

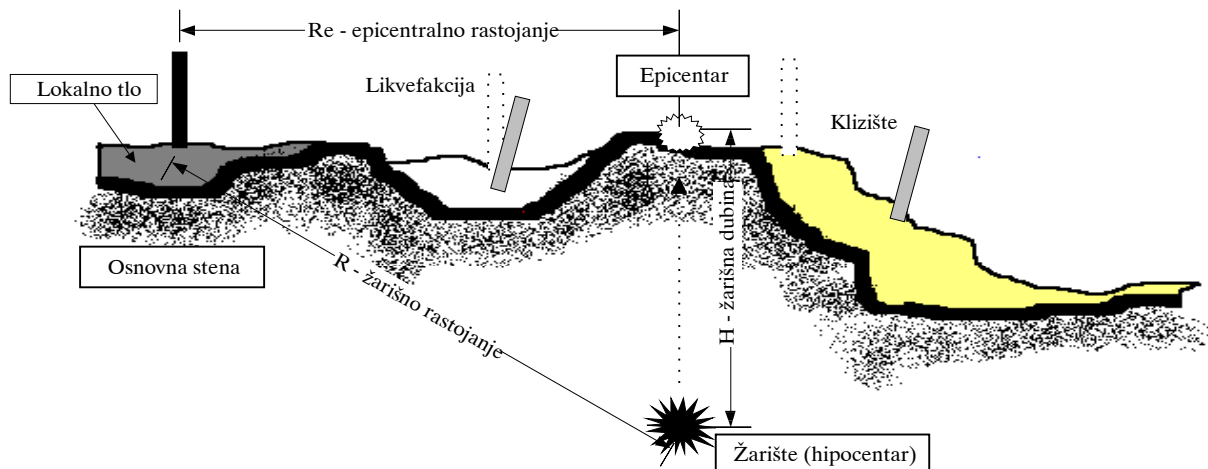
1. REKAPITULACIJA OSNOVNIH POJMOVA O ZEMLJOTRESIMA

UVOD

U uvodnom delu izloženi su osnovni *seizmološki pojmovi*: opis zemljotresa u prostoru, *jačina zemljotresa* u epicentru - *magnituda*, *povratni period* zemljotresa kao i opis efekata zemljotresa na objekte i okolinu na nekoj lokaciji - *intenzitet*. U nastavku, definišu se merljive fizičke veličine koje su podloga za inženjerski opis zemljotresa na nekoj lokaciji: *ubrzanje*, *brzina* i *pomeranje tla*, postupak registrovanja - *akcelerogrami* kao i njihove empirijske veze sa magnitudom i rastojanjem lokacije od epicentra. Na kraju, dat je primer efekata zemljotresa u Mionici 1998. na lokaciji teritorije Beograda.

1.1 OPIS ZEMLJOTRESA

Zemljotres predstavlja kretanje tla usled naglih *tektonskih poremećaja* u delu zemljine kore - *žarištu (hipocentar)*, na dubini H - *žarišna dubina*, slika 1.1 Zemljotresi sa žarišnom dubinom $H < 70$ km smatraju se *plitkim zemljotresima*. Oblast na vertikalnoj projekciji žarišta na površinu zemlje naziva se *epicentar*. Rastojanje objekta od žarišta odnosno epicentra naziva se *žarišno - R odnosno epicentralno - R_e rastojanje*, slika 1.1.



Slika 1.1 Zemljotres - prostorni opis

Seizmički talasi izazivaju kretanje *osnovne stene* ispod objekta, propagiraju kroz *lokalno tlo* do temelja objekta i izazivaju kretanje temelja i objekta. Lokalna tla u kojima se pri zemljotresu mogu pojaviti *likvefakcija* ili *klizište*, nazivaju se *dinamički nestabilnim tlom*. Objekti fundirani u takvom tlu nisu predmet narednih razmatranja, pretpostavlja se da je objekat fundiran u stabilnom tlu, bez značajnije *interakcije* konstrukcije i tla.

