

Primljen / Received: 23.8.2016.

Ispravljen / Corrected: 21.8.2017.

Prihvaćen / Accepted: 22.9.2017.

Dostupno online / Available online: 10.4.2018.

Ekperimentalno modalno istraživanje modela minareta u raznim vrstama temeljnog tla

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Kemal Haciefendioğlu**, dipl.ing.građ.
kemalheo@gmail.com



²Dr.sc. **Emre Alpaslan**, dipl.ing.građ.
emre.alpaslan@omu.edu.tr



²Doc.dr.sc. **Gökhan Demir**, dipl.ing.građ.
gokhan.demir@omu.edu.tr



²Mr.sc. **Burcu Dinç**, dipl.ing.građ.
burcu.dinc@omu.edu.tr



²Doc.dr.sc. **Fahri Birinci**, dipl.ing.građ.
fbirinci@omu.edu.tr

¹Privatni sektor, Turska

²Sveučilište Ondokuz Mayıs, Turska
Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Kemal Haciefendioğlu, Emre Alpaslan, Gökhan Demir, Burcu Dinç, Fahri Birinci

Ekperimentalno modalno istraživanje modela minareta u raznim vrstama temeljnog tla

U radu se prikazuje analiza utjecaja raznih vrsta temeljnog tla na dinamično ponašanje armiranobetonskih minareta. Za potrebe istraživanja u laboratoriju je izrađen ab model u mjerilu 1:20. Kako bi se ustanovile razlike u dinamičkom ponašanju modela minareta ovisno o vrsti temeljnog tla, kao temeljno tlo korišten je šljunak, pijesak i mješavina gline i šljunka. Ekperimentalna mjerenja su provedena pomoću operacionalne modalne analize (OMA), pri čemu su u obzir uzete okolne vibracije uslijed djelovanja vjetera i prometa. Rezultati ispitivanja pokazuju da vrsta temeljnog tla bitno utječe na dinamičko ponašanje ab minareta.

Ključne riječi:

operacionalna modalna analiza, ab minaret, poboljšana dekompozicija frekventnog područja, ambijentalne vibracije

Scientific Paper – Preliminary report

Kemal Haciefendioğlu, Emre Alpaslan, Gökhan Demir, Burcu Dinç, Fahri Birinci

Experimental modal investigation of scaled minaret embedded in different soil types

The influence of various types of foundation soil on dynamic behaviour of reinforced-concrete minarets is analysed in the paper. A 1:20 RC scale model was constructed in laboratory for the testing. The gravel, sand, and clay-gravel mixture, were used as foundation soil types to determine differences in dynamic behaviour as related to the type of foundation soil. Experimental measurements were conducted using the Operational Modal Analysis (OMA), taking into account ambient vibrations due to wind action and traffic. Test results show that the dynamic behaviour of RC minaret is strongly influenced by the type of foundation soil.

Key words:

operational modal analysis, RC minaret, enhanced frequency domain decomposition, ambient vibrations

Vorherige Mitteilung

Kemal Haciefendioğlu, Emre Alpaslan, Gökhan Demir, Burcu Dinç, Fahri Birinci

Experimentelle modale Untersuchung der Minarettmodelle auf verschiedenen Baugrundarten

In der Abhandlung wird die Analyse des Einflusses verschiedener Baugrundarten auf das dynamische Verhalten von Minaretten aus Stahlbeton dargestellt. Zum Zweck der Untersuchung im Labor wurde ein Stahlbetonmodell in einem Maßstab von 1:20 angefertigt. Um den Unterschied im dynamischen Verhalten des Minarettmodells abhängig von der Baugrundart festzustellen, wurde als Baugrund Kies, Sand und eine Mischung von Ton und Kies verwendet. Die experimentellen Messungen wurden mithilfe der operationalen Modalanalyse (OMA) durchgeführt, wobei die durch Wind und Verkehr verursachte Umgebungsvibration berücksichtigt wurde. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Baugrundart das dynamisch Verhalten der Minarette aus Stahlbeton erheblich beeinflusst.

Schlüsselwörter:

operationale Modalanalyse, Minarett aus Stahlbeton, verbesserte Dekomposition des Frequenzbereichs, Umgebungsvibration

1. Uvod

Dinamičko ponašanje postojećih građevina ovisi o svojstvima ugrađenih materijala i o vrsti rubnih uvjeta na razini temelja. Odziv konstrukcije, koji uključuje i njezine temelje, nazivamo interakcijom (međudjelovanjem) tla i konstrukcije. Interakcija tla i konstrukcije treba se uzeti u obzir kako bi se što točnije razumjele dinamičke karakteristike postojeće građevine. Jasno je da se dinamički odziv građevina temeljenih u deformabilnom tlu bitno razlikuje od odziva građevina temeljenih u krutom tlu. Interakcija tla i konstrukcije bitno utječe na osnovne vlastite frekvencije konstrukcija, a do smanjenja naročito dolazi kod drugog i viših oblika. Osim toga, interakcija tla i konstrukcije u velikoj mjeri utječe i na koeficijent prigušenja, naročito u slučaju građevina s manjim brojem katova, većim temeljima i građevina izvedenih u mekom tlu [1].

Minareti su visoki i vitki tornjevi čija visina ponekad doseže i do 70 metara. Oni se grade uz bok džamija, a izvode se od kamena ili opeke, s pojačanim stubama. U seizmički aktivnim područjima Turske često se grade i armiranobetonski minareti. Stoga je jasno da su u većoj mjeri izloženi djelovanju potresa, što može dovesti do smanjenja mehaničke otpornosti, rušenja i ljudskih žrtava.

Nakon rušenja nekih minareta kao što su Bodurga [2], Centre [3] i Kadiköy [4] smještenih u Çankırıju, Bingöli i Sultandağlıli te nakon drugih sličnih slučajeva rušenja minareta u Turskoj [5], istraživači su pažnju usmjerili na ispitivanje dinamičkog ponašanja takvih građevina, a pritom se primjenjuju kako eksperimentalne tako i analitičke metode. Eksperimentalna modalna analiza (EMA) i operacionalna modalna analiza (OMA) primjenjuju se za ocjenjivanje dinamičkih parametara građevina kao što su modalni oblici, modalne frekvencije i koeficijenti prigušenja. U postupku EMA, poznata ulazna sila (udarni čekić, uteg ili elektrodinamička treskalica) nanosi se na građevinu kako bi se odredila njezina modalna svojstva. Metoda EMA primjenjuje se za određivanje modalnih svojstava građevina i u tu se svrhu prikupljaju vibracijski signali tijekom uporabe građevine. Prema toj metodi, na građevinu mogu utjecati različite pobude kao što su vjetar, promet, valovi itd. Zbog financijskih razloga i mogućeg oštećenja građevine pri korištenju metode EMA, danas se sve više u provedbi analiza koristi metoda OMA, možda ponajprije zato što se radi o nerazornom ispitivanju. Postupak OMA sadrži neke tehnike utemeljene na frekventnom i na vremenskom području. Te se tehnike primjenjuju za određivanje dinamičkih parametara građevina. U vremenskom se području koriste sljedeći postupci: stohastička identifikacija potprostora (eng. *Stochastic Subspace Identification* - SSI), polireferentni složeni eksponent (eng. *Poly reference Complex Exponential* - PRCE), algoritam za provedbu svojstvenih sustava te Ibrahimove tehnike za vremensko područje. U frekventnom se području koristi poboljšana dekompozicija frekventnog područja (eng. *Enhanced Frequency Domain Decomposition* - EFDD) isto kao i postupci za potprostor u frekventnom području [6-11].

