

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Slaven Begović, Tanja Pejić, Vjeran Višnjević

**Dinamička svojstva sedam povijesnih zgrada u  
Zagrebu i njihova ugroženost potresima**

Zagreb, 2012. godina

Ovaj rad izrađen je na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Geofizički odsjek pod vodstvom dr. sc. Marijana Heraka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2011./2012.

## Sadržaj

Uvod .....	1
1. Teorija .....	2
1.1 Mireni oscilator uz vanjsku pobudu .....	2
1.2. Frekventni odziv oscilatora .....	5
1.3 Amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ i HVSR.....	8
2. Instrumenti i mjerenja .....	15
3. Rezultati mjerenja i diskusija .....	17
3.1. The Regent Esplanade .....	17
3.2. Zagrebačka katedrala .....	21
3.3. Državni hidrometeorološki zavod .....	24
3.4. Hrvatsko narodno kazalište .....	28
3.5. Muzej Mimara .....	31
3.6. Rektorat Sveučilišta u Zagrebu.....	33
3.7. Hrvatski sabor.....	36
Zaključak .....	39
Zahvale .....	40
Literatura .....	41
Sažetak .....	43
Summary .....	44

## Uvod

Zemlja nikada ne miruje i stalno podrhtava. Stalna trešnja čije su akceleracije u rasponu od  $10^{-7}$  g do  $10^{-4}$  g (g - ubrzanje Zemljine sile teže) nazivamo mikroseizmički nemir. Porijeklo mikroseizmičkog nemira je raznoliko: promet, vjetar (čiji se utjecaj na tlo prenosi npr. putem stabala, preko građevina ili trenjem), industrijski radovi ili udaranje valova mora o obalu. Zbog podrhtavanja tla podrhtavaju i zgrade, što je moguće mjeriti, a time i izračunati dinamičke parametre osciliranja zgrade (frekvenciju, mirenje) koji mogu dati vrijedne informacije o trenutnom stanju zgrade (Prevolnik, 2008; Crawford i Ward, 1964; Trifunac, 1972; Brownjohn, 2003; Ventura i dr., 2003), tj. o njejoj stabilnosti ili trenutnoj ugroženosti (kolika je opasnost većeg ili manjeg oštećenja zgrade uslijed mogućeg potresa). Također, moguće je izmjeriti mikrovibracije zgrade prije i poslije potresa, građevinskih zahvata ili oštećenja te vidjeti razlike u parametrima i ukazati na potrebne zahvate za ojačavanje zgrade jer se uslijed potresa možda dogodilo strukturno oštećenje koje ne mora biti vidljivo okom. Na ponašanje zgrada utječu materijali i način gradnje, dimenzije zgrada i njihov oblik. Za vrijeme trajanja potresa uvjeti u kojima se zgrada nalazi bitno su drugačiji od onih u kojima potresa nema i zgrada miruje, no, ova jednostavna metoda daje vrlo kvalitetnu mogućnost procjene ponašanja građevina. To se posebno odnosi na procjenu mogućnosti rezonancije zgrada – tlo, ako se očekuje da će tlo na kojem se nalazi temelj zgrade tijekom potresa oscilirati frekvencijama bliskima vlastitim frekvencijama građevine.

Zagrebačko jepodručje smješteno na seizmički aktivnom prostoru, na dodiru velikih tektonskih jedinica Alpa, Dinarida i Panonskog bazena. Josip Torbar piše o potresu u Zagrebu 1880. godine, čiji opis odgovara VIII. stupnju Mercalli-Cancani-Siebergove ljestvice (Herak i Herak, 2008; Aničić, 2000). Već Mohorovičić u svom predavanju iz 1909. godine napominje da prosječna građevina za svog životnog vijeka mora izdržati popriličan broj potresa među kojima su oko 100 umjerenih, 100 slabijih i 1500 do 2000 vrlo slabih potresa sa žarištem podno grada Zagreba te oni u široj okolini (Mohorovičić, 2009).

Cilj jeovog rada po prvi put utvrditi potresnu ugroženost nekoliko povijesno važnih građevina u Zagrebu i njihove dinamičke parametre. Mjerenja oscilacija uzrokovanih mikroseizmičkim nemirom izvedena su u zgradama Hrvatskog sabora, hotela The Regent Esplanade, Državnog hidrometeorološkog zavoda, zagrebačke katedrale, Rektorata Sveučilišta u Zagrebu, muzeja

Mimare i Hrvatskog narodnog kazališta. Rad je podijeljen u tri cjeline: teorijska razrada, opis instrumenta i mjerenja te analiza dobivenih rezultata.

## 1. Teorija

### 1.1 Mireni oscilator uz vanjsku pobudu

Prema Prevolniku (Prevolnik, 2008), dinamičko ponašanje svake građevine ovisi o njoj vlastitoj frekvenciji i o omjeru mirenja osnovnog i viših modova prisilnih oscilacija. Te dvije veličine nazivamo dinamičkim parametrima građevine, a njihovo poznavanje vrlo je važno, s obzirom na to da pomoću njih možemo procijeniti ponašanje zgrade u slučaju potresa i ocijeniti njezinu ugroženost. Da bismo odredili te parametre, moramo građevinu aproksimirati nekim sustavom kojeg znamo matematički opisati. U prvoj aproksimaciji, i uz pretpostavku linearnog elastičnog sustava, možemo građevinu opisati jednodimenzionalnim oscilatorom uz vanjsku pobudu, koju u ovom slučaju predstavlja mikrosezmički nemir. Za svaku zgradu izvedena su mjerenja u samoj zgradi i jedno mjerenje na tlu ispred zgrade u njoj blizini (*free-field*). Mjerenjem na tlu određujemo vanjsku pobudu koja djeluje na temelje zgrade.

Odziv harmoničkog oscilatora na vanjsku pobudu dobije se rješavanjem obične diferencijalne jednadžbe mirenog harmoničkog oscilatora uz vanjsku pobudu

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -ma(t) \quad (1)$$

gdje je  $m$  masa oscilatora,  $x$  je relativni pomak mase  $m$  u odnosu na tlo,  $c$  je koeficijent mirenja,  $k$  krutost sustava, a  $a(t)$  je apsolutna akceleracija tla u odnosu na neku fiksnu referentnu točku. Podijelimo li jednadžbu (1) s masom, dobivamo

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -a(t) \quad (2)$$

gdje su  $\omega_0$  i  $\zeta$  dinamički parametri – vlastita kružna frekvencija slobodnog oscilatora i omjer mirenja – koje opisujemo jednadžbama

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

i

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}}. \quad (4)$$

Omjer mirenja je bezdimenzionalna veličina koja se izražava u postocima koeficijenta kritičnog mirenja  $c_c$ . Vlastiti period harmoničkog oscilatora dan je s

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (5)$$

Jednadžbu (1) rješava se metodom varijacije konstanti (koju ovdje nećemo detaljno opisivati) u dva koraka: rješavanjem homogene jednadžbe (slobodni mireni harmonički oscilator, jednadžba (6))

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (6)$$

i nehomogene jednadžbe (opći oblik jednadžbe (2)).

Homogena jednadžba rješava se uz pretpostavku rješenja oblika

$$x = e^{\gamma t} \quad (7)$$

u kojem je  $\gamma$  obično kompleksan broj. Kad uvrstimo takav oblik rješenja u jednadžbu (6), dobivamo kvadratnu jednadžbu po  $\gamma$ , koja za rješenje daje

$$\gamma_{1,2} = \omega_0(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}). \quad (8)$$

Iz posljednje jednadžbe možemo vidjeti da će harmonički oscilator imati različite režime gibanja u ovisnosti o međusobnom odnosu njegove vlastite frekvencije i koeficijenta mirenja, točnije rješenje jednadžbe (6) ovisit će o tome ima li jednadžba (8) jedno realno rješenje, dva realna rješenja ili dva kompleksno-konjugirana rješenja.

Ako je  $0 \leq \zeta < 1$ , sustav ima dva kompleksno-konjugirana rješenja i oscilator je potkritički miren. Pomak je dan s

$$x_h(t) = C_1 e^{-(\zeta\omega_0 - i\omega_d)t} + C_2 e^{-(\zeta\omega_0 + i\omega_d)t}, \quad (9)$$

gdje je  $\omega_d$  vlastita kružna frekvencija mirenog sustava definirana kao

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (10)$$

a  $C_1$  i  $C_2$  su konstante koje se određuju iz rubnih uvjeta.

Rješenje za pomak potkritički mirenog oscilatora može se napisati i u sljedećem obliku

$$x_h(t) = X e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t - \varphi) \quad (11)$$

iz kojeg se vidi da potkritički miren sustav oscilira kružnom frekvencijom  $\omega_d$  i fazom  $\varphi$  i da amplituda oscilacija trne u vremenu u ovisnosti o omjeru mirenja  $\zeta$ . Što je omjer mirenja veći, to je trnjenje amplitude brže u vremenu.

U slučaju  $\zeta = 1$  jednadžba (6) ima jedno realno rješenje i sustav je kritički miren. Amplituda takvog oscilatora trne bez oscilacija i pomak je opisan jednadžbom

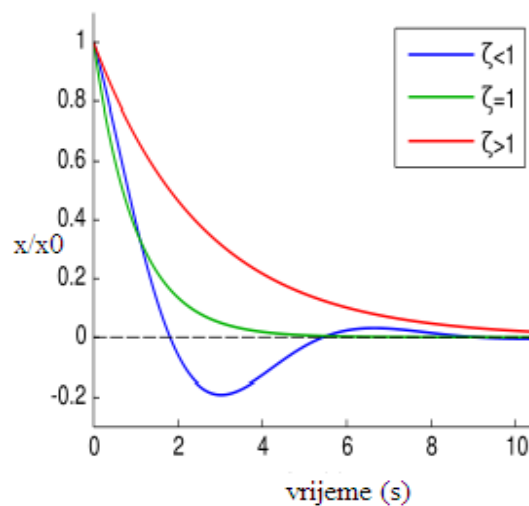
$$x_h(t) = [C_1 + C_2 t]e^{-\omega_0 t}. \quad (12)$$

U slučaju  $\zeta > 1$  jednadžba (6) ima dva realna rješenja i sustav je natkritički miren. Amplituda takvog oscilatora također trne bez oscilacija, ali sporije nego u slučaju kritičkog mirenja. Pomak je opisan jednadžbom

$$x_h(t) = C_1 e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t} + C_2 e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_0 t}. \quad (13)$$

Sva tri oblika gibanja slobodnog mirenog oscilatora prikazana su na slici 1.1<sup>1</sup>.

Gibanje slobodnog mirenog harmoničkog oscilatora harmoničko je samo u slučaju kad postoje oscilacije, dakle u slučaju potkritičkog mirenja pa je jednadžba (9) rješenje homogene jednadžbe (6).



Slika 1.1. Ponašanje slobodnog mirenog oscilatora u ovisnosti o omjeru mirenja.

Pri rješavanju nehomogene jednadžbe pretpostavljamo rješenje jednadžbe u obliku jednadžbe (9), ali  $C_1$  i  $C_2$  više nisu konstante, već su funkcije vremena  $C_1(t)$  i  $C_2(t)$

<sup>1</sup>Izvor:Prevolnik, 2008

$$x_h(t) = C_1(t)e^{-(\zeta\omega_0 - i\omega_d)t} + C_2(t)e^{-(\zeta\omega_0 + i\omega_d)t}. \quad (14)$$

Navedenom metodom varijacije konstanti dobiva se rješenje mirenog harmoničkog oscilatora uz djelovanje vanjske pobude  $a(t)$

$$x(t) = \frac{-1}{\omega_d} \int_0^t a(\tau) e^{-\zeta\omega_0(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau, \quad (15)$$

iz kojeg se vidi da uz bilo koju pobudu  $a(t)$  možemo izračunati vremenski odziv oscilatora  $x(t)$ .

### 1.2. Frekventni odziv oscilatora

Frekventni odziv sustava definira se kao omjer Fourierova transformata izlaznog signala i Fourierova transformata ulaznog signala. Fourierov transform definiran je kao

$$F[x(t)] = X(i\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

i omogućuje nam prijelaz iz vremenskog oblika signala u frekventni oblik signala. U našem slučaju ulazni je signal Fourierov transform apsolutnog pomaka tla u odnosu na fiksnu referentnu točku, a izlazni je signal pomak izmjeren u samoj zgradi.

Primjenom Fourierova transformata na jednadžbu (2) dobivamo sljedeće

$$(i\omega)^2 X(i\omega) + 2\zeta\omega_0 i\omega X(i\omega) + \omega_0^2 X(i\omega) = -(i\omega)^2 A(i\omega), \quad (17)$$

gdje je  $A(i\omega)$  ulazni signal, a  $X(i\omega)$  izlazni signal. Prema tome, frekventni je odziv sustava

$$F(i\omega) = \frac{X(i\omega)}{A(i\omega)} = \frac{\omega^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega_0^2\omega^2} - \frac{i(2\zeta\omega_0\omega^3)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega_0^2\omega^2}. \quad (18)$$

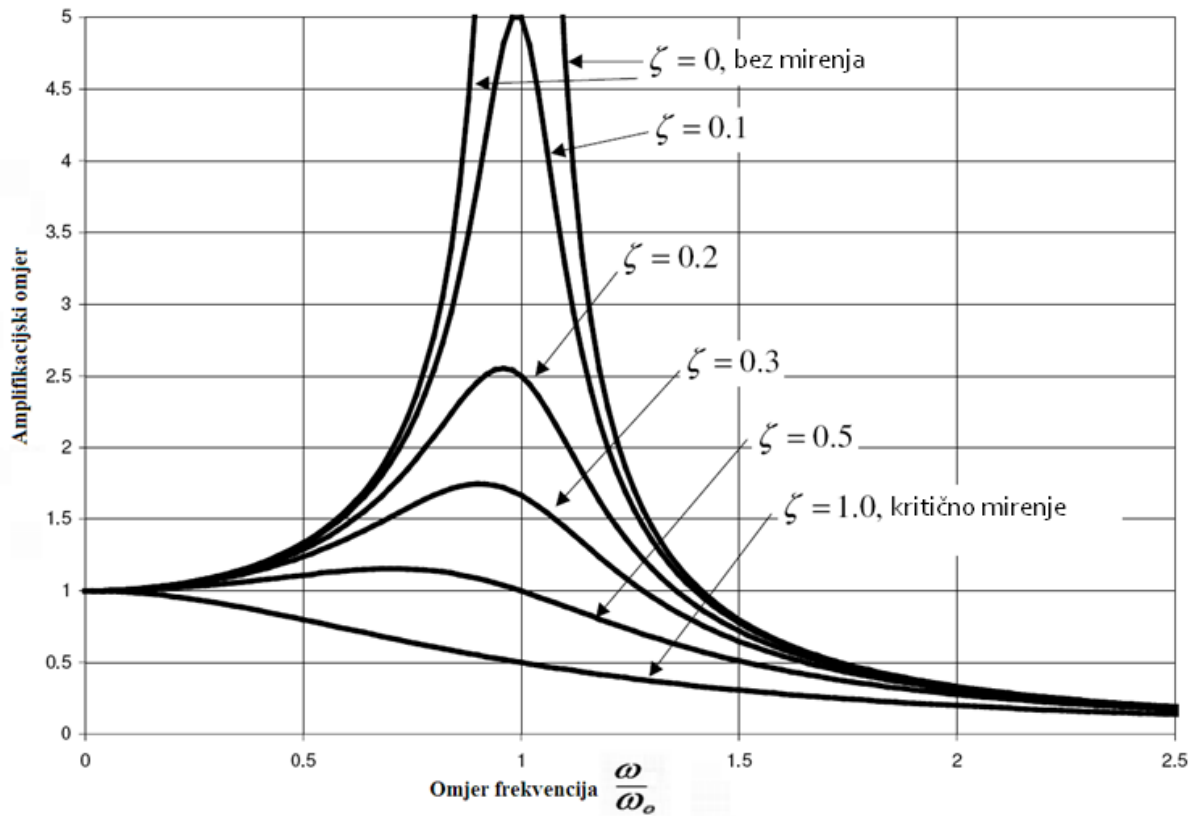
Vidimo da je to kompleksna veličina pa ju prikazom u polarnom obliku možemo rastaviti na amplitudni frekventni odziv i fazni frekventni odziv, koji su predočeni jednadžbama (19) i (20)

$$|F(i\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega_0^2\omega^2}}, \quad (19)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan \frac{\text{Im}(F(i\omega))}{\text{Re}(F(i\omega))} = \arctan \frac{2\zeta\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (20)$$



