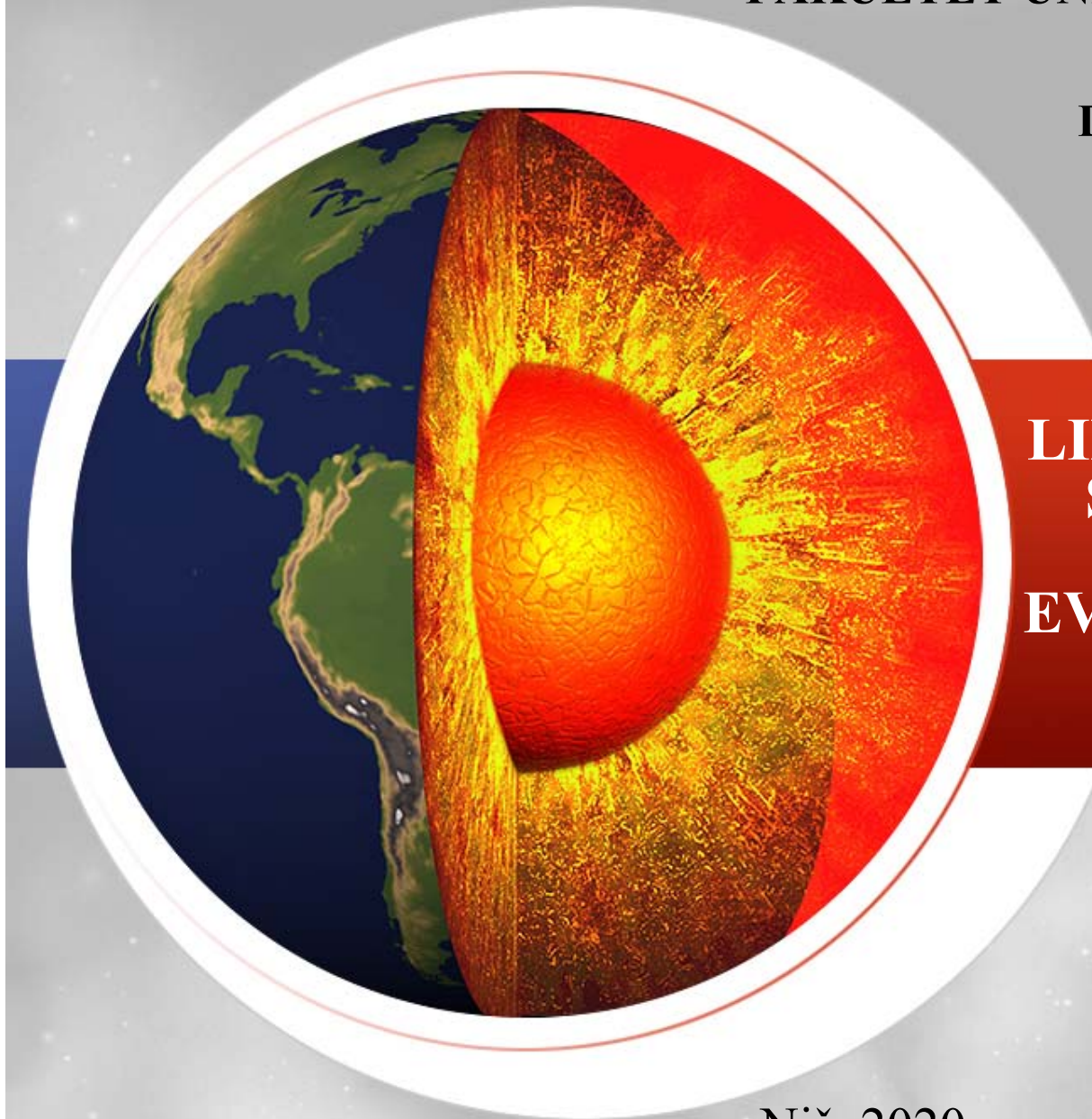


**GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI
FAKULTET UNIVERZITET U NIŠU**



**DINAMIKA KONSTRUKCIJA
SA ZEMLJOTRESNIM
INŽENJERSTVOM**

**LINEARNO-ELASTIČNA
SEIZMIČKA ANALIZA
ZGRADA PREMA
EVROPSKOJ NORMI EN
1998-1:2004**



Niš, 2020.

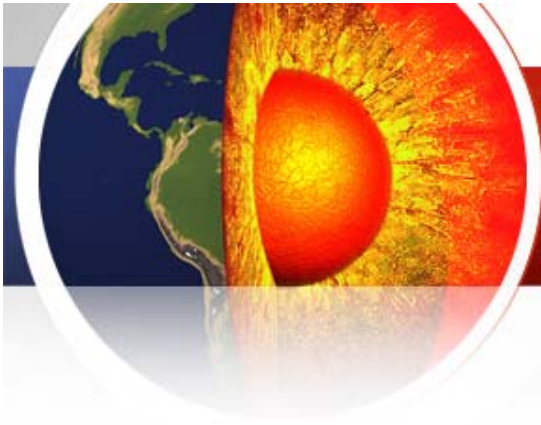
Predmetni nastavnik:
Dr Dragan Zlatkov, docent

Predmetni asistent:
Andrija Zorić



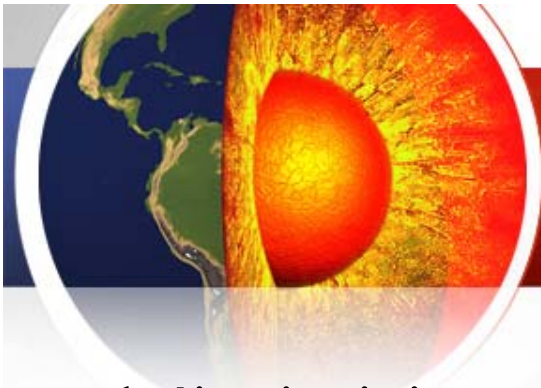
SADRŽAJ

- LITERATURA;
- KARAKTERISTIKE SEIZMIČKI OTPORNIH ZGRADA;
- KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI;
- OSNOVNI ZAHTEVI ZA PONAŠANJE;
- KLASE ZNAČAJA I FAKTORI ZNAČAJA;
- PRORAČUNSKI MODEL;
- METODE ANALIZE;
 - METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA;
 - MULTIMODALNA SPEKTRALNA ANALIZA;
 - NELINEARNA STATIČKA („PUSHOVER“) ANALIZA;
 - NELINEARNA ANALIZA VREMENSKOG ODGOVORA;
- KOMBINACIJA EFEKATA KOMPONENATA SEIZMIČKOG DEJSTVA;
- PRORAČUN POMERANJA;
- DOKAZ SIGURNOSTI – GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI;
- DOKAZ SIGURNOSTI – GRANIČNO STANJE UPOTREBLJIVOSTI;
- ZAKLJUČAK.



LITERATURA

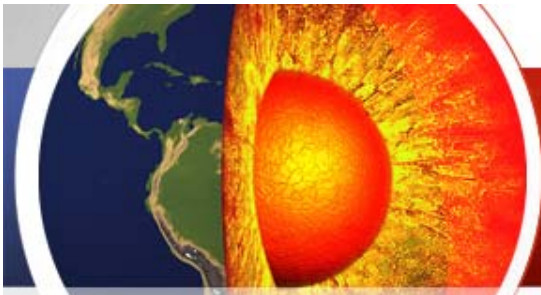
- EN 1998-1:2004, Evrokod 8, Proračun seizmički otpornih konstrukcija, Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade, Beograd, 2009;
- EN 1990:2002, Evrokod 0, Osnove proračuna konstrukcija, Beograd, 2006;
- Čaušević, M. (2014): *Dinamika konstrukcija, Potresno inženjerstvo – Aerodinamika – Konstrukcijske euronorme*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb;
- Janković, S. (2014): *Osnove seizmičkog planiranja i projektovanja za inženjere arhitekture i građevine*, AGM knjiga, Beograd;



KARAKTERISTIKE SEIZMIČKI OTPORNIH ZGRADA

Vodeći principi za projektovanje zgrada:

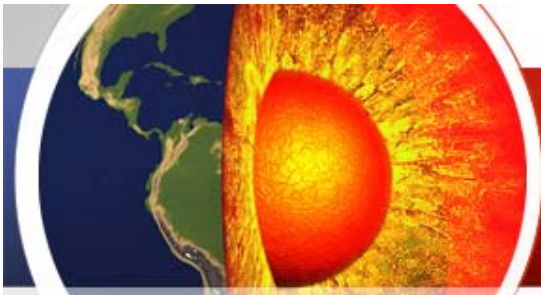
- jednostavnost konstrukcijskog sistema (regularnost konstrukcijskog sistema, koja se karakteriše postojanjem jasnih i direktnih putanja prenošenja seizmičkih sila);
- ujednačenost, simetrija i konstrukcijska rezerva (statička neodređenost) (ravnomerna raspodela konstrukcijskih elemenata koji omogućuju kratko i direktno prenošenje inercijalnih sila koje nastaju u raspodeljenim masama u zgradi; podela zgrade na dinamički nezavisne celine pomoću seizmičkih razdelnica pod uslovom da su razdelnice projektovane protiv međusobnog sudaranja pojedinačnih celina; regularnost konstrukcije po visini eliminiše stvaranje osetljivih zona gde koncentracije napona ili zahtevi za velikom duktilnošću mogu da prerano dovedu do rušenja; dobro uravnotežen odnos između raspodele mase i raspodele krutosti eliminiše velike ekscentricitete između centra masa i centra kutosti; simetričan raspored konstrukcijskih elemenata je potreban da se ostvari regularnost zgrade);