Mera jačine zemljotresa naziva se *magnituda zemljotresa - M* . Prema Richteru [1], veza *oslobođene energije E* u žarištu i magnitude M glasi

$$\log_{10} E = 4,8 + 1,5M \quad (\text{Joul-a}) \quad (1.1)$$

Zemljotres magnitude M , 32 puta je "jači" od zemljotresa magnitude $M-1$, 1000 puta jači od zemljotresa magnitude $M-2$ itd. Za zemljotrese magnitude $M < 5$ smatra se da praktično ne izazivaju štete, dok sa porastom magnitude raste zahvaćena površina kao i intenzitet (El Centro 1940. $M=6,6$; Skoplje 1963. $M=6,0$; Crna gora 1979. $M=7,0$;

Maljen-Mionica 1998. $M=5,6$). Smatra se da je najveća moguća magnituda $M=9$ (Lisabon 1755. $M=8,6$).

Prosečan vremenski interval T_p (godina) između pojave dva zemljotresa iste jačine naziva se *povratni period* zemljotresa sa magnitudom M . Jači zemljotresi događaju se ređe, sa dužim povratnim periodom. Za zemljotres sa povratnim periodom od $T_p=50$ godina očekuje se da se pojavi jedanput u 50 godina, dva puta u 100 godina itd.

Recipročna vrednost povratnog perioda, $P=1/T_p$, predstavlja *verovatnoću pojave* zemljotresa određene jačine u jednoj - tekućoj godini.

Ocena *merodavnog zemljotresa* za projektovanje konstrukcija vrši se prema *prihvatljivom riziku* za određeni objekat [2] :

$P=0,02$ ($T_p=50$ godina) - oštećenja koja ne zahtevaju popravku,

$P=0,002$ ($T_p=500$ godina) - oštećenja koja se mogu popraviti, tzv. *projektni zemljotres*,

$P=0,0002$ ($T_p=5000$ godina) - nepopravljiva oštećenja.

Verovatnoća pojave zemljotresa sa povratnim periodom T_p u vremenskom intervalu od T godina iznosi $P_t=1-(1-P)^T$. Verovatnoća pojave zemljotresa sa povratnim periodom $T_p=500$ godina u narednih $T=10$ godina iznosi $P_{10}=1-(1-1/500)^{10} = 0,02 = 1/50$. U periodu od $T=T_p$ godina, verovatnoća pojave zemljotresa sa povratnim periodom T_p iznosi $P_{T_p} = 0,63$ ($P_{50}=P_{500}=P_{5000}$).

Mera *efekata*, posledica zemljotresa na objekte i okolinu naziva se *intenzitet zemljotresa* - I na određenoj lokaciji. Gradacija posledica izražava se *skalama intenziteta*, koje mogu da budu *opisne* (... "padaju dimnjaci, zvone crkvena zvona, otpada malter"...) ili *kvantitativne* (ubrzanje, brzina, pomeranje tla, ili kombinacija ovih veličina). Na osnovu opisnih skala procenjuje se očekivana ili dogođena *šteta*, ali za analizu efekata zemljotresa na konstrukcije podatak da "zvone zvona" je neupotrebljiv.

U Jugoslaviji se koristi *MSK-64* skala, sa dvanaest *stepeni intenziteta* zemljotresa. Zemljotresi intenziteta do šest stepeni ne smatraju se štetnim, dok na teritoriji Jugoslavije najveći očekivani intenzitet zemljotresa sa povratnim periodom $T_p=500$ godina iznosi devet stepeni. Mada između očekivane štete i ubrzanja tla postoji slaba korelacija, ako ne postoje pouzdaniji podaci obično se za vezu intenziteta I i gornje granice najvećeg očekivanog ubrzanja tla a_g pretpostavlja:

intenzitet VII-og stepena: $a_g \leq 0,10$ g (*zona niskog seizmičkog intenziteta*)

