BAKAR 51 (2026) 1 COPPER

UDK: 624.042.7:699.841(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2601061M
NAUČNI RAD
Oblast: Gradjevinstvo

Primljen: 16.09.2026.
Prerađen: 21.09.2026.
Prihvaćen: 22.09.2026.

PREGLED RAZLIČITIH METODA ANALIZE SEIZMIČKOG PONAŠANJA GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA

REVIEW OF DIFFERENT METHODS FOR ANALYZING THE SEISMIC BEHAVIOR OF BUILDING STRUCTURES

Nevena Marković[1a] , Sandra Guševac[1b], Jelena Đorđević[1c], Jelena Stefanović[1d]

[1]Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor, Srbija

[1a]Email:nevena.markovic@irmbor.co.rs, Orcid: https://orcid.org/0009-0005-1278-8805
[1b]Email:sandra.filipovic@irmbor.co.rs, Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6776-9899
[1c]Email:jelena.djordjevic@irmbor.co.rs, Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5406-0074
[1d]Email:jelena.stankovic@irmbor.co.rs, Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6418-1814

Izvod

Seizmička analiza predstavlja važan segment projektovanja građevinskih konstrukcija u cilju obezbeđenja njihove sigurnosti i odgovarajućeg ponašanja pri dejstvu zemljotresa. U radu je prikazan pregled metoda seizmičke analize u skladu sa zahtevima standarda EN 1998 (Evrokod 8). Razmatrane su četiri osnovne metode: linearna statička analiza primenom metode bočnih sila, linearna dinamička analiza primenom modalne analize i spektra odgovora, nelinearna statička (pushover) analiza i nelinearna dinamička analiza u vremenskom domenu. Za svaku metodu analizirani su osnovni principi proračuna, karakteristike, prednosti i ograničenja, kao i uslovi i mogućnosti primene u zavisnosti od složenosti, regularnosti i dinamičkih karakteristika konstrukcije. Na osnovu razmatranih karakteristika ukazan je značaj pravilnog izbora metode seizmičke analize u skladu sa zahtevima standarda i specifičnostima posmatrane konstrukcije.

Ključne reči: *seizmička analiza, građevinske konstrukcije, Evrokod 8, metoda bočnih sila, modalna analiza, pushover analiza, nelinearna dinamička analiza*

Abstract

Seismic analysis represents an important aspect of the design of building structures, aimed at ensuring their safety and adequate performance under earthquake loading. This paper presents an overview of seismic analysis methods in accordance with the requirements of EN 1998 (Eurocode 8). Four main methods are considered: linear static analysis using the equivalent lateral force procedure, linear dynamic analysis based on modal response spectrum analysis, nonlinear static (pushover) analysis, and nonlinear dynamic time-history analysis. For each method, the basic principles of analysis, main characteristics, advantages and limitations, as well as the conditions and possibilities of application depending on the complexity, regularity and dynamic characteristics of the structure, are discussed. Based on the considered characteristics, the im-

portance of selecting an appropriate seismic analysis method in accordance with the requirements of the standard and the specific characteristics of the structure is highlighted.

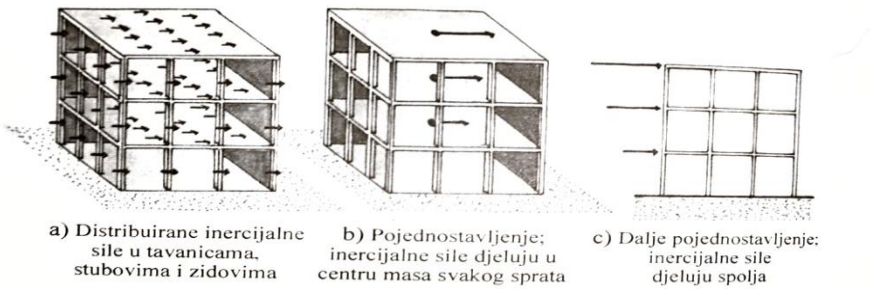
Keywords: *seismic analysis, building structures, Eurocode 8, equivalent lateral force procedure, modal analysis, pushover analysis, nonlinear dynamic analysis*

1. UVOD

Postupak seizmičke analize zasniva se na definisanju odgovarajućeg matematičkog modela konstrukcije, definisanju relevantnog seizmičkog dejstva i proračunu unutrašnjih sila, pomeranja i drugih merodavnih uticaja u konstruktivnim elementima [1,2].