KARAKTERISTIKE SEIZMIČKI OTPORNIH ZGRADA

Vodeći principi za projektovanje zgrada:

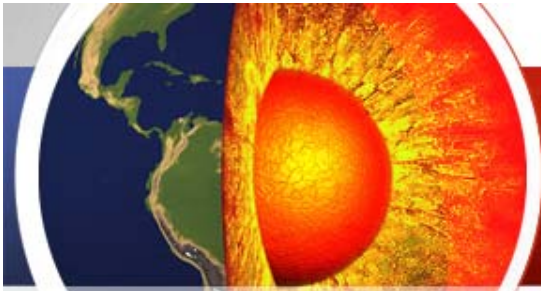
- otpornost i krutost u dva pravca (konstrukcijski elementi moraju da budu raspoređeni u osnovi međusobno ortogonalno, obezbeđujući slične karakteristike otpornosti i krutosti u oba glavna pravca; izbor karakteristika krutosti kostrukcije treba da ograniči nastanak prekomernih pomeranja koja mogu dovesti do nestabilnosti usled efekata teorije II reda ili do prevelikih oštećenja);
- torziona otpornost i krutost (torziona krutost smanjuje trziona pomeranja usled kojih dolazi do neravnomernog naprezanja različitih konstrukcijskih elemenata; konstrukcijski elementi raspoređeni po obimu zgrade);
- ponašanje spratnih tavanica kao krutih dijafragmi (tavanice se ponašaju kao horizontalne dijafragme koje prihvataju i prenose inercijalne sile na vertikalne noseće elemente i obezbeđuju da se vertikalni elementi ponašaju kao celina u suprotstavljanju horizontalnim seizmičim dejstvima; ponašanje tavanica kao dijafragmi je posebno važno u slučajevima kompleksnih i neravnomernih konfiguracija vertikalnih nosećih elemenata ili u slučaju dvojinih ili mešovutih sistema.);



KARAKTERISTIKE SEIZMIČKI OTPORNIH ZGRADA

Vodeći principi za projektovanje zgrada:

- **adekvatno fundiranje** (projektovanje i izvođenje temelja, kao i veza sa konstrukcijom iznad temelja mora da obezbedi da je cela zgrada podvrgnuta ravnomernoj seizmičkoj pobudi; za konstrukcije koje se sastoje iz diskretnog broja nosećih zidova, koji se razlikuju u širini i krutosti, načelno treba da se izaberu kruti, kutijasti ili višćelijski temelji; za zgrade sa pojedinačnim elementima fundamenata (temeljne stope ili šipovi) upotreba temeljne ploče ili veznih greda u oba pravca između ovih elemenata se preporučuje).

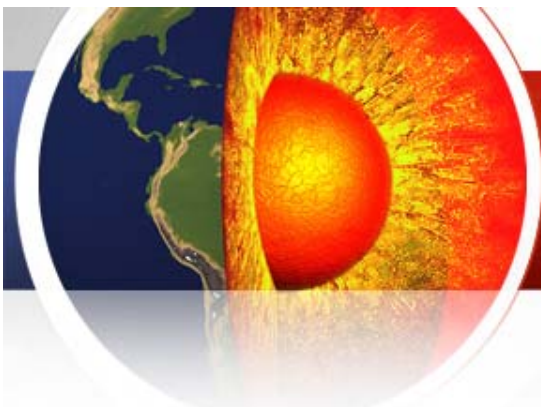


KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

Sa stanovišta seizmičkog proračuna konstrukcija zgrada se klasifikuje kao konstrukcijski regularne (pravilne) i konstrukcijski neregularne (nepravilne).

Ova razlika ima implikacije u sledećim aspektima seizmičkog projektovanja:

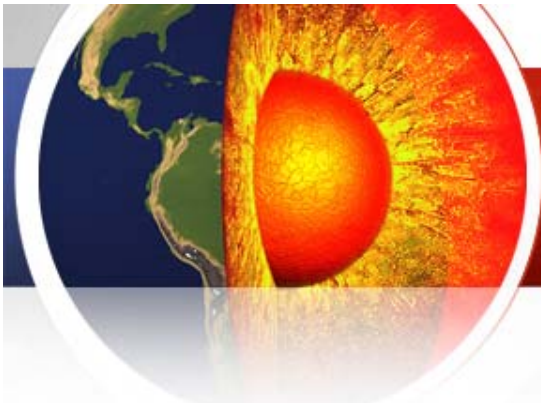
- model konstrukcije, koji može da bude ili uprošćen ravanski model ili prostorni model;
- metod analize, koji može da bude ili uprošćena metoda spektra odgovora (procedura bočnih sila) ili modalna analiza;
- vrednost faktora ponašanja q , koji će da bude smanjen za zgrade koje su neregularne po visini.



KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

Regularnost		Dozvoljeno uprošćenje		Faktor ponašanja za linearnu analizu
U osnovi	Po visini	Model	Linearno-elastična analiza	
Da	Da	Ravanski	Bočne sile ^a	Referentna vrednost
Da	Ne	Ravanski	Modalna	Smanjena vrednost
Ne	Da	Prostorni ^b	Bočne sile ^a	Referentna vrednost
Ne	Ne	Prostorni	Modalna	Smanjena vrednost

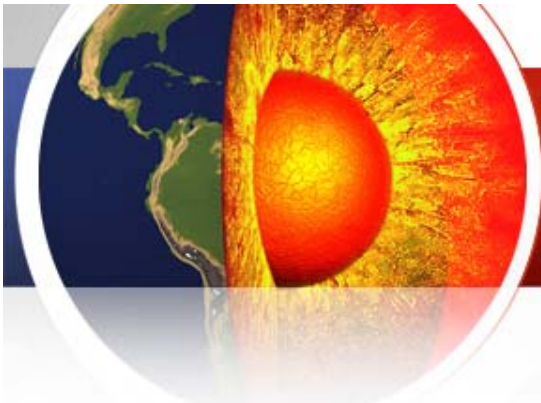
Za zgrade koje su neregularne po visini, umanjeње vrednosti faktora ponašanja su date preko referentne vrednosti koje su pomnožene sa **0,80**.



KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

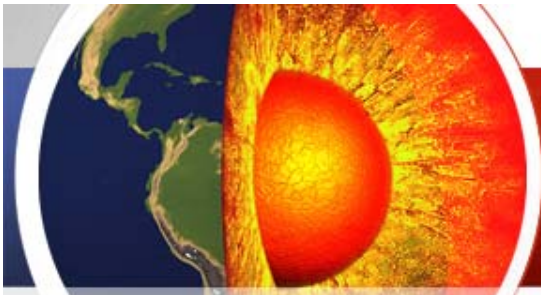
Zgrada koja se klasifikuje kao regularna u osnovi mora da zadovolji sve sledeće uslove:

- Konstrukcija zgrade mora da bude približno simetrična u osnovi u odnosu na dve ortogonalne ose;
- Konfiguracija u osnovi mora da bude kompaktna, tj. Svaka tavanica mora da bude ograničena sa poligonalnom konveksnom linijom. Ako postoje uvlačenja u osnovi, regularnost u osnovi još uvek može da se smatra da je zadovoljena, pod uslovom da ova uvlačenja u osnovine utiču na horizontalnu krutost tavanice i da za svako uvlačenje površina konture tavanice i konveksne poligonalne linije koja obuhvata tavanicu ne prelazi **5%** od površine tavanice;



KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

- Krutost tavanice u svojoj ravni mora da bude dovoljno velika u poređenju sa bočnom krutošću vertikalnih elemenata, tako da deformacija tavanice ima mali uticaj na raspodelu sila između vertikalnih nosećih elemenata. U tom smislu tavanice koje u svojoj ravni imaju oblike L, C, H, I i X treba pažljivo da se razmatraju, posebno što se tiče krutosti bočnih delova koje moraju da budu uporedive sa krutošću centralnog dela da bi zadovoljile uslov krute dijafragme;
- Vitkost zgrade u osnovi $\lambda = L_{\max}/L_{\min}$ ne sme da bude veća od 4, gde su, redom, L_{\max} i L_{\min} veća i manja dimenzija u osnovi zgrade, mereno u ortogonalnim pravcima;

