

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.8>

Mehanizmi otkazivanja zidova izvan ravnine – pregled normi i primjena na građevine kulturne baštine

Out-of-plane failure mechanisms – normative framework and application to cultural heritage buildings

Katarina Jajčević¹, Marija Demšić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, katarina.jajcevic@grad.unizg.hr,
marija.demsic@grad.unizg.hr

Sažetak

Kod analize povijesnih građevina u Hrvatskoj, koje su uglavnom izvedene kao nearmirano zide, posebno je važno najprije provjeriti moguće lokalne mehanizme otkazivanja, prije nego što se pristupi procjeni globalnog odziva konstrukcije. Budući da u trenutno primjenjivim normama u Hrvatskoj, uključujući Eurokod 1998-3, nisu definirana pravila za analizu mehanizama otkazivanja izvan ravnine, najpraktičniju nit vodilju za njihovu provjeru pružaju talijanske norme NTC 2008 (Norme tecniche per le costruzioni) i njihova novija inačica NTC 2018. U ovom radu daje se pregled postojećih normi te se razmatraju buduće smjernice kroz novu generaciju Eurokoda 1998-3. Osim toga, obrađuje se primjena smjernica za ocjenu i smanjenje seizmičkog rizika kulturne baštine s osvrtom na NTC 2008, osobito za crkve.

Ključne riječi: mehanizmi otkazivanja izvan ravnine, kulturna baština, nearmirano zide, potresna oštetljivost

Abstract

In the analysis of historical buildings in Croatia, which are predominantly unreinforced masonry structures, it is particularly important to first assess the potential out-of-plane failure mechanisms before evaluating the global structural response. Since the currently applicable standards in Croatia, including the Eurocode 1998-3, do not define rules for the analysis of out-of-plane failure mechanisms, the most practical approach for their assessment is provided by the Italian standards NTC 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) and their more recent version, NTC 2018. This paper presents an overview of existing regulations and considers future guidelines introduced by the new generation of Eurocode 1998-3. In addition, it addresses the application of guidelines for the assessment and reduction of seismic risk to cultural heritage, with reference to NTC 2008, especially in the context of churches.

Keywords: out-of-plane failure mechanisms, cultural heritage, unreinforced masonry, seismic vulnerability

1. Uvod

Nakon dva razorna potresa koja su pogodila Hrvatsku 2020. godine, pregledane su 422 građevine koje nose status nepokretnih kulturnih dobara. Od tog broja, 28% pretrpjelo je teška oštećenja nosivih elemenata, a najveći udio odnosi se na sakralne građevine, poput crkava i kapela [1]. Talijanska direktiva [2] koja se veže na NTC [3] te se odnosi na kulturnu baštinu, sastavljena je s ciljem definiranja postupka stjecanja znanja, procjene razine seizmičke sigurnosti te projektiranja mogućih intervencija u skladu sa zahtjevima i specifičnostima građevina kulturne baštine. Prema toj direktivi [2], procjena seizmičke sigurnosti provodi se na tri razine (*Livelli di valutazione della sicurezza sismica*):

- **LV1:** Kvalitativna analiza i procjena pomoću pojednostavljenih mehaničkih modela
- **LV2:** Procjena pojedinih makroelemenata (kinematička granična analiza lokalnih mehanizama sloma)
- **LV3:** Procjena globalnog seizmičkog odziva građevine

Metodologija se razlikuje ovisno o razini i tipologiji građevine kulturne baštine, pri čemu svaka zahtijeva poseban pristup, koristeći neku od globalnih proračunskih metoda. Razina LV1 predstavlja kvalitativnu metodu koja se temelji na vizualnoj procjeni, dok analiza lokalnih mehanizama otkazivanja odgovara razini LV2. Razina LV3 primjenjuje se kada je potrebna detaljna procjena seizmičke sigurnosti građevine, neovisno o tome planiraju li se intervencijske mjere ili ne.

