



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO – MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU
ODSEK ASTRONOMIJA



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	12 11 2009
ОРГАНИЗ.ЈЕД:	БРОЈ
0603	9/1567

SEIZMOLOGIJA I SOPSTVENE OSCILACIJE
UNUTAR PLANETE

- diplomski rad -

Mentor:
dr Imre Gut

Student:
Martin Mihailović

Novi Sad,
2009.

*NEIZMERNU ZAHVALNOST DUGUJEM MENTORU,
PROF. DR GUTU, NA NEISCRPNOM STRPLJENJU I
PRUŽANJU POMOĆI. ŽELEO BIH DA SE ZAHVALIM
DUŠICI I MILICI MILOŠEVIĆ NA PRUŽENOJ PODRŠCI,
KAO I NADEŽDI I OLIVERI MIJATOVIĆ KOJE SU BILE
UZ MENE.*



Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Sadržaj:

1. UVOD.....	- 5 -
2. SEIZMOLOGIJA.....	- 6 -
2.1 Tektonika i tektonske ploče.....	- 6 -
2.1.1 Transform (konzervativne) zone.....	- 9 -
2.1.2 Divergentne (konstruktivne) zone	- 10 -
2.1.3 Konvergentne (destruktivne) zone.....	- 10 -
2.1.4 Prekidi.....	- 10 -
2.2 Zemljotresi.....	- 11 -
2.2.1 Kako nastaju zemljotresi.....	- 12 -
2.3 Elementi zemljotresa	- 13 -
2.3.1 Fokalna dubina.....	- 13 -
2.3.2 Hipocentar.....	- 13 -
2.3.3 Epicentar	- 13 -
2.4 Podela zemljotresa	- 15 -
2.5 Kako se meri jačina zemljotresa	- 16 -
3. SEIZMIČKI TALASI.....	- 17 -
3.1 Tipovi seizmičkih talasa	- 17 -
3.1.1 Zapreminski talasi.....	- 18 -
3.1.1.1 <i>P</i> talasi.....	- 18 -
3.1.1.2 <i>S</i> talasi	- 19 -
3.1.2 Površinski talasi	- 19 -
3.1.2.1 Rajlijevi talasi	- 20 -
3.1.2.2 Lovovi talasi	- 21 -
4. JEDNAČINE KRETANJA <i>P</i> I <i>S</i> TALASA	- 23 -
4.1 Jednačine <i>P</i> talasa	- 24 -
4.2 Jednačine <i>S</i> talasa	- 25 -
4.3 Furijeove transformacije.....	- 28 -
5. SEIZMOLOGIJA: SOPSTVENE OSCILACIJE	- 30 -
5.1 Normalni modovi i viši harmonici.....	- 31 -
5.2 Nomenklatura i normalni modovi.....	- 33 -
5.3 Efekti rotacije, eliptičnosti i asferne strukture Zemlje.....	- 34 -
5.4 Tipovi sopstvenih oscilacija	- 35 -
5.4.1 Sferoidni modovi	- 35 -
5.4.2 Toroidni modovi	- 36 -
	- 3 -

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

5.4.3 Radijalni modovi.....	- 37 -
6. ZEMLJINE SOPSTVENE OSCILACIJE KOJE SU EKSCITOVANE U TOKU ZEMLJOTRESA U OBLASTI SUMATRA – ANDAMAN, 26. decembra 2004. godine.....	- 38 -
6.1 Tektonski podaci.....	- 39 -
6.2 Seizmografski podaci	- 40 -
6.3 Sopstvene oscilacije na drugim planetama	- 52 -
7. REFERENCE.....	- 55 -
DODATAK.....	- 56 -
Rihterova skala	- 56 -
Merkalijeva skala.....	- 59 -
Biografija:	- 61 -

1. UVOD

Ovaj diplomski rad je posvećen obradi osnovnih pojmova u seizmologiji, a naročito oblasti seizmologije koja se bavi sopstvenim oscilacijama planete koje nastaju nakon zemljotresa. Cilj rada je celovito objašnjenje gorepomenutih sopstvenih oscilacija na konkretnom primeru radi lakšeg razumevanja efekata koje proizvode.

Nakon uvodnog dela su opisani osnovni pojmovi seizmologije, zemljina unutrašnjost, mehanika pomeranja tektonskih ploča kao i vrste tektonskih raseda, odnosno granica koje razdvajaju tektonske ploče.

Pojašnjeni su zemljotresi: kako nastaju, koji tipovi zemljotresa postoje, kao i kako se mere i koje se skale koriste za određivanju jačine zemljotresa (skale su detaljno opisane u zadnjem poglavlju).

Nakon zemljotresa su predložene vrste seizmičkih talasa i načini na koje se oni prostiru, što nam je neophodno za razumevanje sopstvenih oscilacija, koje su osnova ovog diplomskog rada. Prikazane su jednačine putem kojih definišemo seizmičke talase.

Sopstvene oscilacije su ono što sledi posle svega rečenog, i objašnjene su detaljno sa dosta slika na kojima možemo videti različite tipove sopstvenih oscilacija i kako se one „vide“ na telu sfernog oblika.

Veliki, razorni zemljotres koji se dogodio u oblasti Sumatre, kao i cunami koji praktično uništio to ostrvo 2004. godine, stvaraju nam idealan primer za detektovanje sopstvenih oscilacija koje su nastale nakon tog katastrofalnog događaja. Do tada slabo detektovane oscilacije, postaju nam dostupne, i uviđamo njihov značaj, koji je pokušao da ovim diplomskim radom bude predložen nekim budućim entuzijastama koji će se detaljnije baviti ovom tematikom, koja je od velikog značaja, kako za proučavanje strukture unutrašnjosti planete, tako i za predviđanje nekih budućih zemljotresa velikih magnituda.

2. SEIZMOLOGIJA

Seizmologija predstavlja ogranak geofizike kao šire naučne discipline, izučava složene procese koji uslovljavaju pripremu i genezu zemljotresa, zatim procese stvaranja i prostiranja seizmičkih talasa kroz Zemljinu unutrašnjost, tektonske procese u žarištu zemljotresa, mehaničke efekte dejstva seizmičkih talasa na tlu i građevinskim objektima itd. Seizmologija se bavi i utvrđivanjem parametara seizmičkog hazarda (seizmičke opasnosti) širih regiona, zatim seizmičkom mikrorejonzacijom manjih prostora kao sto su lokacije građevinskih objekata, izučavanjem mogućnosti prognoze jakih zemljotresa, stvaranjem i kretanjem cunami talasa (velikih talasa koje generišu podvodni zemljotresi) itd. Ukratko, seizmologija je nauka o zemljotresima, a ime je dobila od grčkih reči *seismos* – potres i *logos* – nauka.

Seizmologija, kao posebna naučna disciplina, nastaje pojavom prvih instrumenata za registrovanje zemljotresa. Prvi kvalitativni instrumentalni zapisi zemljotresa (seizmogrami) registrovani su u XIX veku [1]. Na teritoriji Balkana prva instrumentalna registracija zemljotresa izvršena je još 1882. godine, kada je u Zagrebačkoj meteorološkoj opservatoriji instaliran jedan mehanički seizmograf. Nešto kasnije, tačnije, 1904. godine, započeta su instrumentalna seizmološka osmatranja u Sarajevu, a u Beogradu su osmatranja započeta 1906. godine, dok je u Podgorici seizmološka stanica formirana 1960. godine.

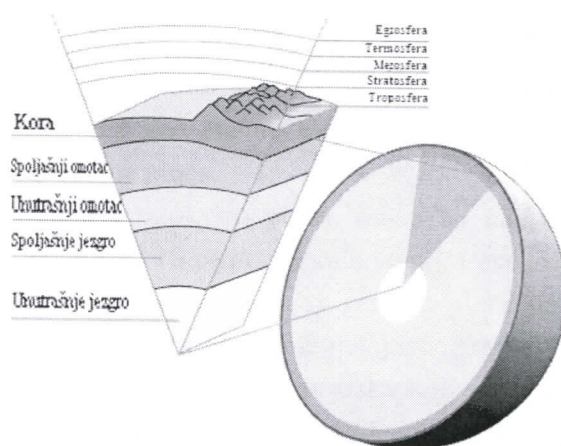
Engleski geolog Šon Mičel (1724-1767) [1] prvi je 1760. godine izneo zamisao da su zemljotresi talasi koje pokreću pomeranja masa stenja kilometrima ispod površine, a 1855. godine italijanski fizičar Luidi Palmijeri (1807-1896) [1] izradio je prvi seizmograf za proučavanje tih talasa. Danas ima više stotina seizmografskih stanica na svim kontinentima, uključujući i Antarktiku, a vibracije jačih potresa mogu se otkriti i na velikim udaljenostima, praktično svugde na Zemlji. Nešto od tih potresa može se čuti uhom. Po Prajeru, naše uho je sposobno da oseti primarne talase od 14 kHz donje granice čujnosti (do 24 kHz gornje granice čujnosti). Ali, to je mali deo mnoštva talasa i sasvim nedovoljan za predviđanje nesreće.

2.1 Tektonika i tektonske ploče

Zemljina površina se sastoji od više slojeva koji se razlikuju po strukturi i hemijskom sastavu. Postoje četiri glavna sloja u Zemljinoj unutrašnjosti, idući od gornjeg prema donjem sloju, oni su:

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

- **Kora** – je voma tanak sloj, koji je debljine oko 30 km, a ta debljina u okeanima je oko 5km,
- **Omotač** – je oko debljine oko 2900 km, i zauzima gotovo polovinu prečnika do centra Zemlje. Sastavljen je od tamnih stena peridotita.
- **Spoljašnje jezgro** – je debljine oko 2300 km i sastoji se od mešavine tečnog gvožđa (90%) i nikla (10%),
- **Unutrašnje jezgro** – se nalazi u samom centru Zemlje i ima prečnik od 1200 km, sastoji se od čvrstog gvožđa (90%) i nikla (10%).



Slika 1: presek Zemlje i raspored sfera [2]

Spoljni sloj, koji je prosečne debljine oko 70 kilometara, sastoji se od nekoliko velikih, nepravilno oblikovanih ploča, koje klize preko, ispod i pored jedna druge, a kreću se po delimično istopljenom unutrašnjem sloju.

Podela spoljnih delova Zemljine unutrašnjosti u **litosferu** i **astenosferu** zasnovana je na njihovim mehaničkim razlikama i načinu prenošenja toplote. Litosfera je hladnija i kruća, dok je astenosfera toplija i mehanički slabija. Takođe, litosfera gubi toplotu kondukcijom, a astenosfera prenosi toplotu i konvekcijom i ima, gotovo, adijabatski temperaturni gradijent [3].

Ova podela se ne bi smela mešati sa hemijskom podelom Zemlje na jezgro, omotač i koru. Litosfera se sastoji kako od kore, tako i od dela omotača. Određeni deo plašta može pripadati litosferi, ali i astenosferi u različitom vremenu, u zavisnosti od temperature i pritiska. Osnovni princip tektonike ploča je da litosfera postoji u obliku odvojenih i različitih krutih ploča koje plutaju na visokoelastičnoj astenosferi. Pomeranje ploča se odvija u rasponu od nekoliko milimetara godišnje, pa sve do pet centimetara godišnje, a grafički prikaz kretanja ploča možemo videti na slici 2.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

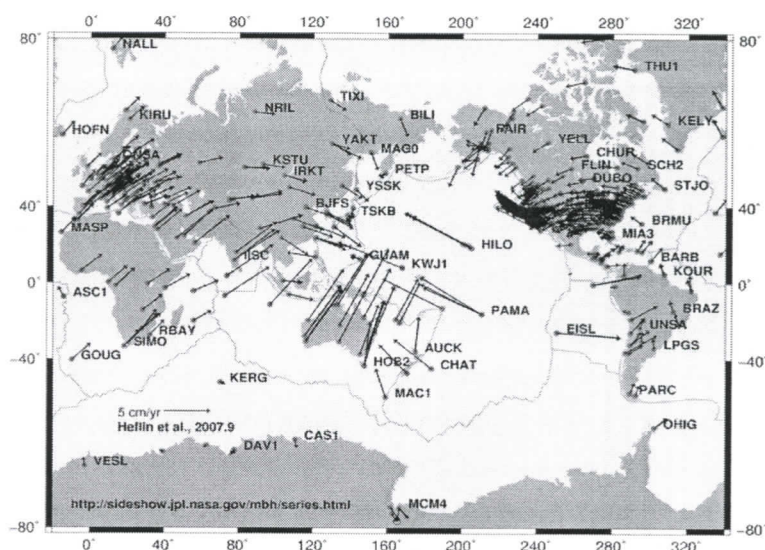
Ploče su oko 100 km debele i sastoje se od litosferskog omotača prekrivenog sa jednim od dva tipa kore: *okeanskom* korom (stari naziv *sima*), ili *kontinentalnom* korom (stari naziv *sial*). Ta se dva tipa kore razlikuju po debljini – kontinentalna kora (100 km) je znatno deblja od okeanske kore (5 km).

Litosferne ploče su velike, pokretljive ploče, nepravilnog oblika, sastavljene od stena. Manje ploče mogu biti kontinentalne, odnosno mogu činiti kontinente, ali većina ploča sadrži morsko tlo, odnosno čini morsko dno. Ploče se pomiču kao celina, usled čega dolazi do toga da je unutrašnjost ploče relativno tektonski pasivna. Postoje 13 velikih i 38 manjih ploča [4].

Većina zemljotresa se „pojavljuje“ na granicama gde se „susreću“ dve ploče, odnosno, lokacija zemljotresa, kao i pukotine koje oni proizvode, pomažu naučnicima da utvrde granice ploča.

Ploče se susreću duž granica ploča, koje su obično povezane s geološkim događajima poput potresa i stvaranja topoloških oblika kao što su planine, vulkani i okeanski rasedi. Većina aktivnih vulkana javlja se na granicama ploča.

Zemljotresi se mogu pojaviti i u okviru ploča, mada su učestaliji zemljotresi koji se dešavaju na granicama ploča. Manje od 10 posto od svih zemljotresa koji se dogode su oni koji se dogode unutar ploča. Kako se ploče pomeraju i granice ploča se menjaju u geološkom vremenu, slabije granične oblasti postaju deo unutrašnjosti ploča. Ove slabe zone unutar kontinenata mogu prouzrokovati zemljotrese usled pritiska koji nastaje na ivicama ploče ili u dubljim korama. Zemljotres u Novom Madridu 1811-1812. godine, kao i onaj koji se dogodio u Čarlstonu 1886. godine, nastali su unutar severno-Američke ploče [4].



Slika 2: prikaz pokreta tektonskih ploča prema GPS¹ [5]

¹ GPS (Global Positioning System) je satelitski sistem za navigaciju koji je razvilo Američko ministarstvo odbrane, koristi se kao pomoć pri navigaciji, kao i za pravljenje mapa, i u naučne svrhe.

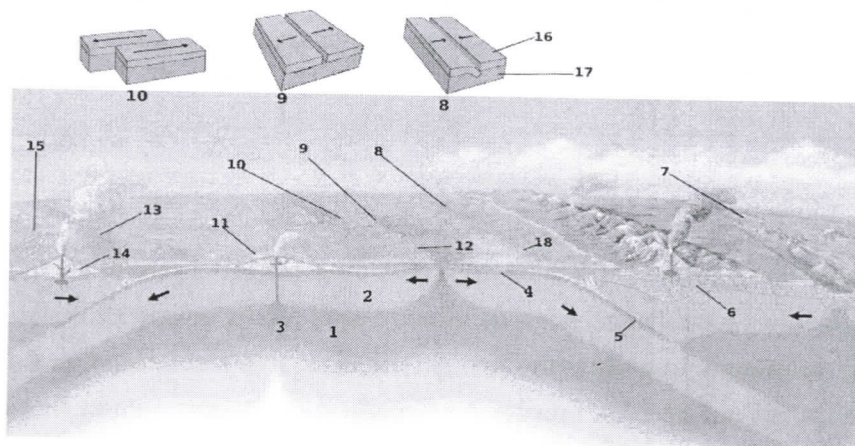
Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Postoje tri tipa granica ploča:

- **Transform** koje se javljaju na mestu gde ploče klize jedna pored druge duž transformnog raseda. Relativno pomicanje dve ploče je ili *sinistralno* (na levo u pravcu posmatrača) ili *dekstralno* (na desno u pravcu posmatrača),
- **Divergentne** se javljaju na mestu gde se dve ploče odmiču jedna od druge,
- **Konvergentne** se javljaju na mestu gde se dve ploče pomiču jedna prema drugoj obično stvarajući zonu *subdukcije* (ako jedna ploča tone pod drugu) ili *kontinentalne kolizije* (ako obe ploče sadrže kontinentalnu koru).

2.1.1 Transform (konzervativne) zone

Zbog trenja ploče ne mogu jednostavno kliziti jedna pored druge. Tačnije, pritisak se nakuplja u obe ploče sve dok ne dostignu stepen prekoračenja praga deformacije stena, kada se akumulirana potencijalna energija oslobađa u vidu deformacije na obe strane raseda. Deformacija je akumulativna i trenutna. Energija otpuštena trenutnim pritiskom je uzrok potresa, učestalog fenomena duž transformnih granica. Primer transform raseda je rased San Andreas, koji se nalazi duž Kalifornijske obale i severozapadnog Meksika. U ovim područjima zemljotresi se dešavaju na malim dubinama i formiraju relativno pravilne linearne forme.



Slika 3: Tri tipa granica ploča: (1) astenosfera (2) litosfera (3) vruća tačka (4) okeanska kora (5) subdukcijaska ploča (6) kontinentalna kora (7) kontinentalna riftna zona (mlada granica ploča) (8) konvergentna granica ploča (9) divergentna granica ploča (10) transformna granica ploča (11) vulkanski plašt (12) divergentni okeanski rased (13) konvergentna granica ploča (14) stratovulkan (15) ostrvski luk (16) litosfera (17) astenosfera (18) jarak. [6]

2.1.2 Divergentne (konstruktivne) zone

Na divergentnim se granicama dve ploče razmiču i na taj način stvaraju prostor koji se puni novim materijalom kore, koji potiče od magme koja se nakuplja ispod kore. To su mesta na kojima neizmerno velike konvekcijske ćelije donose jako velike količine vrućeg astenosferskog materijala, a magma nastaje usled smanjenja pritiska. Većina zona razdvajanja se nalazi u okeanima, a kao primere navešćemo severno Američku i Evroazijsku ploču koje su međusobno razdvojene srednje-Atlanskim grebenom. U zonama razdvajanja, zemljotresi se pojavljuju na manjim dubinama (na oko 30 km od površine).

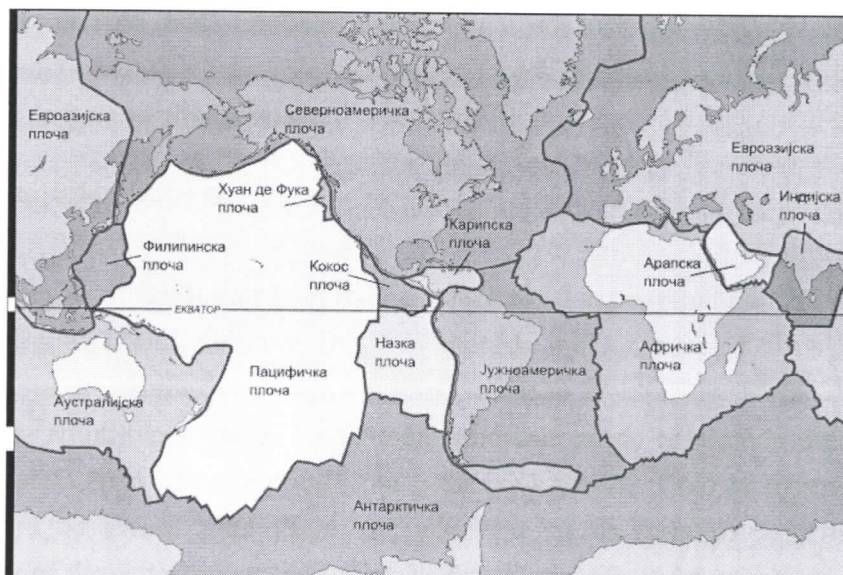
2.1.3 Konvergentne (destruktivne) zone

Priroda konvergentnih granica zavisi od tipa litosfernih ploča koje se sudaraju. Na mestu gde se gusta okeanska ploča sudara sa manje gustom kontinentalnom pločom, usled čega se okeanska ploča podvlači pod kontinentalnu, stvarajući pritom zonu subdukcije (podvlačenja). Na površini, topografski je izražaj, obično, okeanski jarak, na okeanskoj strani, a planinski venac na kontinentalnoj strani. Primer zone subdukcije okean-kontinent je područje duž zapadne obale južne Amerike gde se okeanska, Nazca, ploča podvlači pod kontinentalnu Južnoameričku ploču. U konvergentnim zonama, istopljene stene se podižu, razdvajajući ploče i dodaju nove materijale na njihove krajeve.