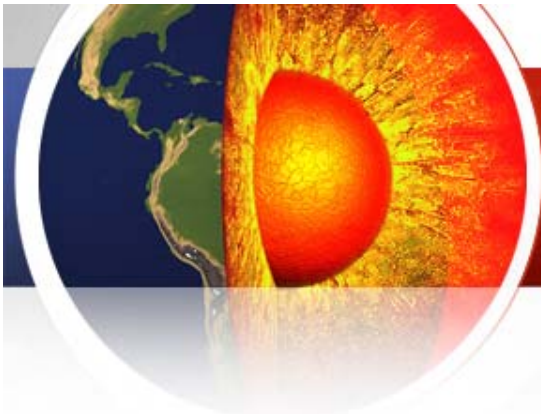


KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

- Na svakom spratu i u svakom razmatranom pravcu x i y konstrukcijski ekscentricitet e_0 i torzioni radijus r moraju da budu u skladu sa uslovima:

$$e_{0x} \leq 0,30r_x \quad r_x \geq l_s \quad e_{0y} \leq 0,30r_y \quad r_y \geq l_s$$

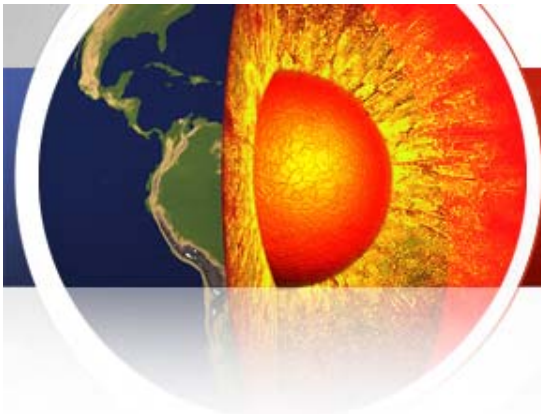
- e_{0x} rastojanje između centra krutosti i centra mase, mereno u pravcu x ose, koja je upravna na pravac za koji se sprovodi analiza;
- e_{0y} rastojanje između centra krutosti i centra mase, mereno u pravcu y ose, koja je upravna na pravac za koji se sprovodi analiza;
- r_x kvadratni koren iz odnosa torziona i bočne krutosti u y pravcu („torzioni radijus“);
- r_y kvadratni koren iz odnosa torziona i bočne krutosti u x pravcu („torzioni radijus“);
- l_s radijus inercije mase tavanice (kvadratni koren iz odnosa polarnog momenta inercije mase tavanice u odnosu na vertikalnu osu u centru mase i mase tavanice).



KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

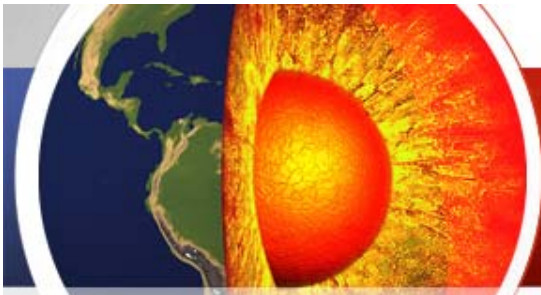
Zgrada koja se klasifikuje kao regularna po visini mora da zadovolji sve sledeće uslove:

- Svi elementi koji obezbeđuju sistem bočne otpornosti, kao što su jezgra, konstrukcijski zidovi ili okviri, moraju da se prostiru bez prekida od temelja do vrha zgrade;
- Horizontalna krutost, kao i masa pojedinačnih spratova, moraju da ostanu konstantni ili da se postepeno menjaju, bez naglih promena, od osnove pa do vrha zgrade;
- Kod okvirnih zgrada, odnos stvarne sprate otpornosti prema otpornosti koja se zahteva ne sme da se neproporcionalno razlikuje između susednih spratova;



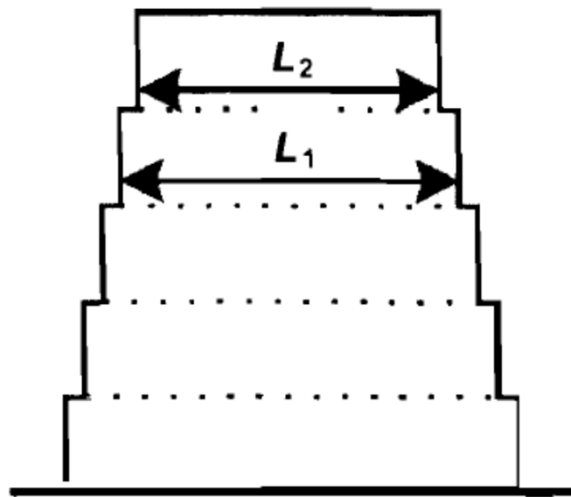
KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

- Kada postoje sažimanja zgrade po visini, primenjuju se dodatni uslovi:
 - za postupna sažimanja koja zadržavaju (vertikalnu) osnu simetriju, sažimanje bilo kod sprata ne sme da bude veće od 20% od prethodne dimenzije u osnovi u pravcu sažimanja;
 - za samo jedno sažimanje u okviru donjih 15% od ukupne visine glavnog konstrukcijskog sistema, sažimanje ne sme da bude veće od 50% od prethodne dimenzije u osnovi. U ovom slučaju konstrukcija u zoni osnove, u okviru vertikalne projekcije gabarita gornjih spratova, mora da bude projektovana tako da prihvata barem 75% horizontalnih smičućih sila koje bi nastale u toj zoni u slučaju zgrade bez povećanja u osnovi;

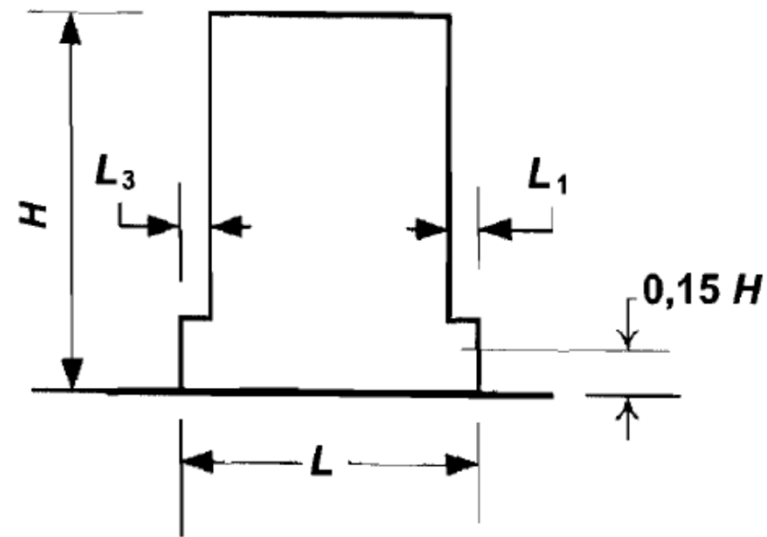


KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI

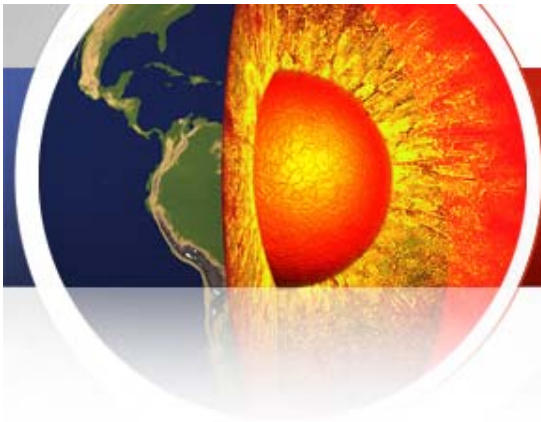
- o ako sažimanja po visini ne zadržavaju simetriju, na svakoj fasadi zbir sažimanja na svim spratovima ne sme da bude veći od 30% od dimenzije u osnovi sprata u prizemlju iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma, niti pojedinačna sažimanja smeju da budu veća od 10% u odnosu na dimenziju u osnovi prethodne etaže;