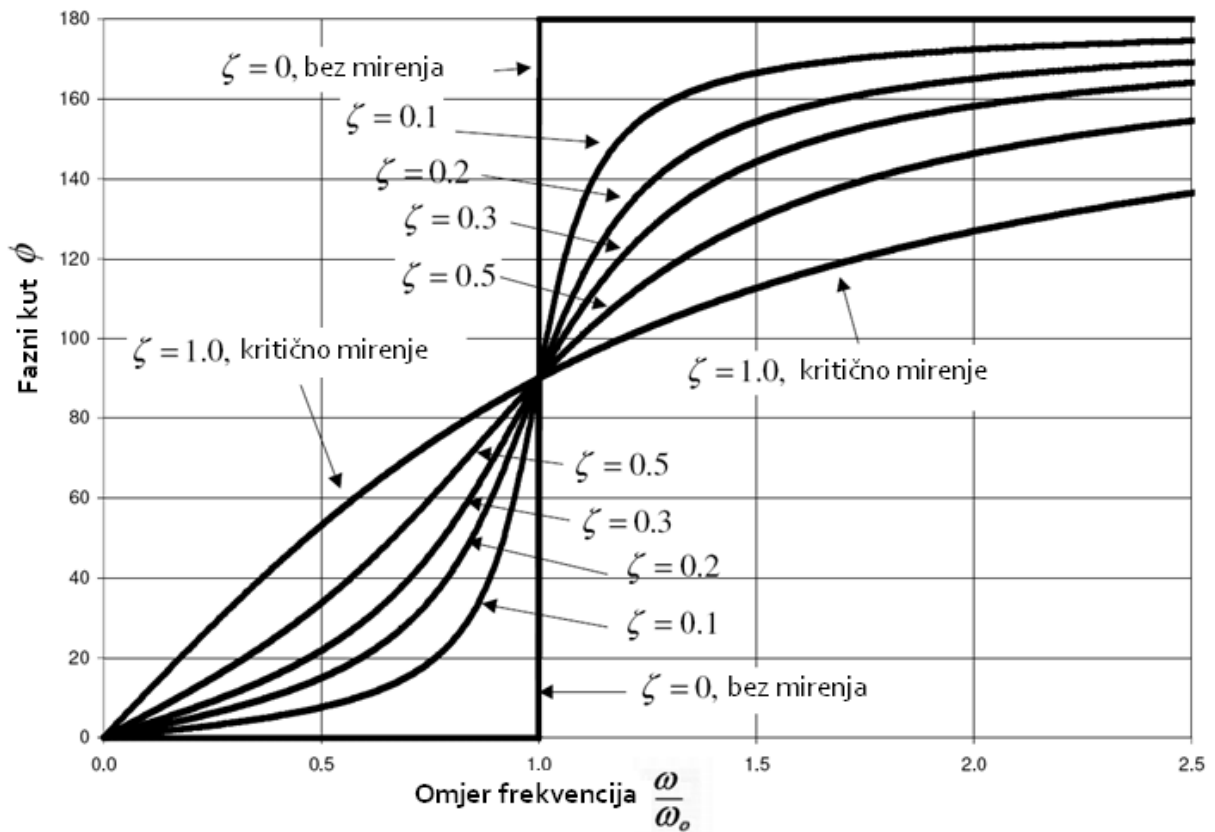
Amplitudni i fazni frekventni odziv prikazuju ovisnost amplitude i faze o kružnoj frekvenciji vanjske pobude  $\omega$ , vlastitoj kružnoj frekvenciji oscilatora  $\omega_0$  i omjeru mirenja  $\zeta$ . Amplitudni i fazni frekventni odziv prikazani su na slikama 1.2<sup>2</sup> i 1.3<sup>3</sup>.



Slika 1.2. Amplitudni frekventni odziv oscilatora.

<sup>2</sup> Izvor: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>

<sup>3</sup> Izvor: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>

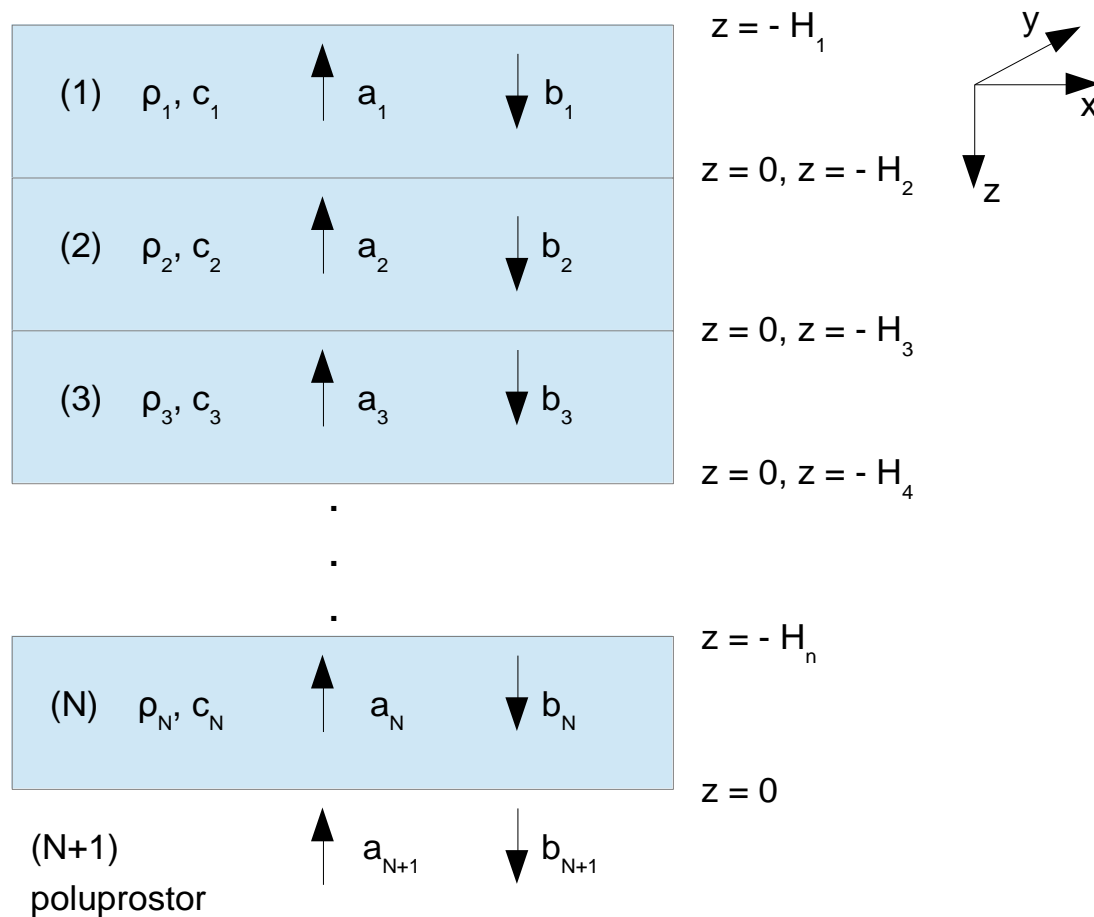


Slika 1.3. Fazni frekventni odziv oscilatora.

Kada je kružna frekvencija vanjske pobude bliska vlastitoj kružnoj frekvenciji oscilatora, dolazi do rezonancije, pri čemu je amplituda osciliranja vrlo velika i sustav se može oštetiti. Iz tog je razloga vrlo važno odrediti vlastitu frekvenciju neke zgrade i predvidjeti kada može doći do rezonancije te pokušati naći načine sprječavanja njene pojave.

### 1.3 Amplifikacijski spektar $AMP(\omega)$ i HVSR

Učinci potresa na građevinu ovise i o vrsti tla na kojem je dotična građevina sagrađena. Općenito, amplitude oscilacija tla bit će manje na čvrstom tlu nego na rastresitom. Zbog toga valja poznavati geološka i fizikalna svojstva terena na kojem je građevina izgrađena kako bi se mogle objasniti opažene amplitude. Pogledajmo najprije teorijski slučaj upada ravnog SH-vala odozdo na strukturu koja se sastoji od horizontalnih slojeva (prema Tsai, 1969).



Slika 1.4. Struktura podzemlja i orijentacija koordinatnog sustava.

Pretpostavljamo podzemlje od  $N$  slojeva ( $N+1$  je poluprostor). Svaki od njih karakteriziran je debljinom  $H_i$ , gustoćom  $\rho_i$  i brzinom širenja valova kroz taj sloj  $c_i$ . Amplitude upadnih valova na slojeve neka su  $a_i$ , a amplitude reflektiranih valova  $b_i$ . Frekvencija vala dana je s  $\omega$ . Kartezijev koordinatni sustav sa z-osi prema dolje postavljamo na donju granicu svakog sloja, kao što je prikazano na slici 1.4. Promatramo harmonijski SH-val (jednadžba (21)) koji upada okomito na granicu slojeva i zanima nas što će se događati na površini i na vrhu poluprostora

$$y\left(t + \frac{z_n}{c_{(N+1)}}\right) = a_{N+1} e^{i\omega\left(t + \frac{z_n}{c_{(N+1)}}\right)}. \quad (21)$$

Za okomiti upad vala na granicu ne dolazi do konverzije valova i sve tri vrste valova (P, SV, SH) šire se neovisno jedan o drugom. Ako, pak, zraka upada pod nekim kutem, a gornji slojevi imaju manju brzinu širenja, onda se valovi lome prema okomici i transmitiraju kroz slojeve gotovo okomito. Zbog toga je pretpostavka o okomitom upadu razumna.

Promatramo val u  $j$ -tom sloju

$$\frac{\partial^2 v_j(z_j, t)}{\partial^2 t} = \frac{c_j^2(\omega) (\partial^2 v_j(z_j, t))}{\partial^2 z_j}, \quad -H < z_j \leq 0, \quad (22)$$

$$v_j(z_j, t) = a_j e^{i(\omega t + k_j z_j)} + b_j e^{i(\omega t - k_j z_j)}, \quad k_j = \frac{\omega}{c_j}. \quad (23)$$

Amplitude određujemo iz rubnih uvjeta za pomake i napetosti.

Napetost na površini mora biti nula

$$p_{zy}(z = -H_1) = 0 \quad (24)$$

$$\mu \frac{\partial v_1}{\partial z_1} = 0 \rightarrow b_1 = a_1 e^{-2ik_1 H_1} = a_1 e^{-2is_1} \quad (25)$$

gdje smo uveli sljedeću oznaku:  $s_j = k_j H_j$ ,  $j = 1, \dots, N$ .

Pomaci na granicama slojeva moraju biti kontinuirani

$$v_j = v_{j+1}, \quad (26)$$

a ako stavimo  $z_j = 0$ , odnosno  $z_{j+1} = -H_{j+1}$ , onda dobivamo sljedeću relaciju

$$a_j + b_j = a_{j+1} e^{-is_{j+1}} + b_{j+1} e^{is_{j+1}}. \quad (27)$$

Općeniti rubni uvjet za napetost na granicama slojeva je sljedeći

$$p_{zy}(z_{j-1} = 0) = p_{zy}(z_j = -H_j). \quad (28)$$

Vrijedi da je  $p_{zy,j} = \mu_j \frac{\partial v_j}{\partial z_j}$  pa rješavanjem prethodne jednadžbe i upotrebom definicije modula smicanja  $\mu, \mu_j = \rho_j c_j^2$  dobivamo sljedeću jednadžbu

$$\frac{\rho_{j-1} c_{j-1}}{\rho_j c_j} (a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{is_j}. \quad (29)$$

Prvi faktor s lijeve strane jednadžbe (29), omjer umnoška gustoće i brzine plićeg i dubljeg sloja, nazivamo relativna seizmička impedancija i označavamo ga

$$\alpha_{j-1} = \frac{\rho_{j-1} c_{j-1}}{\rho_j c_j}. \quad (29a)$$

Sada jednadžba (29) poprima oblik

$$\alpha_{j-1} (a_{j-1} - b_{j-1}) = a_j e^{-is_j} - b_j e^{is_j}. \quad (30)$$

Jednadžbe (27) i (30) možemo sada prvo međusobno zbrojiti pa nakon toga oduzeti kako bismo dobili izraze za amplitude upadnog i reflektiranog vala izražene preko seizmičke impedancije:

$$\begin{aligned} a_j &= \frac{1}{2} [(1 + \alpha_{j-1})a_{j-1} + (1 - \alpha_{j-1})b_{j-1}] e^{is_j} \\ b_j &= \frac{1}{2} [(1 - \alpha_{j-1})a_{j-1} + (1 + \alpha_{j-1})b_{j-1}] e^{-is_j}. \end{aligned} \quad (31)$$

Jednadžbe (31) zapisujemo u matičnom obliku

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + \alpha_{j-1})e^{is_j} & (1 - \alpha_{j-1})e^{is_j} \\ (1 - \alpha_{j-1})e^{-is_j} & (1 + \alpha_{j-1})e^{-is_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Matricu 2x2 s desne strane jednadžbe (32) (nazovimo je matricom  $A$ ) zapisat ćemo u obliku umnoška dviju matrica

$$A = \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{j-1} & 1 - \alpha_{j-1} \\ 1 - \alpha_{j-1} & 1 + \alpha_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Matrice s desne strane izraza (33) označit ćemo sa  $S_j$  odnosno  $2T_{j-1}$

$$S_j = \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix} \quad (33a)$$

$$2T_{j-1} = \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{j-1} & 1 - \alpha_{j-1} \\ 1 - \alpha_{j-1} & 1 + \alpha_{j-1} \end{bmatrix} \quad (33b)$$

pa jednađba (32) poprima sljedeći oblik

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \mathbf{S}_j \mathbf{T}_{j-1} \begin{bmatrix} a_{j-1} \\ b_{j-1} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Matrice  $\mathbf{S}$  i  $\mathbf{T}$  daju informacije o relativnoj seizmičkoj impedanciji pojedinih slojeva, dakle o gustoći i brzini rasprostiranja valova kroz njih te o dubini pojedinih slojeva. Da bismo mogli izračunati takve matrice, moramo poznavati geotehnička svojstva stijena koje čine temeljno tlo.