2. Razrada metodologija

2.1. Razrada metode LV1 za crkve prema smjernicama za ocjenu i smanjenje rizika kulturne baštine s osvrtom na NTC

Razinom LV1 za crkve, mjesta molitve i druge građevine s velikim dvoranama, bez međukatnih konstrukcija [2] potresna oštetljivost određuje se indeksom ranjivosti i_v čija vrijednost varira između 0 i 1. Taj se indeks definira kao ponderirani prosjek ponašanja različitih dijelova građevine prema formuli (1):

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (1)$$

Ova metodologija obuhvaća 28 mehanizama oštećenja navedenih u direktivi [2], povezanih s makroelementima karakterističnima za crkve. Ukoliko neki makroelement nije prisutan u promatranoj građevini, dodjeljuje mu se težinski faktor $\rho_k = 0$. U ostalim slučajevima taj faktor ima vrijednost između 0,5 i 1. Svaki k -ti mehanizam (od ukupno 28) ima pridružene dvije vrijednosti: pokazatelj ranjivosti v_{ki} i pokazatelj konstrukcijskih mjera kojima se smanjuje mogućnost aktivacije tog tipa mehanizma v_{kp} . Nadalje, ovom se metodologijom definira i indeks štete i_d (2), također unutar granica od 0 do 1, koji se računa kao normalizirani prosjek lokalnih oštećenja s obzirom na razinu pretrpljene štete d_k za svaki k -ti mehanizam:

$$i_d = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} \quad (2)$$

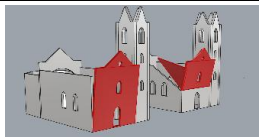
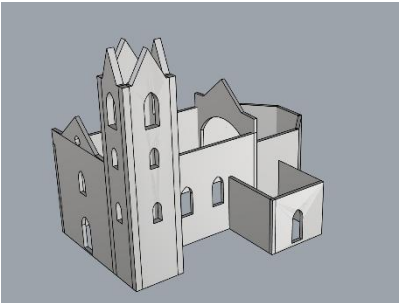
Odgovarajućom korelacijom omogućen je izračun vrijednosti akceleracije tla koja odgovara stanju ograničenog oštećenja (*Stato Limite di Danno* – SLD) (3) te stanju znatnog oštećenja (*Stato Limite di salvaguardia della Vita* – SLV) (4):

$$a_{SLD}S = 0,025 \cdot 1,8^{2,75-3,44i_v} \quad (3)$$

$$a_{SLV}S = 0,025 \cdot 1,8^{5,1-3,44i_v} \quad (4)$$

U Tablici 1 prikazan je postupak određivanja vrijednosti pokazatelja ranjivosti v_{ki} i pokazatelja učinkovitosti konstrukcijskih mjera koje smanjuju mogućnost aktivacije pripadajućeg tipa mehanizma v_{kp} , za jedan od 28 definiranih mehanizama. Također su prikazani volumni model analizirane crkve, konačna vrijednost indeksa ranjivosti te vrijednosti ubrzanja tla za odgovarajuća granična stanja.

Tablica 1. Primjer proračuna na razini LV1

Mehanizam	ρ_k	v_{ki}	v_{kp}	$\rho_k(v_{ki} - v_{kp})$	Slika
Prevrtanje pročelja	1	1	0	1	
				$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} = 0,6$ $a_{SLD}S = 0,025 \cdot 1,8^{2,75-3,44i_v} = 0,03742 [g]$ $a_{SLV}S = 0,025 \cdot 1,8^{5,10-3,44i_v} = 0,14890 [g]$	

2.2. Razrada metode LV2 sukladno NTC-u [1]

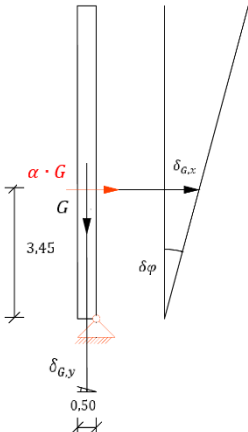
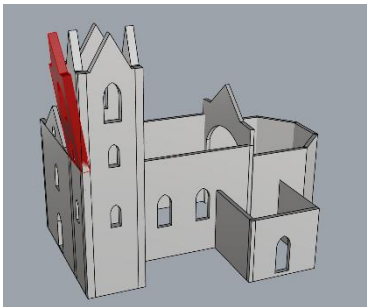
2.2.1. Linearna kinematička analiza

U sklopu linearne analize određuje se faktor aktivacije lokalnog mehanizma α_0 . Provjera nosivosti za zadano granično stanje provodi se usporedbom spektralne akceleracije ili poprečne sile s pripadajućim proračunskim zahtjevom. Faktor aktivacije određuje se primjenom principa virtualnog rada u terminima pomaka, i to pomoću jednadžbe (5) koja izjednačava vanjske i unutarnje sile za virtualni pomak sustava:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{j=1}^n P_j \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (5)$$