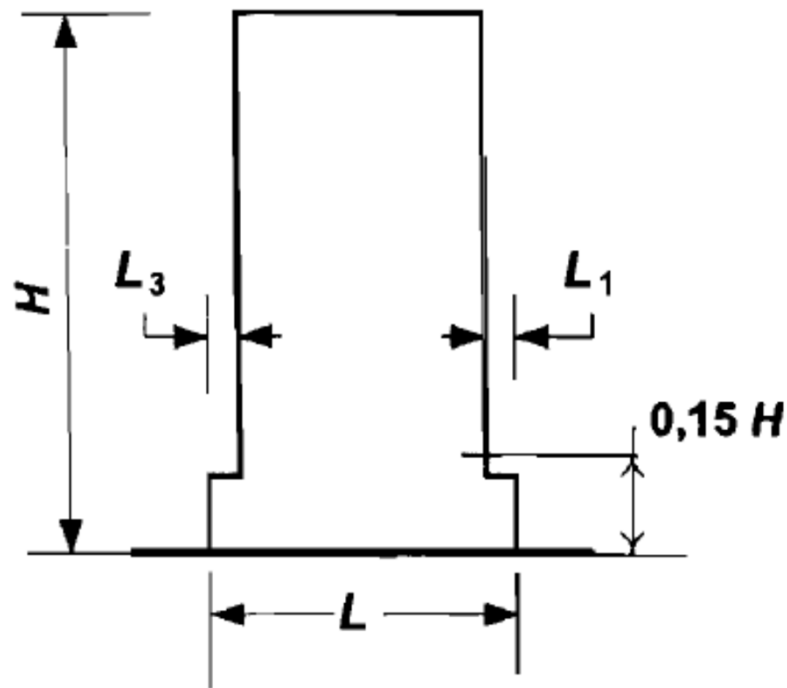
Kriterijum za (a): $\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,20$



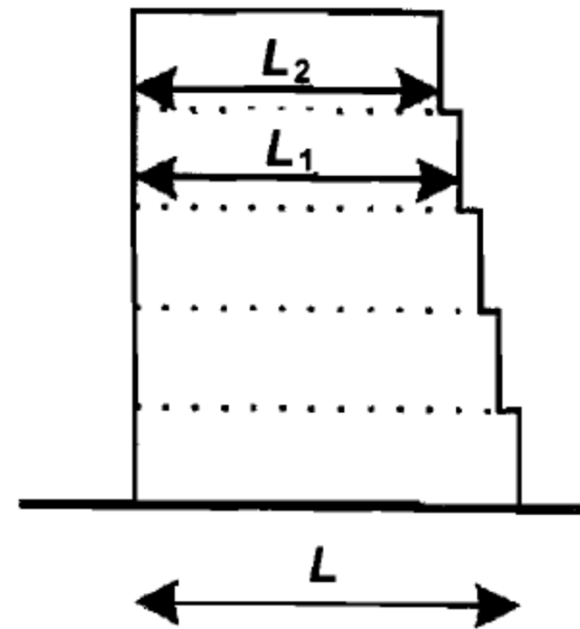
Kriterijum za (b): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,20$



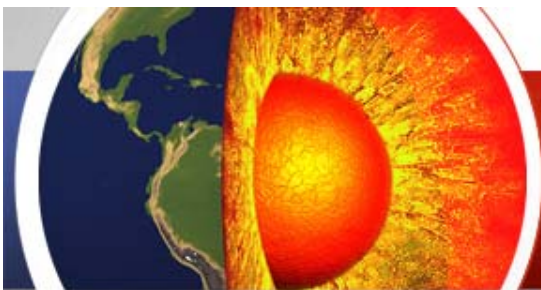
KRITERIJUMI KONSTRUKCIJSKE REGULARNOSTI



Kriterijum za (c): $\frac{L_3 + L_1}{L} \leq 0,50$



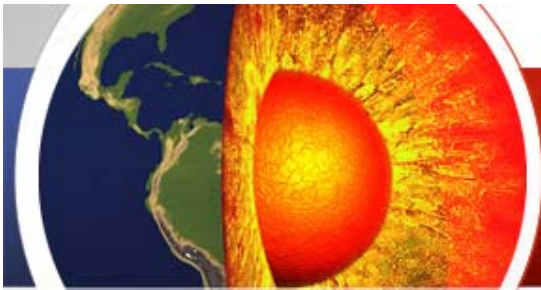
Kriterijum za (d): $\frac{L - L_2}{L} \leq 0,30$
 $\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,10$



KLASE ZNAČAJA I FAKTORI ZNAČAJA

Zgrade su klasifikovane u 4 klase značaja, u zavisnosti od posledica rušenja na ljudske živote, od njihovog značaja za javnu sigurnost i zaštitu ljudi u periodu neposredno posle zemljotresa, kao i od socijalnih i ekonomskih posledica rušenja.

Klasa značaja	Zgrade	Faktor značaja γ_i
I	Zgrade sa manjim značajem za sigurnost ljudi, npr. poljoprivredne zgrade	0,8
II	Obične zgrade, koje ne spadaju u druge kategorije	1,0
III	Zgrade čija je seizmička otpornost značajna u smislu rušenja, npr. škole, dvorane, kulturne institucije itd.	1,2
IV	Zgrade čiji je integritet tokom zemljotresa od vitalnog značaja za civilnu zaštitu, npr. bolnice, vatrogasne stanice, električne centrale itd.	1,4

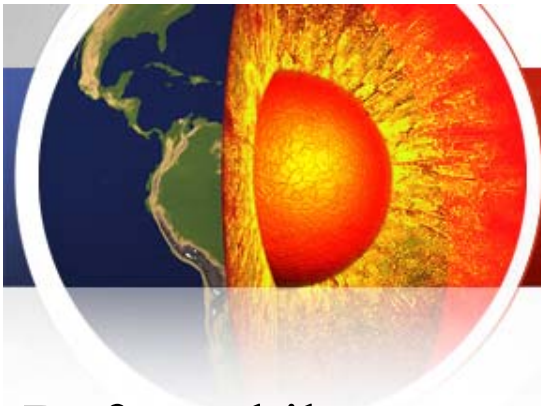


ANALIZA KONSTRUKCIJE PRORAČUNSKI MODEL

Model zgrade mora da adekvatno prikazuje raspodelu krutosti i mase, tako da se svi značajni oblici deformacije i inercijalne sile korektno uzimaju u obzir u analizi konstrukcija na seizmičko dejstvo. U slučaju nelinearne analize, proračunski model mora takođe da korektno prikazuje i raspodelu nosivosti.

Za zgrade koje ispunjavaju kriterijume regularnosti u osnovi analiza može da se sprovede primenom dva ravanska modela, po jedan za svaki glavni (horizontalni) pravac.

U analizi armiranobetonskih zgrada, spregnutih čelično-betonskih zgrada, kao i zidanih zgrada, krutost nosećih elemenata treba da se odredi uzimajući u obzir efekte prslina. Takva krutost treba da odgovara početku tečenja prslina. Osim u slučaju primene tačnije analize elemenata sa prslinama, u analizi betonskih i zidanih konstrukcija za fleksione i smičuće karakteristike elemenata, mogu da se usvoje vrednosti koje su jednake jednoj polovini krutosti neisprskalih preseka.



ANALIZA KONSTRUKCIJE PRORAČUNSKI MODEL

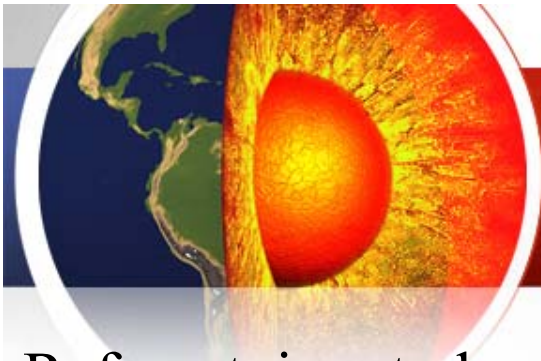
Deformabilnost temelja treba da se uključe u proračun uvek kada to može da ima negativan globalni uticaj na odgovor konstrukcije.

Sa namerom da se uzmu u obzir nepouzdanosti u položaju masa i u prostornoj varijaciji seizmičkih kretanja, izračunati položaj centra mase svake tavanice mora da se posmatra kao premešten iz svog nominalnog položaja za dodatni slučajni ekscentricitet u svakom pravcu:

$$e_{ai} = \pm 0,05L_i$$

e_{ai} – slučajni ekscentricitet spratne mase i u odnosu na nominalni položaj centra mase, koji se primenjuje u istom smeru za sve spratove,

L_i – dimenzije tavanice upravno na pravac seizmičkog dejstva.



METODE ANALIZE

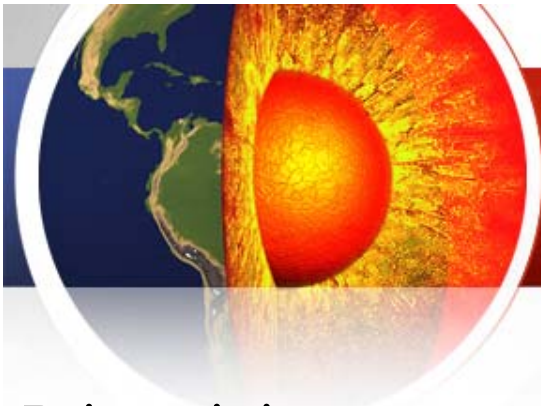
Referentni metod za određivanje seizmičkih uticaja je modalna analiza u kombinaciji sa metodom spektra odgovora, gde se koristi linearno elastični model konstrukcije i projektni spektar.

