OBNOVA GRADA ZAGREBA NAKON POTRESA

Ciklus predavanja: Znanjem za Zagreb (i Hrvatsku) - Zagrebu od Rijeke

Primjena nelinearnog statičkog proračuna u seizmičkoj analizi postojećih konstrukcija

dr. sc. Saša Mitrović, dipl. ing. građ.

i.t.t. d.o.o., M. Albaharija 10a, Rijeka

Sadržaj

- Uvod
- Metode proračuna seizmičke otpornosti konstrukcija
- Pristup s faktorom ponašanja
- Nelinearna statička metoda (*pushover* analiza)
- Zaključak

UVOD

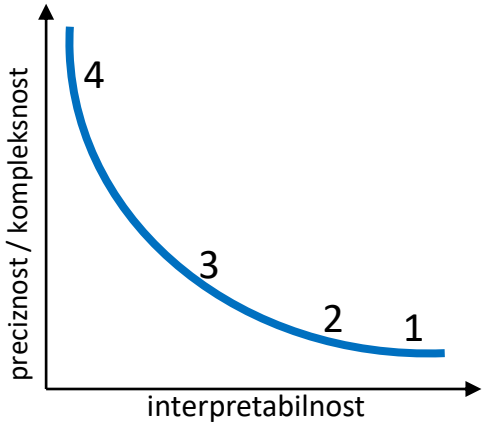
- EC 1998 daje inženjerima na raspolaganje različite metode za proračun seizmičke otpornosti konstrukcija. Predviđene metode imaju komparativne prednosti i nedostatke, ali i svoja ograničenja u primjeni.
- Potrebno je napraviti distinkciju u proračunskom pristupu **novim** i **postojećim konstrukcijama** (ciljevi proračuna, pouzdanost ulaznih parametara, poznavanje mehanizama otkazivanja, itd.)
- Nelinearni proračuni nisu uvijek nužni, ali u određenim slučajevima daje novu dimenziju seizmičkoj analizi. Za njihovu uporabu treba bitno veće znanje i angažman od inženjera u odnosu na linearne proračune, ali danas postoji više komercijalnih programskih paketa koji omogućuju provedbu nelinearnih proračuna sukladno važećim normama na pristupačan način.
- Prateće predavanje *Primjeri rekonstrukcije i prenamjene zaštićenih povijesnih zgrada u Rijeci* koncentrira se na praktične primjere.

Sve slike i fotografije od autora osim gdje drukčije navedeno.

METODE PRORAČUNA

Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

	Metode proračuna		EN 1998-1
1.	Linearni statički	Metoda proračuna bočnih sila	[4.3.3.2]
2.	Linearni dinamički	Modalni proračun primjenom spektra odziva	[4.3.3.3]
3.	Nelinearni statički	Postupno guranje (*pushover*)	[4.3.3.4.2 i Dodatak B]
4.	Nelinearni dinamički	Nelin. proračun primjenom vremenskog zapisa (*time-history*)	[4.3.3.4.3]

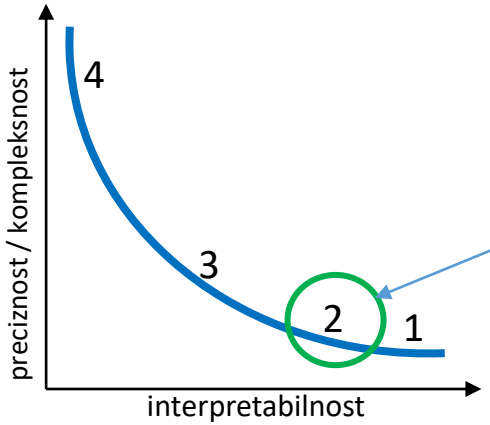


	preciznost	kompleksnost	interpretabilnost
1	prihvatljiva	mala	jako dobra
2	dobra	prihvatljiva	dobra
3	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4	jako dobra	jako velika	jako slaba

METODE PRORAČUNA

Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

	Metode proračuna		EN 1998-1
1.	Linearni statički	Metoda proračuna bočnih sila	[4.3.3.2]
2.	Linearni dinamički	Modalni proračun primjenom spektra odziva	[4.3.3.3]
3.	Nelinearni statički	Postupno guranje (*pushover*)	[4.3.3.4.2 i Dodatak B]
4.	Nelinearni dinamički	Nelin. proračun primjenom vremenskog zapisa (*time-history*)	[4.3.3.4.3]