U dostupnoj su literaturi prikazane brojne istraživačke teme koje se odnose na primjenu nerazornih postupaka ispitivanja, naročito

postupka OMA, na različitim vrstama građevina poput mostova [12-17], brana [18], zgrada [19-22], silosa [23] i nuklearnih elektrana [24]. Dobar primjer je analiza dinamičkih parametara provedena u okviru ispitivanja okolnih vibracija na tornju visine 74 metara iz sedamnaestog stoljeća, na kojem je zamijećen velik broj pukotina na nosivim zidovima koji se nalaze na zapadnoj i istočnoj strani građevine [25]. Objavljen je i rad gdje je provedeno dinamičko ispitivanje zidanog zvonika te je ustanovljeno da je znatno oštećen pa stoga i vrlo osjetljiv na dinamičke i seizmičke utjecaje. U radu [26] prikazana su eksperimentalna istraživanja i operativne modalne analize provedene radi definiranja modela konačnih elemenata za tu povijesnu građevinu. Zaključeno je da se trebaju poduzeti značajne mjere radi uspostavljanja odgovarajućeg modela konačnih elemenata koji bi bio kompatibilan s eksperimentalno dobivenim dinamičkim svojstvima. Dinamička i seizmička svojstva armiranobetonskih minareta također su ispitivana u okviru brojnih objavljenih radova. Mogući razlozi velikih oštećenja armiranobetonskog minareta analizirani su proučavanjem načina popuštanja i seizmičkog ponašanja te dinamičkom analizom minareta [27]. Druga analiza oštećenja provedena je pomoću paketne valne transformacije (eng. *wavelet packet transform* - WPT) i umjetne neuronske mreže (ANN). Rezultati studije pokazuju da je primijenjena metoda računski djelotvorna te dostatna za razumijevanje o tome na koje načine dolazi do oštećenja [28]. Kako bi se na što bolji način odredilo dinamičko ponašanje nearmiranih povijesnih zidanih minareta, u radu su modelirana i analizirana tri zidana nearmirana povijesna minareta visine 20, 25 i 30 metara, a pritom su korištena dva zapisa o pomaku tla u Turskoj u toku potresa Kocaeli i Duzce. Rezultati modalne analize pokazali su da su na visinu minareta i spektralne karakteristike ulaznog kretanja utjecali vlastiti periodi konstrukcije i opći odziv konstrukcije [29]. U jednom je radu analizirana minimalizirajuća signalna buka koja utječe na pouzdanost i točnost podataka, a pritom je korišten pristup diskretne valne transformacije (eng. *discrete wavelet transform* - DWT). Rezultati studije pokazuju da čak i kada signale karakterizira jaka ili slaba buka, predložena metoda ipak je prikladnija od tradicionalnih metoda [30]. Provedena je analitička i operacionalna modalna analiza turskog armiranobetonskog minareta i utvrđene su prirodne frekvencije i koeficijent prigušenja minareta pomoću metode odabira vrhova (eng. *peak picking* - PP) i stohastičke identifikacije potprostora (SSI) [31]. U analizi ab minareta korišten je model konačnih elemenata, obavljeno je modalno ispitivanje, provedeno je ažuriranje modela konačnih elemenata te je obavljena analiza seizmičkog ponašanja prije i nakon ažuriranja modela. Modalni parametri minareta dobiveni su tijekom prirodnih pobuda kao što su djelovanje vjetra i aktivnosti ljudi [32]. Metoda ambijentalnih vibracija primijenjena je za izradu podložne ploče za razne uvjete tla. U ovom je radu podložna ploča modelirana tako da je bila dvadeset puta manja od podložne ploče stvarne građevine. Analizirane su dinamičke karakteristike modela podložne ploče dimenzija 150 x 100 x 5 cm te je zaključeno da uvjeti tla bitno djeluju na vlastite frekvencije, modalne oblike i modalne koeficijente prigušenja [33].

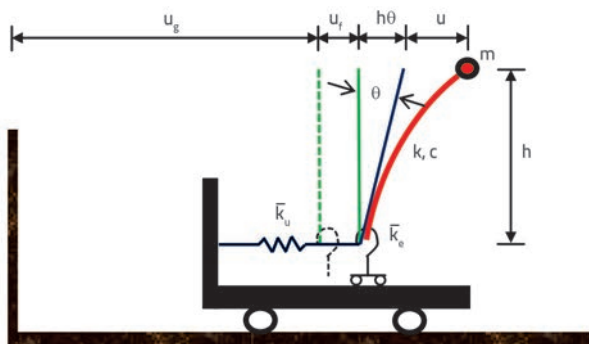
U većini se radova posebna pozornost usmjerava na istraživanje modalnih parametara minareta. Međutim, uglavnom se ne ocjenjuje utjecaj raznih vrsta tla na dinamičke karakteristike tih građevina. Stoga se ovaj rad upravo bavi određivanjem dinamičkih karakteristika modela armiranobetonskog minareta izrađenog u laboratorijskim uvjetima i ugrađenog u tri različite vrste tla. Kako bi se što bolje odredio utjecaj vrste tla na dinamičko ponašanje armiranobetonskog minareta, na temelju modalnog testiranja određena su tri modalna parametra, a rezultati su uspoređeni za svaki pojedini slučaj.

2. Analiza modalnih ispitivanja

Ispitivanje ambijentalnih vibracija može se smatrati vrlo djelotvornom metodom za ocjenjivanje elastičnih karakteristika i modalnih parametara (prirodnih frekvencija, modalnih koeficijenata prigušenja i modalnih oblika) interakcije tla i konstrukcije za građevine podvrgnute opterećenjima koja se javljaju u njihovoj okolini. Prirodne frekvencije i prirodni modalni oblici ubrajaju se među ključne parametre bilo koje konstrukcije i to zbog njihove izravne veze s krutošću konstrukcija. Stoga se može reći da nas na postojanje oštećenja mogu upozoriti upravo promjene prirodnih frekvencija i modalnih oblika građevine. Operacionalna modalna analiza (OMA) bavi se samo izlaznim mjerenjima konstrukcijskih sustava, bez umjetne pobude. Dvije metode kojima se često koristi za karakterizaciju modalnih parametara konstrukcije jesu metoda poboljšane dekompozicije frekventnog područja (eng. *Enhanced Frequency Decomposition Domain* - EFDD) i metoda stohastičke identifikacije potprostora (SSI).

2.1. Utjecaj interakcije tlo-konstrukcija (SSI) na modalne parametre

Analiza SSI u velikoj se mjeri oslanja na modele konstrukcija s jednim stupnjem slobode u smislu da se efekti inercijske interakcije iskazuju u prvom obliku. Ovaj se sustav može istraživati kao izravan model jednokatnice ili, općenitije, kao aproksimativni model građevine s više oblika i više katova za koji je iznimno važan odziv u prvom obliku [34].



Slika 1. Pojednostavljeni model za analizu inercijske interakcije [34]

Jednadžbe kretanja koje definiraju jednostavan sustav prikazan na slici 1., dane su izrazima (1), (2) i (3):

bočno:

$$m(\ddot{u}_f + h\ddot{\theta} + \ddot{u}) + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (1)$$

ukupno bočno:

$$m(\ddot{u}_f + h\ddot{\theta} + \ddot{u}) + m_f\ddot{u}_f + c_u\dot{u}_f + k_u u_f = -(m + m_f)\ddot{u}_g \quad (2)$$

ukupno rotacijsko:

$$mh(\ddot{u}_f + h\ddot{\theta} + \ddot{u}) + I\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} + k_\theta\theta = -mh\ddot{u}_g \quad (3)$$

gdje su m , k i c matrice mase, krutosti i prigušenja, u , \dot{u} i \ddot{u} su vektori pomaka, brzine i ubrzanja, h je visina konstrukcije, a I je rotacijski moment inercije konstrukcije. k_u , c_u , k_θ i c_θ su koeficijenti funkcije impedancije temelja koji označavaju karakteristike krutosti i prigušenja interakcije tla i temelja. U vezi sa slikom 1., funkcija impedancije određuje se kako slijedi:

$$\bar{k}_k = k_k(\alpha_0, \nu) + i\omega c_k(\alpha_0, \nu) \quad (4)$$

gdje indeks k simbolizira oblik deformacije u i θ , ω je kutna frekvencija (rad/s), α_0 je bezdimenzijska frekvencija identificirana pomoću $\alpha_0 = \omega r/V_s$, r je polumjer temelja, V_s brzina posmičnog vala tla, a ν je Poissonov koeficijent za tlo.