U zavisnosti od konstrukcijskih karakteristika zgrade, može se koristiti jedan od sledeća dva tipa linearno-elastične analize:

- „metoda ekvivalentnih bočnih sila“;
- „multimodalna spektralna analiza“.

Kao alternativa linearnom pristupu, nelinearni metod takođe može da se koristi:

- nelinearna statička (pushover) analiza;
- nelinearna (dinamička) analiza vremeskog odgovora.



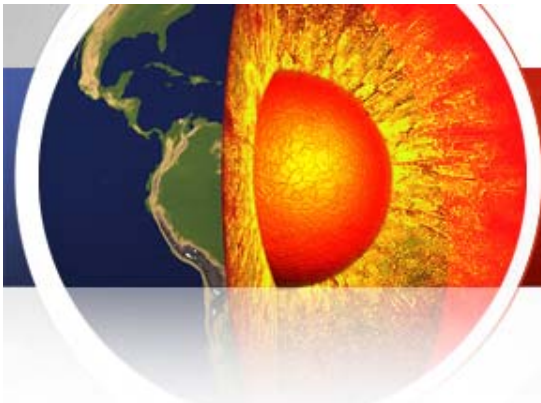
METODE ANALIZE METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA

Primenjuje se na zgrade koje se mogu analizirati sa dva ravanska modela i čiji odgovor ne zavisi bitno od uticaja viših sojstvenih oblika slobodnih vibracija.

- zgrade koje imaju osnovne periode slobodnih vibracija T_1 za svaki od dva pravca koji su manji od:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases}$$

- zgrade koje zadovoljavaju kriterijume regularnosti po visini.



METODE ANALIZE METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA

Seizmička smičuća sila u osnovi F_b za svaki horizontalni pravac za koji se zgrada analizira:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda$$

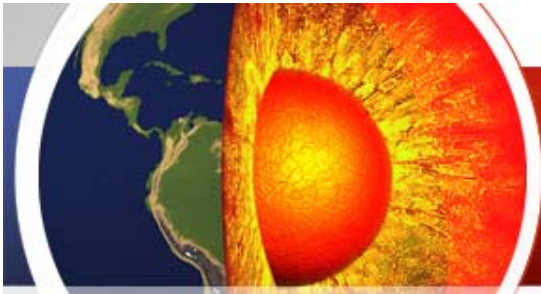
$S_d(T_1)$ – ordinata projektnog spektra za period T_1 ;

T_1 - osnovni period slobodnih vibracija za posmatrani horizontalni pravac;

m - ukupna masa zgrade iznad temelja ili iznad krutog podruma;

λ – korekcionni faktor, čija je vrednost jednaka $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 \leq 2T_c$ i zgrada ima više od dva sprata, dok je $\lambda = 1,0$ u svim drugim slučajevima.

(Faktor λ uzima u obzir činjenicu da kod zgrada sa barem tri sprata i za translatorsni svojstveni oblik vibracija za svaki horizontalni pravac, efektivna modalna masa prvog (osnovnog) tona oblika je manja u proseku za 15% od ukupne mase zgrade)



METODE ANALIZE METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA

Za zgrade sa visinama do 40 m, vrednost osnovnog perioda T_1 [s] može da se približno odredi prema izrazu:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$$

C_1 – jednako 0,085 za prostorne čelične okvire, 0,075 za prostorne betonske okvire i za čelične okvire sa ekscentričnim spregovima, kao i 0,050 za ostale konstrukcije;

H – visina zgrade, u metrima, od temelja ili od vrha krutog podruma.

Za konstrukcije sa betonskim ili zidanim zidovima, vrednost C_1 može da se sračuna prema:

$$C_1 = 0,075 \cdot \sqrt{A_c} \quad A_c = \sum \left[A_i \left(0,2 + \left(\frac{l_{wi}}{H} \right) \right)^2 \right]$$

A_c – totalna efektivna površina smičućih zidova prvog sprata zgrade u m^2 ;

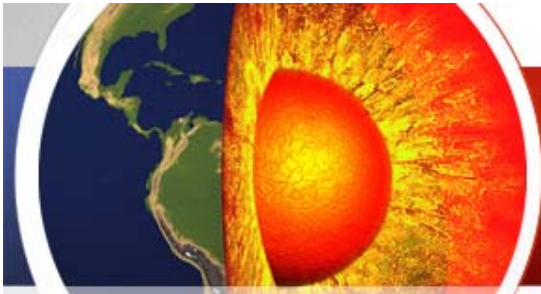
A_i – efektivna površina poprečnog preseka smičućeg zida u posmatranom pravcu prvog sprata;

l_{wi} – dužina smičućeg zida prvog sprata u pravcu koji je paralelan sa primenjenim silama izraže u metrima, sa ograničenjem da odnos l_{wi}/H ne prelazi 0,90.

Procena osnovnog perioda može da se uradi i prema sledećem izrazu:

$$T_1 = 2\sqrt{d}$$

d – horzionatno elastično pomeranje vrha zgrade izaženo u metrima usled gravitacionoh sila koje se primenjuju u horzionatnom pravcu.



METODE ANALIZE METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA

Uticaji od seizmičkog dejstva određuju se tako što se u svakom od dva ravanska modela zgrade apliciraju horizontalne spratne sile F_i :

$$F_i = F_b \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j}$$

F_i – horizontalna sila koja deluje na sprat i ;

F_b – seizmička sila u osnovi zgrade;

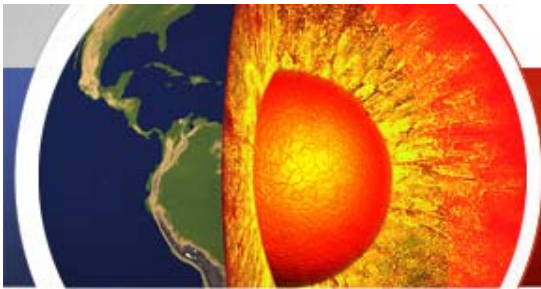
s_i, s_j – amplitude pomeranja masa m_i i m_j u osnovnom svojstvenom obliku;

m_i, m_j – spratne mase.

Kada se osnovni svojstveni oblik aproksimira sa horizontalnim pomeranjima koja se linearno povećavaju po visini zgrade, horizontalne sile F_i se određuju prema izrazu:

$$F_i = F_b \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j}$$

z_i, z_j – visine masa m_i i m_j iznad nivoa seizmičkog dejstva (temelji ili vrh krutog podruma);



METODE ANALIZE METODA EKVIVALENTNIH BOČNIH SILA

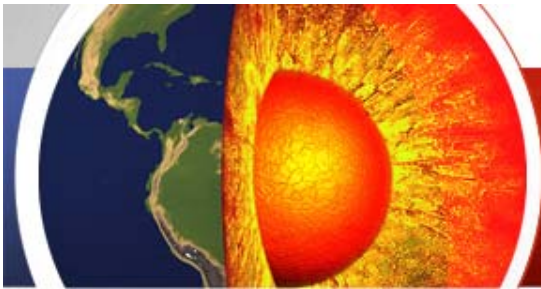
Ako su horizontalna krutost i masa simetrično raspoređeni u osnovi zgrade i ako slučajni ekscentricitet nije uzet u obzir nekim tačnijim postupkom, slučajni torzioni efekti mogu da se uzmu u obzir tako što se uticaji u pojedinačnim nosećim elementima pomnože faktorom δ :

$$\delta = 1 + 0,6 \frac{x}{L_e}$$

x – rastojanje posmatranog nosećeg elementa od centra mase zgrade u osnovi mereno upravno na pravac zemljotresnog dejstva koji se analizira;

L_e – rastojanje između dva međusobno najudaljenija noseća elementa u osnovi, mereno upravno na pravac zemljotresnog dejstva koji se analizira;

Ako se analiza sprovodi primenom dva ravanska modela, po jedan za svaki glavni horizontalni pravac, torzioni efekti mogu da budu određeni tako što se udvostruči slučajna ekscentričnost e_{ai} i primeni faktor δ , pri čemu je faktor 0,6 povećan na 1,2.



METODE ANALIZE MULTIMODALNA SPEKTRALNA ANALIZA

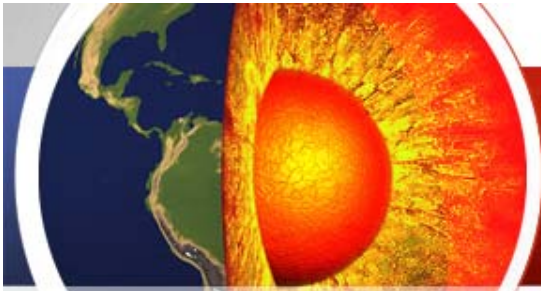
Ova analiza se primenjuje na zgrade koje ne zadovoljavaju uslove za primenu metode bočnih sila.