intenzitet VIII-og stepena: $a_g \leq 0,20$ g

intenzitet IX-og stepena: $a_g \leq 0,40$ g

gde je $g=9,81$ m/s² ubrzanje zemljine teže. Povećanju intenziteta za jedan stepen odgovara dva puta veće ubrzanje tla. Prema Sikošekcu [1], za vezu magnitude M i intenziteta zemljotresa I u epicentru, za teritoriji Jugoslavije može da se usvoji relacija

$$I = 1,5M - 0,5 \quad (1.2)$$

Za određenu lokaciju - teritoriju, ocena očekivanog intenziteta zemljotresa sa različitim povratnim periodima T_p vrši se na osnovu *seizmičke rejonizacije* - analize lokalnih geoloških uslova, kao i očekivanih magnituda, žarišnih dubina i epicentralnih rastojanja zemljotresa koji mogu da se pojave u *potencijalnim žarištima*. Rejonizacija može da bude prosečna - *makro-rejonizacija* (globalna podela teritorije Jugoslavije, prema kojoj se u Beogradu može očekivati zemljotres intenziteta $I=VIII$ sa povratnim periodom $T_p=500$ godina), ili detaljna - *mikro-rejonizacija*. Podaci se sistematizuju u obliku *seizmoloških karata*, koje prikazuju intenzitet ili neki merljiv podatak, kao što je ubrzanje tla. Za potrebe izgradnje stanice "Beograd - Centar" u Prokopu, nakon

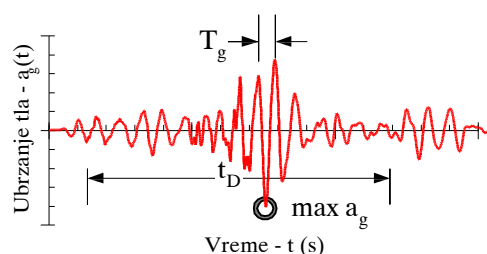
seizmičke mikrojoneizacije, za maksimalno očekivano ubrzanje tla pri zemljotresu sa povratnim periodom $T_p=500$ godina usvojeno je $a_g = 1,18 \text{ m/s}^2 = 0,12g$, što je znatno manje od navedene gornje granice ubrzanja tla za VIII-u seizmičku zonu od $0,20g$.

1.2 ZAPISI UBRZANJA TLA U TOKU VREMENA - AKCELEROGRAMI

Zemljotres izaziva prostorno kretanje temeljnog tla, koje se može opisati sa tri translacije i tri rotacije tla - "šest stepeni slobode". U zoni epicentra jakih zemljotresa obično su izražene sve komponente kretanja, dok se za ocenu odgovora konstrukcije udaljenijih objekata rotacije tla obično mogu zanemariti. Kako se pouzdanost konstrukcija ionako proverava za efekte gravitacionih opterećenja, to se najčešće zanemaruju i vertikalna ubrzanja tla usled zemljotresa.

Mada zemljotres u suštini izaziva "prinudna pomeranja" konstrukcija, najčešće se njegovi efekti opisuju preko ubrzanja mase konstrukcije, kao još jedan slučaj horizontalnog opterećenja, analogno dejstvu vetra.

Podaci o očekivanim ubrzanjima tla zasnivaju se, između ostalog, i na zapisima



Slika 1.2 Karakteristike zapisa ubrzanja tla

ubrzanja tla u toku trajanja zemljotresa - akcelerogramima, koji se registruju pomoću uređaja akcelerografa. Za ocenu efekata zemljotresa na konstrukcije značajni su podaci: maksimalno registrovano ubrzanje tla - $\max a_g$ (na dalje - a_g), trajanje jakog dela zemljotresa - t_D , predominantni period oscilovanja tla - T_g , slika 1.2. Na osnovu registrovanih ubrzanja, analitički se mogu dobiti zapisi promene brzine tla - v_g odnosno pomeranja tla - d_g u toku vremena, slika

1.3b-c. Računska apsolutna pomeranja tla su problematičan podatak, jer se dobijaju nakon dvostruke integracije dijagrama ubrzanja tla, kome obično nedostaje početni deo, dok se akcelerograf automatski ne uključi. Zapisi ubrzanja obično se koriguju, pa kako postupci korekcije vremenom napreduju, menja se i računsko pomeranje tla zemljotresa El Centro iz 1940. godine.