O vremenu ovisna kretanja iz jednadžbi (1), (2) i (3) pretvorena su u Laplaceovo područje prema $f(t) = \hat{f}e^{st}$. Kao što smo već prikazali, koeficijenti k_u , c_u , k_θ i c_θ su funkcije frekvencije s realnim vrijednostima. U Laplaceovom području, ti se koeficijenti spominju kao realne vrijednosti ocijenjene na polu funkcije transfera koja se treba odrediti. Radi praktičnosti, ti koeficijenti Laplaceovog područja isti su kao i impedancija temelja u frekventnom području određenom na frekvenciji konstrukcije za povoljnu razinu histereznog prigušenja tla. Pretvaranjem Laplaceovog područja i razdvajanjem pomoću koeficijenata mase, jednadžbe (1), (2) i (3) mogu se ponovno izraziti na sljedeći način:

$$s^2\hat{u}_f + s^2h\hat{\theta} + A\hat{u} = -s^2\hat{u}_g \quad (5)$$

$$A_u\hat{u}_f + s^2\mu h\hat{\theta} + s^2\mu\hat{u} = -s^2\hat{u}_g \quad (6)$$

$$s^2\hat{u}_f + A_\theta h\hat{\theta} + s^2\hat{u} = -s^2\hat{u}_g \quad (7)$$

gdje je s varijabla Laplaceovog područja složene vrijednosti, a $\mu = m / (m + m_f)$. Ako se zanemari rotacijska inercija konstrukcije i masa temelja (tj. $I = 0$, $\mu = 1$), koeficijenti A definiraju se kako slijedi:

$$A_k = s^2 + 2\xi_k\omega_k s + \omega_k^2 \quad (8)$$

gdje je ω kutna frekvencija (rad/s), ξ je koeficijent prigušenja, $k = [u, \theta]$, u i θ (a te vrijednosti označavaju konstrukciju s fiksnom osnovom, translaciju temelja i njihanje temelja), a koeficijenti frekvencija i prigušenja (ω_k , ξ_k) označavaju dinamičko ponašanje konstrukcije (ω , ξ) ili sustava sastavljenog od tla i temelja (ω_u , ξ_u i ω_θ , ξ_θ). Ti parametri ovise o svojstvima sustava kako slijedi:

$$\omega_k^2 = \frac{k_k}{m}, \quad \xi_k = \frac{c_k}{2m\omega_k} \quad (k = [] \text{ ili } u) \tag{9}$$

$$\omega_\theta^2 = \frac{k_\theta}{m}, \quad \xi_\theta = \frac{c_\theta}{2mh^2\omega_\theta} \tag{10}$$

Tri nepoznate funkcije odziva ($\hat{u}, \hat{u}_f, \hat{\theta}$) i tri jednađbe uključene su u jednađbe (5), (6) i (7). Odziv se može dobiti izravno u vidu svojstava sustava [34],

$$\frac{\hat{u}}{\hat{u}_g} = -\frac{B_\theta B_u s^2}{C_s}, \quad \frac{\hat{u}_f}{\hat{u}_g} = -\frac{B_\theta B_s s^2}{C_s} \text{ i } \frac{h\hat{\theta}}{\hat{u}_g} = -\frac{B B_u s^2}{C_s} \tag{11}$$

gdje je:

$$B_k = A_k - s^2$$

$$C_s = s^2(B_u B + B_u B_\theta + B_\theta B) + B_u B B_\theta$$

Jednađba (11) je potpuno rješenje SSI modela iz slike 1. Stoga se bilo koja relevantna funkcija transfera može odrediti izravno iz tih rezultata [34]. Gornji se postupak može primijeniti na kružne temelje, a prilagođen je za pravokutne temeljr uzimajući u obzir koeficijent B/L , gdje su B i L poluširina tj. poludužina temelja. Dodatne se informacije mogu naći u odgovarajućoj literaturi [35].

2.2. Metoda poboljšane dekompozicije frekventnog područja (EFDD)

Metoda dekompozicije frekventnog područja (FDD) obično se koristi za operacionalnu modalnu analizu u raznim područjima građevinarstva. Matrica spektralne gustoće podijeljena je u niz sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF) uz provedbu dekompozicije singularne vrijednosti unutar tog postupka. Ako je opterećenje bijela buka, te ako je konstrukcija donekle prigušena, a modalni su oblici blisko postavljenih oblika geometrijski ortogonalni, tada se tom metodom mogu dobiti točni rezultati. Vrlo logični rezultati mogu se dobiti čak i kada ti uvjeti nisu zadovoljeni [36]. Postupak EFDD poboljšana je verzija postupka FDD prema kojem se modalni parametri izravno ocjenjuju na temelju proračuna dobivenih obradom signala. U postupku EFDD frekventni sadržaj odziva dobiva se korištenjem funkcija autospektralne gustoće snage izmjerenih vremenskih serija odziva [36]. Originalna metoda EFDD prikazana je u više radova [37]. Odnos između nepoznatih ulaznih i izmjerenih izlaznih signala može se u postupku EFDD izraziti na sljedeći način [38].

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \tag{12}$$

gdje je $G_{xx}(j\omega)$ matrica spektralne gustoće snage (PSD) $r \times r$ ulaznog signala, r je broj ulaza, $G_{yy}(j\omega)$ je matrica $m \times m$ PSD izlaznog signala, m je broj odziva, $H(j\omega)$ je matrica funkcije frekventnog odziva (FRF) $m \times r$, a $*$ i T opisuju konjugiranu tj. transponiranu kompleksnu vrijednost. Matrica FRF $H(j\omega)$ definira se kako slijedi:

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \tag{13}$$

gdje je n broj oblika, λ_k je pol, a R_k matrica ostatka. Primjenom jednađbe (13) u jednađbi (12), dobivamo [36]:

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \tag{14}$$

gdje s predstavlja singularne vrijednosti a \bar{H} je kompleksna konjugirana i transponirana vrijednost. Izlazna vrijednost PSD može se smanjiti na oblik pola/ostatka kako slijedi:

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \tag{15}$$

gdje su A_k i B_k k -te matrice ostatka izlazne vrijednosti PSD. Sljedeći se izraz dobiva provođenjem dekompozicije singularne vrijednosti izlazne matrice PSD poznate na diskretnim frekvencijama $\omega = \omega_i$:

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \tag{16}$$

gdje matrica U_i predstavlja unitarnu matricu koja sadrži singularni vektor u_{ij} , S_i je dijagonalna matrica koja sadrži skalarne singularne vrijednosti s_{ij} , PSD matrica u jednađbi (16), te vršne vrijednosti i singularni vektori, u_{ij} odgovaraju vlastitim frekvencijama, tj. vlastitim modalnim oblicima.

2.3. Stohastička metoda za identifikaciju potprostora (SSI)

Za razliku od postupka FDD, u okviru stohastičke metode za identifikaciju potprostora (SSI) primjenjuju se tehnike koje se odnose na vremenska područja. Neke od osnovnih karakteristika postupka SSI su: izravno rješavanje vremenskih serija sirovog odziva, red podataka i deterministički ulazni signal, te buka smanjena kroz ortogonalnu projekciju i sintezu na temelju dekompozicije. Postupak SSI prvobitno su koncipirali Van Overschee i De Moor [11], a kasnije dodatno razvili neki drugi autori kao što su Hermans i Van de Auweraer [39], Peters [40], te Reynder i Roeck [41]. Neke od prednosti metode SSI su: rad u vremenskoj domeni, nema ispuštanja jer se ne koristi Fourierova transformacija, te upotrebe mnogo nižeg reda modela nego što je to slučaj kod drugih komercijalno dostupnih analizatora modela višeg reda [42].

U ovom se postupku dinamički parametri konstrukcije mogu izraziti pomoću niza linearnih konstantnih koeficijenata i diferencijalnih jednađbi drugog reda:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{R(t)\} = [B]\{u(t)\} \tag{17}$$

gdje su $[M]$, $[C]$ i $[K]$ matrice mase, prigušenja i krutosti, $\{R(t)\}$ je sila pobude, $\{\dot{U}(t)\}$, $\{U(t)\}$ i $\{U(t)\}$ su vektori ubrzanja, prigušenja i pomaka u kontinuiranom vremenu t . Vektor sile može se opisati pomoću matrice $[B]$ kojom se definiraju ulazne vrijednosti za

prostor i vektor $(u(t))$. Pomoću sljedećih definicija [43]:

$$x(t) = \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \quad (18)$$

jednadžba (17) može se unijeti u jednadžbu stanja:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (19)$$

gdje je A , matrica stanja, B , je ulazna matrica, a $x(t)$ je vektor stanja.

Nakon određenih pretpostavki i matematičkih obrada, dobiven je sljedeći diskretni vremenski potpuno stohastički model stanja-prostora vibracijske konstrukcije:

$$x_{k+1} = A x_k + w_k \quad (20)$$

$$y_k = C x_k + v_k$$

Jednadžba (20) predstavlja opći oblik identifikacije sustava vrijeme-prostor kroz mjerenje operacionalnih vibracija. U literaturi [41] se mogu pronaći detaljnija objašnjenja o definiranju jednadžbe (20).

