

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Božen Mušterić, Jakov Oreb

**ANALIZA UTJECAJA RAZDJELNICA PRI DJELOVANJU POTRESA NA PRIMJERIMA
KARAKTERISTIČNIH ZGRADA U GRADU ZAGREBU**

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je pri Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Josipa Atalića, dipl. ing. građ. i dr. sc. Zvonka Sigmunda, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Općenito o istraživanju i motivacija | 1 |
| 1.2. Općenito o potresu..... | 1 |
| 2. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA | 5 |
| 3. RAZDJELNICE I SUDARANJE..... | 7 |
| 3.1. Povoljni oblici građenja u seizmičkim područjima | 7 |
| 3.2. Problem tlocrtne raspodjele (problem ekscentriciteta)..... | 8 |
| 3.3. Razdjelnice | 11 |
| 3.3.1. Općenito | 11 |
| 3.3.2. Projektiranje razdjelnica kroz prošlost..... | 12 |
| 3.3.3. Ispuna u razdjelnicama..... | 15 |
| 3.4. Sudaranje (<i>engl. structural pounding</i>) | 16 |
| 4. MATERIJALI I PRETHODNA ISTRAŽIVANJA..... | 21 |
| 4.1. Problemi postojećeg fonda zgrada u Hrvatskoj..... | 21 |
| 4.2. Studija za saniranje posljedica od potresa..... | 23 |
| 4.3. Dosadašnji doprinos studiji | 25 |
| 4.3.1. Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski | 26 |
| 4.3.1.1. Vizualni pregled zgrade | 28 |
| 4.3.2. Studentsko naselje Stjepan Radić – paviljon 1 | 30 |
| 4.3.2.1. Vizualni pregled zgrade | 32 |
| 4.3.3. Javna/poslovna zgrada Područnog ureda gradske uprave Trnje..... | 33 |
| 4.3.3.1. Vizualni pregled zgrade | 35 |
| 4.3.4. Stambena građevina - Siget 16 A-F | 36 |
| 4.3.4.1. Vizualni pregled zgrade | 38 |
| 4.4. Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštjetljivosti | 40 |
| 5. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG (TERENSKOG) ISTRAŽIVANJA | 44 |
| 5.1. Uvod u eksperimentalno istraživanje | 44 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 5.2. | Operacionalna modalna analiza (OMA) | 45 |
| 5.3. | Mjerna mjesta i postupak ispitivanja | 46 |
| 5.3.1. | Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski | 46 |
| 5.3.2. | 1. Paviljon SD-a Stjepan Radić | 47 |
| 5.3.3. | Zgrada PU Trnje | 48 |
| 5.3.4. | Siget 16..... | 49 |
| 5.4. | Rezultati eksperimentalne analize | 51 |
| 5.5. | Komentar rezultata eksperimentalnih istraživanja na terenu | 51 |
| 6. | METODE POTRESNE ANALIZE | 53 |
| 6.1. | Metoda spektralne analize | 53 |
| 6.2. | Nelinearna metoda dinamičke analize u vremenu | 58 |
| 6.2.1. | Bilježenje potresnog zapisa | 58 |
| 6.2.2. | Metoda dinamičke analize u vremenu | 59 |
| 6.2.3. | Izračun uporabom umjetnih vremenskih zapisa | 60 |
| 6.3. | Potresni zapis korišten u ovom istraživanju | 61 |
| 7. | NUMERIČKO MODELIRANJE | 64 |
| 7.1. | Programski paket ETABS 2015 | 64 |
| 7.2. | Metoda konačnih elemeanta | 65 |
| 7.2.1. | Vrste konačnih elemenata | 66 |
| 7.3. | Numeričko modeliranje razdjelnica | 67 |
| 7.3.1. | Modificirani linijski kontaktni (engl. link) elementi | 67 |
| 7.3.2. | Gap elementi | 70 |
| 7.3.3. | Definiranje razdjelnica u programskom paketu | 71 |
| 7.4. | Zadavanje potresa u programskom paketu | 72 |
| 7.5. | Vrste ispitanih modela | 73 |
| 7.5.1. | Koncertna Dvorana Vatroslav Lisinski..... | 74 |
| 7.5.2. | 1. Paviljon SD-a Stjepan Radić | 76 |
| 7.5.3. | Zgrada PU Trnje | 79 |
| 7.5.4. | Siget 16..... | 81 |
| 7.6. | Zgrade s različitim brojem katova | 84 |
| 8. | USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA | 87 |
| 8.1. | Usporedba ulaznih parametara ispitivanja | 88 |
| 8.2. | Usporedba rezultata za vrednovanje utjecaja razdjelnica | 89 |
| 8.2.1. | 1. paviljon SD-a Stjepan Radić..... | 89 |
| 8.2.2. | Zgrada PU Trnje | 93 |
| 8.2.3. | Siget 16..... | 95 |
| 8.2.4. | KD Vatroslav Lisinski..... | 98 |
| 8.2.5. | Zgrade s različitim brojem katova | 99 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.3. | Prikaz sudaranja zgrada | 102 |
| 9. | PRIMJENA REZULTATA ISTRAŽIVANJA | 105 |
| 9.1. | Nadopuna Obrasca za inicijalnu procjenu potresne oštetiivosti | 105 |
| 9.2. | Web aplikacija SeiHAZ-a | 106 |
| 10. | ZAKLJUČAK | 118 |
| 10.1. | Zaključci iz provedenog istraživanja | 118 |
| 10.1. | Smjernice za daljnja istraživanja | 119 |
| 11. | LITERATURA | 120 |
| 12. | SAŽETAK | 123 |
| 13. | SUMMARY | 125 |
| 14. | ZAHVALE | 127 |

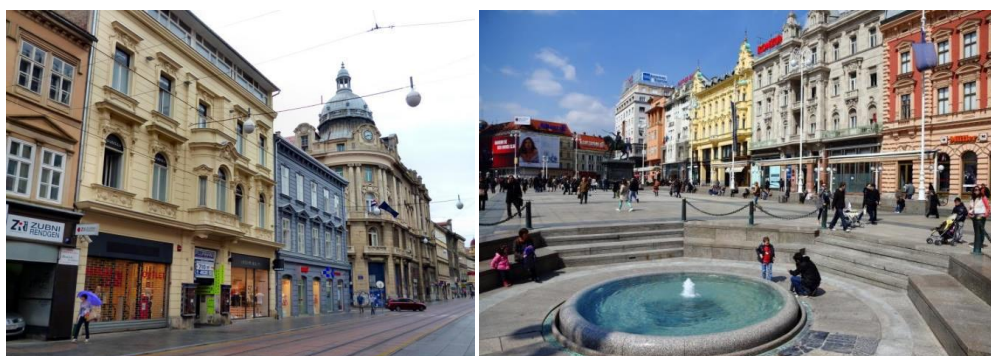
1. UVOD

1.1. Općenito o istraživanju i motivacija

U ovom radu se istražuje utjecaj razdjelnica odnosno utjecaj sudaranja susjednih zgrada na njihovo ponašanje pri djelovanju potresa koristeći realne primjere zgrada karakterističnih za Grad Zagreb.

Razdjelnicama definiramo gabarite pojedine zgrade ili njezinih karakterističnih dijelova (često nazivane dilatacijama). Vrlo često se njihov utjecaj zanemaruje odnosno zgrade se analiziraju kao neovisne cjeline, iako je poznato da utjecaj postoji. Naime, potres izaziva gibanje zgrada koje se međusobno sudaraju ukoliko nisu dovoljno odmaknute jedna od druge, što je vrlo česta pojava u urbanim sredinama, a posebice za slučaj tradicijske gradnje kada su zgrade „naslonjene“ jedna na drugu. Primjer navedenog je svakako uži centar Zagreba odnosno cijela gradska četvrt Donji Grad (Slika 1.1.)

Napretkom tehnologije navedena tematika je sve više prisutna u istraživanjima stranih stručnjaka koja se uglavnom provode na reološkim modelima, a manje na primjerima realnih zgrada, kao što je slučaj u ovom istraživanju. Konačna primjena istraživanja bit će u poboljšanju točnosti parametarskih analiza koje se koriste u okviru „Studije za saniranje posljedica od potresa“.



Slika 1.1. Primjeri tradicijske gradnje u Ilici i na Trgu bana Jelačića u Zagrebu

1.2. Općenito o potresu

Potres se najčešće očituje kao podrhtavanje tla zbog naglog oslobađanja energije u Zemljinoj kori. Uzroci oslobađanja energije mogu biti različiti, ali s obzirom na važnosti u

pogledu utjecaja na ljudsku okolinu, posebice graditeljsku baštinu, u kontekstu potresnog inženjerstva se u pravilu razmatraju potresi povezani s teorijom tektonskih ploča, odnosno potresi koji nastaju zbog tektonskih promjena [1]. Stoga se potres može opisati kao endogeni proces prouzročen tektonskim pokretima u Zemljinoj unutrašnjosti uz naglo oslobađanje energije koja se u obliku seizmičkih valova širi prema površini Zemlje. Pojava potresa pripada skupini prirodnih rizika koji se ne mogu predvidjeti, a s određenom se vjerojatnošću mogu dogoditi u bilo kojem trenutku[2].

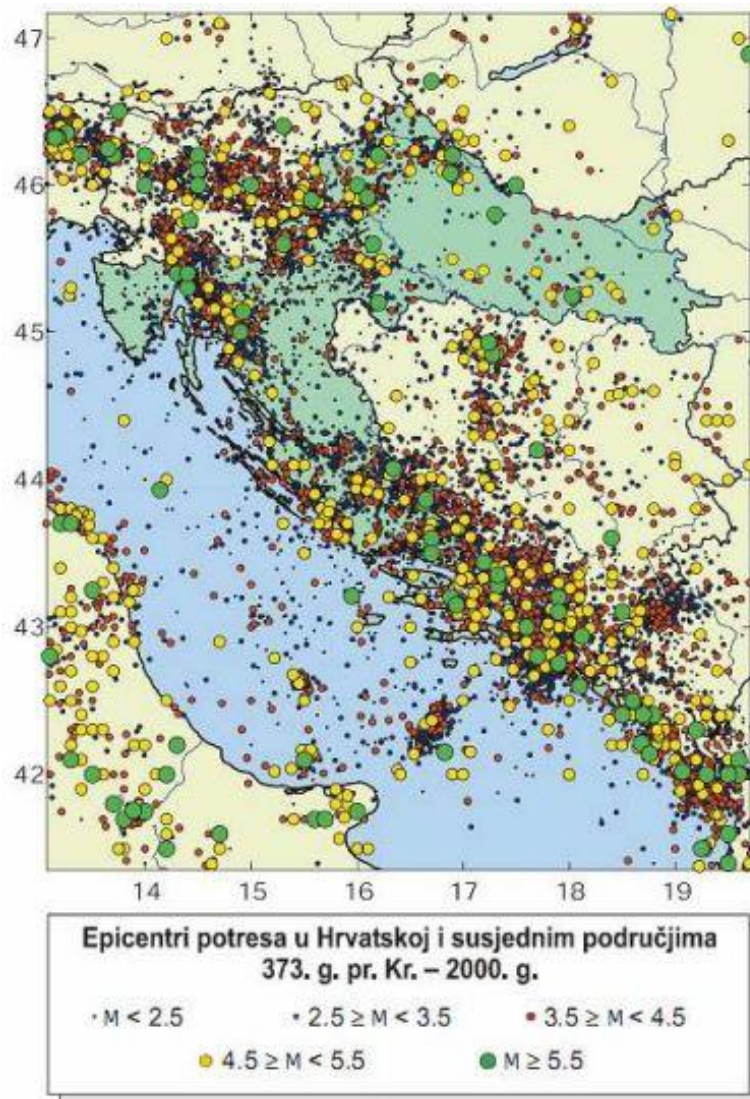
Nažalost, brojni su primjeri razornih potresa u Europi i svijetu posljednjih desetljeća, primjerice Kathmandu u Nepal 2015., L'Aquila u Italiji 2009., Kobe u Japanu 1995. te mnogi drugi. Također u Republici Hrvatskoj i regiji imamo mnogo primjera devastirajućih potresa koji su doveli do velikih ljudskih i materijalnih gubitaka kao primjerice potresi u Skopju 1963. i Crnoj Gori 1979. godine. Potres u Skopju je bio velika prirodna katastrofa u kojoj je stradalo preko 1.000 ljudi, a voše od 70% grada je bilo razrušeno, ostavivši preko 200.000 ljudi bez svojim domova [3]. U Hrvatskoj, jedan od jačih potresa zabilježenih dogodio se 1880. godine upravo na zagrebačkom području. U njemu je razoren veliki dio grada koji je tada imao manje od 30.000 stanovnika, a gotovo svi građevinski objekti bili su oštećeni [4]. Posljedni snažniji potres u Hrvatskoj se dogodio 1996. na području Slanog i Stona, gdje uz materijalnu štetu, srećom nije bilo ljudskih žrtava.



Slika 1.1. Posljedica potresa u Zagrebu 1880. godine [5]

Unatoč nezaustavljivom tehnološkom napretku i značajnim iskoracima u građevinsko-tehničkoj regulativi, potres u trenutku može dovesti do uništenja cijelih naselja ili gradova. Posljedice pojave jakog potresa mogu obuhvatiti oštećenja ili rušenje svih vrsta postojećih građevina, među kojima posebnu pozornost treba usmjeriti na objekte od posebne važnosti (primjerice bolnice i škole), kritične točke prometne i komunalne infrastrukture, stambene zgrade, vrijednu kulturno-spomeničku baštinu te industrijske objekte. Stoga se moguća pojava potresa mora povezati sa značajnom izravnom i neizravnom štetom na imovini, uz

opasnost od ozbiljnih ozljeda i mogućeg gubitka ljudskih života [6]. Saniranje posljedica je dugotrajan i težak proces. Stanovništvo postaje nesigurno zbog gubitka stambenog i radnog mjesta, živi u neadekvatnim uvjetima, gubi se kvaliteta života, pada standard i u konačnici se očekuje iseljavanje dijela stanovništva i značajni materijalni gubici kako zbog samog utjecaja potresa, tako i zbog narušene sposobnosti oporavka društva.



Slika 1.2. Epicentri potresa u Hrvatskoj i susjednim područjima

S obzirom da potrese nije moguće spriječiti, provođenje mjera za ublažavanje posljedica potresa i pripremljenost društvene zajednice u slučaju njegove pojave od iznimne su važnosti. Stoga je svjetski utjecajne zajednice kao Europska komisija, UNISDR, World Bank, World Health Organization intenzivno potiče razvoj metodologije i alata za procjenu rizika od potresa. Jedan od kojih je i „Global Earthquake model“ (GEM) kojoj je cilj napraviti opću bazu podataka, modele i programske pakete za procjenu seizmičkog rizika na globalnoj

razini. Međutim, svako podneblje ima svoju specifičnu tipologiju gradnje pa globalni model se mora korigirati na lokalnoj razini. U Hrvatskoj se dosad vrlo malo poduzelo u vezi poboljšanja procjena seizmičkog rizika.

U zadnje vrijeme se ulaže sve više napora i sredstava pa tako primjerice Grad Zagreb već nekoliko godina potiče i financira „Studiju za saniranje posljedica od potresa“ koju provodi Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. U sklopu tog projekta se nastoje odrediti posljedice djelovanja potresa prvenstveno na kritičnu infrastrukturu u Gradu Zagrebu, a zatim i na ostale zgrade. Ovim projektom se također nastoje ispuniti stavke ugovora Sendai Framework [7], čijim se potpisivanjem Republika Hrvatska obvezala da će do 2030. godine, između ostalog, raditi na dobivanju baze podataka potrebne za predviđanje potresne oštetljivosti.

U razvijenim zemaljama poput SAD-a, Kanade i Novog Zelanda, za procjene seizmičkog rizika sekoriste obrasci za inicijalnu procjenu potresne oštetljivosti. Pomoću tih obrazaca se relativno kratkim i brzim pregledom konstrukcije može odrediti približna vjerojatnost rušenja zgrade te rizičnost u pogledu gubitka ljudskih života i materijalne štete. Ovaj pristup odabran je i za potrebe procjene potresne ugroženosti Grada Zagreba, no zbog specifičnog načina građenja za ovo podneblje, obrasce treba izmijeniti i prilagoditi uvjetima u Hrvatskoj, kako bi se u konačnici mogli dobiti pouzdani i prihvatljivi rezultati procjene rizika od potresa. Iako su se do sada obrasci u tu svrhu mijenjali, nakon određenih saznanja iz raznih istraživanjima je potrebno raditi daljnje korekcije i nadopune obrazaca.

Jedna od potrebnih nadopuna jest unutar obrasca definirati utjecaj razdjelnica, odnosno sudaranja zgrada. Sile koje se javljaju od sudaranja mogu prouzročiti velika oštećenja zgrada, ili u najgorem slučaju rušenje čitave zgrade. Stoga će se u ovom radu detaljnije istražiti takvo djelovanje na odabranim primjerima. Dobiveni rezultati će se koristiti za nadopunu „Obrasca za procjenu potresne oštetljivosti“ čija je preciznost i pouzdanost veoma bitna za točnije rezultate i bolju procjenu potresne oštetljivosti zgrada.

2. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj razdjelnica, odnosno sudaranja dviju ili više susjednih zgrada koje se može pojaviti tijekom potresa u slučaju kada ne postoje adekvatne seizmičke razdjelnice među zgradama. Prema prijašnjim istraživanjima, navedeni utjecaj ostao je na razini pretpostavke, pa će se u ovom radu dodatno analizirati.

Jedan od razloga neistraženosti problema sudaranja jest nedostatak numeričkih modela u kojima se može promatrati utjecaj razdjelnica, pa je također jedan od ciljeva ovog rada unaprijediti postojeću bazu podataka kako bi se postavili temelji za buduća istraživanja. Naime, pregledom dostupne literature se moglo naići samo na reološke modele koji simuliraju sudaranje zgrada, a u ovom istraživanju je cilj napraviti iskorak i ispitivati modele realnih zgrada.

U svakodnevnoj inženjerskoj praksi ne postoji jednostavan način modeliranja same razdjelnice između zgrada u slučaju potresa. Stoga će se koristiti napredne i kompleksne metode dinamičke analize koje je trebalo detaljno istražiti i ispitati, a jedan od ciljeva istraživanja jest prenijeti iskustvo u radu s tim metodama i olakšati njihovu primjenu u budućim istraživanjima.

U konačnici, cilj je pomoću dobivenih rezultata implementirati utjecaj razdjelnica u postojeći „Obrazac za inicijalnu procjenu oštetljivosti“ radi povećanja njegove preciznosti pri procjeni potresne oštetljivosti zgrada.

Analizirat će se numerički modeli četiriju karakterističnih zgrada na području Grada Zagreba, koje su odabrane na temelju procjene stručnjaka u području znanosti vezanom za ovo istraživanje.

Analizirane zgrade su:

- Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski;
- 1. paviljon Studentskog doma Stjepan Radić,
- Zgrada područnog ureda gradske uprave Trnje
- stambena zgrada u naselju Siget.

Eksperimentalna istraživanja na ovim zgradama su pokazala nepravilnosti u ponašanju baš na mjestima razdjelnica. Stoga se predviđa da će u slučaju potresa na doći do odvajanja zgrada i međusobnog sudaranja, a posebice je opasno ako jedna od zgrada poprimi ulogu ležaja (spriječava translaciju) za drugu zgradu i dodatno uzrokuje torzijsko zaokretanje, čime se izravno ugrožavaju dijelovi konstrukcije na najudaljenijim mjestima od mjesta kontakta zbog najvećeg kraka sila.

3. RAZDJELNICE I SUDARANJE

3.1. Povoljni oblici građenja u seizmičkim područjima

U ovom poglavlju će se pojasniti kriterij regularnosti građevinskih konstrukcija (engl. *regularity criteria*) koji je važan za razumjevanje odredbi EN 1998-1:2004 [8] jer on utječe na vrijednosti parametara korištenih pri projektiranju konstrukcija na potres. Kao zaključak poglavlja navest će se komentar usporedba ispitanih zgrada sa današnjim pravilima seizmičkog projektiranja.

Ukratko, značajke konstrukcija s dobrim ponašanjem prilikom potresa jesu:

- jednostavnost
- ujednačenost, simetrija i višestruka statička neovisnost
- jednolika i kontinuirano raspodjeljena krutost u tlocrtu i po visini
- djelotvornost stropnih konstrukcija, uključujući i krovnu
- potrebna krutost u odnosu na karakteristike tla ispod temelja (interakcija tla i konstrukcije)
- konstrukcija nije previše izdužena u tlocrtu niti previsoka
- konstrukcija je projektirana tako da u horizontalnim elementima konstrukcije plastični zglobovi nastanu prije nego u vertikalnim

Ovo su samo osnovna pravila i njihovom primjenom se ne može govoriti o idealnom ponašanju konstrukcije u potresu, ali uz dobro projektiranje i izvedbu detalja postoje velike šanse da se konstrukcija ne uruši nakon djelovanja potresa velikog intenziteta. Važno je da se u projektu konstrukcije primjene pozitivne spoznaje o projektiranju građevina u seizmičkim područjima. Konačno, promatranjem ponašanja konstrukcija u stvarnim potresima, pokazalo se da konstrukcije najjednostavnijih oblika imaju manju vjerojatnost urušavanja pri potresu. [9]

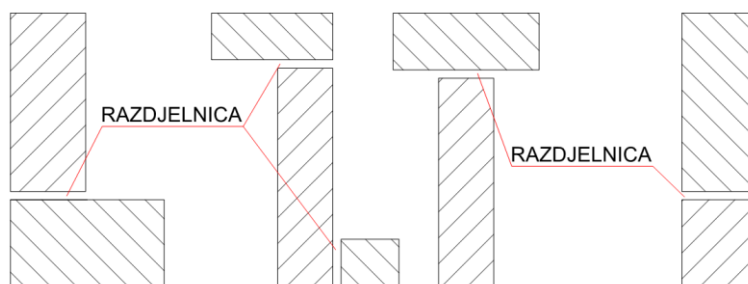
Analizom zgrada ispitanih u ovom istraživanju, može se doći do zaključka da one nisu povoljnog oblika za seizmička područja, ponajviše zbog nepoznavanja prethodno navedenih pravila projektiranja u njihovom vremenu izgradnje.

Promatrajući općepoznata pravila za projektiranje i izvedbu seizmički otporne zgrade, u daljnjem tekstu će se detaljnije opisati samo ona koja su izravno bitna za područje ovog istraživanja.

3.2. Problem tlocrtne raspodjele (problem ekscentriciteta)

Iz pravila navedenih u prethodnom poglavlju jasno je da jednostavnost i simetričnost zgrade treba biti sačuvana po svim katovima, što znači da treba izbjegavati ona rješenja koja će proizvoditi nagle skokove u veličinama krutosti i nagle promjene nosivosti po katovima. Svaka nesimetričnost dovodi do neželjenih i teško procjenjivih torzijskih momenata koji se u projektiranju građevina teoretski trebali izbjeći, ali u stvarnosti to često nije moguće.

Modularno projektiranje pomoću kružnih, kvadratnih, pa čak i pravokutnih tlocrtnih elemenata sa malim relativnim odnosima duže i kraće stranice, pravi su izbor za postizanje pravilne ukupne tlocrtne forme zgrade. Ipak, zbog brojnih zahtjeva urbanističkih planova ili želja investitora, nerijetko je potrebno izvođenje nepravilne i komplicirane zgrade raznih oblika (L,Z,T ili zgrada u nizu) kako je prikazano na slici 3.1. Ukoliko se primjeni takav način projektiranja, treba pokušati takve objekte **rastaviti razdjelnicama** (više u poglavlju 3.3) na niz pravilnih i dovoljno kratkih cjelina, sa simetrično postavljenim zidovima za preuzimanje seizmičkih sila. Neke od zgrada promatranih u ovom istraživanju su upravo takvih oblika.



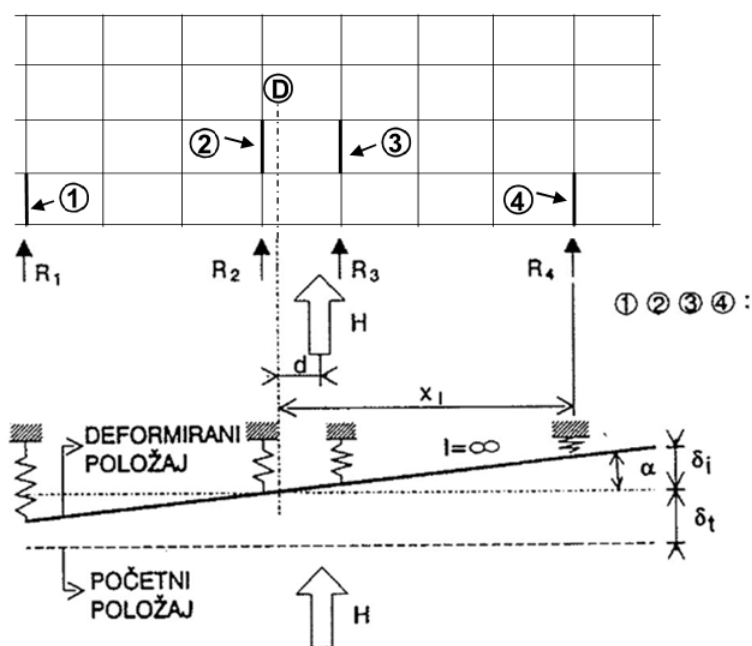
Slika 3.1. Nepravilne tlocrtne forme zgrade

Za objašnjenje **efekta torzije**, potrebno je krenuti od definicije temeljnih pojmova kao što su centar mase, centar krutosti i udaljenost između njih koja se naziva ekscentricitet zgrade.

Centar mase (CM) je točka koja se nalazi na prosječnoj udaljenosti od svih čestica nekog sustava ili pojedinih čestica tijela. To je hvatište ukupne vanjske sile koja djeluje na sustav čestica ili na tijelo. **Centar krutosti (CK)** je točka u tlocrtu zgrade koja se nalazi na prosječnoj udaljenosti od elemenata zgrade ovisno o njihovoj translacijskoj krutosti, na način da krući elementi centar povlače više, a manje kruti element manje. Općenito najveću krutost u tlocrtu zgrade imaju zidovi. Zgrada je simetrična koliko se CK i CM poklope, a prilikom vanjskog djelovanja takva zgrada će se samo translirati.

Međutim, položaj centra mase neke građevine ne nalazi se uvijek na istom mjestu gdje i položaj centra krutosti. Rezultanta seizmičkih (inercijalnih) sila djeluje u CM, ali se rotacija zgrade odvija oko CK. Zbog toga nastaju torzijski momenti oko vertikalne linije koja spaja središta krutosti pojedinih etaža u vertikalnom smjeru građevine. Ove torzijske momente moraju preuzeti zidovi [10].

Silama potresa od translacije zgrade u takvom slučaju se pridružuju i sile od torzije koja može biti pozitivnog ili negativnog predznaka. Tako se u rubnom zidu, kojemu je u tlocrtu CM bliži nego CK, povećava sila potresa, a u zidu, kojemu je CK bliži nego CM, smanjuje. Iz navedenog zaključujemo da su najkritičniji oni elementi koji su najudaljeniji od centra krutosti. [10]



Slika 3.2. Translacijski i rotacijski pomaci [11]

Ukoliko najkritičniji elementi nisu adekvatno dimenzionirani, prilikom potresa može doći do katastrofalnih posljedica, što je vidljivo u slučaju hotela "Terminal" u gradu Guatemala City u Gvatemali, koji je teško oštećen prilikom potresa magnitude 7.5 po Richteru 1976. godine. To je primjer tipičnog rušenja uzrokovanog torzijom [12].



Slika 3.3. Primjer razarajućeg efekta torzije [12]

Da bi se obuhvatile nesigurnosti razmjesta masa, kao i prostorna promjenjivost seizmičkog djelovanja, prema HRN EN 1998-1 [13] zahtijeva se da se proračunsko središte masa svake etaže pomakne iz svog početnog mjesta u oba glavna smjera za dodatnu slučajnu ekscentričnost e_x i e_y tako da se ta ekscentričnost poveća:

$$e_x = 0,05L_x \quad (3.1.)$$

$$e_y = 0,05L_y \quad (3.2.)$$

Gdje je:

L_x – tlocrtna dimenzija u x-smijeru

L_y – tlocrtna dimenzija u y-smijeru

Ovim pravilom i simetrične zgrade dobivaju ekscentricitet pri proračunu, dok se kod onih nesimetričnih ekscentricitet zbog geometrije dodatno povećava.[10]

Navedeno djelovanje posebice dolazi do izražaja ukoliko se potvrdi hipoteza da zbog nepravilno izvedene razdjelnice i ekscentričnog sudaranja kao posljedice dolazi do povećanja efekta torzije.