Prema Naumoskom [1], maksimalno ubrzanje tla a_g (cm/s^2) zemljotresa magnitude M , na lokaciji sa žarišnim rastojanjem R - atenuacijska formula, može da se oceni prema relaciji

$$a_g = 654e^{0,54M}/(R+20)^{1,33} \quad (1.3)$$

maksimalna očekivana brzina tla v_g (cm/s) iznosi

$$v_g = 4,43e^{0,94M}/(R+20)^{1,38} \quad (1.4)$$

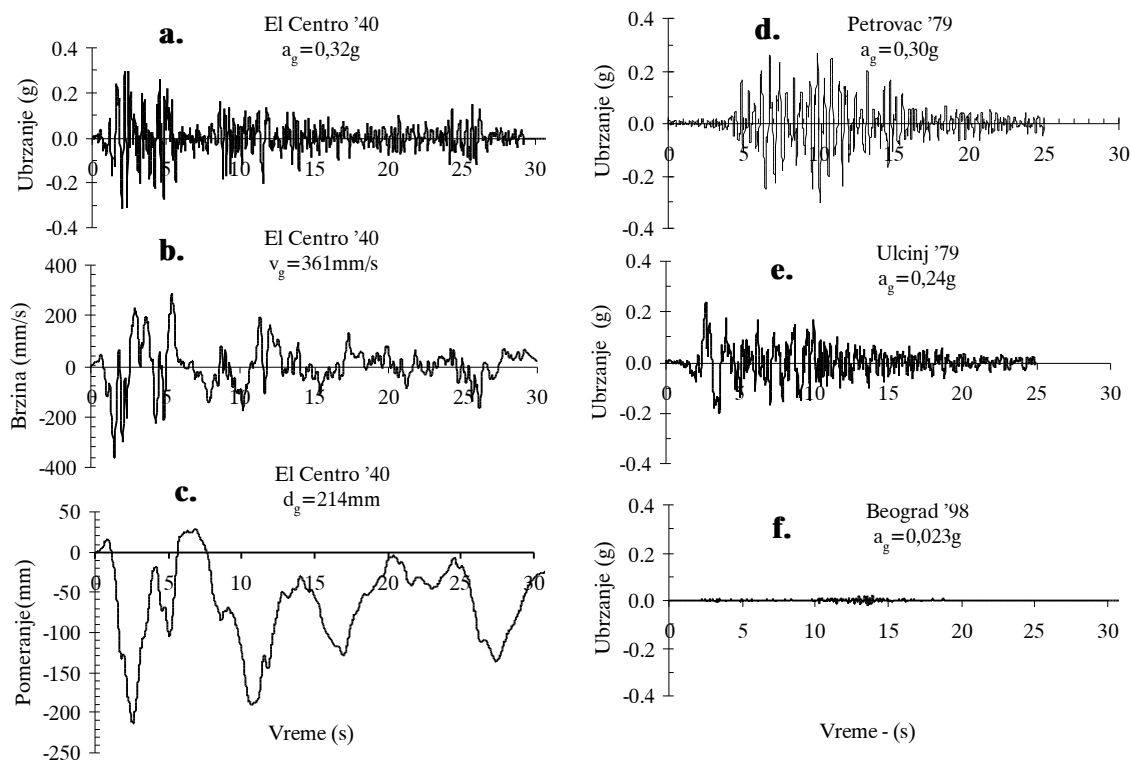
a maksimalno očekivano pomeranje tla d_g (cm) može da se oceni pomoću relacije