2.1.4 Prekidi

Prekidi su pukotine unutar Zemljine kore duž kojih se dva bloka pomeraju jedan naspram drugog. Prekidi se dele u tri glavne grupe, koje se definišu u zavisnosti kako se kreću. **Normalni prekidi** se javljaju kao posledica povlačenja ili napona. **Prekidi pod naponom** nastaju kao posledica pritiskanja ili kompresije. **Prekidi presečenih odrona** se dešavaju kao posledica bilo kakvog vida napona ili naprezanja materijala. Većina prekida duž zona razdvajanja su normalni, duž zona podvlačenja su pod naponom, a duž transform zona su presečeni odroni.

Geolozi su došli do otkrića da se zemljotresi ponavljaju duž zona prekida, koji predstavljaju neki vid „slabe tačke“ u Zemljinoj kori. Čak i ako se dogodio zemljotres u nekoj zoni prekida, nema nikakve garancije da se neće dogoditi ponovo, odnosno nema garancije da se pritisak ploča smanjio u toj oblasti. U Novom Madridu dogodio se veliki zemljotres 6. decembra 1811. godine [7], nakon čega je usledio veliki naknadni zemljotres šest sati posle inicijalnog zemljotresa.



Slika 4: zemljine litosferne ploče [8]

Raspored i veličina litosferni ploča, kontinentalnih i okeanskih, se jasno može videti na slici 4.

2.2 Zemljotresi

Zemljotres ili potres, je rezultat iznenadnog oslobađanja energije unutar Zemljine kore koji stvara seizmičke talase. Zemljotresom, potresom ili trusom nazivamo nagle, iznenadne i kratkotrajne pokrete slojeva Zemljine kore, koji u obliku udara, talasa, drhtanja i tutnjave izazivaju potrese. Reč zemljotres, koristi se da bi se opisao seizmički događaj, koji je nastao prirodnim putem (usled aktivnosti uzdužnih i poprečnih rasednih linija, pucanje pukotina u Zemljinoj kori, vulkanske aktivnosti, odroni, obrušavanje stena u podzemnim kanalima, pad meteorita, itd.), a mogu nastati i mehaničkim putem, odnosno, može ih proizvesti i čovek (nuklearni eksperimenti, eksplozije prilikom miniranja rudnika itd.).

Na površini Zemlje, zemljotresi se manifestuju tako što se tlo trese, a u nekim slučajevima i pomera. Potresi koji nastaju usled zemljotresa ponekad mogu prouzrokovati odrone i erupcije vulkana. Tačka inicijalnog pucanja tla naziva se fokus ili hipocentar.

Pri pojavi potresa, odnosno zemljotresa, razlikujemo **hipocentar**, ili centar potresa, kao mesto nastanka i početnog pokreta u dubini Zemljine kore (do 60 km, a u retkim slučajevima i do 700 km dubine); **epicentar** je mesto koje se nalazi neposredno iznad hipocentra na površini Zemlje sa najjačim udarom seizmičkih talasa. U epicentru zemljotresa javljaju se vertikalni udari

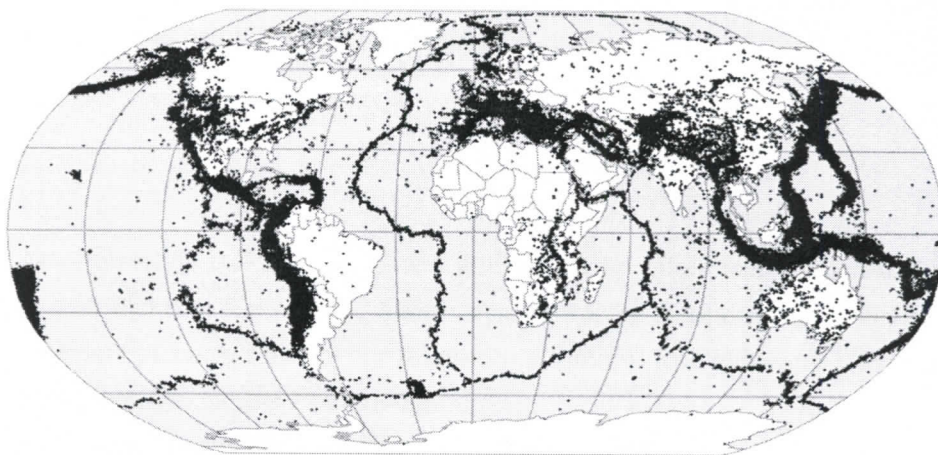
Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

sa spuštanjem i izdizanjem površine, a dalje, u okolini epicentra, udari se javljaju u obliku talasa, ili talasnih oscilacija. Kod talasa razlikujemo amplitudu kao visinsku razliku između vrha i dna, i talasna dužina koja obuhvata breg i dolinu talasa. Talasni period je vreme za koje talas pređe talasnu dužinu i brzina prostiranja talasa.

2.2.1 Kako nastaju zemljotresi

Najprostije rečeno: zemljotres je vibracija, ponekad jaka, površine Zemlje, nakon koje sledi oslobađanje energije u Zemljinoj kori. Ovaj vid energije može nastati usled naglog dislociranja segmenata kore, usled raznih dejstava, kako prirodnih tako i veštačkih. Kora se prvo savija do određene granice izdržljivosti stena, a nakon što savijanje pređe tu granicu dolazi do pucanja, usled čega se oslobođena energija prenosi na neko novo mesto. Tako nastaju seizmički talasi. Ovi talasi putuju od izvora zemljotresa duž površinu i kroz Zemlju, različitim brzinama u zavisnosti od toga kroz kakav se materijal kreću. Neke vibracije su na dovoljno visokim frekvencijama da se mogu čuti, dok su druge niskih frekvencija i mogu se detektovati samo pomoću instrumenata.

Na slici 5 možemo videti raspored zemljotresa registrovanih u periodu od 1963. do 1998. godine [9]. Ovo je NASA-ina mapa zemljotresa na kojoj se nalazi sve ukupno 358.214 zemljotresa u periodu od 35 godina.



Slika 5: karta sa svim epicentrima potresa od 1963-1998. Godine [9]

2.3 Elementi zemljotresa

2.3.1 Fokalna dubina

Fokalna dubina zemljotresa je dubina u odnosu na površinu Zemlje odakle potiče energija zemljotresa. Zemljotresi koji imaju fokalnu dubinu od 70 km se klasifikuju kao plitki, dok se zemljotresi koji nastaju na dubini od 79 do 300 km klasifikuju kao zemljotresi srednje dubine, a fokalna dubina dubokih zemljotresa dostiže i do 700 km. Fokus zemljotresa je, uglavnom, koncentrisan u kori ili gornjem plaštu. Uzimajući u obzir da je dubina na kojoj se nalazi zemljino jezgro 6.370 km, uviđamo da i najdublji zemljotresi potiču iz, relativno, plitkih delova zemljine unutrašnjosti.

2.3.2 Hipocentar

Naziv hipocentar (ili u doslovnom prevodu sa starogrčkog „ispod centra“) odnosi se na mesto odakle potiče zemljotres (naziva se još i *fokus*) nastao prirodnim putem, ili ako je nastao nuklearne eksplozije (koji u tom slučaju ima još i naziv *nulta tačka*).

Hipocentar zemljotresa se nalazi na mestu gde se nakuplja energija koja nastaje usled pritiska u stenama, a koja se oslobađa usled pucanja istih.

2.3.3 Epicentar

Epicentar zemljotresa je tačka na površini Zemlje koja se nalazi tačno iznad tačke fokusa ili epicentra, odnosno tačke iz koje potiče zemljotres. Lokacija zemljotresa se obično opisuje geografskim položajem epicentra i njegovom fokalnom dubinom. Reč epicentar vodi poreklo od grčke reči *epikentron*, *epi-* na, nakon, *kentron*-centar.

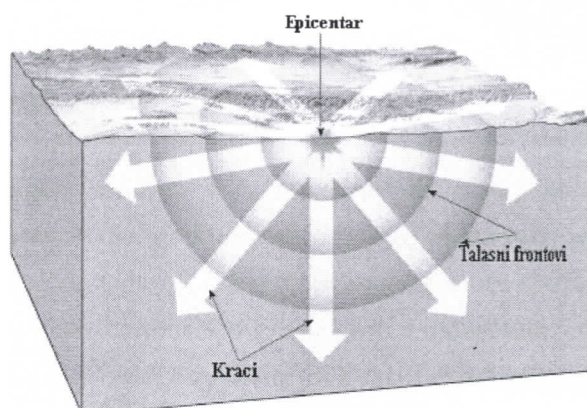
Epicentri su obično mesta gde zemljotresi nanesu najviše štete. U toku zemljotresa, seizmički talasi se prostiru sferno od hipocentra.



Slika 6: grafički prikaz elemenata zemljotresa [10]

Kada se jednom izračunaju epicentralna rastojanja iz najmanje tri seizmografske stanice, lako je doći do zaključka gde se nalazi epicentar zemljotresa.

Zemljotresi koji nastaju na dnu okeana, ponekad stvaraju talase velikih jačina koji su poznatiji kao Cunami (Japanski užasni „veliki talasi“). Ovi talasi, nastali usled zemljotresa, se kreću okeanom velikim brzinama, koje mogu dostizati i do 960 km/h, i mogu biti visine do 15 m, ili čak i veći do trenutka dok stignu do obale.



Slika 7: prostiranje seizmičkih talasa [8]

2.4 Podela zemljotresa

Zemljotresi se dele na:

1. Prema uzrocima pojave: *tektonski* (najčešći i najjači potresi izazvani tangencijalnim i radijalnim tektonskim pokretima), *vulkanski* (snažni i razorni potresi pri vulkanskim erupcijama), *urvinski* (slabiji lokalni trusovi zbog rušenja i obrušavanja zidova i tavanica podzemnih kanala i pećina), i *meteorski* (potres izazvan udarom meteorita – u Sibiru 1908. Osetio se na daljini 5200 km);
2. Prema mestu pojave – *kopneni* i *podmorski* (podmorski izazivaju morske talase visoke do 15 m, prelaze okeane brzinom do 900 km/h); (Cunami – 26.12.2004. Indijski okean);
3. Prema pravcu prostiranja – *centralni* (kružnim oblikom zahvaćene oblasti), *lateralni* (elipsastog oblika) i *linearni* ili *aksijalni* (izduženi oblik duž tektonskih rasjeda);
4. Prema načinu opažanja – *makroseizmi* se čulno opažaju, a *mikroseizmi* instrumentima. Mikroseizmi se dijele na teleseizmičke pokrete izvan makroseizmičkih oblasti i mikroseizmičke oscilacije slabih potresa;
5. Prema energiji i veličini prostiranja – *lokalni* (primjećuju se čulno do 200 km, a instrumentima do 500 km udaljenosti), *mali* (čulno se osećaju do 600 km, a instrumentima do 5000 km), *srednji* (čulno se osećaju od 300 do 1000 km, a instrumentima do 10 000), *veliki* (čulno se osećaju preko 500 km, a instrumentima do 12 000), i *svetski* (čulno se osećaju do 2000 km, a instrumentima do 20 000 km);
6. Prema veličini ubrzanja trusnih talasa.

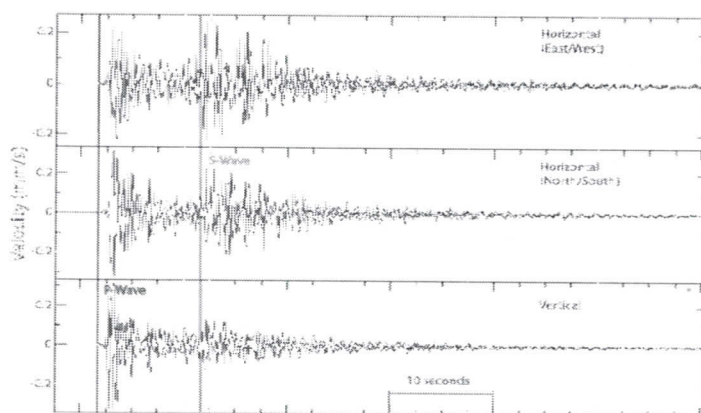
Sam proces pripreme zemljotresa traje dosta dugo, a zavisi od jačine zemljotresa koji će biti generisan. Tako na primer, zemljotres sa magnitudom 7 stepeni Merkalijeve skale biće praćen pojavom raznih fenomena (tzv. prekursora), odnosno predznaka zemljotresa u periodu od nekoliko godina pre njegovog događanja. Istovremeno, prateći fenomeni su, kao što smo već naglasili, veoma brojni, ali se ne manifestuju po nekom standardnom obrascu. Naime, izvesni fenomeni u nekim slučajevima su vrlo naglašeni, dok su u drugim njihove pojave minorne ili sasvim izostaju. Ovakvo ponašanje prekursora jakih zemljotresa obavezuje istraživače da istovremeno osmatraju što veći broj takvih fenomena i da iz njihove manifestacije tokom vremena pokušavaju da izvedu kratkoročnu prognozu sledećeg jakog zemljotresa u regionu.

Razlozi manifestacije raznih geofizičkih i geoloških fenomena u fazi pripreme zemljotresa vezani su za proces akumuliranja naponskog polja, najčešće kao posledice bočnih tektonskih pritisaka u zemljinoj kori.



2.5 Kako se meri jačina zemljotresa

Vibracije koje prouzrokuju zemljotresi se detektuju, beleže instrumentima koji se nazivaju **seizmografi**. Cik-cak linije, laički rečeno, koje dobijamo kao rezultat merenja nazivamo **seizmogram**, (možemo videti primer jednog seizmograma na slici 8), a on predstavlja promene intenziteta vibracija koje nastaju usled kretanja površine tla koja se nalazi ispod instrumenata za merenje. Iz dobijenih i obrađenih podataka, dobijenih iz seizmograma, naučnici mogu da odrede vreme, epicentar, i fokusnu dubinu, kao i tip prekida u kojem nastaje zemljotres, a isto tako mogu i da odrede količinu energije koja je proizvedena.



Slika 8: prikaz seizmograma [11]

Jačina zemljotresa se može izraziti na više načina. Magnituda zemljotresa, koja se obično izražava po *Rihterovoj skali* [3], je mera za amplitudu seizmičkih talasa. Magnituda momenta zemljotresa je mera kojom se označava količina energije koja je oslobođena u toku zemljotresa, i može biti izražena preko rezultata dobijenih iz očitavanja seizmografa. *Intenzitet*, koji se može meriti *modifikovanom Merkalijevom skalom* [3], je subjektivna mera kojom se izražava koliko je jak bio sam potres na nekoj određenoj lokaciji. Više o merenju seizmičkih talasa, kao i sklalama kojima se izražava jačina zemljotresa, možemo videti u dodatku.

Međunarodna skala jačine potresa (Merkalijeva) kreće se od I do XII stepeni, prema jačini udara i potresa. Prvi stepen je čulno neprimetan dok je XII katastrofalan. Od njega se ruše sve građevine, menja se reljef, nastaju i nestaju jezera, nastaju u reljefu ogromne pukotine, rečni tokovi menjaju pravac i dr. Potresi su na Zemlji rasprostranjeni po oblastima tzv. trusne oblasti. Seizmičke oblasti sa čestim i jakim potresima su u prostoru Tihog okeana i duž njegove zapadne i istočne obale, zatim u prostoru Sredozemnog mora i duž alpskih i himalajskih venaca planina. Penseizmičke oblasti s rijetkim i slabim trusovima su na granicama spomenutih oblasti, a aseizmičke oblasti bez potresa su vodoravni stari geološki slojevi (Kanadski štit, Ruska ploča i dr.).

3. SEIZMIČKI TALASI

Kada u unutrašnjosti Zemlje dođe do nekog naglog pomeraja unutar kore, ili ako dođe do nekog vida naglog pucanja materijala, energija koja se oslobodi tim putem stvara *seizmičke talase*, uslovno rečeno. Seizmičke talase možemo uporediti sa talasima koji nastaju na površini vode, u koju, kada bacimo neko telo, recimo kamenčić, nastaju koncentrični talasi koji se prostiru od te tačke u koju smo bacili kamenčić. Isto tako i seizmički talasi predstavljaju talase energije koja se prenosi kroz elastičnu površinu zemlje, kao i kroz unutrašnjost Zemlje i njeno jezgro, a kao rezultat zemljotresa, ili nekog vida eksplozije.

Za beleženje seizmičkih talasa koriste se seizmografi, a podatci koji se dobiju tim putem se beleže na hodogramu.

Brzina prostiranja seizmičkih talasa varira u zavisnosti od gustine i elastičnosti materijala kroz koji se prostire. Raspon brzina se kreće od 3-8 km/s u Zemljinoj kori, pa do 13 km/s kroz dublje slojeve unutrašnjeg omotača [12].

Zemljotresi stvaraju različite tipove talasa sa različitim brzinama prostiranja, koji, kada dođu do seizmičkih opservatorija, u zavisnosti od vremena koje im je bilo potrebno da pređu određeno rastojanje, omogućuju naučnicima da odrede lokaciju hipocentra. Seizmički talasi koji nastaju usled eksplozija ili kontrolisanih vibracija, su jedan od osnovnih metoda geofizičkog istraživanja tla. Seizmologija kontrolisanih izvora se koristi za mapiranje rudnika soli, prekida, antiklinala kao i drugih geoloških „zamki“ u petrografskim stenama, geološkim prekidima, tipovima stena, kao i kraterima nastalim od udara meteora .

Koristeći seizmičku topografiju u kombinaciji sa talasima zemljotresa, unutrašnjost zemlje je kompletno mapirana do rezolucije od nekoliko hiljada kilometara.

3.1 Tipovi seizmičkih talasa

Postoji nekoliko različitih tipova seizmičkih talasa, i svaki od njih se kreće na drugačiji način. Dva osnovna tipa seizmičkih talasa su *zapreminski* i *površinski talasi*. Zapreminski talasi se kreću kroz slojeve Zemlje u unutrašnjosti, dok se površinski talasi kreću po površini planete, poput talasa na vodi koje smo ranije opisali.

3.1.1 Zapreminski talasi

Zapreminski talasi se kreću kroz unutrašnjost zemlje, i stižu do površine pre površinskih talasa. Ovi talasi se mogu pojaviti u dva oblika, i to:

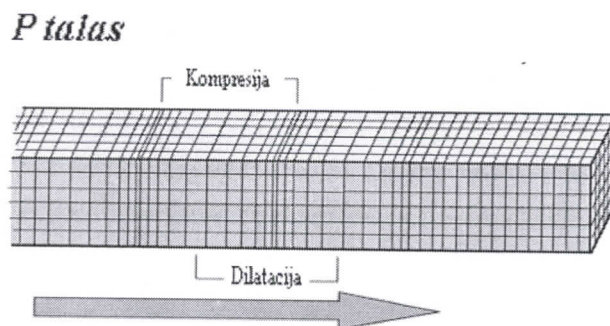
- *Kompresioni, longitudinalni, primarni ili P talasi;*
- *Transverzalni, talasi smicanja, sekundarni ili S talasi.*

Oba tipa talasa prolaze kroz unutrašnjost Zemlje, krećući se od tačke fokusa do udaljenih tačaka na površini, ali samo se kompresioni, ili *P* talasi, kreću kroz zemljino tečno jezgro. Zapreminski talasi se prostiru kroz slojeve Zemljine unutrašnjosti koji variraju po gustini i moduu².

3.1.1.1 P talasi

Prvi tip zapreminskih talasa su *P* talasi ili *primarni talasi*. Od svih vrsta talasa, *P* talasi imaju najveću brzinu, a samim tim i „stižu“ prvi do seizmičkih mernih stanica, zbog čega su i dobili ime primarni talasi. *P* talasi se mogu kretati kroz stene, ali se mogu i kretati kroz vodu, ili slojeve Zemljine unutrašnjosti koji su u tečnom stanju. Ovi talasi povlače i guraju materijale napred – nazad, poput zvučnih talasa koji guraju vazduh napred – nazad. Napravićemo poređenje sa grmljavinom usled koje se događa da nam prozori počnu vibrirati u isto vreme kad se začuje grmljavina. To se događa upravo zbog guranja i povlačenja vazduha napred – nazad.