U ovoj jednadžbi, n predstavlja broj sila težine P_i koje djeluju na blokove mehanizma, dok m predstavlja broj sila težine P_j koje ne djeluju izravno na blokove, ali njihova masa generira horizontalne inercijalne sile na blokove jer se ne mogu učinkovito prenijeti na druge nosive elemente. Broj vanjskih sila F_h koje djeluju na blokove, ali nisu povezane s masama, predstavljen je vrijednošću o . U konačnici, virtualni rad unutarnjih sila zadan je kao L_{fi} . U horizontalnom pravcu predstavljeni su pripadni virtualni pomaci $\delta_{x,i}$ za i -to opterećenje P_i te $\delta_{x,j}$ za j -to opterećenje P_j , pri čemu se pozitivnim smatra smjer koji odgovara pravcu djelovanja potresne sile koja aktivira mehanizam. Pripadni virtualni pomak $\delta_{y,i}$ predstavlja vertikalni virtualni pomak i -tog opterećenja P_i , koji se smatra pozitivnim ako je usmjeren prema gore. U Tablici 3 prikazan je ručni proračun faktora aktivacije α_0 za jedan od mogućih lokalnih mehanizama na modelu crkve iz primjera za razinu potresne opasnosti LV1. Proračun je proveden uzimajući u obzir samo vlastitu težinu mehanizma, dok su dodatna opterećenja, trenje, drobljenje ziđa te ostali povoljni i nepovoljni učinci zanemareni.

Tablica 2. Primjer proračuna faktora aktivacije α_0

Volumen mehanizma [m³]	Težište mehanizma [m]	Zapreminska težina [kN/m³]	Vlastita težina [kN]	Debljina zida [m]
9,16	3,45	18	164,88	0,5
				$\delta_{G,x} = 3,45\delta\varphi$ $\delta_{G,y} = 0,25\delta\varphi$
$\sum \delta W = 0$ $\alpha_0 \cdot G \cdot 3,45 \cdot \delta\varphi - G \cdot 0,25 \cdot \delta\varphi = 0$ $\alpha_0 = 0,072$				

Nadalje se određuje proračunska modalna masa M^* te faktor udjela proračunske modalne mase e^* prema izrazu (6).

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{P_{x,i}})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{P_{x,i}}^2} \rightarrow e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} \quad (6)$$

Spektralno ubrzanje a_0^* pripadnog ekvivalentnog sustava dobije se prema izrazu (7):

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} \quad (7)$$

Faktor pouzdanosti FC koristi se za smanjenje spektralnog ubrzanja koji uzima u obzir nepouzdanost modela. Ako je razina znanja LC1 (*Ograničeno znanje – pretpostavka krutih blokova*), faktor FC iznosi 1,35 te se ta vrijednost najčešće primjenjuje. Ukoliko su

primjenjive više razine znanja LC2 (*Dovoljno znanje*) ili LC3 (*Precizno znanje*), faktor FC može se smanjiti na vrijednost 1,20 za LC2, a 1,00 za LC3. Sada kada imamo vrijednost spektralnog ubrzanja α_0^* , možemo je vrednovati u odnosu na određeno granično stanje. Međutim, ako umjesto spektralnog ubrzanja želimo vrednovati silu, to je moguće uz malu preinaku formule prema izrazu (8):

$$M^* \alpha_0^* = F^* = M^* \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{FC} \quad (8)$$

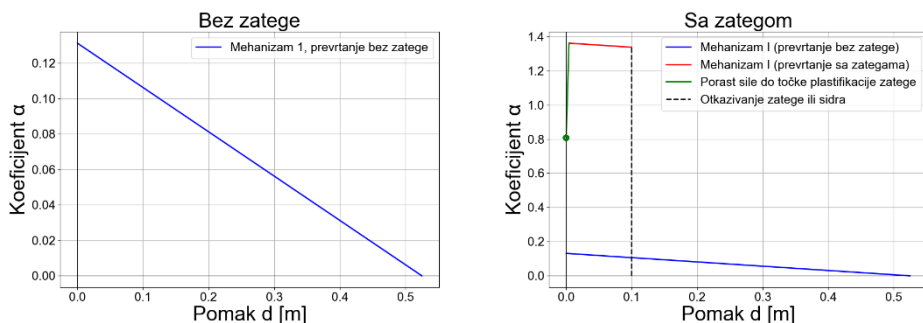
Granične vrijednosti spektralnog ubrzanja definirani su s obzirom na pojedino granično stanje u normi NTC [3].