3.3. Razdjelnice

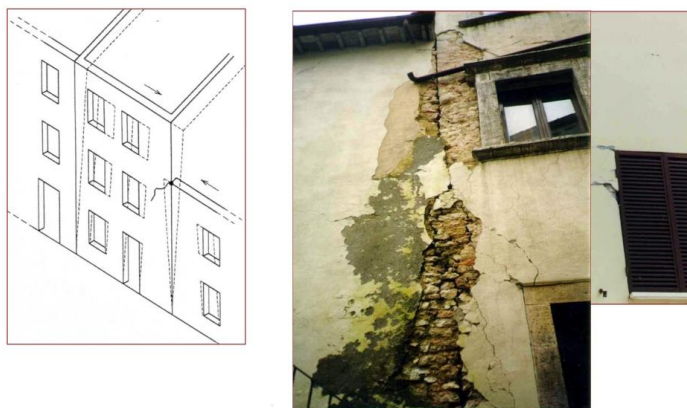
3.3.1. Općenito

Razdjelnice (engl. *expansion joint* ili *movement joint*) su vertikalni uski slobodni prostori koji razdvaju dva zida ili dvije građevine. Izvode se da bi omogućile slobodan rad i pomake odvojenih dijelova konstrukcije koji nastaju zbog nejednolikog slijeganja temelja, toplinskih učinaka, puzanja i skupljanja betona, djelovanja vlage kod opečnih zidnih elemenata, progiba kao i mogućih učinaka unutarnjih naprezanja koji su uzrokovani vertikalnim ili bočnim opterećenjima. [10]

Širina tih spojeva treba omogućavati maksimalno očekivani pomak zgrade. Spojevi trebaju biti ispunjeni lako kompresibilnim materijalom i na vanjskom zidu trebaju biti zapunjeni materijalom koji sprječava prodor vode. [10]

Vertikalne razdjelnice treba postavljati zbog više razloga: usljed nepravilnog tlocrta građevine (ranije objašnjeno u poglavlju 3.2), na mjestima promjene visine, na mjestima gdje građevina mjenja visinu ili broj etaža nad zemljom ili ispod nje te na mjestu različitog geološkog sastava tla. Ako se razdjelnice ne izvedu tamo gdje je potrebno, građevina će ih napraviti sama u obliku manjih većih nepravilnih pukotina, uključujući otpadanje površinskih dijelova i drobljenje materijala. [10]

Dvije nezavisne konstrukcije trebale bi biti razmaknute dovoljno da prilikom njihova osciliranja uzrokovanog potresom ne dođe do sudaranja. Takav razmak naziva se seizmička razdjelnica (engl. *seismic gap*) i predmet je brojnih rasprava u znanstveno-stručnoj literaturi već preko 50 godina, ali zadovoljavajućeg praktičnog rješenja još uvijek nema. [14]



Slika 3.4. Primjer oštećenja usljed nepravilno izvedene seizmičke razdjelnice

U Hrvatskoj, specifična arhitektura karakteristična za Grad Zagreb i Republiku Hrvatsku dodatno uzrokuje probleme vezane uz razdjelnice.

Neke od specifičnosti svakako su:

- Izvedba građevina u blokovima (Donji grad u Zagrebu)
- Izvedba građevina u nizovima (stambene zgrade u naselju Siget i zgrada PU Trnje)
- Ekscentričnost odnosno tlocrtna nepravilnost (KD Vatrostav Lisinski, Studentski dom Stjepan Radić)

Većina navedenih primjera su obrađeni u ovom istraživanju, a ujedno su i reprezentativni primjeri načina gradnje u vremenu i mjestu u kojem su izgrađeni. Kao motivaciju za detaljnim proučavanjem seizmičkih razdjelnica, ističe se podatak da je većina svih administrativnih građevina u Zagrebu izgrađena prije 1964. godine odnosno prije prvih propisa koji značajnije uzimaju u obzir potresno djelovanje. Također, izdvojene građevine su većinom smještene u staroj jezgri gdje postoji i značajna opasnost od požara nakon djelovanja potresa. S obzirom na navedeno, dio građevina od javnog i društvenog značaja je ozbiljno ugrožen.

3.3.2. ***Projektiranje razdjelnica kroz prošlost***

U prošlosti su razdjelnice u našim krajevima izvođene na nekoliko načina u ovisnosti s vremenom izgradnje konstrukcije.

Do 1964. godine, razdjelnice između zgrada na našim prostorima se izvode zbog temperaturnih djelovanja i skupljanja betona, a ne zbog potresa. Dvije zidane zgrade u nizu imaju jedan zajednički zid na granici zemljišnih čestica. Nova zidana zgrada izvodi se „prilijepljena“ uz postojeću gdje se stari i novi zid se dodiruju, a između njih nema zračnog prostora. Svaki zid ima vlastiti temelj. Isto pravilo vrijedi i za susjedne zgrade od armiranog betona koje se izvode po dilatacijama. Izvode se bez razmaka jer je to najjednostavnije za izvedbu, a eventualno se u vertikalnu ravninu radi odvajanja postavlja bitumenska ljepenka [14]. To je materijal koji se u današnje vrijeme postavlja kao hidroizolacija i nikako ne zadovoljava uvjete lako stišljivog materijala koji je propisan Eurokodom za postavljanje u seizmičke razdjelnice.



Slika 3.5. Primjeri zidanih i AB zgrada s razdjelnicama - Ustavni sud RH i Mamutica



Slika 3.6. Bitumenska ljepenka na mjestu razdjelnice

Nakon 1964. godine (nakon potresa u Skoplju 1963.), inženjeri su došli do saznanja da razdjelnice nemaju samo funkciju ograničenja duljine zgrade zbog skupljanja betona već da treba uzeti u obzir izbjegavanje sudaranja susjednih zgrada zbog mogućih asinkronih oscilacija, odnosno različitih perioda oscilacija susjednih zgrada. Godine 1964. u Pravilniku o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima [15] uvodi se pojam seizmičkih razdjelnica, a dana je i formula za određivanje razmaka između susjednih zgrada ovisno o njihovoj visini:

$$f_{\max} = \frac{H}{600} \quad (3.3.)$$

gdje je H visina objekta, ne uzimajući u obzor utjecaj tla. [15]

Godine 1981. donosi se Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [16], koji je kasnije u nekoliko navrata nadopunjavan. U njemu mogu se naći slične jednostavne odredbe o veličini razdjelnica kao i u prijašnjem pravilniku.

Aseizmičke razdelnice projektuju se za:

- 1) izlomljene - nepravilne osnove objekata visokogradnje;
- 2) objekte sa neujednačenim visinama.

Širina razdelnica iznosi najmanje 3,0 cm. Za svaka 3,0 m povećanja visine objekta preko 5 m širina razdelnice povećava se za po 1 cm.

Za objekte visokogradnje visine preko 15 m kao i za niže fleksiohe konstrukcije, kao što su skeleti bez ukrućenja, širina razdelnice određuje se proračunom tako da ne sme biti manja od dvostruke vrednosti maksimalnih deformacija susednih segmenata objekata i ne sme biti manja od vrednosti iz stava 1. ovog člana.

Slika 3.7. Izvadak iz Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [16]

Trenutno važeća norma za projektiranje konstrukcija na potres je „Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija“ (HRN-EN-1998) koju je propisala Europske organizacije za normizaciju (CEN), a dužne su je provoditi sve članice Europske unije, u koje spada i Republika Hrvatska. U prvom dijelu te norme (HRN-EN-1998-1:2011) se propisuje razmak seizmičkih razdjelnica pod točkom 4.4.2.7 [13].

Zgrade moraju biti zaštićene od sudaranja sa susjednim zgradama prouzročeno potresom ili sudaranja neovisnih jedinica iste zgrade.

Smata se da je ovaj zahtjev ispunjen ako:

- Za zgrade ili konstrukcijski neovisne jedinice koje ne pripadaju istom vlasniku, razmak od granice parcele od potencijalnih udara potresa nije manji od najvećeg horizontalnog pomaka zgrade na odgovarajućoj razini proračunat u skladu s izrazom (4.23)
- Za zgrade ili konstrukcijski neovisne jedinice koje se nalaze na istoj parceli, razmak između njih nije manji od od drugog korjena zbroja kvadrata najvećih horizontalnih pomaka dvaju zgrada ili jedinica na odgovarajućoj razini, proračunatih u skladu s izrazom (4.23):

$$d_s = q \cdot d_e \quad (4.23.)$$

Gdje je:

d_e - elastična deformacija neke točke konstrukcije;

d_s - pomak iste točke konstrukcije određen linearnom analizom uporabom projektnih spektara odgovora prema odredbi članka 3.2.2.5 EN 1998-1:2004;

q - faktor ponašanja za pomake (uzima se jednak dobivenom faktoru ponašanja za određenu konstrukciju pri proračunu vrijednosti djelovanja)

- Ako su katne visine zgrade ili neovisnih jedinica koje se proračunavaju jednake onima susjedne zgrade ili jedinice, može se ranije navedeni razmak smanjiti faktorom 0,7

3.3.3. Ispuna u razdjelnicama

U periodu nakon došenja pravilnika iz 1964. godine, na mjestu razdjelnica ugrađivale su se ploče od drvolita ili heraklita, a kasnije polistirena i stiropora, što je ujedno bila i oplata za novi zid susjedne zgrade. „Meki“ materijal ostao je ugrađen u razdjelnici i nije se uklanjao. Na pročeljima zgrade se obično širina razdjelnice maskirala bakrenim ili aluminijskim limom koji se pričvršćuje upucanim čavlima ili vijcima i moždanicima [14].



Slika 3.8. Stiropor u razdjelnici obložen limom
na vanjskoj fasadi

Nakon potresa u El Asnam-u (Alžir) 1980. godine, primjećeno je da polistiren (stiropor) ima značajnu tlačnu čvrstoću i prenosi potresne sile između dvije susjedne zgrade. Pokazalo da se ugrađeni „meki“ materijali pri potresu i sudaranju zgrada nalazi se u troosnom stanju naprezanja, odnosno u stanju spriječene deformacije. Stoga se nakon početnog deformiranja, ponaša kao kruto tijelo između dvaju zidova. S obzirom da je početna deformacija relativno mala, može se zaključiti da i u ovom slučaju seimičke razdjelnice uopće

nema. Prezentirane su i serije rezultata u svrhu objašnjavanja utjecaja materijala ispune u razdjelnici (Slika 3.9) [17].

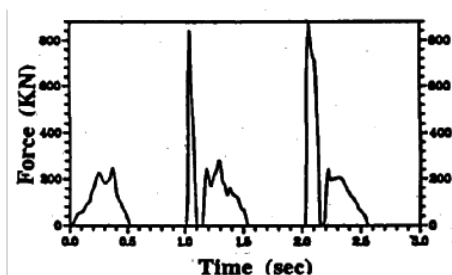


Figure 6 : Impact Force versus Time of the 3rd level with full joint $K_c = 3 \text{ GN/m}$, $K_t = 0.14 \text{ GN/m}$, $F = 1 \text{ Hz}$.

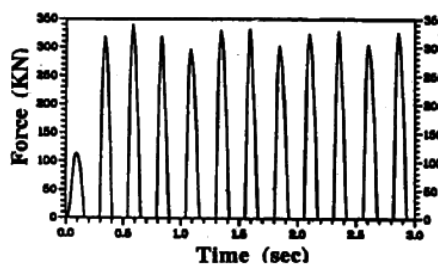


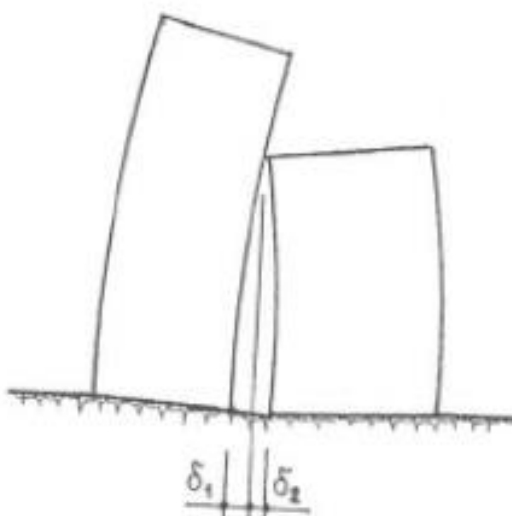
Figure 7 : Impact Force versus Time with full joint $K_c = 3 \text{ GN/m}$, $K_t = 42 \text{ GN/m}$, $F = 4 \text{ Hz}$.

Slika 3.9. Izmjerene sile u razdjelnici s ispunom [17]

Studija utjecaja materijala ispune u razdjelnici pokazuje da je postignut veći broj udara. Primjećuje se također povećanje vrijednosti udarne sile kao i vremena trajanja.

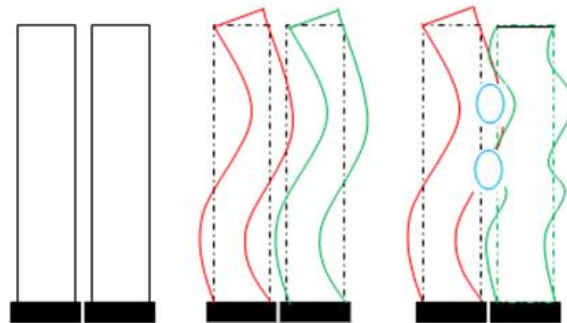
3.4. Sudaranje (*engl. structural pounding*)

Susjedne građevine, korištene za različite namjene (stambene, javne/poslovne zgrade) učestalo imaju različitu visinu i masu što dovodi do različitih dinamičkih karakteristika. Stoga tijekom potresa, koji uzrokuje vertikalne i horizontalne pomake konstrukcija, one mogu oscilirati asinhrono, pa može doći do uzajamnog sudaranja zgrada koje su u kontaktu ili jako blizu jedna drugoj. Taj fenomen u praksi se naziva sudaranje (*engl. structural pounding*).



Slika 3.10. Sudaranje se javlja ukoliko vrijedi: $\delta \geq \delta_1 + \delta_2$

U jakim potresima koji su zabilježeni proteklih desetljeća, sudari su doveli do znatnih oštećenja, pa čak i rušenja susjednih, nedovoljno razmaknutih građevina različitih svojstava, kod kojih postoji mogućnost osciliranja s razlikom u fazi.



Slika 3.11 Osciliranje susjednih građevina pri potresu – u fazi i asinhrono [18]

Tijekom potresa koji je 1985. godine zadesio grad Mexico City sudari su zabilježeni na 40 % od ukupno 330 srušenih ili jako oštećenih konstrukcija, a kod 15 % srušenih konstrukcija sudaranje je bilo glavni uzrok rušenja [19]. Kasai i Maison navode da je kod potresa Loma Prieta zabilježeno 200 sudara u kojima je sudjelovalo više od 500 građevina i to na lokacijama kojese od epicentra udaljene više od 90 km [20].



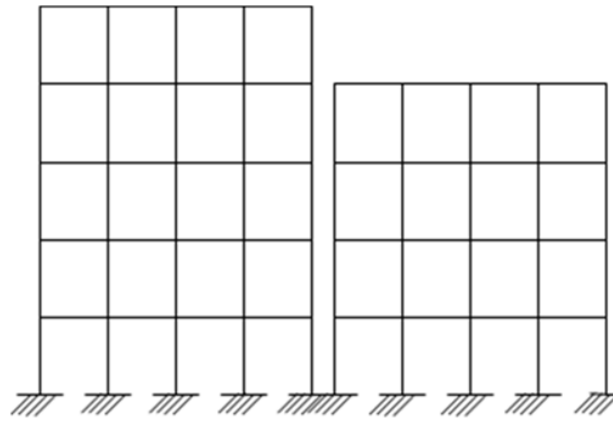
Slika 3.12. Otkazivanje zgrade zbog sudaranja prilikom potresa u Mexico City-u 1985. godine [19]

Da bi se problem sudaranja dobro objasnio, treba krenuti od prvog problema koji mora biti riješen prilikom planiranja izgradnje nove građevine, a to je njezin položaj u odnosu na susjedne zgrade i granice posjeda. Građevine u gradskim sredinama i metropolama izgrađene su jedna uz drugu ili jedna vrlo blizu drugoj, na udaljenostima manjim od potrebnih

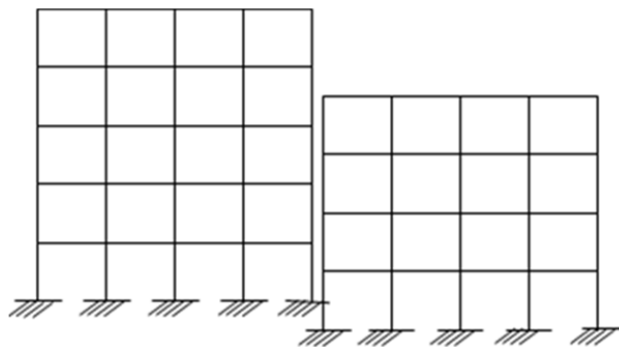
za izbjegavanje sudaranja. Razlog tome ponajviše je zahtjev funkcionalne upotrebe zemljišta kao i velika cijena koštanja samog zemljišta.

Ispod je navedeno nekoliko primjera gdje se javljaju oštećenja od sudaranja usljed djelovanja potresa velike amplitude [18]:

- Susjedne građevine istih visina, istih razina katova, s različitim dinamičkim svojstvima
- Susjedne građevine, istih visina i različitih razina katova
- Susjedne građevine ,različitih visina, ali istih razina katova
- Susjedne građevine, različitih visina i različitih razina katova
- Građevine u nizu,različitih visina i istih razina katova
- Građevine u nizu,različitih visina i različitih razina katova
- Susjedni dijelovi iste građevine koji su nepravilno odvojeni razdjelnicom



Slika 3.13. Primjer građevina različitih visina i istih razina katova [18]



Slika 3.14. Primjer građevina različitih visina i različitih razina katova [18]

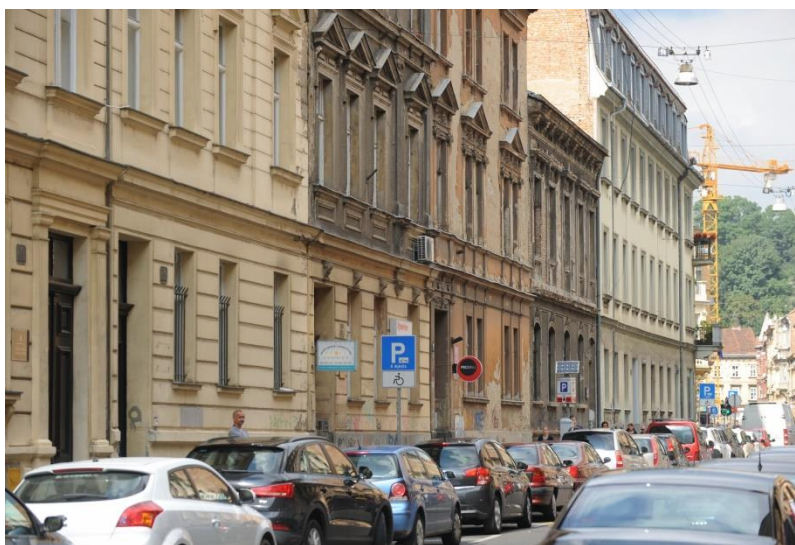


Slika 3.15. Primjeri susjednih zgrada različitih visina u uže centru Zagreb (Vlaška ulica)

Sila, koja se javlja između susjednih zgrada tijekom sudaranja, dovodi do lokalnih oštećenja, oštećenja konstrukcijskih elemenata i njihovog otkazivanja, što je jako opasno za građevinu na globalnoj razini. Na osnovu prijašnjih razmatranja sudaranja, zaključci su sljedeći [18]:

- Susjedne građevine, s pravilnom seizmičkom razdjelnicom, zahvaćene su oštećenjem usljed sudaranja tek tijekom jakih potresa.
- U slučaju potrebe za izgradnjom zgrade velike duljine, razdjelnice se moraju postaviti na propisanim udaljenostima, a neadekvatan spoj različitih dijelova iste građevine može također uzrokovati sudaranje susjednih dijelova usljed velikih magnituda potresa.
- Građevine sa različitim razinama katova su nepoželjne jer se totalna sila udara prenosi direktno na stupove i zidove. U tom slučaju dolazi do povećanja pomaka na višim katovima te do konstantnog urušavanja gornjeg dijelakonstrukcije, koji je dimenzioniran na manje sile. Tada, usljed djelovanja gravitacije, nastaju velika oštećenja. Stoga je bolje rješenje graditi susjedne građevine s istim razinama katova i s prikladnom seizmičkom razdjelnicom.
- Kad su zgrade u nizu povezane razdjelnicama, vanjske građevine trpe veća oštećenja u usporedbi s unutrašnjim.
- Prilikom izgradnje zgrada u nizu, svi zidovi u poprečnom smjeru su nosivi dok su u uzdužnom uglavnom nosivi samo vanjski. Dilatiranjem i nastavljanjem zgrada u niz, onemogućuje se postavljanje otvora (prozora) na spojne zidove. Stoga su svi prozori za prihvat dnevnog svjetla na uzdužnim stranama zgrade i oslabljuju uzdužne zidove koji na taj način gube svoju krutost za prijenos horizontalnih opterećenja. Iz tog razloga mnogo su kruće prilikom djelovanja

horizontalnog opterećenja u poprečnom smjeru. Zbog nejednake krutosti u dva smijera događa se sudaranje zgrada u nizu pri potresu.



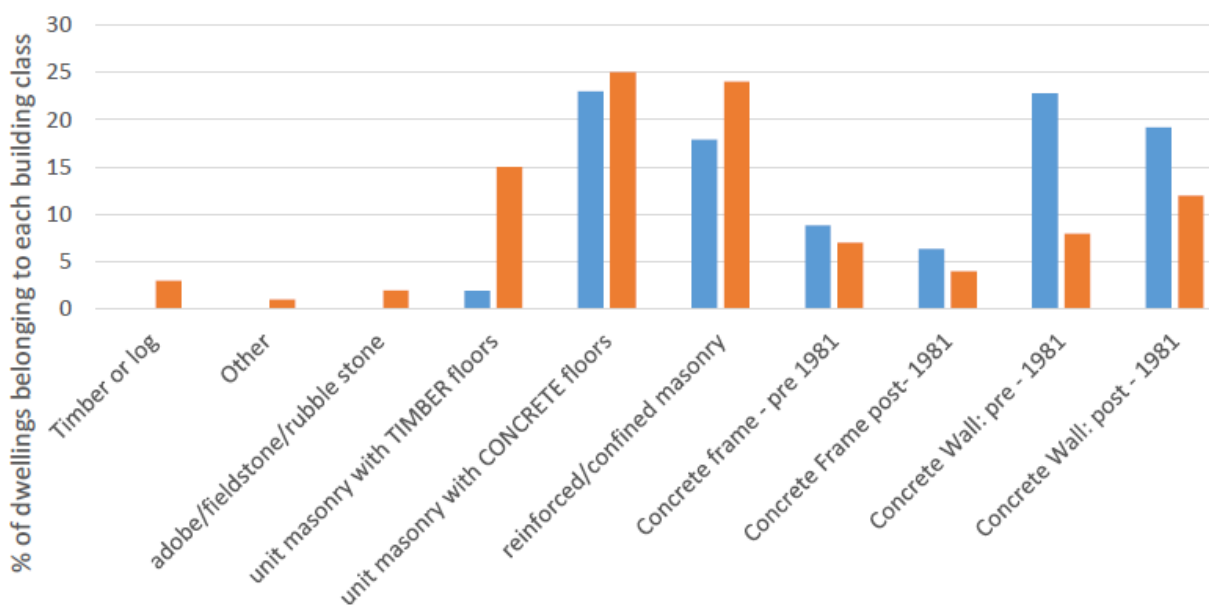
Slika 3.16. Zgrade u nizu

Sve navedene spoznaje o sudaranju korisne su kao ulazni podaci za numeričke modele. Ukoliko približno znamo posljedice možemo preliminarno istražiti utjecaj tog efekta na karakteristične građevine u gradu Zagrebu, na osnovu čega bi saznanja o eventualnim posljedicama potresa bila potpunija. Preciznijim modeliranjem sudaranja i prepoznavanjem kritičnih mjesta mogu se dobiti pouzdani rezultati koju u konačnici mogu pomoći u spašavanju ljudskih života, kao i očuvanju zgrada koji su dio kulturne baštine grada Zagreba. Način na koji je sudaranje modelirano u ovom istraživanju je detaljnije opisano u poglavlju 7.

4. MATERIJALI I PRETHODNA ISTRAŽIVANJA

4.1. Problemi postojećeg fonda zgrada u Hrvatskoj

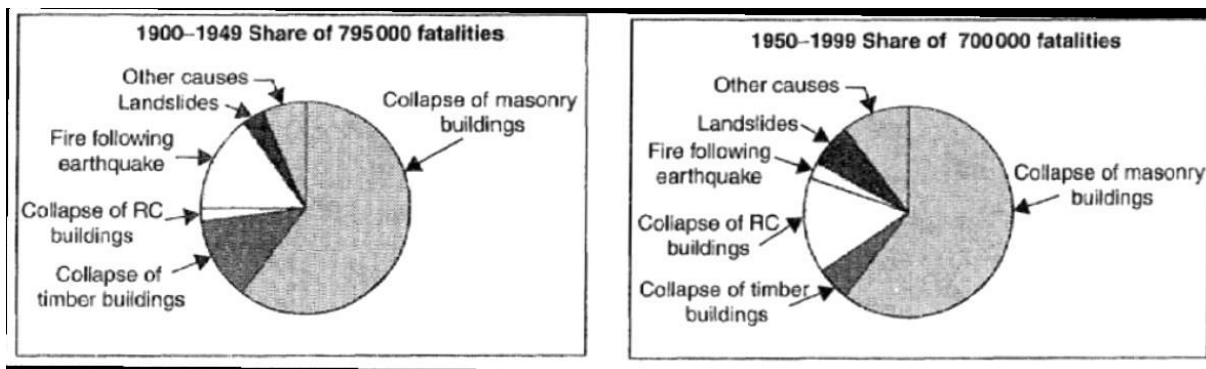
Prema rezultatima europskiog projekta NERA (Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation), u okviru kojeg su se prikupljali raspoloživi podaci o postojećem fondu građevina u europskim državama, za urbana područja u Hrvatskoj dobivena je načelna klasifikacija i zastupljenost tipova građevina (Slika 4.1) pregledom Google Street View aplikacije i temeljem upitnika koje su ispunjavali hrvatski građevinski stručnjaci [21].



Slika 4.1. Zastupljenost tipova građevina urbanim područjima u Hrvatskoj prema rezultatima projekta NERA [21]

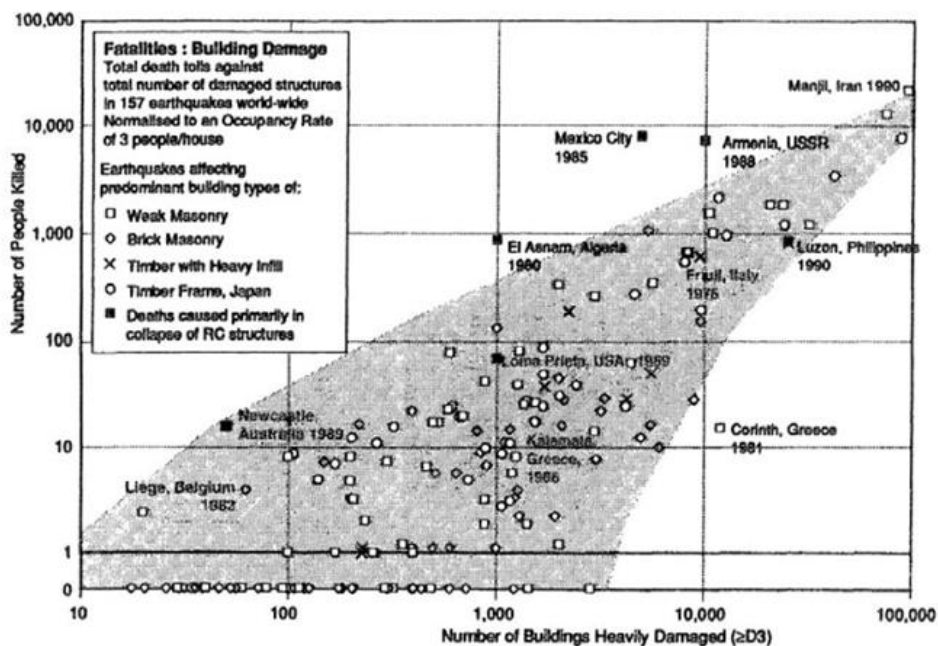
Iz prethodne slike lako je uočiti da veliku većinu infrastrukture u Hrvatskoj čine zidane i armiranobetonske građevine.

U većini razornih potresa glavni uzroci gubitaka ljudskih života su oštećenje odnosno djelomično otkazivanje ili potpuno rušenje građevina. U prošlom stoljeću prosječno 75% smrtnih slučajeva zbog posljedica potresa povezano je upravo s odzivom građevina, a većina žrtava bilo je povezano s rušenjem zidanih zgrada (Slika 4.2.) [22] koje su uobičajene u seizmički aktivnim područjima, a prema NERA (Slika 4.1.) u Republici Hrvatskoj također zauzimaju veliki postotak postojećeg fonda građevina.



Slika 4.2. Prikaz uzroka ljudskih žrtava zbog posljedica potresa [22]

Međutim, statistički podaci (slika 4.2.) ukazuju i na porast broja žrtava u AB konstrukcijama, koje su u novije vrijeme učestalo predstavljale prvi izbor pri određivanju nosivog sustava, a u slučaju rušenja mogu izazvati i teže posljedice od zidanih konstrukcija [23]. Stoga kod procjene ranjivosti građevina s AB konstrukcijama itekako treba voditi računa o posljedicama mogućih odstupanja od suvremenih načela projektiranja seizmičke otpornosti, posebice u pogledu duktilnosti. Povezanost broja ljudskih žrtava s brojem jako oštećenih građevina (Slika 4.3.) uočljiva je iz odgovarajućeg prikaza ovisnosti za velik broj potresa u prošlosti [22].



Slika 4.3. Ovisnost broja ljudskih žrtava i broja jako oštećenih građevina zbog posljedica potresa [22]

Očito je da su prilikom izgradnje zidanih betonskih i AB zgrada nužne seizmičke razdjelnice koje u prošlosti nisu pravilno izvođene. Dodatno, ako se uzme u obzir da je

većina stambenih jedinica, a time i građevina, izgrađena za značajno manja opterećenja od potresa ili ga uopće ne uzimajući u obzir, jasno je ukazana ugroženost velikog dijela postojećeg fonda građevina.

4.2. Studija za saniranje posljedica od potresa

Jedno od značajnih istraživanja u vezi utjecaja potresa koje se provodi u Hrvatskoj je Studija za saniranje posljedica od potresa [24]. Ta studija je dio realizacije projekta Ureda za upravljanje u hitnim situacijama. Radi se u okviru **Razvojne strategije Grada Zagreba** i kao potpora predviđenom projektu "Potresni rizik Grada Zagreba - infrastruktura, stanovništvo, građevine i kulturna dobra" koji je pripremljen za prijavu na natječaj **financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj**.