NOVE ZGRADE

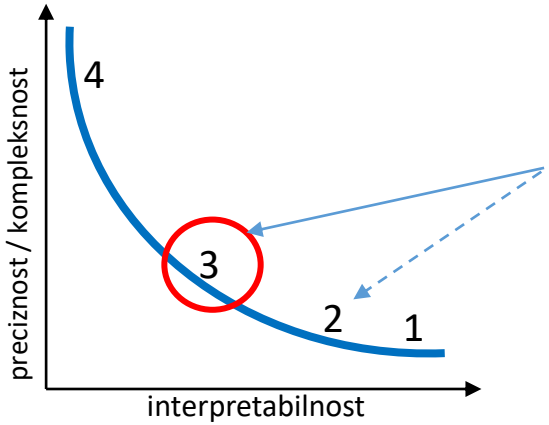
- uglavnom su predimenzionirane
- linearne metode i pristup faktorom ponašanja OK
- poznat mehanizam sloma
- 1998-1 „Referencijska metoda određivanja potresnih učinaka je modalni proračun primjenom spektra odziva uz primjenu linearno-elastičnog modela konstrukcije i proračunskog spektra"

	preciznost	kompleksnost	interpretabilnost
1	prihvatljiva	mala	jako dobra
2	dobra	prihvatljiva	dobra
3	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4	jako dobra	jako velika	jako slaba

METODE PRORAČUNA

Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

	Metode proračuna		EN 1998-1
1.	Linearni statički	Metoda proračuna bočnih sila	[4.3.3.2]
2.	Linearni dinamički	Modalni proračun primjenom spektra odziva	[4.3.3.3]
3.	Nelinearni statički	Postupno guranje (*pushover*)	[4.3.3.4.2 i Dodatak B]
4.	Nelinearni dinamički	Nelin. proračun primjenom vremenskog zapisa (*time-history*)	[4.3.3.4.3]



POSTOJEĆE ZGRADE

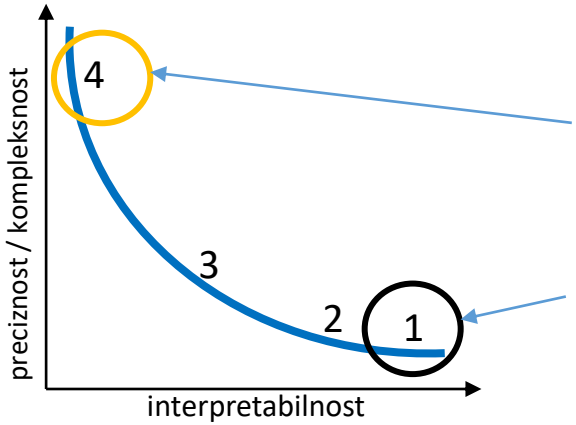
- potreban je drugačiji pristup
- Granično stanje blizu rušenja (BR) „Pristup s faktorom ponašanja q općenito nije prikladan za kontrolu graničnog stanja”
- potrebno je uočiti lokalne i globalne mehanizme sloma
- važniji su detalji (od globalnog proračuna)
- 1998-1 Smije se primijeniti nelinearni statički proračun za provjeru ponašanja konstrukcija sa sljedećom svrhom: „za ocjenu ponašanja postojećih ili obnovljenih zgrada u smislu norme EN 1998-3”

	preciznost	kompleksnost	interpretabilnost
1	prihvatljiva	mala	jako dobra
2	dobra	prihvatljiva	dobra
3	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4	jako dobra	jako velika	jako slaba

METODE PRORAČUNA

Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

	Metode proračuna		EN 1998-1
1.	Linearni statički	Metoda proračuna bočnih sila	[4.3.3.2]
2.	Linearni dinamički	Modalni proračun primjenom spektra odziva	[4.3.3.3]
3.	Nelinearni statički	Postupno guranje (*pushover*)	[4.3.3.4.2 i Dodatak B]
4.	Nelinearni dinamički	Nelin. proračun primjenom vremenskog zapisa (*time-history*)	[4.3.3.4.3]



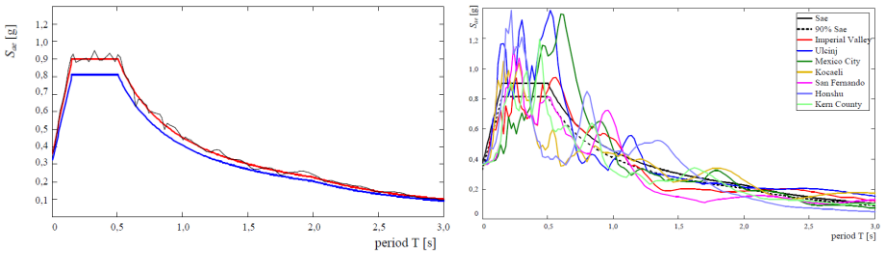
Time-history

- vrlo velika kompleksnost i dugotrajnost proračuna,
- Teška interpretacija rezultata,
- problem cikličkog konstutivnog zakona,
- problem određivanja pobude: realni zapisi vs. umjetni zapisi, 7 zapisa – srednja vrijednost, 3 zapisa – najveća vrijednost.