P talasi su poznati i kao *kompresioni* talasi, što bi u prevodu značilo da se zemljište kompresuje (sabija) i širi u pravcu prostiranja talasa. Pod uticajem *P* talasa, čestice se kreću u istom pravcu kao i talasi, odnosno u pravcu u kojem se kreće oslobođena energija, a taj pravac nazivamo „pravac prostiranja talasa“.



Slika 9: grafički prikaz kretanja *P* talasa saprikazanim mestima gde se čestice sabijaju, kao i mestima dilatacije (širenja); strelica pokazuje pravac kretanja talasa [13]

² **Moduo** je mera kojom se definiše krutost izotropnog elastičnog materijala, a poznat je i kao moduo elastičnosti.

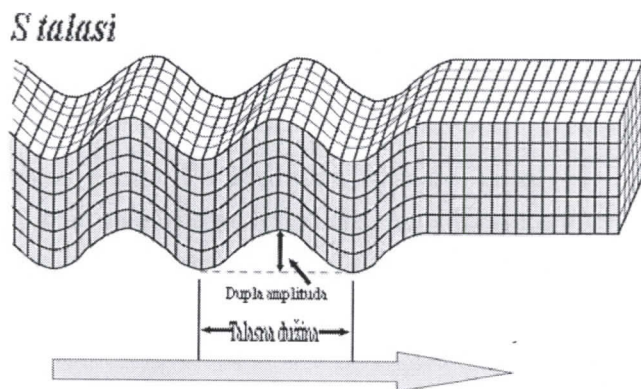
Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Karakteristične brzine kojima se P talasi šire su 300 m/s kada se kreću kroz vazduh, 1450 m/s kroz vodu i oko 5000 m/s kada se kreću kroz granit [8]. Kada nastanu kao posledica zemljotresa, P talasi su manje destruktivni u odnosu na druge talase, kao posledica manjih amplituda.

3.1.1.2 S talasi

Drugi tip zapreminskih talasa čine *sekundarni, transversalni* ili S talasi, a oni su drugi talasi koji se mogu osetiti u toku zemljotresa. S talasi su sporiji u odnosu na P talase, i mogu da se kreću samo kroz čvrste materijale, dok se kroz tečne sredine ne mogu kretati. Zbog ove osobine S talasa seizmolozi su došli do zaključka da je Zemljino spoljašnje jezgro u tečnom stanju. Zbog njihove niske frekvencije, i duge periode velike amplitude mogu biti najdestruktivniji talasi.

S talasi pomeraju čestice stena u pravcu normalnom na pravac kretanja talasa. Postoje dvatipa S talasa: SV talasi i SH talasi. Kretanje čestica kod SV talasa ima vertikalnu komponentu (gore – dole), dok kretanje čestica kod SH talasa ima horizontalnu komponentu (levo – desno u odnosu na pravac prostiranja talasa). SV talasi se još i nazivaju sporim S talasima, a SH brzim S talasima.



Slika 10: grafički prikaz kretanja čestica kod S talasa; strelica pokazuje pravac kretanja talasa [13]

3.1.2 Površinski talasi

Površinski talasi su dugoperiodični talasi koji dolaze do merne stanice nakon P i S talasa, i njihova energija je koncentrisana u blizini površine zemlje. Površinski talasi su mehanički talasi koji se prostiru kroz međusklop različitih sredina. Postoje dva tipa površinskih talasa, i to:

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

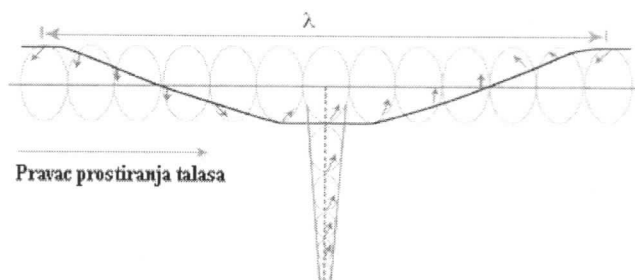
- *Rajlijevi talasi;*
- *Lovovi talasi.*

Energija dvodimenzionalnog prostiranja površinskih talasa opada sa rastojanjem r kao r^{-1} . Može se zaključiti da se na velikim rastojanjima od izvora, na seizmogramu preovladavaju površinski talasi. Geometrijsko prostiranje zapreminskih talasa u unutrašnjosti Zemlje daje nam kao rezultat da energija opada kao $1/r^2$ tako da amplituda zapreminskih talasa opada kao $1/r$. Kao rezultat razlike u geometrijskom prostiranju, amplituda površinskih talasa je, obično, mnogo veća nego kod zapreminskih talasa na većim rastojanjima od izvora (rastojanje od izvora do mesta gde se prima signal obično se naziva epicentralna razdaljina).

Još jedna bitna stvar kod prostiranja horizontalnih talasa i očuvanja energije je da su površinski talasi kratkotrajni, amplituda opada sa povećanjem dubine i teži ka nuli na veoma velikim dubinama. Površinski talasi su obično mnogo manjih frekvencija nego zapreminski talasi. Ako imaju nisku frekvenciju i veliku amplitudu, površinski talasi prouzrokuju većinu štete koju zemljotres nanosi građevinama.

3.1.2.1 Rajlijevi talasi

Rajlijevi talasi nastaju kao rezultat interakcije upadnih P i SV talasa na slobodnu površinu i kreću se paralelno sa površino. Rajlijevi talasi se kreću po površini. U izotropnim čvrstim sredinama kretanje čestica se vrši po elipsama u ravni normalnoj na površinu i paralelnoj sa pravcem prostiranja talasa (videti sliku 11). Čestice koje se nalaze dublje unutar sredine se kreću po manjim elipsama, sa ekscentričnošću koja se menja sa dubinom. Na većim dubinama kretanje čestica postaje progradno. Ovakvi navodi nam ukazuju da Rajlijeve talase možemo uočiti na vertikalnoj komponenti seizmograma. Po definiciji, Rajlijevi talasi su vrsta površinskih talasa, tako da izvori zemljotresa koji su bliže površini ekscituju jače Rajlijeve talase, za razliku od izvora koji se nalaze dublje unutar planete. Amplituda ovih talasa opada eksponencijalno sa dubinom. Sve do sada rečeno o Rajlijevima talasima dovodi nas do zaključka, da na seizmometru širokog opsega, najveću amplitudu imaju upravo Rajlijevi talasi. Rajlijevi talasi su i disperzioni talasi.

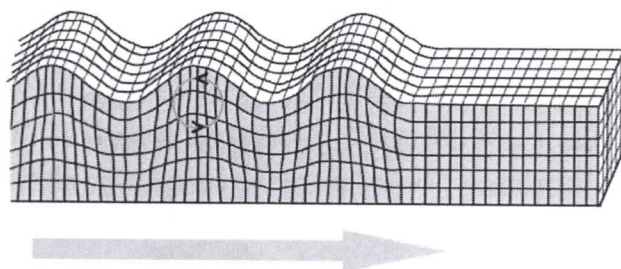


Slika 11: eliptično kretanje čestica kod prostiranja Rajlijevih talasa [14]

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Postojanje ovih talasa, je ustanovio Džon Vilijam Strut, lord Rajli 1885 godine. Sporiji su po brzini od zapreminskih talasa, grubo rečeno, 90% brzine S talasa za elastične homogene celine.

Dokazano je da su Rajlijevi talasi vidljivi u toku zemljotresa na nekim otvorenim prostorima, kao što je npr. parking gde se kola pomeraju gore dole, ali, po proučavanjima seizmologa ta pomeranja su samo prividna, usled pokretanja ljudskog oka tokom potresa gore dole.



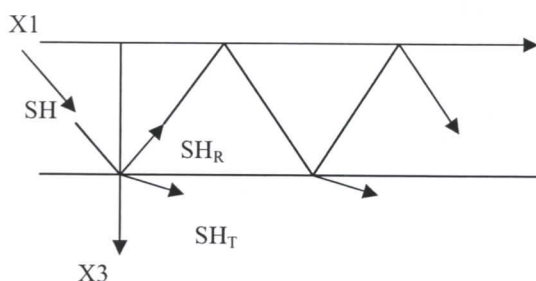
Slika 12: grafički prikaz prostiranja Rajlijevih talasa; strelica na slici pokazuje pravac kretanja talasa [13]

Intenzitet potresa kod Rajlijevih talasa na određenoj lokaciji, zavisi od većeg broja faktora:

- Veličina zemljotresa,
- Rastojanje od zemljotresa,
- Dubina zemljotresa,
- Geološka struktura kore,
- Fokalni mehanizam zemljotresa (fokalni mehanizam zemljotresa opisuje neelastičnu deformaciju u regiji nastanka zemljotresa).

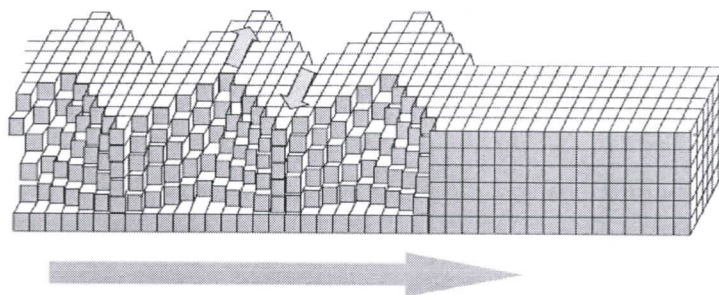
3.1.2.2 Lovovi talasi

Lovovi talasi su jedan oblik površinskih talasa, a formiraju se interferencijom većeg broja reflektovanih talasa od slobodne površine (slika 16), odnosno, oni su površinski seizmički talasi koji izazivaju horizontalno pomeranje tla u toku zemljotresa. U suštini, Lovovi talasi su horizontalno polarizovani zapreminski talasi koji se kreću na graničnoj površini elastičnih sredina. Lovovi talasi su brži od Rajlijevih talasa, i zbog toga se mogu videti na seizmogramu pre Rajlijevih talasa. Kretanje čestica unutar ovih talasa je paralelno sa površinom, ali je normalno u odnosu na pravac prostiranja. Ovi talasi su uvek disperzionni.



Slika 13: upadni SH talas udara u graničnu površinu tako da se većina energije odbija ka površini, i „zarobljava“ je. SH_R reflektovana energija SH talasa, SH_T mali deo energije SH talasa koja se prenosi kroz površinu.

Dobili su ime po A.E.H. Love-u, Britanskom matematičaru, koji je napravio matematički model talasa 1911 godine. Uobičajeno je da se oni kreću većom brzinom od Rajlijevih talasa.



Slika 14: grafički prikaz prostiranja Lovovih talasa; strelica na slici pokazuje pravac kretanja talasa [13]

Lovovim talasima treba veliki vremenski period pre nego što iščeznu zbog velike količine energije koju sadrže. Iz ovih razloga, ovaj tip talas je najrazorniji u direktnim oblastima fokusa ili epicentra zemljotresa.

U prošlosti je postojalo verovanje da psi i mačke mogu predvideti zemljotres pre nego što se dogodi, ali je utvrđeno da su oni osetljiviji na vibracije tla mnogo više nego ljudi i mogu da oseću subtilnije talase koji prethode Lovovim talasima, kao što su P i S talasi.

4. JEDNAČINE KRETANJA P I S TALASA

Postojanje P i S talasa prvi je pokazao Poason (Poisson) 1828 godine. Pokazao je da su P i S tipovi talasa, u stvari jedino rešenje jednačine talasa za beskonačnu sredinu. Rešenje jednačine kretanja u elastičnoj sredini, daje nam kao rezultat dokaz postojanja elastičnih talasa u unutrašnjosti te sredine. Talasi su fenomen koji pokazuje mogućnost prenošenja energije, bez prenošenja materije.

Da bi smo formulisali jednačine kretanja u elastičnoj, neprekidnoj sredini, primenićemo Navier – Stouksovu jednačinu koja je primena drugog Njutnovog zakona na jedinicu zapremine kontinualne sredine.

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (4.1)$$

gde je $\mathbf{v}$ brzina delića sredine, ρ je gustina delića sredine, p je pritisak (skalarni, koji je isti u svim pravcima), $\mathbf{T}$ je tenzor pritiska koji je zavisao od pravca (npr. mehanički pritisak u čvrstoj sredini) a $\mathbf{f}$ je sila (unutrašnja ili spoljašnja) koja deluje po jedinici zapremine. Jednačinu (4.1) možemo zapisati i na ovaj način:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (4.2)$$

Da bi dobili jednačine P i S talasa, vektorsko polje možemo predstaviti kao kombinaciju gradijenta nekog skalarnog potencijala i vektorskog potencijala (Helmholcova teorema, a potencijal se označava kao Helmholtcov potencijal).

$$\mathbf{v} = \nabla \Phi + \nabla \times \Psi \quad (4.3)$$

gde je Φ skalarni potencijal vektorskog polja (polja brzine), a Ψ vektorski potencijal vektorskog polja (polja brzine), odnosno, jednačina (4.3) predstavlja zbir skalarnog i vektorskog potencijala vektorskog polja.

Nakon uvođenja Helmholtcove teoreme, odnosno, nakon uvođenja skalarnog i vektorskog potencijala vektorskog polja, Navier – Stouksove jednačine dobijaju sedeći oblik:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla \Phi - \mu \nabla \times \Psi \quad (4.4)$$

Jednačina (4.4) predstavlja deformacije u homogenoj, izotropnoj sredini, kao zbir divergencije skalarnog polja i rotora vektorskog polja brzine. Deformacije unutar sredine su kako u zapremini, tako i u obliku.

Sa μ se označava moduo stišljivosti, a sa λ moduo elastičnosti, a oba ova modua predstavljaju Lameove konstante.

4.1 Jednačine P talasa

Jednačine P talasa se mogu izvesti iz divergencije Navier – Stouksove jednačine (4.4). Primenom divergencije na jednačinu (4.4), uz uslov da su λ i μ konstante, dobijamo:

$$\nabla \cdot \left[\rho \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} \right] = (\lambda + 2\mu) \nabla \cdot \nabla \Phi - \mu \nabla \cdot \nabla \times \Psi \quad (4.5)$$

Iz činjenice da je $\nabla \cdot \nabla \times \Psi = 0$ (divergencija rotora), zaključujemo da je drugi član desne strane jednačine jednak nuli, a prvi član jednačine možemo zapisati pomoću identiteta:

$$\nabla \cdot \nabla \Phi = \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right] \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \frac{\partial}{\partial x_3} \right] \Phi = \nabla^2 \Phi \quad (4.6)$$

A odatle sledi da jednačina (4.4) dobija oblik:

$$\nabla \cdot \left[\rho \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} \right] = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi \quad (4.7)$$

U homogenoj izotropnoj sredini ρ je konstantno, odnosno, možemo da ga izvučemo ispred diferencijala. Zbog linearnosti operatora, možemo zameniti mesta diferenciranja po vremenu i koordinati. Tako da korišćenjem $\Phi(x, t) = \nabla \cdot \mathbf{v}$, dobijamo:

$$\rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi \quad (4.8)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (4.9)$$

Ova jednačina predstavlja oblik standardnog rešenja oscilatorne jednačine. Kao rešenje dobijamo jednačinu oblika sinusne ili kosinusne funkcije. U toj jednačini je konstanta sa desne strane jednačine ispred izvoda po vremenu. Ta konstanta predstavlja recipročnu vrednost c^2 , tako da se brzina prostiranja P talasa može izraziti na sledeći način:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (4.10)$$

Postojanje oba Laméova parametra koji se pojavljuju u jednačini (4.10), pokazuje nam da P talasi utiču na promenu zapremine i oblika sredine. Pošto je μ karakteristika samo čvrstih sredina, a λ karakteristika i čvrstih i tečnih sredina, može se izvesti zaključak da se ovi talasi kreću kroz sredine svih agregatnih stanja.

Pošto su λ i μ konstante, dolazimo do zaključka da su primarni, P , talasi brži od sekundarnih, S talasa.

P talasi se nekad definišu i kao dilatacioni talasi, a pošto je dilatacija relativna promena zapremine, ponekad se nazivaju i talasima pritiska.

4.2 Jednačine S talasa

Jednačine S talasa se mogu izvesti primenjujući rotor na jednačinu (4.4). Talas se kreće u pravcu x ose. Promene (rotor) se odvijaju u $y - z$ ravni (slika 15). Zbog toga primenjen rotor prelazi u cirkulaciju u $y - z$ ravni (curl):

$$\nabla \times \left[\rho \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} \right] = (\lambda + 2\mu) \nabla \times \nabla \Phi - \mu \nabla \times \nabla \times \Psi \quad (4.11)$$

Pošto je cirkulacija gradijenta jednaka nuli, prvi član sa desne strane jednačine (4.11) je jednak nuli, a u homogenoj sredini gustina je konstantna, možemo zameniti mesta diferenciranju po vremenu i koordinati, tako da dobijamo:

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\mu \nabla \times [\nabla \times \Psi] \quad (4.12)$$

Koristeći identitet vektorskog računa

$$\nabla^2 \mathbf{a} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{a}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{a}) \quad (4.13)$$

Jednačinu (4.11) možemo zapisati kao:

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\mu [\nabla(\nabla \cdot \Psi) - \nabla^2 \Psi] \quad (4.14)$$

Prema osobinama operatora ∇ prvi član sa desne strane je nula, tako da dobijamo sličnu diferencijalnu jednačinu drugog reda koja opisuje kretanje poremećaja kroz homogenu sredinu, tj. dobijamo jednačinu kretanja S talasa:

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{\frac{\mu}{\rho}} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (4.15)$$

Ova jednačina predstavlja oblik standardnog rešenja oscilatorne jednačine. Kao rešenje dobijamo jednačinu oblika sinusne ili kosinusne funkcije, u kojoj je konstanta ispred izvoda po vremenu, a predstavlja recipročnu vrednost c^2 , tako da se brzina prostiranja S talasa može napisati u sledećem obliku:

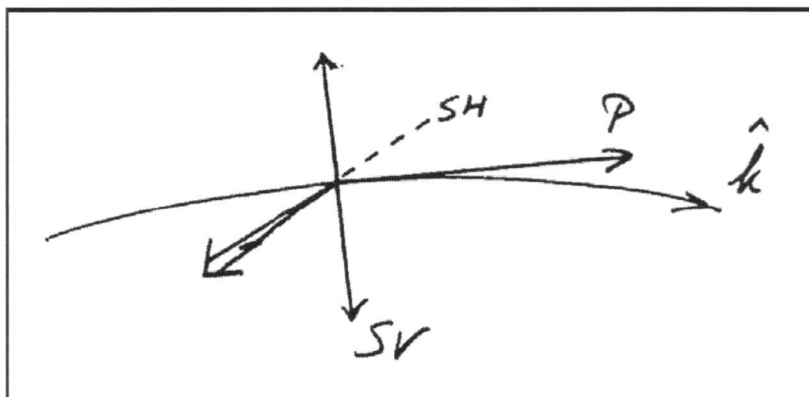
$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (4.16)$$

Prisustvo jednog Laméovog parametra, μ , koji je karakteristika samo čvrstih sredina, pokazuje nam da S talasi deluju samo na promenu oblika sredine, odnosno, da se S talasi kreću samo kroz čvrste sredine.

S talasi se nekada definišu kao talasi rotacije. Pošto je vektorski potencijal dat kao $\Psi = \nabla \times \mathbf{v}$, zaključujemo da je $\nabla \cdot \Psi = 0$. Ako divergencija vektorskog polja iščezne, vektorsko polje očuvava zapreminu.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Vektorski potencijal vektorskog polja (Ψ) je kompresionog karaktera, i menja se u ravni y - z . Sa $\hat{k}$ (na slici 15) smo definisali talasni vektor koji pokazuje pravac kretanja talasa. Nasuprot P talasima, brzina delića sredine u S talasima je normalno na $\hat{k}$; transversalno kretanje čestice se može podeliti na vertikalno polarizovane (odnosno one koji imaju vertikalnu komponentu) tzv. SV talase, i horizontalno polarizovane (odnosno one koji imaju horizontalnu komponentu), tzv. SH talase (pogledati sliku 15). Pomeraj v_y je u istoj ravni kao i potencijal SV talasa (Ψ_{SV}).



Slika 15: pravci oscilovanja čestice (delića sredine), usled P i S talasa u odnosu na smer kretanja talasa

Razlaganje vektora brzine na Φ i Ψ se može svesti na tri jednačine Φ , Ψ_{SV} i Ψ_{SH} , čija rešenja dobijamo u obliku eksponencijalnih kompleksnih funkcija vremena i koordinate.