2.4. Kriterij modalnog osiguranja (MAC)

Kriterij modalnog osiguranja (eng. *Modal Assurance Criterion* - MAC) može se primijeniti u modalnoj analizi jer se tim kriterijem mogu usporediti različiti modalni oblici u jednom broju. Vrijednost MAC je između 0 i 1, tj. ako postoji dostatna sukladnost između modalnih oblika tada vrijednost MAC iznosi približno 1. Za dva različita modalna oblika $\{\varphi_r\}$, $\{\varphi_s\}$, vrijednost MAC može se izračunati kako slijedi [44]:

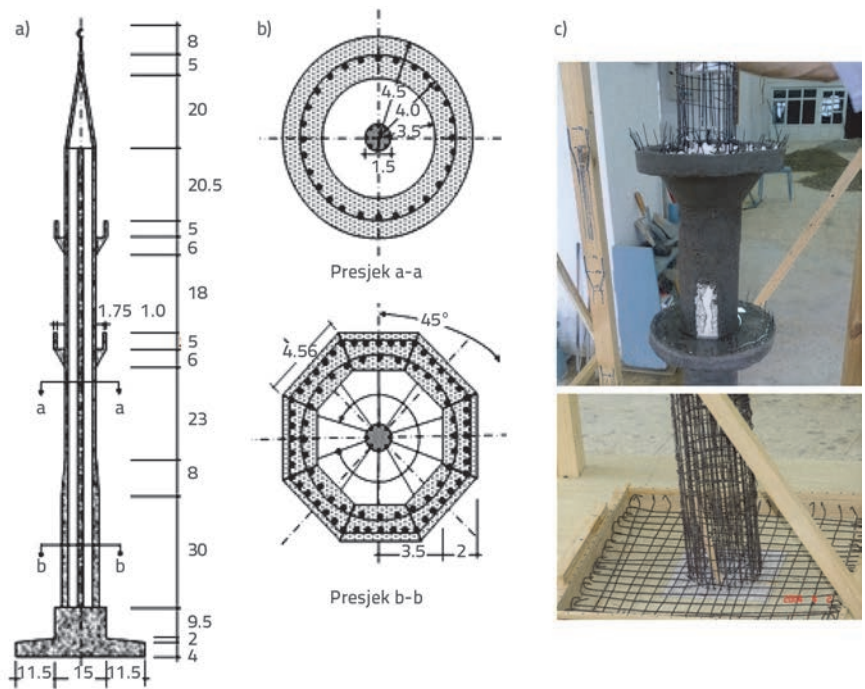
$$MAC(r,s) = \frac{|\{\varphi_r\}^T \{\varphi_s\}|^2}{(\{\varphi_r\}^T \{\varphi_r\})(\{\varphi_s\}^T \{\varphi_s\})} \quad (21)$$

gdje je $\{\varphi_s\}$ probni modalni vektor, oblik s , $\{\varphi_r\}$ je kompatibilni modalni vektor, a oblik r i T je transponirana matrica.

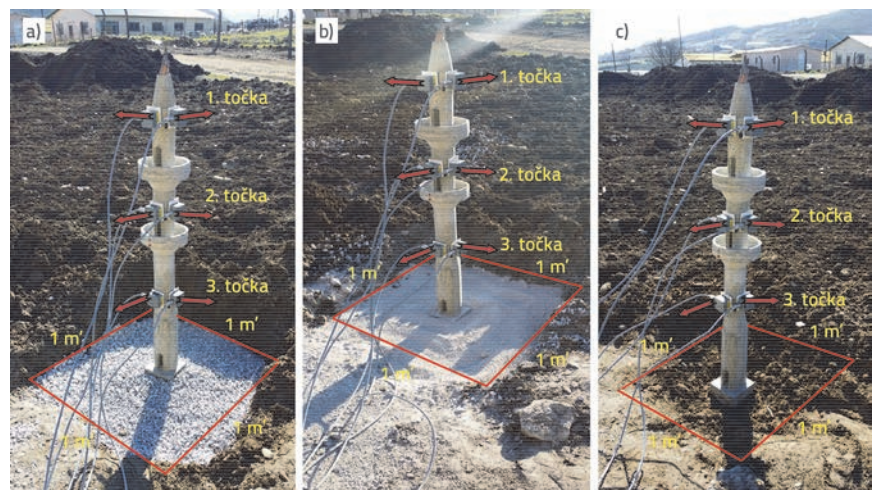
3. Eksperimentalni slijed i model ab minareta

Za potrebe analize utjecaja različitih vrsta tla na dinamičko ponašanje konstrukcije, u ovom je radu korišten

model armiranobetonskog minareta u mjerilu 1:20. U tom je modelu upotrijebljen razred betona C30/37, što je u skladu s normom TS EN 206-1 [45]. U pokusu je primjenjena metoda ultrazvučnog ispitivanja. Prikaz armiranja modela minareta prikazan je na slici 2.b. Operacionalna modalna analiza (OMA) korištena je za određivanje vibracijskog odziva sustava za različite vrste tla. Određene vrste tla postavljene su u tlo. Dimenzije su iznosile 100 x 100 x 20 cm (d x š x v). Dimenzije modela i temelja minareta prikazane su na slici 2. Temelji modela ugrađeni su u zadane vrste tla. Za određivanje svojstava tla korištenih u ovoj analizi nisu rađene posebne analize, tj. namuce su odabrane vrste tla za potrebe



Slika 2. a) Dimenzije modela minareta u mjerilu 1:20 [cm]; b) postupak izrade modela minareta



Slika 3. Eksperimentalna primjena: a) temeljnog tla sastavljenog od šljunka; b) temeljnog tla od pijeska; c) temeljnog tla od mješavine gline i šljunka

temeljenja modela. U analizama su predviđena tri slučaja za određivanje utjecaja vrste tla na dinamičke karakteristike ispitivane konstrukcije. Slučajevi temeljnog tla prikazani na slici 3. mogu se opisati kao šljunak, pijesak i mješavina gline i šljunka.