S obzirom da se Grad Zagreb nalazi u jednoj od potresno vrlo aktivnih zona predviđanje gubitaka zbog potresa je od naročitog interesa za državnu vlast i zajednicu. Predstavlja vrlo važan aspekt za **implementaciju strategije prevencije katastrofa** i predlaganja mjera za ublažavanje njihovih posljedica.

Kao nova zemlja članica Europske Unije, Republika Hrvatska je prihvatila Smjernice za izradu Procjene rizika od katastrofa Europske Komisije (engl. *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*). Budući da u Republici Hrvatskoj postoje seizmički vrlo aktivna područja, **smanjenje seizmičkog rizika je od naročitog nacionalnog i javnog interesa**.

Poznato je da se seizmički rizik može kvantificirati kao konvolucija četiri zasebna faktora (Slika 4.4), no usprkos naporima da se proizvedu **globalno primjenjivi modeli kvantificiranja**, zadovoljavajući rezultati mogu se postići tek unosom karakterističnih podataka dobivenih temeljem **lokalne ekspertize** za pojedine gradove, regije ili cijelu zemlju.



Slika 4.4. Ažuriranje odabranih pojedinačnih faktora seizmičkog gubitka s pomoću skupova podataka specifičnih za određenu zemlju

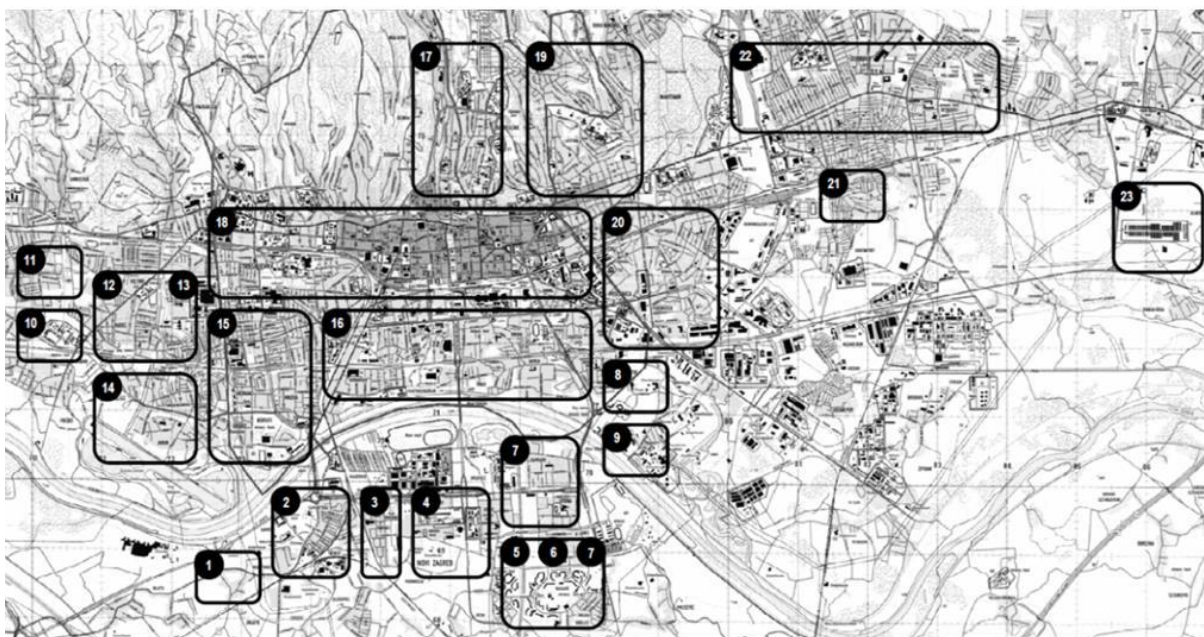
U skladu s navedenim, **cilj ove studije** je usredotočiti se na odabrane parametre specifične za našu zemlju, osobito u vezi s karakteristikama postojećeg fonda zgrada i

ocijeniti prikladne modele vjerojatnosti dostizanja pojedinih graničnih stanja za procjenu fizičke oštetljivosti zgrada kako bi se pokrenuo razvoj cjelovitog i pouzdanog modela za procjenu seizmičke oštetljivosti i gubitaka za Republiku Hrvatsku. Poboľšanje postupaka procjene seizmičkog rizika za Republiku Hrvatsku predstavlja **najvažniji doprinos studije**. Nadalje, očekuje se da implementacija projektnih aktivnosti vezana za diseminaciju rezultata istraživanja **podigne razinu lokalne javne svijesti** o različitim aspektima seizmičkog rizika.

U prošlosti nisu provedena sustavna istraživanja u svezi karakterizacije hrvatskog fonda postojećih građevina i s time povezane fizičke oštetljivosti, iako su takvi podaci bitne komponente za ocjenjivanje rizika zbog potresa. Zbog toga je **hitno potrebno unaprijediti dostupne skupove podataka** specifične za Hrvatsku, odnosno Grad Zagreb. Stoga će uspješno ostvarenje ciljeva projekta imati neposredni učinak na poboljšanje primjena ocjenjivanja rizika, jer će unaprijeđeni skupovi podataka u svezi s fondom postojećih građevina dati prikladnije modele izloženosti i preciznije rezultate.

Slijedom navedonog, jedna od osnovnih ideja studije je dobrom pripremom i organizacijom stvoriti **kvalitetnu bazu podataka** (dokumentacija, pregledi i procjene kroz obrasce, eksperimentalna mjerenja, numerički modeli, itd.) karakterističnih građevina koja će omogućiti brz pristup i analizu prikupljenih podataka. Velika baza podataka moći će se koristiti za niz novih bitnih saznanjapoput procjene rizika od potresa ili procjene oštećenja nakon potresa ili pri raščišćavanju djelomičnog urušavanja i spašavanja zatrpanih osoba.

Kao pomoć u problematici kategorizacije postojećeg fonda zgrada u Zagrebu, izrađena je karta s tipovima građevina i godinama gradnje. Pomoću kategorizacije moguće je ocijeniti karakteristične tipove građevina i nosivih konstrukcija, odnosno načina gradnje, uz odgovarajuća razdoblja izgradnje za pojedine dijelove grada (Slika 13). Karta sadržava grubi pregled tipova nosivih konstrukcija i razdoblja njihove gradnje po gradskim četvrtima (8) na koje bi se mogli osloniti tijekom analiza.



Slika 4.5 Područja karakterističnih tipova građevina u gradu Zagrebu

Bazu rezultata karakterističnih tipova građevina se može **ekstrapolirati** na iste ili slične građevine u Gradu Zagrebu ("**pokriti**" **stambeni fond**) i time dati doprinos u preciznijoj procjeni potresne ugroženosti.

4.3. Dosadašnji doprinos studiji

Nakon 4 godine „Studije za saniranje posljedica od potresa“ baza podataka o građevinama povećana je na respektabilnu razinu zahvaljujući uvidima u arhive, konzultaciji sa starijim stručnjacima, brojnim eksperimentalnim analizama i terenskim istraživanjima. Za potrebe studije izrađen je čitav **niz numeričkih modela** koji su kalibrirani sa eksperimentalnim istraživanjima, te je tako nastala baza pouzdanih modela i analiza na temelju kojih se mogu raditi preciznije procjene uključujući procjene očekivanog broja oštećenih ili srušenih zgrada, kao i broja mogućih ljudskih žrtava u slučaju razornog potresa.

U dosadašnjem dijelu studije, preciznije u četvrtoj fazi sudjelovali su i autori ovog rada radom na detaljnim eksperimentalnim (terenskim) istraživanjima i izradi kalibriranih numeričkih modela tvornice Franck i Koncertne dvorane Lisinski, s doc.dr.sc Josipom Atalićem kao mentorom, a dobivene rezultate priložili su kao temu svog **Završnog rada** pod nazivom „Analiza konstrukcije koncertne dvorane Lisinski“ i „Analiza konstrukcije tradicijske zgrade u Zagrebu“.

U ovoj proširenoj analizi korišteno je četiri numerička modela građevina iz baze podataka „Studije za saniranje posljedica od potresa“, koje su, za problem nepostojanja seizmičke razdjelnice, procijenjene kao najkritičnije i reprezentativne. Kriterij odabira su bili rezultati mjerenja ambijentalnih vibracija koje pokazuju nepravilnosti u ponašanju, posebno u blizini razdjelnice te stručne procjene stručnjaka za proučavanje djelovanja potresa na građevine, prof.dr.sc. Dražena Aničića i doc.dr.sc Josipa Atalića. Svaka od odabranih zgrada nalazi se u svom zasebnom području iz karte Grada Zagreba s karakterističnim tipovima i godinama izgradnje (slika 4.5).

Osnovni modeli predstavljaju zasebnu cjelinu odnosno zgradu ili dio zgrade koja se prije ovog istraživanja analizirala samostalno, bez utjecaja susjednih zgrada ili susjednih dijelova zgrade. U ovoj analizi su ti modeli **nadograđivani** uzimanjem u obzir i ispitivanjem utjecaja susjednih građevina.

Analiza svakog od primjera počinje s **uvodom** gdje je u kratkim crtama opisana građevina sa svim bitnim podacima koji se koriste tijekom analiza, a posebice je istaknuta **motivacija** zašto se pojedina građevina obrađuje. U uvodnom dijelu su istaknuti i korišteni izvori podataka (primjerice, dostupna projektna dokumentacija ili naknadni arhitektonski snimak) s osvrtom na njihovu pouzdanost. Za sve analizirane građevine su napravljena **eksperimentalna istraživanja i numerički modeli** prema kojima se izvode zaključci.

Posebno za ovo istraživanje, detaljnije je proučen problem nepostojanja seizmičke razdjelnice, tj. utjecaj sudaranja na cjelokupno ponašanje zgrada prilikom potresa. Priložene su i slike s terena koje potkrepljuju navedeni opis.

4.3.1. ***Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski***

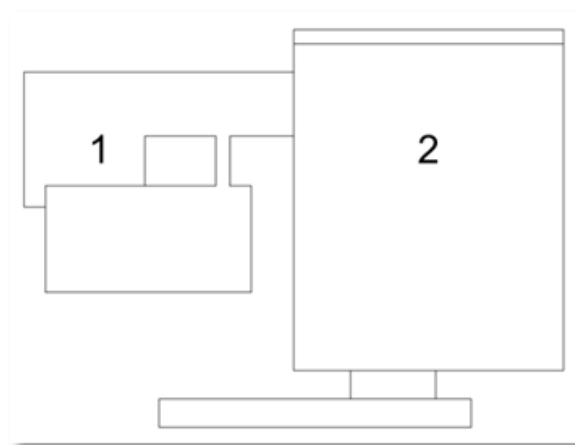
Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski se smatra jednim od obilježja Grada Zagreba. Odluka o gradnji koncertne dvorane "Vatroslav Lisinski" je donesena 1957. godine, a gradnja je počela 1961. godine prema idejnom rješenju grupe projektanata: Marijana Haberlea, Minke Jurković i Tanje Zdvořak [25]. Netom nakon što je izgrađena nosiva konstrukcija 1964. godine (Slika 4.6), katastrofalna poplava je uzrokovala odgodu dovršetka i otvaranja građevine sve do 1973. godine.



Slika 4.6 Koncertna dvorana Vatroslava Lisinskog u izgradnji i danas [25]

Od tada dvorana se intenzivno koristi, a može se istaknuti da je opremljena s najsuvremenijom tehničkom opremom i godišnja posjećenost od 760 000 ljudi.

Treba istaknuti da se na pravokutnoj parceli osim zgrade koncertne dvorane nalazi i zgrada koja je namijenjena kao dodatni poslovni prostor. Zgrada ima 4 kata, ukupne visine 20,65 m i najveće tlocrtno površine 1704 m². Poslovna zgrada (Slika 4.7 – oznaka 1) je u dilatirana od zgrade koncertne dvorane (Slika 4.7 – oznaka 2) i numerički model te zgrade dodatno izrađen je za potrebe ove analize.



Slika 4.7. Shematski tlocrtni prikaz dvorane - 2 i poslovnog prostora - 1

Zgrada koncertne dvorane je pravokutnog oblika dimenzija oko 71,2x57,2 m s ukupnom bruto razvijenom površinom (BRP) od 4072,6 m². Ukupna visina građevine je 29,6 m (vrh kupole), a sastoji se od 4 kata. Visina visokog prizemlja je 5,6 m, kata 4,76 m, galerije 4,0 m i kupole 5,6 m. Kota uređenog terena nalazi se na 200 m.n.m.

Vertikalna komunikacija obuhvaća 8 stubišta, od toga 6 unutarnjih (jednokrakih i dvokrakih) i 2 vanjska (jednokraka) koja služe za evakuaciju. Nosiva konstrukcija stubišta uglavnom ima masivne AB nosače preko kojih su u poprečnom smjeru postavljena gazišta kao nosivi elementi.



Slika 4.8 Fotografija karakterističnih stubišta u koncertnoj dvorani

Konstrukcija je **temeljena** na armiranobetonskim temeljimasamcima i trakastim temeljima na dubini 6,0 m od razine terena. Dimenzije temelja samaca su od 0,9/0,9 m do 3,3/3,3 m. Prema dostupnim podacima temeljno tlo je šljunak dobre zbijenosti.

Nosivu konstrukciju čini sustav AB stupova i zidova sa (uglavnom) sitno-rebričastim stropom i u nekim dijelovima AB pločama. Armiranobetonski stupovi su kružnog (promjera od 40-60 cm) i pravokutnog oblika (poprečnog presjeka 40/40-50/80 cm), a pojavljuju se i cijevni čelični stupovi (promjera 159 mm i debljine stijenke 4,5 mm).

Sitnorebričasti strop seizvodio na gradilištu s visinom rebara 41-57 cm (širine 12 cm) te debljinom ploče 6-10 cm. Najčešći osni razmak rebara je 1,0 m. **Armiranobetonske ploče** (dimenzija 10-25 cm) se koriste rijetko i obično na mjestima gdje nije bilo povoljno koristiti sitno-rebričasti strop. **Armiranobetonske grede** su uglavnom pravokutnih presjeka, a koristile su se grede različitih dimenzija (najmanja 25/30 cm, a najveća 80/70 cm).

Vanjski armiranobetonski zidovi su debljine 26 cm, a unutarnji 30 cm. Prema konceptu nosive konstrukcije zidovi dominantno preuzimaju horizontalna opterećenja (značajno veća krutost u odnosu na stupove). Prema dostupnim podacima pretpostavljena je kvaliteta materijala C16/20, C25/30 i C35/45, a za čeličnu konstrukciju kupole S235.

Prema podacima iz postojećeg projekta proračun na potresno opterećenje nije napravljen. Kao horizontalno opterećenje na konstrukciju je korišteno opterećenje vjetrom.

4.3.1.1. Vizualni pregled zgrade

Prema dostupnoj dokumentaciji, poslovna zgrada je dilatirana od zgrade koncertne dvorane, ali preciznijih detalja o načinu izvedbe nema. Uvidom na terenu, uočilo se da su dvije zgrade razdvojene bez ikakvog razmaka, odnosno jedna je prislonjena uz drugu.(slika XXX). Dakle, seizmička razdjelnica uopće ne postoji.

Nosivi stupovi su razdvojeni razdjelnicom na dva jednaka dijela, dok se na razini komunikacije dviju zgrada pretpostavlja da razdjelnica ne postoji, tj. zid jedne zgrade korišten je kao oplata susjedne. Zgrade naslonjene jedna na drugu što je zaključeno uvidom u

arhivske nacрте kao i konzultacijama sa građevinskim inženjerom koji radi na održavanju zgrade.



Slika 4.9. Pogled na spoj dviju zgrada

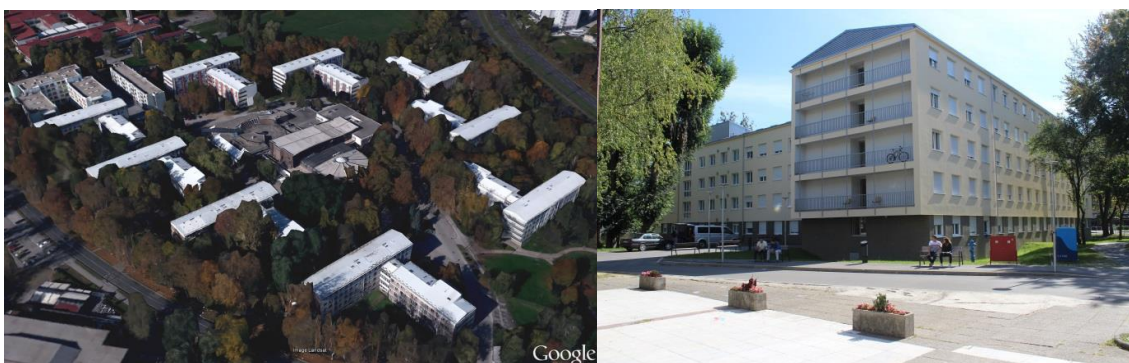




Slika 4.10. Detalj razdjelnice između koncertne dvorane i poslovne zgrade

4.3.2. **Studentsko naselje Stjepan Radić – paviljon 1**

Studentsko naselje "Stjepan Radić" je središnje, ujedno i najveće, studentsko naselje u Zagrebu, ali i u Hrvatskoj. Naselje se nalazi između Selske ceste i Jarunske ulice, pored Jadranskog mosta, a u blizini Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te Sportskog parka Mladost. Kompleks se sastoji od 11 paviljona od kojih je 9 izgrađeno početkom 60-tih godina prošlog stoljeća te spadaju u zaštićen kulturni spomenik. Sedam paviljona su potpuno isti s jedinom razlikom u nadtemeljnim zidovima kojima se konstrukcija prilagođavala visini terena. Peti i šesti paviljon su konceptualno malo drugačiji, a 2010. godine su otvorena još dva nova paviljona na jugozapadnom dijelu naselja. Za analizu je odabran prvi paviljon, jedan od "starih" paviljona.



Slika 4.11. Perspektiva naselja i fotografija prvog paviljona

Prvi paviljon, kao i ostali "stari" paviljoni, je izgrađen je prije više od 50 godina. Obnovljenje prije Univerzijade 1987. godine te 2015. godine za Europske sveučilišne igre s

tim da (prema izjavama nadzornog inženjera) nije bilo intervencija na nosivoj konstrukciji. Paviljon se rasprostire na površini od 1100 m² i sastoji se od dva "krila". Veće "krilo" ima prizemlje i 4 kata (dimenzija 12m×50 m), okomito je postavljeno krilo s 3 kata (dimenzija 12 m×33 m). Svijetla visina prostora u prizemlju je 2,53 m, na prvom katu 2,39 m, dok je na drugom, trećem i četvrtom katu svijetla visina 2,43 m. Visina krovišta iznosi 1,5 m, a ukupna visina građevine iznosi 16,57 m. Nadmorska visina poda prizemlja iznosi oko 118 metara.



Slika 4.12. Fotografije iz obnove 2015. godine

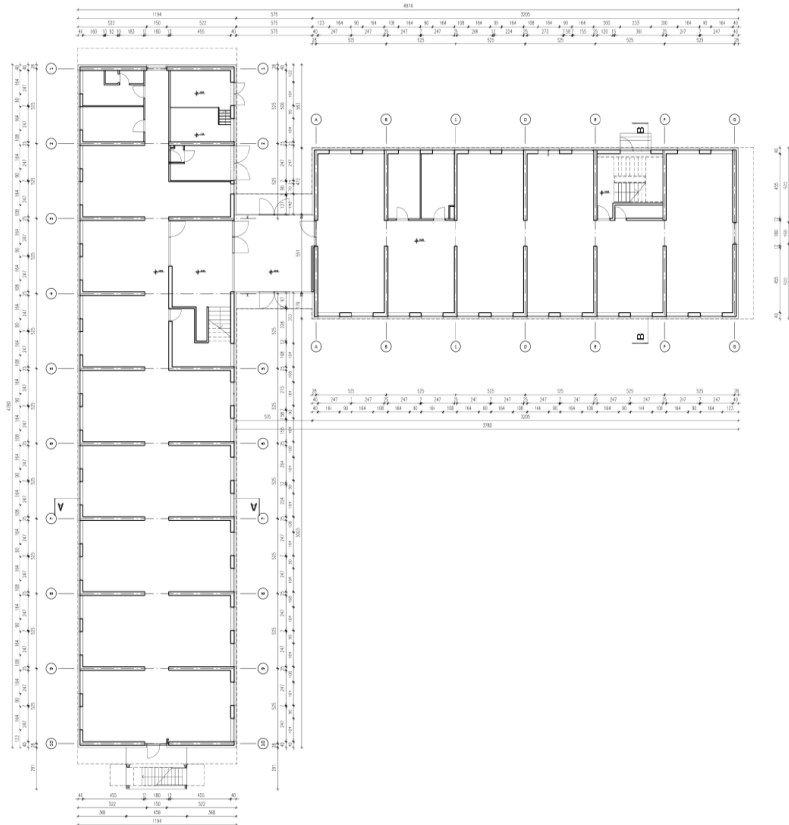
Vanjski i unutarnji nosivi zidovi su od pune opeke debljine 24 cm, a unutar konstrukcije se može naći i ostalih tipova opeke (Slika 4.12). Nužno je istaknuti da je svaki drugi poprečni zid nosivi na što je upozorio nadzorni inženjer na gradilištu (obnova iz 2015. godine). Nosivi poprečni zidovi su oslonci sitnorebričastom stropu s dimenzijama rebra 5×18 cm i ploče 10 cm. Uzdužne grede su dimenzija 28/25 cm i 28/20 cm (Slika 4.12), a prisutne su na fasadama te u hodniku.

Spoj dvaju "krila", koji je ujedno i ulazni prostor je drugačije koncipiran od ostatka konstrukcije. Stropna konstrukcija je na jednom dijelu oslonjena na čelične stupove, a iznad stupova su postavljene grede dimenzija 28/40 cm koje služe kao ležaj stropa.

Temeljna konstrukcija su armiranobetonske trake presjeka 35/50 cm s nadtemeljnim zidovima debljine 25 cm i visine oko 2,0 m (visina je određena okolnim terenom).

Krovnu konstrukciju čine drvene rešetke na razmacima od 1,33 m, sastavljene od drvenih elemenata presjeka 12x12 cm. Svako krilo, pa tako i dio konstrukcije između dva krila, ima svoju odvojenu krovnu konstrukciju različite visine.

Ukupno paviljon sadrži 180 dvokrevetnih soba te još po 7 prostorija na svakom katu (učionice, wc, tuševi, umivaonice i kuhinje i prostor za čistačice). Komunikacija između katova ostvarena je dvokrakim stubištim.



Slika 4.13. Tlocrt prizemlja iz projekta rekonstrukcije 2015. godine

4.3.2.1. Vizualni pregled zgrade

Prema dostupnim informacijama smatra se da postoji razdjelnica između dva "krila" koja nije seizmička. Prilikom pregleda razdjelnice na terenu, zabilježen je pogled na spoj čija se svojstva ne mogu točno utvrditi zbog vanjske fasade paviljona (Slika 4.14). Ne može se također utvrditi postoji li međusobni razmak dvaju krila, međutim pretpostavlja se da su krila „prislonjena“ jedno uz drugo, a armatura se, prema izjavi projektanta posljednje rekonstrukcije, ne nastavlja iz jednog krila u drugo.



Slika 4.14. Pogled na dilataciju između krila

Zbog nepravilne tlocrtne geometrije građevine, može se zaključiti da će prilikom potresa manje krilo imati znatno veći utjecaj na veće, nego obrnuto. Razlog tome je što će se, prema pretpostavci, prilikom međusobnog djelovanja tijekom potresa u većem krilu javiti torzijsko zaokretanje koje najviše ugrožava nosive elemente na najudaljenijim mjestima od kontakta. U manjem krilu će se javiti samo sila koja djeluje u uzdužnom smjeru, čije djelovanje znatno manje ugrožava elemente konstrukcije od torzije.

Način izvedbe razdjelnice od iznimne je važnosti jer bi se tada mogao pretpostaviti točan utjecaj manjeg krila na veće te bi se tako, prilikom izrade numeričkih modela, moglo doći do preciznijih rezultata. S obzirom da ta informacija nije poznata, prilikom ispitivanja će se napraviti više modela za različite slučajeve, te uz pomoć rezultata dobivenih eksperimentalnim istraživanjem, konačno donijeti odluka o utjecaju sudaranja na ponašanje ove građevine.

4.3.3. ***Javna/poslovna zgrada Područnog ureda gradske uprave Trnje***

Kao primjer zgrade od posebne važnosti, izabrana se javna/poslovna zgrada Područnog ureda gradske uprave Trnje. Nalazi se na adresi Ulica Grada Vukovara 56-60 te je izgrađena 1948. godine. Posljednja rekonstrukcija objekta provedena je 2008. godine.

Zgrada ima podrum, prizemlje i 5 katova. Tlocrtne dimenzije su 134,65 m u uzdužnom smjeru (smjer istok – zapad) i 10,90 m u poprečnom smjeru (smjer sjever – jug). Ukupna visina zgrade je 23,18 m (bez podrumске etaže i temelja). Visina podruma je oko 3,0 m, prizemlja oko 5,0 m (uključujući galeriju), a svih ostalih katova 3,2 m.

Po duljini je zgrada podijeljena na 6 dilatacija koje su numerirane od smjera istoka prema zapadu. Rubne dilatacije se razlikuju od unutrašnjih samo na mjestu rubnih zidova u prizemlju, gdje se umjesto rubnih poprečnih zidova nalaze dva stupa eliptičnog poprečnog presjeka s dimenzijama velike i male poluosi od 50 i 20 cm (Slika 4.15).



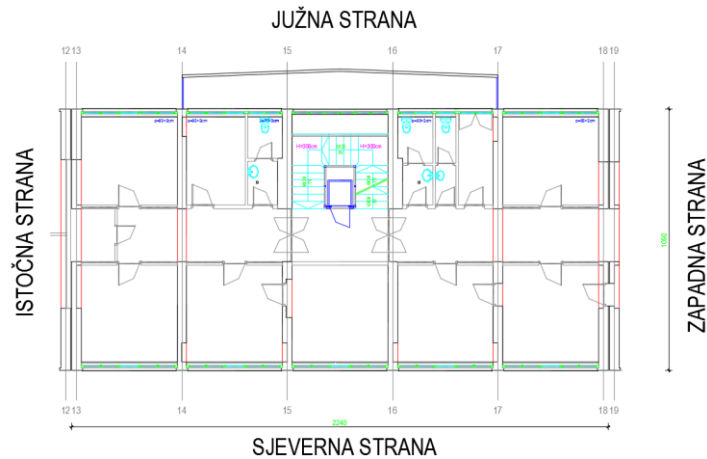
Slika 4.15. Pogled na rubne stupove zgrade

Svaka dilatacija ima po jedan ulaz na sjevernoj (glavni) i južnoj strani (sporedni). Svaka dilatacija ima i svoje unutarnje stubište na južnoj strani u poprečnom smjeru odnosno sredini u uzdužnom smjeru. Stubište je trokrako te se u njegovoj sredini nalazi lift bez liftne jezgre. Inicijalna istraživanja i analize provedeni su na 3. dilataciji duljine 22,40 m u uzdužnom smjeru, a u novoj proširenoj analizi pridodane su i sve ostale pa se u konačni proučavala i cjelokupna zgrada (Slika 4.16).



Slika 4.16. Zgrada područnog ureda gradske uprave na Trnju

Vizualnim pregledom tijekom eksperimentalnih mjerenja su naknadno ispravljani neki detalji vezani za nosivu konstrukciju, ali potrebno je istaknuti da nisu poznati svi detalji vezani uz koncept nosivosti pa su isti morali biti pretpostavljeni prema uobičajenoj praksi iz vremena gradnje (1948. godina). Dodatno, i u Izvješću o energetskom pregledu zgrade iz 2011. godine postoji manji osvrt na konstrukciju u kojem se također nosiva konstrukcija definira kao zidana (nosivi zidovi od pune opeke) s tim da su stropne konstrukcije pretpostavljene kao sitnobreičasti strop u svim etažama (prema sloju betona od 5 cm u tlačnoj zoni).



Slika 4.17. Tlocrt karakterističnog kata

Podrumski dio objekta je poluukopan (sjeverna strana ispod nivoa terena). U prizemnom dijelu zgrade izvedena je galerija. Podaci o korištenim materijalima nisu poznati već se prema dimenzijama zidova i vremenu gradnje pretpostavlja da su zidovi od pune opeke, a ploče i grede armirano betonske. Ploče su prema arhitektonskim nacrtima debljine 20 cm, jedino je ploča podruma definirana kao sitnobreičasti strop ukupne visine 33 cm. Zidovi su uglavnom debljine 40 cm, mjestimično su "stanjeni" na 20 cm (niše), a samo dva zida oko stubišta su debljine 60 cm.

4.3.3.1. Vizualni pregled zgrade

S obzirom da nepostoji dokumentacija o izvedenoj razdjelnici između susjednih dijelova zgrade, razdjelnicu se moralo istražiti na terenu.

Uvidom na terenu, može se vidjeti da su sve dilatacije prislonjene jedna uz drugu. Iako se čini na prvi pogled da se rubne površine zidova međusobno dodiruju, između njih je ugrađen tanki lim koji je prekriven vanjskom fasadom (Slika 4.19). Na određenim mjestima je fasada otpala, pa je lim lako uočljiv. Općenito, zbog starosti zgrade, na određenim razdjelnicama je došlo do pojave pokotina, a na nekim mjestima je odlomljen i sam lim.



Slika 4.18. Pogled na razdjelnicu s prednje i stražnje strane zgrade



Slika 4.19. Lim i pukotine oko razdjelnice

Slijedom navedenoga, čak i da je lim dobro očuvan, ne može se reći da pridonosi sprječavanju sudaranja zgrada tijekom potresa. S obzirom da zračnog razmaka između dilatacija nema, zaključujemo da seizmička razdjelnica uopće ne postoji.