Promatramo pomak u sustavu sloja iznad poluprostora ( $z_N = 0$ )

$$v_{N+1} = a_{N+1} e^{i(\omega t + k_{N+1} z_N)} + b_{N+1} e^{i(\omega t - k_{N+1} z_N)},$$

i ponovno iskorištavamo rubne uvjete, jednađbe (27) i (30)

$$\begin{aligned} a_N + b_N &= a_{N+1} + b_{N+1} \\ \alpha_N (a_N - b_N) &= a_{N+1} - b_{N+1}, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_N & 1 - \alpha_N \\ 1 - \alpha_N & 1 + \alpha_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Općenito možemo pisati da je

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \mathbf{S}_j \mathbf{T}_{j-1} \mathbf{S}_{j-1} \mathbf{T}_{j-2} \dots \mathbf{S}_2 \mathbf{T}_1 \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Korištenjem rezultata jednađbe (25) možemo matricu  $\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix}$  pisati na sljedeći način

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_1 e^{-2is_1} \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} \begin{bmatrix} e^{is_1} \\ e^{-is_1} \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} \mathbf{S}_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Iskoristimo to da jednađbu (37) napišemo ovako

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} \mathbf{S}_1 \left[ \prod_{k=1}^{j-1} \mathbf{T}_k \mathbf{S}_k \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Prihvatimo sljedeću oznaku

$$\left[ \prod_{k=1}^{j-1} \mathbf{T}_k \mathbf{S}_k \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j + iy_j \\ x_j' + iy_j' \end{bmatrix}, \quad (40)$$

gdje se veličine označene crticama odnose na reflektirani val. Uzmimo sada da je  $j = N$  i uvrstimo jednadžbu (40) u jednadžbu (36) i upotrijebimo jednadžbu (39).

$$\begin{bmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = \mathbf{T}_N a_1 e^{-is_1} \mathbf{S}_N \begin{bmatrix} x'_N + iy'_N \\ x_N + iy_N \end{bmatrix} = a_1 e^{-is_1} \begin{bmatrix} x'_{N+1} + iy'_{N+1} \\ x_{N+1} + iy_{N+1} \end{bmatrix}. \quad (41)$$

Iz ovoga slijedi

$$a_{N+1} = a_1 e^{-is_1} (x_{N+1} + iy_{N+1}), \quad (42)$$

odnosno izrazili smo amplitudu vala na vrhu poluprostora preko amplitude vala na slobodnoj površini. Potonju jednadžbu možemo preurediti

$$a_1 = \frac{e^{is_1}}{x_{N+1} + iy_{N+1}} a_{N+1}. \quad (43)$$

Dakle, ako poznajemo amplitudu vala na vrhu poluprostora i ako poznajemo svojstva slojeva, možemo odrediti amplitudu vala na površini. S obzirom na to da ne znamo amplitudu vala na vrhu poluprostora, možemo staviti da je  $a_{N+1} = 1$  i gledati koliko je povećanje amplitude na površini, odnosno možemo procijeniti kako će slojevi amplificirati amplitudu, što nam daje informacije o potresnoj opasnosti.

Sada ćemo uvrstiti jednadžbu (43) u jednadžbu (39)

$$\begin{bmatrix} a_j \\ b_j \end{bmatrix} = \frac{a_{N+1}}{x_{N+1} + iy_{N+1}} \mathbf{S}_j \begin{bmatrix} x'_j + iy'_j \\ x_j + iy_j \end{bmatrix}. \quad (44)$$

Izračunajmo sada pomak na površini. Ako stavimo da je  $z_1 = -H_1$ , onda iz jednadžbe (23) i uz upotrebu jednadžbe (25) imamo da je

$$v_1 = a_1 e^{i(\omega t - k_1 H_1)} + b_1 e^{i(\omega t + k_1 H_1)} = 2a_1 e^{i\omega t} e^{-is_1}. \quad (45)$$

Ako za  $a_1$  uvrstimo jednadžbu (43) i kompleksni broj zapišemo u sljedećem obliku

$$x + iy = r e^{i\varphi} \quad \text{uz} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right),$$

pomak na površini jednak je

$$v_1 = \frac{2}{\sqrt{x_{N+1}^2 + y_{N+1}^2}} a_{N+1} e^{i\left(\omega t - \arctan\left(\frac{y_{N+1}}{x_{N+1}}\right)\right)}, \quad (46)$$

što daje gibanje površine pod stalnom pobudom. Što bi se dogodilo kada bismo imali samo jedan beskonačno tanak sloj iznad poluprostora ( $N = 1$ )? Uz pretpostavku beskonačno tankog sloja imamo

$$\rho_1 = 0, \quad H_1 \rightarrow 0,$$

$$s_1 = k_1 H_1 = 0,$$

$$\alpha_1 = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = 0,$$

i zanima nas koliki su  $x_2 + iy_2$  i  $x_2' + iy_2'$ . Upotrebom prethodnih izraza i jednažbi (40), (33a) i (33b) dobivamo

$$\begin{bmatrix} x_2' + iy_2' \\ x_2 + iy_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_1 \mathbf{S}_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

iz čega možemo zaključiti da je

$$x_2 = x_2' = 1 \text{ i}$$

$$y_2 = y_2' = 0.$$

Uvrstimo li taj rezultat u jednažbu (46), za pomak na površini dobivamo da je

$$v_1 = 2a_2 e^{i(\omega t - \arctan(\frac{y_2}{x_2}))} = 2a_2 e^{i\omega t}, \quad (47)$$

odnosno površina oscilira amplitudom dvostruko većom od amplitude upadnog vala! Do takvog efekta dolazi zbog konstruktivne interferencije dolaznog i odlaznog vala. Sada možemo definirati amplifikacijski spektar za neku frekvenciju  $\omega$

$$AMP(\omega) = \frac{1}{\sqrt{x_{N+1}^2 + y_{N+1}^2}}, \quad (48)$$

$$AMP(\omega) = \frac{a_1}{a_{N+1}}. \quad (49)$$

Amplifikacijski spektar govori koliko će većom amplitudom oscilirati slobodna površina u odnosu na granicu poluprostora, a to i jest upravo ono što nas zanima - kako će tlo reagirati na pobudu. Obično se za granicu poluprostora ( $N+1$ ) uzima čvrsta stijena u kojoj se transverzalni val rasprostire brzinom većom od 800 m/s.



Iz jednadžbe (40) možemo izvesti sljedeće relacije

$$\begin{bmatrix} x'_{j+1} + iy'_{j+1} \\ x'_{j+1} + iy'_{j+1} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_j \mathbf{S}_j \left[ \prod_{k=1}^{j-1} \mathbf{T}_k \mathbf{S}_k \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_j \mathbf{S}_j \begin{bmatrix} x_j + iy_j \\ x'_j + iy'_j \end{bmatrix}$$

$$2x_{j+1} = (x_j + x_j \alpha_j + x'_j - x'_j \alpha_j) \cos(s_j) + (-y_j - y_j \alpha_j + y'_j - y'_j \alpha_j) \sin(s_j)$$

$$2y_{j+1} = (y_j + y_j \alpha_j + y'_j - y'_j \alpha_j) \cos(s_j) + (x_j + x_j \alpha_j - x'_j + x'_j \alpha_j) \sin(s_j) \quad (50a)$$

odnosno

$$2x'_{j+1} = (x_j - x_j \alpha_j + x'_j + x'_j \alpha_j) \cos(s_j) + (-y_j + y_j \alpha_j + y'_j + y'_j \alpha_j) \sin(s_j)$$

$$2y'_{j+1} = (y_j - y_j \alpha_j + y'_j + y'_j \alpha_j) \cos(s_j) + (x_j - x_j \alpha_j - x'_j - x'_j \alpha_j) \sin(s_j). \quad (50b)$$

Ako uzmemo da je  $j = 1$ , imamo

$$x_1 = x'_1 = 1 \text{ i}$$

$$y_1 = y'_1 = 0.$$

Uvrštavanjem ovih izraza u jednadžbe (50a) i (50b) dobivamo

$$x_2 = x'_2, \text{ odnosno}$$

$$y_2 = -y'_2, \quad (51)$$

a indukcijom se može pokazati da ovakvi zaključci vrijede i za  $j = 1, \dots, N$ . Uvrstimo relacije (51) u (50a) i (50b) i dobivamo sljedeće

$$x_{j+1} = x_j \cos(s_j) - y_j \sin(s_j)$$

$$y_{j+1} = \alpha_j (y_j \cos(s_j) + x_j \sin(s_j)). \quad (52)$$

Iz ovih jednadžbi možemo lako računati amplifikacijski spektar slojevitog poluprostora,  $AMP(\omega)$ .

Da bi procijenili veličine  $x$  i  $y$ , moramo poznavati geološku građu podzemlja i dubine na kojima leži osnovna stijena, kao i koliko su konsolidirani slojevi iznad poluprostora.

Problem s ovom teorijom je što je ona linearna i vrijedi za elastične slojeve dakle za male pomake tla, međutim, u slučaju jačih potresa imamo nelinearnosti pa  $AMP(\omega)$  precjenjuje povećanje, ali je dovoljno dobra za konzervativnu procjenu.

U slučaju vertikalnog upada vala na granicu,  $AMP_S = \frac{a_{1,S}}{a_{N+1,S}}$  i  $AMP_P = \frac{a_{1,P}}{a_{N+1,P}}$  (indeksi S i P se odnose na vrstu vala – S-val ili P-val) opisuju povećanje horizontalnih i vertikalnih komponenata pomaka. Uz pretpostavku da su horizontalna i vertikalna gibanja u prosjeku jednaka na čvrstoj stijeni, što je u mnogobrojnim mjerenjima i potvrđeno, definiramo *HVSR* (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) na površini s

$$HVSR(f) = \frac{AMP_S(f)}{AMP_P(f)}. \quad (54)$$

U procjenama seizmičkog hazarda često se  $HVSR(f)$  koristi kao procjena za  $AMP_S(f)$ , koji je važan jer su upravo S-valovi zaslužni za najjaču trešnju prilikom potresa i definiraju seizmičke sile na danoj lokaciji. Iz prethodne jednadžbe vidno je da je  $HVSR(f) \approx AMP_S(f)$  samo ako je  $AMP_P(f) \approx 1$  za sve frekvencije od interesa. Ovakva aproksimacija vrijedi samo onda kada se P-valovi propagiraju kroz najviše slojeve puno brže od S-valova, u kojem slučaju imaju i puno više rezonantne frekvencije. Ta činjenica ne smije se zanemariti pri upotrebi empirijskog *HVSR*-a za procjenu povećanja pomaka, pogotovo za frekvencije daleko više od osnovne. Ukoliko se to ipak zanemari kod upotrebe empirijskog *HVSR*-a za procjenu povećanja, dolazi do određenog potcjenjivanja povećanja S-valova, uslijed prikrivanja rezonancije viših modova unutar *HVSR*-a odzivom P-valova i nezanemarivim vertikalnim povećanjem na nižim frekvencijama. Ova činjenica donekle se ublažuje spoznajom da će u slučaju jakog potresa nelinearni efekti smanjiti amplifikaciju izračunatu uz pretpostavku linearnog modela.

## 2. Instrumenti i mjerenja

Mjerenja su vršena od 7. listopada do 5. studenog 2011. godine s tri mjerna uređaja Tromino (slika 2.1<sup>4</sup>). Svako mjerenje trajalo je po 16 minuta s uzorkovanjem od 128 Hz. Tromino je prenosivi digitalni seizmograf malih dimenzija (mase oko 1 kg) koji mjeri 3 komponente mikrosezmičkog nemira. Mjerenja su vršena na tvrdim zemljanim i betonskim podlogama ispred zgrada te u zgradama uz nosive zidove po vertikalnom profilu na različitim površinama, shodno mogućnostima i dopuštenju. Radi boljeg prijenosa vibracija uređaj se postavlja na jastučić punjen pijeskom na koji se stavi mramorna pločica. Usmjerenje uređaja mora biti u istom smjeru u zgradi i pri mjerenju na otvorenom. Obično se S-J os instrumenta stavi paralelno s dužom osi građevine. Podatci su prebačeni s instrumenta na računalo

<sup>4</sup> Izvor: <http://www.tromino.eu/zoom.asp?img=1&prod=1>

pomoću programskog paketa Grill koji dolazi uz instrument, nakon čega su podatci obrađeni pomoću Matlaba, programa FREDA (Herak, 2011; Herak i Herak, 2008) i ModelHVSR (Herak, 2008). Pomoću FREDA-e analizirani su spektri izmjereni na najvišem nivou zgrade i uspoređeni su s HVSR spektrima pobude (*free-field*) (Pannou i dr., 2005; Mucciarelli i dr., 2001; Maresca i dr., 2006; Konno i Ohmachi, 1998; Gallipoli i dr., 2004; Fäcke i dr., 2006), koji su usrednjeni programom ModelHVSR. Dobiveni rezultati prikazani su slikama kojima je na osi apscisa raspon frekvencija, na ordinati s lijeve strane skala je normirana po najvišem šiljku spektra razmatrane komponente (plavo), dok su na desnoj strani vrijednosti HVSR-a tla (crveno). Drugi skup slika prikazuje povećanje amplitude pomaka kroz zgradu u odnosu na amplitudu pomaka tla.



Slika 2.1. Tromino.

Mjerenja su izvršena u sedam povijesno važnih zgrada u Zagrebu. U zgradi Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) na Griču mjereno je na sedam mjernih točaka; u prizemlju i tavanu svakog od tri krila te izvan zgrade na zemljanoj podlozi istočno od zgrade. U Zagrebačkoj katedrali mjereno je na osam točaka, šest točaka od kapelice u podnožju do samog vrha sjevernog tornja, po jedno mjerenje u brodu katedrale i na betonskoj podlozi ispred crkve. U zgradi Hrvatskog sabora mjereno je na pet točaka: u podrumu, prizemlju, na drugom i četvrtom katu te na Markovom trgu. U hotelu Esplanade mjereno je na pet mjesta: u

podrumu, prizemlju, na trećem katu i na krovu zgrade, a mjerenje na otvorenom obavljeno je u parku na Tomislavovom trgu. U muzeju Mimara izmjereno je šest točaka: u podrumu, prizemlju, na prvom i drugom katu i na tavanu, a pobudni signal izmjeren je ispred zgrade na betonskoj podlozi. U zgradi Rektorata izmjerene su četiri točke - prizemlje, drugi kat, tavan i mjerenje kod Zdenca života nasuprot zgrade na betonskoj podlozi. Za vrijeme mjerenja na tavanu pojavile su se poteškoće s mjernim instrumentom koje su dovele u pitanje to mjerenje pa je pri obradi podataka za spektar zgrade uzeto mjerenje s drugog kata. U Hrvatskom narodnom kazalištu mjerena su obavljena na sedam točaka, i to na krovu, tavanu, na terasi prvog kata, u prizemlju, podrumu i tunelu ispod "zelenog vala" koji povezuje zgradu HNK-a sa zgradom Akademije dramske umjetnosti te mjerenje pored Zdenca života na betonskoj podlozi.

### 3. Rezultati mjerenja i diskusija

#### 3.1. *The Regent Esplanade*

Hotel Esplanade (slike 3.1.1 i 3.1.2<sup>5</sup>) sagrađen je 1925. godine s ciljem pružanja luksuznog smještaja putnicima Orient Expressa. Za vrijeme rekonstrukcije 2003. - 2004. godine pojačana je i mjestimično uklonjena cigla iz zidova da bi se olakšala konstrukcija.



Slika 3.1.1. Hotel Esplanade.



Slika 3.1.2. Pogled odozgo: hotel Esplanade (sjever je prema gore).

