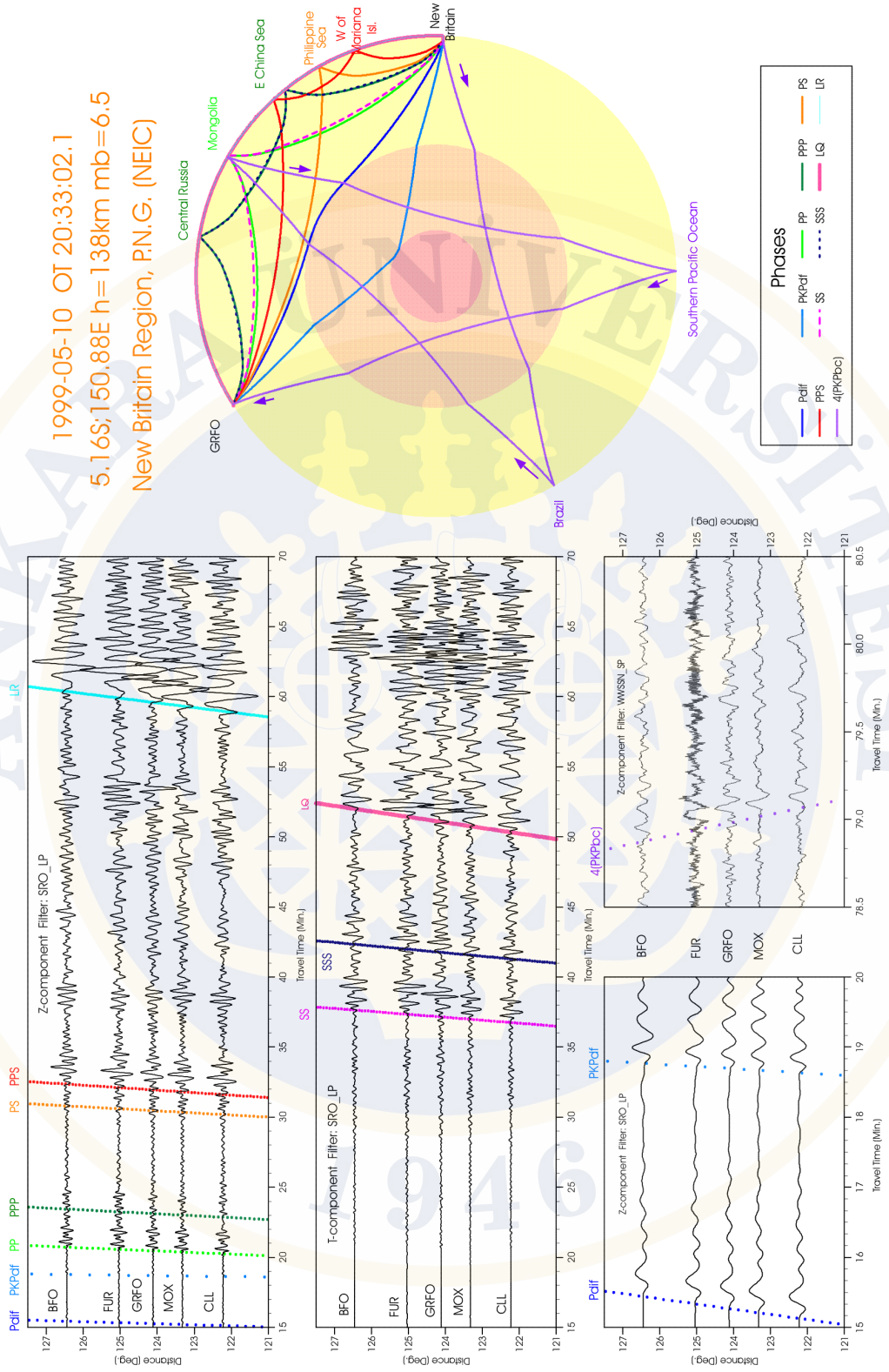
Şekil 4.22 Mantoda (M), dış çekirdekte (OC) ve iç çekirdekte (IC) ilerleyen ışın yolları. P dalgası ışın yolu düz, S-dalgası ışın yolu ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir (üstte). Kırmızı ışın yolları ise Almanya'daki üç bileşenli ve geniş bantlı MOX istasyonu tarafından kaydedilen dış odak uzaklığı $\Delta = 112.5^\circ$ olan bir depremin (altta) cisim dalgalarını göstermektedir.