4.3.4. **Stambena građevina - Siget 16 A-F**

Naselje Siget rasprostire se na površini od 72 ha i ima cca 8500 stanovnika. Gradnja je započela 1963. godine u skladu s planom izrađenim u Urbanističkom zavodu Grada Zagreba, a prve zgrade useljene su 1965. godine. Naselje se sastoji od više tipova građevina, a dominiraju stambeni tornjevi P+16, te dvije vrste lamela - više (katnosti P+9), te niže (katnosti P+5, tzv. tip "Volta"). Svaka od navedenih grupa zgrada izvođena je specifičnom tehnikom građenja.

U istraživanju će se detaljnije obraditi primjer zgrade (katnosti P+9), na adresi Siget 16 A-F. Zgrada je odabrana kao jedna od kritičnih stambenih građevina od strane prof. Dražen Aničića. Zgrada se sastoji od tri dilatacije i 6 ulaza. Analiza rezultata je prvotno napravljena za jednu rubnu dilataciju, a u novoj proširenoj analizi analizirala se cjelokupna građevina.



Slika 4.20. Stambena građevina Siget 16 A-F – pročelje JZ

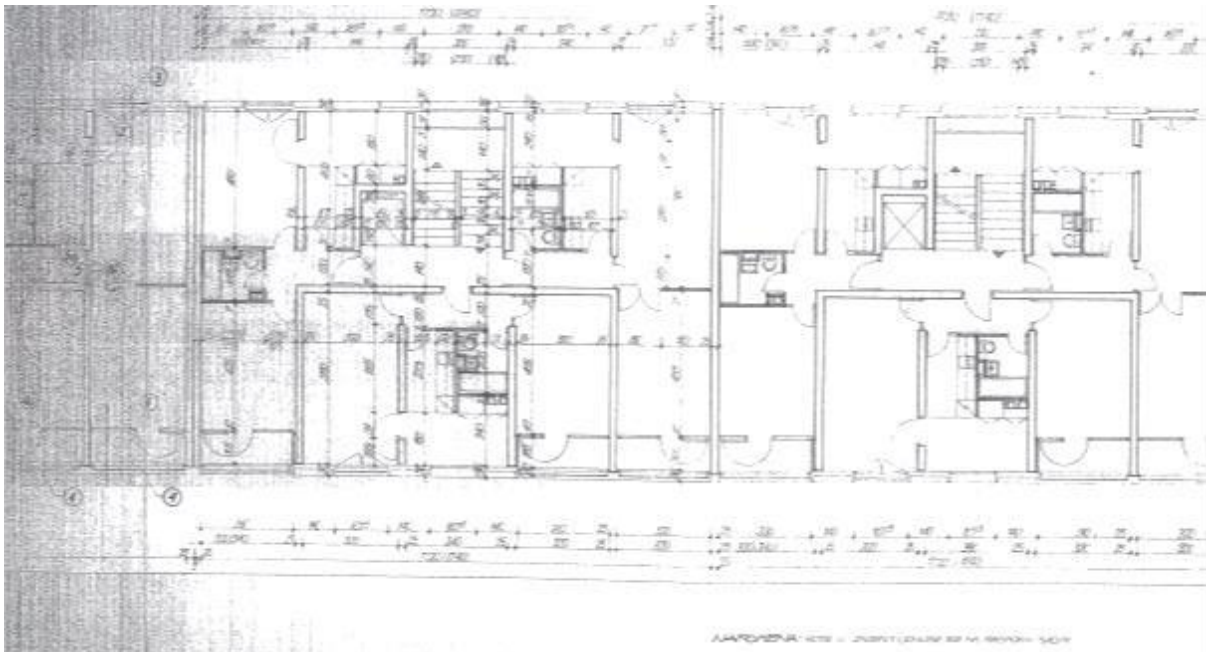
Stambena zgrada Siget 16 A-F je izgrađena 1964. godine. Zgrada se sastoji od 3 dilatacije te ima instalacijsku etažu, suteran, prizemlje i 8 katova. Potpunu simetričnost cijele zgrade i svih dilatacije narušava samo prolaz za automobile koji prolazi kroz prizemlje središnje dilatacije (Slika 4.21). Na tom mjestu, umjesto poprečnih zidova i otvora, nalaze se 3 stupa pravokutnog poprečnog presjeka dimenzija 100x25 cm. Na stupove se naslanjaju jedna poprečna i dvije uzdužne grede iznad kojih se nalazi ploča prizemlja.



Slika 4.21. Prolaz za automobile kroz središnju dilataciju

Zgrada je izvedena u sustavu s poprečnim nosivim zidovima debljine 25 cm, od betonskih termobloketa dimenzije 25x20x40 cm na razmaku od 3,20 odnosno 3,40 m. Stropna konstrukcija je od montažnih AB ploča debljine 16 cm, širine 100, 120 odnosno 140 cm, sa štednim otvorima koji se (nakon montaže) betoniranjem horizontalnih serklaža i spojnicama među pločama uz izradu monolitno izlivenih klinova za vezu, "pretvaraju" u monolitne stropove.

Nosivi poprečni zidovi su ukrućeni s uzdužnim zidom od betonskih bloketa, a na krajevima i s okvirom kojeg formiraju horizontalni uzdužni serklaži kao prečke i AB završeci poprečnih zidova. Pretpostavlja se da horizontalno opterećenje (potres) u poprečnom smjeru preuzimaju poprečni zidovi, dok u uzdužnom smjeru ukupno horizontalno opterećenje preuzima središnji uzdužni zid. Temeljenje je izvedeno na trakastim temeljima.



Slika 4.22. Tlocrt karakterističnog kata

4.3.4.1. Vizualni pregled zgrade

Zbog nedostatka dostupne dokumentacije o izvedenoj razdjelnici između susjednih dijelova zgrade, razdjelnicu se moralo istražiti na terenu.

Uvidom na terenu, može se vidjeti da su sve dilatacije prislonjene jedna uz drugu, a prostor između njih zapunjen, stoga nema prostora koji omogućuje slobodno gibanje. Na određenim mjestima je došlo do raspucavanja zgrade na mjestu kontakta gdje su nastale

rupe i do nekoliko centimetara širine, dok ostatak zgrade nema vidljivih oštećenja. Navedena oštećenja mogu biti posljedica promjene temperature ili prethodnih manjih potresa. (Slika 4.24).



Slika 4.23. Pogled na razdjelnicu s prednje i stražnje strane zgrade



Slika 4.24. a) neoštećena razdjelnica b) pukotine na kontaktu dilatacija

Iako na vanjskim mjestima spoja postoje pukotine i zračni prostor između dilatacija, oni nemaju utjecaja na konačno ponašanje zgrade prilikom potresa zbog zanemarivo male veličine. Stoga zaključujemo da su dilatacije naslonjene jedna uz drugu te daseizmička razdjelnica ne postoji.

4.4. **Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštjetljivosti**

Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštjetljivosti je važan i neizostavan dio Studije za saniranje posljedica od potresa. Napravljen je po uzoru na razvijene države poput SAD-a, Kanade i Švicarske, koje koriste slične obrasce za procjenu potresne oštjetljivosti svoje infrastrukture. Osnovna namjena obrasca je brzo i efikasno procijeniti kolika se šteta, zbog potresa, očekuje na građevini. Cilj je pregledati i ocijeniti savfond građevinana području Zagreba te na temelju prikupljenih podataka izraditi planove zaštite i spašavanja u slučaju potresa. Također bi se mogla detektirati i, uz dostatna financijska sredstva, rekonstruirati kritična infrastruktura da bi se spriječile neželjene posljedice.






Obrazac funkcionira na principu parametarske analize. Potrebno je ispuniti određena polja koja su svrstana po različitim parametrima. Svaki parametar daje svoj koeficijent iz kojeg se kasnije dobiva konačan rezultat. Bitne parametri obrasca su svakako tip nosive konstrukcije i površina zidova u prizemlju budući da su najviše opterećeni prilikom potresa. Konačan rezultat također ovisi i o vrsti tla iznad koje stoji građevina te potresnoj zoni u kojoj se građevina nalazi. Obrazac ispunjuje prethodno educiran ocjenjivač uz pomoć dostupne arhitektonske dokumentacije i pregleda građevine na terenu.

Izlazni parametri dobiveni obrascem su:

- VR - varijabla koja opisuje vjerojatnost rušenja zgrade)
- RIZ – varijabla koja opisuje rizičnost zgrade u koju je uključena vrijednost potencijalnih ljudskih stradanja te materijalnih šteta
- ŽR - varijabla koja je prikaz statistički očekivanog broja žrtava pri apsolutnom kolapsu promatrane zgrade.

Nužno je napomenuti da su vrijednosti navedenih parametara probabilističke, a ne egzaktne.

Iz izlaznih parametara se u konačnici mogu iščitati očekivane razine oštećenja analizirane zgrade prema EMS-98 klasifikaciji (Slika 4.25) te tako uvrstiti ocjenjivanju građevinu u jednu od kategorija oštećenja.

| B Procjena stupnja oštećenja prema EMS-98 klasifikaciji za potrese p. p. 475 god. i p. p. 95 god. | | | | | |
|---|---|---|--|---|---|
| Kategorija, skala, omni: | I | II | III | IV | V |
| | Blago oštećenje | Umjereno oštećenje | Značajno oštećenje | Vrlo teško oštećenje | Otkazivanje |
| |  |  |  |  |  |
| zanemarivo konstr. oštećenje blago nkonstr. oštećenje | blago konstr. oštećenje umjereno nkonstr. oštećenje | umjerano konstr. oštećenje teško nkonstr. oštećenje | teško konstr. oštećenje i vrlo teško nkonstr. oštećenje | vrlo teško konstrukcijsko oštećenje | |
| 95 | ▼ | | | | |
| 475 | ▼ | | | | |

Slika 4.25. EMS-98 klasifikacija

Dosadašnja praksa s ovim obrascima se pokazala zadovoljavajuća. Međutim, na određenim zgradama nisu dobiveni prihvatljivi i pouzdani rezultati. Upravo su zgrade s razdjelnicama bile jedne od pokazatelja da obrasci nisu u potpunosti precizni, što je bio i dodatni motiv da se pristupi ovom istraživanju.

| | | | |
|-------------|-----------------------------|------------------|------------------------------------|
| Ocjenjivač: | (ime i prezime ocjenjivača) | Kod ocjenjivača: | (identifikacijski kod ocjenjivača) |
| Adresa: | adresa pregledane zgrade | Datum: | datum ocjenjivanja |

Opći podaci

| | |
|----------------------|--|
| Informacije dobivene | (upisati izvor informacija pomoću kojih je zgrada ocijenjena) |
| Godina izgradnje | (upisati godinu izgradnje zgrade / ako je nepoznata predložiti period izgradnje) |
| Katnost iznad terena | (upisati broj etaža iznad nivoa okolnog terena) |

Očekivane materijalne i nematerijalne štete

| | | |
|-----------------------|--|--|
| Vrijednost zgrade | TV = BRP * CKI / 1,000,000 BRP= (unjeti bruto razvijenu površinu [m ²]) CKI= (cijena izgradnje iz tablice "CKI") | TV automatski izračun vrijednosti |
| Stradavanje korisnika | Z= (tablicom zaposjednutost izračunati) SKO= automatski izračun vrijednosti | Izaberi tip SKO automatski izračun |
| Važnost zgrade | I (VZ = 1) - bez javnih okupljanja; - bez predmeta i instalacije od značajne vrijednosti; - bez ekoloških rizika | VZ (odaberi važnost zgrade) |
| | II (VZ = 2) - mjesto javnih okupljanja; - predmeta i instalacije od značajne vrijednosti; - važna infrastrukturna vrijednost; - ograničen ekološki rizik | |
| | III (VZ = 5) - vitalna infrastrukturna vrijednost; - zgrade sa velikim utjecajem na ekološki sustav | |
| Ukupno ŠT: | ŠT = (TV + SKO) * VZ = | ŠT automatski izračun |

Vrijednost VPP

| Pot.zona God.izgrad. | P1 < 0,10g | P2 < 0,20g | P3 < 0,25g | P4 > 0,30g |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| do 1964 | 2 | 3 | 6 | 15 |
| 1965- 1978 | 1 | 2 | 3 | 8 |
| od 1988 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tlo, potresne zone i vrijeme projektiranja

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| Tip tla (Za pomoć pogledati priručnik) | I (TL = 1) - Kameno tlo - Velika povr. cementiranog rasutog kamenog tla | TL (odaberi tip tla) |
| | II (TL = 2) - Šljunak i pijesak bez mulja - Nekonsolidirani fini pijesak, silit ili glina - Nanosni materijal prethodnih dvaju tipova | |
| | III (TL = 4) - Aluvijalni nanosi organskog porijekla - Potencijalna klizišta | |
| VPP *TL = | | automatski izračun |
| Ocjena TPP | | ocjene 1-3 |

Slika 4.26. Obrazac- prva stranica

Udio zidova i katnost

| | | | |
|---|------------------|-------|------------------------------------|
| Horizontalno ukrućenje | Povoljno | 0 | HU |
| | Nepovoljno | 2 | (odabrati tip horizontalnog ukr.) |
| | Nepostojeće | 5 | |
| Tip nosive konstrukcije | Zidovi, jezgra | 0,5 | TU |
| | Pomični okviri | 2 | (odabrati tip nosive konstrukcije) |
| | Ziđe | 4 | |
| | Okviri s ispunom | 2 - 6 | |
| | Miješani sustavi | 6 | |
| Površine zidova prizemlja – smjer osi X - Uz _x [m ²] | | | (upisati) |
| Površine zidova prizemlja – smjer osi Y - Uz _y [m ²] | | | (upisati) |
| Korisna površina etaža iznad prizemlja [m ²] | | | (upisati) |
| (KAT / UZ)*(TU+HU) = | | | automatski izračun |
| Ocjena ODN | | | ocjene 1-4 |

Podaci o konstrukciji

| | | | |
|--------------------------|------------------------------|---|---|
| Vertikalno ukrućenje | Kontinuirano | 0 | VU |
| | Nije kontinuirano | 2 | (upisati) |
| | Mekani kat | 5 | |
| Horizontalna razvijenost | Kompaktna | 0 | HR |
| | Razvijena | 1 | (upisati) |
| Temelji | Ploča | 0 | TEM |
| | Trakasti | 1 | (upisati) |
| Ukupno POK | POK = HU+VU+HR+TK+TEM | | POK automatski izračun |

Vrijednosti za gradaciju

| | | |
|---|--------------------------------|---|
| Ukupno VR: | VR = TPP * ODN = | VR automatski izračun |
| Ukupno RIZ: | RIZ = (VR + POK) * ŠT = | RIZ automatski izračun |
| Očekivani broj stradalih pri totalnom kolapsu: | | ŽR automatski izračun |

Očekivana razina oštećenja prema EMS-98 skali za povratni period potresa 475 god.

1. razina oštećenja

2. razina oštećenja

3. razina oštećenja

4. razina oštećenja

5. razina oštećenja

Za određenu kategoriju očekivane razine oštećenja (prema rezultatima analize) ovdje će se prikazati opis očekivanih posljedica na ocijenjenoj zgradi

Slika 4.27. Obrazac - druga stranica

5. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG (TERENSKOG) ISTRAŽIVANJA

5.1. Uvod u eksperimentalno istraživanje

U protekla dva desetljeća, modalna analiza je postala osnovni postupak prilikom utvrđivanja, poboljšanja i optimiziranja dinamičkih karakteristika građevinskih konstrukcija [26]. To je standardna metoda linearne seizmičke analize[27]. Modalnom analizom određuju se dinamički parametri, odnosno vlastite frekvencije, modalni oblici i prigušenja konstrukcije prilikom određene pobude. Važna je zbog konačnog formuliranja matematičkog modela, kalibriranja i upotrebljava se pri opisivanju cjelokupnog dinamičkog ponašanja konstrukcije.

Odgovor konstrukcije, koji čine pomak, brzina ili akceleracija, dostiže maksimalne vrijednosti pri određenim frekvencijama. Postupkom Fourierove transformacije, odnosno razlaganja signala na komponente s određenim frekvencijama, transformiramo odgovor konstrukcije iz vremenske u frekventnu domenu. Na mjestima rezonantnih frekvencija u frekventnom zapisu ističu se rezonantni vrhovi, dok iz pripadnih amplituda možemo odrediti modalne oblike. Postoje dvije osnovne metode eksperimentalne modalne analize: Klasična eksperimentalna modalna analiza (EMA) i Operacionalna modalna analiza (OMA) [28].

Prilikom provođenja dinamičkih ispitivanja, potrebna je oprema za prikupljanje i obradu podataka. Za mjerenje akceleracija korišteni su akcelerometri B&K 8340 i sustav za prikupljanje podataka B&K 3560C s odgovarajućim računalnim programom. Mjerni sustav sastoji se od:

- **Pobuđivača**
- **osjetilo ili senzor**
- **sustav za prikupljanje podataka**
- **sustav za analizu**



Slika 5.1. Dio opreme za ispitivanje

5.2. Operacionalna modalna analiza (OMA)

Početak 90-tih godina prošlog stoljeća počinje primjena nove vrste modalne analize, operacionalna modalna analiza (OMA), koja pronalazi široku primjenu pri dinamičkim ispitivanjima građevinskih konstrukcija. Glavna razlika u odnosu na klasičnu eksperimentalnu modalnu analizu (EMA) jest ta da su za određivanje modalnih parametara konstrukcije potrebni samo rezultati izmjerenih odgovora konstrukcije. Dakle, nije potrebno poznavati funkciju pobude niti je potrebno da bude kontrolirana, već se upotrebljava ambijentalna pobuda u operacionim uvjetima. Nadalje, usvojena je i pretpostavka da sile prilikom djelovanja na konstrukciju imaju prvenstveno stohastički, odnosno nasumični karakter [28].

Pobude koje se javljaju kod građevinskih konstrukcija, kao što su prometno opterećenje, vjetar, valovi i seizmička mikropodrtavanja tla aproksimiraju se bijelim šumom. Prilikom toga zadovoljava se pretpostavka da pobuda stohastički poprima frekvencije širokog raspona te se takvi parametri koriste kao ulazna pobuda [29].

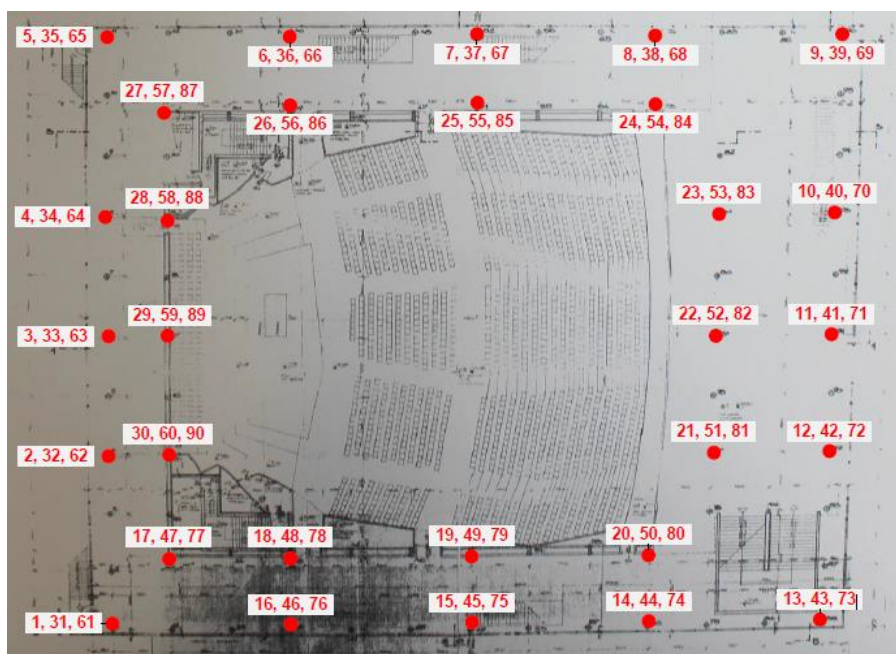
Veličina i masivnost glavne su karakteristike građevinskih konstrukcija, no poteškoće nastaju prilikom ispitivanja jer se vrlo teško pobuđuju na osciliranje zbog kompliciranog nanošenja kontrolirane pobude. Upravo zbog toga glavna je prednost OMA-e što pri ispitivanju nije potrebno kontrolirano pobuđivanje konstrukcije te je samim time postupak pojednostavljen, pogotovo kod velikih konstrukcija [30]. Koristi se jedino oprema za prikupljanje i obradu podataka, što cijeli proces čini jednostavnijim, bržim, a što je i najvažnije, znatno jeftinijim. Za vrijeme mjerenja, nepoznavanje ulazne pobude unosi određenu nesigurnost kod određivanja dinamičkih parametara, no uporabom sofisticiranih metoda OMA-e ta nesigurnost se svodi na minimalnu.

5.3. Mjerna mjesta i postupak ispitivanja

Mjerenjem ambijentalnih vibracija određeni su dinamički parametri konstrukcije. S obzirom na različitu složenost ispitivanih konstrukcija, odabran je određen broj karakterističnih točaka pojedinih etaža za koje je procijenjeno da će moći dobro aproksimirati ponašanje konstrukcije. Vibracije su mjerene u neposrednoj blizini krajnjih točaka objekta i uz vertikalne nosive elemente konstrukcije. Odabir mjernih točaka ovisio je o što boljem prikazu vlastitih oblika konstrukcije, ali također i o pristupačnosti pojedinih lokacija unutar samog objekta. U svakoj odabranoj točki, mjerenje je provedeno u dva horizontalna smjera, x i y, kao što je prikazano na slici.

5.3.1. *Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski*

U Koncertnoj dvorani Vatroslav Lisinski su mjerene vibracije na prvom i drugom katu, po trideset mjernih mjesta (točke 31-60 i 61-90), (Slika 5.2). Akceleracije u prizemlju nisu mjerene (točke 1-30). Na svakom mjernu mjestu, ukupno 60, mjerenje je provedeno u dva horizontalna smjera, x i y, kao što je prikazano na slici, što sveukupno čini 120 mjerenih stupnjeva slobode.

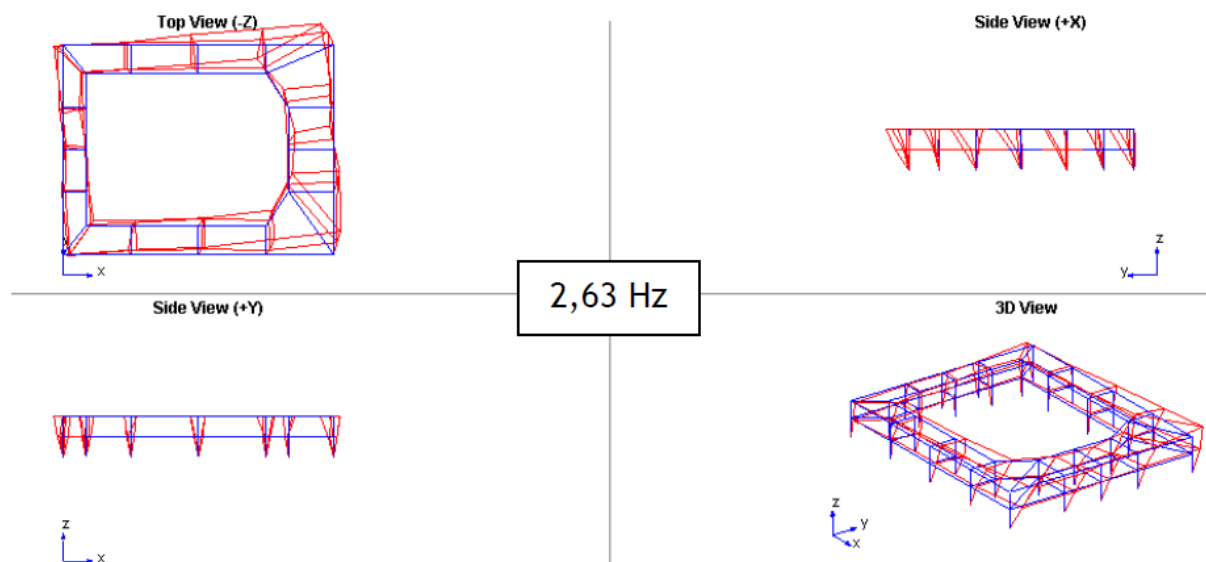


Slika 5.2. Prikaz mjernih mjesta u KD Vatroslav Lisinski

Rezultati vlastitih frekvencija i koeficijenata prigušenja prikazani su u narednoj tablici (Tablica 5.1). Slika 5.3 prikazuje eksperimentalno određen prvi vlastiti oblik titranja.

Tablica 5.1. Vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja

| Vlastita frekvencija [Hz] | VI. frek. st. dev. [Hz] | Koeficijent prigušenja [%] | Koef. prig. st. dev. [%] |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 2,63 | 0,05 | 2,39 | 1,31 |
| 5,49 | 0,03 | 0,45 | 0,20 |
| 5,88 | 0,13 | 0,49 | 0,31 |



Slika 5.3. Prvi vlastiti oblik titranja

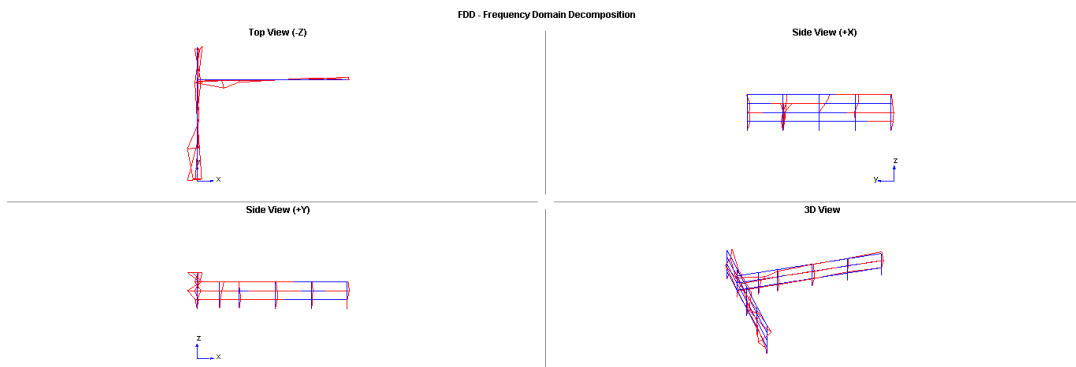
5.3.2. 1. Paviljon SD-a Stjepan Radić

U 1. paviljonu Studentskog doma Stjepan Radić su mjerene vibracije na hodnicima svakog kata, po deset mjernih mjesta, osim na zadnjem katu gdje je samo pet mjernih mjesta. Akceleracije u prizemlju nisu mjerene. Na svakom mjernu mjestu, ukupno 35, mjerenje je provedeno u dva horizontalna smjera, x i y, kao što je prikazano na slici, što sveukupno čini 70 mjerenih stupnjeva slobode.

Tablica 5.2. Vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja

| Vlastita frekvencija [Hz] | VI. frek. st. dev. [Hz] | Koeficijent prigušenja [%] | Koef. prig. st. dev. [%] |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 4.125 | 0.07037 | 2.393 | 1.117 |
| 6.125 | 0.1066 | 4.344 | 1.49 |
| 8.625 | 0.438219 | 4.306 | 1.956 |

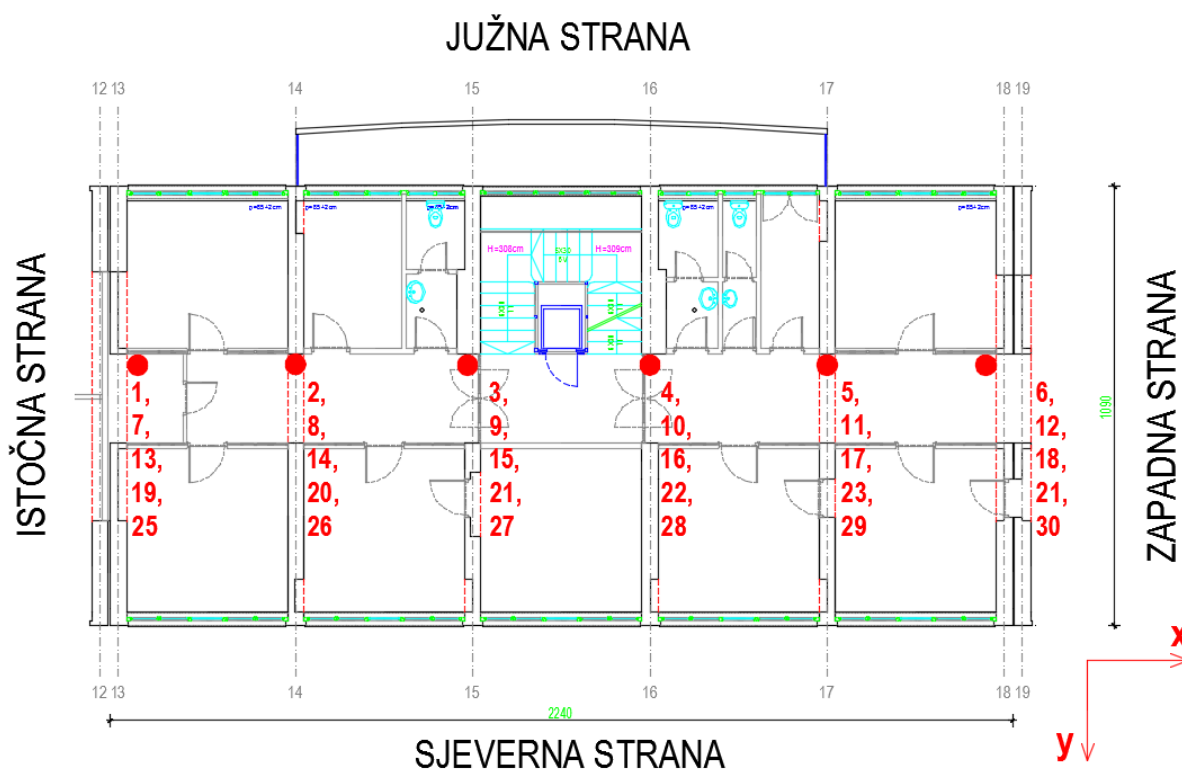
Rezultati vlastitih frekvencija i koeficijenata prigušenja prikazani su u prethodnoj tablici (Tablica 5.2). Slika 5.4 prikazuje eksperimentalno određen prvi vlastiti oblik titranja.