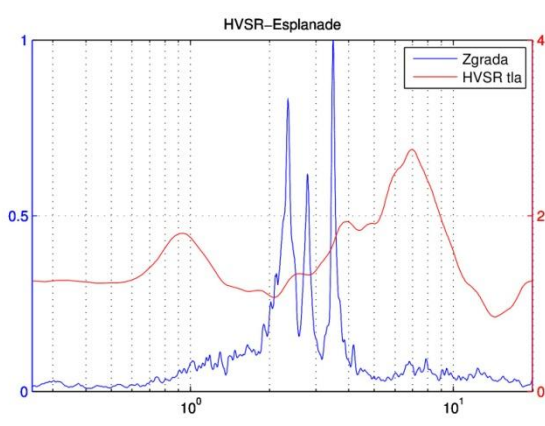
---

<sup>5</sup> Izvor: Google Earth

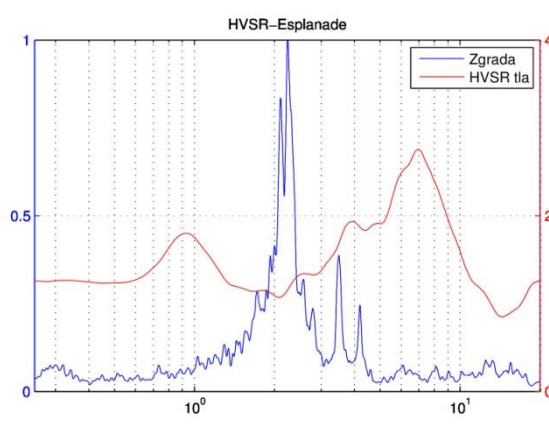
**Tablica 1. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova hotela The Regent Esplanade; L–uzdužna os zgrade, T–poprečna os zgrade.**

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
Esplanade - L	$2.23 \pm 0.03$	$4.75 \pm 1.50$	$3.51 \pm 0.01$	$1.5 \pm 0.5$	$4.18 \pm 0.02$	$2.00 \pm 0.75$
Esplanade - T	$2.34 \pm 0.01$	$3.25 \pm 0.75$	$2.79 \pm 0.01$	$1.75 \pm 0.25$	$3.51 \pm 0.02$	$1.00 \pm 0.38$

Mjerenja su izvedena po vertikali u podrumu, prizemlju, na trećem katu i na krovu, a pobudni je signal izmjeren na Tomislavovom trgu. Uređaj je usmjeren paralelno s pružanjem željezničke pruge u smjeru istok-zapad. Zbog podjednakih dimenzija zgrade u oba smjera očekujemo da će horizontalne komponente gibanja biti podjednake.

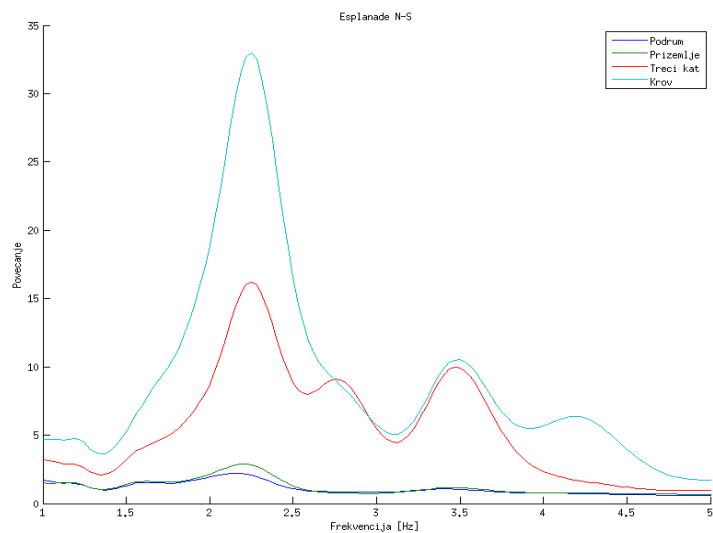


**Slika 3.1.3. Spektar poprečne komponente oscilacija hotela Esplanade i pripadnog HVSR-a tla.**

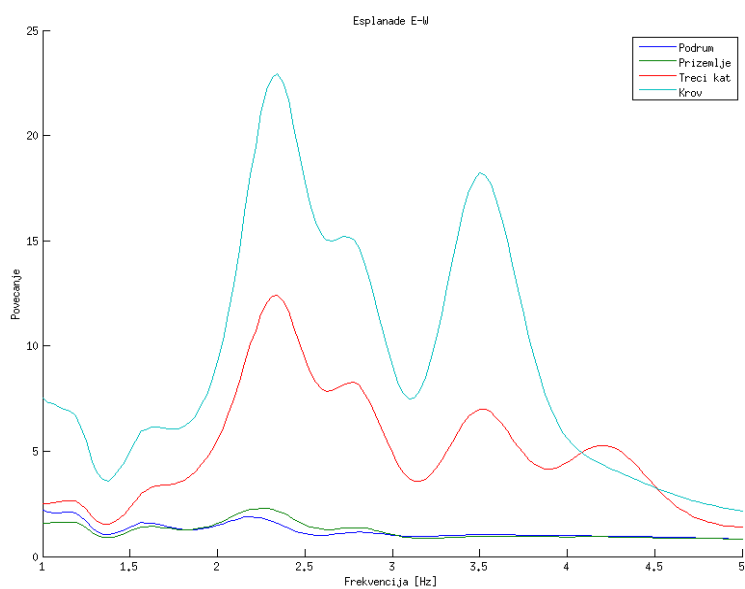


**Slika 3.1.4. Spektar uzdužne komponente oscilacija hotela Esplanade i pripadnog HVSR-a tla.**

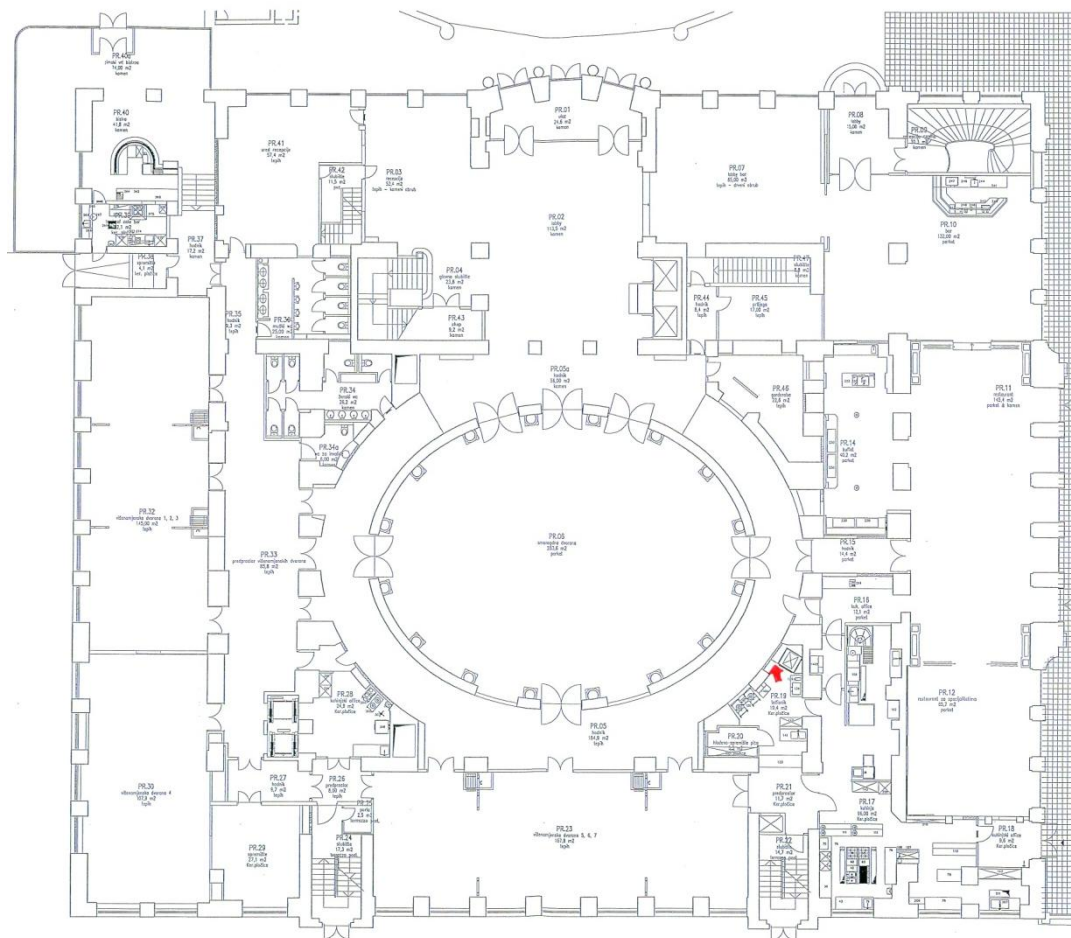
Za reprezentativni spektar zgrade uzeto je mjerenje na krovu. U poprečnom smjeru ističu se tri šiljka na frekvencijama 2.34 Hz, 2.79 Hz i 3.51 Hz (slika 3.1.3, tablica 1) koji se nalaze između dva maksimuma *HVSR*-a. Na moguću ugroženost zgrade ukazuje jedino treći šiljak spektra koji se nalazi blizu manjeg lokalnog maksimuma *HVSR*-a i koji ukazuje na povećanje pomaka. Na preostalim dvama šiljcima nema znatnog povećanja. U uzdužnom smjeru također se ističu tri šiljka, jedan izražen i dva manja 2.23 Hz, 3.51 Hz, 4.18 Hz (slika 3.1.4, tablica 1). Srednji šiljak u uzdužnom smjeru ima istu frekvenciju kao i treći u poprečnom.



Slika 3.1.5. Izgladeni vertikalni profil povećanja uzdužne komponente pomaka hotela Esplanade u odnosu na tlo.



Slika 3.1.6. Izgladeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka hotela Esplanade u odnosu na tlo.



**Slika 3.1.7. Tlocrt prizemlja hotela Esplanade (crvena strelica označava mjernu točku).**

Vidi se da su osnovne frekvencije u oba smjera bliske, što potvrđuje očekivanja zbog dimenzija zgrade. Ipak, spektralne se slike dosta razlikuju i čini se da je prigušenje zgrade veće u uzdužnom smjeru (tablica 1). To bi moglo biti zbog ojačane eliptične konstrukcije unutarnjih zidova, koja je izdužena u istom smjeru (slika 3.1.7 tlocrt prizemlje). Moguće je da je šiljak na 4.18 Hz neki viši mod zgrade. Iz slika 3.1.5 i 3.1.6 vidi se porast povećanja s visinom: u poprečnom je smjeru povećanje na krovu dvadesetak puta veće u odnosu na tlo, a u uzdužnom je to povećanje tridesetak puta veće u odnosu na tlo. Maksimumi se po visini nalaze na istim frekvencijama.



### 3.2. Zagrebačka katedrala

Prvi put sagrađena u 13. stoljeću, zagrebačka katedrala (slike 3.2.1 i 3.2.2<sup>6</sup>) obnavljana je nekoliko puta, a u današnjem obliku sa svoja dva tornja sagrađena je u temeljitoj obnovi nakon potresa 1880. godine. Obnova je trajala do 1906., a restauracija je počela 1990. godine te traje i dan danas.



Slika 3.2.1. Zagrebačka katedrala.



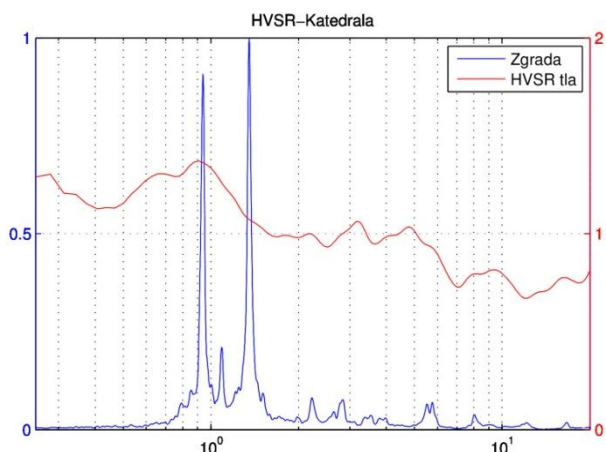
Slika 3.2.2. Pogled odozgo: katedrala (sjever je prema gore).

Mjeren je sjeverni toranj jer se južni u trenutku mjerenja restaurirao. U tornju je raspoređeno šest mjernih točaka, od kapelice u podnožju do vrha. Jedna mjerna točka je u brodu katedrale, a pobudni signal izmjeren je ispred katedrale. Mjerni je uređaj usmjeren u smjeru pružanja broda katedrale, što znači da se uzdužna komponenta približno poklapa s geografskim smjerom istok-zapad. Za spektar zgrade uzeto je mjerenje na vrhu tornja, na otprilike 100 m visine.

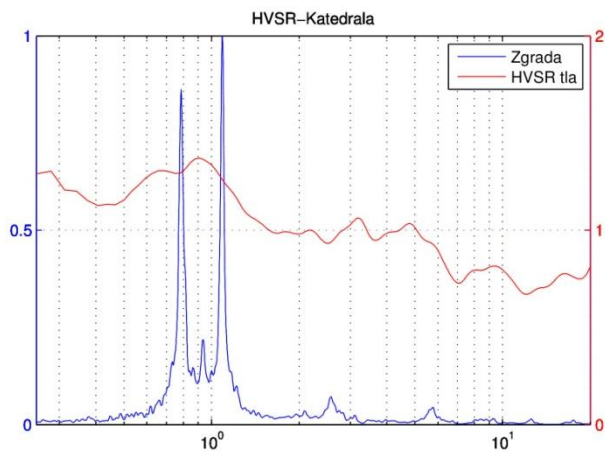
---

<sup>6</sup> Izvor: Google Earth





Slika 3.2.3. Spektar poprečne komponente oscilacija katedrale i pripadnog HVSR-a tla.



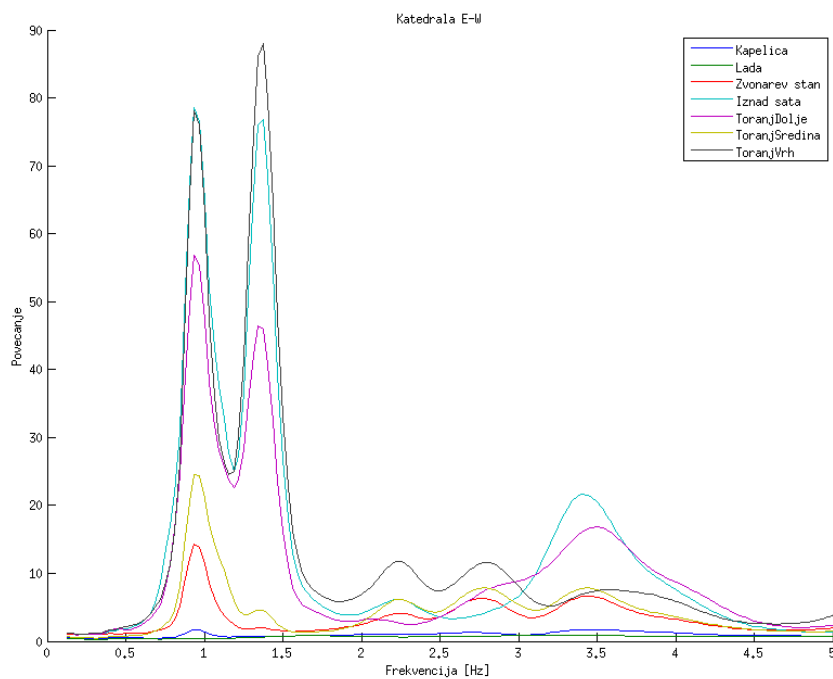
Slika 3.2.4. Spektar uzdužne komponente oscilacija katedrale i pripadnog HVSR-a tla.