Rešenje primarnog i sekundarnog talasa (4.9 i 4.15) tražimo u obliku

$$\Phi = \Phi_0 e^{-i(\hat{k}x - \omega t)} \quad (4.17)$$

$$\Psi = \Psi_0 e^{-i(\hat{k}x - \omega t)} \quad (4.18)$$

gde je sa ω označena kružna frekvencija talasa, a sa x rastojanje između izvora i posmatrane tačke.

Kada jednačine (4.17) i (4.18) uvrstimo u jednačine (4.9) i (4.15), rešenja u xyz koordinatnom sistemu glase:

$$\alpha^2 \nabla^2 \Phi = -\omega^2 \Phi$$

$$\beta^2 \nabla^2 \Psi_{SV} = -\omega^2 \Psi_{SV} \quad (4.19)$$

$$\beta^2 \nabla^2 \Psi_{SH} = -\omega^2 \Psi_{SH}$$

Sada imamo obične diferencijalne jednačine, koje su poznate i kao Helmholtcove jednačine, koje su lakše za rešavanje nego parcijalne diferencijalne jednačine.

4.3 Furijeove transformacije

Da bi smo iz hodograma sa kojeg se ne mogu videti osnovni sastavni delovi dobili jasnu sliku, koristimo Furijeove transformacije. Furijeova transformacija je važna matematička operacija kojom se periodična funkcija razlaže na svoje „spektralne komponente“ radi jednostavnije analize. Odgovarajuća transformacija neke neprekidne funkcije $x(t)$ data je sledećim izrazom:

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{i \cdot \omega \cdot t} dt \quad (4.20)$$

Gde su promenljive ω (ugaona frekvencija) i t (vreme), a oznaka i predstavlja imaginarnu jedinicu. Sabiranje po vremenima se vrši na celom domenu vremena.

Furijeova transformacija se koristi da bi smo dobijene rezultate merenja seizmografom mogli da pretvorimo u spektar, na kome će nam biti lakše da izdvojimo željene podatke, to jest, modove zemljotresa koje čine složen hodogram.

Furijeova transformacija koje koristimo za razlaganje hodograma imaju sledeći oblik:

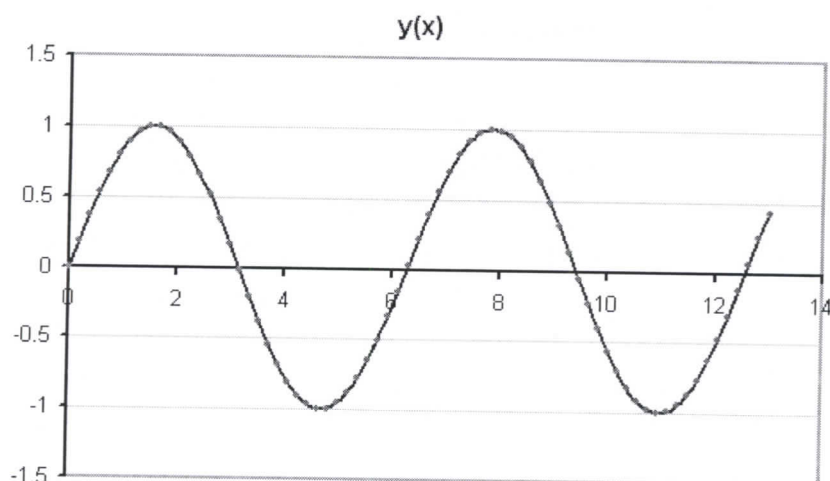
$$x(\mathbf{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\mathbf{r}, t) e^{i \omega t} dt \quad (4.21)$$

$x(r, \omega)$ je elongacija na hodogramu za datu frekvenciju ω , na stanici koja je udaljena r od zemljotresa.

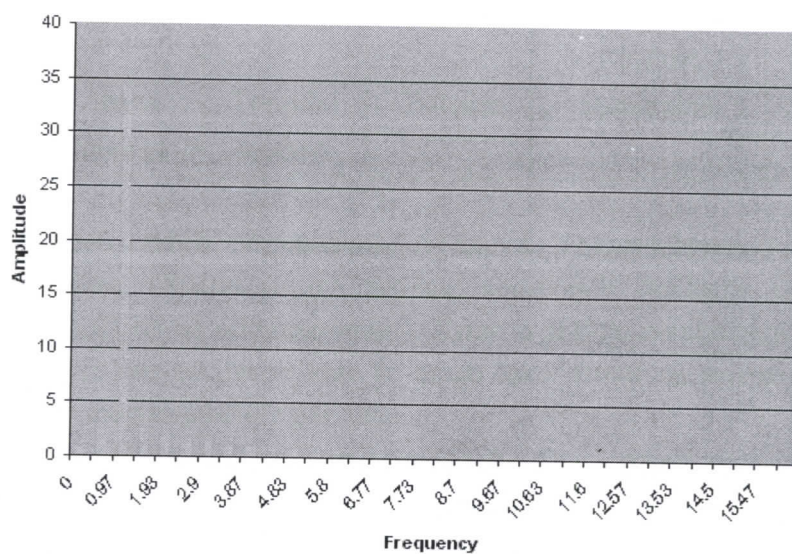
U specijalnim slučajevima, kada nam je potrebno da dobijene podatke izražene u domenu frekvencije, treba da pretvorimo u podatke u domen vremena, možemo iskoristiti furijeove antitransformacije, odnosno obrnutu Furijeovu transformaciju:

$$x(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\mathbf{r}, \omega) e^{-i \omega t} d\omega \quad (4.22)$$

Na slikama 16a i 16b možemo videti kako izgledaju podaci koji su dobijeni, kao i kako izgledaju nakon što su na njih primenjene furijeove transformacije. Najizraženiji pik je na frekvenciji od 1 mHz.



Slika 16a: primer podataka dobijenih seizmografom [27]



Slika 16b: izgled dobijenih podataka nakon primenjenih furijeovih transformacija [27]

5. SEIZMOLOGIJA: SOPSTVENE OSCILACIJE

Seizmologiju, kao nauku, možemo „rastaviti“ u tri reprezentativne discipline: površinski talasi, zapreminski talasi i normalni modovi sopstvenih oscilacija. Ove discipline se međusobno prepliću i stvaraju jednu celinu. Svaka od ovih, nazvaćemo ih disciplinama, sadrže jednačine prostiranja talasa, ali svaka od njih ima različite granične uslove. Svaka od ovih disciplina je bitna za istraživanje određenih pojava u unutrašnjosti planete.

Tabela: uopštene karakteristike delova seizmologije

Seizmički domen	Tip		Primena	Kako se beleže	Granični uslovi
Zapreminski talasi	P-SV	SH	Visoke frekvencije	Talasni oblici	Nemaju granice
Površinski talasi	Rajlijevi	Lovovi	Litosfera	Disperzija; grupne c i fazne v brzine	Međuveza
Normalni modovi	Sferni modovi	Toroidni modovi	Globalna	Spektralno	Sferni oblik planete

Kako možemo videti u tabeli, normalni modovi nam daju okvir u kome možemo predstaviti globalne seizmičke talase. Obično su ovi modovi sopstvenih oscilacija ekstremno niskih frekvencija i teško su uočljivi na seizmogramima. Samo u slučaju zemljotresa velikih energija mogu da se stvore sopstvene oscilacije koje se mogu lako očitati na seizmogramima, i to u slučajevima kada se seizmogrami beleže par dana.

Kao bilo koja ograničena sredina, Zemlja može da „zvoni poput zvona“, i nakon što se dogodi veliki zemljotres, može oscilovati u normalnim modovima sa diskretnim frekvencijama. Da bi smo bolje pojasnili prethodni iskaz, zamislimo da je elastična sfera zategnuta kao žica na gitari, što bi značilo da mogu da postoje stojeći talasi. U seizmologiji, ti stojeći talasi su poznatiji kao normalni modovi, ili sopstvene oscilacije. Ove oscilacije odgovaraju stojećim talasima površine najveće moguće talasne dužine i najniže frekvencije (perioda od oko sat vremena). Oscilacije dugih vremenskih intervala se jedino mogu izmeriti usled nastanka jakih zemljotresa, odnosno zemljotresa velikih magnituda. Postojanje normalnih modova Zemlje uočeno je početkom 19–og veka kada su matematičari (Poason i Rejli) [15] [16] proučavali prostiranje elastičnih talasa. Prvo zabeleženo postojanje takvih oscilacija je bilo 1960. godine kod nastanka velikog Čileanskog zemljotresa, na seizmogramima koji su beleženi u dugačkim vremenskim intervalima [17].

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Čitav set normalnih modova formira osnovu koja nam je potrebna da bi opisali osnovno elastično pomeranje koje se može dogoditi u unutrašnjosti Zemlje, i njegove osobine se mogu iskoristiti da bi se izračunali dugoperiodični seizmogrami površinskih talasa.

Ono što je karakteristično za normalne modove kod sopstvenih oscilacija je da je polje označeno kao zbir stojećih talasa, umesto progresivnih talasa. Teoretski seizmogrami se mogu izračunati za sferno-simetrične, ne rotirajuće, elastične, izotropne Zemljine modele sabiranjem modova na niskim frekvencijama. Na visokim frekvencijama, broj modova koji su potrebni da bi predstavili polje je toliko veliki da je tehnika sabiranja modova neprimenljiva.

Problem oscilacija elastične sfere je toliko star, da su na njoj radili i neki od fizičara XIX veka, među kojima su i Poason, Lord Kelvin, Darwin, Lamb. Lamb³ je raspravljao o različitim modovima oscilacija kod uniformne elastične sfere i dao je temelje jednačine frekvencije [18]. Klasifikovao je oscilacije sfere u „prvu“ i „drugu klasu“. Oscilacije prve vrste su poznate kao toroidalne ili torzione oscilacije, a oscilacije druge klase su poznate kao sferne oscilacije. Toroidalne oscilacije su „izvrtanja“ paralelna sa površinom sfere, i na njih ne utiče gravitacija, dok na sferoidne oscilacije utiče gravitacija (sa periodama $t > 500s$) i oni su slični P , SV i Rajlijevim talasima.

Zemlja se razlikuje od homogene elastične sfere u dva aspekta: sopstvene gravitacije, i heterogenosti prečnika. Gravitacija nema uticaj na toroidne oscilacije zato što kod njih nema divergencije i nemaju radijalnu komponentu pomeranja, tako da je raspored gustine nepromenjen. Što se tiče sfernih oscilacija, gravitacija ima veliki značaj. Lov je pokazao da gravitacija sfere koja je veličine i mase kao Zemlja i čvrsta kao čelik ima period oscilacije od gotovo jednog sata. Očigledno je, da bi se ovaj mod mogao posmatrati, potrebni su instrumenti velike osetljivosti sa većim periodama nego kod merenja seizmičkih pokreta koji se rutinski mere.

5.1 Normalni modovi i viši harmonici

Zvuk koji proizvodi zemljotres sadrži informacije o strukturama unutar Zemlje. Pošto cela planeta učestvuje u sopstvenim oscilacijama, normalni modovi su osetljivi na uobičajene mehaničke osobine i sveukupne planetarne strukture. Od posebnog značaja je da talasi niskih frekvencija moraju da dejstvuju nasuprot gravitaciji tako da beleženje moda sadrži informacije o gustini slojeva zemlje. Iz ovih razloga, normalni modovi su odigrali glavnu ulogu u razvoju referentnih globalnih modela seizmičkih osobina.

³ Ser Horas Lamb (Sir Horace Lamb) (1894 – 1934) je bio britanski matematičar i autor nekoliko važnih tekstova koje su imale uticaj na klasičnu fiziku. Zaslužan je i za otkriće i definisanje elastičnih talasa čija se kretanja čestica nalaze u ravni koja je određena pravcem prostiranja talasa i normalnom ravni.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Drugo važno svojstvo normalnih modova je to da, pomeraj bilo kojeg broja modova se može sabrati kao Furijeov niz, sa određenim vrednostima faze i amplitude stojećih talasa za različite frekvencije, da bi se konstruisao sintetički seizmogram (tehnika koja je poznata kao sabiranje modova). Prostiranje zapreminskih i površinskih talasa se može simulirati odgovarajućim brojem osnovnih i viših modova. Površinski talasi su određeni njihovim frekvencijama ω i talasnim brojem k (pogledati čvrsto poglavlje). Nismo uzeli u obzir granice sredine osim kod slobodne površine, i frekvencija je uzeta kao nezavisna promenljiva.

Da bi smo uvideli kompletnu sliku problema, uzmimo u obzir običnu situaciju vibracija žice koja se drži na oba kraja. Kretanje u žici mora zadovoljiti 1D jednačinu talasa, sa faznom brzinom c :

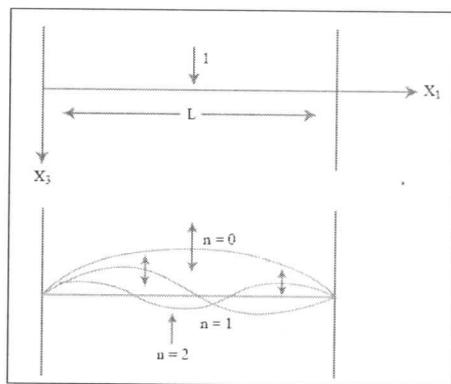
$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} \quad (5.1)$$

Opšte rešenje ove jednačine bilo bi

$$u(x,t) = Ae^{i\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)} + Be^{i\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)} + Ce^{-i\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)} + De^{-i\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)} \quad (5.2)$$

Konstante A – D mogu se odrediti iz graničnih uslova, tj. od fiksiranih krajeva,

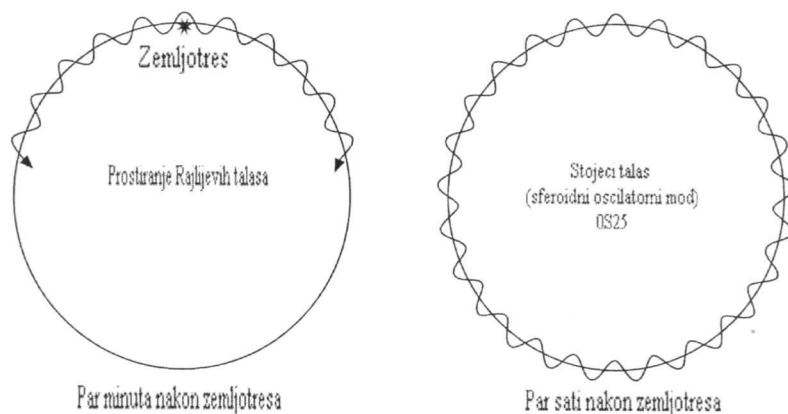
Ove diskretne svojstvene funkcije, označene sa ω nazivaju se svojstvene frekvencije datog ograničenog sistema.



Slika 17: žica (struna) zategnuta na dva kraja. Osnovni mod je dat sa $n = 0$; $n=1,2,\dots$ su viši harmonici, odnosno broj međučvorova [14].

5.2 Nomenklatura i normalni modovi

Normalni modovi sopstvenih oscilacija su pravo rešenje jednačina talasa u sfernom koordinatnom sistemu i nomenklatura modova se, dakle, bazira na sfernim harmonicima. Prisjetimo se da su gravitacioni i magnetni potencijal, u stvari, zbrovi mododva sa različitim koeficijentima (Gausovi koeficijenti u slučaju magnetnog potencijala). Izraz sume modova je sličan izrazima sferne harmonije koja se koristi kod objašnjavanja geoida i magnetnog polja.



Slika 18: nastajanje sopstvenih površinskih oscilacija interferencijom površinskih talasa

Postoj dva osnovna tipa sopstvenih oscilacija. Prvi tip oscilacija se naziva torzionim (ili toroidalnim) oscilacijama a označavaju se sa T . Toroidalni modovi su pokreti nastali u unutrašnjosti planete, a kretanja su paralelna sa površinom planete. Analogni su po načinu oscilovanja delića sredine sa SH i Lovovim talasima. Kod ovi modova nema promene gustine, i nema poremećaja u gravitacionom polju. Laički rečeno, toroidalne modove možemo opisati kao „uvrtanje“ polulopti. Ako pogledamo sliku 20, možemo videti kako se polulopte „uvrću“ u suprotnim smerovima, a ako imamo dve „lopte“ (manja unutar veće) vidimo da se one uvrću u suprotnim smerovima. Ako pogledamo kako se sopstvene oscilacije toroidalnih modova prostiru duž prečnika planete, možemo uočiti da imaju sličnosti sa S talasima, odnosno, delići sredine se kreću se u pravcu normalnom na prečnik.

Za razliku od toroidalnih modova, sferoidni modovi, koje označavamo sa S , su u potpunosti radijalna kretanja. Sferoidne modove možemo laički opisati kao izdužavanje i skupljajnje lopte (videti sliku 19). Ako pogledamo slučaj kada imamo loptu unutar lopte, možemo videti da se unutrašnja lopta skuplja (ili širi) u smeru suprotnom od spoljašnje lopte. Sferoidni modovi su, ako posmatramo njihovo oscilovanje duž prečnika, slični P talasima, odnosno, kreću se u pravcu prečnika planete.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Instrumenti koji su napravljeni za merenje malih fluktuacija u gravitacionom polju ne mogu zabeležiti toroidne oscilacije, ali zato mogu da zebelež sferoidne oscilacije.

Tabela: periode oscilacija nekih normalnih modova

Mod	Perioda (s)	Mod	Perioda (s)
${}_0S_0$	1277.52	${}_0T_2$	2636.38
${}_0S_2$	3223.25	${}_0T_{10}$	618.97
${}_0S_{15}$	426.15	${}_0T_{20}$	360.03
${}_0S_{30}$	262.09	${}_0T_{30}$	257.76
${}_0S_{45}$	193.91	${}_0T_{40}$	200.95
${}_0S_{60}$	153.24	${}_0T_{50}$	164.70
${}_0S_{150}$	66.90	${}_0T_{60}$	139.46
${}_1S_2$	1470.85	${}_1T_2$	756.57
${}_1S_{10}$	465.46	${}_1T_{10}$	381.65
${}_2S_{10}$	415.92	${}_2T_{40}$	123.56

Prethodna tabela nam predstavlja neke od posmatranih modova. Normalni modovi sa najdužim periodama su sferoidni modovi ${}_0S_2$, koji imaju periodu od oko 54 minuta. U poslednje 4 decenije identifikovani su mnogi modovi.

5.3 Efekti rotacije, eliptičnosti i asferne strukture Zemlje

Degeneracija normalnih modova postoji samo u slučaju elastične sfere. Uzimajući u obzir rotaciju Zemlje, eliptičnost, trodimenzionalne heterogene brzine, kao i gustine materijala, degeneracija će biti uklonjena i dobijamo niz oscilacija veoma bliskih frekvencija, a to nazivamo razdvajanjem normalnih modova. Ako imamo jedan pik na spektru to nazivamo singletom. Kada imamo više pikovo sa veoma bliskim frekvencijama, to nazivamo multiplet, a u slučaju da imamo zamrljane vrhove, to nazivamo traka. Dakle, možemo posmatrati oštre vrhove na dobijenom spektru, a možemo i posmatrati široke ili zamrljane vrhove oko očekivane frekvencije normalnog moda.

Normalni modovi se mogu posmatrati pomoću seizmograma koji se beleže nekoliko dana, a na dobijena merenja se primenjuju Furijeove transformacije, radi lakšeg očitavanja rezultata. Razdvojen (ili Furijeov) spektar zemljotresa dovoljno velike jačine, će nam u tom slučaju pokazati individualne pikove, a svaki od njih može biti povezan sa određenim specifičnim modom.

5.4 Tipovi sopstvenih oscilacija

Slično kao što smo podelili površinske talase na Rajlijeve i Lovove, tako ćemo podeliti i sopstvene oscilacije u dva tipa:

- *Sferoidni*, koji su analogni *P-SV* sistemu Rajlijevih talasa, kao i promena zapremine, i imaju komponentu kretanja paralelnu prečniku na rastojanju od centra planete, označavaju se sa ${}_nS_l$
- *Toroidni* ili torzioni modovi koji uključuju transversalno kretanje paralelno sa površinom planete, a analogno je *SH* i Lovovim talasima, nema promene u zapremini; označavaju se sa ${}_nT_l$.