Metoda bočnih sila

- samo za pravilne zgrade bez znatnog doprinosa viših oblika vibracija od osnovnog oblika u svakom smjeru.

	preciznost	kompleksnost	interpretabilnost
1	prihvatljiva	mala	jako dobra
2	dobra	prihvatljiva	dobra
3	vrlo dobra	velika	prihvatljiva
4	jako dobra	jako velika	jako slaba

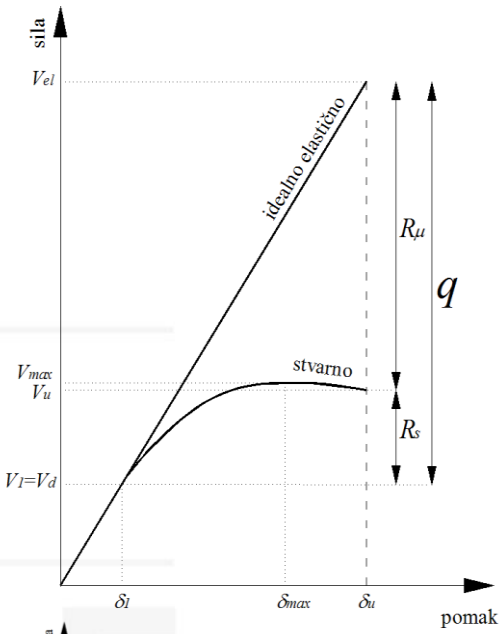


PRISTUP FAKTOROM PONAŠANJA

Faktor ponašanja q je približno omjer potresnih sila koje bi djelovale na konstrukciju ako bi njezin odziv bio elastičan uz 5%-tno viskozno prigušenje i potresnih sila koje se smiju uzeti u proračunu uz uobičajeni elastični model, još uvijek osiguravajući zadovoljavajući odziv konstrukcije.

U praktičnom smislu faktor ponašanja reducira seizmičke sile s kojima proračunavamo konstrukciju iskorištavanjem duktilnih svojstva same konstrukcije (sposobnost trošenja energije u konstrukciji kontroliranim oštećenjem).

- Faktor ponašanja ovisi o: materijalima, geometriji, pravilnosti, detaljima izvedbe čvorova, itd.
- Za konstrukcije male duktilnosti q = 1,5 (*overstrength*).
- Stvarni pomak jednak je umnošku faktora ponašanja i izračunatog elastičnog pomaka $u = q \times u_{el}$.



DUKTILNOST

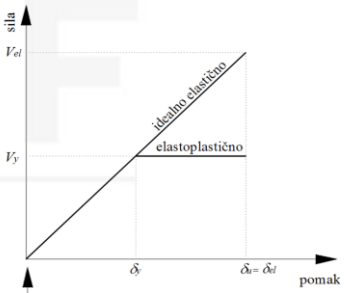
$$R_\mu = \frac{V_{el}}{V_u}$$

VIŠAK NOSIVOSTI (*OVERSTRENGTH*)

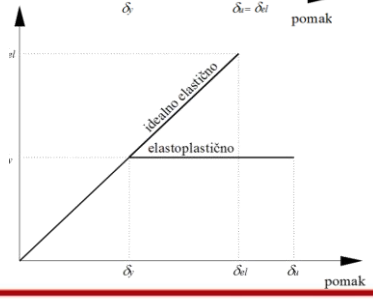
$$R_s = \frac{V_u}{V_d}$$

FAKTOR PONAŠANJA

$$q = R_\mu \cdot R_s = \frac{V_{el}}{V_d}$$



Pravilo jednakosti pomaka ($T > T_C$ „meke konst.”)



Pravilo jednakosti meh. rada ($T < T_C$ „krute konst.”)

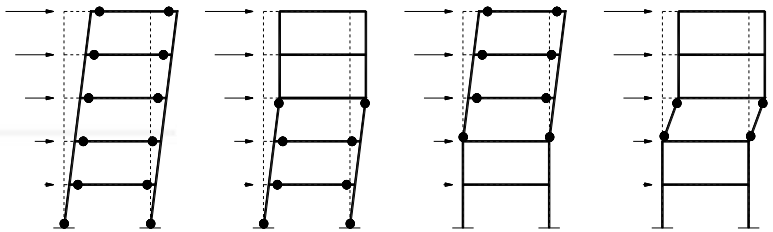
PRISTUP FAKTOROM PONAŠANJA

NOVE KONSTRUKCIJE – relativno je lako i pouzdano odrediti *q* za, unaprijed poznata klasa duktilnosti i mehanizmi sloma.

POSTOJEĆE KONSTRUKCIJE – pristup faktorom ponašanja slabo primjenjiv za postojeće (stare zidane) konstrukcije – nepoznat mehanizam sloma, ključni su lokalni mehanizmi sloma, postoje slabe karike koje treba uočiti, lokalni zahtjevi mogu biti bitno veći od globalnih, ziđe se ponaša izrazito nelinearno.