Dış-odak uzaklığının $\Delta \leq 104^\circ$ olduğu mesafeye kadar P ve S dalgaları gayet iyi gözlenirken, bu noktadan $\Delta = 140^\circ$ ye kadar ise bu tür dalgaların kaydedilemedikleri gözlenmiştir. Doğrudan P- dalgalarının ulaşmadığı bu tür bölgelere P- dalgaları için “gölge zonu” denmektedir (Şekil 4.23). Bununla birlikte, ÇMS’ye 104° de gelen uzun periyotlu P-dalgaları bu noktada saçılmaya uğrayarak gölge zonu içerisine doğru yayılırlar (Şekil 4.23). Saçılmaya uğrayan bu P-dalgaları Pdif olarak isimlendirilirler. Pdif dalga fazlarının genlikleri nispeten çok küçüktür. Bu nedenle, büyük genlikli PP fazı 144° dolaylarında kolayca gözlenebilir

(Şekil 4.22 ve 4.24). $\Delta > 140^\circ$ olduğu bölgelere ise sadece derinlere doğru kuvvetli bir şekilde kırılarak çekirdeğe giren P-dalgaları ulaşabilmektedir. Bunun nedeni, en alt mantodaki 13.7 km/sn'lik P-dalgası hızının, ÇMS boyunca, en üst dış çekirdekteki 8 km/sn'lik bir hıza aniden düşmesidir. S- dalgaları sıvı dış çekirdekte ilerleyemedikleri için, bu tür dalgalar $\Delta > 104^\circ$ den sonra istasyonlara doğrudan gelememekte ancak P fazından dönüşmüş olanları kaydedilmektedir.



Şekil 4.23 P ve S dalgalarına ait gölge zonlarının yer kesiti üzerinde şematik gösterimi.



Şekil 4.24 121° ile 127° uzaklıkları arasında kaydedilen belli başlı dalga fazlar

Farklı episantr uzaklıkları için sismogramlar üzerindeki dalga fazları ve tanımlanma şekilleri izleyen paragraflarda anlatılmaktadır:

10°-25°

P ve S telesismik fazları genellikle kısa mesafelerdeki Pn ve Sn fazlarının yerini alır ancak daha önce de ifade edildiği gibi özellikle 10° to 15° arasındaki bazı kayıtlarda karışıklıklar olabilir.

25°-40°

P ve S grupları daha kolay tanımlanır, PcP, ScS, ScP fazları çoğunlukla büyük ve keskin genliklidir. Bu fazların P ve S fazlarından sonraki zaman farkları uzaklıkla azalır. ScP ve S'in seyahat zamanı eğrileri yaklaşık 38° de kesişir ve ScP, S olarak yanlış yorumlanır. S (10 sn'den daha uzun periyotlu), çoğunlukla yatay bileşenlerde düşeye göre daha büyük genliklidir. ScP ve PcS düşey düzlemde polarize olurlar. PP ve SS oluşmaya başlar.

40°-84°

P ve S fazlarının başlangıçları açıkça belirgindir, PP ve SS fazları da belirgin olmaya başlarlar, PS ve PPS uzak mesafelerde S'den sonra görünürler. P'P' 75° yakınlarında bir kostiğe (eğrisel yüzey) sahiptir; bununla birlikte genlikleri nadiren P fazından büyük olur; periyotları belirgin bir şekilde uzar; birkaç dakika sonra P'P' fazını SKPP' takip eder ve P'P' ile karıştırılabilir.

84°-105°

P'nin başlangıcı belirgindir ve bunu çoğunlukla 3-4 dakika sonra onu büyük genlikli PP izler; S dalgası grubunun açıkça belirgin olması nedeniyle bu aralıkta bunu belirlemek kolaydır ancak grup içerisindeki fazların görünümü (pattern) birçok seyahat zamanı eğrisinin kesişimi nedeniyle çok karışıktır ve değişkendir. 84°'de SKS, S'den önce gelmeye başlar; SKS, 90-95°'ye kadar genellikle S'den daha küçük genliklidir fakat sonra genlikler artmaya başlar ve 103°'nin ilerisinde yeterince büyüktür. PS, SP ve PPS fazlarının hepsi SS ve SSS kadar belirgindir. P ve K harfleri içeren tüm fazlar düşey düzlemde polarize olmuşlardır. Bazı tam transvers fazlar da aynı özelliği gösterebilir.