Slika 5.4. Prvi vlastiti oblik titranja

5.3.3. Zgrada PU Trnje

U zgradi Područnog ureda gradske uprave Trnje su mjerene vibracije na 6 mjernih mjesta po svakom katu (ukupno 30 mjernih mjesta) i to u dva smjera u horizontalnoj ravnini prema skicama mjernih mjesta (Slika 5.5). Mjerna mjesta su se nalazila duž južne strane hodnika zgrade. U prizemlju objekta nije provedeno mjerenje vibracija.

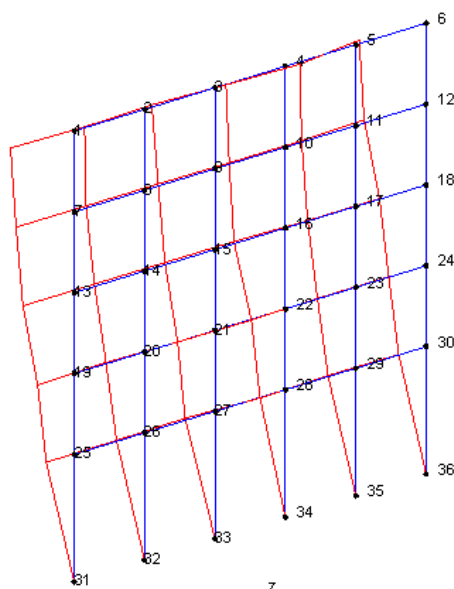


Slika 5.5. Skica mjernih mjesta u tloctru

Rezultati mjerenja vlastitih frekvencija i koeficijenata prigušenja objekta prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 5.3). Slika 5.6 prikazuje eksperimentalno određen prvi vlastiti oblik titranja objekta.

Tablica 5.3. Vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja objekta

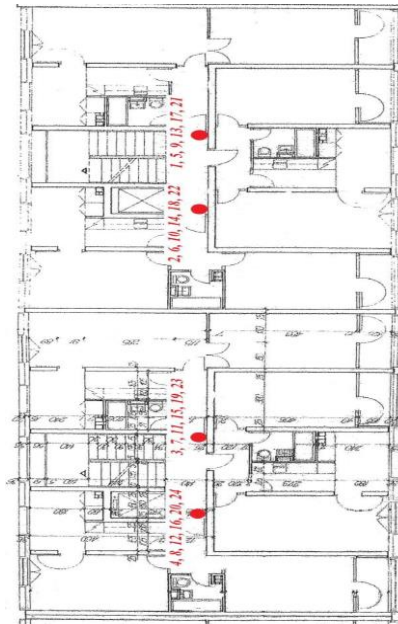
| Vlastita frekvencija [Hz] | Vl. frek. st. dev. [Hz] | Koeficijent prigušenja [%] | Koef. prig. st. dev. [%] |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1,959 | 0,02936 | 2,372 | 1,91 |
| 2,774 | 0,05305 | 2,474 | 0,7511 |
| 3,315 | 0,01667 | 2,174 | 2,073 |
| 4,235 | 0,04088 | 0,794 | 0,5416 |
| 4,966 | 0,07559 | 0,715 | 0,3818 |
| 5,986 | 0,03893 | 0,298 | 0,1152 |



Slika 5.5. Prvi vlastiti oblik titranja

5.3.4. **Siget 16**

U stambenoj zgradi u naselju Siget su mjerenje vibracije u oba stubišta rubne dilatacije, na svakom drugom katu po dva mjerna mjesta u svakom stubištu (Slika 5.6). Akceleracije u podrumu nisu mjerene. Na svakom mjernu mjestu, ukupno 20, mjerenje je provedeno u dva horizontalna smjera, x i y, kao što je prikazano na slici, što sveukupno čini 40 mjerenih stupnjeva slobode.

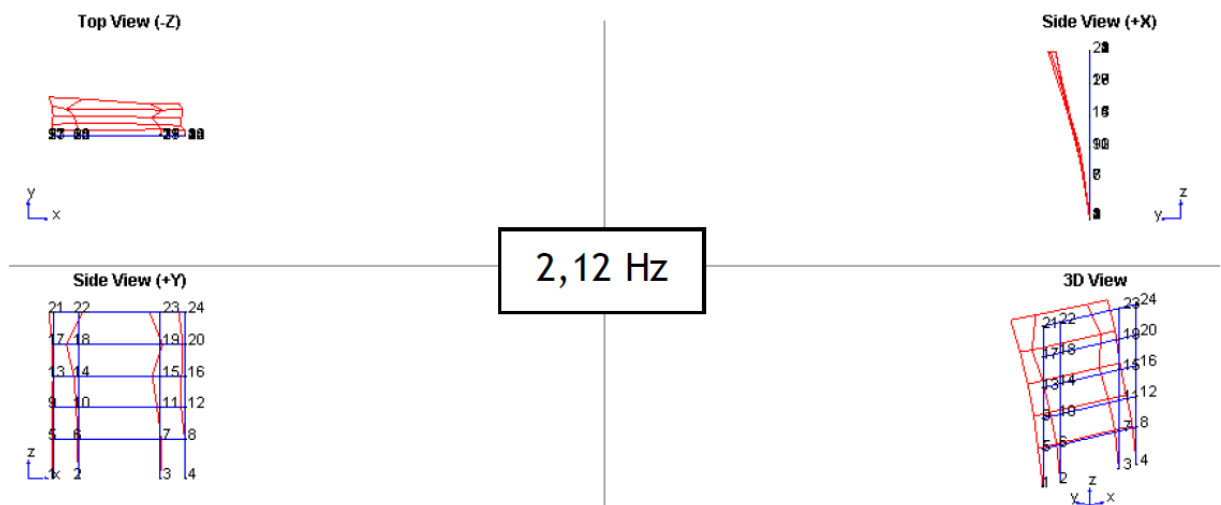


Slika 5.6. Mjerna mjesta u građevini (Siget 16)

Rezultati mjerenja vlastitih frekvencija i koeficijenata prigušenja objekta prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 5.4). Slika 5. prikazuje eksperimentalno određen prvi vlastiti oblik titranja objekta.

Tablica 5.4. Vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja objekta

| Vlastita frekvencija [Hz] | Vl. frek. st. dev. [Hz] | Koeficijent prigušenja [%] | Koef. prig. st. dev. [%] |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 2,12 | 0,09 | 2,24 | 0,84 |
| 2,44 | 0,08 | 2,07 | 0,60 |
| 3,39 | 0,02 | 2,36 | 0,94 |
| 4,63 | 0,04 | 4,15 | 1,01 |



Slika 5.7. Prvi vlastiti oblik titranja

5.4. Rezultati eksperimentalne analize

Dobiveni rezultati su poslužili za načelno vrednovanje konstrukcije slijedeći preporuke iz važećih normi posebice Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (EN 1998-3:2005+AC:2010) [31] [32], te Pravilnika o metodologiji za izradu procjena ugroženosti i planova zaštite i spašavanja [33].

Provedene analize su prilagođene većem broju građevina, stoga se nisu provodile detaljni numerički proračuni na nizu građevina. Također, mora se imati na umu:

- moguće grube greške u vrijeme gradnje (kontrola kvalitete),
- nedovoljno poznato ponašanje tla pri potresima jačih intenziteta,
- moguća izloženost ranijim potresima i drugim izvanrednim djelovanjima,
- zahvati i rekonstrukcije koje su se dogodile u prošlosti,
- nevidljiva oštećenja u strukturi konstrukcije nastala djelovanjem vode i atmosferilija,
- nedovoljno dobra dokumentacija o gradnji objekta ili njezino nepostojanje,
- nepoznavanje svojstava materijala građevine.

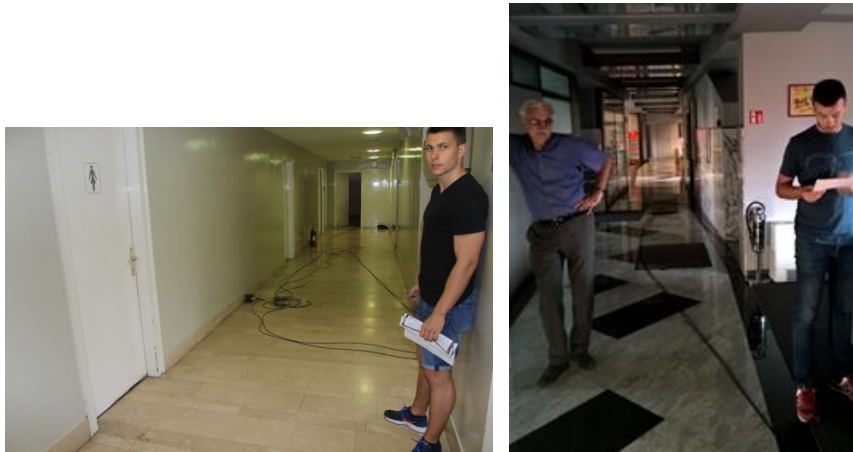
Rezultati eksperimentalnog određivanja dinamičkih parametara su se pokazali iznimno važni jer se prema njima može pouzdano kalibrirati numerički model, posebice jer ponekad nema pouzdanih ulaznih podataka, Treba imati na umu sve pretpostavke i karakter mjerenja ambijentalnih vibracija što se razlikuje u odnosu na stanje pri djelovanju jakih potresa (velike amplitude). Usporedbom eksperimentalno određenih i numeričkih vrijednosti vlastitih frekvencija i odgovarajućih oblika titranja utvrđeno je zadovoljavajuće poklapanje za osnovne oblike titranja u uzdužnom i poprečnom smjeru svih analiziranih konstrukcija što omogućuje pouzdanu procjenu ponašanja konstrukcije pri potresnim opterećenjima.

5.5. Komentar rezultata eksperimentalnih istraživanja na terenu

Metoda modalne analize korištena je u „Studiji za sanaciju posljedica od potresa“, kao i u završnim radovima autora obog rada kako bi se aproksimirali periodi i vlastiti oblici titranja zgrada u ambijentalnom okruženju (promet, vjetar...). Navedeni podatak veoma je bitan kako za kalibraciju sa numeričkim modelima tako i za daljnja eksperimentalna istraživanja na numeričkim modelima. Upravo takvi kalibrirani modeli pomažu **vjerodostojnijoj pretpostavci** stvarnog ponašanja građevine usljed nepredvidivih djelovanja poput potresa.

Dobiveni rezultati ovim eksperimentima su vlastite vibracije (tonovi) otkazivanja koji nam pojednostavljno rečeno prikazuju gdje je ispitana zgrada "najslabija"..

Potrebno je istaknuti da se u postojećim istraživanjima unutar Studije ponekad nije moglo dobro aproksimirati vlastite vibracije dobivene eksperimentalnim mjerenjima, nekada baš radi problema utjecaja razdjelnice susjedne zgrade. U svrhu poboljšanja aproksimacije odrađeni su dodatni uvidi u arhivske nacрте, obavljena potrebna mjerenja dimenzija na terenu kao i konzultacije u cilju dodatnog informiranja. Sve navedeno pomaže preciznijoj kalibraciji prilikom nadogradnje numeričkim modela stoga su i navedeni rezultati istraživanja točniji te će omogućiti točnije zaključke.



Slika 5.2. Eksperimentalno ispitivanje na terenu

6. METODE POTRESNE ANALIZE

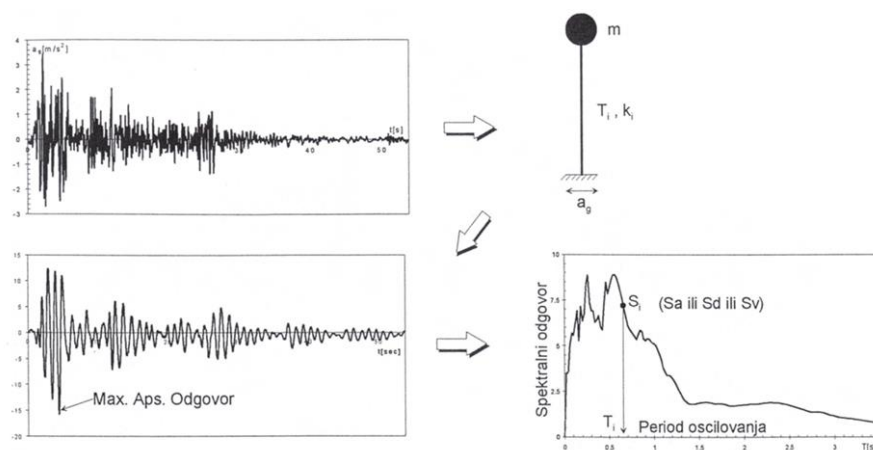
U ovom poglavlju biti će opisanekorištene metode pomoću kojih se analizirao utjecaj potresa na zgrade u ovom radu.

6.1. Metoda spektralne analize

Metoda spektralne analize (*engl. Response spectrum*) se najčešće primjenjuje u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Radi se o linearnom dinamičkom proračunu [34].

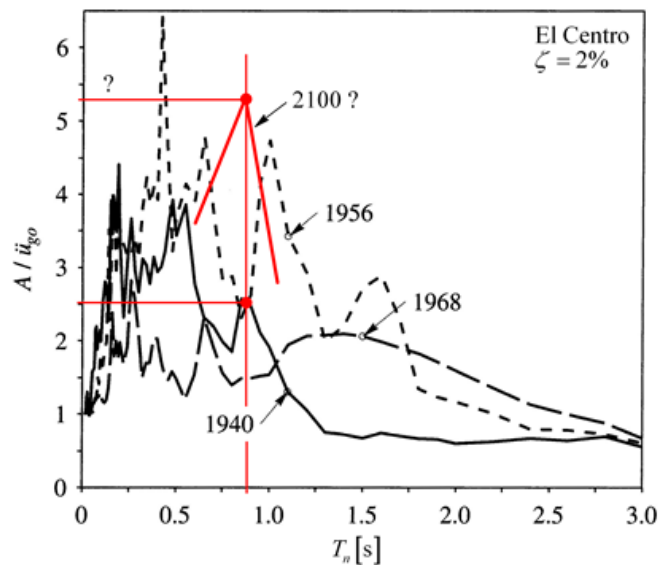
Za inženjersko vrednovanje zapisa potresa iskazanog u obliku toka ubrzanja za vrijeme trajanja potresa kao i za projektiranje koriste se **spektri odgovora** (*engl. response spectra*).

Spektar odgovora se može definirati kao skup maksimalnih odgovora sistema sa jednim stupnjem slobode na pobudu u obliku akcelerograma potresa. Radi se niz linearnih dinamičkih analiza iz kojih se izdvajaju samo maksimalni odgovori i to kao apsolutne vrijednosti. Spajanjem maksimalnih odgovora dobiva se krivulja koja se naziva spektar odgovora. Ulazno opterećenje je akcelerogram potresa. Rezultat proračuna je vremenski tok promjene promatrane veličine za koje se želi proračunati spektar odgovora. Navedeni postupak prikazan je na Slici 6.1.



Slika 6.1. Postupak proračuna spektra odgovora [11]

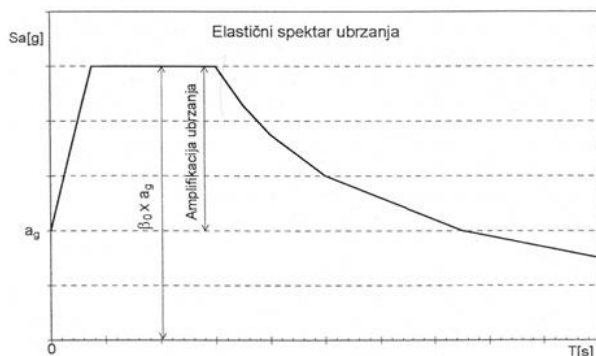
Projektni spektar je zamišljeni spektar koji sadrži procjenu djelovanja budućih potresa a koristi se za projektiranje potresno otpornih konstrukcija. Glavna zamisao je napraviti spektar koji zamjenjuje više potresa, a nazubljenosti prikazane na slikama aproksimirati dovoljno visokim pravcima.



Slika 6.2. Izrada spektra koji zamjenjuje više potresa [34]

Jedan spektar odgovora za odabrani zapis kretanja tla vrijedi samo za taj potres, odnosno odabrani akcelerogram. Obzirom da se ne može sa sigurnošću unaprijed reći kako će izgledati akcelerogram nekog budućeg potresa, trebalo bi pri proračunskim analizama obuhvatiti mogući utjecaj što više različitih zapisa kretanja tla (preporuča se 7 potresnih zapisa). Za svakodnevne projektantske potrebe to je nepraktično i veoma opširno, jer proračun i oblikovanje nosivih konstrukcija za djelovanje potresa predstavljaju samo jedan dio projekta neke građevine. Rješenje je nađeno u primjeni takozvanih **zaglađenih ili glatkih spektara odgovora** [11].

Ako ne postoje adekvatni zapisi sa sličnih područja, potrebno je prilagoditi zapise s područja drugačijih svojstava. uzevši u obzir činjenicu da je potres stohastička pojava pa je moguće uočiti pravilnosti koje se onda koriste za procjenu ponašanja budućih potresa, a projektni spektar je statistička obrada više spektralnih krivulja [35].



Slika 6.3. "Zaglađeni" ili "glatki" spektar ubrzanja [11]

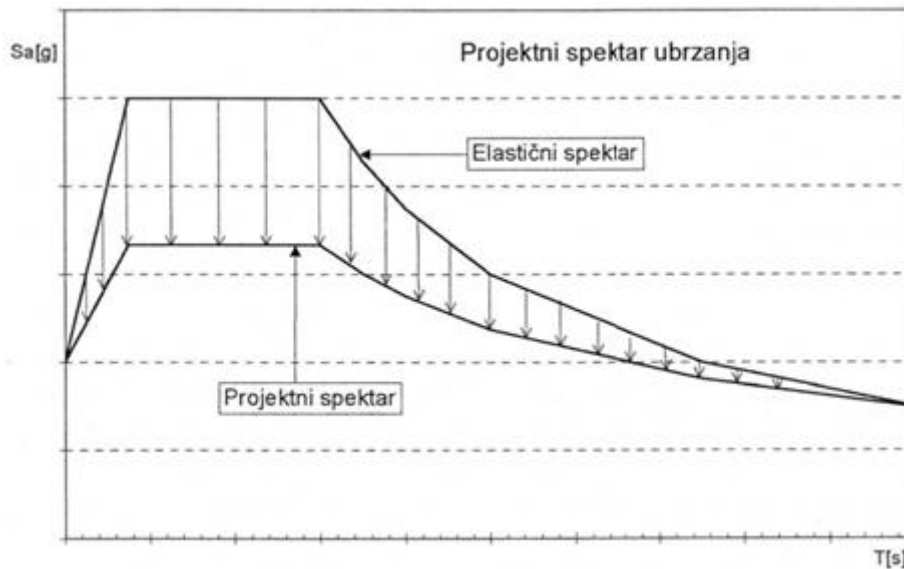
Tijekom ovog istraživanja primjećeno je da usljed upotrebe spektralne linije rezultati nekad idu "previše" na sigurnu stranu.

Prethodno opisani spektri odgovora su **elastični spektri**, jer su dobiveni pod pretpostavkom o linearno-elastičnom ponašanju materijala. Međutim, potres ima karakter slučajnog i kratkotrajnog opterećenja, tako da se pri dimenzioniranju konstrukcija za njegovo djelovanje uzimaju **koeficijenti sigurnosti (koef=1,0)**. Drugim riječima, prihvaća se činjenica da se tokom djelovanja jačih potresa naprezanje konstruktivnih elemenata približava njihovoj graničnoj nosivosti, a kod pojedinih dijelova konstrukcije ona može biti i dostignuta.[11].

Ponašanje konstrukcije za vrijeme djelovanja nekog mogućeg potresa se najbolje može pratiti proračunskim analizama koje pretpostavljaju nelinearan odgovor konstruktivnih elemenata. Međutim takvi proračuni su nepraktični za svakodnevnu inženjersku praksu u kojoj treba za relativno kratko vrijeme doći do pouzdanih rezultata. **Nelinearno ponašanje konstruktivnih elemenata, koje je realnost već kod srednje jakih potresa, nastoji obuhvatiti na što jednostavniji način** [11].

Elastični spektri ubrzanja, kao što je i primjer (na slici "Zaglađeni" ili "glatki" spektar ubrzanja), direktno se mogu koristiti za dimenzioniranje relativno **krutih** konstrukcija, koje prije loma ne mogu podnijeti nelinearne deformacije, ili je njihova veličina zanemarljiva. Suvremene nosive konstrukcije, izrađene uglavnom od armiranog betona i čelika, prije loma pokazuju **duktilno ponašanje**, koje se dodatnim mjerama konstruktivnog oblikovanja može i poboljšati. Zato se za proračun i dimenzioniranje takvih konstrukcija koriste **projektni spektri odgovora** [11].

Ordinate projektnih spektara su znatno manje nego kod elastičnih spektara, jer uzimaju u obzir mogućnost nelinearnog rada konstrukcije i disipaciju energije unesene potresom. Umanjenje potrebne nosivosti u odnosu na elastične spektre neposredno ovisi o duktilnosti nosivog sistema. Ilustracija postupka za dobivanje projektnog spektra odgovora je na slici (Projektni spektar odgovora). Projektni spektri su sastavni dio tehničkih propisa za proračun i oblikovanje građevina izloženih potresu [11].



Slika 6.4. Projektni spektar odgovora [11]

Primjena projektnih spektara za dimenzioniranje nosivih konstrukcija omogućava znatno racionalnije i vitkije konstrukcije, ali se mora imati na umu da nelinearni odgovor znači i oštećenja konstruktivnih elemenata koja je nakon djelovanja potresa potrebno popraviti.

Duktilne konstrukcije moguće proračunavati na znatno umanjene seizmičke sile u odnosu na konstrukcije koje se čitavo vrijeme ponašaju elastično, što je iz ekonomskih i estetskih razloga prihvatljivije.

Umjesto opsežne nelinearne analize takvih sistema, koja bi obuhvaćala disipaciju seizmičke energije kroz duktilno ponašanje, viskozno prigušenje i druge mehanizme, većina propisa među kojima je i Eurocode 8, predviđaju linearnu analizu koja se zasniva na reduciranom spektru odziva, takozvana „metoda sila“ (Force based design).

Prema Eurocodeu 8, redukcija elastičnog spektra odziva ostvaruje se uvođenjem faktora ponašanja q , koji je ovisan o nosivom sistemu i njegovoj regularnosti te razredu duktilnosti.

Način određivanja vrijednosti faktora ponašanja konstrukcije q definiran je odredbama Eurocodea 8. Prilikom odabira faktora ponašanja q potrebno je voditi računa da li elementi konstrukcije, te ona kao cjelina imaju dostatnu duktilnost i na taj način što točnije predvidjeti ponašanje same konstrukcije u potresu.

| Vrsta konstrukcije | DCM | DCH |
|---|-------------------------------|---------------------------------|
| okvirni sistem dvojni sistem zidni sistem sa povezanim zidovima | $3 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$ | $4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$ |
| zidini sistem sa nepovezanim zidovima | 3,0 | $4 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$ |
| sistem torzijski fleksibilan | 2,0 | 3,0 |
| sistem obrnutog njihala | 1,5 | 2,0 |

Slika 6.5. Definicija faktora ponašanja u ovisnosti o vrsti konstrukcije i razredu dutilnosti

Smanjenje elastičnog nivoa nosivosti predstavljeno je koeficijentom umanjenja ili njegovom recipročnom vrijednošću, faktorom ponašanja konstrukcije q . Navedeno je moguće prikazati sljedećom jednažbom:

$$F_y = \alpha_\mu F_{el} = \frac{F_{el}}{q} \quad (6.1)$$

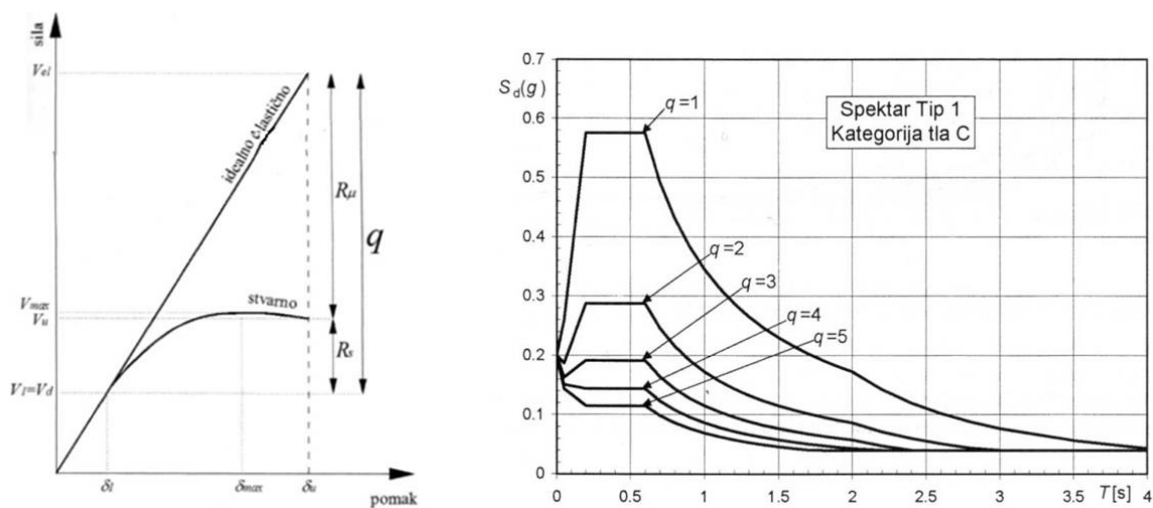
gdje je:

F_y - nosivost na granici plastifikacije (umanjena elastična nosivost)

α_μ - koeficijent umanjenja

F_{el} - nosivost konstrukcije koja se pri najjačem potresu ponaša elastično

q - faktor ponašanja konstrukcije



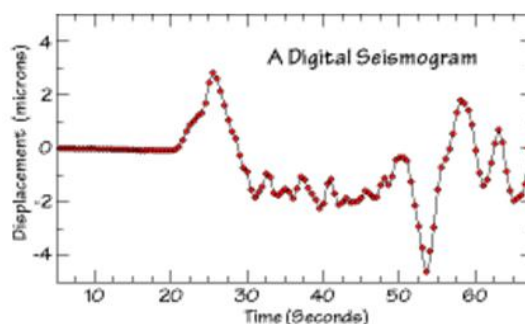
Slika 6.6. Definicija faktora ponašanja q [11]

6.2. Nelinearna metoda dinamičke analize u vremenu

U ovom poglavlju će biti prikazani procesi i teorijska podloga kojom se opisuje složena nelinearna metoda dinamičke analize u vremenu (engl. *time history analysis*).

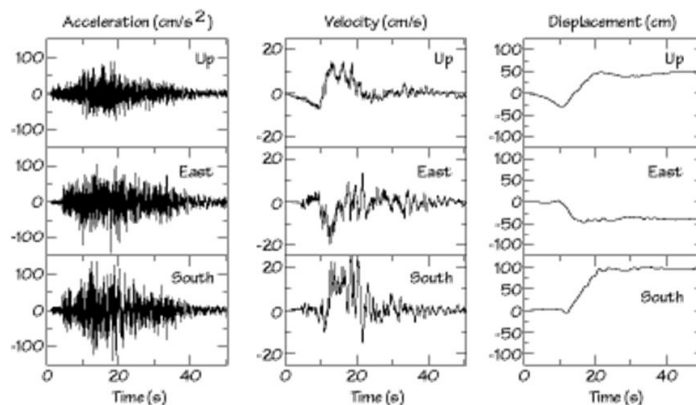
6.2.1. Bilježenje potresnog zapisa

U trenutku nastanka potresa, dolazi do iznenadnog pomaka na rasjedu i oslobađanja energije, a kroz stijensku masu prostiru se u okolinu potresni valovi. Bilježenje potresnog zapisa se provodi pomoću seizmografa, mjernog instrument koji bilježi pomake tla u funkciji od vremena, dok se sam potresni naziv naziva seizmogram. Obično se mjerenja vrše u tri međusobno okomita pravca: vertikalno, sjever-jug i istok-zapad [11].



Slika 6.7. Seizmogram potresa

Druga važna klasa instrumenata su **akcelerografi**. Služe za bilježenje vibracija velikih amplituda, odnosno velikih akceleracija u epicentralnom području, zapis koji dobijemo se naziva akcelerogram. Te akceleracije su posebno značajne za građevine jer ukazuju na silu kojom će na njih djelovati potresna trešnja. Na slici 6.8 je prikazan akcelerogram potresa koji se dogodio na obali Meksika 1985 [11].



Slika 6.8 Akcelerogram potresa

Težak je zadatak zabilježiti dugotrajne ($\geq 15s$) i jake trešnje ($\geq 0,20g$) stoga se one bilježe akcelerozgrafima za jake trešnje, a ne seizmografom. Za navedenu tvrdnju postoji nekoliko razloga:

- Nepoznati smijer potresa
- Neispravan rad (postoji opasnost od kvara)
- Oštećenja (udarci)

Potresi zapisi dobiveni mjerenjem vrlo su nepravilni po amplitudi i trajanju, te se za potrebe proračuna i propisa bilježe na tlu (ne u zgradi ili njenoj blizini). Sastoje se od 1500 do 3000 točkaka na razmaku od 1/50 do 1/100s [34].