Uticaj svih svojstvenih oblika slobodnih vibracija koji značajno doprinose globalnom odgovoru zgrade moraju da se uzmu u obzir. Ovaj uslov je zadovoljena na bilo koji od sledećih načina:

- zbir efektivnih modalnih masa za razmatrane svojstvene oblike vibracija iznosi najmanje 90% od ukupne mase konstrukcije;
- svi tonovi sa efektivnim modalnim masama koje su veće od 5% od ukupne mase konstrukcije su uzeti u obzir.

Ako ovi zahtevi ne mogu da budu zadovoljeni (npr. kod zgrada sa značajnim doprinosom torzionih tonova), minimalan broj k tonova koji treba da se uzme u obzir u prostornoj analizimora da zadovolji oba uslova:

$$k \geq 3\sqrt{n} \quad T_k \leq 0,2s \quad n - \text{broj spratova iznad temlja ili iznad krutog podruma.}$$



METODE ANALIZE MULTIMODALNA SPEKTRALNA ANALIZA

Odgovori za dva svojstvena oblika i i j (uključujući translatorne i torzione oblike) mogu da se smatraju kao međusobno nezavisni ukoliko njihovim periodima T_i i T_j zadovoljavaju uslov (pretpostavka $T_j \leq T_i$):

$$T_j \leq 0,9T_i$$

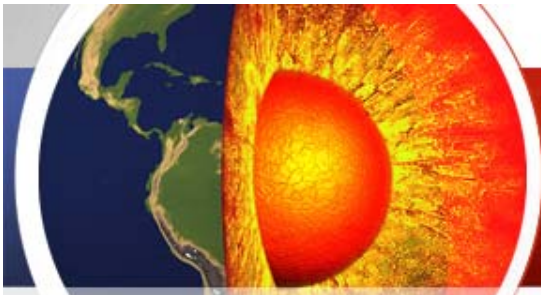
Kada svi relevantni modalni odgovori mogu da se posmatraju kao međusobno nezavisni, maksimalna vrednost nekog uticaja E_E od seizmičkog dejstva je:

$$E_E \leq \sqrt{\sum E_{Ei}^2}$$

E_E – posmatrani seizmički uticaj (npr. sila, pomeranje itd.);

E_{ei} – vrednost posmatranog uticaja u svojstvenom obliku i .

Ako nije zadovoljen uslov međusobne nezavisnosti svojstvenih oblika, tačniji postupci kombinovanja modalnih maksimuma, kao što je „kompletna kvadratna kombinacija“, moraju da se primene.



METODE ANALIZE MULTIMODALNA SPEKTRALNA ANALIZA

Kada se u analzi koristi prostorni proračunski model, slučajni torzioni efekti mogu da se odrede kao anvelope uticaja koji se dobijaju usled statičkih opterećenja koja se sastoje od torzionih momenata M_{ai} oko vertikalnih osa svakog sprata i :

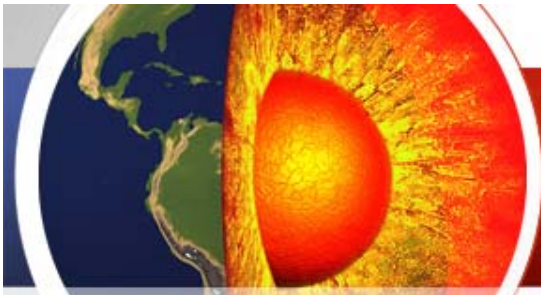
$$M_{ai} = e_{ai}F_i$$

M_{ai} – torzioni moment primenjen na sprat i oko njegove vertikalne ose (kroz centar mase);

e_{ai} – slučajni ekscentricitet ukupne mase sprata i za sve relevantni pravac;

F_i – horizontalna sila koja deluje na sprat i za sve relevantne pravce.

Uticaj od slučajnih torzionih efekata treba da se uzme u obzir i sa pozitivnim i sa negativnim znacima (isti znak za sve spratove).



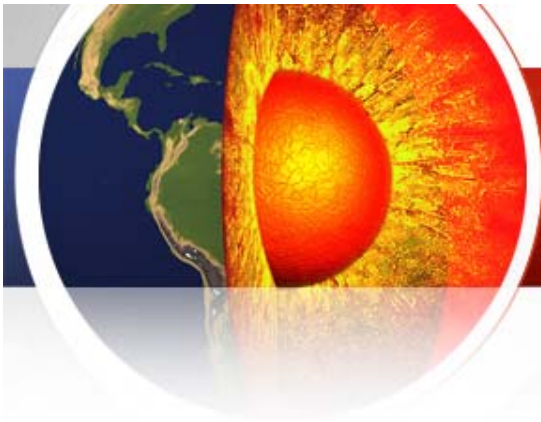
METODE ANALIZE NELINEARNA STATIČKA ANALIZA

Nelinearna statička („pushover“) analiza je nelinearna statička analiza koja se sprovodi pod uslovima konstantnog gravitacionog opterećenja i monotonno rastućeg horizontalnog opterećenja.

Barem dve vertikalne raspodele bočnih (poprečnih) sila moraju da se primene:

- „ravnomerna raspodela“ zasnovana na bočnim silama koje su proporcionalne masama bez obzira na visinski položaj (ravnomerna raspodela ubrzanja pri zemljotresu);
- „modalna raspodela“ proporcionalna sa bočnim silama koje su u skladu sa raspodelom bočnih sila u posmatranom pravcu, određene u elastičnoj analizi).

Bočne sile moraju da se apliciraju na mestima koncentrisanih masa u proračunskom modelu. Slučajni ekscentricitet mora da se uzme u obzir.

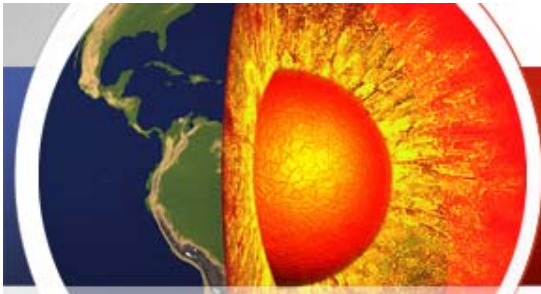


METODE ANALIZE NELINEARNA ANALIZA VREMENSKOG ODGOVORA

Vremenska zavisnost odgovora konstrukcije može da se odredi primenom direktne numeričke integracije diferencijalnih jednačina kretanja, koristeći akcelerograme.

Modeli konstrukcijskih elemenata treba realno da opisuju disipaciju energije u intervalu očekivanih amplituda pomeranja u seizmičkoj proračunskoj situaciji.

Ako je odgovor određen na osnovu barem 7 nelinearnih analiza osrednjene vrednosti odgovora dobijenih iz svih ovih analiza mogu da se koriste kao proračunska vrednost uticaja od zemljotresa E_d . U suprotnom, kao E_d mora da se koristi najnepovoljnija vrednost iz svih sprovedenih analiza.



KOMBINACIJA EFEKATA KOMPONENATA SEIZMIČKOG DEJSTVA

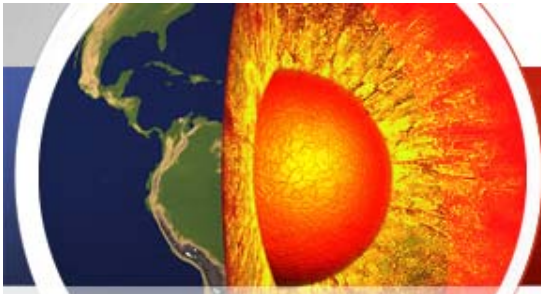
U opštem slučaju smatra se da horizontalne komponente seizmičkog dejstva deluju istovremeno.

Kombinacija horizontalnih komponenti seizmičkog dejstva može da se uzme u obzir na sledeće načine:

Odgovor konstrukcije za svaku komponentu mora da se izračuna posebno, koristeći pravila kombinovanja modalnih odgovora;

Maksimalna vrednost bilo kog uticaja u konstrukciji usled dve horizontalne komponente uticaja seizmičkog dejstva, može da se proceni kao kvadratni koren zbira kvadrata uticaja za svaku horizontalnu komponentu;

Prethodno načelo daje konzervativnu procenu verovatne vrednosti. Mogu da se koriste tačniji modeli za procenu verovatne simultane vrednosti efekata dve horizontalne komponente zemljotresnog dejstva.