U obje komponente spektra vidimo dva istaknuta šiljka i jedan mali. U poprečnoj komponenti spektra (slika 3.2.3, tablica 2) istaknuti su šiljci na 0.94 Hz i 1.36 Hz, a manji je šiljak na 1.09 Hz. Prvi šiljak poklapa se s maksimumom *HVSR*-a, što ukazuje na opasnost od rezonancije između tla i zgrade uz blago povećanje pomaka.

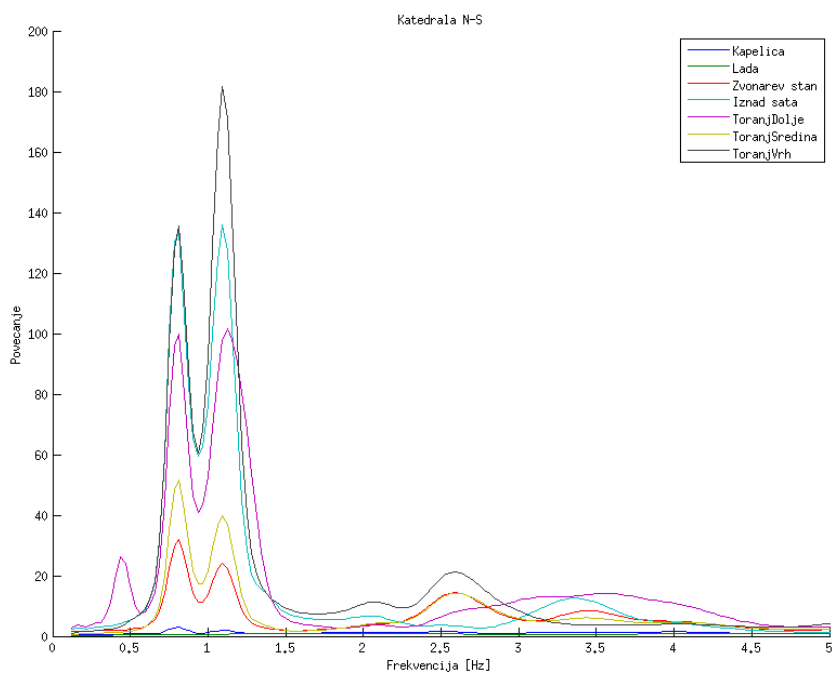
Tablica 2. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova Zagrebačke katedrale; L–uzdužna os broda katedrale, T–poprečna os broda katedrale.

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
Katedrala - L	$0.788 \pm 0.002$	$1.00 \pm 0.38$	$0.936 \pm 0.004$	$2.50 \pm 0.88$	$1.088 \pm 0.001$	$0.50 \pm 0.13$
Katedrala - T	$0.938 \pm 0.002$	$0.50 \pm 0.25$	$1.087 \pm 0.003$	$1.0 \pm 0.5$	$1.355 \pm 0.003$	$0.50 \pm 0.13$

U uzdužnoj komponenti spektra (slika 3.2.4, tablica 2) istaknuti su šiljci na 0.79 Hz i 1.09 Hz, a manji je na 0.94 Hz. Maksimum *HVSR*-a obuhvaća sva tri šiljka. Do povećanja može doći, a o rezonanciji je teže govoriti jer je taj maksimum relativno širok i do rezonancije može doći na bilo kojoj od navedene tri frekvencije. U ovom slučaju dolazi do preslušavanja: preslušava se osnovni mod u poprečnoj komponenti na srednji šiljak u uzdužnoj komponenti i drugi mod u uzdužnoj komponenti na srednji u poprečnoj, što se vidi iz iznosa frekvencija tih modova. Interesantno je primijetiti da su uzdužni i poprečni spektri dosta različiti, iako je toranj uzak i simetričan. Mogući uzrok tome u zajedničkoj je bazi oba tornja koji su dograđeni nakon potresa 1880. godine, koji zbog nje možda osciliraju zajedno i neovisno o brodu katedrale.



**Slika 3.2.5. Izglađeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka katedrale u odnosu na tlo.**



**Slika 3.2.6. Izglađeni vertikalni profil uzdužne komponente pomaka katedrale u odnosu na tlo.**

Na slikama 3.2.5 i 3.2.6 vidi se da je u poprečnom smjeru pomak na vrhu tornja u odnosu na tlo 90 puta veći, a u uzdužnom smjeru taj je pomak 180 puta veći. U poprečnoj komponenti na otprilike 3.5 Hz niži dijelovi tornja imaju veće pomake od vrha tornja. To je neočekivani rezultat i pretpostavljamo da je to utjecaj broda katedrale, no to ne možemo sa sigurnošću

tvrditi jer smo u brodu mogli izmjeriti samo jednu prizemnu točku u kojoj se nije pokazala ni jedna izražena frekvencija. Smjer najvećeg povećanja geografski je smjer istok-zapad, što je suprotno očekivanjima s obzirom na to da je to dulja os zgrade. Prigušenje je malo u oba smjera, što je i za očekivati zbog visine zgrade. U uzdužnom smjeru je prigušenje ( $D_0 = 1\%$ ) dvostruko veće što je mogući utjecaj broda katedrale (tablica 2).

### 3.3. Državni hidrometeorološki zavod

Zgrada DHMZ-a (3.3.1<sup>7</sup> i 3.3.2<sup>8</sup>) ima tri krila: sjeverno, južno i istočno (srednje) u obliku slova U. Godine 1864. južno i istočno krilo podižu se na dva kata pa zgrada tako poprima današnji izgled (nulla dies sine observatione).



Slika 3.3.1. Zgrada DHMZ-a.



Slika 3.3.2. Prikaz odozgo: DHMZ (sjever je prema gore).

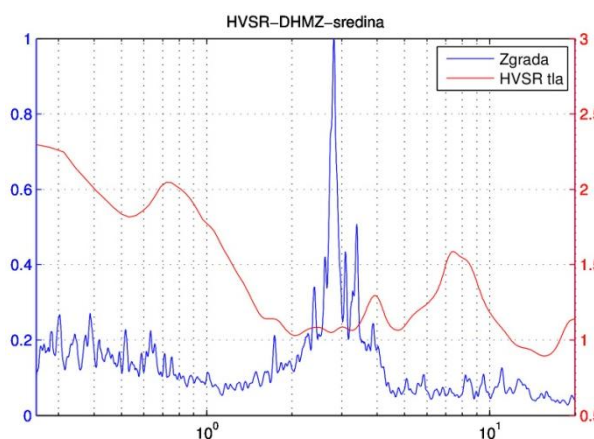
Mjerenja su provedena u sva tri krila u prizemlju i na tavanu, a mjerna točka na otvorenom bila je iza istočnog krila zgrade. Uzdužna komponenta instrumenta usmjerena je u smjeru dulje osi srednjeg (istočnog) krila. Mjerenje na tavanu uzeto je kao referentno.

<sup>7</sup> Izvor: Nulla dies sine observatione: 150 godina Geofizičkog zavoda u Zagrebu (ur. Mirko Orlić)

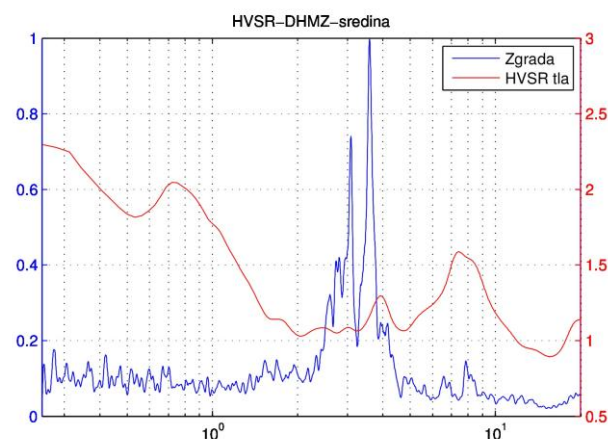
<sup>8</sup> Izvor: Google Earth

**Tablica 3. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova zgrade DHMZ-a; L–uzdužna os zgrade, T–poprečna os zgrade.**

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
DHMZ sredina -L	$3.08 \pm 0.01$	$1.25 \pm 0.50$	$3.59 \pm 0.02$	$2.00 \pm 0.63$	/	/
DHMZ sredina -T	$2.82 \pm 0.03$	$3.0 \pm 2.0$	/	/	/	/
DHMZ sjever -L	$3.07 \pm 0.02$	$2.00 \pm 0.63$	/	/	/	/
DHMZ sjever -T	$3.82 \pm 0.07$	$5.25 \pm 2.88$	/	/	/	/
DHMZ jug -L	$2.59 \pm 0.02$	$3.00 \pm 1.13$	$3.45 \pm 0.04$	$3.25 \pm 1.25$	$4.05 \pm 0.03$	$2.50 \pm 0.88$
DHMZ jug -T	$2.57 \pm 0.03$	$2.75 \pm 2.13$	$3.50 \pm 0.11$	$4.5 \pm 3.0$	/	/



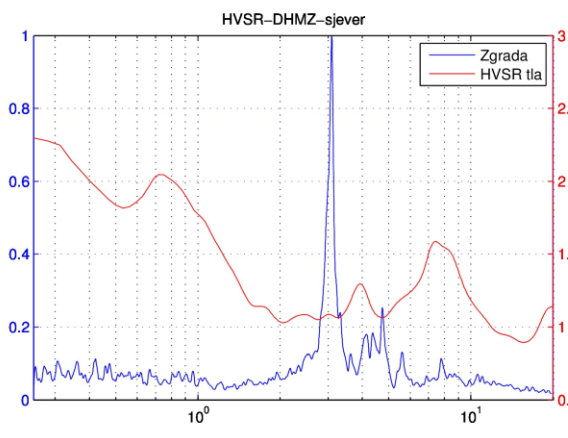
**Slika 3.3.3. Spektar poprečne komponente oscilacija srednjeg (istočnog) krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.**



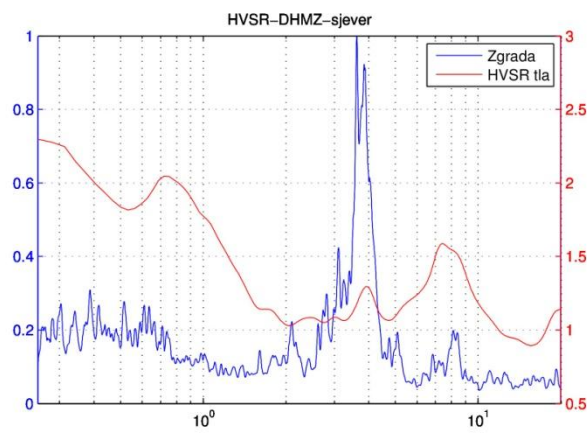
**Slika 3.3.4. Spektar uzdužne komponente oscilacija srednjeg (istočnog) krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.**

Na poprečnoj komponenti spektra srednjeg krila (slika 3.3.3, tablica 3) ističe se jedan šiljak na frekvenciji 2.82 Hz koji se nalazi između dva maksimuma *HVSR*-a pa na toj frekvenciji ne očekujemo rezonanciju tla sa zgradom. U području šiljka *HVSR* iznosi oko 1 pa nema povećanja.

Uzdužna komponenta srednjeg krila (slika 3.3.4, tablica 3) ima dva šiljka na frekvencijama 3.08 Hz i 3.60 Hz koji se također nalaze između dva maksimuma, s time da za osnovni mod ne očekujemo rezonanciju ni povećanje, a drugi mod malo zahvaća mali lokalni maksimum *HVSR*-a.

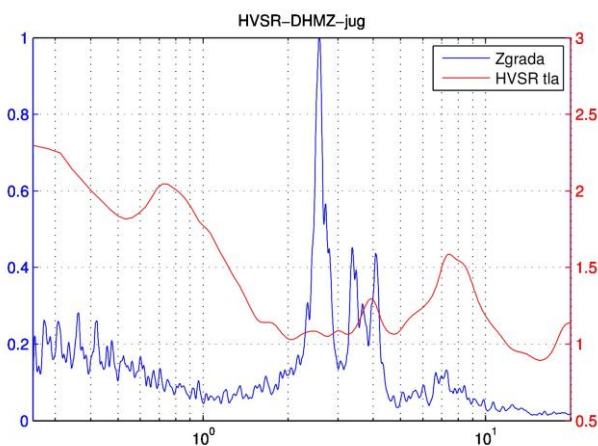


Slika 3.3.5. Spektar poprečne komponente oscilacija sjevernog krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.

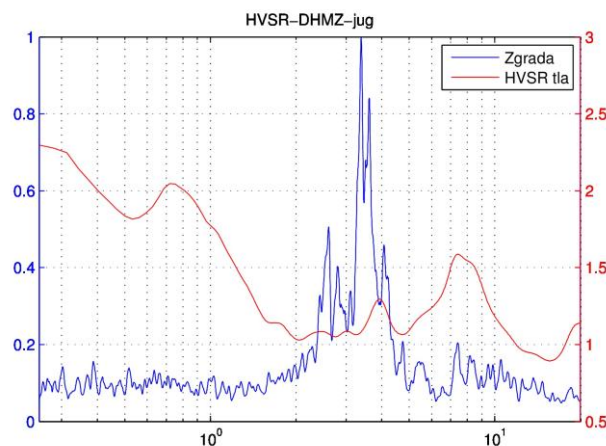


Slika 3.3.6. Spektar poprečne komponente oscilacija sjevernog krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.

Sjeverno krilo u obje komponente (slike 3.3.5 i 3.3.6, tablica 3) ima po jedan istaknuti šiljak, 3.07 Hz na uzdužnoj i 3.82 Hz na poprečnoj. Šiljci su u oba slučaja između dva maksimuma *HVSR*-a, a poprečna komponenta poklapa se s manjim lokalnim maksimumom i može doći do rezonancije.

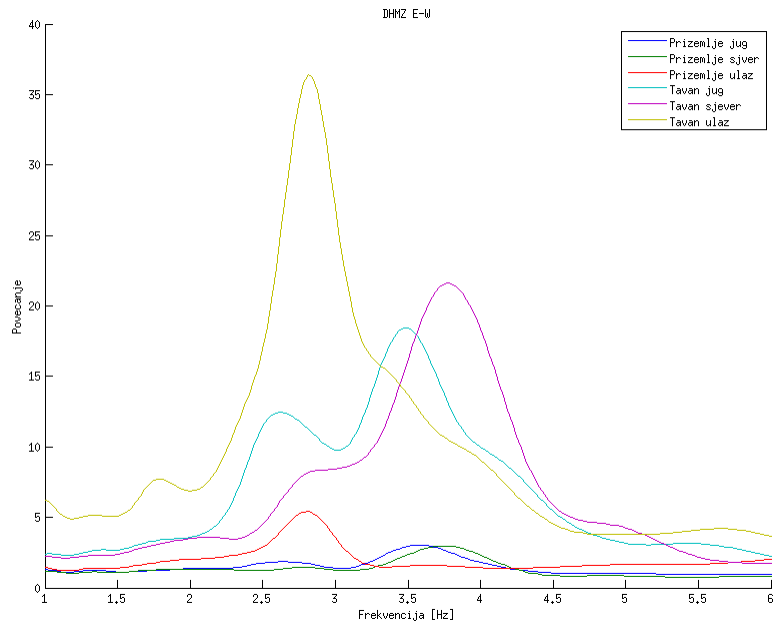


Slika 3.3.7. Spektar poprečne komponente oscilacija južnog krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.