Seizmička opterećenja predstavljaju jedan od najsloženijih vidova dinamičkog opterećenja kojem građevinske konstrukcije mogu biti izložene. Za razliku od statičkih opterećenja, zemljotres izaziva ubrzanja tla koja, usled mase konstrukcije, dovode do pojave inercijalnih sila. Njihovo dejstvo može izazvati značajne deformacije i oštećenja, a u nepovoljnim slučajevima i gubitak stabilnosti konstrukcije. Savremeni pristup projektovanju stoga ne podrazumeva potpuno sprečavanje oštećenja, već kontrolisano ponašanje konstrukcije kroz odgovarajuću duktilnost i disipaciju energije [2].

Seizmička analiza građevinskih konstrukcija definisana je zahtevima standarda EN 1998 (Evrokod 8), a izbor odgovarajućeg postupka analize zavisi od karakteristika konstrukcije, njene regularnosti, konstruktivnog sistema i potrebnog nivoa detaljnosti analize. Odgovor konstrukcije na seizmičko dejstvo zavisi od brojnih faktora, među kojima su materijal, geometrija, krutost i raspored konstruktivnih elemenata, kao i način prijema horizontalnih dejstava [2]. Tokom zemljotresa, konstrukcije su izložene horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima tla, koja izazivaju složena unutrašnja naprezanja i deformacije. Razumevanje odziva konstrukcije na ovakva opterećenja je ključno za obezbeđivanje njihove stabilnosti, sigurnosti i trajnosti.



Sl. 1. *Pojednostavljenje delovanja seizmičkih horizontalnih inercijalnih sila [3]*

U zavisnosti od karakteristika konstrukcije i zahtevanog nivoa analize, mogu se primeniti linearni ili nelinearni, kao i statički ili dinamički postupci.

Linearne metode predstavljaju jednostavniji pristup koji se često primenjuje u inženjerskoj praksi, dok nelinearne metode omogućavaju detaljniju procenu ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti, uključujući razvoj plastičnih mehanizama i promenu krutosti konstruktivnih elemenata [1].

2. KLASIFIKACIJA METODA SEIZMIČKE ANALIZE

U savremenom inženjerstvu razvijene su različite metode za analizu seizmičkog ponašanja građevinskih konstrukcija. Metode seizmičke analize mogu se klasifikovati prema načinu primene opterećenja na statičke i dinamičke, kao i prema načinu modeliranja ponašanja konstrukcije na linearne i nelinearne.

Najprihvaćenija podela metoda seizmičke analize jeste podela koja je data odredbom standarda EC8-1, 4.3.3 [1]:

I. Linearna statička analiza-*metoda bočnih sila/ekvivalentna statička analiza*
II. Linearna dinamička analiza-*modalna analiza sa sprekrima odgovora*
III. Nelinearna statička analiza-*pushover analiza*
IV. Nelinearna dinamička analiza-*nonlinear time-history analysis*

Svaka od navedenih metoda ima prednosti i ograničenja, a njihov izbor zavisi od složenosti i tipa konstrukcije, raspoloživih dostupnih podataka, kao i cilja analize.

3. LINEARNE METODE SEIZMIČKE ANALIZE

Linearna statička metoda bočnih sila i linearna dinamička modalna analiza sa spektrima odgovora predstavljaju standardne postupke za seizmičku analizu građevinskih konstrukcija [4]. Metoda bočnih sila koristi osnovni ton oscilovanja, dok modalna analiza obuhvata više tonova i time omogućava detaljnije sagledavanje dinamičkog ponašanja konstrukcije. Za razliku od modalne analize, metoda bočnih sila daje rezultate sa jasno definisanim predznakom uticaja [1].