$$d_g = 0,060e^{1,20M}/(R+20)^{1,34} \quad (1.5)$$

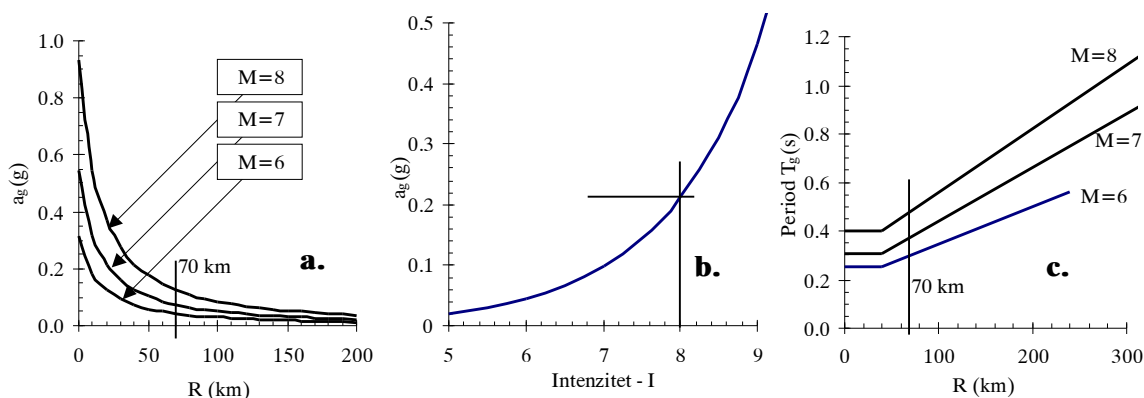
Prema Paulay [2], veza maksimalnog ubrzanja tla a_g (m/s^2) i intenziteta zemljotresa I na jednoj lokaciji može da se prikaže u obliku

$$a_g = 10^{-2,40 + 0,34I} \quad \text{odnosno} \quad (1.6)$$

$$I = (\log_{10} a_g + 2,40)/0,34 \quad (1.7)$$



Slika 1.3 Zapisi zemljotresa: a) El Centro (zemljotres Imperial Walley, California, 1940., komponenta EW, $M=6,6$), b-c) El Centro - brzina i pomeranje tla, d) Petrovac (Crna Gora 1979., komponenta EW, $M=7,0$), e) Ulcinj (Crna Gora 1979., komponenta EW, $M=7,0$), f) Beograd (Mionica 29.09.1998., komponenta EW, $M=5,6$, epicentralno rastojanje $R_e=74$ km, dubina žarišta $H=16$ km). Zapis "Beograd" registrovan je na sarmatskim krečnjacima ("lokalno tlo"), na stanici Tašmajdan Republičkog seizmološkog zavoda u Beogradu.



Slika 1.4 (a) atenuacijska kriva prema (1.3); (b) ubrzanje tla - intenzitet prema (1.6); (c) predominantni period oscilovanja tla T_g u zavisnosti od magnitude i žarišnog rastojanja /1/

Prema Watabe-u /1/, trajanje jakog dela zemljotresa t_D (s) može da se proceni prema relaciji

$$t_D = 10^{(M-2,5)/3,23} \quad (1.8)$$

Prema Seed-u [1], predominantni period sopstvenih oscilacija tla T_g na nekoj lokaciji raste sa porastom magnitude M , ali i sa povećanjem žarišnog rastojanja R , slika 1.4.c - "tlo filtrira" visoke frekvence sopstvenih oscilacija.

Navedene empirijske relacije treba shvatiti kao kvalitativne, između ostaloga i zbog toga što su preuzete od različitih autora, pa je moguća neusaglašenost veličina, intenziteta na primer.

Primer 1.1

Na osnovu ocenjene magnitude $M=5,6$ i dubine žarišta $H=16$ km zemljotresa u Mionici 1989. godine, analitički odrediti parametre kretanja tla u epicentru i na lokaciji Beograd, $R \sim R_c = 74$ km.

Prema (1.2), intenzitet zemljotresa u epicentralnom području Mionice 1998. godine iznosio je

$$I = 1,5 \times 5,6 - 0,5 = 7,9$$

što se dobro slaže sa registrovanim oštećenjima na terenu.