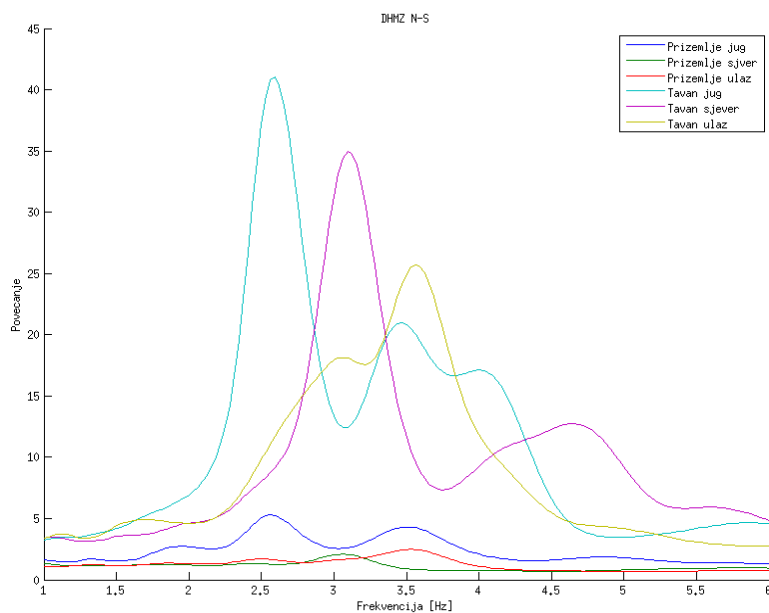


Slika 3.3.8. Spektar uzdužne komponente oscilacija južnog krila DHMZ-a i pripadnog HVSR-a tla.

Poprečna komponenta južnog krila (slika 3.3.7, tablica 3) ima dva šiljka, na 2.57 Hz i 3.50 Hz, od kojih se drugi malo preklapa s lokalnim maksimumom. Uzdužna komponenta (slika 3.3.8, tablica 3) ima tri šiljka, 2.60 Hz, 3.45 Hz i 4.05 Hz. Lokalni maksimum *HVSR*-a zahvaća najviši mod. Dolazi do preslušavanja u južnom krilu gdje se osnovni mod preslušava iz uzdužne komponente u poprečnu komponentu, a prvi mod iz poprečne u uzdužnu komponentu.



Slika 3.3.9. Izglađeni vertikalni profil povećanja I-Z komponente pomaka DHMZ-a u odnosu na tlo.



Slika 3.3.10. Izglađeni vertikalni profil povećanja S-J komponente pomaka DHMZ-a u odnosu na tlo.

Zbog složenog oblika zgrade moguće je da dolazi do prenošenja titranja s jednog krila na drugo, npr. poklapaju se osnovni mod uzdužne komponente srednjeg i sjevernog krila.

Prvi mod sredine poprečne komponente i preslušana frekvencija južnog krila podudaraju se, a zbog složenog oblika ne možemo utvrditi je li u pitanju preslušavanje ili prenošenje gibanja s jednog krila na drugo.

Za svako krilo očekujemo da će u smjeru kraće osi vlastite frekvencije biti manje, a povećanje veće, što se vidi iz slika 3.3.9 i 3.3.10 gdje poprečna komponenta srednjeg krila ima



povećanje preko 35 puta u odnosu na tlo, a uzdužne komponente sjevernog i južnog krila imaju povećanja od 35 do 42 puta u odnosu na tlo. Iz istih slika vidi se da južno krilo ima minimum povećanja na frekvenciji na kojoj sjeverno krilo ima maksimum povećanja, što je u slučaju potresa nepovoljno za zgradu. Prigušenja srednjeg i sjevernog krila su veća u poprečnom smjeru, što je neočekivano jer bi prigušenje trebalo biti veće u smjeru dulje osi zgrade. Južno krilo očekivano ima veće prigušenje u uzdužnom smjeru, no vrijednosti su bliske u oba smjera. To bi bilo za očekivati kada bi krilo bilo podjednakih dimenzija u oba smjera, što ovdje nije slučaj. Zbog kompleksnosti zgrade ne možemo zaključivati o uzrocima (tablica 3).

Činjenica da svako od krila zgrade ima svoje jasno izražene vlastite frekvencije govori o tome da bi se ona u potresu mogla ponašati nezavisno jedno o drugome, što može uzrokovati destruktivne efekte.

### 3.4. Hrvatsko narodno kazalište

Mjerenja u zgradi HNK-a (slike 3.4.1 i 3.4.2<sup>9</sup>) u Zagrebu vršena su na krovu, tavanu, terasi, u prizemlju i tunelu ispod "zelenog vala". Mjerenje pobudnog signala izvršeno je pored Zdenca života ispred zgrade.



Slika 3.4.1. Hrvatsko narodno kazalište.

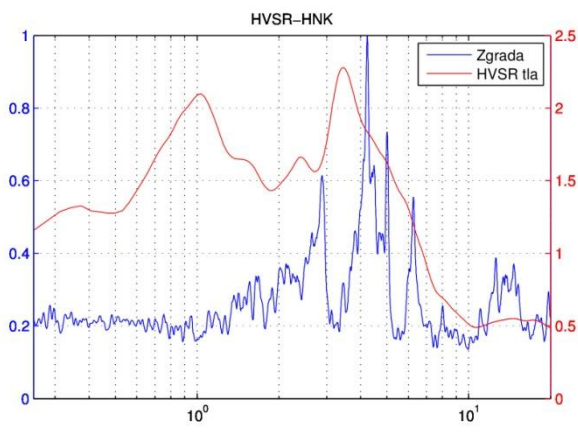


Slika 3.4.2. Prikaz odozgo: HNK (sjever je prema gore).

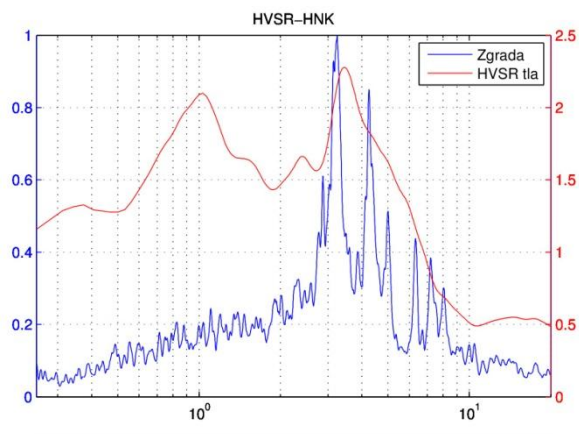
Neobarokna zgrada iz 1895. godine očekivano se pokazala kao vrlo složena, što se vidi i iz spektra zgrade koji ima više šiljaka. U uzdužnoj komponenti (slika 3.4.3, tablica 4) oni su na frekvencijama 2.85 Hz, 4.27 Hz i 6.27 Hz, a u poprečnoj (slika 3.4.4, tablica 4) na 3.22 Hz i

<sup>9</sup> Izvor: Google Earth

4.30 Hz. Znatno je preklapanje maksimuma *HVSR*-a sa šiljcima spektra u oba smjera. Zgrada je zbog toga ugrožena i moglo bi doći do rezonancije i opasne amplifikacije gibanja tijekom potresa na frekvencijama između 3 i 7 Hz. Povećanja su mala i podjednaki vrijednosti u oba smjera zgrade (slike 3.4.5 i 3.4.6). Zanimljivo je da terasa kazališta iznad ulaza u uzdužnom smjeru pokazuje veću amplifikaciju na višim frekvencijama (iznad 8 Hz) nego na nižim. Prigušenja su podjednaki vrijednosti u oba smjera, s time da je u poprečnom smjeru nešto veće što je neočekivano (tablica 4).



Slika 3.4.3. Spektar uzdužne komponente oscilacija HNK-a i pripadnog HVSR-a tla.

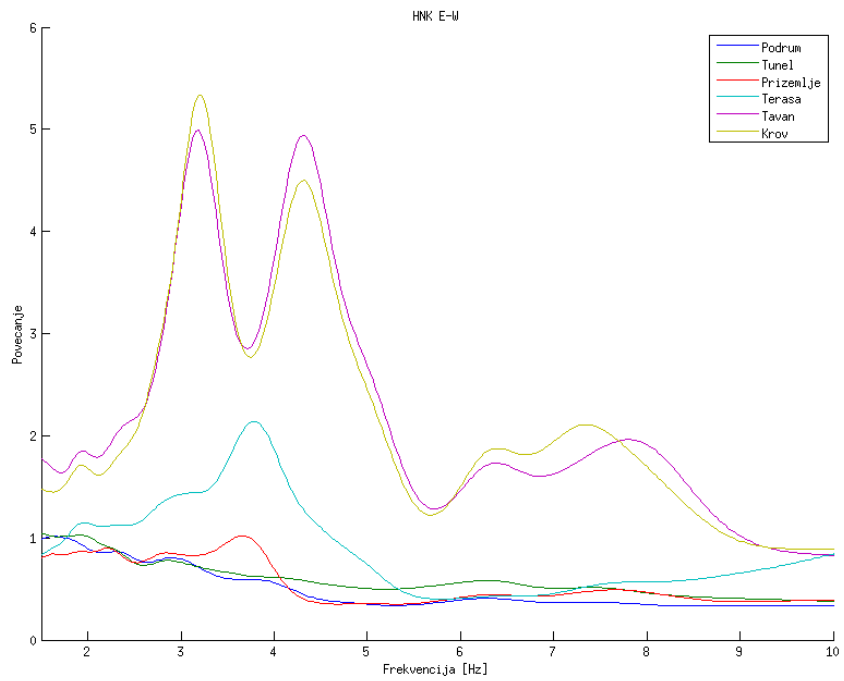


Slika 3.4.4. Spektar poprečne komponente oscilacija HNK-a i pripadnog HVSR-a tla.

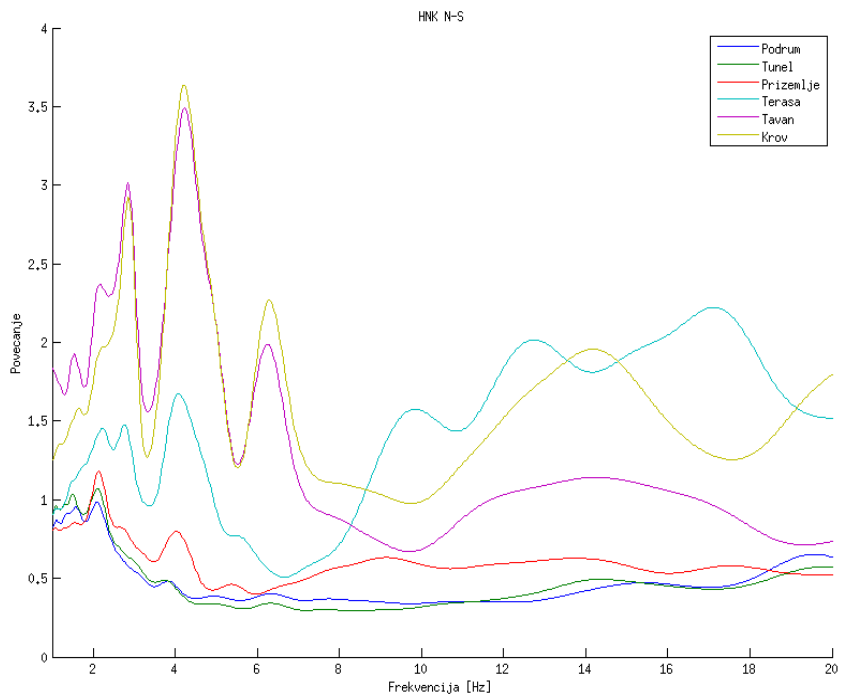
Tablica 4. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova zgrade HNK; L–uzdužna os zgrade, T–poprečna os zgrade.

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
HNK - L	$2.85 \pm 0.03$	$4.00 \pm 1.38$	$4.27 \pm 0.05$	$5.25 \pm 2.25$	$6.27 \pm 0.04$	$3.50 \pm 0.88$
HNK - T	$3.22 \pm 0.02$	$5.00 \pm 0.13$	$4.30 \pm 0.03$	$3.5 \pm 1.0$	/	/





Slika 3.4.5. Izglađeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka HNK-a u odnosu na tlo.



Slika 3.4.6. Izglađeni vertikalni profil povećanja uzdužne komponente pomaka HNK-a u odnosu na tlo.

### 3.5. Muzej Mimara

Muzej Mimara (slike 3.5.1<sup>10</sup> i 3.5.2<sup>11</sup>) smješten je u zgradi bivše Kraljevske realne gimnazije sagrađene krajem 19. stoljeća<sup>12</sup>. Građevinu odlikuju izrazito debeli (do jednog metra) cigleni zidovi. Mjerne točke u zgradi bile su podrum, prizemlje, prvi kat, drugi kat i tavan. Tromino je postavljen tako da je izmjerena uzdužna komponenta u smjeru dulje osi zgrade, dok je signal pobude mjeren na betonskom nogostupu ispred same zgrade. Pri usporedbi osnovnih modova zgrade s *HVSR*-om uzeto je mjerenje s tavana zgrade.



Slika 3.5.1. Muzej Mimara.



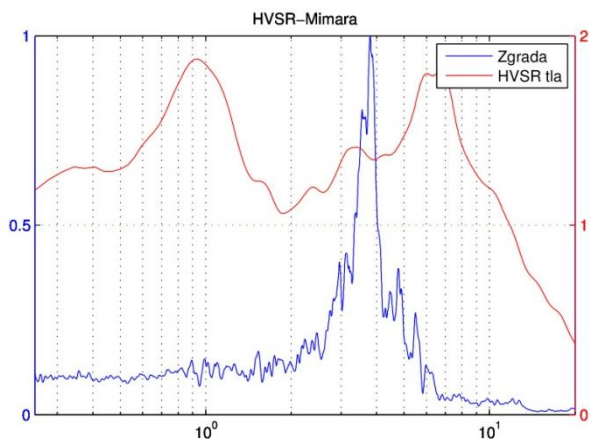
Slika 3.5.2. Prikaz odozgo: Mimara (sjever je prema gore).

U oba smjera izmjeren je po jedan osnovni mod, 3.77 Hz u uzdužnom (slika 3.5.3, tablica 5) i 2.91 Hz u poprečnom (slika 3.5.4), i oba padaju između dva maksimuma *HVSR*-a. Stoga, zaključujemo kako vjerojatno neće doći do rezonancije tla i zgrade. Povećanja pomaka s visinom izražena su u oba smjera s nešto izraženijom poprečnom komponentom (slike 3.5.5 i 3.5.6). U skladu s očekivanjima, vlastita frekvencija u poprečnom smjeru manja je od one u uzdužnom i ima znatno manje prigušenje. Prigušenje je veće u uzdužnom smjeru što je i očekivano (tablica 5).