105°-128°

En büyük fazlar genellikle PP, SP ve SS dir. PPP, SSS, PPS, SKS ve SKKS fazları da bu aralıkta oluşmaya başlar. Büyük depremler sonucu ortaya çıkan, saçılan P ya da Pc fazları, PP fazından yaklaşık 4 dakika daha önce uzun-periyot hareketine oranla daha zayıf bir şekilde kaydedilirler. 105°'den sonra iç çekirdek sınırından yansıyan ve iç çekirdekten geçen PKiKP ve PKIKP dalgaları, kısa periyotlu ve duyarlı aletlerin kayıtlarında ortaya çıkar. Seyahat zamanı eğrileri, çekirdek ya da manto tabanına yakın saçılma içerisindeki hız değişimlerine karşılık gelen iki ya da üç koldan oluşur fakat kolayca belirlenemezler. Bolt (1964) ve Adams, Randall (1964)'ın makalelerinden de görüleceği gibi Jeffreys-Bullen tabloları, PKiKP fazlarının seyahat zamanlarını içermez.

128°-143°

Küçük genlikli PKhKP ve PKIKP dalgalarının karmaşık ilk varışları gözlenir. Bundan yaklaşık iki dakika sonra ise belirgin PP fazı, 1 dakika sonra ise SKP gelir. Bu aralık SKP fazının 132° de odaklandığı bölgeyi de kapsar. Bu uzaklıklara yakın bölgelerdeki SKP ve PKS, genellikle sismogramın ilk kısmında yer alan en büyük genlikli fazlardır. Kısa periyotlu PKKP ve SKKP varışları hariç, 135°'nin ilerisinde SKP ve büyük genlikli SS fazı arasında belirgin fazlar yoktur.

143°-160°

144° uzaklıkta PKP çok belirgin olmaya başlar. Daha uzak mesafelerde ve kısa-periyotlu duyarlı sismografların kayıtlarında bu faz art arda gelen üç ya da daha fazla gruba ayrılır. İlk grup, PKIKP, çok zayıftır ve basit bir görünümü vardır, sonra bunu daha kuvvetli PKhKP ve PKP₂ fazları takip eder. SKP, çoğunlukla büyük genlikli bir faz olarak devam eden PP tarafından örtülür. SKKS, SKSP ve PPS belirgin ve açıktır fakat 160°'ye doğru zayıflarlar. Bu nedenle, bu uzaklıklardaki en göze çarpan fazlar PKP₁, PKP₂, PP ve sonraki uzun periyotlu SS ve SSS fazlarıdır.