Dodatni uvjeti za primjenu linearnih metoda:

- zidovi koji preuzimaju bočno opterećenje raspoređeni u oba horizontalna smjera,
- zidovi neprekinuti po visini,
- stropovi imaju dovoljnu krutost u ravnini i dovoljno su spojeni s obodnim zidovima da se može pretpostaviti da inercijske sile raspodjeljuju na vertikalne elemente kao kruta dijafragma,
- stropovi na suprotnim stranama zajedničkog zida nalaze se na istoj visini,
- na svakom katu omjer bočne krutosti u ravnini najkrućeg zida i najslabijeg primarnog potresnog zida ne premašuje 2,5.



HRN EN 1998-1

Tablica 9.1 – Tipovi gradnje i gornja granica faktora ponašanja

Tip gradnje	Faktor ponašanja q	Nacionalni dodatak
Nearmirano ziđe u skladu samo s normom EN 1996 (preporučeno samo za slučajeve male seizmičnosti)	1,5	→ 1,5
Nearmirano ziđe u skladu s normom EN 1998-1	1,5 – 2,5	→ 2,0
Omeđeno ziđe	2,0 – 3,0	→ 2,5
Armirano ziđe	2,5 – 3,0	→ 2,5

NELINEARNA STATIČKA METODA (*PUSHOVER* ANALIZA)

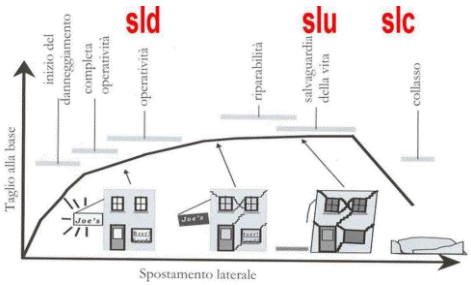
NELINEARNA STATIČKA METODA – projekti obnove konstrukcije (*retrofitting)* obuhvaća: pojačanje (*strengthening*) neoštećene konstrukcije i popravak (*repair*) konstrukcija oštećenih potresom.

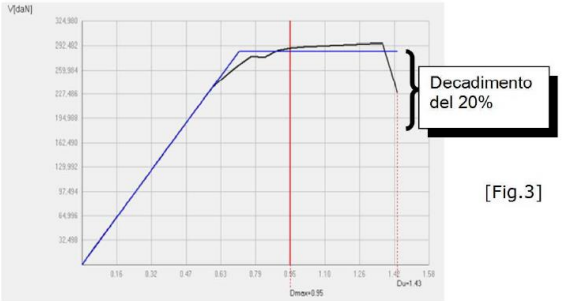
N2 metoda kombinira metodu postupnog guranja (*pushover*) model s više stupnjeva slobode sa spektralnim proračunom ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode (N – nelinearno / 2 – broj modela).

Pushover – sastoji se od niza nelinearnih statičkih proračuna za monotono rastuće bočno opterećenje. Potrebno je ostvariti ravnotežu krivulja poprečne sile i pomaka karakteristične točke (krov). Bočno opterećenje se nanosi u oblicima: linearni trokutasti (*linear*), modalni (*modal*), jednoliki (*uniform*).

Sposobnost se definira pomakom krova. Najveća sposobnost pomaka odgovara pomaku krova pri kojem je ukupna bočna otpornost (poprečna sila u podnožju) pala ispod 80% najveće otpornosti konstrukcije zbog progresivnog oštećenja i sloma elemenata koji preuzimaju bočno opterećenje. Sposobnost pomaka krova odgovara ciljanom pomaku N2 metode.

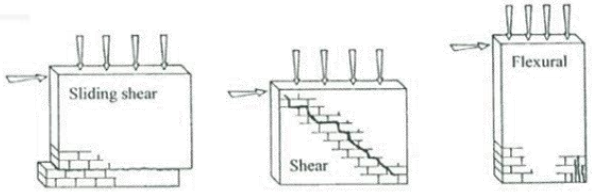
Nelinearna analiza mora prepoznati osnovne mehanizme sloma: slom klizanjem, posmični slom, slom savijanjem. Diktirani su veličinom vertikalnog tlačnog opterećenja.





[Fig.3]

3Muri (2020.)



Tomaževič (2020.)

NELINEARNA STATIČKA METODA (*PUSHOVER* ANALIZA)

N2 METODA – provodi se u nizu koraka (HRN EN 1998-1 B):

1. **Podaci** – opis geometrije konstrukcije, presjeci, konstitutivni zakoni i seizmički zahtjev u obliku elastičnog spektra (pseudo)ubrzanja.
2. **Seizmičko opterećenje u AD formatu** – nelinearni spektar u formatu ubrzanje - pomak:

   $S_a = S_{ae} / R_\mu$

   $S_d = (\mu / R_\mu)\, S_{de} = (\mu / R_\mu)\, (T^2/4\pi^2)\, S_{ae} = \mu\, (T^2/4\pi^2)\, S_a$

   μ - faktor duktilnosti, maksimalni pomak / pomak na granici tečenja

   R_μ - *red. faktor zbog duktilnosti* (μ-1) T/T_C +1 za $T < T_C$; μ *za* $T \geq T_C$
3. **Pushover analiza** – provedba analize za različite oblike bočne sile: linearni trokutasti (*linear*), modalni (*modal*), jednoliki (*uniform*).
4. **Ekvivalentni model s jednim stupnjem slobode (SDOF) i dijagram kapaciteta** – transformacija sustava pomoću faktora Γ.