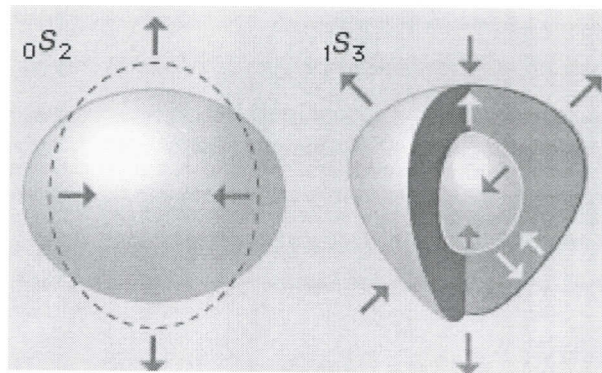
Sa indeksom n označavamo broj čvorova duž poluprečnika planete, a naziva se još i brojem viših harmonika, a sa indeksom l označavamo broj čvorovnih ravni na površini Zemlje.

Sferoidni modovi su brojniji u odnosu na toroidne modove. Postoje neki modovi koji su dobili posebna imena, kao što je to slučaj kod ${}_0S_0$, koji je dobio ime „mod disanja“. To ime je dobio zbog toga što se cela zapremina sfere periodično širi i skuplja, a prvi put je uočen tokom zemljotresa u oblasti Sumatre 2004. godine, o čemu će kasnije biti reči. Drugi takav mod, koji je dobio svoje ime, je ${}_0S_2$ koji je nazvan „ragbi lopta“ zbog svojih ekstrema prilikom sopstvenih oscilacija koji izgledaju kao lopta za ragbi. Dva moda koja ne postoje su ${}_0S_1$ i ${}_0T_1$, iz tog razloga što bi za postojanje prvog, sferoidnog moda moralo da dode do pomeranja centra gravitacije, koje se ne može desiti, a za postojanje toroidnog moda bilo bi neophodno da se cela sfera uvija napred i nazad, što je kontradiktorno održanju uglovnog momenta rotirajuće sfere.

Gravitacija ne utiče na toroidno kretanje, ali dugoperiodične sferoidne oscilacije uključuju snažan rad nasuprot gravitaciji; posmatranje ovih modova nam može otkriti informacije o planetarnoj strukturi i sveukupnoj gustini.

5.4.1 Sferoidni modovi

Sferoidni modovi uključuju rešavanja potencijala Φ . Sa povećanjem l u blizini Zemljine površine sferoidni modovi se javljaju kao Rejljevi talasi (sa razlikom u tome što su Rejljevi talasi progresivni, a sopstvene oscilacije stojeći talasi). Sferoidni modovi koji imaju $n > 0$ nazivamo višim harmonicima. Sferoidni modovi se mogu osetiti kroz celu Zemlju, uključujući i tečno i čvrsto unutrašnje jezgro. Za sferoidne modove, broj viših harmonika n ne mora biti u vezi sa sveukupnim brojem linija čvorova duž obima zemlje.



Slika 19: primeri oscilovanja nekih sferoidnih modova [19]

Ako pogledamo sliku 19, vidimo dva sferoidna moda, ${}_0S_2$ i ${}_1S_3$. Vidimo da kod drugog moda imamo dve sfere, i da svaka osciluje u različitom pravcu. Dolazimo do zaključka da sa indeksom n , koji je u ovom slučaju 1, označavamo broj čvorova, odnosno preklapanja, duž unutrašnjosti sfere. Sa indeksom l , u ovom slučaju, označavamo broj čvorova na površini same sfere.

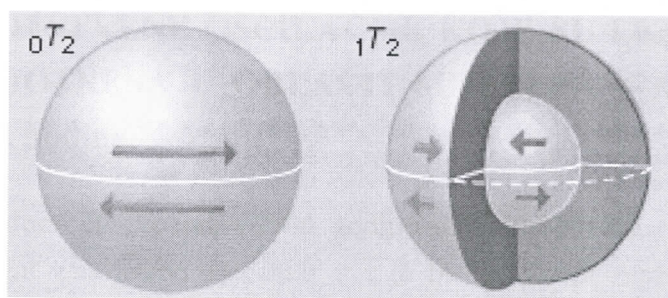
5.4.2 Toroidni modovi

Toroidni modovi su slični modovima homogenog sfernog tela. Uviđamo sličnost sa Lovovim površinskim talasima kao i SH zapreminskim talasima koje možemo odvojiti od Rajlijevih talasa kao i $P-SV$ zapreminskim talasima. Helmholtcova jednačina [20] je data u sledećem obliku:

$$(\nabla^2 + k^2)T = 0 \quad (5.3)$$

Gde je k talasni broj ($k = \frac{\omega}{l}$), a T predstavlja toroidalni potencijal (skalarni potencijal vektorskog polja sa sfernim koordinatama (r, θ, φ, t)).

Helmholtcova jednačina se koristi za rešavanje fizičkih problema vremena i prostora, a koji uključuju parcijalne diferencijalne jednačine.

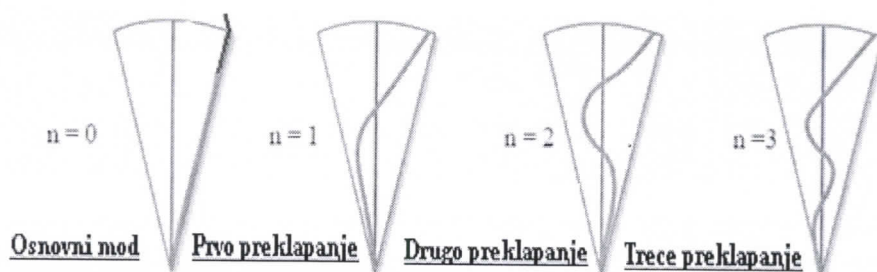


Slika 20: primeri oscilovanja nekih toroidnih modova [19]

U slučaju toroidnih modova, vidimo na slici 20, da sa indeksom n označavamo broj čvorova u unutrašnjosti sfere. Vidimo da kod moda ${}_1T_2$ imamo dve sfere, čije se polulopte kreću u suprotnim smerovima, kako međusobno, tako i u odnosu na drugu sferu. Sa indeksom l smo označili broj na koji je sama sfera izdeljena.

5.4.3 Radijalni modovi

Radijalni modovi su podgrupa sferoidnih modova koji imaju $l = 0$, $m = 1$ i $n = 0, 1, 2, \dots$ radijalni modovi nemaju linije čvorova duž površine Zemlje. Sa m se označava azimutni broj ($-l \leq m \leq l$), odnosno, za svako l postoji $2l+1$ azimutni broj za linije čvorova u pravcu θ . Ovi modovi obuhvataju Zemljino širenje i skupljanje ili takozvani „mod disanja“. Za radijalne modove n predstavlja broj sfera duž prečnika zemlje. Radijalni modovi predstavljaju sopstvene oscilacije duž radijusa.

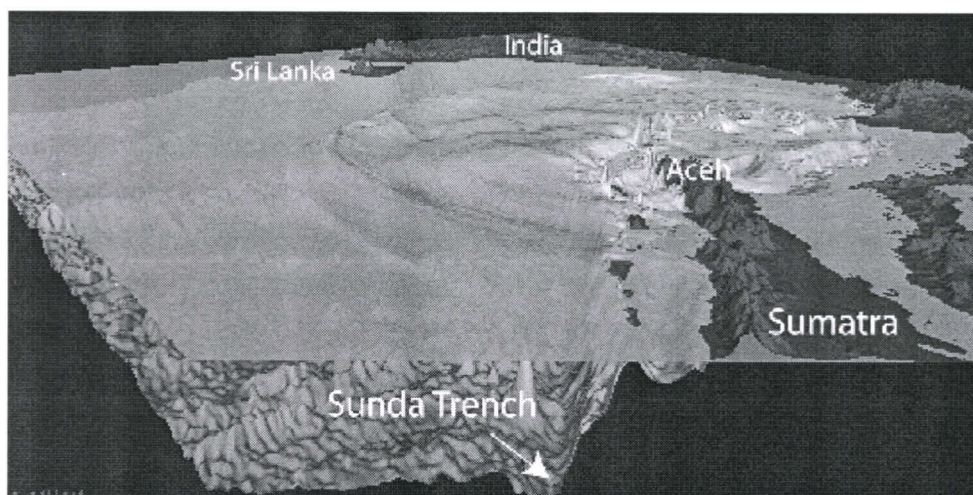


Slika 21: tipovi radijalnih modova i preklapanja [14]

U odsustvu osetljivih dugoperiodičnih seizmometara, normalni modovi sopstvenih oscilacija Zemlje ostali su neotkriveni sve dok Beniofov seizmometar nije zabeležio signal niske frekvencije koji je nastao usled zemljotresa koji se desio na Kamčatki 1952. Godine [21]. Sa globalnom mrežom visoko osetljivih seizmometara širokog opsega mnogi modovi su do sada posmatrani i identifikovani.

6. ZEMLJINE SOPSTVENE OSCILACIJE KOJE SU EKSCITOVANE U TOKU ZEMLJOTRESA U OBLASTI SUMATRA – ANDAMAN, 26. decembra 2004. godine.

Zemljotres koji se desio 26. decembra 2004. godine u 00:58:53 UTC u Sumatra- Andaman području je bio podvodni zemljotres, epicentar mu je bio u blizini zapadne obale Sumatre (3.32°N i 95.85°E), naneo je veliki udarac našoj planeti, i proizveo je ceo spektar vibracionih sopstvenih oscilacija, koje su se u periodama $T > 1000$ s, mogle posmatrati narednih par nedelja seizmičkim merenjima širokog opsega na globalnom nivou. Zemljotres je nastao duž zone podvlačenja u kojoj je Indijska ploča (okeanska ploča) se podvukla pod mikro ploču Burme, a koja je deo Sunda ploče. Granica između pločama je označena na slici kao Sunda rov (Sunda Trench).



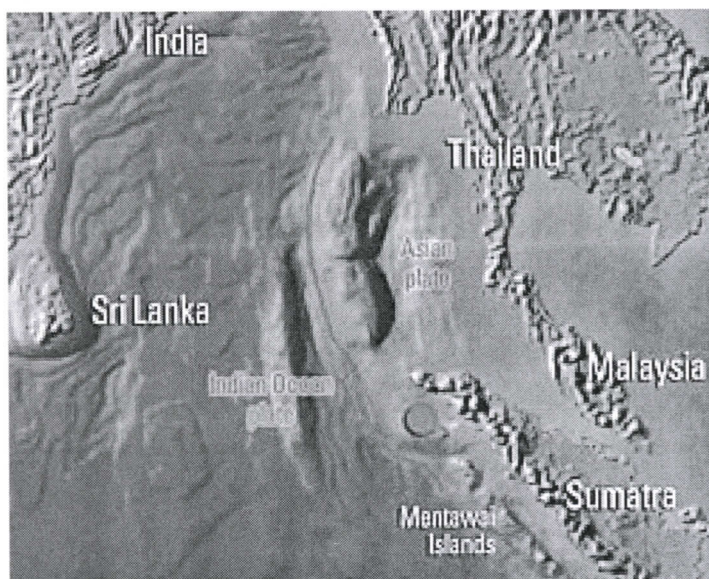
Slika 22: talas koji je nastao nakon zemljotresa. [22]

Sa magnitudom 9.2 stepena Merkalijeve skale [22], drugi je po jačini zemljotres koji je zabeležen seizmografom. Imao je najveći period pucanja, između 8.3 i 10 minuta, i prouzrokovao je vibracije usled koji je cela planeta vibrirala po 1 cm i pokrenuo je druge zemljotrese u oblastim na drugom kraju planete (kao npr. na Aljasci) [23].

Odnosi frekvencija i slabljenja sopstvenih oscilacija Zemlje nam daju neka ograničenja što se tiče unutrašnjosti naše planete, sastava, kao i same dinamike, tako da nam analiza dugoperiodičnih seizmičkih beleženja ovakvih događaja omogućava novi uvid u strukturu Zemlje.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Bio je to prvi po redu zemljotres velikih magnituda koji je bio zabeležen i izmeren raznim digitalnim tehnologijama koje nisu bile dostupne do tada. Sumatra – Andaman zemljotres je zabeležen globalnom mrežom digitalnih seizmometara.



Slika 23: mapa na kojoj je prikazan epicentar zemljotresa (crvena tačka), crvena linija označava granice tektonskih ploča [25]

6.1 Tektonski podaci

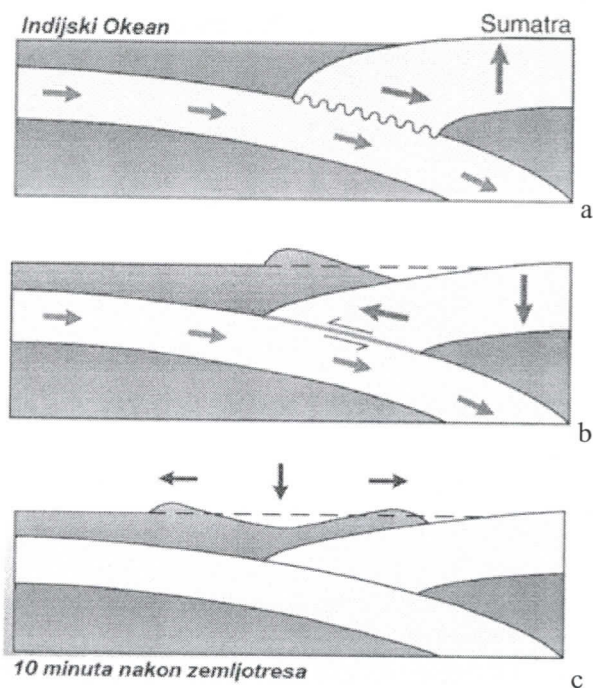
Po procenama, oko 1600 km linije pucanja duž zone subdukcije Indijske ploče je bilo povučeno pod ploču Burme za oko 15 m. Podvlačenje se desilo u dve faze u periodu od nekoliko minuta, i to:

- Seizmografski podaci ukazuju da je u prvoj fazi došlo do pucanja u zoni dugoj 400km i 100 km širokoj ispod površine okeana. Pucanje je imalo brzinu od oko 2.8 km/s, i počelo je duž obale Aceh – a (nalazi se na severnom obodu ostrva Sumatre) i nastavilo se u pravcu severozapada u periodu od 100 sekundi. [29]
- Nakon prve faze, došlo je do pauze od oko 100 sekundi, a nakon toga se pucanje nastavilo severno u pravcu Andamana i Nikobarskih ostrva. Brzina je bila manja, oko 2.1 km/s. Pucanje u pravcu severa je trajalo oko pet minuta i nastavilo se do granice ploče koja se tu menja iz subdukcije u transform granicu. [29]

Indijska ploča je deo velike Indo – Australijske ploče, koja obuhvata Indijski okeana i Bengalski zaliv. Kreće se u pravcu sever – istok brzinom od 6 cm/god. Indijska ploča se graniči

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

sa Burmanskom pločom (koja se smatra delo velike Evro – Azijske ploče) Sunda rovom. Indijska ploča se podvlači pod Burmansku ploču na kojoj se nalaze Nikobarska ostrva, Andamanska ostrva i ostrvo Sumatra. Ploča se podvlači sve dublje i dublje usled čega dolazi do porasta pritiska.



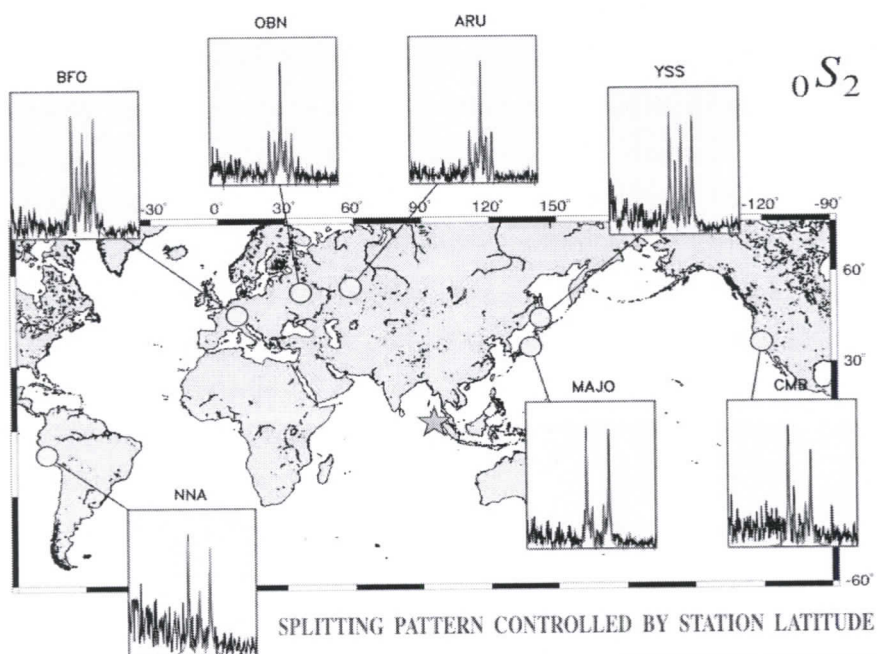
Slika 24: geneza cunamija; a) dugotrajni proces akumulacije napona u kontaktnoj zoni kolizionih tektonskih ploča, b) nastanak zemljotresa – pucanjem stena u kontaktnoj zoni i izdizanje vodene mase iznad zone hipocentra, c) započinje kretanje stvorenih talasa ka obalama. [10]

6.2 Seizmografski podaci

Sumatra - Andaman je bio prilika za testiranje seizmografske tehnologije širokog opsega na globalnom nivou. Podaci koji su dobijeni sa 400 FDSN⁴ stanica bili su dovoljno dobrog kvaliteta da bi bilo moguće posmatrati sopstvene oscilacije. Raspored stanica za merenje je takav da su mogle da pojedinačno izoluju pojedinačne vibracije [24].

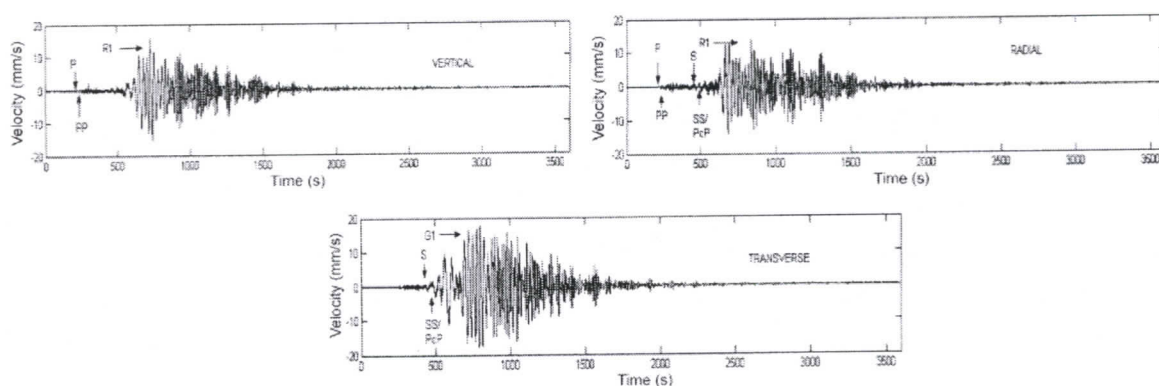
⁴ FDSN (Federation of Digital Broadband Seismographic Networks) – udružena mreža digitalnih seizmografa širokog opsega.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete



Slika 25: registrovani i izdvojeni sferoidni mod ${}_0S_2$ u raznim mernim stanicama [26]

Zabeleženi seizmogrami koji su izdvojeni su iskorišćeni za dobijanje brzine pomeranja tla usled zemljotresa. Horizontalne komponente su rotirane koristeći smer suprotan od azimuta (back azimuth) da bi se transformisale u radijalne i transversalne komponente, kao što je prikazano na slici 26. Označene su faze koje su od značaja za proučavanje uključujući Rajlijeve talase (R1) i Lovove talase (G1), a na seizmogramu zapreminski talasi imaju dominantnu brzinu i zato stižu prvi.[24].