160°-180°

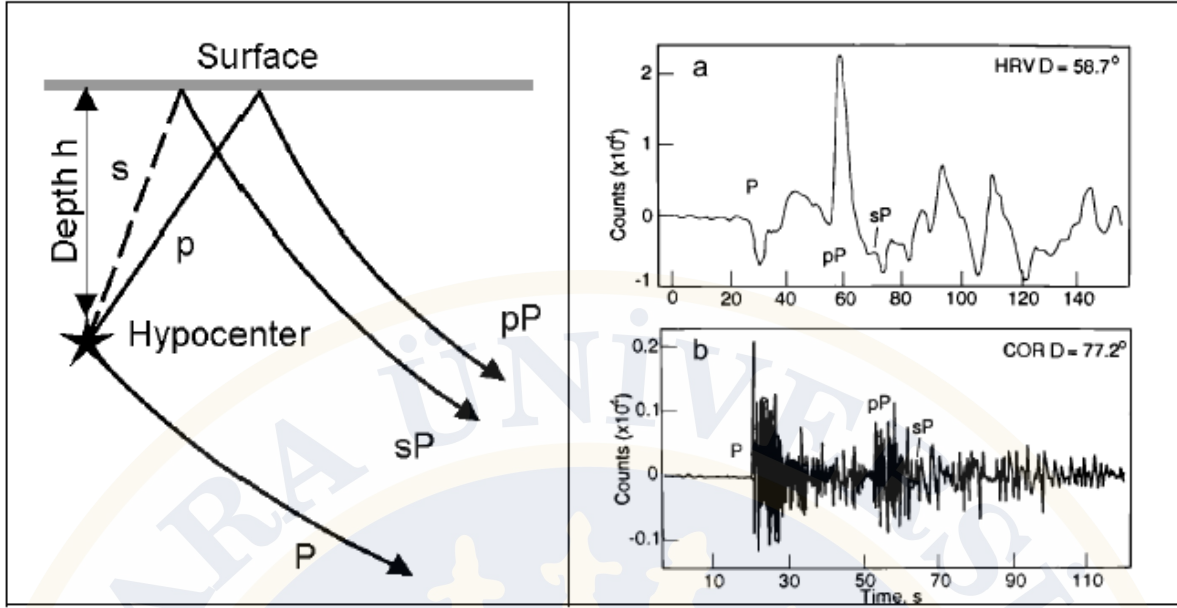
Bu uzaklıklarda kayıtlar iki ayrı dalga grubu ile karakterize edilirler. Bunlar başlangıç dolaylarındaki PKIKP, PKP₂, PP ve PPP fazları ile SS ve SSS tarafından takip edilen büyük genlikli SKKS fazıdır. İlk varışlar ile yüzey dalgaları arasındaki zaman farkı hemen hemen bir saate yaklaşır. Sismogram iki ayrı depremin kaydına benzer şekildedir.

Genellikle sismogramların yorumlanmasında kaçınılması gereken bazı hatalar şöyledir:

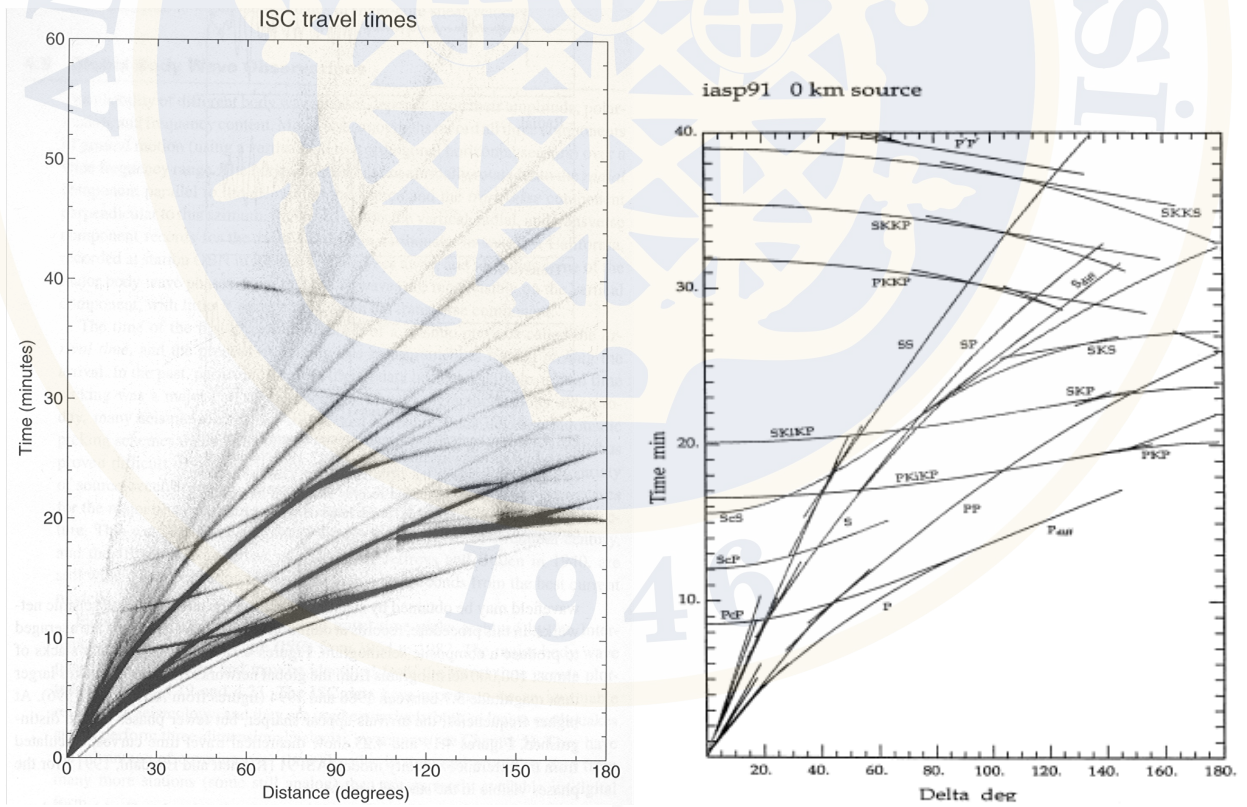
- 1) 115°-120° uzaklıkları arasında PP ve PS dalgalarının P ve S olarak yanlış yorumlanması ve bundan dolayı uzaklığın yaklaşık 80° gibi yanlış hesaplanması
- 2) 84°'den daha uzak mesafelerde SKS fazının S olarak yanlış yorumlanması.