Primena linearnih metoda ne znači da se očekuje potpuno elastično ponašanje konstrukcije. Nelinearno ponašanje se indirektno uzima u obzir primenom faktora ponašanja q u projektnom spektru. Na taj način se složenost nelinearne analize zamenjuje pojednostavljenim linearnim proračunom, koji je pogodan za uobičajeno projektovanje konstrukcija [1,2].

Linearne metode mogu se primeniti na ravanskim modelima za dva horizontalna pravca ukoliko su ispunjeni odgovarajući uslovi regularnosti i krutosti konstrukcije. U suprotnom, primena prostornih modela omogućava potpunije sagledavanje prostornog ponašanja konstrukcije i efekata torzije, koji mogu biti nedovoljno obuhvaćeni ravanskim modelima [1].

3.1. Linearna statička metoda-metoda bočne sile

Kao što i sam naziv kaže, ova metoda seizmičke inercijalne horizontalne sile, dinamičkog karaktera, zamenjuje ekvivalentnim statičkim horizontalnim silama. Glavni preduslov za ovu metodu jeste da konstrukcije dominantno osciluje u prvom tonu oscilovanja u oba glavna pravca. Međutim, kod konstrukcija kod kojih uticaj imaju i viši tonovi oscilovanja statičkim silama se ne mogu tačno predstaviti dinamičke sile [1].



Sl. 2. *Algoritam proračuna linearnom statičkom metodom*

U EC8-1, 4.3.3.2.2(3) nalaze se empirijske formule za proračunavanje prvog tona oscilovanja konstrukcije [1,5,6]:

$T_1 = 0{,}075H^{\frac{3}{4}}$ - zgrade sa AB prostornom ravanskom konstrukcijom [5].

$T_1 = 0{,}05H^{\frac{3}{4}}$ - za svaki drugi konstruktivni sistem [5].

Seizmička sila u osnovi se dobija na osnovu sledeće jednačine koja je data u EC8-1, 4.3.3.2.2(1) [1,5,6]:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \tag{1}$$

gde je: $S_d(T_1)$-ordinata projektnog spektra ubrzanja, m-ukupna masa zgrade, λ-korekcioni faktor.

Ukupna seizmička sila, koja se raspoređuje po visini u nivoima spratova konstrukcije, određuje se prema izrazu koji je dat u EC8-1, 4.3.3.2.3(2) [1,5,6]:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum_j s_i \cdot m_i} \tag{2}$$

gde je F_i-horizontalna sila koja deluje na spratu, F_b-ukupna seizmička sila, s_i, s_j-pomeranje masa m_i i m_j u osnovnom obliku oscilovanja, m_i i m_j-spratne mase.

3.2. Linearna dinamička analiza-modalna analiza sa spektrima odgovora

Modalna analiza sa spektrom odgovora predstavlja opštu metodu linearne dinamičke analize i može se primeniti i na konstrukcije koje ne ispunjavaju uslove za primenu metode bočnih sila. Kod zgrada koje su regularne u osnovi, ali neregularne po visini, mogu se koristiti ravanski modeli, dok se za konstrukcije neregularne i u osnovi i po visini zahtevaju prostorni modeli [1].

U okviru modalne analize se prvenstveno određuju sopstvene vibracije, a zatim se za svaki ton dobijaju sopstvene kružne frekvencije ω_i, sopstveni oblici oscilovanja **Y**, faktori participacije Γ_i i efektivna modalna masa M_i^{ef}, dok se spratne seizmičke sile se mogu izračunati uz pomoć matrice masa [1]:

$$F_i = KU_i = M\omega_i^2 U_i = MS_d(T_1)\,\Gamma_i \mathbf{Y} \qquad (3)$$

Modalna analiza ima jednu specifičnost koja je veoma pogodna za proračun. Naime, u proračunu se ne moraju uzimati u obzir svi tonovi oscilovanja, već samo oni koji imaju uticaj na globalni odgovor sistema [1]. U EC8-1, 4.3.3.3.1(3) jasno je definisano da pri izboru broja tonova koji se uzimaju u proračun mora da se zadovolji sledeće [1]:

- U modalnu analizu potrebno je uključiti dovoljan broj tonova tako da zbir njihovih efektivnih modalnih masa obuhvati više od 90% ukupne mase konstrukcije [6];
- Takođe, u proračun je potrebno uključiti sve tonove čiji doprinos efektivnoj modalnoj masi iznosi najmanje 5% ukupne mase konstrukcije [6].

Pritom, kod prostornog modela, obavezna je provera za svaki relevantni pravac [1,5,6].

U slučaju da se prethodna dva zahteva ne mogu zadovoljiliti, minimalan broj tonova koji se uzima u obzir u prostornoj analizi prema EC8 treba da ispuni sledeća dva uslova [1,5,6]:

- $k = 3 \cdot \sqrt{n}$;
- $T_k \leq 0{,}20s$

gde je k-broj tonova koji se uzimaju u obzir, n-broj spratova iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma,T_k-period oscilovanja za ton k.

4. NELINEARNE METODE SEIZMIČKE ANALIZE

Nelinearna analiza predstavlja napredni postupak kojim se realno modelira ponašanje konstrukcije u neelastičnoj oblasti, uzimajući u obzir plastifikaciju, degradaciju krutosti i progresivno oštećenje elemenata [7,8].

Osnovni izvor nelinearnosti u konstrukcijama su materijalna i geometrijska nelinearnost [9]. Materijalna nelinearnost potiče od nelinearnog odnosa napona i

deformacija, uz pojavu plastifikacije i oštećenja materijala, dok geometrijska nelinearnost nastaje usled velikih pomeranja i rotacija koje utiču na unutrašnje sile i stabilnost celokupnog sistema [10]. Ovakvi efekti su najizraženiji kod konstrukcija koje su izložene dinamičkim i cikličnim opterećenjima, gde dolazi do značajnih promena krutosti tokom vremena [10].

Primena nelinearne analize omogućava detaljno praćenje razvoja oštećenja u konstrukciji, uključujući formiranje i plastičnih zglobova, pojavu pukotina i promenu unutrašnjih sila, čime se dobija realnija procena nosivosti i mehanizma loma konstrukcije [11].

U okviru nelinearnih metoda posebno se izdvajaju nelinearna statička i nelinearna dinamička analiza [7]. Nelinearna statička analiza omogućava procenu globalnog kapaciteta konstrukcije kroz odnos sila i pomeranja, dok nelinearna dinamička analiza uzima u obzir vremensku promenljivost opterećenja i omogućava detaljno praćenje odziva konstrukcije tokom trajanja dejstva [8].

Savremena istraživanja pokazuju da nelinearna analiza ima ključnu ulogu u razvoju pouzdanijih numeričkih modela i metoda projektovanja, uključujući primenu naprednih simulacija u programima zasnovanih na konačnim elementima [7]. Ovakvi pristupi omogućavaju efikasnije i preciznije analize složenijih konstrukcija, uz smanjenje rizika od neočekivanih kolapsa i povećane sigurnosti [8].

4.1. Statička nelinearna (pushover) analiza

Jedna od najčešće primenjivanih nelinearnih metoda jeste statička nelinearna analiza, odnosno *pushover* analiza. Ona predstavlja pojednostavljeni nelinearni postupak za procenu odgovora konstrukcije pri seizmičkom dejstvu. U odnosu na linearne metode omogućava detaljniji uvid u razvoj nelinearnog ponašanja, identifikaciju kritičnih preseka i oblasti u kojima se očekuju veće neelastične deformacije, kao i procenu globalnog ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti [1].