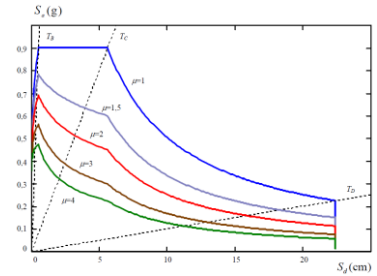
   $\Gamma = \Sigma\, m_i\, \phi_i / \Sigma\, m_i\, \phi_i^2 = m^* / \Sigma\, m_i\, \phi_i^2$

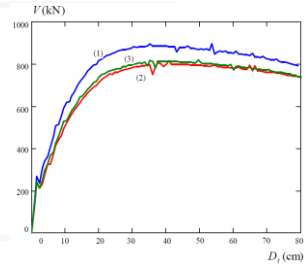
   m^* - ekvivalentna masa SDOF [$\Sigma\, m_i\, \phi_i^2$]

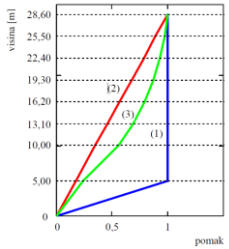
   D^* - pomak SDOF sustava [D_t / Γ]

   F^* - sila SDOF sustava [V / Γ]

   T^* - period SDOF sustava [$2\pi \sqrt{(m^*\, D_y^* / F^*_y)}$]
5. **Potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode** – vidi slike ovisno o $T^* < T_C$ ili $T^* \geq T_C$.
6. **Globalni seizmički zahtjev za model s više stupnjeva slobode** – zahtijevani pomak ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode u pomak vrha zgrade (ciljani pomak): $D_t = \Gamma\, S_d(T^*)$.
7. **Lokalni potresni zahtjevi** – apsolutni i relativni pomaci katova.
8. **Procjena ponašanja** – analiza oštećenja.



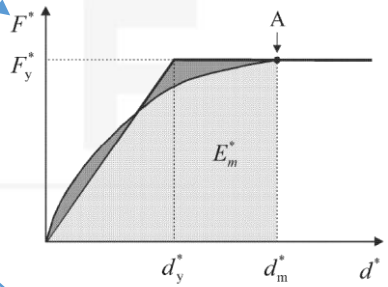




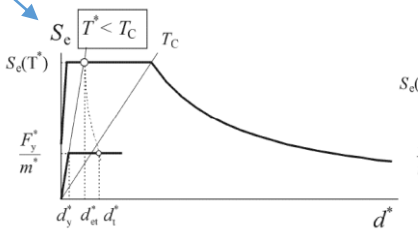
Nepromjenjivi oblik unatoč pojavi plastifikacije i zglobova: >>> adaptivna. analiza

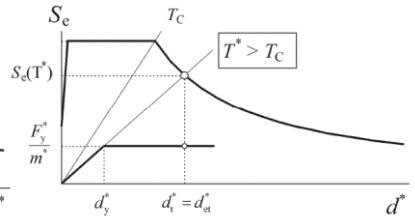
Nepravilne zgrade, torzija >>> više modalne analize.

Zgrade u blokovima.



HRN EN 1998





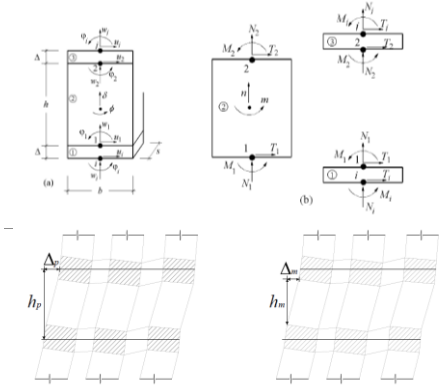
NELINEARNA STATIČKA METODA (*PUSHOVER* ANALIZA)

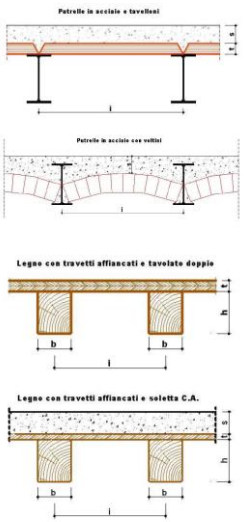
NELINEARNA STATIČKA METODA – Pristup s makro elementima i ekvivalentnim okvirima što omogućuje:

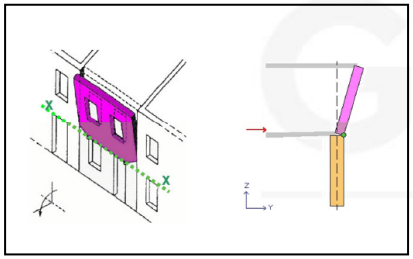
- relativno jednostavan, brz i učinkoviti proračun,
- prepoznavanje mehanizme slomova i lokalnih nestabilnosti,
- različite vrste zida i međukatnih konstrukcija (važna horizontalna krutost).