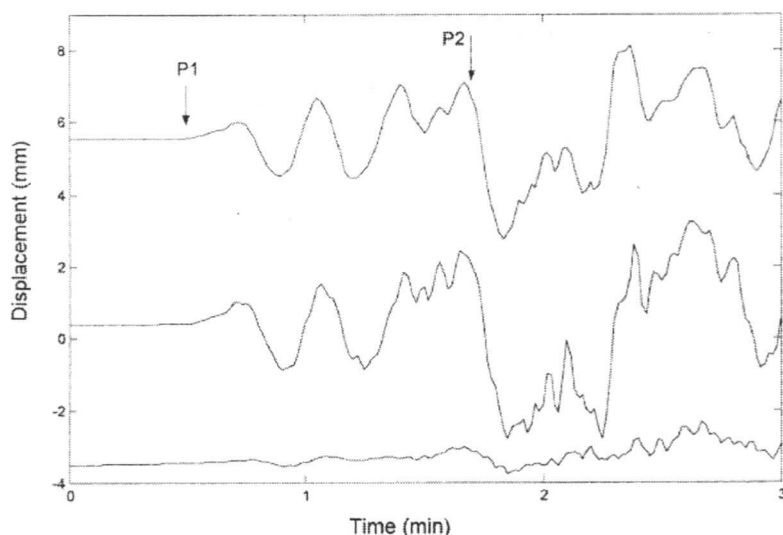


Slika 26: vertikalne, radijalne i transversalne komponente brzine kretanja tla, koje su zabeležene seizmografom širokog opsega sa frekvencijom uzorkovanja od 20 Hz. Vreme početka merenja je 01:00:08.32 (UTC) [24]

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Zabeležene brzine su međusobno integrisane da bi se izračunalo pomeranje tla, za koje je grupa P talasa prikazana na slici 26. Vreme stizanja P talasa do merne stanice zavisi od momenta nastajanja (pucanja) i mesta izvora zemljotresa. Na slici 27 su označene $P1$ i $P2$ faze. Faza $P1$ označava inicijalno pucanje, dok je fazom $P2$ označeno sledeće veće pucanje. Vremenska razlika između $P1$ i $P2$ faze je 72s. Inicijalno pucanje se dogodilo duž severne obale Sumatre, a sledeće veliko pucanje se dogodilo nešto malo južnije od ostrva Nikobar. Pretpostavlja se da se pucanje nastavilo dalje u pravcu sever – severozapad.

Dogodio se i veliki broj naknadnih potresa upravo u oblasti sever – severozapad (2.8°N – 14.2°N) što je odprilike rastojanje od 1300km [24]. Ovo pokazuje orijentaciju pucanja u toku glavnog potresa. Merna stanica u Kharagpuru je locirana u pravcu prostiranja pucanja, tako da su tu zabeležene snažne faze P talasa .

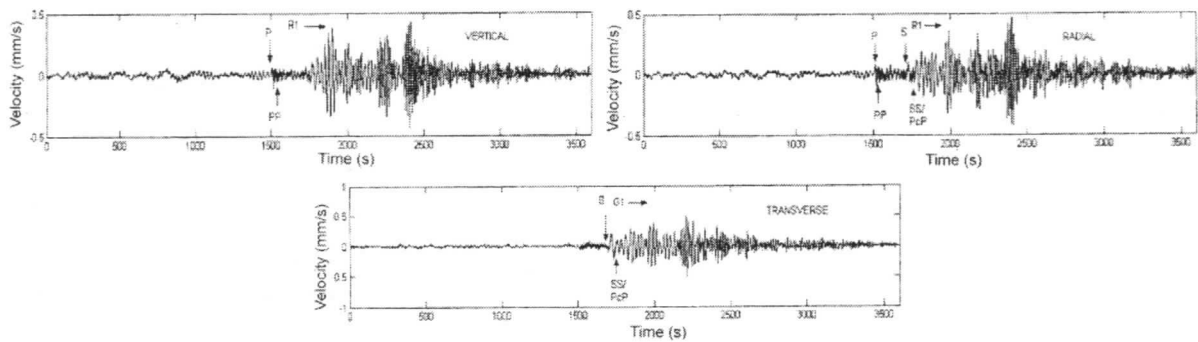


Slika 27: grupa P talasa u vertikalnoj, radijalnoj i transverzalnoj komponenti pomeranja tla zabeležena seizmografom širokog opsega sa frekvencijom uzorkovanja od 1 Hz, a nastali usled glavnog potresa.

Vreme početka beleženja 00:03:03na mernoj stanici u Kharagpuru (Indija) (UTC). [24]

Najjači naknadni potres magnitude 7.1 (USGS) dogodio se istog dana u 04:21:29 (UTC) sa epicentrom koji se nalazio na 6.98°N , 92.94°E , na nekih 511 km severno – severozapadno od glavnog potresa [24]. Vertikalne, radijalne i transverzalne komponente brzine pomeranja tla za ovaj naknadni potres su prikazane na slici 28.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete



Slika 28: vertikalna, radijalna i transversalna komponenta brzine kretanja tla zabeležena seizmografom širokog opsega sa frekvencijom uzorkovanja od 20 Hz za najjači glavni potres. Vreme početka merenja 04:00:13.87 (UTC). Faze od većeg značaja su označene. Podaci sa merne stanice u Kharagpuru (Indija) [24]

Podatci dobijeni beleženjem glavnog i naknadnog potresa su iskorišćeni da bi se dobili pomeranje tla, brzina i ubrzanje, a čije su maksimalne vrednosti date u tabeli.

Tabela: vednosti brzine, ubrzanja i pomeraja za glavni i naknadni potres

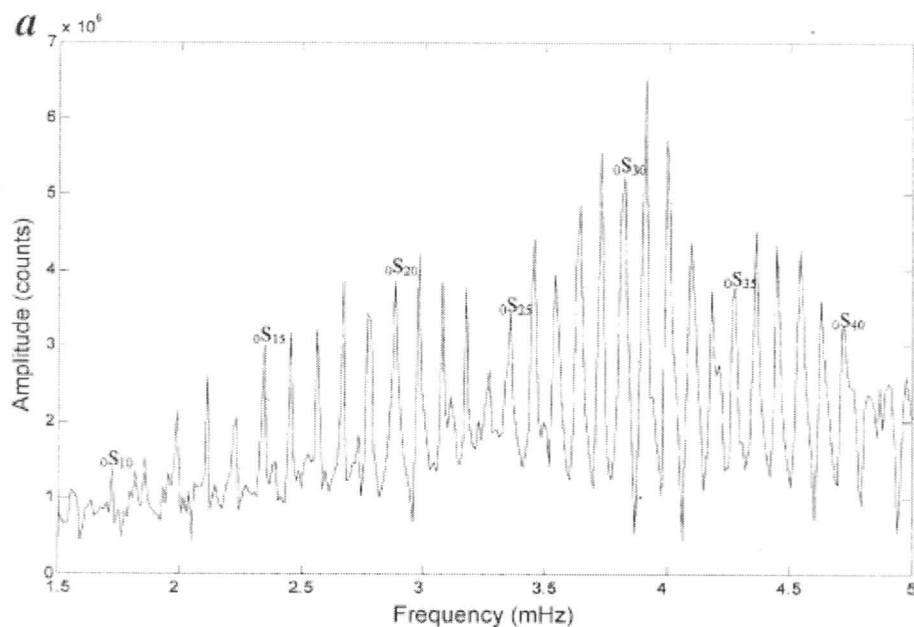
	Glavni zemljotres			Najveći naknadni potres		
Maksimalna vrednost	Vertikalna	Radijalna	transverzalna	Vertikalna	Radijalna	transverzalna
Maksimalno pomeranje (mm)	61.58	56.55	99.43	1.27	1.32	1.73
Maksimalna brzina (mm/s)	15.36	12.69	17.67	0.44	0.46	0.51
Maksimalno ubrzanje (mm/s ²)	4.70	6.53	14.72	0.20	0.21	0.20

Kada nastanu seizmički pokreti usled velikih zemljotresa, stojeći talasi, ili kako se još nazivaju sopstvene oscilacije se stvaraju kao diskretne svojstvene frekvencije. Ove oscilacije se izražavaju funkcijom sfernih harmonika ${}_nY_l$ (Y može biti S ili T), gde l predstavlja uglovni broj a n broj nultih prelazaka duž prečnika. Sferoidni modovi se označavaju kao ${}_nS_l^m$ a toroidni modovi se označavaju kao ${}_nT_l^m$. Fundamentalni modovi sopstvenih oscilacija odgovaraju broju $n = 0$.

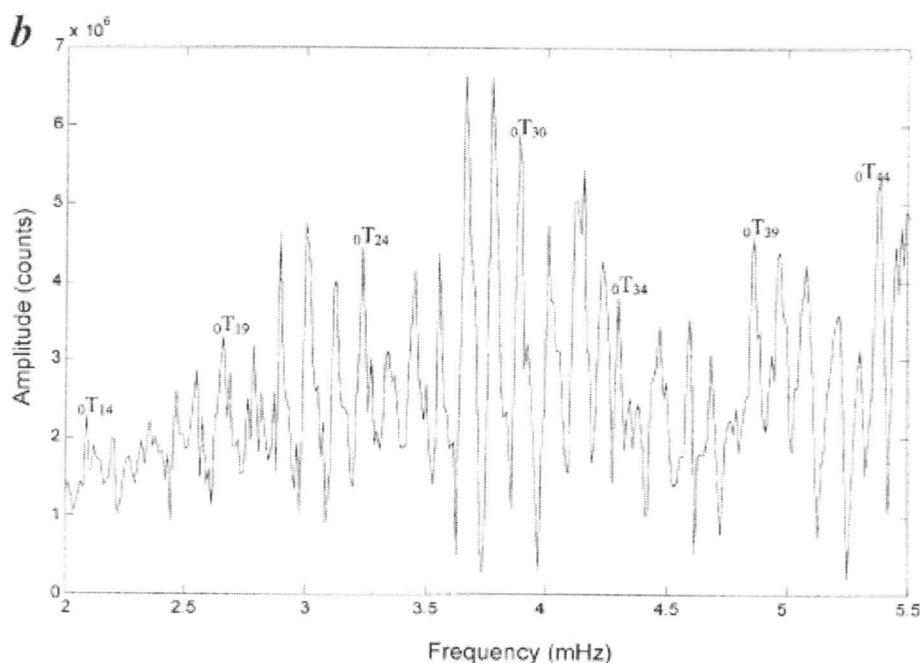
Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Generalno, ovi modovi imaju energiju koja je koncentrisana u omotaču, sa energijom zapreminskih talasa koja je raspoređena u dubljim slojevima omotača nego što je to slučaj kod energije površinskih talasa. Kako vrednost l raste, energija površinskih i zapreminskih talasa se koncentriše u pravcu površine. Za $l > 20$, fundamentalni sferoidni modovi interferiraju tako da proizvode osnovne modove Rajlijevih talasa. Viši harmonici ($n > 0$) sferoidnih kretanja uključuju energiju koja je nastala u unutrašnjosti zemlje, uključujući i spoljašnje i unutrašnje jezgro. Za Zemlju koja je sfernog, nerotacionog, elastičnog i izotropnog tipa, sa frekvencijama l i n koje su konstantne, te frekvencije imaju istu vrednost m , i takvi modovi se označavaju samo sa uglovnim i radialnim brojevima, odnosno ${}_nS_l$ i ${}_nT_l$.

Za analizu sopstvenih oscilacija analizirani su podaci koji su dobijeni u okviru 20 h sa frekvencijom uzorkovanja od 0.1 Hz. Amplituda spektra vertikalne komponente pokazuje pikove amplitude pomoću kojih se očitavaju fundamentalni sferoidni modovi ${}_0S_l$, za $l=9$ do 43 kao što vidimo na slici br. 29a. Amplituda spektra transvezalne komponente koja je prikazana na slici 29b pokazuje toroidne modove sa vrednostima l od 14 do 44 [24].



Slika 29a: amplituda spektra koji je zabeležen u okviru 20 h, vertikalne komponente glavnog zemljotresa koja pokazuje osnovne sopstvene sferoidne oscilacije [24].



Slika 29b: amplituda spektra koji je zabeležen u okviru 20 h, transversalna komponenta glavnog zemljotresa, koja pokazuje jasne sopstvene toroidne oscilacije [24].

Predstavljena analiza nam omogućava da podelimo geometriju pucanja ploča u dve velike oblasti, prvo koje se desilo duž severne obale Sumatre, dok je drugo pucanje počelo 72 s kasnije duž južnog oboda Nikobarskih ostrva. Seizmičke faze koje su identifikovane u ovoj analizi važe i za događaj koji je zabeležen na 2237 km od epicentra sa azimutom od 155° . Sopstvene oscilacije, odnosno fundamentalni sferoidni i toroidni modovi, su detektovani putem seizmografa širokog opsega u istraživačkoj stanici u Karagpuru.

Sferoidni modovi ${}_0S_2 - {}_0S_5$ sopstvenih oscilacija Zemlje, koji su nastali usled zemljotresa su zabeleženi na CDSN (China Digital Seismograph Network), i možemo ih videti na slici 30. Uporedivši dobijene modove sa teoretski izračunatim modovima sopstvenih oscilacija, došlo se do zaključka da imaju slične periode. Fenomen spektralnog razdvajanja je jasno uočen na ${}_0S_2$, ${}_0S_3$, ${}_0S_4$, ${}_2S_1$ i ${}_1S_2$ modovima sopstvenih oscilacija. Posebno je bitno da je mod ${}_2S_1$ zabeležen po drugi put. Simuliran je singlet ${}_0S_2$ moda na sedam CDSN stanica [23], na osnovu fokalnog mehanizma i seizmičkog momenta sile izvora zemljotresa.

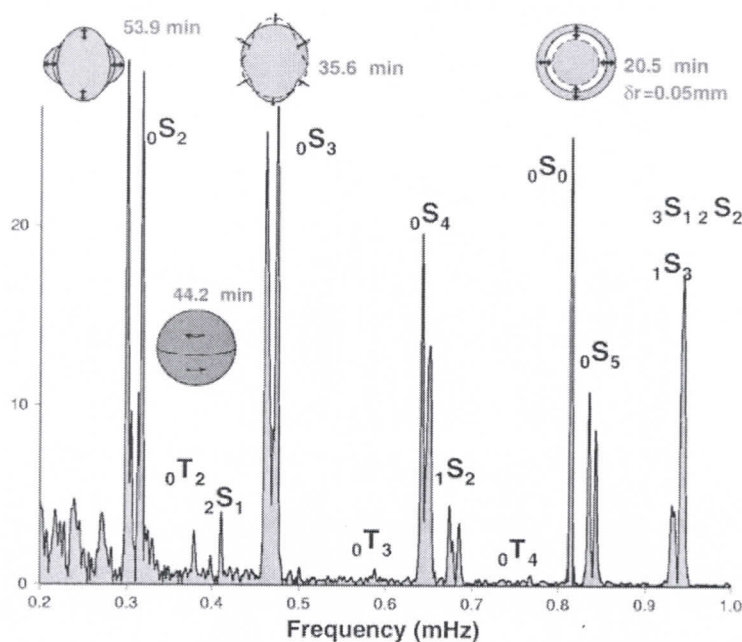
Najjači zemljotresi nam omogućuju najdetaljnije podatke o Zemljinoj unutrašnjosti, otkrivajući nam dešavanja koja su do tada bila predviđana teorijski. Uparivanjem sferoidnih i toroidnih modova zajedno sa Koriolisovom silom, daju nam formu hibridnih vibracionih modela. Hibridni toroidni modeli mogu da poseduju i vertikalnu komponentu vibracije, osobinu koju poseduju samo sferoidni modeli. Parovi modova ${}_0S_1 - {}_0T_1$ u rasponu vremenskih perioda od 300-

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

500 s, a koji su sličnih frekvencija ispod 1mHz, su slabog intenziteta, i nije ih bilo moguće izmeriti seizmometrima sve do Sumatra-Andaman zemljotresa.

Na slici 30 možemo videti modove sopstvenih oscilacija koji su zabeleženi.

Prvo što možemo uočiti na ovom spektru je da su S modovi predominantni u odnosu na T modove, odnosno da su njihovi intenziteti višestruko veći u odnosu na T modove. Vidimo da je prvi mod koji se pojavljuje ${}_0S_2$ i to kao multiplet, isto kao i mod ${}_0S_3$, koji su, u suštini i najzastupljeniji. Perioda pojavljivanja moda ${}_0S_0$ je 20,5 minuta, dok su periode modova ${}_0S_2$ i ${}_0S_3$ 53,9 minuta, odnosno 35,6 minuta, respektivno. T modovi su pretežno singleti, i kao što je već rečeno, slabijeg su intenziteta, i uglavnom su se pojavili samo ${}_0T_n$ modovi, odnosno ${}_0T_2$, ${}_0T_3$, i ${}_0T_4$ modovi. A kod S modova uočavamo da je zabeležen čak i ${}_1S_2$ mod, koji je nešto slabije izražen, kao i mod ${}_2S_1$, ${}_1S_3$, ${}_3S_1$, ${}_2S_2$. Zadnja tri navedena moda su imala gotovo istu frekvenciju između 0,9 i 1,0 mHz.



Slika 30: Šematski prikaz sopstvenih oscilacija ekscitovanih tokom zemljotresa u oblasti Sumatra – Andaman superpozicioniranjem na spektru koji je beležio vertikalna seizmička kretanja 240 sati u stanici CAN (Kanbera, Australija) [23].

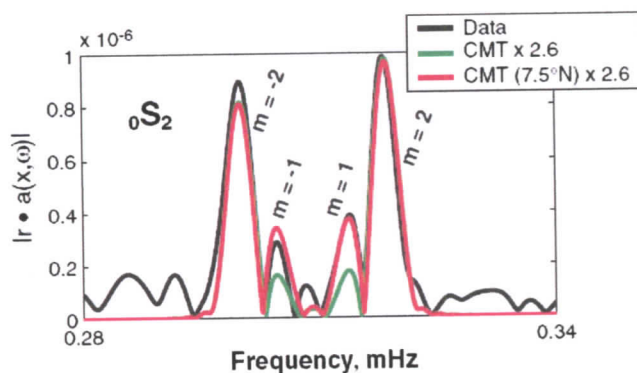
U periodu od kasnih 70-ih godina prošlog veka pa do danas, seizmolozi su odredili magnitudu M_w za velike zemljotrese izražene u seizmičkom momentu M_0 . Kao mera prosečnog pomeranja koji se dešava duž zone prekida, M_0 je u vezi sa njegovim dešavanjima na frekvencije jednako nuli. Logično je da se meri M_0 iz najjačih sopstvenih oscilacija, kao što je to slučaj kod ${}_0S_2$, ${}_0S_3$, ${}_0S_4$, ${}_0S_0$ i ${}_1S_0$ modova. Kod gotovo svih zemljotresa, ekscitacija ovih modova je preslaba

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

da bi se direktno merila, ali to nije bio slučaj kod Sumatra-Andaman zemljotresa. Mod ${}_0S_2$, poznatiji i kao „mod ragbi lopte“, sopstvene oscilacije sa najdužom posmatranom periodom (53.7 minuta) [23], je jako izražena u spektru vertikalne komponente koja je izračunata iz velikog dela mernih stanica.

Istraživanja koja je sproveo Adam Dziewonski [31] pomoću detaljnih podataka koji su dobijeni od nekoliko većih zemljotresa, dala su mogućnost određivanja orijentacije deformacije tla (pozicioniranja zemljotresa) kao i magnitude zemljotresa i fokalnim mehanizmima. Rezultati tih istraživanja poznati su danas kao Harvardski CMT (Centroid Moment Tensor), i danas se izučavaju na Lamont – Doherty Earth opservatoriji, a predvodi ih Goran Ekstrom (poznatiji su kao Global CMT Project [32]).

Amplitude nekoliko sferoidnih modova sopstvenih oscilacija sa periodama od $T > 1000$ s su bile uvećane za 1.25 – 2.6 puta u odnosu na one koje su bile predviđenih Harvardskim CMT-om i dostizale su amplitudu ${}_0S_2$ moda (slika 31). Ta uvećanja koja se uvode, dobijena su na osnovu proračunavanja razlike koja se može uočiti upoređivanjem rezultata dobijenih CMT -om i zabeleženih rezultata.



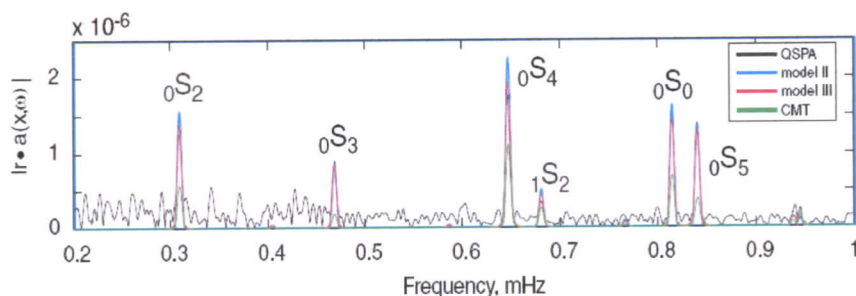
Slika 31: uočeni i predviđeni spektar ${}_0S_2$ moda na stanici u Oslu [23]

Na spektru sa slike 31 možemo da vidimo crnu, crvenu i zelenu liniju koje predstavljaju sledeće: crna linija predstavlja dobijene rezultate koji su zabeleženi u mernoj stanici u Oslu, zelena linija predstavlja predviđene rezultate CMT -om uvećane za 2.6 puta. Vidimo da su singleti $m=1$ i $m=-1$ mali tako da dolazimo do zaključka da se geometrijski centar nalazi blizu ekvatora. Vidimo da vrednost m može biti i negativna. Putem CMT -a izračunat je hipocentar zemljotresa, koji se nalazio na 3.2°N . Dobijeni rezultati se nisu poklapali sa predviđenim. Tek nakon što je centroid bio pomeren na tačku 7.5°N , dobijeni su odgovarajući rezultati.