6.2.2. **Metoda dinamičke analize u vremenu**

Prema odredbama danim u dijelu 3.2.3. EN 1998-1:2004 [8] u nelinearnoj dinamičkoj analizi konstrukcija u vremenu mogu se koristiti umjetni akcelerozgrami i realni SM akcelerozgrami zapisani u nekoj stvarnom potresu na lokaciji koja po svojim karakteristikama tla i seizmičnosti približno odgovara lokaciji predmetne konstrukcije.

Umjetni akcelerozgrami se dobivaju po posebnoj proceduri i ne smiju biti niži od 0,9 amplituda elastičnih spektara iz dijela EN 1998-1:2004 [8].

Kao rezultat rada s umjetnim akcelerozgramima dobiva se vremenski prikaz promjene neke određene veličine, kao što su na primjer pomaci katova, dok se primjenom elastičnih spektara iz dijela 3.2.2 [8] dobije za pomak samo jedan broj (prethodno objašnjeno u poglavlju 3.3)

Od svih raspoloživih metoda, nelinearni dinamički proračun upotrebom vremenskog zapisa preciznija je metoda, ali stoga i kompleksnija, te proračun same konstrukcije uporabom vremenskog zapisa najdulje traje i treba pažljivo interpretirati rezultate. To je inkrementalno iterativna metoda kojoj je osnovna varijabla vrijeme. Proračun uporabom vremenskog zapisa provodi se u vremenskim koracima čiji broj ovisi o duljini trajanja potresa, a u praksi to znači više tisuća inkrementata. Pri tom se u svakom koraku izračunavaju dinamičke karakteristike konstrukcije. Uzevši u obzir da je potrebno ponoviti proračun za minimalno tri zapisa, a preporučljivo ih je uzeti sedam ili više, može se zaključiti da je utrošak vremena potreban za ovu metodu neusporedivo veći od bilo koje druge ranije opisane metode. Treba dodati da je priprema zapisa također vremenski zahtjevan posao, kao i obrada izlaznih podataka kojih je iznimno mnogo.

Ovakvo značajno povećanje utroška vremena posljedica je neprihvatanja ograničenja koja su sastavni dio ostalih metoda. U ovoj analizi uzima se u obzir duljina trajanja potresa, ciklička priroda seizmičkog opterećenja, a s njom i akumulacija oštećenja, utjecaj degradacije konstrukcije uslijed njenog nelinearnog ponašanja na njena dinamička svojstva, itd.

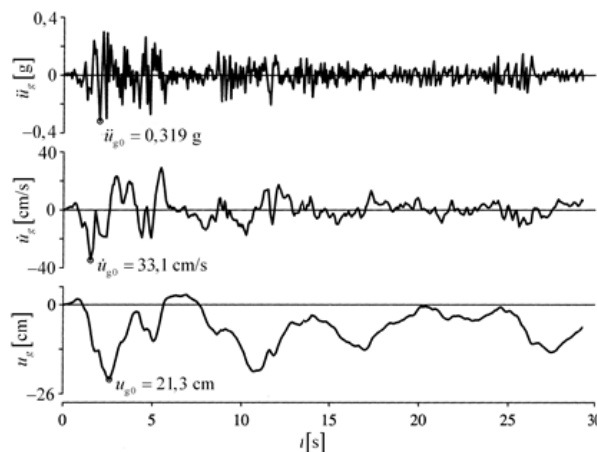
Iako metoda vremenskog zapisa teoretski nema ograničenja uporabe, u praksi se najčešće primjenjuje za proračun dvodimenzionalnih modela.

Seizmičko opterećenje u ovoj metodi dano je kao ubrzanje temeljnog tla u funkciji vremena što se prikazuje umjetnim akcelerogramima (koji je korišten u ovom istraživanju) ili zapisima stvarnih potresa.

6.2.3. **Izračun uporabom umjetnih vremenskih zapisa**

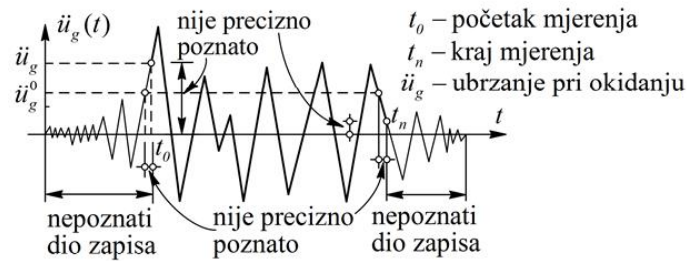
Djelovanje potresa može se simulirati umjetnim vremenskim zapisima koji se mogu generirati na način da bude u potpunosti u skladu s propisima izglađenim spektrima, a da istovremeno sadrže i komponente nepravilnosti i slučajnosti, što je slučaj i sa realnim potresima.

Uporabi je često potresni zapis: El Centro, smijer sjever – jug , 18.5.1940 nastao prilikom potresa u Kaliforniji [34].



Slika 6.9. Potresni zapis El Centro [34]

Zapis brzine i pomaka nastao je integriranjem ubrzanja i brzine. Okidanje uređaja nastupa ako je $u_g \geq u_g^0$, a za $u_g < u_g^0$ uređaj miruje. Posljedica toga je nepoznati početni dio zapisa (vidljiv na Slici 6.10.) zbog kojeg dolazi do problema integriranja [34].



Slika 6.10. Sravnavanje zapisa popravkom osnovne linije [34]

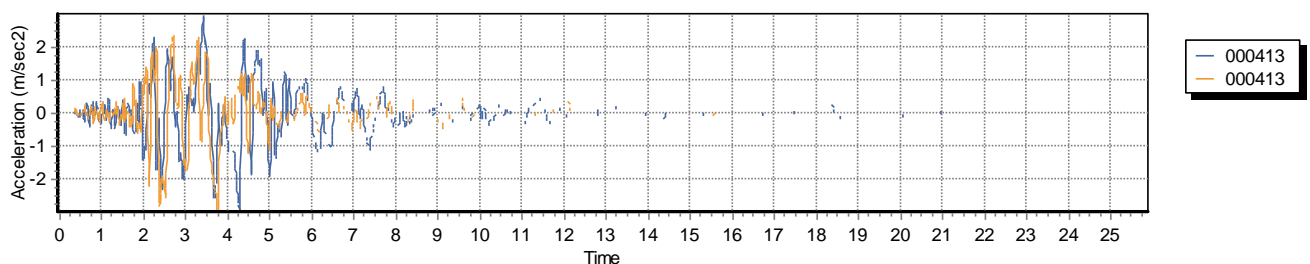
Ovaj potresni zapis se često koristi se prilikom proračuna u softwerima. Međutim, istraživanja su pokazala da nije prikladan za Grad Zagreb.

6.3. Potresni zapis korišten u ovom istraživanju

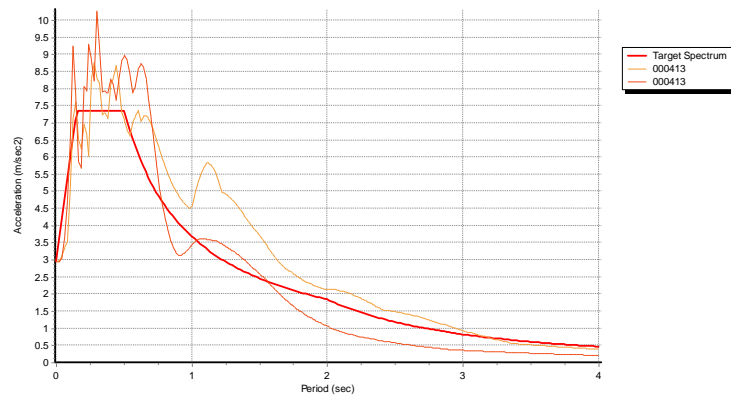
Sukladno prethodno navedenome, odabran je pristup u kojem je korišten potresni zapis iz Stona 1996. godine i metoda dinamičke analize u vremenu.

Zbog zahtjeva propisa koji kažu da je za takvu analizu potrebno primijeniti minimalno 7 potresnih zapisa (akcelerograma) primijenjena je konzervativnija i prihvatljivija metoda pretvaranja izvornog potresnog zapisa na kojem je provedno samo skaliranje i popravak osnovne linije u umjetni zaglađeni potresni zapis radi podudaranja s ciljanim spektrom prema Eurokodu 8.

| Waveform ID | Earthquake ID | Station ID | Earthquake Name | Date | Mw | Fault Mechanism | Epicentral Distance [km] | PGA_X [m/s ²] | PGA_Y [m/s ²] | PGV_X [m/s] | PGV_Y [m/s] | ID_X | ID_Y | Np_X | Np_Y | EC8 Site class |
|-------------|---------------|------------|--------------------|-----------|-----|-----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-------------|--------|--------|---------|---------|----------------|
| 413 | 192 | ST164 | Kalamata Greece | 9/13/1986 | 5.9 | normal | 10 | 2.1082 | 2.9095 | 0.3271 | 0.3226 | 5.4085 | 5.7724 | 0.88782 | 0.68617 | B |
| | | | | | | | SCALE FAC. | 1.396 | 1.012 | | | | | | | |

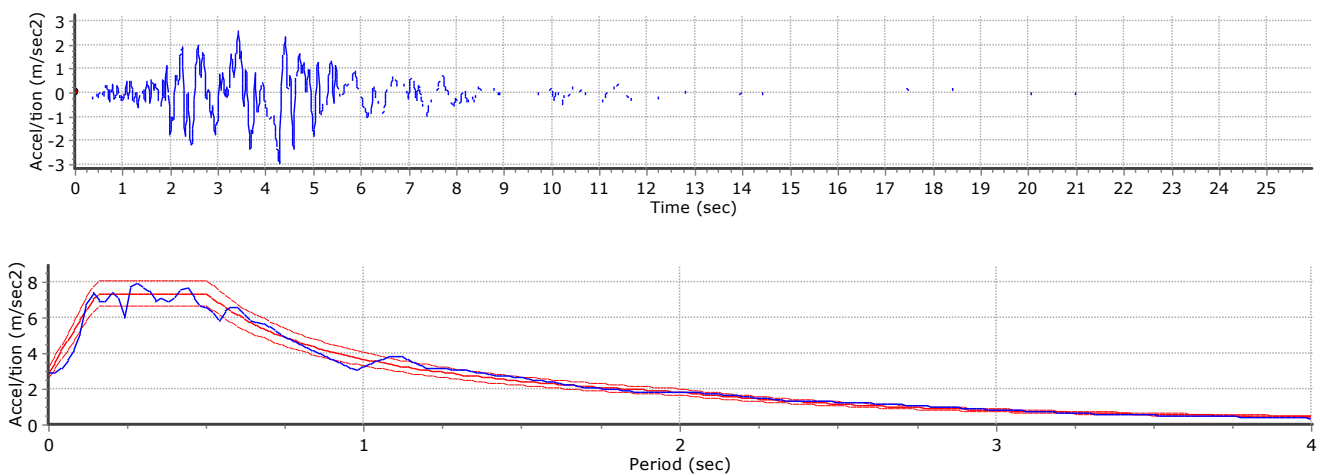


Slika 6.11. Zabilježeni potresni zapis

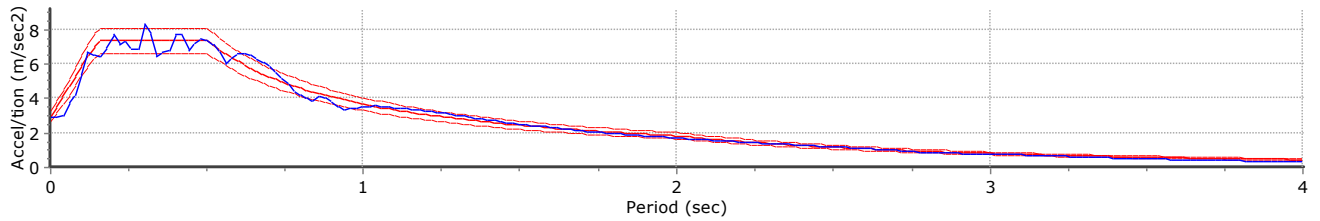
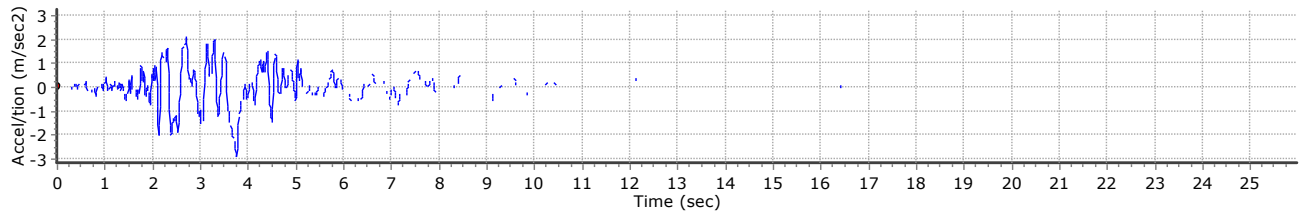


Slika 6.12. Skaliranje i popravak osnovne linije

Prilagodba izvornog zabilježenog zapisa provedena je u program SeismoArtif gdje se mijenjao frekvencijski sadržaj zapisa radi podudaranja s ciljanim spektrom prema Eurokodu 8 (vršno ubrzanje 0,25g, tip tla B). SeismoArtif je aplikacija koja može generirati umjetne potresne akcelerograme koji se podudaraju sa specifičnim spektrima odgovora koristeći različite metode proračuna i određene pretpostavke. [36]



Slika 6.13. Stvarni zapis u x smjeru i umjetni zapis 413_x_artificial



Slika 6.14. Stvarni zapis u y smjeru i umjetni zapis 413_x_artificial

Dobiveni potresni zapisi zadani su u programskom paketu Etabs kao opterećenje na kalibrirane konstrukcije umjesto standardnog potresnog zapisa El Centro iz prethodno navedenih razloga.

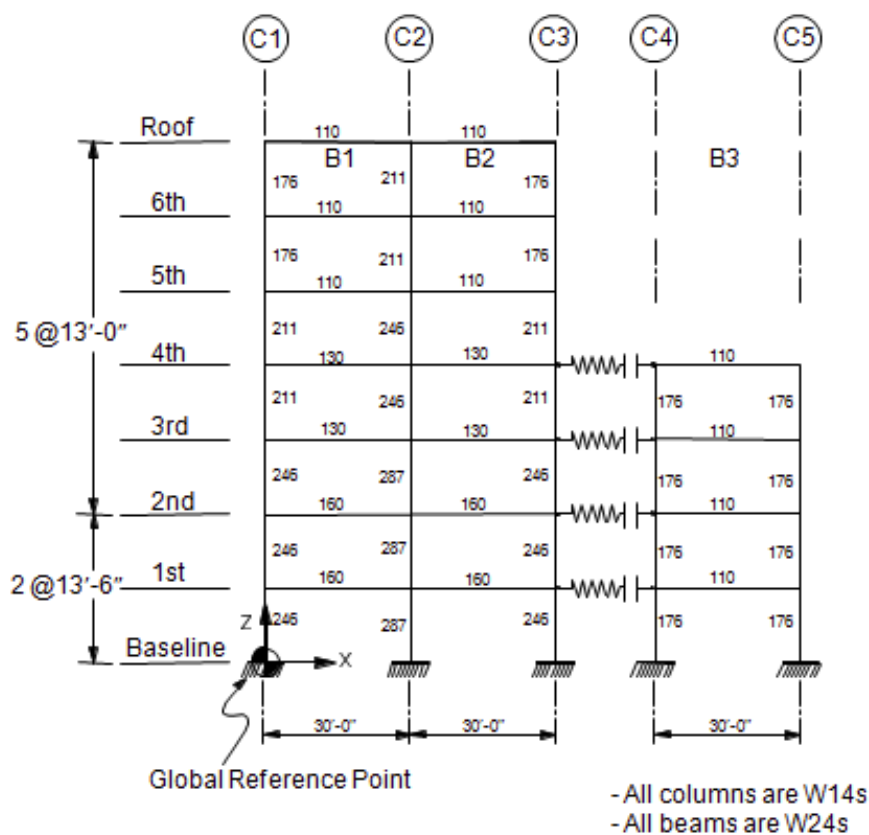
Iako je potres veoma nepredvidiva pojava smatramo da smo se ovakvim pristupom i analizom u okviru naših mogućnosti približili toj prirodnoj nepogodi čije se nastupanje predviđa u budućnosti.

7. NUMERIČKO MODELIRANJE

U ovom poglavlju prikazane su glavne karakteristike numeričkog modeliranja zgrada i razdjelnica među njima u programskom paketa Etabs 2015. Potreba za analizom realnih trodimenzijskih modela s problemom utjecaja sudaranja u nevedenom programskom paketu je najprikladnija primjenom nelinearne time history analize i nelinearnih gap elemenata. 2D analize u Etabsu ovog problema dokazale su da je softver dobar za aproksimaciju stoga se na osnovu tih rezultata prelazi na 3d alize realnih modela (Slika 7.1)

7.1. Programski paket ETABS 2015

Numerički modeli općenito služe za numeričku analizu konstrukcije, pomoću koje se u inženjerskoj praksi aproksimira ponašanje konstrukcije pod djelovanjem opterećenja. Proračun zgrada proveden je u programskom paketu ETABS 2015 [37], Computers and structures, Inc. specijaliziranom za projektiranje konstrukcija u seizmički aktivnim područjima.



Frame Elevation

Slika 7.1. Modeliranje sudaranja na primjeru 2D okvira

Numerički modeli i proračuni su prilagođeni ovoj fazi projekta u kojima nisu poznata u potpunosti svojstva materijala, kao ni trenutno stanje konstrukcije s obzirom na njezin životni vijek. Nastojalo se obuhvatiti globalno ponašanje građevine te odrediti eventualna kritična mjesta na koja bi se trebala obratiti posebna pozornost. Svakako treba imati u vidu da se postupak ocjene potresne otpornosti građevine treba provoditi stupnjevito i paralelno sa eksperimentalnim ispitivanjima konstrukcije i temeljnog tla. S obzirom na to, globalni numerički modeli moraju imati mogućnost nadogradnje novim i detaljnijim parametrima. Uz složenost numeričkih modela, važnu ulogu imaju i primijenjene metode numeričkog proračuna. Ovdje se također nastojalo ostaviti prostor za nadogradnju modela, a ujedno i postići zadovoljavajuće rezultate.

7.2. Metoda konačnih elemeanta

Numerički modeli se u programskom paketu ETABS proračunavaju pomoću **metode konačnih elemenata**. Osnovni koncept metode je da se realni model kontinuuma s beskonačno mnogo stupnjeva slobode podijeli na više manjih dijelova. Pritom se svaki dio (konačni element) ponaša kao samostalan, a s ostalima je povezan pomoću čvorova. Točna rješenja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi zadaća kontinuuma dobivaju se samo u čvorovima, a kvaliteta rješenja unutar elemenata ovisi o primijenjenom konačnom elementu i njegovoj složenosti. Primjenom ove metode mogu nastati i razne pogreške u proračunu, stoga je **neophodno poznavanje teorijskih postavki proračuna** kako bi se one mogle što više smanjiti. [38]

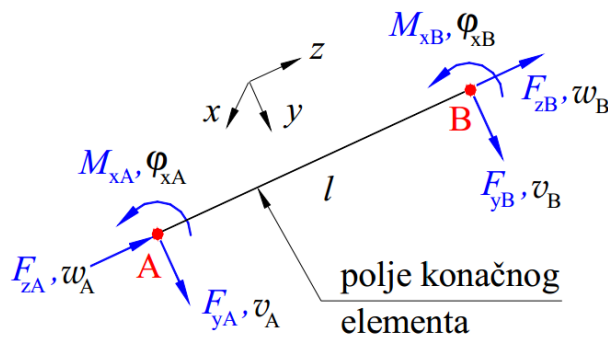
Korišteni su trodimenzionalni štapni konačni elementi i plošni konačni elementi ljuske sa 3 ili 4 čvora. Naprezanja i unutarnje sile u elementima se generiraju u 4 Gaussove točke i ekstrapoliraju u čvorove elementa. Treba spomenuti da se radi prilagodbe današnjim propisa i načinima dimenzioniranja elemenata prihvatio koncept transformiranja naprezanja u plošnim elementima u unutarnje sile svedene na os zidnog nosača (uzdužna i poprečna sila i moment savijanja). Kao metoda proračuna za potresno djelovanje u dijelu ispitivanja korištena je metoda spektralne analize kojom se kombiniraju oblici titranja sa pripadnim faktorima doprinosa za ukupni odgovor konstrukcije. Kriteriji kombiniranja oblika titranja i njihovih smjerova, kao i aktivacija mase građevine, je zadovoljen prema [31].

U drugom dijelu ispitivanja bilo je neophodno koristiti metodu dinamičke analize u vremenu s posebnim osvrtom na nelinearne *gap* elemente kojim se opisalo ponašanje na kontaktnim plohama dviju susjednih građevina. Programski paket nije usko specijaliziran za

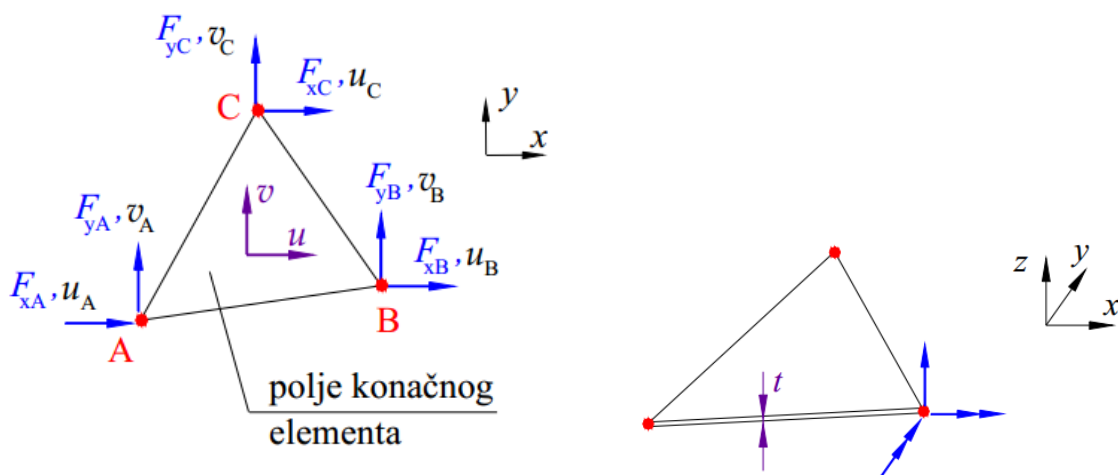
ovu vrstu problema stoga je obavljen niz testiranja u svrhu što boljeg prilagođavanja parametara.

7.2.1. Vrste konačnih elemenata

Konačni elementi mogu biti linijski, plošni i volumni, no u daljnjim poglavljima obrađivat će se samo štapni i plošni elementi zbog njihove primjene pri izradi numeričkog modela u okviru ovog rada. (Slika 7.2 i 7.3.). Volumni konačni elementi nisu korišteni u ovoj analizi, pretpostavljeno je da njihova upotreba nebi povećala preciznost rezultata značajno za ovu razinu istraživanja. Pretpostavka je da bi vrijeme proračuna raslo neproporcionalno u odnosu na preciznost rezultata.



Slika 7.2. Prikaz linijskog konačnog elementa



Slika 7.3.. Prikaz plošnog konačnog elementa,
ravninskog (lijevo) i prostornog (desno)

Štapni element (Slika 7.2) je definiran kao općeniti trodimenzionalni (engl. *beam-column*) element koji uključuje dvoosno savijanje, torzije, uzdužne deformacije i dvoosne posmične deformacije po Bathe i Wilsonu (1976). [39]

Plošni elementi (Slika 7.3) se koriste u analizi 3D modelima u kojima sve zidove (engl. *wall*) i ploče (engl. *floor*) modeliramo plošnim elementima. Elementi su već klasični u numeričkim modelima stoga će biti navedene samo osnovne postavke.

Modelirajući konvencionalnim, plošnim elementima, diskretiziramo tijelo definirajući mu srednju plohu, pa naknadno zadajemo debljinu elementa (eng. *section property*). Mogu biti definirani s tri ili četiri točke odabirući membransko ili pločasto ponašanje.

Homogeno pločasto ponašanje uključuje komponente savijanja van ravnine u oba smjera i translacijsku komponentu u smjeru normale okomite na ravninu elementa. Tanke ploče su definirane Kirchohoff-ovom formulacijom koja isključuje posmične deformacije a u programu se definira pomoći *shell-thin* naredbe, dok je debela ploča definirana Mindlin/Reissner-ovom formulacijom koja uključuje efekte posmičnih deformacija. U ovom istraživanju u potpunosti su korištene tanke ploče. Pomaci van ravnine su kubični. [24]

Svaki element ima svoj lokalni koordinatni sustav za definiranje materijalnih karakteristika, opterećenja ili za prikaz rezultata. Varijabilna *four to eighth point* formulacija numeričke integracije je korištena za krutost elementa, a naprezanja i unutarnje sile su određene u 2x2 Gaussovima točkama integracije i u konačnici ekstrapolirani u čvorove. [24]

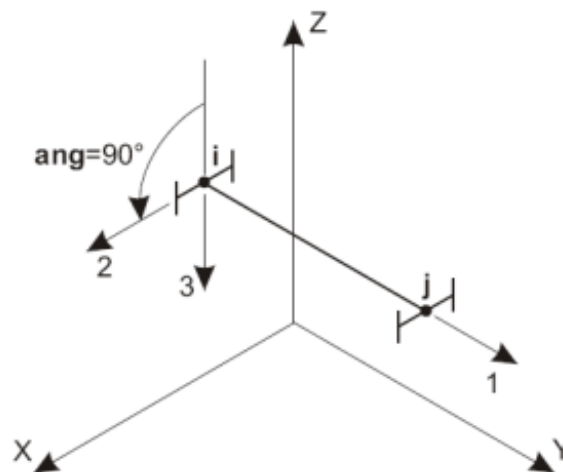
7.3. Numeričko modeliranje razdjelnica

7.3.1. **Modificirani linijski kontaktni (engl. *link*) elementi**

Svojstva dodirnih ploha susjednih građevina u modelima će se opisivati s modificiranim linijskim kontaktnim (engl. *link*) elementima. Korištena inačica *link* elementa je osnovni *gap* element. Pravilnim definiranjem karakteristika pojedinog *linka* se interpretiralo ponašanje kontaktnim plohami.

Po definiciji *link* element služi za povezivanje dva čvora (*i* i *j*). Svaki element je definiran kao šest neovisnih opruga za svaki od šest stupnjeva slobode po čvoru. *Link* ima svoj lokalni koordinatni sustav za definiranje sila (u čvorovima) i deformacija (uzduž elementa) te za interpretaciju rezultata. Osi su označene 1, 2 i 3 s tim da je os 1 uzduž

elementa i odgovara uzdužnim deformacijama, a definirana je smjerom zadavanja od čvora i do čvora j (**Error! Reference source not found.**). Osi 2 i 3 se odnose na posmične deformacije u ravninama okomitim na element i može im se naknadno zadati orijentacija. U ovom istraživanju prilikom modeliranja sa krutim oprugama spriječene su deformacije u sva 3 smijera, 1, 2 i 3, dok je usljed modeliranja *gap* elemenata, dopuštena samo deformacija opruge u uzdužnom (1) smjeru (Slika 7.4)



Slika 7.4. Lokalne osi *link* elementa [40]

Šest nezavisnih unutarnjih deformacija su definirane za *link* element, a računaju se iz relativnog pomaka čvora j u odnosu na čvor i u njihovom koordinatnom sustavu:

- uzdužna $d_{u1} = u_{1j} + u_{1i}$
- poprečna u 1-2 ravnini $d_{u2} = u_{2j} + u_{2i} - dj2 \cdot r_{3j} - (L - dj2)r_{3i}$
- poprečna u 1-3 ravnini $d_{u3} = u_{3j} + u_{3i} - dj3 \cdot r_{2j} - (L - dj3)r_{2i}$
- torzija $d_{r1} = r_{1j} + r_{1i}$
- čisto savijanje u ravnini 1-3 $d_{r2} = r_{2i} + r_{2j}$
- čisto savijanje u ravnini 1-2 $d_{r3} = r_{3j} + r_{3i}$

gdje su:

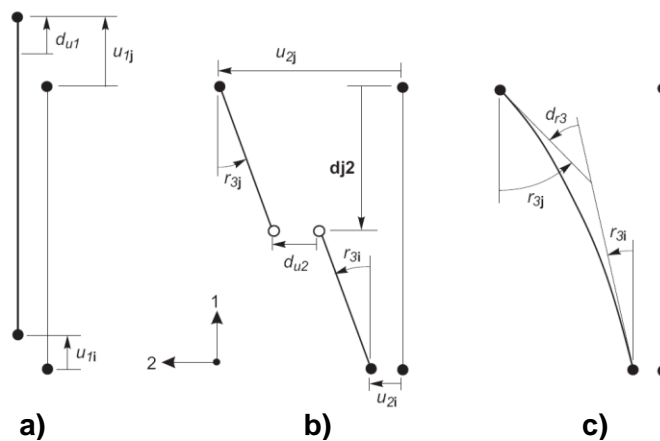
$u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, r_{1i}, r_{2i}, r_{3i}$ - translacije i rotacije čvora i ;

$u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}$ - translacije i rotacije čvora j ;

$dj2$ - udaljenost od čvora j do mjesta gdje je mjerena posmična deformacija d_{u2} ;

$dj3$ - udaljenost od čvora j do mjesta gdje je mjerena posmična deformacija d_{u3} ;

L - duljina elementa



Slika 7.5. Unutarnje deformacije link elementa: uzdužne deformacije (a), posmične deformacije (b) i deformacije uzrokovane savijanjem (c) [24]

Niz različitih karakteristika se može definirati za ponašanje *linka* tj. njegov odnos sila-deformacija. Raznim vrstama *link*-ova se pokrivaju većina karakterističnih odnosa elemenata u građevinarstvu:

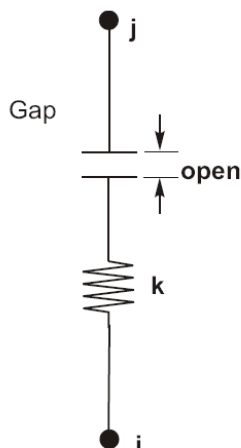
- multi-linearna jednoosna elastičnost
- jednoosna plastičnost
- viskoelastično prigušenje
- multi-linearna jednoosna plastičnost sa više tipova histereznog ponašanja
- dvoosna plastičnost - bazni izolator
- *gap* (samo tlak)
- *hook* (samo vlak)
- friction-pendulum bazni izolator sa i bez prevencije od odizanja koji ujedno može biti *gap-friction* za kontaktno ponašanje

S obzirom na karakteristike koje mu se pridruže te vrste analize koja se provodi postoje tri vrste ponašanja: linearno, nelinearno i ovisno o frekvenciji (engl. *frequency-dependant*). Za vrijeme nelinearne analize, nelinearni odnos sila-deformacija se koristi za sve stupnjeve slobode za koje su definirani nelinearni parametri, a za sve ostalo se koriste linearni parametri. [24]

Bitno je napomenuti da svaki odnos sila-deformacija koristi linearnu krutost kako je nelinearni efekt neznatan (npr. closed gap), a kada k ima vrijednost nula ne može biti generirana nelinearna sila za taj stupanj slobode. Unutar svakog stupnja slobode možemo imati nekoliko komponenti koji mogu biti neovisne ili spregnute (engl. *coupled*). [24]

7.3.2. **Gap elementi**

Inačicu *link elemenata* koja ima linearno ponašanje u tlaku, a bez mogućnosti preuzimanja vlačnih sila nazivamo *gap element* (0.). *Gap element* korišten je u ovom istraživanju za proučanje sudarne sile između susjednih građevina.