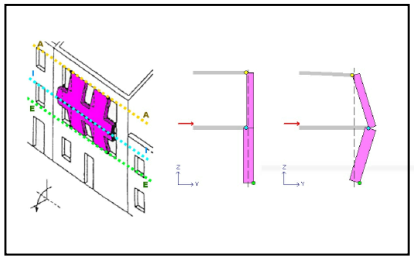
3muri

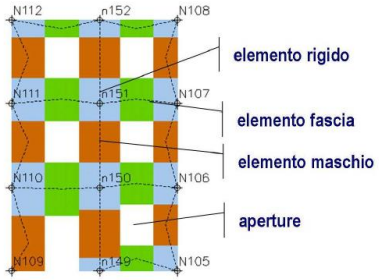
S.T.A. DATA



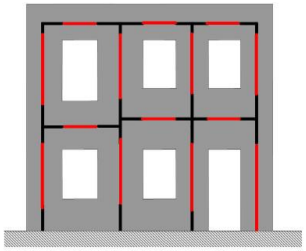




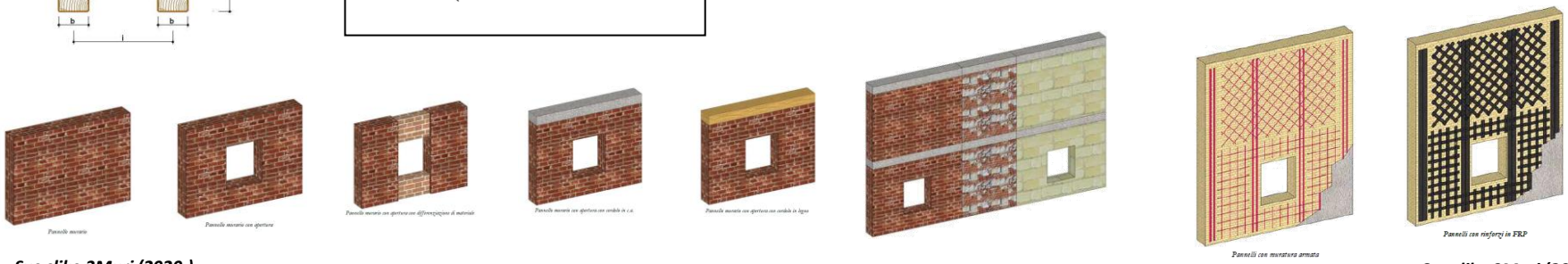




Mesh che rappresenta la suddivisione in "macroelementi"



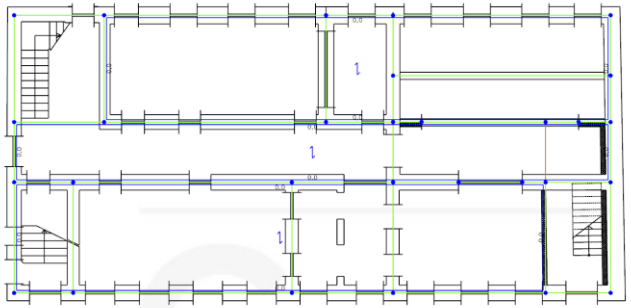
Individuazione del telaio "equivalente"

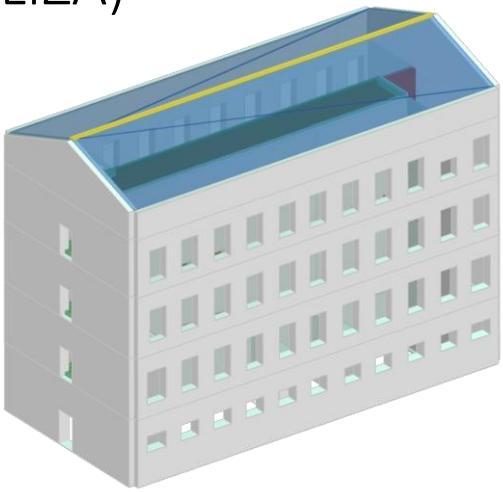


Sve slike 3Muri (2020.)