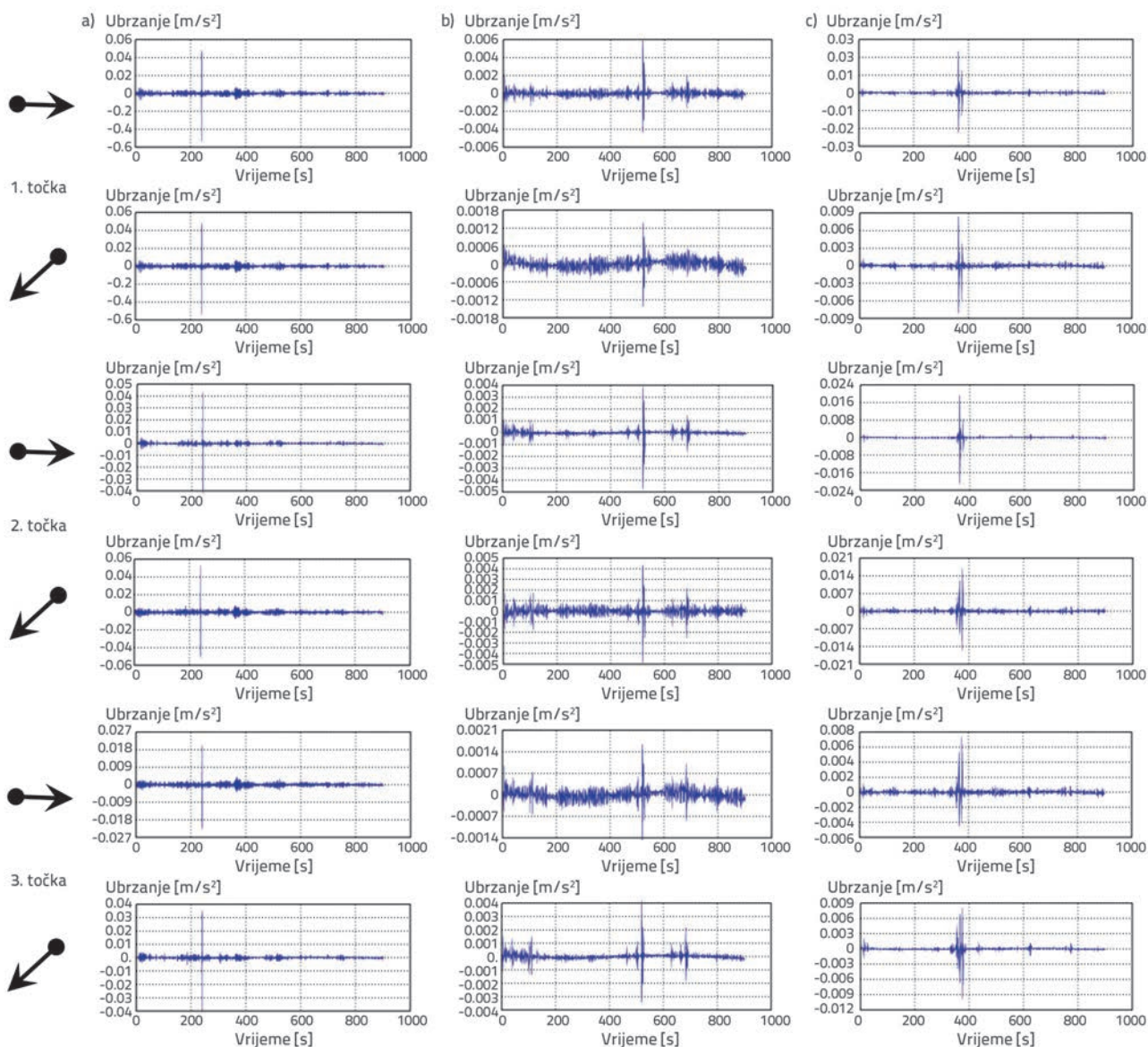
4. Provedba eksperimenta

Za određivanje modalnih parametara modela armiranobetonskog minareta primijenjena je metoda OMA. Za provedbu eksperimenta primijenjen je sustav za prikupljanje podataka, jednoosni akcelerometar i kontrolni uređaj (slika 4.). Jednoosni akcelerometri služili su za određivanje vibracijskog odziva konstrukcije na ambijentalne vibracije uzrokovane vjetrovom i prometom. Za pohranjivanje signala

s akcelerometara u smjerovima X i Y s ukupno tri različite lokacije korišten je mrežno povezani program za prikupljanje podataka Testlab_V2. Raspon frekvencija iznosio je od 0 do 100 Hz, a mjerenje je trajalo 15 minuta. Podaci dobiveni pomoću akcelerometara prikazani su na slici 5.



Slika 4. Jednoosni akcelerometri, uređaj za obradu signala i kontrolni uređaj



Slika 5. Vremenske serije ubrzanja za: a) temeljno tlo od šljunka; b) temeljno tlo od pijeska; c) temeljno tlo od mješavine gline i šljunka

Za određivanje eksperimentalnih modalnih parametara modela minareta korišten je program ARTeMIS 1.5. Postupci EFDD i SSI primijenjeni su za određivanje prirodnih frekvencija, koeficijenata prigušenja i modalnih oblika minareta. Bellove funkcije s jednim stupnjem slobode određene su postupkom EFDD u programu ARTeMIS. Svi modalni parametri određeni su na temelju tih Bellovih spektara s jednim stupnjem slobode. Svi modalni parametri mogu se u postupku SSI izraziti pomoću posebnog iskaza funkcije transfera. Za analizu podataka korišten je algoritam neponderirane osnovne komponente (UPC) [46].

5. Rezultati i rasprava

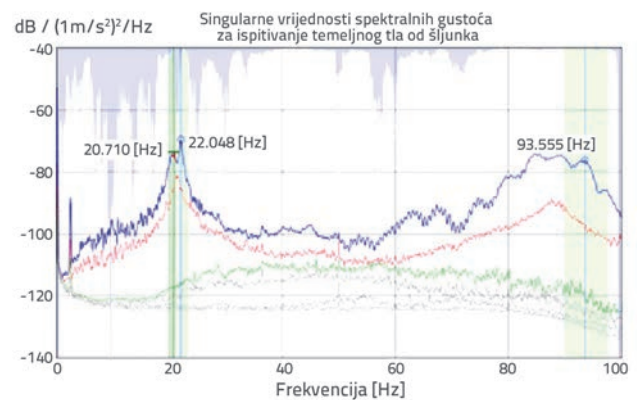
Modalni parametri modela minareta određeni su na temelju odziva na ambijentalne vibracije modela minareta postavljenog u tri vrste temeljnog tla: šljunak, pijesak i mješavinu gline i šljunka. Za sve tri vrste temeljnog tla određene su spektralne gustoće snage modela minareta dobivene postupkom EFDD te stabilizacijski dijagrami modela minareta dobiveni postupkom SSI. Ocijenjene su prve tri modalne frekvencije, modalni oblici i modalni koeficijenti prigušenja modela minareta.

Spektralne gustoće snage šljunka, pijeska i mješavine gline i šljunka dobivene postupkom EFDD prikazane su na slikama 6., 9. i 12. Stabilizacijski dijagram šljunka, pijeska i mješavine gline i šljunka prikazani su na slikama 7., 10. i 13. Modalni oblici modela minareta za temeljna tla od šljunka, pijeska i mješavine gline i šljunka, dobiveni postupcima EFDD i SSI, prikazani su na slikama 8., 11. i 14.

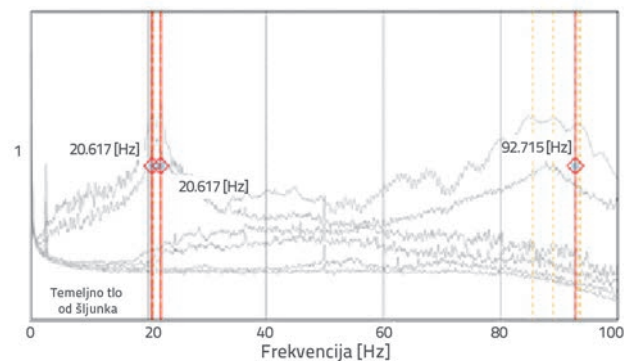
Prirodne frekvencije, modalni koeficijenti prigušenja i modalni oblici modela minareta određeni su pomoću ispitivanja ambijentalnih vibracija za tri različite vrste temeljnog tla. Prve tri prirodne frekvencije dobivene pomoću metoda EFDD i SSI prikazane su u tablici 1. Modalni koeficijenti prigušenja modela minareta prikazani su u tablici 2. za oba postupka.

Rezultati dobiveni postupkom OMA pokazuju da su prve tri prirodne frekvencije modela minareta u rasponu od 20 do 100 Hz. Iz analiza se također može vidjeti da vrsta temeljnog tla bitno utječe na prirodne frekvencije modela minareta. Dok se najniže prirodne frekvencije modela minareta postižu u slučaju pješčanog temeljnog tla, najviše se iskazuju u slučaju temeljnog tla sastavljenog od mješavine gline i šljunka. U svim slučajevima možemo uočiti da su prve dvije prirodne frekvencije relativno bliske jedna drugoj. Međutim, treće prirodne frekvencije šljunka i mješavine gline i šljunka otprilike su za četiri i

pol i tri puta veće od prve dvije prirodne frekvencije modela minareta. Tome je možda razlog izrazita krutost modela minareta.

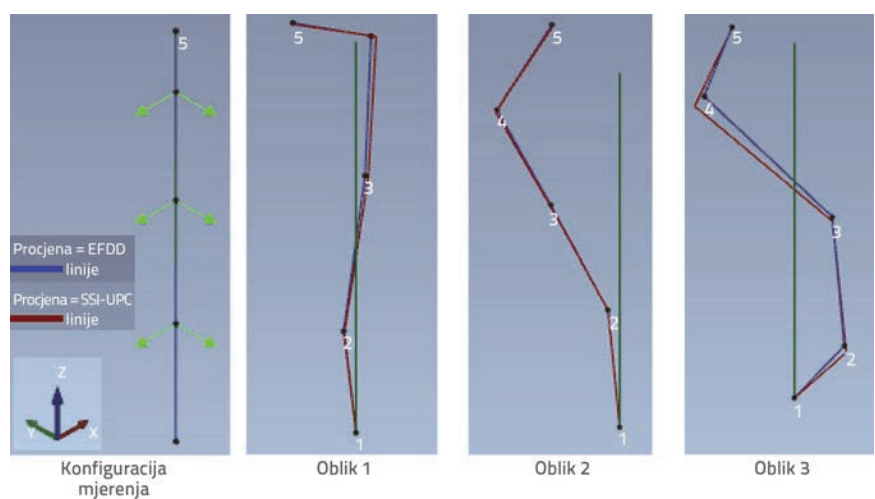


Slika 6. Spektralna gustoća snage šljunkovitog temeljnog tla modela minareta određena postupkom EFDD