Slika 7.6: Nelinearne gap karakteristike za uzdužne deformacije[40]

Za svaki stupanj slobode se može definirati neovisni *gap element*. Sve unutarnje deformacije su neovisne tj. zatvaranje ili otvaranje (engl. *open*) *gapa* ne utječe na ponašanje ostalih deformacija.

Isključenje vlačnih sila zahtijeva i materijalno nelinearni proračun stoga je nužno definirati nelinearne parametre uključujući i krutost *linka* za taj stupanj slobode. Nelinearni odnos sile f i deformacije d za *gap element* je definiran:

$$f = \begin{cases} k(d + open) & \text{ako je } d + open < 0 \\ 0 & \text{ostalo} \end{cases} \quad (7.1) [40]$$

Za krutost *linka* u teoriji se preporučuje koristiti vrijednost $10^2 - 10^4$ veću od krutosti vezanih elemenata ako se želi ograničiti na elastične deformacije u pojedinoj opruzi (*linku*). Velike vrijednosti se ne preporučuju jer mogu napraviti značajne numeričke poteškoće. Utjecaj parametra krutosti biti će testiran na realnim kalibriranim numeričkim modelima (poglavlje 8.1)

7.3.3. Definiranje razdjelnica u programskom paketu

Za numeričko modeliranje mogu se koristiti različite metode aproksimacije kontakta dvije zgrade, ali s obzirom na:

- **raspoložive ulazne podatke** - npr. nema podataka o prigušenju i krutosti pa bi se ubacivanjem pretpostavljenih vrijednosti previše aproksimiralo, što bi točnost rezultata moglo dovesti u pitanje. Korištene su preporučene uobičajene vrijednosti iz literature, a njihova točnost provjerena je i usporedbom rezultata (poglavlje 8.1)
- **preporuke iz programskog paketa** - programski paket Etabs preporučuje vrijednosti i ima provedene patch testove kojima su te vrijednosti provjerene
- **primjenjivost u programskom paketu** - složeni modeli zahtijevaju složene parametarske analize, dok se u ovom istraživanju ipak provode ispitivanja na realnim primjerima i stoga koristimo jednostavniji model koji dovoljno dobro opisuje razdjelicu i daje dovoljno dobre rezultate

Uzevši u obzir navedeni slijed, za povezivanje dviju susjednih građevina, odnosno za definiranje razdjelnica, u ovom istraživanju su se koristili *gap* elementi (poglavlje 7.3.2). Ovi elementi, koji su povezani na čvorove susjednih građevina, postaju aktivni kad se dvije susjedne građevine približavaju, tj. kad građevine ne titraju u fazi, a deaktiviraju se kad se čvorovi odmiču (vlačna faza). **Sudarna sila** mjeri se kad se građevine približe jedna drugoj jedna drugoj za veći iznos od međusobnog razmaka, tj. aktiviraju se kad razmak prijeđe iz 0 u negativnu vrijednost.

Nelinearni odnos između deformacija i naprezanja koji je prisutan prilikom korištenja *gap* elemenata povlači korištenje složene nelinearne *time history* analize. To u praksi znači da interakcija linearne *response spectrum* analize i nelinearnih *gap* elemenata ne bi mogla dati ispravne rezultate.

| Directional Properties | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Direction | Fixed | NonLinear | Properties |
| <input checked="" type="checkbox"/> U1 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for U1..."/> |
| <input type="checkbox"/> U2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for U2..."/> |
| <input type="checkbox"/> U3 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for U3..."/> |
| <input type="checkbox"/> R1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for R1..."/> |
| <input type="checkbox"/> R2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for R2..."/> |
| <input type="checkbox"/> R3 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="button" value="Modify/Show for R3..."/> |

Slika 7.7. Definiranje gap elemenata u programu ETABS

Radi bolje i kvalitetnije usporedbe rezultata istraživanja, na jednoj vrsti modela su se, umjesto gap elemenata, koristili kruti i nedeformabilni *link* elementi. U tom slučaju, računalni program analizira ponašanje zgrade u nizu kao **neprekinute cjeline**. U tom slučaju promatralo ponašanje konstrukcije kao da razdjelnica između dvije građevine uopće ne postoji.

Slika 7.8. Definiranje krutih *link* elemenata u programu ETABS

7.4. Zadavanje potresa u programskom paketu

Umjetni vremenski zapisi u ovom istraživanju generirani su programom SeismoArtif. Pri generiranju vremenskih zapisa poštivana su navedena pravila. Ukupno trajanje potresa je 25 sekundi, potresnog zapisa 30 sekundi. Razlika od 5 sekundi se ostavila radi promatranja ponašanja konstrukcije nakon potresa prestanka djelovanja potresa. Unutar postavljenih granica simuliraju se nepravilne i slučajne vibracije prisutne kod stvarnih potresa.

U cijelom istraživanju došlo je do promjene pretpostavljenog faktora konstrukcije (koji se kreće između 1,5 i 3 za analizirane zgrade) s njihove prave vrijednosti na vrijednost 1,0.

Takav pristup odabran je iz nekoliko razloga:

- Ujednačavanje svih ispitanih zgrada s obzirom na faktor ponašanja
- Korištena metoda dinamičke analize u vremenu prilikom analize koristi faktor ponašanja 1,0
- Lakša približna kontrola ispravnost i složenih rezultata dobivenih metodom dinamičke analize u vremenu pomoću raznih metoda kao što su npr (kontrola pomaka vrha zgrade – odstupanje ne bi smjelo biti veće od 20%).

Prije proračuna putem metode dinamičke analize u vremenu, osigurano je postupno nanošenje opterećenja (vlastite težine, dodatnog stalnog i dijela korisnog opterećenja) na konstrukciju korištenjem funkcije „Ramp“. Funkcija „Ramp“ počinje u nultoj sekundi analize te postupno povećava aktiviranu masu do desete sekunde zapisa, nakon čega je aktivirana čitava masa konstrukcije.

7.5. Vrste ispitanih modela

U svrhu ovog istraživanja bit će izrađeno nekoliko vrsta numeričkih modela za svaku analiziranu zgradu. Svaki vrsta će imati različito definirane određene parametre te stoga i različite rezultate proračuna. Rezultati svih modela pojedine zgrade bit će uspoređeni međusobno da se u konačnici može analizirati utjecaj razdjelnica za svaku pojedinu zgradu, što je i cilj ovog istraživanja.

Prvi model je **osnovni model**, preuzet iz baze podataka. On predstavlja samostalan dio zgrade, odnosno dio zgrade koji nije u interakciji sa okolnim građevinama, čime se omogućuje slobodan rad konstrukcije bez utjecaja sudaranja.

Drugi model je **torzijski spriječen u jednoj osi** tako da su definirane nepomični ležajevi na mjestu razdjelnice, koji zamjenjuju susjednu građevinu tj. omogućuje rotaciju promatranog modela oko susjedne građevine kao da je ona kruta i nepomična. Ležajevi moraju biti definirani u jednoj vertikalnoj osi oko koje se događa zakretanje zgrade. U slučaju kada bi se ležajevi definirali na drukčiji način, rezultati ne bi bili mjerodavni jer bi tada dva ili više ležaja činili spreg sila te se ne bi dobio željeni efekt zakretanja građevine. Problem kod ovog modela je činjenica da ležaj preuzima unutarnje sile od elemenata konstrukcije u svojoj blizini, pa će se moći jedino usporediti sile u elementima koji se nalaze na većoj udaljenosti od ležajeva.

Treći model (**kruto povezane zgrade**) je definiran tako da razdjelnica između dvije građevine uopće ne postoji, nego se radi o jednoj cijelovitoj konstrukciji. Takvi modeli će prikazati ponašanje dviju susjednih građevina u slučaju da se one tijekom potresa zajedno gibaju. Postoje dva načina kako je moguće definirati takav spoj. Jedan od njih je da na mjestu razdjelnice, dvije susjedne građevine imaju zajednični rubni element (npr. nosivi zid) ili su rubni elementi međusobno spojeni krutom vezom. Kod drugog načina se na mjestu razdjelnice definiraju kruti i nedeformabilni *link* elementi (vidi poglavlje 7.3.1) koje spajaju dva

susjedna rubna elementa od svake građevine. U ovom istraživanju odabran je drugi način od dva navedena.

Četvrti model prikazuje najbolju **aproksimaciju stvarnog stanja na terenu**. Najdetaljniji je, a ujedno i najprecizniji model. U njemu je korištena nelinearna metoda dinamičke analize u vremenu (vidi poglavlje 6.2) za razliku od dosadašnjih, gdje se koristila linearna metoda spektralne analize. Korišteni su i nelinearni *gap* elementi na mestima razdjelnica, a razmak, tj. otvor *gap* elementa između njih je približno pretpostavljeni stvaran razmak između promatranih zgrada. Moguća greška u procjeni smatra se zanemarivom za ovakvu vrstu istraživanja.

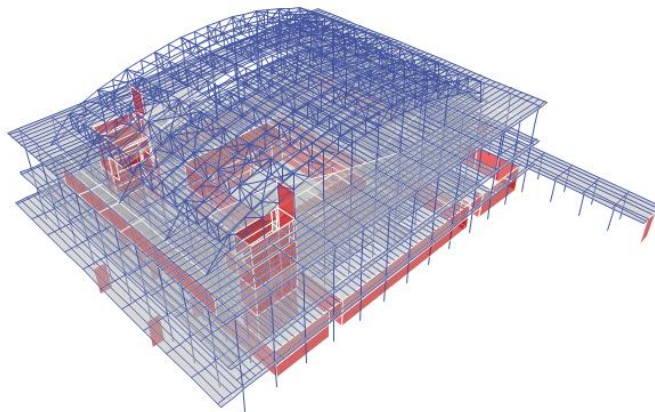
U nastavku će biti nabrojani svi definirani modeli za svaku zgradu ispitivanu u sklopu ovog istraživanja

7.5.1. **Koncertna Dvorana Vatroslav Lisinski**

Prema dostupnoj dokumentaciji, vizualnom pregledu građevine i provedenim terenskim istraživanjima, napravljeno je nekoliko numeričkih modela KD Vatroslav Lisinski. Svaki model prikazuje zaseban slučaj utjecaja dilatacije (objašnjeno na početku poglavlja poglavlja 7.5.).

U nastavku su prikazani svi modeli s kratkim opisom:

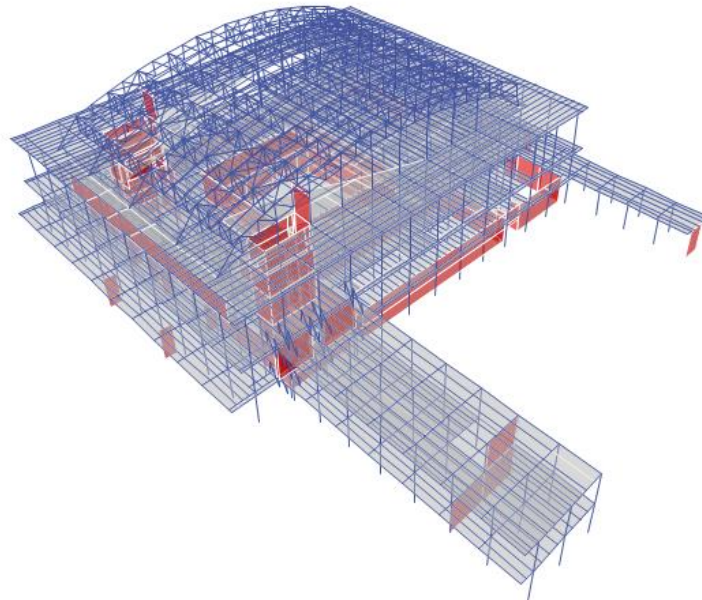
- 1. model: koncertna dvorana bez poslovne zgrade
 - inicijalni model iz baze podataka
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q



Slika 7.9. Numerički model koncertne dvorane

- 2. model: koncertna dvorana torzijski fiksirana u jednoj
 - na mjestu dodira s poslovnom zgradom definirani sunepomični ležajevi
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q

- 3. model: koncertna dvorana i poslovna zgrada zajedno
 - međusobno spojeni krutim oprugama
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja η



Slika 7.10. Numerički model s koncertne dvorane i poslovne zgrade

- 4. model: koncertna dvorana i poslovna zgrada zajedno
 - međusobno spojene *gap* elementima
 - provedena metoda dinamičke analize u vremenu s periodima 0,5 s i 0,4 s za definiranje krivlje prigušenja
 - analizirana 2 slučaja s različitim otvorom *gap* elemenata – 1 mm i 5 mm

| | |
|---|---|
| <p>Identification</p> <p>Property Name: <input type="text" value="Gap 1 mm"/></p> <p>Direction: <input type="text" value="U1"/></p> <p>Type: <input type="text" value="Gap"/></p> <p>NonLinear: <input type="text" value="Yes"/></p> | <p>Identification</p> <p>Property Name: <input type="text" value="Gap 5 mm"/></p> <p>Direction: <input type="text" value="U1"/></p> <p>Type: <input type="text" value="Gap"/></p> <p>NonLinear: <input type="text" value="Yes"/></p> |
| <p>Linear Properties</p> <p>Effective Stiffness: <input type="text" value="0"/> kN/m</p> <p>Effective Damping: <input type="text" value="0"/> kN-s/m</p> | <p>Linear Properties</p> <p>Effective Stiffness: <input type="text" value="0"/> kN/m</p> <p>Effective Damping: <input type="text" value="0"/> kN-s/m</p> |
| <p>Nonlinear Properties</p> <p>Stiffness: <input type="text" value="1000000"/> kN/m</p> <p>Open: <input type="text" value="1"/> mm</p> | <p>Nonlinear Properties</p> <p>Stiffness: <input type="text" value="1000000"/> kN/m</p> <p>Open: <input type="text" value="5"/> mm</p> |

Slika 7.11. Prikaz definiranih *gap* elemenata“: 1 mm i 5 mm

Damping Coefficients

Direct Specification

Specify Damping by Period

Specify Damping by Frequency

| | Mass Proportional Coefficient | Stiffness Proportional Coefficient |
|--|-------------------------------|------------------------------------|
| | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| | 0,6981 1/sec | 3,537E-03 sec |
| | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

| | Period | Frequency | Damping |
|--------|---------|------------------------------|---------|
| First | 0,5 sec | <input type="text"/> cyc/sec | 0,05 |
| Second | 0,4 sec | <input type="text"/> cyc/sec | 0,05 |

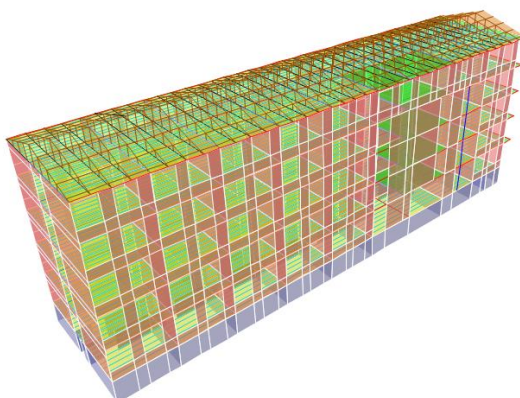
Slika 7.12. Prikaz perioda za definiranje krivlje prigušenja

7.5.2. 1. *Paviljon SD-a Stjepan Radić*

Prema dostupnoj dokumentaciji, vizualnom pregledu građevine i provedenim terenskim istraživanjima, napravljeno je nekoliko numeričkih modela 1.-og paviljona Studentskog doma Stjepan Radić. Svaki model prikazuje zaseban slučaj utjecaja dilatacije (objašnjeno na početku poglavlja poglavlja 7.5.).

U nastavku su prikazani svi modeli s kratkim opisom:

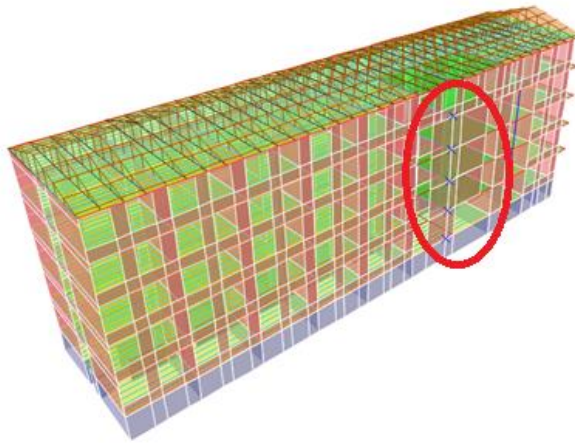
- 1. model: veće krilo paviljona samostalno bez manjeg
- korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q



Slika 7.13. Numerički model samo većeg krila

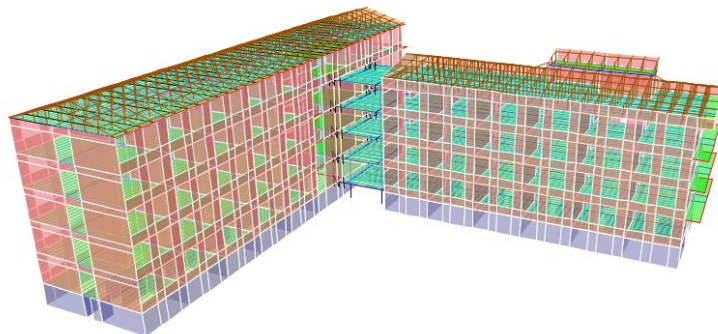
- 2. model: veće krilo paviljona torzijski fiksirano u jednoj osi

- na mjestu razdjelnice definirani su nepomični ležajevi
- korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q



Slika 7.14.. Numerički model torzijski fiksiran u jednoj osi

- 3. model (2 varijante):
 - oba krila kontinuirano spojena
 - inicijalni model iz baze podataka
 - horizontalni elementi manjeg krila (grede i ploče) su povezani s elementima većeg krila upetom vezom
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q
 - na spoju dvaju krila definirane krute opruge
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q



Slika 7.15. Numerički model oba krila zajedno

- 4. model: krila spojena *gap* elementima

- korištena metoda dinamičke analize u vremenu s periodima 0,5 s i 0,4 s za definiranje krivulje prigušenja
- analizirana 3 slučaja s različitim otvorom *gap* elemenata – 1 mm, 5 mm i 10 mm
- slučaj s *gap* elementima otvora 10 mm je analiziran u još 3 varijante s različitim periodima za definiranje krivulje prigušenja:
 - 0,5 s i 0,25 s
 - 0,5 s i 0,12 s
 - 0,6 s i 0,05 s

The image shows three panels for defining gap elements. Each panel has three sections: Identification, Linear Properties, and Nonlinear Properties.

| Property Name | Direction | Type | NonLinear | Effective Stiffness (kN/m) | Effective Damping (kN-s/m) | Stiffness (kN/m) | Open (mm) |
|---------------|-----------|------|-----------|----------------------------|----------------------------|------------------|-----------|
| Gap 1 mm | U1 | Gap | Yes | 0 | 0 | 1000000 | 1 |
| Gap 5 mm | U1 | Gap | Yes | 0 | 0 | 1000000 | 5 |
| Gap 10 mm | U1 | Gap | Yes | 0 | 0 | 1000000 | 10 |

Slika 7.16. Prikaz definiranih *gap* elemenata: 1 mm, 5 mm i 10 mm

The image shows three panels for defining damping coefficients. Each panel has three sections: Mass Proportional Coefficient, Stiffness Proportional Coefficient, and Damping.

| Case | Mass Proportional Coefficient | Stiffness Proportional Coefficient | First Period (sec) | Second Period (sec) | First Damping | Second Damping |
|--------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------|----------------|
| Top Left | 0,6981 | 3,537E-03 | 0,5 | 0,4 | 0,05 | 0,05 |
| Top Right | 0,8378 | 2,653E-03 | 0,5 | 0,25 | 0,05 | 0,05 |
| Bottom Left | 1,0134 | 1,540E-03 | 0,5 | 0,12 | 0,05 | 0,05 |
| Bottom Right | 0,9666 | 7,346E-04 | 0,6 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

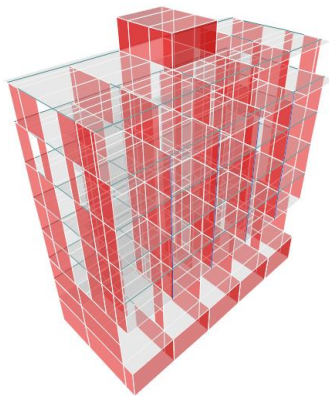
Slika 7.17. Prikaz perioda za definiranje krivulje prigušenja

7.5.3. Zgrada PU Trnje

Prema dostupnoj dokumentaciji, vizualnom pregledu građevine i provedenim terenskim istraživanjima, napravljeno je nekoliko numeričkih modela zgrade Područnog ureda gradske uprave Trnje. Svaki model prikazuje zaseban slučaj utjecaja dilatacije (objašnjeno na početku poglavlja poglavlja 7.5.).

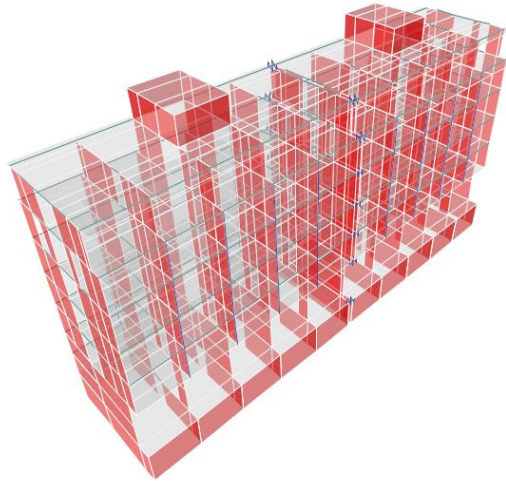
U nastavku su prikazani svi modeli s kratkim opisom:

- 1. model: jedna dilatacija samostalno
 - inicijalni model iz baze podataka
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q

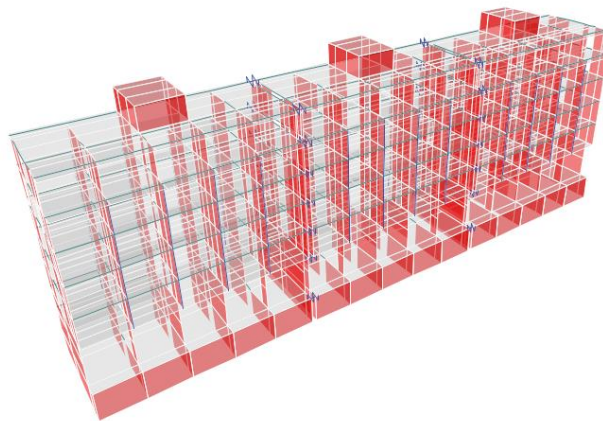


Slika 7.18. Numerički model jedne dilatacije

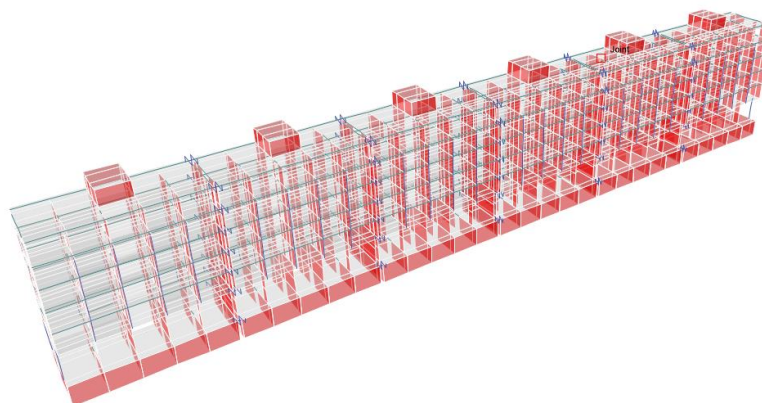
- 2. model: jedna dilatacija torzijski fiksirana u jednoj osi
 - na mjestu razdjelnice s jedne strane definirani su nepomični ležajevi
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q
- 3. model: više dilatacija spojenih krutim oprugama
 - rubni elementi dilatacija međusobno spojeni krutim oprugama
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q
 - analizirana 3 slučaja s različitim brojem dilatacija:
 - dvije dilatacije međusobno spojene
 - tri dilatacije međusobno spojene
 - svih šest dilatacija međusobno spojene



Slika 7.19. Numerički model dviju dilatacija



Slika 7.20. Numerički model triju dilatacija



Slika 7.21. Numerički model svih šest dilatacija

- 4. model: više dilatacija spojenih *gap* elementima
- korištena metoda dinamičke analize u vremenu s periodima 0,5 s i 0,4 s za definiranje krivulje prigušenja

- otvor *gap* elemenata - 10 mm
- analizirana 3 slučaja s različitim brojem dilatacija:
 - dvije dilatacije međusobno spojene
 - tri dilatacije međusobno spojene
 - svih šest dilatacija međusobno spojene (s)
- analizirana je i varijanta modela s dvije dilatacije gdje je krutost „gap“ elemenata smanjena s 10^6 na 10^2 kN/m

| Property Name | Value |
|---------------|-----------|
| Property Name | Gap 10 mm |
| Direction | U1 |
| Type | Gap |
| NonLinear | Yes |

| Property Name | Value |
|---------------|-----------|
| Property Name | Gap 10 mm |
| Direction | U1 |
| Type | Gap |
| NonLinear | Yes |

| Property Name | Value | Unit |
|---------------------|-------|--------|
| Effective Stiffness | q | kN/m |
| Effective Damping | 0 | kN-s/m |

| Property Name | Value | Unit |
|---------------------|-------|--------|
| Effective Stiffness | q | kN/m |
| Effective Damping | 0 | kN-s/m |

| Property Name | Value | Unit |
|---------------|---------|------|
| Stiffness | 1000000 | kN/m |
| Open | 10 | mm |

| Property Name | Value | Unit |
|---------------|-------|------|
| Stiffness | 100 | kN/m |
| Open | 10 | mm |

Slika 7.22. Prikaz definiranih *gap* elemenata uobičajene i smanjene krutosti

Damping Coefficients

Direct Specification
 Specify Damping by Period
 Specify Damping by Frequency

| | Mass Proportional Coefficient | Stiffness Proportional Coefficient |
|--|-------------------------------|------------------------------------|
| | 0,6981 1/sec | 3,537E-03 sec |

| | Period | Frequency | Damping |
|--------|---------|-----------|---------|
| First | 0,5 sec | cyc/sec | 0,05 |
| Second | 0,4 sec | cyc/sec | 0,05 |

Recalculate Coefficients

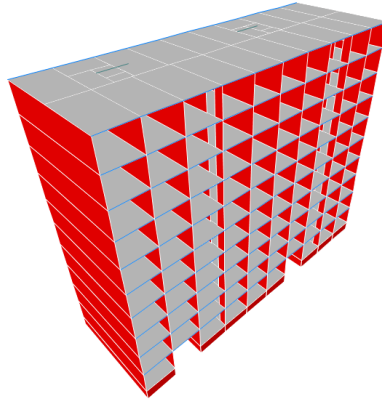
Slika 7.23. Prikaz perioda za definiranje krivulje prigušenja

7.5.4. **Siget 16**

Prema dostupnoj dokumentaciji, vizualnom pregledu građevine i provedenim terenskim istraživanjima, napravljeno je nekoliko numeričkih modela stambene zgrade u naselju Siget. Svaki model prikazuje zaseban slučaj utjecaja dilatacije (objašnjeno na početku poglavlja poglavlja 7.5.).