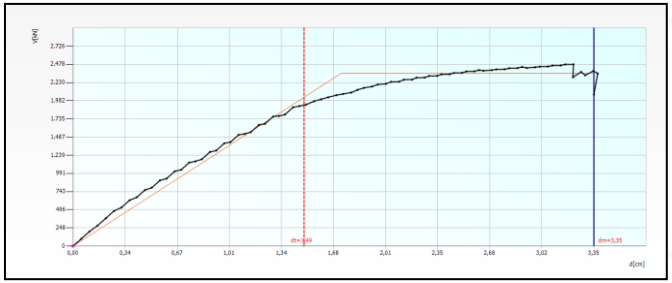
Sve slike 3Muri (2020.)

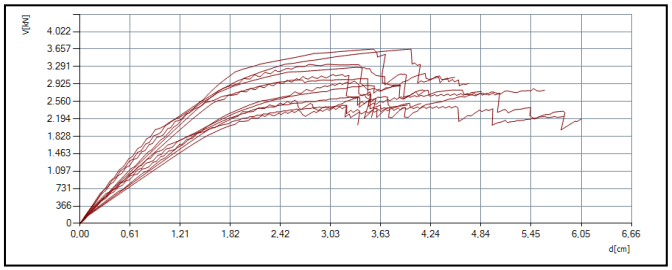
NELINEARNA STATIČKA METODA (*PUSHOVER* ANALIZA)





(1) Postojeća zgrada
(2) Tlocrt konstrukcije – unos geometrije i ostalih ulaznih podataka
(3) 3D model konstrukcije

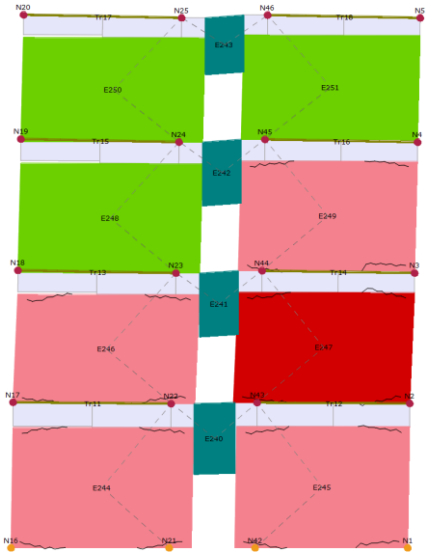




Pushover krivulje za jedno opterećenje i za sva iz istog smjera.

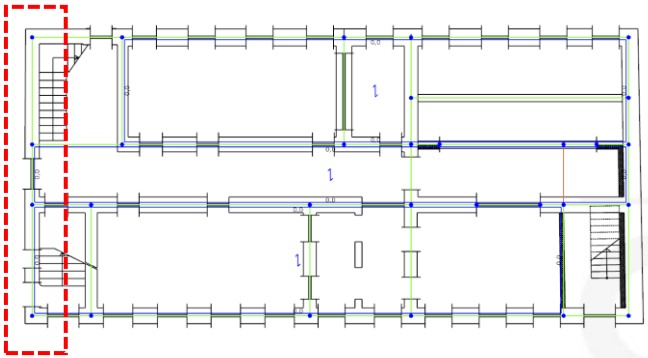
No.	Insert in report	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [cm]	dt NC [cm]	dm NC [cm]	α NC	dm/dt NC
1	☑	+X	Uniform	0,00	4,61	4,67	1,013	1,013
2	☑	+X	Static forces	0,00	5,10	4,77	0,935	0,935
3	☑	-X	Uniform	0,00	4,27	4,41	1,034	1,033
4	☑	-X	Static forces	0,00	4,81	8,40	1,746	1,746
5	☑	+Y	Uniform	0,00	3,54	4,78	1,348	1,350
6	☑	+Y	Static forces	0,00	4,11	3,56	0,867	0,866
7	☑	-Y	Uniform	0,00	3,66	4,25	1,160	1,161
8	☑	-Y	Static forces	0,00	4,22	5,28	1,252	1,251
9	☑	+X	Uniform	57,45	4,55	6,92	1,520	1,521
10	☑	+X	Uniform	-57,45	4,38	4,54	1,036	1,037
11	☑	+X	Static forces	57,45	5,33	7,92	1,486	1,486
12	☑	+X	Static forces	-57,45	5,35	4,69	0,878	0,877
13	☑	-X	Uniform	57,45	4,13	5,36	1,299	1,298
14	☑	-X	Uniform	-57,45	4,19	5,09	1,215	1,215
15	☑	-X	Static forces	57,45	4,97	8,17	1,642	1,644
16	☑	-X	Static forces	-57,45	4,61	6,65	1,443	1,443
17	☑	+Y	Uniform	123,46	3,62	4,63	1,278	1,279
18	☑	+Y	Uniform	-123,46	3,51	3,90	1,112	1,111
19	☑	+Y	Static forces	123,46	4,15	3,88	0,936	0,935
20	☑	+Y	Static forces	-123,46	4,09	3,34	0,818	0,817
21	☑	-Y	Uniform	123,46	3,60	4,64	1,289	1,289
22	☑	-Y	Uniform	-123,46	3,76	4,10	1,091	1,090
23	☑	-Y	Static forces	123,46	4,15	5,39	1,297	1,299
24	☑	-Y	Static forces	-123,46	4,33	5,63	1,299	1,300