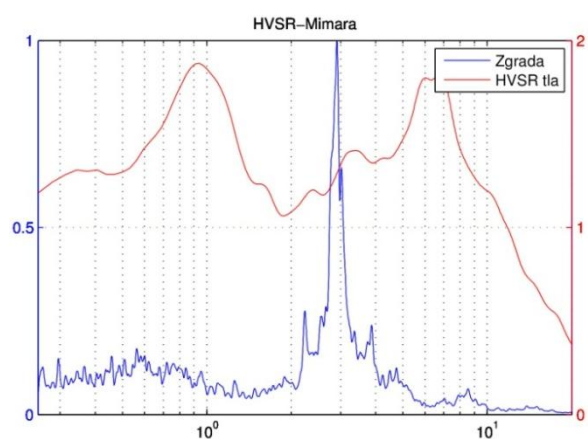
<sup>10</sup> Izvor: [http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej\\_Mimara](http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej_Mimara)

<sup>11</sup> Izvor: Google Earth

<sup>12</sup> Izvor: [http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej\\_Mimara](http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej_Mimara)



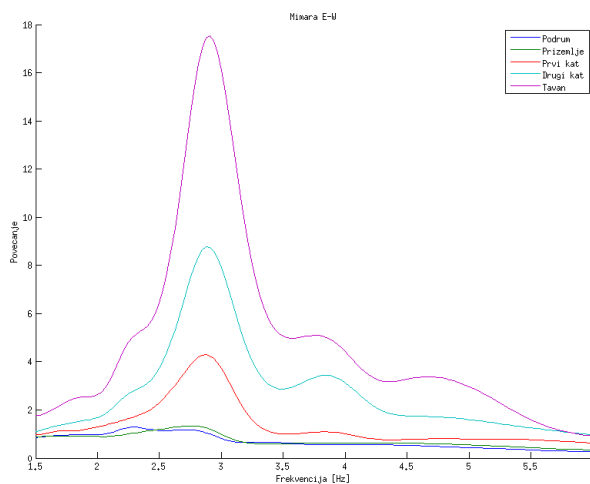
Slika 3.5.3. Spektar uzdužne komponente oscilacija muzeja Mimare i pripadnog HVS-a tla.



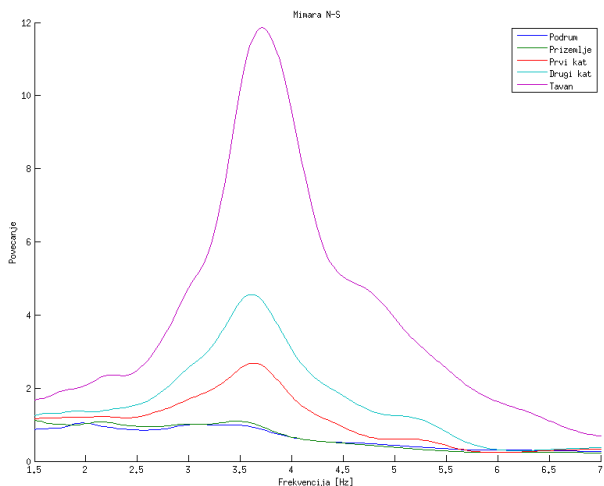
Slika 3.5.4. Spektar poprečne komponente oscilacija muzeja Mimare i pripadnog HVS-a tla.

Tablica 5. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova muzeja Mimare; L–uzdužna os zgrade, T–poprečna os zgrade.

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
Mimara - L	$3.77 \pm 0.05$	$6.00 \pm 2.25$	/	/	/	/
Mimara - T	$2.91 \pm 0.26$	$3.00 \pm 1.25$	/	/	/	/



Slika 3.5.5. Izglađeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka muzeja Mimare u odnosu na tlo.



Slika 3.5.6. Izglađeni vertikalni profil povećanja uzdužne komponente pomaka muzeja Mimare u odnosu na tlo.

### 3.6. Rektorat Sveučilišta u Zagrebu

Zgrada Rektorata Sveučilišta u Zagrebu (slike 3.6.1<sup>13</sup> i 3.6.2<sup>14</sup>) izgrađena je polovicom 19. stoljeća. Visine je 26 metara, a svojom je izduženom stranom spojena sa susjednom zgradom. Mjerenja su izvedena u prizemlju, na drugom katu i tavanu, s time da je mjerenje na tavanu odbačeno zbog problema s instrumentom. Mjerna točka na otvorenom bila je preko puta zgrade pored Zdenca života. Pri analizi je korišteno mjerenje s drugog kata.



Slika 3.6.1. Rektorat Sveučilišta u Zagrebu.

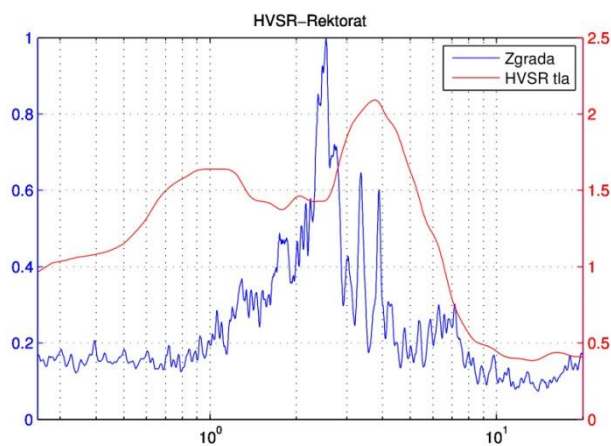


Slika 3.6.2. Prikaz odozgo: Rektorat Sveučilišta u Zagrebu (sjever je prema gore).

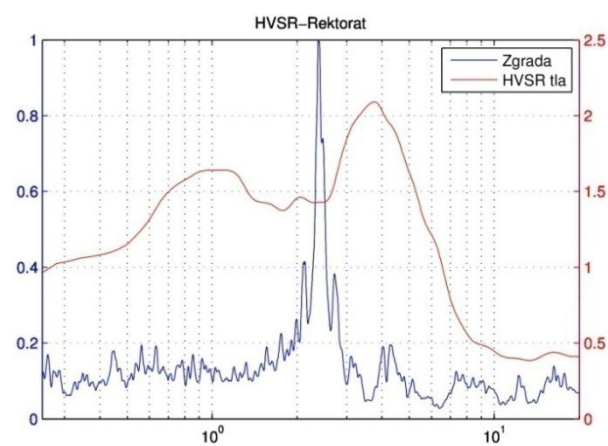
Osnovni modovi u uzdužnom smjeru (slika 3.6.3, tablica 6) na 2.53 Hz i poprečnom smjeru (slika 3.6.4, tablica 6) na 2.40 Hz smjeru ne podudaraju se s *HVSR*-om. No, u uzdužnom smjeru pojavljuju se i dva manja šiljka, na 3.36 Hz i 3.87 Hz, koji se poklapaju s maksimumom *HVSR*-a pa postoji opasnost od rezonancije između tla i zgrade. Očekivano, dominantan je pomak u smjeru kraće osi (slike 3.6.5 i 3.6.6). S obzirom na izraženu izduženost zgrade u smjeru istok-zapad, donekle iznenađuje da se osnovne frekvencije u oba smjera praktički poklapaju. Uzrok tome vjerojatno je spoj zgrade sa susjednim kućama, čime je povećana krutost zgrade u poprečnom smjeru (sjever-jug). To se slabije odrazilo na prigušenje koje je u smjeru kraće osi dva puta manje nego u uzdužnom smjeru. Prigušenje je očekivano veće u uzdužnom smjeru (tablica 6).

<sup>13</sup> Izvor: [http://hr.wikipedia.org/wiki/Sveučilište\\_u\\_Zagrebu](http://hr.wikipedia.org/wiki/Sveučilište_u_Zagrebu)

<sup>14</sup> Izvor: Google Earth



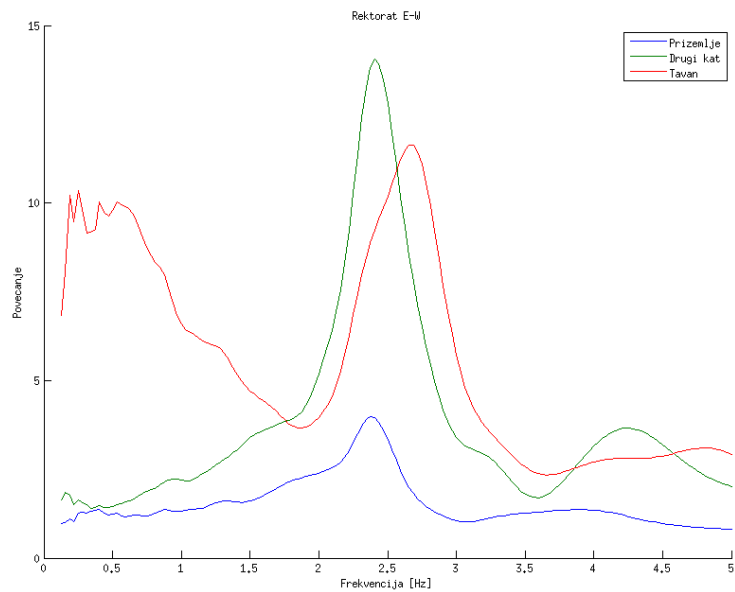
Slika 3.6.3. Spektar uzdužne komponente oscilacija Rektorata i pripadnog HVSR-a tla.



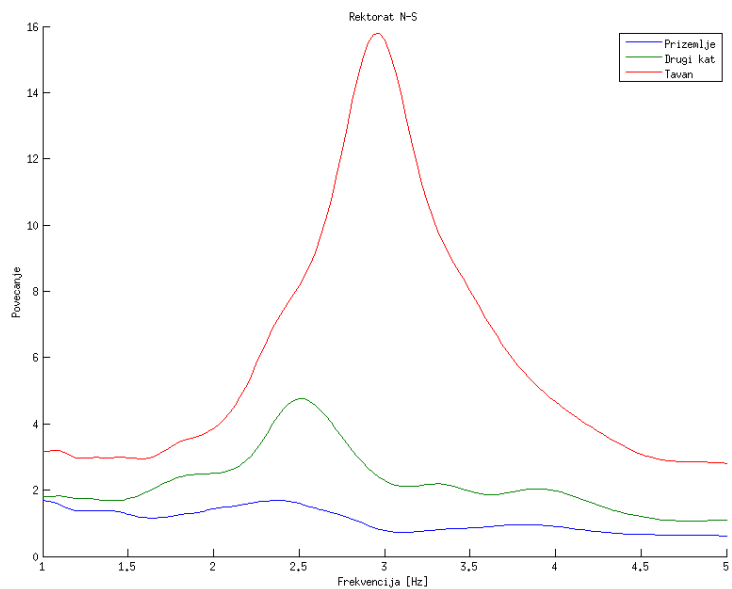
Slika 3.6.4. Spektar poprečne komponente oscilacija Rektorata i pripadnog HVSR-a tla.

Tablica 6. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova zgrade Rektorata; L—uzdužna os zgrade, T—poprečna os zgrade.

Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
Rektora - tL	$2.52 \pm 0.04$	$7.00 \pm 3.25$	$3.36 \pm 0.03$	$3.25 \pm 1.38$	$3.87 \pm 0.01$	$1.75 \pm 0.38$
Rektorat - T	$2.40 \pm 0.02$	$3.25 \pm 1.25$	$4.4 \pm 0.1$	$7.00 \pm 2.75$	/	/



Slika 3.6.5. Izglađeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka Rektorata u odnosu na tlo



Slika 3.6.6. Izglađeni vertikalni profil uzdužne komponente pomaka Rektorata u odnosu na tlo.



### 3.7. Hrvatski sabor

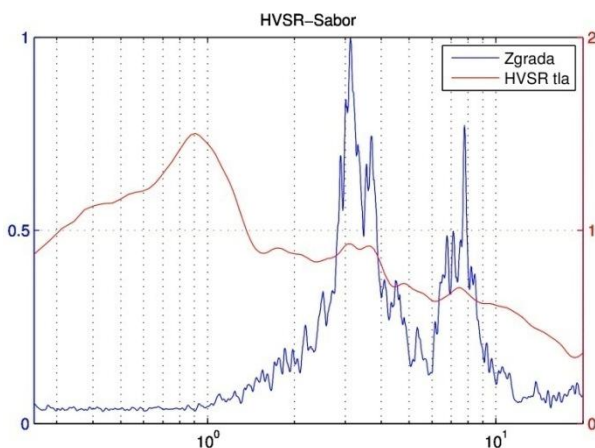
Sagrađena polovicom 18. stoljeća zgrada Hrvatskog sabora (slike 3.7.1 i 3.7.2<sup>15</sup>) u svom vijeku prošla je požar, potres i nedavno granatiranje. Prvotna zgrada Hrvatskog sabora jedno je vrijeme bila zgrada Zagrebačke županije, da bi početkom 20. stoljeća ponovo postala zgrada Sabora. Sadašnji izgled dobila je 1911. godine, dok je posljednje preuređenje bilo 1995. godine. Mjerenja su vršena u dijelu zgrade uz Opatičku ulicu u podrumu, prizemlju, drugom i četvrtom katu zgrade, a pobudni je signal mjeren ispred crkve sv. Marka.



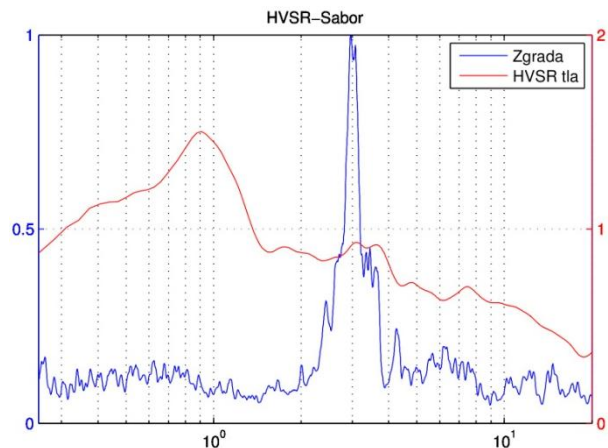
Slika 3.7.1. Zgrada Hrvatskog sabora.



Slika 3.7.2. Prikaz odozgo: zgrada Hrvatskog sabora (sjever je prema gore).

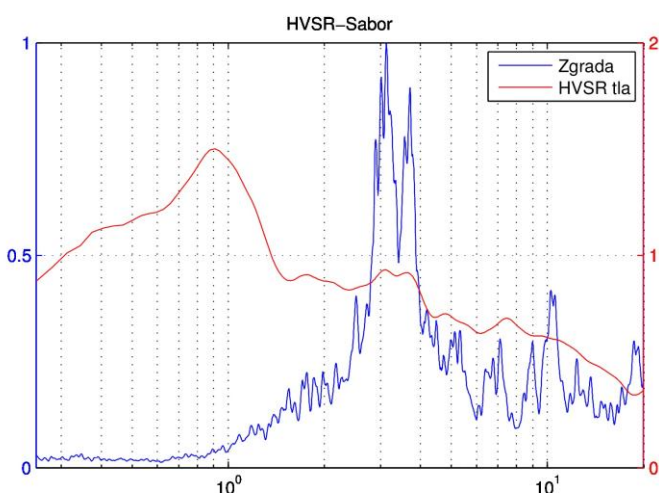


Slika 3.7.3. Spektar uzdužne komponente oscilacija Hrvatskog sabora i pripadnog HVSRS-a tla.



Slika 3.7.4. Spektar poprečne komponente oscilacija Hrvatskog sabora i pripadnog HVSRS-a tla.

<sup>15</sup> Izvor: Google Earth



Slika 3.7.5. Spektar uzdužne komponente oscilacija 2. kata Hrvatskog sabora i pripadnog HVSR-a tla.

tablica 7). Niti u jednom smjeru nema poklapanja s maksimumom *HVSR*-a pa smatramo da neće doći do rezonancije zgrade i tla.