Prema (1.3), maksimalno prosečno ubrzanje tla u Beogradu iznosi

$$a_g = 6,54 e^{0,54 \times 5,6} / (74 + 20)^{1,33} = 31,9 \text{ cm/s}^2 = 0,032g$$

dok je na stanici Tašmajdan, na krečnjacima, registrovano ubrzanje od $0,023g$, slika 1.3.f.

Prema (1.4), maksimalna brzina tla u Beogradu iznosi

$$v_g = 4,43 e^{0,94 \times 5,6} / (74 + 20)^{1,38} = 1,62 \text{ cm/s}$$

dok se integracijom registrovanih ubrzanja dobija vrednost $v_g = 0,85 \text{ cm/s}$.

Prema (1.5), maksimalno pomeranje tla u Beogradu iznosi

$$d_g = 0,060 e^{1,20 \times 5,6} / (74 + 20)^{1,34} = 0,11 \text{ cm}$$

dok se integracijom registrovanih ubrzanja dobija vrednost $d_g = 0,07 \text{ cm}$.

Prema (1.7), računski intenzitet zemljotresa u Beogradu iznosi

$$I = (\log_{10} 0,032 \times 9,81 + 2,40) / 0,34 = 5,6$$

dok se ocene kreću u granicama $I=5-5,5$.

Prema (1.8), trajanje jakog dela zemljotresa iznosi

$$t_D = 10^{(5,6-2,5)/3,23} = 9,1 \text{ s}$$

što se slaže sa merenjima.

Prema slici 1.4c, predominantni period sopstvenih oscilacija tla je u granicama $T_g = 0,25 - 0,30 \text{ s}$, što ukazuje da je ovaj zemljotres bio najopasniji za krute konstrukcijske sisteme, sa niskim periodom sopstvenih oscilacija.

Ukupni utisak je da predloženi izrazi prihvatljivo opisuju merene i osmatrane veličine. I pored niskog intenziteta registrovanog u Beogradu, zemljotres sa epicentrom u Mionici izazvao je prilično uznemirenje u Beogradu, pa i mala oštećenja na pojedinim starijim objektima. Prema rečima svedoka, na pojedinim lokacijama pojavila se i panika u visokim objektima.

Generalno, zemljotresi čija je dužina trajanja jakog dela $t_D < 10$ sekundi, kod kojih je predominantni period oscilacija tla $T_g < 1$ sekunde i kod kojih je odnos ubrzanja i brzine tla $a_g/v_g > 1$, spadaju u zemljotrese *visoke frekvence, kratkog trajanja i niske energije*. Takav je bio i mionički zemljotres ($a_g/v_g = 0,023 \times 981 / 0,85 = 26,5 \text{ 1/s} > 1$).

Prema važećoj rejonizaciji teritorije Jugoslavije, Beograd se nalazi u VIII-oj, a Mionica u IX-oj zoni seizmičkog intenziteta, prema skali MSK-64. Utisak je pojedinih građevinaca kao i seizmologa da su očekivani efekti zemljotresa na teritoriji Beograda preceñeni. Ako je žarište u području Mionice, pri zemljotresu magnitude $M=5,6$, u Beogradu izazvalo ubrzanje od samo $0,02g$ na steni, postavlja se pitanje koje je to žarište, i kolika je energija potrebna da se iniciraju ubrzanja od oko $0,2g$, sa povratnim periodom od $T_p=500$ godina?

Beograd je područje sa najvećom koncentracijom stanovništva i materijalnih dobara u Jugoslaviji, pa pri donošenju budućih propisa i utvrđivanju karata ubrzanja tla treba izvršiti ozbiljne analize.

Izneta dilema ni u kom slučaju nije prilog paušalnim procenama tipa "ma kakav zemljotres!". Šta može da se dogodi na teritoriji Beograda prvenstveno treba da procene seizmolozi. Za građevince je to jedno od *dejstava na konstrukcije*, ma koliko iznosilo. I slab zemljotres može da bude opasan za loša konstrukcijska rešenja.