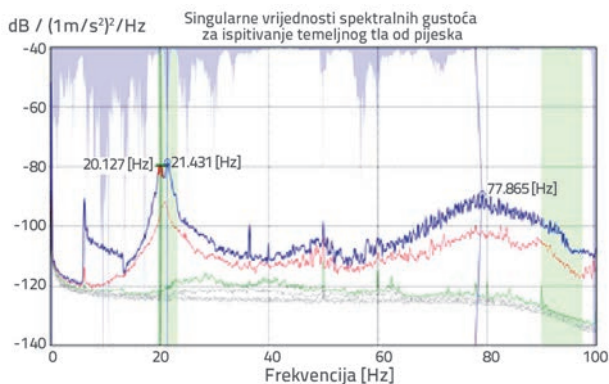


Slika 7. Stabilizacijski dijagram šljunkovitog temeljnog tla modela minareta određen postupkom SSI

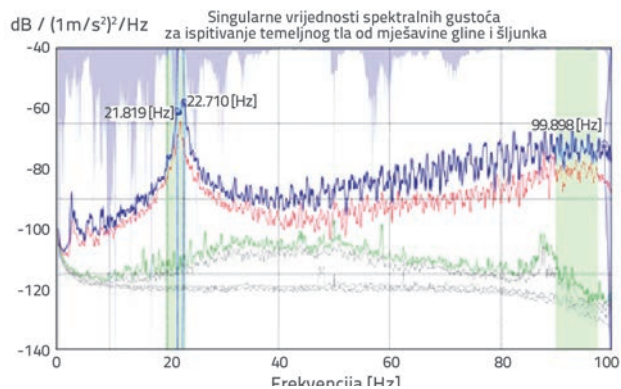
Treba također spomenuti da su prirodne frekvencije svake vrste temeljnog tla dobivene EFDD postupkom gotovo jednake prirodnim frekvencijama koje su dobivene postupkom SSI. Ta



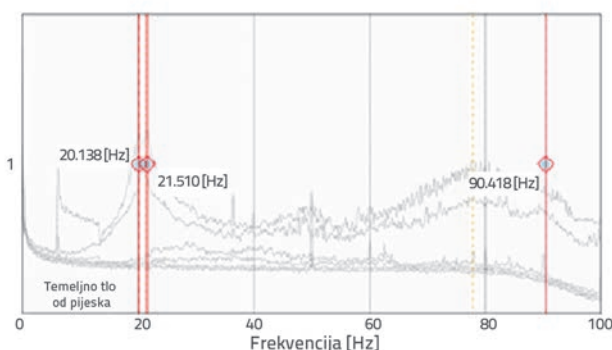
Slika 8. Modalni oblici modela minareta za šljunkovito temeljno tlo



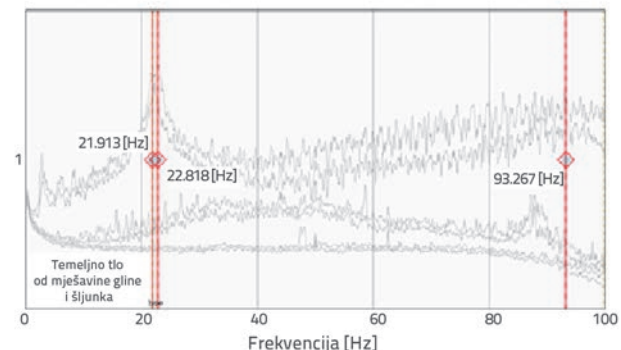
Slika 9. Spektralna gustoća snage pješčanog temeljnog tla modela minareta određena postupkom EFDD



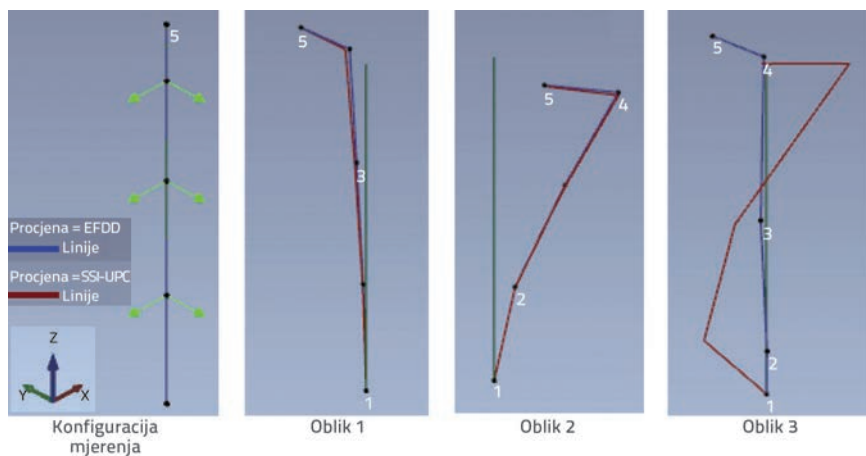
Slika 12. Spektralna gustoća snage temeljnog tla od mješavine gline i šljunka određena postupkom EFDD za model minareta



Slika 10. Stabilizacijski dijagram pješčanog temeljnog tla modela minareta određen postupkom SSI



Slika 13. Stabilizacijski dijagram temeljnog tla od mješavine gline i šljunka određen postupkom SSI za model minareta



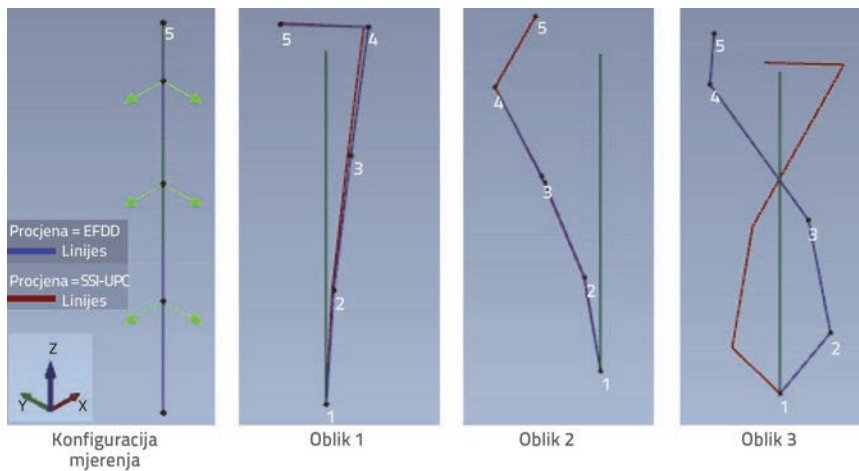
Slika 11. Modalni oblici modela minareta za pješčano temeljno tlo

se podudarnost frekvencija također može uočiti kod modalnih oblika modela minareta dobivenih primjenom postupaka EFDD i SSI. Može se zaključiti da su eksperimentalna ispitivanja provedena na zadovoljavajući način i to upravo zbog dobre podudarnost modalnih oblika dobivenim pomoću spomenutih postupaka. S druge strane, prva tri modalna oblika analiziranih vrsta temeljnog tla u određenoj se mjeri

međusobno razlikuju. Osim toga, iz modalnih se oblika može zaključiti da su savijanje i vertikalni pomak osnovni obrasci modalnog ponašanja modela minareta.

Kao što je prije navedeno, na koeficijente prigušenja konstrukcija znatno utječe interakcija tla i konstrukcije. Jasno se može vidjeti da modalni koeficijenti prigušenja modela minareta nasumce variraju ovisno o vrsti temeljnog tla. Stoga je teško postići potpunu usklađenost koeficijenata prigušenja modela minareta. Može se reći da su prva tri modalna koeficijenta prigušenja modela minareta, izračunana pomoću

postupka SSI, viši od onih postignutih prema postupku EFDD. Srednje vrijednosti koeficijenata prigušenja konstrukcije mogu se koristiti za sve tri analizirane vrste temeljnog tla. Kod postupka EFDD, prosjeci za šljunak, pijesak i mješavinu gline i šljunka redom iznose 1,25 %, 1,22 % i 1,18 %. Kod postupka SSI, te vrijednosti iznose 2,35 %, 1,76 % i 2,631 %. Može se također uočiti da se najviši modalni



Slika 14. Modalni oblici modela minareta za temeljno tlo od mješavine gline i šljunka

koeficijent prigušenja postiže za temeljno tlo od šljunka. Rezultati eksperimentalnih analiza također su provjereni pomoću kriterija modalnog osiguranja (MAC) za prirodne

za pijesak i mješavinu gline i šljunka. Jasno je da bi se još pouzdanije vrijednosti tih oblika dobile kada bi se koristio veći broj senzora.

oblike dobivene postupcima EFDD i SSI. Oblik matrice MAC za postupke EFDD i SSI prikazan je na slici 15. za sva tri temeljna tla. Općenito se može zaključiti da su modalni oblici dobiveni pomoću EFDD-a i SSI-ja međusobno dosta dobro usklađeni između tri prirodna modalna oblika modela minareta. Vrijednosti MAC prikazane su i u tablici 3.