2.2.2. Nelinearna kinematička analiza

Faktor aktivacije α_0 odgovara kritičnoj vrijednosti za aktivaciju kinematičkog lanca. Ako dalje promatramo razvoj tog faktora kroz pomake mehanizma opisanog pomakom kontrolne točke d_k , prelazimo u područje nelinearne kinematičke analize. Analiza se provodi sve do konfiguracije u kojoj se α_0 poništava, odnosno do krajnjeg pomaka $d_{k,0}$. Razvoj vrijednosti faktora α može se odrediti primjenom linearne kinematičke analizu uz kontinuiranu promjenu geometrije sustava. Međutim, ako se djelovanja na blokove tijekom razvoja kinematičkog lanca održavaju konstantnima, krivulja razvoja faktora α poprima gotovo linearan oblik te se može odrediti izrazom (9):

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{d_k}{d_{k,0}} \right) \quad (9)$$

Ukoliko tijekom razvoja kinematičkog lanca dolazi do postupne promjene vanjskih sila – primjerice produljenja zatege ili smanjenja stupnja zazidanosti između dvaju zidova – krivulja se može smatrati linearnom po dijelovima. U tom se slučaju procjenjuje prema pomacima pri kojima se javljaju znatne promjene, poput tečenja ili pucanja zatege, naglog gubitka zazidanosti između zidova i slično, prema pristupu prikazanom na Slici 1 i opisanom u [4].



Slika 1. Kvalitativni prikaz nelinearnih krivulja kapaciteta mehanizma s jednim blokom bez zatege (lijevo) te sa zategom (desno)

Nakon što je poznata promjena koeficijenta α , može se definirati krivulja kapaciteta ekvivalentnog oscilatora kao odnos između ubrzanja α^* i pomaka d^* . Potrebna je masa M^* , koja sudjeluje u kretanju sustava, a može se procijeniti iz virtualnih pomaka točaka na kojima su primjenjene težine, promatrajući ih kao pripadni oblik gibanja. Zatim se spektralno

ubrzanje a^* dobije pomoću koeficijenta α te udjela mase M^* koji sudjeluje u kinematičkom lancu. Taj proces prikazan je izrazom (10).

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} \rightarrow a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} \rightarrow a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*}\right) \quad (10)$$

Spektralni pomak d^* ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode računa se kao srednji pomak različitih točaka na koje su primjenjene sile P_i , pri čemu se za svaku točku uzima u obzir veličina sile P_i . Poznavajući pomak kontrolne točke d_k , moguće je definirati d^* prema izrazu (11) s obzirom na virtualne pomake procijenjene u početnoj konfiguraciji.

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}} \quad (11)$$

Sukladno određenim graničnim vrijednostima za spektralno ubrzanje u normi [3] za linearnu kinematičku analizu, definirane su i granične vrijednosti spektralnog pomaka s obzirom na promatrana granična stanja za nelinearnu kinematičku analizu.

3. Zaključak

Zbog učestalih razornih potresa i bogate kulturne baštine, u Italiji se razvio snažan interes za proučavanje ponašanja zidanih zgrada tijekom potresa, što je ujedno i jedan od razloga zašto Italija prednjači u području potresnog inženjerstva u Europi. Talijanske su norme među prvima definirale postupak provjere lokalnih mehanizama otkazivanja, prije nego što će takav pristup postati dio europskih smjernica. Ipak, nova generacija Eurokoda 1998-3 donijet će smjernice za takve proračune, u temeljima vrlo slične talijanskom pristupu, ali uz izmjenju parcijalnih sigurnosnih faktora te proračun koji se temelji na sili umjesto na ubrzanju. U svakom slučaju, ključno je da inženjerska struka prepozna važnost ovakvog proračuna, jer lokalni mehanizmi otkazivanja, osim što su česta pojava pri jakim potresima kod postojećih građevina od nearmiranog ziđa, predstavljaju izravnu prijetnju ljudskom životu — što im daje dodatnu težinu i opravdava potrebu za pažljivom analizom i jasnim normativnim okvirom.

Literatura

- [1] Croatia December 2020 Earthquake - Rapid Damage and Needs Assessment. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.36346.21443.
- [2] Segretariato Generale. Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle Norme tecniche per le costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008). Circolare n. 26/2010. Rim; 2010.
- [3] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. NTC, Istruzioni per l'applicazione della Nuove norme tecniche per le costruzioni, Rim; 2008.
- [4] Demšić M., Uroš M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Baniček M.: Otkazivanje zidova izvan ravnine, Potresno inženjerstvo, obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, (193–206) U: J. Atalić, M. Todorić, M. Uroš, M. Šavor Novak, M. Crnogorac, S. Lakušić (ur.), 2021.