Deprem odağının çok derinlerde olması durumunda uzak istasyonlara ilk önce odağı derinlere doğru terk eden P- dalgası ulaşır. Daha sonra ise bu dalgayı, odak derinliğine bağlı olarak yaklaşık 4.5 dakika sonra, odağı yukarıya doğru terk eden diğer fazlar takip eder. Bu fazlar yerin serbest yüzeyinden veya bir okyanus tabanından (pP, sP, pPP, sPP, pPKP, vb) veyahutta bir okyanusun serbest yüzeyinden (pwP) ya da Moho süreksizliğinin iç kısmından (pmP) yansıyan ve başka fazlara dönüşen, “derinlik fazları” olarak da adlandırılan fazlardır. Bu dalgaların yüzeye doğru giden kısa parçası genellikle p ve s gibi küçük harflerle gösterilir (Şekil 4.20 ve 4.25). Sonraki kısımları ise dalga türü ve yoluna bağlı olarak büyük harflerle adlandırılır (pP, sP, pPP, sPP, pPKP, ... gibi). Bu fazlar, kayıtlar üzerinde belirgin bir karaktere sahiptir ve genliklerinden dolayı tanımlanmaları oldukça kolaydır. Bu fazların istasyona varış zamanları ile önceki P veya S zamanları arasındaki fark, odak derinliğinin saptanmasında kullanılan bir göstergedir.

Bir sismik fazın kayıtlarda ayırtedilebilir ilk hareketi “varış zamanı” olarak isimlendirilir. Bugüne kadar dünya üzerinde kurulu bir çok istasyondan uluslar arası veri merkezlerine gönderilen çok sayıda depreme ait fazların seyahat zamanlarının dış odak uzaklığının bir fonksiyonu olarak çizdirilmesi sonucu küresel ölçekte zaman-uzaklık eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.26a'da 1964-1987 yılları arasında Uluslararası Sismoloji Merkezi'ne (International Seismological Centre -ISC) gönderilen beş milyondan fazla seyahat zamanı verisinin uzaklığın fonksiyonu olarak çizdirilmesi sonucu elde edilmiş seyahat zamanı eğrisi görülmektedir. Şekil 4.26b'de ise IASP91 modeli kullanılarak belli başlı sismik fazlar için elde edilmiş kuramsal seyahat zamanı eğrisi görülmektedir. Bu iki eğri birbiri ile karşılaştırıldığında, gözlemsel eğri üzerindeki çoğu seyahat zamanı verisinin kuramsal eğri ile birebir çakıştığı kolayca görülmektedir.



Şekil 4.25 Doğrudan gelen bir telesismik P- dalgasının farklı ışın yolları ve onun derinlik fazları (solda). 24 Mayıs 1991 Peru depreminin (odak derinliği $h = 127$ km) derinlik fazları; a) geniş bant kaydı ve b) modellenmiş kısa periyot kaydı.



Şekil 4.26 1964-1987 yılları arasında, 50 km derinliğe kadar olan depremlerin ISC tarafından toplanmış a) gözlemsel b) kuramsal seyahat zamanı eğrileri.