Dijagonale matrice MAC pokazuju da su procijenjeni modalni oblici gotovo potpuno isti kod postupaka EFDD i SSI. Također je ustanovljeno da u tim postupcima nema nedostajućih ili suvišnih oblika. Niže vrijednosti MAC ustanovljene su samo u trećem obliku

Tablica 1. Prve tri prirodne frekvencije modela minareta

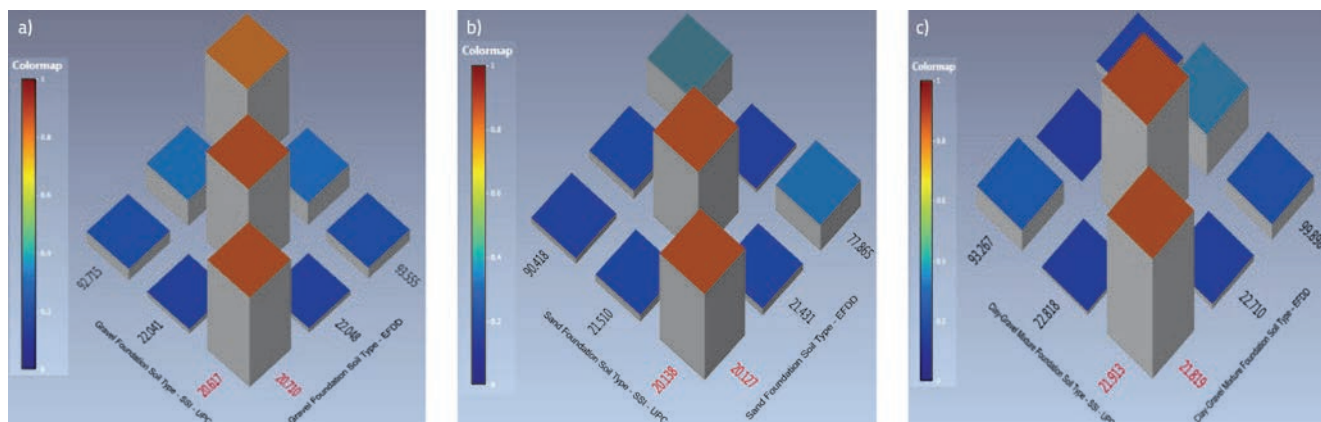
Modalni oblik	Prirodne frekvencije [Hz]					
	Temeljno tlo od šljunka		Temeljno tlo od pijeska		Temeljno tlo od mješavine gline i šljunka	
	EFDD	SSI	EFDD	SSI	EFDD	SSI
1	20,710	20,617	20,127	20,138	21,819	21,913
2	22,048	20,617	21,431	21,510	22,710	22,818
3	93,555	92,715	77,865	90,418	99,898	93,267

Tablica 2. Prva tri modalna koeficijenta prigušenja modela minareta

Modalni oblik	Modalni koeficijenti prigušenja [%]					
	Temeljno tlo od šljunka		Temeljno tlo od pijeska		Temeljno tlo od mješavine gline i šljunka	
	EFDD	SSI	EFDD	SSI	EFDD	SSI
1	1,352	2,037	1,204	1,259	1,179	1,875
2	1,149	1,278	1,064	1,151	0,781	1,558
3	----	3,762	1,412	2,883	1,595	4,460

Tablica 3. Vrijednosti MAC kod postupaka EFDD i SSI za sva tri temeljna tla

Postupak	Modalni oblik	Temeljno tlo od šljunka			Temeljno tlo od pijeska			Temeljno tlo od mješavine gline i šljunka		
		EFDD			EFDD			EFDD		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
SSI	1	0,993	0,049	0,119	0,994	0,080	0,295	0,998	0,044	0,128
	2	0,051	0,996	0,244	0,081	0,989	0,044	0,030	0,999	0,342
	3	0,125	0,279	0,911	0,062	0,094	0,415	0,174	0,003	0,054



Slika 15. Vrijednosti MAC za postupke EFDD i SSI za sve tri vrste temeljnog tla: a) temeljenje u šljunku, b) temeljenje u pijesku; c) temeljenje u mješovitom tlu sastavljenom od gline i šljunka

6. Zaključak

U ovom su radu analizirani utjecaji različitih vrsta temeljnog tla na dinamičko ponašanje armiranobetonskih minareta. Za analizu je korišten armiranobetonski model minareta izrađen u mjerilu 1:20 za laboratorijske uvjete. Armirani model minareta temeljen je u tri vrste temeljnog tla, a to su šljunak, pijesak i mješavina gline i šljunka. Eksperimentalna mjerenja provedena su postupkom OMA pri okolnim vibracijama kao što su vjetar i promet, a eksperimentalne dinamičke karakteristike modela minareta (vlastite frekvencije, modalni oblici i modalni koeficijenti prigušenja) određene su pomoću postupka EFDD na osnovi frekventnog područja te pomoću postupka SSI na osnovi vremenskog područja.

Prirodne frekvencije armiranog modela minareta mijenjaju se ovisno o vrsti temeljnog tla. Prve tri registrirane prirodne frekvencije variraju od 20 do 100 Hz. Maksimalne prirodne frekvencije dobivene su na temeljnom tlu sastavljenom od mješavine gline i šljunka. Minimalne prirodne frekvencije modela minareta registrirane su za temeljno tlo od pijeska. Također, prva tri modalna koeficijenta prigušenja variraju između 0,781 i 1,595 % za EFDD, te između 1,151 i 4,460 % za postupak SSI. Najviše vrijednosti modalnog koeficijenta prigušenja dobivene su za šljunčano temeljno tlo kod prva dva prirodna oblika. S

druge strane, najviši modalni koeficijent prigušenja zabilježen je za temeljno tlo od mješavine gline i šljunka u usporedbi s ostalim vrstama temeljnog tla (šljunak i pijesak). Gotovo iste dinamičke karakteristike armiranobetonskog modela minareta postignute su za svako analizirano temeljno tlo nakon dekompozicije signala prema postupcima EFDD i SSI. Ti primjeri pokazuju dobru podudarnost postupaka EFDD i SSI u eksperimentalnim uvjetima.

Rezultati operacionalne modalne analize jasno pokazuju da vrsta temeljnog tla znatno utječe na dinamičke karakteristike armiranih konstrukcija minareta. U zaključku se može navesti da se operacionalna modalna analiza bazirana na ispitivanju okolnih vibracija može sigurno primijeniti za određivanje utjecaja raznih vrsta temeljnog tla na dinamičke karakteristike armiranobetonskih minareta, naročito u seizmičkim područjima.

Zahvala

Budući da je ovo istraživanje podržalo Sveučilište Ondokuz Mayıs (istraživački projekt br. 2011BŞV1134) u okviru Državnog projekta za planiranje infrastrukture iz 2011. godine koji nosi naziv "Središnji laboratorij za materijale i konstrukcije", autori izražavaju svoju zahvalnost na podršci.