KOMBINACIJA EFEKATA KOMPONENATA SEIZMIČKOG DEJSTVA

Alternativno, seizmički uticaji usled kombinacije horizontalnih komponenti seizmičkog dejstva mogu da se izračunaju primenom obe sledeće kombinacije:

$$E_{Edx} + 0,3E_{Edy}$$

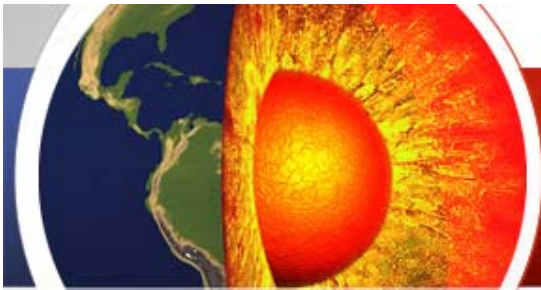
$$E_{Edy} + 0,3E_{Edx}$$

“+“ – ukazuje „da se kombinuje sa“;

E_{edx} – vrednost uticaja usled primene seizmičkog dejstva u pravcu izabrane ose x konstrukcije;

E_{edy} – vrednost uticaja usled primene seizmičkog dejstva u pravcu izabrane ose y konstrukcije.

Za zgrade koje zadovoljavaju kriterijume regularnosti u osnovi i kod kojih su zidovi ili nezavisni sistemi spregova u dva glavna horizontalna pravca jedini primarni seizmički elementi, može da se smatra da seizmička dejstva deluju odvojeno bez kombinovanja.



KOMBINACIJA EFEKATA KOMPONENATA SEIZMIČKOG DEJSTVA

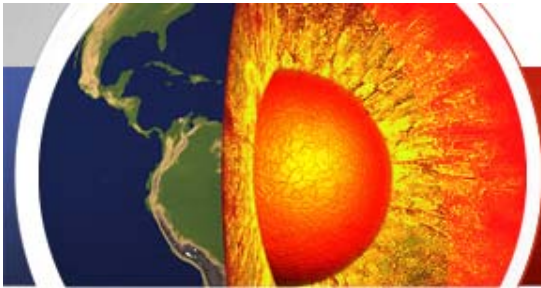
Ako je a_{vg} veće od $0,25g$ vertikalna komponenta seizmičkog djestva mora da se uzme u obzir u sledećim slučajevima:

- za horizontalne ili skoro horizontalne konstrukcijske elemente sa rasponima 20 m ili više;
- za horizontalne ili skoro horizontalne konzolne elemente duže od 5 m;
- za horizontalne ili skoro horizontalne prethodno-napregnute elemente;
- za grede na koje su oslonjeni stubovi;
- za konstrukcije sa baznom izolacijom.

$$E_{Edx} + 0,3E_{Edy} + 0,3E_{Edz}$$

$$0,3E_{Edx} + E_{Edy} + 0,3E_{Edz}$$

$$0,3E_{Edx} + 0,3E_{Edy} + E_{Edz}$$



PRORAČUN POMERANJA

Ako se primenjuje linearna analiza, pomeranja nastala usled projektnog seizmičkog dejstva treba da se izračunaju na osnovu elastičnih deformacija konstrukcijskog sistema:

$$d_s = q_d \cdot d_e$$

d_s – pomeranje tačke konstrukcijskog sistema usled projektnog seizmičkog dejstva;

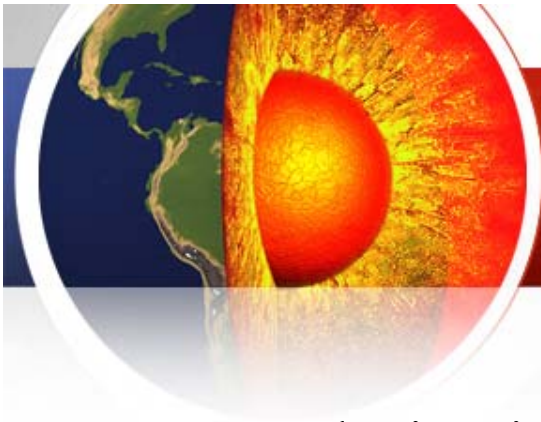
q_d – faktor ponašanja za pomeranja, za koje se usvaja da je jednako q osim ako nije dtugačije navedeno u standardu;

d_e – pomeranje iste začke konstrukcijskog sistema koje je određeno prema linearnoj analizi zasnovanoj na projektnom sepktru odgovora.

Vrednost d_s ne treba da bude veća od vrednosti koja je dobijena primenom elastičnog spektra. U opštem slučaju q_d je veće od q ako je osnovni period konstrukcije manji od T_c .

Kada se određuje d_e moraju da se uzmu u obzir i uticaji torzionih efekata.

U slučajevima primene nelinearne statičke ili dinamičke analize, dobijena pomeranja su ona koja su direktno određena u analizi, bez dodatne modifikacije.



DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

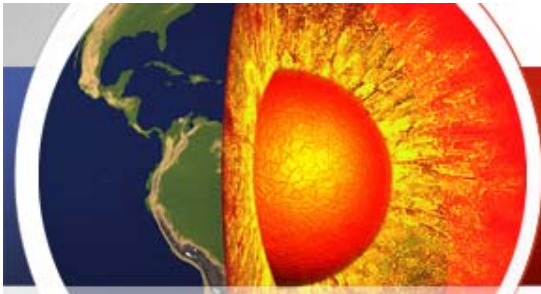
Smatra se da je sigurnost protiv rušenja usled seizmičke proračunske situacije osigurana ukoliko su zadovoljeni zahtevi nosivosti, duktilnosti, ravnoteže, stabilnosti temelja.

Uslov nosivosti:

$$E_d \leq R_d$$

E_d – proračunska vrednost uticaja od projektnog seizmičkog dejstva;

R_d – odgovarajuća proračunska vrednost nosivosti elementa



DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Efekte drugog reda (P- Δ efekti) ne moraju da se uzimaju u obzir ako je sledeći uslov zadovoljen za sve spratove:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$$

θ – koeficijent osetljivosti međuspratnog relativnog horizontalnog pomeranja;

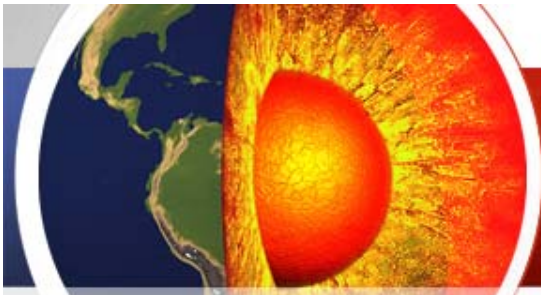
P_{tot} – ukupno gravitaciono opterećenje na i iznad posmatranog sprata razmatrano u seizmičkoj proračunskoj situaciji;

d_r - proračunsko međuspratno relativno horizontalno pomeranje, izračunato kao razlika između osrednjenih horizontalnih pomeranja d_s na vrhu i na dnu posmatranog sprata;

V_{tot} – ukupna seizmička smičuća sila u posmatranom spratu;

h – međuspratna visina.

Ako je $0,1 < \theta \leq 0,2$, uticaji drugog reda mogu da se približno uzmu u obzir množenjem relevantnih uticaja od seizmičkih dejstava faktorom $1/(1-\theta)$.



DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

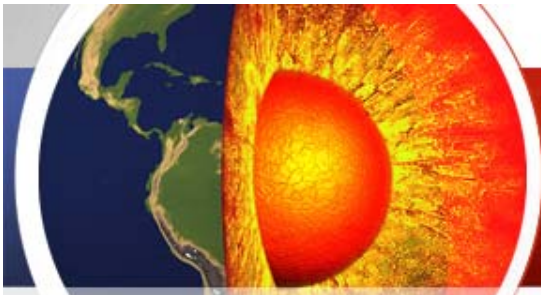
Globalni i lokalni uslovi duktilnosti:

- Mora da se proveriti da li konstrukcijski elementi ili konstrukcija u celini poseduje adekvatnu duktilnost, uzimajući u obzir očekivanu duktilnost u eksploataciji, koja zavisi od izabranog sistema i faktora ponašanja;
- Potrebno je ostvariti hijerarhiju nosivosti različitih konstrukcijskih komponenti koja je neophodna da se osigura nameravana konfiguracija plastičnih zglobova i da se izbegnu kruti lomovi. Kod višespratnih zgrada mora da se spreči formiranje plastičnog mehanizma „mekog“ sprata.

$$\sum M_{Rc} \geq 1,3 \sum M_{Rb}$$

$\sum M_{Rc}$ – zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti stubova vezanih u čvoru. Minimalna vrednost momenata nosivosti stubova unutar opsega aksijalnih sila u stubovima nastalih u seizmičkoj proračunskoj situaciji moraju da se korite;

$\sum M_{Rb}$ – zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti greda koje su vezane u čvoru. Kada se koriste veze sa delimičnom nosivošću, momenti nosivosti tih veza se uzimaju u obzir.



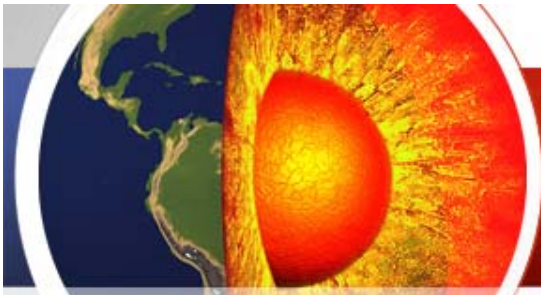
DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Uslov ravoteže:

- Konstrukcija zgrade mora da bude stabilna, uključujući preturanje ili klizanje, u seizmičkoj proračunskoj situaciji.