Modeli II i III na slikama 32, 34, i 35 zasnivaju se na modelima zapreminskih i površinskih talasa. Oba modela predstavljaju varijacije CMT -a koje su dale približno tačnija rešenja nego sam CMT. Strmiji prekid je mnogo efikasniji u predviđanju modova sa dužim

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

periodama, i stoga, modeli konačnog pucanja mogu u mnogome poboljšati poklapanja između predviđenih i dobijenih amplituda modova. Model III, koji predviđa intenzitet pikova propagacije pucanja pre modela II, imao je više uspeha u predviđanju apsolutne vrednosti spektralnog pika kod vertikalne komponente modela, sa greškom od 10 %.



Slika 32: spektar sopstvenih oscilacija zabeleženih na mernoj stanici na Severnom polu. Na x osi je frekvencija, a na y osi je ugao skretanja seizmometra, koji je proporcionalan elongaciji tla. Prikazana je vertikalna komponenta. [23]

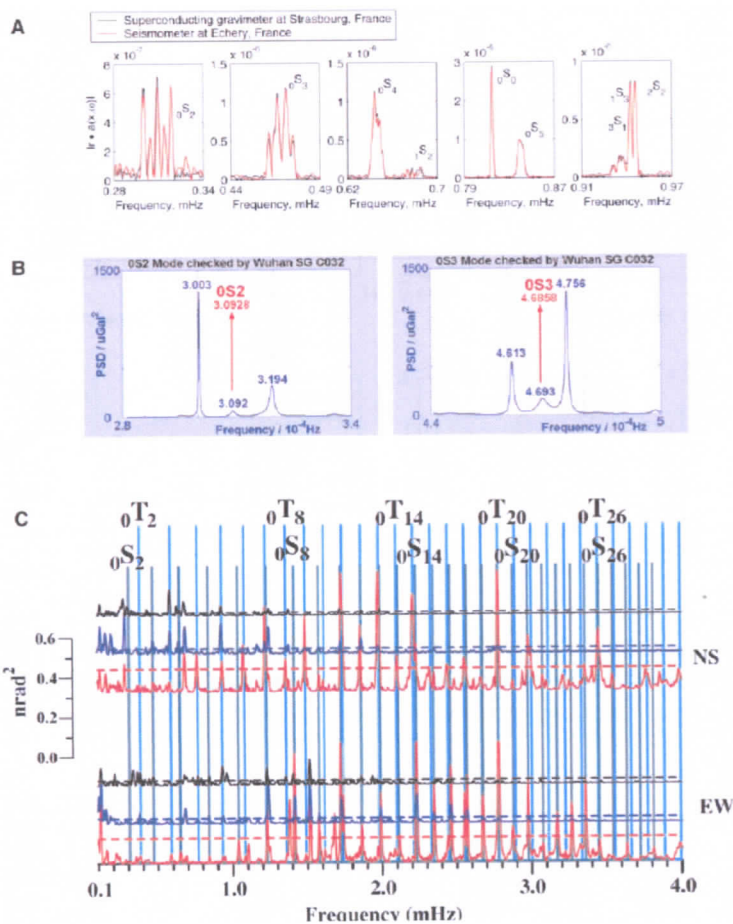
Spektar na slici 32 je dobijen na mernoj stanici na severnom polu (QSPA). Merena su vertikalna pomeranja u trajanju od 106 sati. Crvenom i plavom linijom su obeležani rezultati predviđeni primenom modela II i III, dok je zelenom linijom predstavljen CMT. Zabeleženi su samo S modovi i to: ${}_0S_2$, ${}_0S_3$, ${}_0S_4$, ${}_0S_5$, ${}_0S_0$ i ${}_1S_2$. Vidimo da mod ${}_0S_4$ ima najizraženiji intenzitet i da se pojavljuje na frekvenciji od 0,9 mHz, dok mod ${}_1S_2$ ima najmanji intenzitet pika.

Zemljotres u oblasti Sumatre je bio idealna prilika za testiranje seizmografske tehnologije širokog opsega na globalnom nivou. Gornja granica pomeranja površine Zemlje, nastalog usled ekscitovanih sopstvenih oscilacija nastalih nakon zemljotresa, kod svih mernih stanica, iznosila je 1cm. Sa sveukupno 400 mernih FDSN stanica dobilo se dovoljno kvalitetnih merenja Zemljinih sopstvenih oscilacija. Sopstvene oscilacije mogu biti uočene i na dopunskim merenjima koji se vrše pomoću superprovodnih gravimetara (videti sliku 33 A), kao i pomoću GPS posmatranja. Podatci dobijeni sa superprovodnih gravimetara daju nam mogućnost kalibracije podataka sa seizmometara na periodama od $T > 1000s$.

Na slici 33 prvi red predstavlja podatke dobijene pomoću superprovodnog gravimetra u Strasburgu, kao i seizmičke podatke dobijene sa stanice u Echery-u. Vidimo da su detektovani S modovi, i da su gotovo svi izvojeni modovi multipleti. Višestruki pikovi spektra (${}_0S_2$) su prouzrokovani razdvajanjem nastalim zemljinom rotacijom. Druga slika predstavlja spektar dobijen Burgovom metodom pomoću superprovodnog gravimetra C032 u Kini, a treći red predstavlja predviđeni spektar horizontalne komponente rezultata koji su dobijeni u Blackman - Turska. Dobijeni podatci su mereni u tri vremenska intervala širine 24 h koji su međusobno pomereni za 12 h. Crvena, crna i plava linija odnose se na različite vremenske intervale (27.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Decembar 12.00h, 27 decembar 00.00h, 28 decembar 12.00h, 2004 godine.). Pokreti u pravcu sever - jug su prikazani u gornjem redu, a u pravcu istok - zapad u donjem redu. Isprekidana linija ukazuje na nivo poverljivosti merenja 95%.

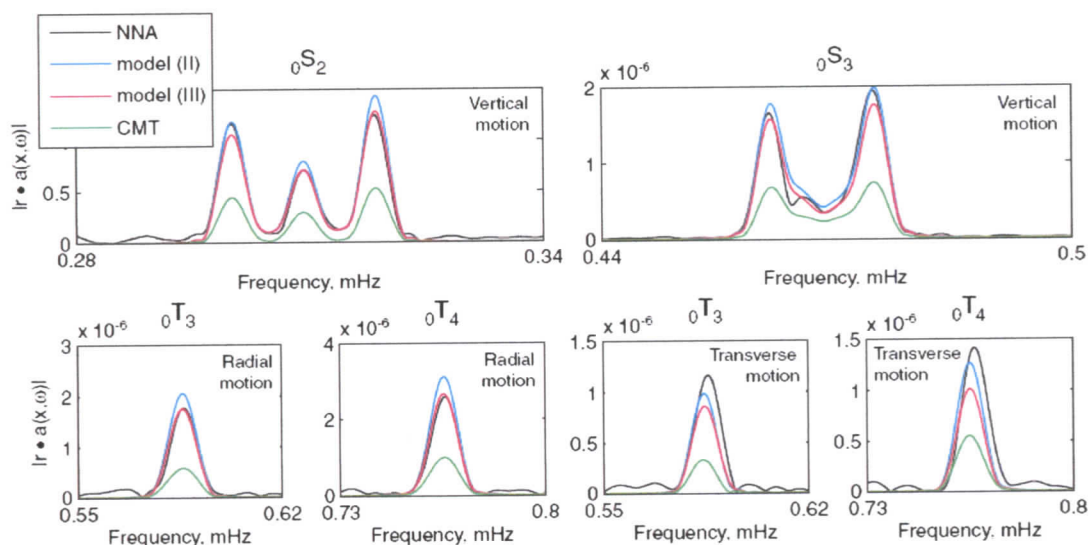


Slika 33: komparacija spektara za Sumatra-Andaman zemljotres [23]

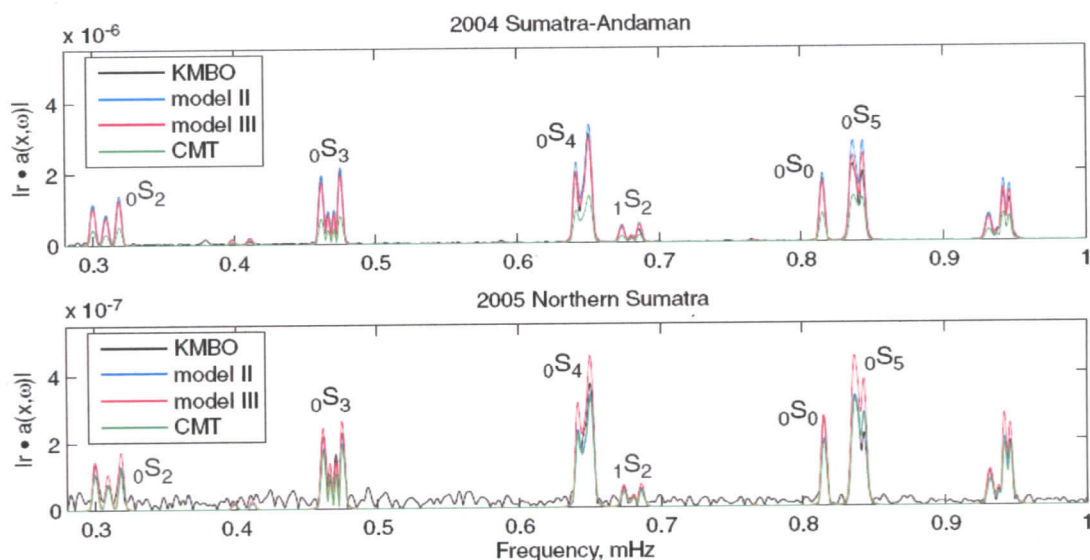
Slika 34 predstavlja komparaciju predviđenih (CMT, modeli II i III) i dobijenih rezultata. Merna stanica na kojoj je bilo izvršeno mernje nalazi se u Peruu. Izdvojeni su neki S i T modovi kod kojih su dobijeni najizraženiji rezultati. Vidimo da je kod $0S_2$ i $0S_3$ modova sopstvenih oscilacija model III dao najpribližniji predviđeni rezultat onom koji je dobijen u toj mernoj stanici, dok je CMT bio daleko od predviđenog, a model II je dao malo veće pikove od dobijenih rezultata. Frekventni opseg u kom su detektovani $0S_2$ i $0S_3$ modovi je od 0.28 - 0.34 i 0.44 - 0.5 mHz, respektivno. Mod $0S_2$ je imao čak tri izražena pika sa velikim intenzitetom, a mod $0S_3$ je imao dva pika. Vertikalni pokreti u kojima su zabeleženi sferoidni modovi manjeg reda su praćeni u trajanju od 144 sata, nakon čega su putem furijeovih transformacija dobijeni prikazani

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

spektri. Horizontalni pokreti koji su beleženi u periodu od 44 sata, a nakon čega su putem furijeovih transformacija pretvoreni u spektre na kojima se očitavaju toroidalni modovi. Maksimum pika se kod sferoidnog moda ${}_0S_3$ nalazio na 2×10^{-6} (rad), a kod toroidnog moda na približno 1.5×10^{-5} (rad).



Slika 34: komparacija dobijenih podataka (sa stanice NNA, Nana, peru) i rezultati. Na x osi je frekvencija, a na y osi je ugao skretanja seizmometra, koji je proporcionalan elongaciji tla. U prvom redu je prikazana vertikalna komponenta, a u drugom horizontalna komponenta. [23]



Slika 35: poređenje spektara zemljotresa Sumatra – Andaman 26.12.2004. i 28.03.2005 na severu Sumatre [23]

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Na spektrima koji su prikazani na slici 35 vidimo poređenja spektara dobijenih merenjima zemljotresa u oblasti Sumatre. Prvi zemljotres se dogodio, kao što je već više puta spomenuto, 26.12.2004, a drugi se dogodio 28.03.2005 isto u oblasti Sumatre. Oba su beležena u periodu od 127 sati na stanici KMBO (Kilima Mgobo, Kenija). Prikazani su samo sferoidni modovi u opsegu od 0.3 do 1 mHz. U oba slučaja mod ${}_0S_4$ ima najjači intenzitet.

U periodama većim od 1000 sekundi, Zemljine sopstvene oscilacije su imale neuobičajeno velike amplitude u odnosu na one koje se predviđene mehanizmom Harvardskog CMT – a. Koristeći realnije modele pucanja koji su izvedeni iz seizmičkih površinskih i zapreminskih talasa, aproksimirane su amplitude sopstvenih oscilacija sa seizmičkim momentom (6.5×10^{22} Nm), koji odgovaraju momentu magnitude 9.15 [23].

Analiza dugoperiodičnih seizmičkih rezultata dobijenih merenjem ovako velikih zemljotresa, omogućavaju nam uvid u informacije o unutrašnjosti Zemlje i njenoj strukturi, a sopstvene oscilacije koje su nastale usled zemljotresa nam daju informacije o jačini zemljotresa i njegovom trajanju. Spektralna amplituda izvora je veća kod zemljotresa sa dužim vremenskim intervalima. Pucanje dva velika segmenta prekida, koja su različito orijentisana, i sa različitim vremenom pucanja, će prouzrokovati spektralnu interferenciju u dugim vremenskim intervalima.

Kalibracija mreže dugoperiodičnih seizmografa je od najvećeg značaja za dalje proučavanje sopstvenih oscilacija. Zemljotresi velikih jačina ($M_W \geq 9.0$) koji će se desiti u budućnosti negde duž granica ploča, mogu ostati nezabeleženi pomoću današnjih seizmometara, koji su zastareli i postoji mogućnost da ne zabeleže važne podatke. U suštini, najbitnija stvar za dalje proučavanje sopstvenih oscilacija je popravljjanje kvaliteta detektorske opreme.

Tri tipa modelovanja su korišćena nakon inicijalnog Harvardskog CMT – a [23], i ni jedan od njih nije dao zadovoljavajuće rezultate a da se nije oslanjao na još jedan, ili čak oba metoda. To su bile teleseizmičke opservacije, geofizika sopstvenih oscilacija i geodetske opservacije zasnovane na GPS - u. Do sada nije se pridao nikakav značaj tome da se pokuša integracija sva tri modelovanja, koja bi možda dala bolje rezultate.

6.3 Sopstvene oscilacije na drugim planetama

Sopstvene oscilacije nisu karakteristične samo za našu planetu. Pokazaćemo da su zabeležene sopstvene oscilacije i na Saturnu.

Istraživanja Saturnovih sopstvenih oscilacija koja su ovde prikazana, zasnivaju se na formiranju modela Saturna koji je napravljen uz pomoć ranijih spektralnih posmatranja. Nakon izvršenih spektralnih analiza, na osnovni model, koji je ranije bio formiran, dodato je oko $\sim 0.18 - 0.25\%$ mase helijuma koji je osnova atmosfere Saturna. Pošto su izvršena i posmatranja Sunca, uočeno je da se model Saturna drastično razlikuje od solarnog modela, tačnije, u procesu formiranja planete, komponenta helijum – vodonika je bila zastupljena oko $11 - 15\%$ manje u odnosu na solarni model. Spektar sopstvenih oscilacija je teorijski izračunat za svaki od modela Saturna na osnovu podataka dobijenih posmatranjem. Rezultati su predstavljeni grafički i tabelarno. Neke od tabela su predstavljene u ovom delu, ali za detaljnije proučavanje pogledati referencu [28]. Od posebnog značaja je analiziranje diskontinuiteta gravitacionih modova koji su povezani sa porastom gustine unutar molekularnog omotača Saturna, i sa graničnom površinom između molekularnog i metalnog omotača. Kada se dobiju podaci putem posmatranja, rezultati se mogu iskoristiti da bi se identifikovali posmatrani modovi, kao i da bi se mogli unaprediti postojeći teorijski modeli.

Posmatrani modeli Saturna se sastoje iz pet slojeva:

1. Spoljni molekularni vodonik – helijum omotač;
2. Unutrašnji molekularni vodonik – helijum omotač;
3. Metalno – vodonični omotač;
4. Sloj sedimentnog helijuma;
5. IR sloj (ice + rock; led + stena).

Osnovni model koji uzet za proučavanje je Sa8. Da bi se mogli proučiti efekti spoljnih diskontinuiteta, uzećemo u obzir i modele sa različitim pritiscima molekularno – metalnog prelaska vodonika (modeli Sa7, Sa8, Sa8c i Sa9), kao i modele sa različitim nivoom rasprostranjenosti elementa helijuma u spoljašnjem vodonik – helijum omotaču (modeli Sa5 i Sa8). Za proučavanje uticaja jezgra na sopstvene oscilacije, uzeti su u obzir modeli sa različitim masama jezgra (IR + helijum) (Sa5, Sa8 i Sa14).

Struktura teorijskih spektara sopstvenih oscilacija je određena adijabatskom strukturom planete i prisustvom diskontinuiteta radijalne gustine. Za simetričnu planetu koja je sfernog, ne rotacionog karaktera, vektor pomeraja zavisi od l i n . Sopstvene oscilacije se sastoje od akustičnih i gravitacionih modova.

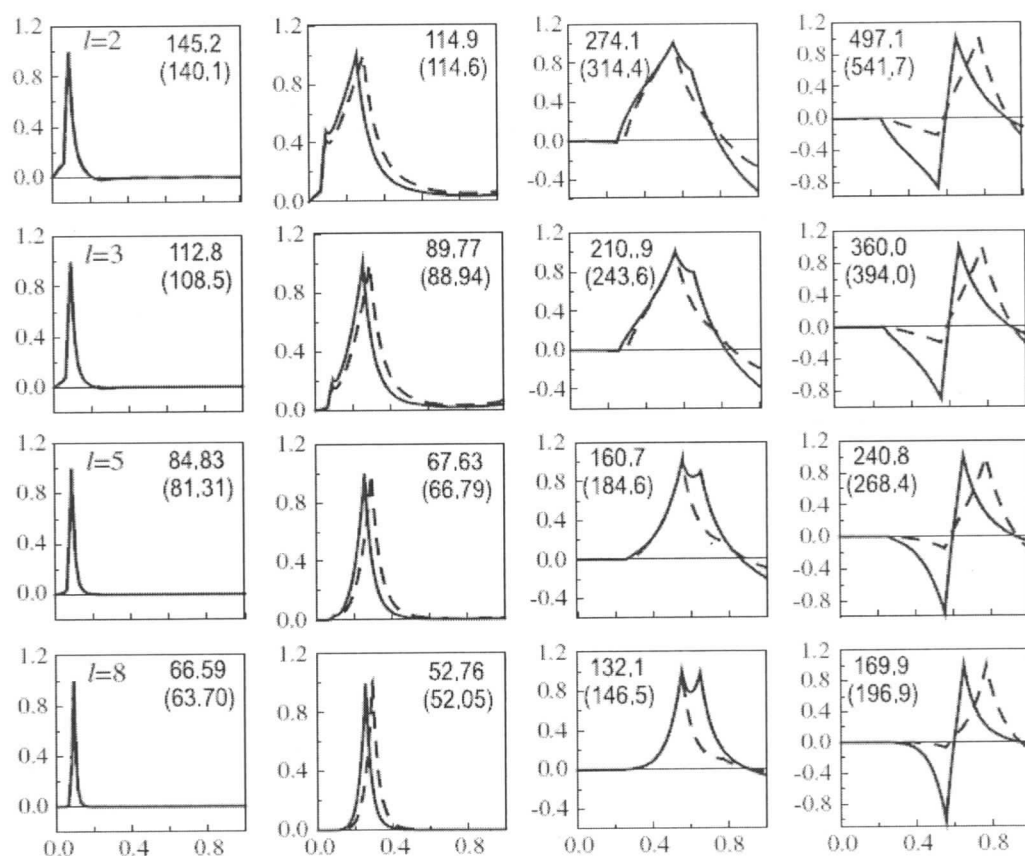
Gravitacionim modovima Saturna odgovaraju sferoidni modovi, a akustičnim modovima odgovaraju toroidni modovi Zemlje.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Kod oscilacija koje nisu radijalnog tipa ($l \neq 0$), za svaki stepen l postoji neki gravitacioni mod (u zavisnosti od gustine diskontinuiteta modela), dok amplitude ovih modova dostižu maksimum u nivou jednakom sa gustinom diskontinuiteta. Pošto se radi o adijabatskom modelu, svi gravitacioni oscilacioni modovi će se pojaviti u graničnim vrednostima modova.