Pushover analiza se zasniva na postepenom povećavanju horizontalnog opterećenja nelinearnog matematičkog modela sve do dostizanja ciljanog pomeranja koje predstavlja procenjeno maksimalno pomeranje karakteristične tačke konstrukcije pri dejstvu projektovanog zemljotresa. Opterećenje se povećava inkrementalno, pri čemu se prati promena krutosti i nosivosti elemenata usled razvoja nelinearnog ponašanja. Radi obuhvatanja mogućih promena raspodele seizmičkog opterećenja po visini konstrukcije, preporučuje se analiza najmanje dve vertikalne raspodele bočnog opterećenja [1].

Rezultat analize prikazuje se krivom kapaciteta, odnosno *pushover* krivom, koja predstavlja odnos ukupne horizontalne sile i pomeranja karakteristične tačke konstrukcije. Na osnovu nje može se sagledati razvoj nelinearnog ponašanja i kapacitet konstrukcije, dok se veličine odgovora pri ciljanom pomeranju mogu uporediti sa graničnim kriterijumima radi procene ponašanja konstrukcije [1].

Metoda se može primeniti na 2D i 3D modele, pri čemu je kod trodimenzionalnih modela potrebno uzeti u obzir moguće torzione efekte i raspodelu krutosti i nosivosti u oba ortogonalna pravca [1].

4.2. Nelinearna dimanička analiza

Nelinearna dinamička analiza predstavlja jednu od najdetaljnijih, ali i najsloženijih metoda za određivanje seizmičkog odgovora konstrukcije. Zasniva se na rešavanju jednačine kretanja sistema sa više stepeni slobode, pri čemu se nelinearno ponašanje elemenata uzima u obzir kroz promenu njihove krutosti tokom vremena [1,2].

Za sprovođenje analize neophodni su odgovarajući akcelerogrami, odnosno zapisi zemljotresa prilagođeni seizmičkim karakteristikama lokacije. Mogu se koristiti prirodni zapisi, skalirani prema projektnoj seizmičnosti, ili veštački generisani akcelerogrami. Izabrani zapisi moraju biti kompatibilni sa projektnim spektrom odgovora [5,6].

Zbog zahtevnog modeliranja nelinearnog ponašanja i potrebe za odgovarajućim seizmičkim zapisima, nelinearna dinamička analiza se najčešće primenjuje za detaljnu procenu seizmičkog ponašanja i sigurnosti konstrukcija, naročito kod složenijih sistema i postojećih objekata [1].

5. UPOREDNA ANALIZA METODA

Uporedna analiza metoda seizmičke analize prikazana je u tabeli 1.

Tabela 1. Uporedna analiza metoda seizmičke analize

Metoda	Prednosti	Nedostaci	Primena
Linearna statička-metoda bočne sile	Brza, jednostavna, daje predznak sile	Preciznost za složene objekte niska	Jednostavne, regularne konstrukcije
Linearna dinamička-modalna analiza	Uključuje više tonova, primenljiva na sve tipove konstrukcija	Rezultati bez predznaka, ne uzima nelinearnost u obzir	Uobičajene konstrukcije srednje složenosti, neregularne konstrukcije
Nelinearna statička-pushover	Identifikacija kritičnih mesta, analiza nelinearnog ponašanja	Manje precizna od nelinearne dinamičke	Konstrukcije gde se traži nelinearni odgovor
Nelinearna dinamička	Najpreciznija, vremenski zavisna, uzima u obzir sve nelinearnosti	Složena, zahtevna za podatke i računare	Naučno-istraživačke analize, složeni ili već izgrađeni objekti

6. ZAKLJUČAK

Seizmička analiza predstavlja važan deo projektovanja građevinskih konstrukcija u cilju obezbeđenja odgovarajućeg nivoa sigurnosti i kontrolisanog ponašanja pri dejstvu zemljotresa. U radu su prikazane i međusobno upoređene četiri osnovne metode seizmičke analize definisane u okviru Evrokoda 8: linearna statička analiza primenom metode bočnih sila, linearna dinamička modalna analiza sa spektrom odgovora, nelinearna statička (*pushover*) analiza i nelinearna dinamička analiza u vremenskom domenu.