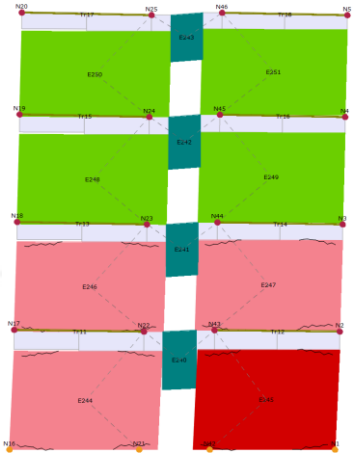
Tablični prikaz svih razmatranih kombinacija i ispunjenost zahtjeva.



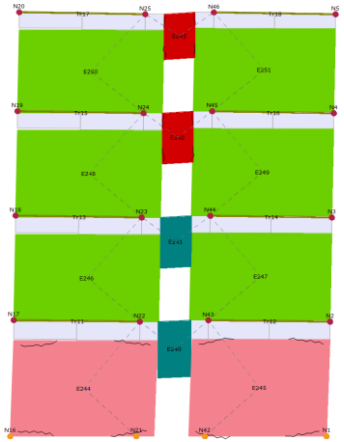
Ekvivalentni okvir, mreža i stanje oštećenja.

NELINEARNA STATIČKA METODA (PUSHOVER ANALIZA)

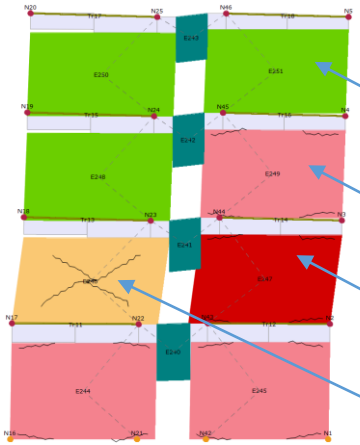




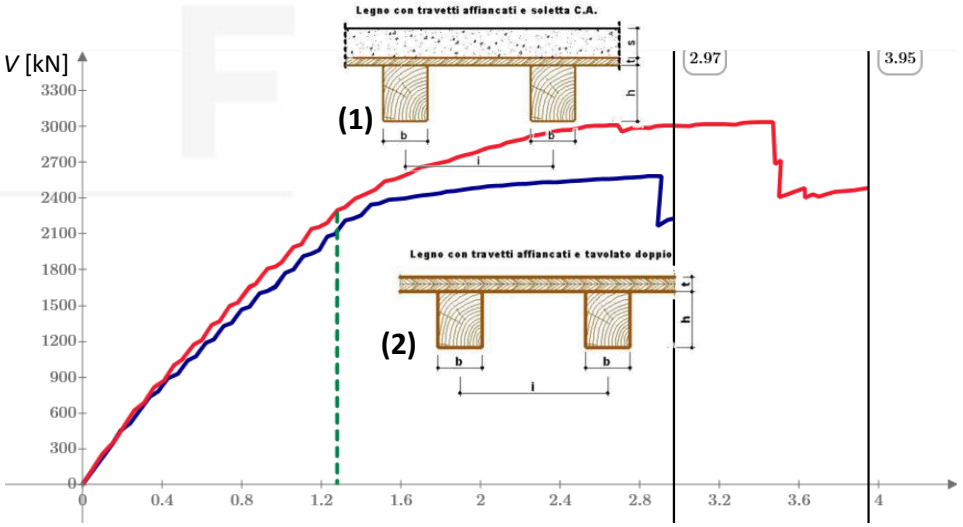
(1) Dijafragma
Jednoliko bočno opterećenje



(2) Fleksibilna međukatna konstrukcija
jednoliko bočno opterećenje



Dijafragma
Linearno bočno opterećenje



Pushover **krivulje za dva slučaja međukatnih konstrukcija i isto bočno opterećenje**

ZAKLJUČAK

- Analiza i proračun postojećih konstrukcija u pravilu je kompleksnije i zahtjevnije od novih konstrukcija. Potrebno je više **znanja** (proračunski pristupi, nove suvremene metode proračuna) i **iskustva** (iz prethodnih potresa i sanacija).
- Potreba za standardiziranim pristupima sanacije, ojačanja i općenito tehničkim rješenjima (ostvarivanje dijafragme, povezivanje dijafragme i nosivih zidova, ojačanje zidova, sanacija oštećenja i pukotina itd.). Posebno je važna uloga revizije i revidenta u projektima obnove.