Oscilacije slabijeg stepena su najvažnije za proučavanje teorijskog spektra oscilacija. Detektovanje takvih oscilacija je moguće pošto se one mogu zabeležiti ako se Saturn posmatra kao zvezda.

Na slici 36 možemo videti različite nivoe rasprostranjenosti helijuma u spoljašnjem molekularnom omotaču, a to nam ukazuje na različite položaje diskontinuiteta, odnosno, slika 36 predstavlja porast gustine na međugranicama između omotača, za različite l . Kao rezultat, modeli Sa5 i Sa8 imaju različite periode gravitacionih modova. Radijalna distribucija pomeraja za veće l , izgleda da ima istu strukturu kao četvorostruke oscilacije, ali su oscilacije koncentrisane bliže fizičkim granicama (porast gustine) kako se l povećava.



Slika 36: svojstvene funkcije za gravitacione modove oscilacija sa $l=2, 3, 5$ i 8 (respektivno, po redovima) za modele Sa8 (pune linije) i Sa5 (isprekidane linije). Svaki gravitacioni mod postiže pik amplitude u istom nivou kao radijalni porast gustine. Brojevi u zagradi predstavljaju vrednosti Sa5 modela. Svaka kriva je označena sa periodom oscilacije izraženim u minutima.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Pune linije na slici 36 predstavljaju gravitacione modove oscilacija za model Sa8, a isprekidane predstavljaju gravitacione modove modela Sa5. Na apscisi je prečnik bez dimenzija, a ordinata je normalizovana amplituda radijalnog pomeraja [28]. Različite količine koncentracije helijuma u spoljašnjem molekularnom omotaču, dovode do različitih položaja diskontinuiteta, a kao rezultat modeli Sa5 i Sa8 [28] imaju različite periode gravitacionih modova.

Tabela: periode akustičnih oscilacija za model Sa8 na Saturnu izražene u minutima [28]

n/l	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0			173.2	131.9	113.0	100.9	92.18	85.44	80.01
1	85.22	69.49	59.01	52.35	47.73	44.38	41.85	39.86	38.24
2	51.17	43.53	38.52	35.67	33.52	31.74	30.24	28.97	27.91
3	36.63	33.49	30.10	27.82	26.34	25.19	24.20	23.33	22.55
4	28.88	26.78	24.99	23.33	22.06	21.09	20.30	19.62	19.00
5	24.54	22.57	21.19	20.03	19.06	18.25	17.55	16.96	16.45
6	21.11	19.65	18.48	17.47	16.67	16.05	15.50	14.99	14.52
7	18.45	17.35	16.36	15.58	14.82	14.23	13.79	13.41	13.04

Rezultati koji su ovde prikazani pokazuju relevantnost proučavanja mehanizama nastajanja talasa da bi se mogle predvideti amplitude svojstvenih modova. Kada se dobiju rezultati posmatranja, mogu se iskoristiti da bi se identifikovali posmatrani modovi i da bi se unapredili modeli unutrašnjih struktura.

Detektovanje sopstvenih oscilacija na Saturnu bi bilo od velike koristi, u tom pogledu, što bi se tako moglo sa sigurnošću utvrditi unutrašnja struktura, kao što je to urađeno sa Suncem pomoću helioseizmologije.

7. REFERENCE

- [1] „Oxford Dictionary of Earth Sciences“, Oxford University Press, 2003,
- [2] [http://sr.wikipedia.org/wiki: autor: Earth-crust-cutaway-spanish.svg](http://sr.wikipedia.org/wiki:autor:Earth-crust-cutaway-spanish.svg),
- [3] „Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy“, CRC Press LLC, 2001,
- [4] „Plate Tectonics : An Insider's History of the Modern Theory of the Earth“, Westview Press, Oreskes, Naomi ed. (2003),
- [5] <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series>,
- [6] <http://sr.wikipedia.org/wiki> autor: USGS/USGov, modified by Eurico Zimbres,
- [7] Jay Feldman. „When the Mississippi Ran Backwards : Empire, Intrigue, Murder, and the New Madrid Earthquakes“ Free Press, 2005,
- [8] <http://sr.wikipedia.org/wiki>,
- [9] <http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/seismic>,
- [10] [http:// Pitanja iz seizmologije.org](http://Pitanja.iz.seizmologije.org),
- [11] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Seismogram>,
- [12] Keith Edward Bullen, Bruce A. Bolt, „ An introduction to the theory of seismology“, Oxford university, 2002,
- [13] http://www.met.gov.pk/Subpage4/waves_files/pwave_web,
- [14] Figure by MIT OCW,
- [15] Siméon Denis Poisson, “Memoirs de l'Académie“, 1823,
- [16] Aki, K. and Richards, “Quantitative seismology” (2nd ed.). University Science Books, P.G., 2002,
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Great_Chilean_Earthquake,
- [18] Lamb, H. „On Waves in an Elastic Plate.“ Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 93, (1917) 114–128,
- [19] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/176199/earthquake/59578/Long-period-oscillations-of-the-globe&usg>,
- [20] Riley, K.F., Hobson, M.P., and Bence, S.J. (2002). „Mathematical methods for physics and engineering“, Cambridge University Press, ch. 19,
- [21] http://www.unc.edu/~leesj/kamchatka/KAM_WEBarticle.htm,
- [22] <http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatraEQ/>,
- [23] Jeffrey Park, Jeroen Tromp, Emile okal, „SCIENCE“, VOL 308 (2005), str. 1139 – 1144,
- [24] S. K. Naith, M. Vyas, I. Pal, ”CURRENT SCIENCE“, VOL. 88, NO. 9, (2005), str 1381 – 1383,
- [25] <http://planetearth.nerc.ac.uk/images/uploaded/custom/strain.jpg&imgrefurl>,
- [26] <http://www.earth.northwestern.edu/people/seth>.
- [27] <http://www.engineersexcel.com/Tools/Discrete%20Fourier%20Transform/Example.jpg>
- [28] T.V. Gudkova, V.N. Zharkov, “Advances in Space Research”, vol. 38, (2006) str. 764 – 769,
- [29] http://en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake,
- [30] <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> ,
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Adam_Dziewonski,
- [32] <http://www.globalcmt.org/>.

DODATAK

Rihterova skala

Rihterova skala koja je dobila ime po Čarlsu F. Rihteru, a oformljena je uz pomoć Benoa Gutenberga, doktorima nauka na univerzitetu Kalifornijskog tehnološkog univerziteta, i najbolja poznata skala za merenje magnituda zemljotresa, a poznata je još i kao skala lokalnih magnituda (M_L), koja dodeljuje određenu količinu seizmičke energije datom broju na skali, koja nastaje usled zemljotresa. Prvobitno je bila namenjena za proučavanje regije Kalifornije. Inspiraciju su inicijalno dobili iz skale prividne magnitude koja se koristi u astronomiji da bi se opisali jačina sjaja zvezda i drugih objekata vidljivih na nebu.

Uzimajući u obzir da se magnituda izvodi iz merenja jednog seizmografa, ograničenog dometa, njegovi rezultati bivaju neutrlisani kada je reč o zemljotresu jačem od 6.8 stepeni. Da bi otklonili ovaj nedostatak, Rihter i Gutenberg su kasnije razvili skalu magnitude koja se zasniva na površinskim talasima (M_s), a druga se zasniva na zapreminskim talasima m_b .

Skala je logaritamska, podeljena u deset veličina, a skaliranje se postiže tako što se izračuna logaritam kombinovan sa horizontalnom amplitudom najvećeg otklona od nulte tačke na Vud-Andersonovom torzionom seizmometru, tako da očitavanje od, na primer 7 stepeni, označava poremećaje nastale usled kpokretatla koji su 10 puta veći od onih koji nastaju na magnitudi od 6 stepeni. Zemljotres od 2 stepena je najslabiji zemljotres koji se može osetiti. Potresi koji se nalaze na 6 stepeni i više, smatraju se velikim, a najrazorniji su oni koji se na skali nalaze na 8 ili većem stepenu. Energija koju oslobodi zemljotres, a koja je usko povezana sa destruktivnom moći zemljotresa, skalira se sa $3/2$ snage amplitude potresa. Odatle sledi da je magnituda od 1 stepena ekvivalentna faktoru od 31.6 otpuštene energije.

Formula za izračunavanje magnitude na skali je:

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} A_0(\text{delta})$$

Gde je sa A označen maksimalni otklon na Vud –Andersenovom seizmografu, a empirijska funkcija A_0 zavisi od rastojanja epicentra, za da tu stanicu.

Obzirom da se radi o skali koja se zasniva na logaritamskoj osnovi, svaki ceo broj se povećava na skali, predstavljajući tako desetostrko uvećanje u merenoj magnitudi; prevodeći to u termine vezane za energiju, svaki celi dobijeni broj koji je uvećan, odgovara uvećanju od 31.6 puta energije koja je oslobođena.

U dodatku možemo videti kako opisujemo tipične efekte u blizini epicentra različitih magnituda zemljotresa, kao i tabelu u kojoj nam je predstavljena energija oslobađa zemljotres, a

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

predstavljenu u terminima sile koja se oslobađa prilikom eksplozije dinamita, ali moramo uzeti u obzir da je ta energija (koju oslobađa energija) merilo za eksplozije ispod zemlje.

Veliki zemljotresi se događaju jedno godišnje, u proseku. Najveći ikada zabeleženi zemljotres bio je Veliki Čileanski, 22 maja 1960, koji je imao magnitudu od 9.5.

Rihterova magnituda	Tip zemljotresa	Efekti zemljotrsa	Koliko se često događaju
Manje od 2.0	Mikro	Mikrozemljotresi, ne mogu se osetiti.	Oko 8.000 po danu.
2.0-2.9	Manji	Pretžno se ne mogu osetiti, ali se mogu žabeležiti.	Oko 1.000 po danu.
3.0-3.9		Obično se mogu osetiti, ali retko naprave štetu.	Oko 49.000 godišnje.
4.0-4.9	Lakši	Primetno pomeranje stvari unutar kuće, slaba buka, malo verovatno nastajanje slabije štete.	Oko 6.200 godišnje.
5.0-5.9	Srednji	Mogu prouzrokovati veću štetu građevinam slabije konstrukcije, a na boljim građevinam minimalne štete.	Oko 800 godišnje.
6.0-6.9	Jaki	Mogu biti destruktivni u naseljenim oblastima do 160 km.	120 godišnje.
7.0-7.9	Jači	Mogu proizvesti veliku štetu na većim površinama.	18 godišnje.
8.0-8.9	Veliki	Mogu naneti veliku štetu u regionima prečnika preko nekoliko hiljada kilometara.	1 godišnje.
9.0-9.9		Razarajući u oblastima po nekoliko hilajda kilometara.	Jedan u 20 godina.
10.0+	Epski	Nikada nije zabeležen.	Jako retko (nepoznato).

Tabelom koja je prikazana opisujemo uobičajene efekte zemljotresa na različitim magnitudama u blizini epicentra. Razmotrićemo ovu tabelu sa predostrožnošću, pošto se efekti koji nastaju usled zemljotresa zavise od same magnitude, odnosno jačine, kao i od rastojanja od epicentra, dubine na kojoj se nalazi fokus zemljotresa, kao i geoloških uslova.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Približna magnituda po Rihterovoj skali	Približna masa dinamita za proizvedenu seizmičku energiju	Ekvivalent u džulima	Primer
0.0	1 kg	4.2 MJ	
0.5	5.6 kg	23.5 MJ	Jaka ručna bomba
1.0	32 kg	134.4 MJ	Eksplzija na gradilištu.
1.5	178 kg	747.6 MJ	Konvencionalna bomba korišćena u II svetskom ratu.
2.0	1 tona	4.2 GJ	Bomba kasnije korišćena u II svetskom ratu.
2.5	5.6 tona	23.5 GJ	Bomba koja probija beton, korišćena u II s. r.
3.0	32 tone	134.4 GJ	„majka svih bombi“ najjače nenuklearno oružje.
3.5	178 tona	747.6 GJ	Nuklearna katastrofa u Černobilu 1986.
4.0	1 kilotona	4.2 TJ	Manja atomska bomba.
4.5	5.6 kilotona	23.5 TJ	
5.0	32 kilotona	134.4 TJ	Atomska bomba bačena na Nagasaki, Lincolnshire zemljotres 2008.
5.4	150 kilotona	625 TJ	Chino Hills zemljotres 2008.
5.5	178 kilotona	747.6 TJ	Little Skull Mtn zemljotres 1992, i Alum Rock zemljotres 2007.
6.0	1 megatona	4.2 PJ	Zemljotres u Double spring Flat-u 1994.
6.5	5.6 megatona	23.5 PJ	Rodos (Grčka) 2008.
6.7	16.2 megatona	67.9 PJ	Zemljotres u Northridge-u 1994.
6.9	26.8 megatona	112.2 PJ	Obalska oblast San Franciska 1989.
7.0	32 megatona	134.4 PJ	
7.1	50 megatona	210 PJ	Energija ekvivalentna Car Bombi, najvećoj termonuklearnoj bombi koja je ikada testirana.
7.5	178 megatona	747.6 PJ	Kašmir (Pakistan) 2005, Antofagasta (Čile) 2007.
7.8	600 megatona	2.4 EJ	Tangshan (Kina) 1976
8.0	1 gigatona	4.2 EJ	Erupcija vulkana Toba pre 75.000 godina; San Francisko 1906; Meksiko Siti 1985; Gujarat (Indija) 2001; Sečuan (Kina) 2008.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

8.5	5.6 gigatona	23.5 EJ	Sumatra (Indonezija) 2007.
9.0	32 gigatona	134.4 EJ	Lisabon (Portugal) 1755.
9.2	90.7 gigatona	379.7 EJ	Anchorage (SAD) 1964.
9.3	114 gigatona	477 EJ	Zemljotres u Indijskom okeanu 2004.
9.5	178 gigatona	747.6 EJ	Valdivia (Čile), 1960.
10.0	1 teratona	4.2 ZJ	Nikada nije zabeležen.

Tabela koju smo ovde predstavili nam daje uvid u poređenje jačine zemljotresa po Rihterovoj skali, u poređenju sa jačinom eksplozije, njenim efektima, kao i količini dinamita koji bi trebalo da se iskoristi da bi se proizvela ta eksplozija.

Merkalijeva skala

Još jedan od načina, odnosno skala, pomoću kojih se meri jačina zemljotresa, je **Merkalijeava skala intenziteta zemljotresa**. Skalom se opisuju efekti koji zemljotres proizvodi na površinu Zemlje, objekte u prirodi, kao i na strukture koje je čovek napravio. Merkalijeva skala ima 12 podeljaka, tako da se zemljotresi označeni sa 1 skoro ni ne osećaju, a oni 12-og stepena prouzrokuju gotovo potpuno uništenje. Vrednosti na skali se razlikuju na osnovu rastojanja od zemljotresa, tako da se najjači intenziteti nalaze na samoj regiji epicentra.

Merkalijeva skala vodi poreklo iz, tada najčešće korišćene, Rossi-Forel-ove skale sa deset podeljaka, koju je preoblikovao italijanski vulkanolog Đuzepe Merkali 1883. i 1902. godine. 1902. godine Merkalijeva skala je proširena za dva stepena zaslugom italijanskog fizičara Adolfa Cancani-a, a kasnije je u potpunosti preuređena od strane nemačkog geofizičara Augusta Heinrich-a Sieberg-a, i od tad je poznata kao **Mercalli-Cancani-Sieberg-ova skala** (MCS skala). MCS skalu je kasnije modifikovao i objavio na engleskom Harrz O. Wood i Frank Neumann 1931. godine kao **Mercalli-Wood-Neumann skalu** (MWN). Kasnije je skala doživela novo preuređivanje i poboljšanje. Za to je bio zaslužan Čarls Rihter. Danas je ova skala pozanta kao **modifikovana Merkalijeva skala**, i obično se ozanačava sa **MM**.

Manji stepeni skale predstavljaju subjektivne ljudske osećaje koji su nastali usled zemljotresa, odnosno kako su ih ljudi osetili, dok se veći stepeni skale zasnivaju na vidljivim polsedicama zemljotresa. Tabela koja će biti predstavljena u nastavku je grubi vodič.

I. Instrumentalni	Uglavnom su neosetni, osim u posebnim prilikama.
II. Slabi	U najboljem slučaju ih je osetilo par ljudi, na višim spratovima

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

	zgrada. Slabiji objekti se mogu ljuljati.
III. Srednji	Osećaju ih ljudi u zgradama na višim spratovima, mnogi ih neće ni prepoznati kao zemljotres. Vibracije na kolima slične kao kad prođe kamion.
IV. Umereni	U kućama će ih osetiti mnogi, a napolju mali broj ljudi. Posude, prozori, vrata se pomeraju, zidovi puckaju. Osećaj kao da veliki kamion udari u zgradu.
V. Prilično jaki	Većina napolju ih može osetiti. Sudovi i prozori mogu da popucaju, velika zvana počinju da zvone.
VI. Jaki	Svi ih mogu osetiti; prozori, posude se lome, knjige padaju sa polica; teži nameštaj se pomera; slabija šteta.
VII. Veoma jaki	Ne može se stajati; nameštaj se lomi; pukotine na slabijim zgradama; na boljim manja oštećenja.
VIII. Destruktivni	Na boljim zgradama manja oštećenja, slabije se ruše; padaju dimnjaci, spomenici, stubovi, zidovi.
IX. Uništavajući	Znatna šteta na boljim građevinama, sa urušenim delovima; zgrade se pomeraju iz temelja.
X. Kobni	Neke drvene konstrukcije potpuno uništene, kamene uništene do temelja. Pruge se krive
XI. Veoma kobni	Mostovi padaju, pruge se jako krive.
XII. Katastrofalni	Potpuna šteta- gotovo sve je uništeno, predmeti su odbačeni u vazduh, zemlja puca.

Biografija:



Martin Mihailović, rođen 04.09.1979. u Vrbasu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Trenutno živi i radi u Novom Sadu.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Martin Mihailović

Prof. Dr. Imre Gut

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2009

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Poglavlja 7; strana 65; slika 36

Geofizika

Seizmologija

Seizmologija, zemljotresi, tektonika, seizmički talasi, sopstvene oscilacije

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

U radu su objašnjene sopstvene oscilacije koje su nastale u toku velikog zemljotresa u oblasti Sumatre 2005 godine. Pored teorijskog objašnjenja sopstvenih oscilacija, posvećena je i posebna pažnja osnovama tektonike kao i tipovima zemljotresa, u cilju boljeg razumevanja pojave sopstvenih oscilacija. Primena sopstvenih oscilacija nastalih usled zemljotresa pokazana je u zadnjoj glavi u kojoj je uz pomoć posmatranja sopstvenih oscilacija napravljen model Saturna.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

18.11.2009.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Dr. Svetlana Lukić, redovni profesor

član:

Dr. Dušan Mrda, docent

član:

Dr. Imre Gut, vanredni profesor, mentor

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Martin Mihailović

AU

Mentor/comentor:

Ph. D. Imre Gut, full prof.

MN

Title:

Seismology and free oscillations in planet

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2009

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

Chapters 7; pages 65; pictures 36

PD

Scientific field:

Geophysics

SF

Scientific discipline:

Seismology

SD

Subject/ Key words:

Eartquakes, seismology, tectonics, seismic waves, free oscillations

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

AB

The paper explained free oscillations which occurred during a large earthquake in Sumatra 2005. In addition to theoretical explanations of free oscillations, special attention is dedicated to basic tectonics and earthquake types, in order to better understand the phenomenon of free oscillations. Applying free oscillations arising due to the earthquake is shown in the last chapter which is using observations of free oscillation created a model of Saturn.

Seizmologija i sopstvene oscilacije unutar planete

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Ph. D. Svetlana Lukić, full prof.

Member:

Ph. D. Dušan Mrda, assistant prof.

Member:

Ph. D. Imre Gut, associate prof., mentor