Analizom karakteristika navedenih metoda može se zaključiti da njihov izbor zavisi od složenosti, regularnosti i dinamičkih karakteristika konstrukcije, kao i od cilja i potrebnog nivoa detaljnosti analize. Linearne metode predstavljaju jednostavnije i praktičnije postupke koji su pogodni za veliki broj uobičajenih konstrukcija, pri čemu se efekti nelinearnog ponašanja indirektno uzimaju u obzir primenom faktora ponašanja q. Modalna analiza, u odnosu na metodu bočnih sila, omogućava detaljnije sagledavanje dinamičkog ponašanja konstrukcije kroz uključivanje više tonova oscilovanja.

Nelinearne metode omogućavaju realističnije sagledavanje ponašanja konstrukcije u neelastičnoj oblasti. *Pushover* analiza pruža mogućnost procene kapaciteta konstrukcije i identifikacije potencijalnih kritičnih područja, dok nelinearna dinamička analiza omogućava detaljno praćenje odziva konstrukcije u vremenu i predstavlja složeniji postupak koji zahteva odgovarajuće nelinearne modele i seizmičke zapise.

Na osnovu prikazanog pregleda može se zaključiti da ne postoji jedinstvena metoda koja je odgovarajuća za sve vrste konstrukcija. Izbor postupka analize treba izvršiti u skladu sa zahtevima standarda, karakteristikama konstrukcije, raspoloživim ulaznim podacima i potrebnim nivoom pouzdanosti rezultata. Pravilnim izborom i primenom metode moguće je adekvatnije proceniti seizmički odgovor konstrukcije i obezbediti racionalnije i sigurnije projektovanje.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2026. godini, br. 451-03-33/2026-03/200052.

LITERATURA

[1] Janković, S. (2022). *Seizmički proračun armirano-betonskih zgrada u skladu sa Evrokodovima*. Podgorica: P FRAME Project.

[2] Čaušević, M. (2022). *Dinamika konstrukcija – potresno inženjerstvo, aerodinamika, konstrukcijske norme*. Podgorica: FRAME Project.

[3] Janković, S. (2014). *Osnove seizmičkog planiranja i projektovanja za inženjere arhitekture i građevine*. Beograd: AGM knjiga; Podgorica: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore.

[4] Lagomarsino, S., Marino, S. & Cattari, S. (2020). Linear static procedures for the seismic assessment of masonry buildings: Open issues in the new generation of European codes. *Structures, 26*, 427–440. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.003.

[5] European Committee for Standardization (2004). *EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.

[6] Institut za standardizaciju Srbije (2015). *SRPS EN 1998-1:2015. Evrokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade*. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

[7] Ćemalović, M. (2023). *Earthquake response of bridges supported by vertical and batter piles accounting for nonlinear soil-structure interaction.* Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Structural Engineering.

[8] Giusto, S., Cattari, S. & Lagomarsino, S. (2024). Investigating the reliability of nonlinear static procedures for the seismic assessment of existing masonry buildings. *Structural Design and Analysis for Constructions and Buildings, 14*(3), 1130. https://doi.org/10.3390/app14031130

[9] Mohammad, S., Baharuddin Abd Rahman, A., Siang Tan, C. & Huei, Y. (2020). Analytical model of nonlinear semi-rigid frames using finite elements. *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research, 3*(4), 22–27. https://doi.org/10.30564/jaeser.v3i4.2593

[10] Khaniki, H. B., Ghayesh, M. H., Chin, R. & Amabili, M. (2022). A review on the nonlinear dynamics of hyperelastic structures. *Nonlinear Dynamics, 110 (2)*, 963–994.

https://doi.org/10.1007/s11071-022-07700-3?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

[11] Naqash, M. T. & Farooq, Q. U. (2018). Performance of rigid steel frames under adequate soil conditions using seismic code provisions. *Open Journal of Civil Engineering, 8 (02),* 91–101. https://doi.org/10.4236/ojce.2018.82008