Otpornost horizontalnih dijafragmi:

- Dijafragme i spregovi u horizontalnim ravnima moraju da budu u stanju da prenesu, sa dovoljnom rezervom nosivosti, uticaje od projektnih seizmičkih dejstava na vertikalne sisteme za prihvatanje bočnih sila sa kojima su povezane. Smatra se da je zahtev zadovoljen ukoliko se dobijeni uticaji u dijafragmi usled seizmičkih dejstava, koji se koriste u odgovarajućim proverama otpornosti, pomnoženi faktorom prekoračenja γ_d većim od **1,0**. (Vrednost može biti definisana u Nacionalnom aneksu. Preporučena vrednost za kruti lom, kao što je smicanje u betonskim dijafragmama iznosi **1,3**, a za duktilni lom je **1,1**.)



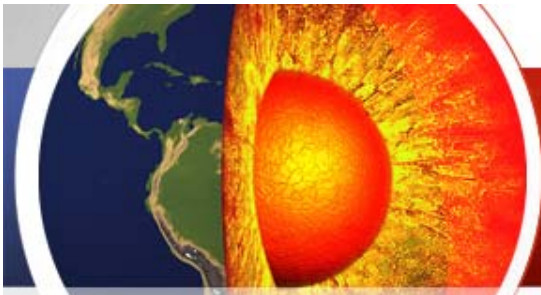
DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Otpornost temelja:

- Uticaji na temelje moraju da se odrede prema proračunu na osnovu programiranog ponašanja uzimajući u obzir i moguću rezervu nosivosti, ali ne treba da prekorače uticaje od seizmičkog dejstva koji odgovaraju odgovoru konstrukcije u seizmičkoj proračunskoj situaciji uz pretpostavku o elastičnom ponašanju ($q = 1,0$);
- Za temelje pojedinačnih vertikalnih elemenata (zidova ili stubova) zahtev će biti zadovoljen ako su proračunske vrednosti uticaja na temelje E_{Fd} određene prema izrazu:

$$E_{Fd} = E_{F,G} + \gamma_{Rd} \Omega E_{F,E}$$

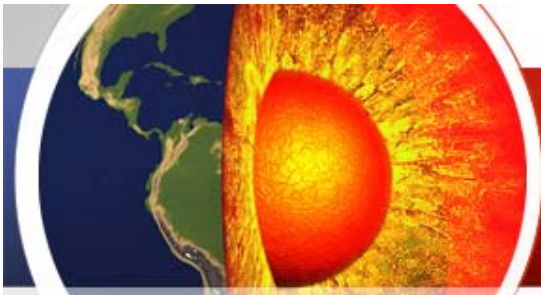
γ_{Rd} – faktor rezerve nosivosti (1,0 za $q \leq 3$ ili 1,2 u suprotnom);
 $E_{F,G}$ – uticaj od neseizmičkog dejstva koja su uključena u seizmičku proračunsku situaciju;
 $E_{F,E}$ – uticaj iz analize u seizmičkoj proračunskoj situaciji;
 Ω – vrednost izraza $R_{di}/E_{di} \leq q$ za disipativnu zonu ili elementa i ;
 R_{di} – proračunska nosivost disipativne zone ili elementa i ;
 E_{di} – proračunska vrednost uticaja u disipativnoj zoni ili elementu i u seizmičkoj proračunskoj situaciji.



DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE NOSIVOSTI

Uslov seizmičke dilatacije:

- Zgrade moraju da budu zaštićene od sudaranja izazvanog zemljotresom sa susednim objektima ili od sudaranja između konstrukcijski nezavisnih delova iste zgrade;
- Za zgrade ili za konstrukcijski nezavisne celine , koje ne pripadaju istoj građevinskoj parceli, ako rastojanje između linije razgraničavanja parcela do potencijalnih tačaka sudara nije manje od maksimalnog horizontalnog pomeranja zgrade na odgovarajućem nivou;
- Za zgrade ili za konstrukcijski nezavisne celine , koje pripadaju istoj građevinskoj parceli, ako rastojanje između njih nije manje od kvadratnog korena od zbira kvadrata od maksimalnih horizontalnih pomeranja dve zgrade ili dve celine na odgovarajućem nivou.
- Ako su spratne visine zgrada ili nezavisnih celina koje se posmatraju iste, kao i spratne visine susedne zgrade ili nezavisne celine, gore navedeno minimalno rastojanje može da bude redukovano sa faktorom **0,7**.



DOKAZ SIGURNOSTI GRANIČNO STANJE UPOTREBLJIVOSTI

Ograničenje relativnog spratnog pomeranja:

- Za zgrade koje poseduju nenoseće elemente od krutih materijala koji su vezani za konstrukciju:

$$d_r v \leq 0,005h$$

- Za zgrade koje sadrže duktilne nenoseće elemente:

$$d_r v \leq 0,0075h$$

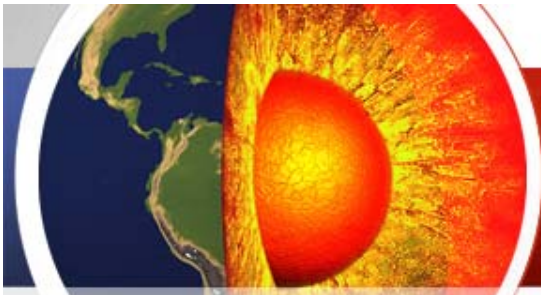
- Za zgrade koje poseduju nenoseće elemente koji su vezani tako da ne ometaju deformaciju konstrukcije ili za zgrade bez nenosećih elemenata:

$$d_r v \leq 0,010h$$

d_r – međuspratno relativno horizontalno pomeranje;

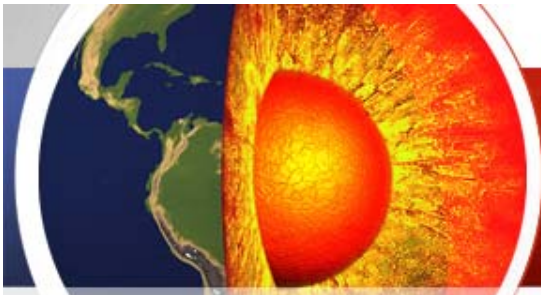
h – spratna visina;

v – faktor redukcije kojim se uzima u obzir kraći povratni period seizmičkog dejstva koje se odnosi na granično stanje upotrebljivosti. (**0,4** za klase značaja III i IV i **0,5** za klase značaja I i II)



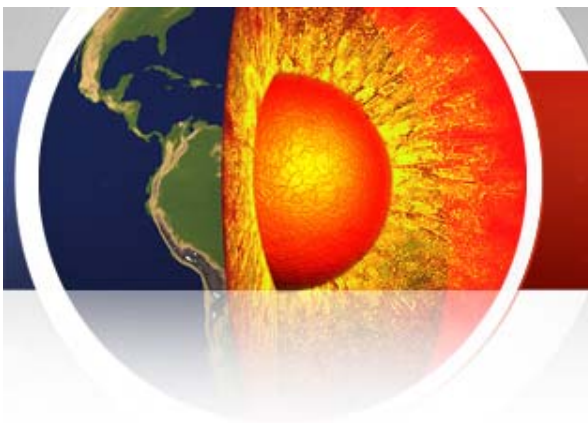
ZAKLJUČAK

- Definirane su karakteristike seizmički otpornih zgrada (jednostavnost, ujednačenost, simetrija, konstrukcijska rezerva, otpornost i krutos u dva pravca, torziona otpornost i krutost, ponašanje spratnih tavanica kao krutih dijafragmi, adekvatno fundiranje);
- Definirani su kriterijumi za klasifikaciju konstrukcija kao konstrukcijski regularne i konstrukcijski neregularne, kako u osnovi, tako i po visini;
- U zavisnosti od konstrukcijske regularnosti moguća su uprošćenja proračunskih modela;
- Razmatrane su metode analize konstrukcije na seizmičko dejstvo (metoda ekvivalentnih bočnih sila, multimodalna spektralna analiza, nelinearna statička „pushover“ analiza, nelinearna dinamička analiza vremenskog odgovora);



ZAKLJUČAK

- Definisano je načino kombinovanja efekata usled horizontalnih komponenti seizmičkog dejstva;
- Definisano je načino kombinovanja efekata usled horizontalnih i vertikalnih komponenti seizmičkog dejstva;
- Definisano je načino određivanja pomeranja konstrukcije obuhvatajući oštećenja konstrukcije usled duktilnog ponašanja;
- Prikazano je osnovni koncept dokaza sigurnosti za granično stanje nosivosti i granično stanje upotrebljivosti.



HVALA NA PAŽNJI