LITERATURA

- [1] Fukuwa, N., Ghannad, M.A.: Soil-Structure Interaction Effect on the Eigenproperties of Structure, in: Elev. World Conf. Earthq. Eng., 949 (1996).
- [2] Taşkın, B., Özdemir, P., Özel, N.M.: Evaluation of Orta-Çankiri June 06, Earthquake, Paper no: AT-130 [in Turkish], in: Proceedings Fifth Natl. Conf. Earthq. Eng., Istanbul, Turkey, pp. 1-11, 2003.
- [3] Dogangün, A.: Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, Eng. Struct., 26 (2004), pp. 841-856. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.02.005>.
- [4] Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H.: Site Investigation and Engineering Evaluation of the Van Earthquakes of October 23rd - November 9th, 2011, Turkish Earthq. Found., 2013 (2012).
- [5] Dogangün, A., Sezen, H., Tuluk, O.İ., Livaoğlu, R., Acar, R.: Traditional Turkish Masonry Monumental Structures and their Earthquake Response, Int. J. Archit. Herit., 1 (2007) 251, <https://doi.org/10.1080/15583050701436980>.
- [6] Akçay, H., Türkay, S.: Identification of power spectra by reweighted and regularized nuclear norm minimization, Control Conf. (ASCC), 10th Asian. (2015). <https://doi.org/10.1109/ASCC.2015.7244396>

- [7] Lin, C.C., Wang, J.F., Ueng, J.M.: Vibration Control Identification of Seismically Excited m.d.o.f. Structure-PTMD Systems, *Journal of Sound and Vibration*, 240 (2001), pp. 87-115
- [8] Jacobsen, N.J., Andersen, P., Brincker, R.: Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, *Proc. ISMA2006 Int. Conf. Noise Vib. Eng.*, pp. 3129-3140, 2006.
- [9] Mack, D.R., Gardner-Morse, G.: Modal Identification of Cable-Stayed Pedestrian Bridge, *J. Struct. Eng.* 119 (1994), pp. 3384-3404.
- [10] Jar-Nan, J., Pappa, R.S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *J. Guid. Control. Dyn.*, 8 (1985), pp. 620-627.
- [11] Van Overschee, P., De Moor, B.: Subspace identification for linear system: Theory - implementation - applications, 1996, <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193>.
- [12] Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B.B., Türker, T., Can Altunişik, A.: Modal Testing, Finite-Element Model Updating, and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, *J. Perform. Constr. Facil.*, 23 (2009), pp. 81-89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2009\)23:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2009)23:2(81)).
- [13] Ivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P.: Finite element modelling and updating of a lively footbridge: The complete process, *J. Sound Vib.*, 301 (2007), pp. 126-145. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.09.024>.
- [14] Brownjohn, J.M.W.: Vibration characteristics of a suspension footbridge, *J. Sound Vib.*, 202 (1997), pp. 29-46. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0789>.
- [15] Brownjohn, 1992, Ambient vibration survey of Fatih Sultan Mehmet Bridges.pdf, (n.d.).
- [16] Siringoringo, D.M., Fujino, Y.: System identification of suspension bridge from ambient vibration response, *Eng. Struct.*, 30 (2008), pp. 462-477. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.004>.
- [17] Ben, J., Papán, D.: Dynamic Modeling and Testing of Cable - Stayed Pedestrian Bridge, *Proc. 14th Int. Modal Anal. Conf.*, 4 (2011), pp. 4-6.
- [18] Abdel-Gaffar, A.M., Scott, R.F., Craign, M.J.: Full scale experimental investigation of a modern earth dam, 1980.
- [19] Ventura, C.E., Lord, J.F., Simpson, R.D.: Effective use of ambient vibration measurements for modal updating of a 48 storey building in Vancouver, Canada, in: *Int. Conf., Structural Dyn. Model. Anal. Correl. Valid*, 2002.
- [20] Srinivas, V., Sasmal, S., Ramanjaneyulu, K., Jeyasehar, C.A.: Influence of test conditions on modal characteristics of reinforced concrete structures under different damage scenarios, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 13 (2013), pp. 491-505. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.04.006>.
- [21] Zdravkovic, S., Zlatkov, D., Mladenovic, B., Igic, T., Stojic, N.: A bearing structure and finished construction behaviour analysis based on the full-scale experimental research, *Facta Univ. - Ser. Archit. Civ. Eng.*, 8 (2010), pp. 119-127. <https://doi.org/10.2298/FUACE1001119Z>.
- [22] Ivanovic, S.S., Trifunac, M.D.: Ambient vibration surveys of full-scale structures using personal computers: examples for Kaprielian Hall BT, 1995.
- [23] Dooms, D., Degrande, G., De Roeck, G., Reynders, E.: Finite element modelling of a silo based on experimental modal analysis, *Eng. Struct.*, 28 (2006), pp. 532-542. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.008>.
- [24] Luz, E., Gurr-Beyer, C., Stöcklin, W.: Experimental investigation of natural frequencies and modes of the HDR nuclear power plant by means of microtremor excitation, in: *8th WCEE, San Fr.*, pp. 977, 1984.
- [25] Gentile, C., Saisi, A.: Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment, *Constr. Build. Mater.*, 21 (2007), pp. 1311-1321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007>.
- [26] Diaferio, M., Foti, D., Giannoccaro, N.I.: Ambient vibration testing and operational modal analysis of a historic tower, 1952.
- [27] Sezen, H., Acar, R., Dogangun, A., Livaoglu, R.: Dynamic analysis and seismic performance of reinforced concrete minarets, *Eng. Struct.*, 30 (2008), pp. 2253-2264. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.11.005>.
- [28] Yi, T.H., Li, H.N., Sun, H.M.: Multi-stage structural damage diagnosis method based on "energy-damage" theory, *Smart Struct. Syst.*, 12 (2013), pp. 345-361.
- [29] Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R.: Investigation of dynamic response of masonry minaret structures, *Bull. Earthq. Eng.*, 6 (2008), pp. 505-517. <https://doi.org/10.1007/s10518-008-9066-5>.
- [30] Yi, T.H., Li, H.N., Zhao, X.Y.: Noise smoothing for structural vibration test signals using an improved wavelet thresholding technique, *Sensors (Switzerland)*, 12 (2012), pp. 11205-11220. <https://doi.org/10.3390/s120811205>.
- [31] Modal of style concrete for identification, *Dynamic Testing of Civil Engineering Structures Series, Exp. Tech.*, pp. 65-75, 2009, <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2009.00400.x>.
- [32] Bayraktar, A., Sevim, B., Altunişik, A.C., Türker, T.: Earthquake analysis of reinforced concrete minarets using ambient vibration test results, *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 19 (2010), pp. 257-273. <https://doi.org/10.1002/tal.464>.
- [33] Türker, T.: Ambient vibration test of building base slab for different ground conditions, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 52 (2014), pp. 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.007>.
- [34] Stewart, J.P., Fennes, G.L.: System identification for evaluating soil-structure interaction effects in buildings from strong motion recordings, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 27 (1998), pp. 869-885. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199808\)27:8<869::AID-EQE762>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199808)27:8<869::AID-EQE762>3.0.CO;2-9).
- [35] Nist, Soil-Structure Interaction for Building Structures, GCR 12-917-21, prepared by the NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium for Universities for Research in Earthquake Engineering, for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2012.
- [36] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal identification from ambient response using frequency domain decomposition, *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, 1 (2000).
- [37] Gade, S., Møller, N.B., Herlufsen, H., Konstantin-Hansen, H., Anderson, P.: Frequency Domain Techniques for Operational Modal Analysis, *Proc. 1st IOMAC Conf.*, (2005) 11.
- [38] Bendat, J.S., Piersol, A.G.: *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley, New York, 1986.
- [39] Hermans, L., Der Aueveraer, V.: Modal testing and analysis of structures under operational conditions: Industrial applications., *Mech. Syst. Syetem Process.*, 13 (1999), pp. 193-216.
- [40] Peeters, B.: *System identification and damage detection in civil engineering*, KU Leuven, 2000.

- [41] Reynders, E., De Roeck, G.: Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis, *Mech. Syst. Signal Process.*, 22 (2008), pp. 617-637. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.09.004>.
- [42] Swanson Analysis System, SVS, ARTEMIS 1.5, (2011).
- [43] Yu, D.J., Ren, W.X.: EMD-based stochastic subspace identification of structures from operational vibration measurements, *Eng. Struct.*, 27 (2005), pp. 1741-1751. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.016>.
- [44] Pastor, M., Binda, M., Harčarik, T.: Modal assurance criterion, *Procedia Eng.*, 48 (2012), pp. 543-548. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>.
- [45] TS EN 206-1, Turkish Standard, Concrete - Specification, performance, production and Conformity, 2014.
- [46] Ventura, C.E., Lord, J.F., Simpson, R.D.: Effective Use of Ambient Vibration Measurements for Modal Updating of a 48 Storey Building in Vancouver, Canada, *Int. Conf. "Structural Dyn. Model. Anal. Correl. Valid.*, pp. 1-10, 2002.