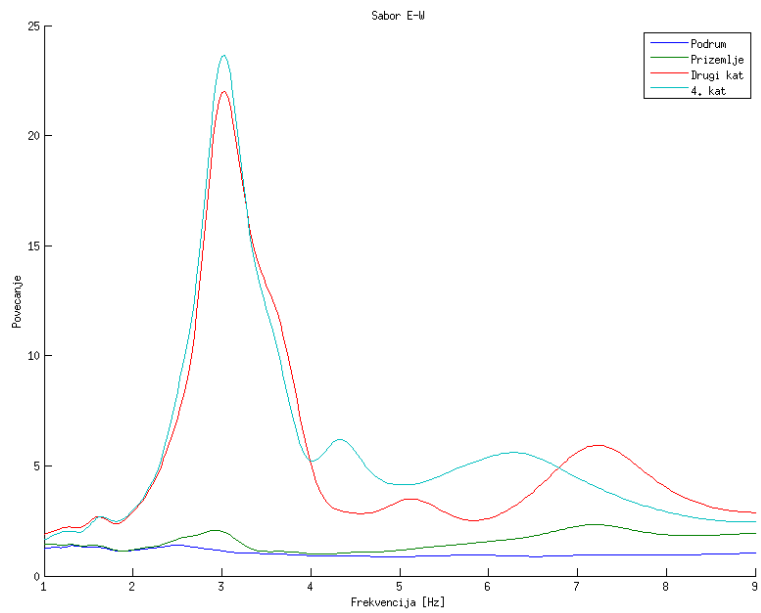
Četvrti kat je novo nadograđen i ne rasprostire se nad cijelom zgradom. Zbog činjenice da četvrti kat zgrade nije izvorni dio zgrade, analizirat ćemo odnos mjerenja s četvrtog kata i *HVSR*-a i mjerenje s drugog kata i *HVSR*-a. Osnovni mod uzdužne komponente na četvrtom katu (slika 3.7.3, tablica 7) na frekvenciji je 3.16 Hz, a prvi mod na 7.66 Hz. Osnovni je mod poprečne komponente na 3.01 Hz (slika 3.7.4,

Tablica 7. Vrijednosti dinamičkih parametara osnovnih i viših modova Hrvatskog sabora; L – uzdužna os zgrade, T – poprečna os zgrade

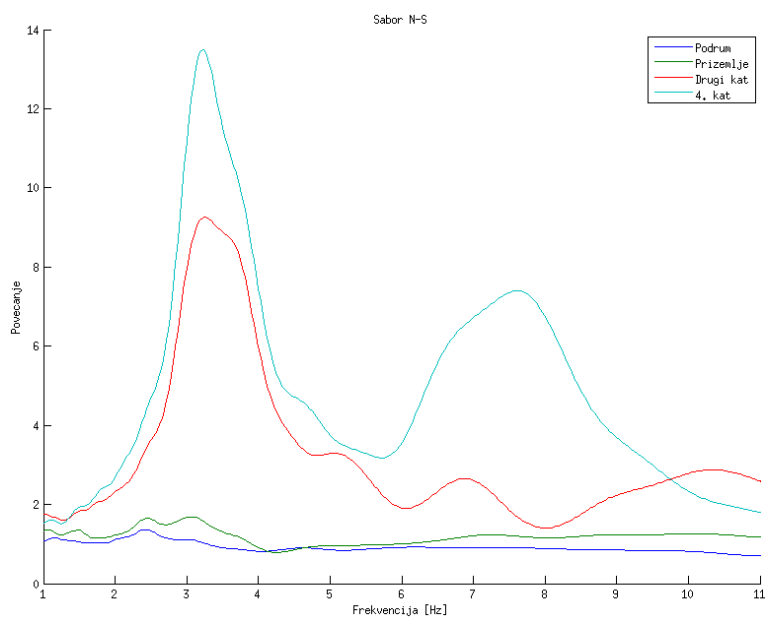
Komponenta	$f_0$ [Hz]	$D_0$ [%]	$f_1$ [Hz]	$D_1$ [%]	$f_2$ [Hz]	$D_2$ [%]
Hrvatski sabor -L	3.16±0.04	7.00±2.25	7.66±0.38	12.50±10.25	/	/
Hrvatski sabor -T	3.01±0.02	3.50±0.75	/	/	/	/

Ako gledamo mjerenje s četvrtog kata, vidjet ćemo jasno istaknut prvi mod zgrade u uzdužnom smjeru. Neočekivano je što, kada gledamo odnos mjerenja drugog kata i *HVSR*-a, toga moda nema (slike 3.7.3 i 3.7.5), što se vidi i na vertikalnom profilu povećanja uzdužne komponente (slika 3.7.6), gdje povećanje ima maksimum između 7 i 8 Hz na četvrtom katu. Ne možemo sa sigurnošću tvrditi zašto je tako. Smatramo da je moguć razlog u tome što je četvrti kat kasnije nadograđen i strukturalno drugačiji od ostatka zgrade i da je drugi očitani mod svojstven za sam kat. Zgrada dominantno titra u smjeru kraće osi, što je sukladno s očekivanjima (slika 3.7.6 i 3.7.7). Prigušenje je veće u uzdužnom smjeru zgrade što je očekivano zbog njenog izduženog oblika (slika 3.7.2, tablica 7).





Slika3.7.6. Izgladeni vertikalni profil povećanja poprečne komponente pomaka Hrvatskog sabora u odnosu na tlo.



Slika3.7.7. Izgladeni vertikalni profil povećanja uzdužne komponente pomaka Hrvatskog sabora u odnosu na tlo.

## **Zaključak**

Cilj ovog rada bio je ispitati stabilnost i ugroženost odabranih starih povijesnih zgrada u Zagrebu. Mjerenja su tijekom razdoblja od mjesec dana vršena u sedam zgrada: Hrvatskom saboru, Zagrebačkoj katedrali, hotelu Esplanade, Državnom hidrometeorološkom zavodu, Hrvatskom narodnom kazalištu, muzeju Mimari i Rektoratu Sveučilišta u Zagrebu. Pretpostavljen je linearni i elastični model tla i građevina, stoga analiza vrijedi samo za male pomake. Očekivano, pokazalo se da pomak raste s visinom i da je dominantan pomak zgrade u smjeru njene kraće osi. Pokazalo se da je prigušenje manje za više zgrade što se i očekivalo jer su više zgrade fleksibilnije. Prigušenja su veća u duljoj osi zgrada, osim kod kompleksnijih zgrada poput HNK-a i DHMZ-a. Najveću ugroženost od rezonancije zgrada – tlo pokazuju zgrade HNK-a i katedrale, a malo su manje ugrožene zgrade hotela Esplanade i DHMZ-a. Poželjno bi bilo ponoviti mjerenja za dvije-tri godine ili u slučaju potresa, restauracije, ili nekog oštećenja da bi se vidjelo je li došlo do promjena dinamičkih parametara građevina. Rad ukazuje na ranjivost povijesnih znamenitosti grada Zagreba pa se nadamo da će se u budućim restauracijama ovih mjerenih zgrada uzeti u obzir potreba za njihovim strukturnim ojačanjima.

## **Zahvale**

Zahvaljujemo se mentoru prof. dr. sc. Marijanu Heraku na vodstvu, strpljenju i svoj ukazanoj pomoći. Zahvaljujemo se i dipl. ing. Josipu Stipčeviću na savjetima i pomoći.

Dodatno se zahvaljujemo tehničkom direktoru hotela Esplanade Bernardu Jambroviću, rektoru katedrale Josipu Kuhtiću i zvonaru, šefu tehničke službe muzeja Mimare Branku Srebačiću, Gordani Zuccon iz DHMZ-a, gospodinu Marijanu iz Rektorata, rukovoditelju tehnike Hrvatskog narodnog kazališta Branku Lepenu i vatrogascu Robertu Firiću te pomoćnici tajnika Hrvatskog sabora Ljerki Lovrić.

## Literatura

- [1] Aničić, D. (2000): *Zagrebačka katedrala u potresu 1880. i njezina današnja obnova*. Građevinar, **52**, 11, 655 – 661.
- [2] Brownjohn, J. (2003): *Ambient vibration studies for system identification of tall buildings*. Earthquake Engng.Struct. Dyn.,**32**, 1, 71–95.
- [3] Crawford R. i Ward H. S. (1964): *Determination of the natural periods of buildings*. Bull. Seism. Soc. Am., **54**, 6, 1743–1756.
- [4] Fäcke, A., Parolai, S., Richwalski, S. M., Stempniewski, L. (2006): *Assessing the Vibrational Frequencies of the Cathedral of Cologne (Germany) by Means of Ambient Seismic Noise Analysis*, Natural Hazards, **38**, 229 – 236.
- [5] Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Castro, R. R., Monachesi, G., Contri, P. (2004): *Structure, soil – structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors*, Soil Dyn. Earthq. Eng., **24**, 487 – 495.
- [6] Herak, M. (2008): *ModelHVSR – a Matlab® Tool to Model Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Noise*.
- [7] Herak, M., Herak, D. (2008): *Seizmičnost i potresna opasnost u gradu Zagrebu*, Zbornik radova konferencije Razvitak Zagreba / Radić, Jure (ur.). Zagreb: SECON HDGK, 91 – 97.
- [8] Herak, M. (2011): *Overview of recent ambient noise measurements in Croatia in free-field and in buildings*, Geofizika, **28**, 21 – 40.
- [9] Maresca, R., Galluzzo, D., Del Pezzo, E. (2006): *H/V Spectral Ratios and Array Techniques Applied to Ambient Noise Recorded in the Colfiorito Basin, Central Italy*, Bull. Seizm. Soc. Am., **96**, 2, 490 – 505.
- [10] Mohorovičić, A. (2009): *Effects of earthquakes on buildings*, Geofizika, **26**, 1 – 65.

- [11] Mucciarelli, M., Contri, P., Giancarlo, M., Calvano, G., Gallipoli, M. (2001): *An Empirical Method to Assess the Seismic Vulnerability of Existing Buildings Using the HVSR Technique*, Pure appl. Geophys. **158**, 2635 – 2647.
- [12] Orlić, M. (ur.) (2011): *Nulla dies sine observatione : 150 godina Geofizičkog zavoda u Zagrebu*, Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, pp 231.
- [13] Pannou, A. A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., Papazachos, C. B. (2005): *Ambient Noise Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: The case of the city of Thessaloniki (Northern Greece)*, Soil Dyn. Earthq. Eng., 25, 261 – 274.
- [14] Prevolnik, S. (2008): *Mjerenje dinamičkih parametara zgrada u Zagrebu uz pobudu mikoseizmičkim neminom.*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, pp 51.
- [15] Trifunac M.D. (1972): *Comparison between ambient and forced vibration experiments*. Earthquake Engng. Struct. Dyn., **1**, 133–150.
- [16] Tsai, N. C. (1969): *Influence of local geology on earthquake ground motion*, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, pp 209.
- [17] Ventura, C., Liam Finn, W.-D., Lord, J.F. i Fujita, N. (2003): *Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurement and low level earthquake shaking*. Soil Dyn. Earthq. Eng., **23**, 313–322.
- [18] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>
- [19] <http://www.tromino.eu>
- [20] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej\\_Mimara](http://hr.wikipedia.org/wiki/Muzej_Mimara)
- [21] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Sveučilište\\_u\\_Zagrebu](http://hr.wikipedia.org/wiki/Sveučilište_u_Zagrebu)
- [22] <http://www.sabor.hr/Default.aspx?sec=484>
- [23] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Hrvatsko\\_narodno\\_kazalište\\_u\\_Zagrebu](http://hr.wikipedia.org/wiki/Hrvatsko_narodno_kazalište_u_Zagrebu)

## Sažetak

Slaven Begović, Tanja Pejić, Vjeran Višnjević

### **Dinamička svojstva sedam povijesnih zgrada u Zagrebu i njihova ugroženost potresima**

Grad Zagreb i njegova šira okolica smješteni su na dodirnoj točki triju velikih tektonskih jedinica i unutar potresima vrlo ugroženog područja. Zbog toga je potrebno obratiti posebnu pozornost na potresnu opasnost i ugroženost pojedinih zgrada od budućih potresa. U radu je opisana moderna i jednostavna metoda kojom se mogu izmjeriti dinamički parametri građevina (frekvencija i omjer mirenja) i dobiti spektri povećanja amplitude pomaka kroz zgradu u slučaju malih pomaka tla. Osim toga, moguće je procijeniti ugroženost građevine usporedbom spektara vibracija građevine i HVSR-a (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) površinskih slojeva tla koji je mjera spektralne amplifikacije trešnje za potresa. Prikazani su i diskutirani rezultati mjerenja dinamičkih parametara (vlastite frekvencije i pripadna prigušenja osnovnog i viših modova) u sedam povijesnih građevina u Zagrebu: zgradama Hrvatskog sabora, Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), Hrvatskog narodnog kazališta (HNK), muzeja Mimare, Rektorata Sveučilišta u Zagrebu, te katedrali i hotelu Esplanade. Vlastite oscilacije pojedine zgrade određene su mjerenjem vibracija uzrokovanih mikroseizmičkim nemirom pomoću trokomponentnog prijenosnog seizmografa. Pobudni signal mjeren je na otvorenom u blizini svake građevine. Rezultati usporedbe spektara vlastitih oscilacija s amplifikacijskim spektrima površinskih slojeva tla ukazuju na to da su zgrada HNK i katedrala, a u nešto manjoj mjeri zgrada DHMZ-a u opasnosti od opasne rezonancije zgrada-tlo tijekom potresa, o čemu valja voditi računa pri budućim rekonstrukcijama tih objekata. Prikupljeni podatci o osnovnim dinamičkim parametrima tvore vrijednu referentnu bazu podataka pomoću koje će biti moguće procijeniti promjenu strukturnog integriteta zgrade tijekom vremena ili nakon potresa.

Ključne riječi: *dinamički parametri, mikroseizmički nemir, potresna ugroženost, HVSR, odziv građevina*

## Summary

Slaven Begović, Tanja Pejić, Vjeran Višnjević

### **Dynamic properties and seismic vulnerability of seven historical buildings in the city of Zagreb**

The city of Zagreb and its greater region are located at the merging point of three large tectonic units, and therefore within an area of high seismic hazard. This is the reason to turn special attention to the threat earthquakes pose to some important buildings. The paper presents the application of a modern and simple method of determination of buildings' dynamic parameters (frequency and damping) as well as the displacement amplification spectra through vertical profile of the buildings in the case of small displacements. It is also possible to estimate vulnerability of buildings due to resonance by comparing the building spectrum and the HVSR (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) of the soil. The results of measurements of dynamic parameters (natural frequency and damping of fundamental and higher modes) for seven buildings of historical importance in Zagreb are shown. They are the houses of Croatian Parliament, Meteorological and Hydrological Service, Croatian National Theatre, the Mimara museum, Rectorate of the University of Zagreb, the cathedral and the hotel Esplanade. Three-component portable seismograph was used to detect and measure natural oscillations of aforementioned buildings caused by microseismic tremors. Free-field signal was measured in the vicinity of each building. The results of comparison of buildings' induced oscillations spectra to ground amplification spectra indicate that the houses of the theater, cathedral and to a lesser extent of the Meteorological and Hydrological Service face danger of reaching resonance with the ground during earthquake, and this should be taken into consideration in future reconstructions of these objects. The collected data of dynamic parameters constitute a valuable database which can be used to estimate the change of structural integrity of buildings over time or after large earthquakes.

Keywords: *dynamic parameters, microseismic tremors, seismic vulnerability, HVSR, building response*