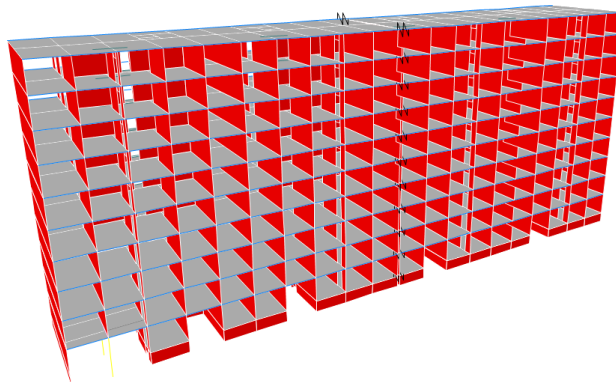
U nastavku su prikazani svi modeli s kratkim opisom:

- 1. model: jedna (rubna) dilatacija samostalno
 - inicijalni model iz baze podataka
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q

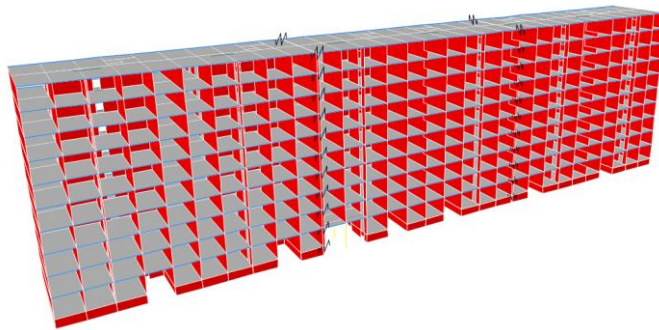


Slika 7.24. Numerički model jedne dilatacije

- 2. model: jedna (rubna) dilatacija torzijski fiksirana u jednoj osi
 - na mjestu razdjelnice definirani su nepomični ležajevi (na drugoj strani se ne nalazi nikakva građevina)
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q
- 3. model: više dilatacija spojenih krutim oprugama
 - rubni elementi dilatacija međusobno spojeni krutim oprugama
 - korištena metoda spektralne analize s izmjenjenim faktorom ponašanja q
 - analizirana 2 slučaja s različitim brojem dilatacija:
 - dvije dilatacije međusobno spojene
 - sve tri dilatacije međusobno spojene
 - dodatno su analizirana još 2 slučaja s dvije i tri dilatacije, gdje se pokušala aproksimirati simetričnost cijele zgrade (umjesto stupova i prolaza za automobile su definirani zidovi tako da je cijela zgrada približno simetrična)



Slika 7.25. Numerički model dviju dilatacija



Slika 7.26. Numerički model svih triju dilatacija

- 4. model: više dilatacija spojenih *gap* elementima
 - korištena metoda dinamičke analize u vremenu s periodima 0,55 s i 0,09 s za definiranje krivulje prigušenja
 - otvor *gap* elemenata - 10 mm
 - analizirana 2 slučaja s različitim brojem dilatacija:
 - dvije dilatacije međusobno spojene
 - sve tri dilatacije međusobno spojene
 - dodatno su analizirana još 2 slučaja s dvije i tri dilatacije, gdje se pokušala aproksimirati simetričnost cijele zgrade (umjesto stupova i prolaza za automobile su definirani zidovi tako da je cijela zgrada približno simetrična)

| Identification | |
|----------------------|--------------|
| Property Name | Gap 10 mm |
| Direction | U1 |
| Type | Gap |
| NonLinear | Yes |
| Linear Properties | |
| Effective Stiffness | 0 kN/m |
| Effective Damping | 0 kN-s/m |
| Nonlinear Properties | |
| Stiffness | 1000000 kN/m |
| Open | 10 mm |

Slika 7.27. Prikaz definiranih *gap* elemenata

Slika 7.28. Prikaz perioda za definiranje krivulje prigušenja

7.6. Zgrade s različitim brojem katova

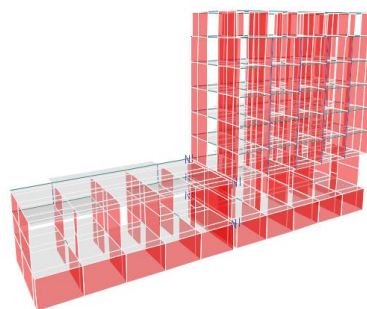
Kao što je navedeno u poglavlju 3.4, problem sudaranja zgrada se javlja, između ostalog, i kada dvije susjedne zgrade imaju različit broj katova istih razina. U ovom istraživanju se također istražio i taj slučaj budući da u Hrvatskoj ne postoje nikakva prijašnja istraživanja u vezi tog problema. S obzirom da u bazi podataka „Studije za saniranje posljedica od potresa“ ne postoje trenutno modeli koji se mogu primjeniti za ovakav slučaj, primjer sudaranja zgrada različitih katova se ispitivao koristeći prethodno analizirane modele (zgrade u naselju Siget i zgrada PU Trnje).

Sve dilatacije navedenih zgrada imaju isti broj katova pa su morali napraviti modeli u kojima bi jedna dilatacija imala manji ili veći broj katova nego druga. Također se broj dilatacija u modelima smanjio na dvije (umjesto tri i šest) kako bi se proučio izolirani slučaj interakciju dviju građevina, a ne više zgrada u nizu. Korištena je metoda dinamičke analize u vremenu s periodima za definiranje krivulje prigušenja koji odgovaraju originalnim modelima s jednakim brojem katova. Nelinearni *gap* elementi su definirani na mjestu razdjelnica s veličinom otvora koji također odgovaraju originalnim modelima s jednakim brojem katova.

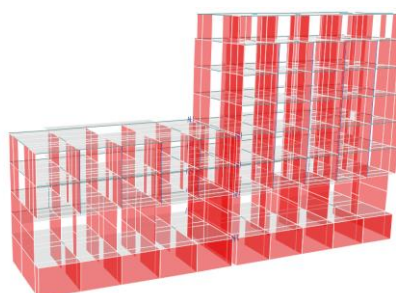
Primjeri različitih katnosti koji su korišteni:

- P+2 i P+8
- P+4 i P+8
- P+6 i P+8

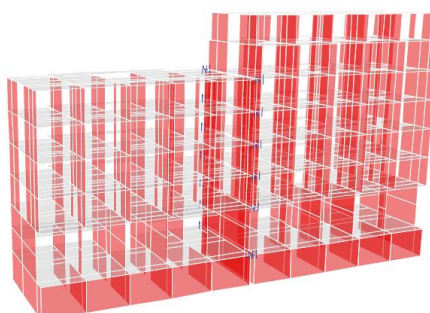
Na sljedećim slikama su prikazani modeli različitih katnosti izrađeni prema zgradi Pu Trnje:



Slika 7.29. Numerički model katnosti P+2 i P+8 (PU Trnje)

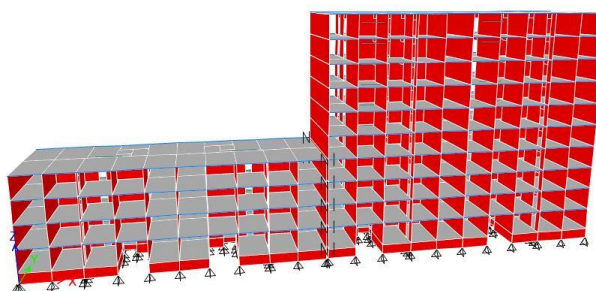


Slika 7.30. Numerički model katnosti P+4 i P+8 (PU Trnje)

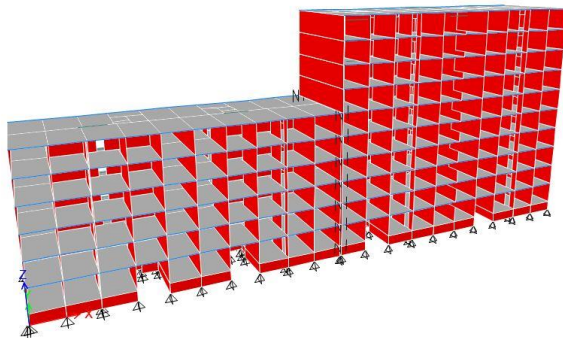


Slika 7.31. Numerički model katnosti P+6 i P+8 (PU Trnje)

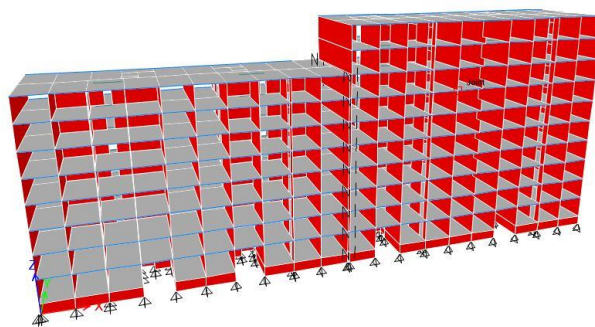
Na slikama XX-XX su prikazani modeli različitih katnosti izrađeni prema zgradi u naselju Siget.



Slika 7.32. Numerički model katnosti P+2 i P+8 (Siget)



Slika 7.33. Numerički model katnosti P+4 i P+8 (Siget)



Slika 7.34. Numerički model katnosti P+6 i P+8 (Siget)

8. USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA

Sveukupno je analizirano 41 različiti model. Računalni proračuni su bili dugotrajni i iscrpni, pogotovo kod modela s metodom dinamičke analize u vremenu, gdje se u prosjeku čekalo po nekoliko sati po modelu za obradu podataka. Rezultati proračuna su detaljni te zauzimaju veliku količinu memorije računala (preko 6 terabajta), što daleko premašuje proračune za uobičajene analize, i vremenski i količinski, koje se svakodnevno koriste. Sažeti prikaz svih analiziranih modela se nalazi u Tablici 8.1.

Tablica 8.1 Prikaz broja obrađenih modela

| Građevina | 1. Samostalan model | 2. Model torzijski fiksiran u jednoj osi | 3. Model s <i>linkelementima</i> | 4. Model s <i>gap</i> elementima |
|--------------------------------|---------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| KD Vatroslav Lisinski | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 1. paviljon SD-a Stjepan Radić | 1 | 1 | 2 | 7 |
| Zgrada PU Trnje | 1 | 1 | 3 | 4 |
| Zgrada u Sigetu | 1 | 1 | 4 | 4 |
| | | | | |
| Zgrade različitih katova | P+2 i P+8 | P+4 i P+8 | P+6 i P+8 | |
| | 2 | 2 | 2 | |

Metoda dinamičke analize u vremenu je rijetko korištena metoda u današnjoj inženjerskoj praksi. Zbog manjka stručne literature i iskustva u radu s njom, moralo se pristupiti samom ispitivanju zadanih parametara da bi se konačni rezultati mogli smatrati vjerodostojnim. Ispitivani parametri su periodi za zadavanje krivulje prigušenja i krutost *gap* elemenata, a rezultati ispitivanja su priloženi u poglavlju 8.1.

Cilj ovog istraživanja je u konačnici dobiti parametar s kojim će se nadopuniti „Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštetljivosti“ iz „Studije za saniranje posljedica od potresa“(LIT). S obzirom na veliku količinu podataka i rezultata koji su dobiveni prilikom proračuna modela, prikazat će se samo rezultati pomoću kojih se najpreciznije može doći do bitnih zaključaka za ovo istraživanje, a to su:

- Vrijednost uzdužne sile u pojedinim *gap* elementima
- Ukupna poprečna sila u razini prizemlja i njezina promjena (porast) zbog djelovanja sila od *gap* elementima
- Vrijednost poprečne sile najkritičnijih elemenata u prizemlju (zidova ili stupova)

Navedeni rezultati su prikazani u poglavlju 8.2.

Iz njih će se najpreciznije moći odrediti utjecaj sudaranja susjednih zgrada tijekom potresa. Sile u *gap* elementima predstavljaju sudarne sile kojom jedna zgrada djeluje na drugu te ujedno i povećavaju razinu poprečne sile u konstrukciji. Porast ukupne poprečne sile će se gledati u prizemlju zbog toga što je na toj etaži u pravilu poprečna sila najveća te se elementi konstrukcije dimenzioniraju na potresno djelovanje prema njezinoj veličini. Usporedba vrijednosti poprečne sile u određenim elementima služiti će kao pomoć pri odabiru vrijednosti parametra Obrasca te za usporedbu rezultata dviju različitih metoda korištenih u ovom istraživanju.

8.1. Usporedba ulaznih parametara ispitivanja

U ovom poglavlju su prikazani rezultati analize numeričkih modela u kojima su se ispitivali ulazni parametri dinamičke analize u vremenu.

Na modelu 1. paviljona SD-a Stjepan Radić su se ispitivali periodi za zadavanje krivulje prigušenja. Obrađena su četiri modela s različitim periodima:

- 0,5 s i 0,4 s
- 0,5 s i 0,25 s
- 0,5 s i 0,12 s
- 0,6 s i 0,05 s

Da bi usporedili rezultate navedenih modela, dovoljno je promotriti pomake točaka definiranih u modelu jer se svi daljnji rezultati dobivaju daljnjom integracijom pomaka. U sljedećoj tablici su prikazane vrijednosti maksimalnih pomaka točke 2043 na 4. katu modela u x i y smjeru.

Tablica 8.2. Pomaci točke u x i y smjeru [mm]

| Period | Pomak | |
|----------------|---------|---------|
| | x smjer | y smjer |
| 0,5 s i 0,4 s | 38,46 | 74,62 |
| 0,5 s i 0,25 s | 39,04 | 73,95 |
| 0,5 s i 0,12 s | 39,63 | 73,10 |
| 0,6 s i 0,05 s | 41,07 | 77,85 |

Iz prikazane tablice se lako može uočiti da je razlika u pomacima zanemariva te se može zaključiti da analiza daje prihvatljive rezultate ukoliko zadani periodi definiraju glatku krivulju prigušenja.

Krutost *gap* elemenata kao parametar koji se koristi u dinamičkoj analizi u vremenu se ispitivala na numeričkom modelu zgrade Područnog ureda gradske uprave Trnje. Obrađena su dva slučaja u modelu s dvije dilatacije, u kojima su definirane različite krutosti *gap* elemenata:

- $k_1 = 10^6$ kN/m
- $k_2 = 10^2$ kN/m

Da bi se usporedile različite krutosti *gap* elemenata, potrebno je usporediti njihove deformacije u uzdužnom smjeru. U Tablici 8.3. prikazane su vrijednosti maksimalnih deformacija elemenata K89, K91 i K94

Tablica 8.3. Maksimalne deformacije *gap* elemenata [mm]

| Gap element | Deformacija | |
|-------------|-------------|-------|
| | k_1 | k_2 |
| K89 | 0,078 | 0,078 |
| K91 | 0,102 | 0,102 |
| K94 | 0,133 | 0,133 |

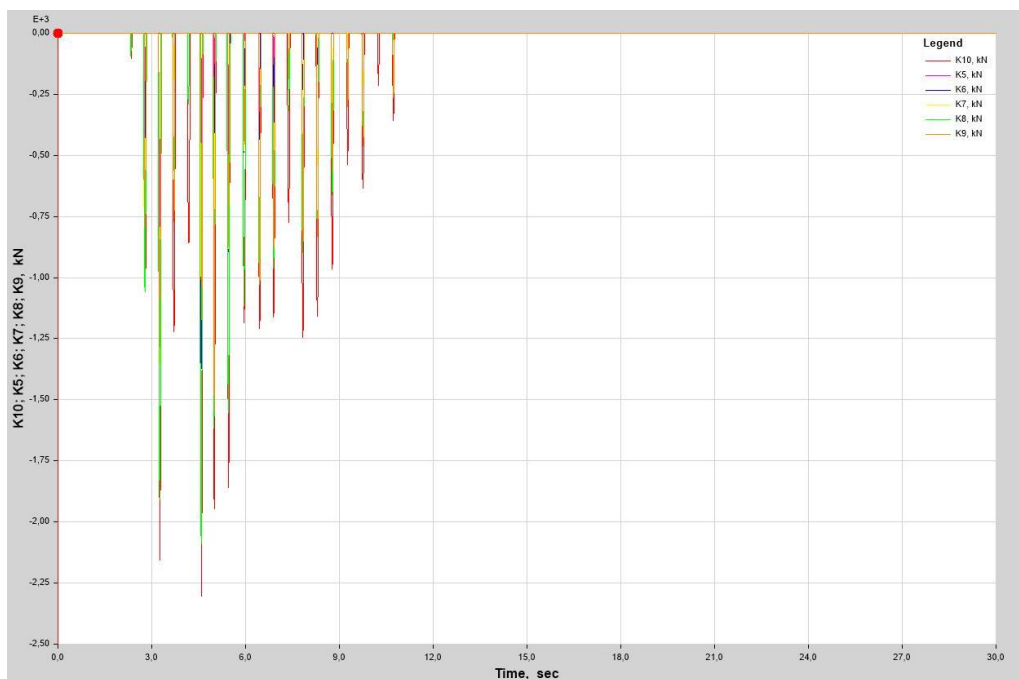
Vidljivo je da su deformacije *gap* elemenata različitih krutosti jednake. Zaključuje se da su rezultati zadovoljavajući ukoliko se uzme vrijednost krutosti preporučena iz prijašnjih ispitivanja. U nastavku će se uzeti krutost k_1 kao mjerodavna te ona biti zadavana u svim daljnjim modelima.

8.2. Usporedba rezultata za vrednovanje utjecaja razdjelnica

8.2.1. 1. paviljon SD-a Stjepan Radić

„Stari“ paviljoni Studentskog doma Stjepan Radić, među koje spada i promatrani 1. paviljon, predstavlja karakterističnu zgradu nepravilnog tlocrta u kojoj je izražen problem ekscentričnosti, o čemu je bilo riječ u poglavlju XXX. Karakteristike razdjelnice u toj zgradi nisu u potpunosti poznate, a uvidom na terenu se također nije moglo doći do točnih informacija. Stoga je analiza ove zgrade provedena s tri vrste različito definiranih *gap* elemenata, svaki sa određenom veličinom otvora.

Rezultati analize za ovu zgradu su prikazani u nastavku.



Slika 8.1. Prikaz promjene sile u *gap* elementima u vremenu

Tablica 8.4. Uzdužne tlačne sile u *gap* elementima [kN]

| <i>gap</i> element | otvor <i>gap</i> elementa | | | T=3,28 |
|--------------------|---------------------------|------|-------|--------|
| | 1 mm | 5 mm | 10 mm | 10 mm |
| K3 | 618 | 384 | - | - |
| K4 | 729 | 587 | - | - |
| K5 | 1002 | 1102 | 733 | 940 |
| K6 | 1290 | 1671 | 1402 | 1262 |
| K7 | 953 | 1137 | 1103 | 1352 |
| K8 | 1593 | 2106 | 2090 | 1907 |
| K9 | 714 | 834 | 1172 | 1285 |
| K10 | 1690 | 2125 | 2303 | 2156 |
| Ukupno | 8589 | 9946 | 8803 | 8902 |

Sve navedene vrijednosti sila se javljaju u istom vremenskom intervalu pa se može uzeti da najveća sudarna sila za ova tri slučaja iznosi redom 8589, 9946 i 8803 kN. Veće sile u pojedinim elementima se javljaju na višim etažama, čime se potvrđuje logična pretpostavka da će sudarne sile biti veće na višim dijelovima zgrada zbog većeg pomaka i akceleracija u odnosu na donje dijelove. Zanimljivo je napomenuti da se sudarna sila u pojedinim *gap* elementima povećava povećanjem razmaka između zgrada, ali se istovremeno zbog većeg razmaka smanjuje broj aktiviranih elemenata. Stoga će se najgora moguća varijanta s najvećom sudarnom silu biti u ovisnosti o ta dva faktora.

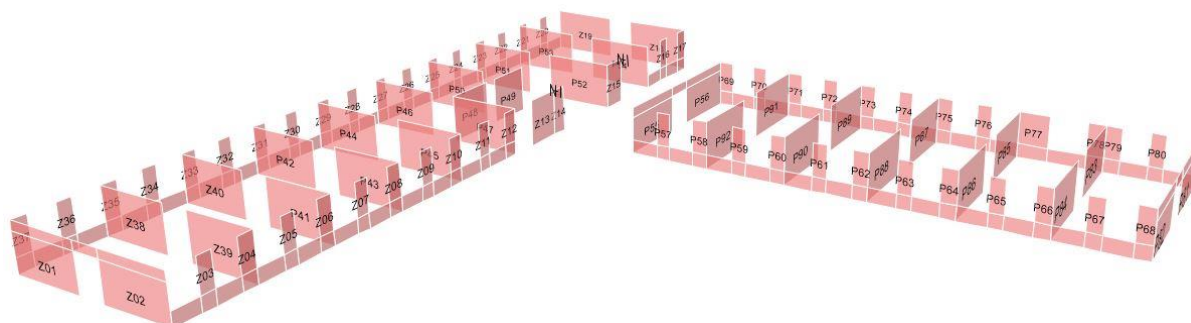
Tablica 8.5. Ukupna poprečna sila u prizemlju [kN]

| Model | | Sila u x smjeru | Sila u y smjeru |
|----------|------------------------|-----------------|-----------------|
| 3. Model | kontinuirano spojen | 32994 | 27061 |
| | spojen link elementima | 32785 | 26934 |
| 4. Model | OTVOR gap 1 mm | 27389 | 5242 |
| | gap 5 mm | 22850 | 5760 |
| | gap 10 mm | 21108 | 5423 |

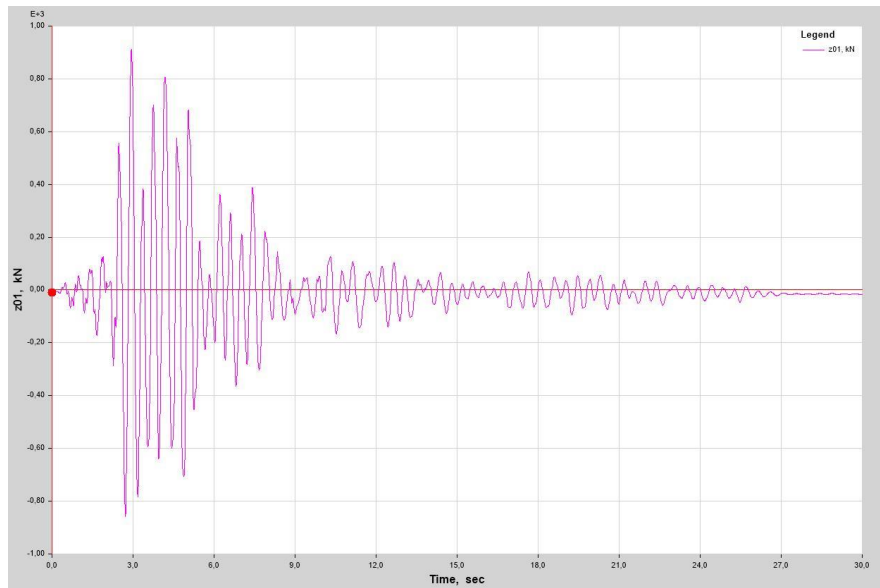
Prije svega, bitno je naglasiti da se kod metode dinamičke analize (4. model) mogla promatrati poprečna sila u vremenskom trenutku gdje je ona bila maksimalna samo za jedan (kritičniji) smjer, u ovom slučaju x smjer. Stoga prikazane vrijednosti poprečne sile u y smjeru za 4. model nisu mjerodavne za daljnju analizu

Ako iz Tablice XX usporedimo vrijednosti sudarnih sila, koje djeluju u x smjeru, s vrijednostima iz Tablice XX1, zaključujemo da sudarne sile iznose redom 30%, 45% i 42% ukupne poprečne sile u prizemlju za sva tri slučaja otvora gap elemenata. To su relativno veliki postotci koji ukazuju na to koliko razdjelnica, odnosno sudaranje može značajno utjecati na ponašanje zgrada prilikom potresa.

3. model je obrađen metodom spektralne analize, a 4. metodom dinamičke analize u vremenu, pa se iz njihove usporedbe može uočiti da metoda spektralne analize daje veću vrijednost ukupne poprečne sile. S obzirom da se metoda dinamičke analize u vremenu smatra kompleksnijom metodom, može se iznijeti hipoteza da je metoda spektralne analize konzervativnija te daje veće vrijednosti sila nego što to stvarno jesu. Međutim, da bi se to sa sigurnošću moglo tvrditi, potrebno je provesti detaljnija istraživanja ove pretpostavke.



Slika 8.2. Oznake elemenata zidova u prizemlju



Slika 8.3. Prikaz promjene poprečne sile u vremenu za zid Z01

Tablica 8.6. Poprečna sila u kritičnim elementima [kN]

| Model | | Element | |
|--|------------------------|---------------|---------------|
| | | Zid Z01 | Zid Z19 |
| 1. Samostalan model | | +899 / -957 | +1160 / -1197 |
| 2. Model torzijski fiksiran u jednoj osi | | +1128 / -1192 | +882 / -901 |
| 3. Model | kontinuirano spojen | +1174 / -1239 | +1736 / -1753 |
| | spojen link elementima | +1174 / -1239 | +1714 / -1731 |
| 4. Model | gap 1 mm | +858 / -846 | +1070 / -1331 |
| | gap 5 mm | +846 / -838 | +935 / -1051 |
| | gap 10 mm | +912 / -858 | +880 / -982 |

Iz priložene tablice je očigledno da se metoda dinamičke analize u vremenu i metoda spektralne analize međusobno razlikuju po dobivenim vrijednostima, kao u Tablici XX.

Kod 4. modela, za usporedbu različitih otvora gap elemenata, promatrao se zid Z19, koji se nalazi u blizini razdjelnice. Rezultati ovog karakterističnog primjera pokazuju da se razina poprečne sile s manjim otvorom gap elementa povećava sa smanjenjem razmaka između zgrada za maksimalnih 26%, što je značajno povećanje koje bitno utječe na ponašanje cijele konstrukcije.

Značajno povećanje poprečne sile u zidu se dobije i za slučaj kada je model torzijski fiksiran u jednoj osi, u odnosu na samostalan model (32%). Za takav slučaj, kada jedno krilo

poprima ulogu ležaja za drugo, se pretpostavlja da postoji realna mogućnost njegove pojave za ovu i za sve zgrade sličnih karakteristika, gdje je izražen problem ekscentriciteta i geometrijske nepravilnosti.

8.2.2. Zgrada PU Trnje

Zgrada područnog ureda gradske uprave Trnje, koja je ujedno i stambena zgrada, karakteristični je primjer zgrada dilatiranih u nizu. Metodom dinamičke analize u vremenu ispitivao se utjecaj razdjelnica i sudaranja zgrada na modelima dvije, tri i šest dilatacija, a rezultati su prikazani u nastavku.

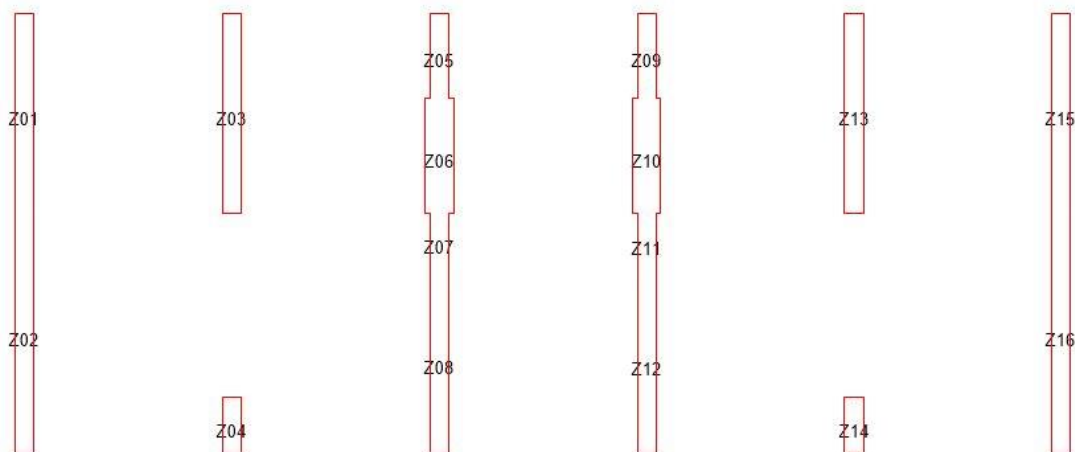
Analizom se ustvrdilo da se kod modela s dvije i tri dilatacije ne javljaju nikakve sile u *gap* elementima. Kod modela sa šest dilatacija, *gap* elementi su se aktivirali samo vrhu rubnih razdjelnica, s ukupnom sudarnom silom od 2413 kN, dok kod ostalih razdjelnica ne dolazi do sudarnja i pojave sudarne sile.

Tablica 8.7. Ukupna poprečna sila u prizemlju [kN]

| Model | | Sila u x smjeru | Sila u y smjeru |
|----------|--------------|-----------------|-----------------|
| 3. Model | 2 dilatacije | 11808 | 20476 |
| | 3 dilatacije | 17784 | 30720 |
| | 6 dilatacija | 35363 | 60343 |
| 4. Model | 2 dilatacije | 11550 | 13374 |
| | 3 dilatacije | 16556 | 19489 |
| | 6 dilatacija | 32618 | 36278 |

Iz gornje tablice je usporedbom sila u x smjeru za 3. i .4 model uočljivo da nema značajne promjene ukupne poprečne sile s obzirom da ne dolazi do značajnog sudaranja u modelima.

U „Studiji za saniranje posljedica potresa“(LIT) se analizirala treća dilatacija, za koju ujedno postoje i eksperimentalna istraživanja. Stoga su se kod promatranja pojedinih elemenata zgrade, uspoređivale vrijednosti poprečnih sila za zidove Z02 i Z16 (slika xxx) koje su dio treće dilatacije.



Slika 8.4. Oznake elemenata zidova u prizemlju za treću dilataciju

Tablica 8.8. Poprečna sila u kritičnim elementima [kN]

| Model | Element | | |
|--|---------------|---------------|---------------|
| | Zid Z02 | Zid Z16 | |
| 1. Samostalan model | +1520 / -1406 | +1570 / -1458 | |
| 2. Model torzijski fiksiran u jednoj osi | +260* | +2060 / -1985 | |
| 3. Model | 2 dilatacije | +1533 / -1413 | +1530 / -1409 |
| | 3 dilatacije | +1513 / -1416 | +1531 / -1405 |
| | 6 dilatacija | +1480 / -1381 | +1487 / -1360 |
| 4. Model | 2 dilatacije | +1445 / -1491 | +1242 / -1281 |
| | 3 dilatacije | +1445 / -1491 | +1242 / -1281 |
| | 6 dilatacija | +1445 / -1491 | +1242 / -1281 |

*Napomena: nije mjerodavno budući da se nalazi u blizini ležaja

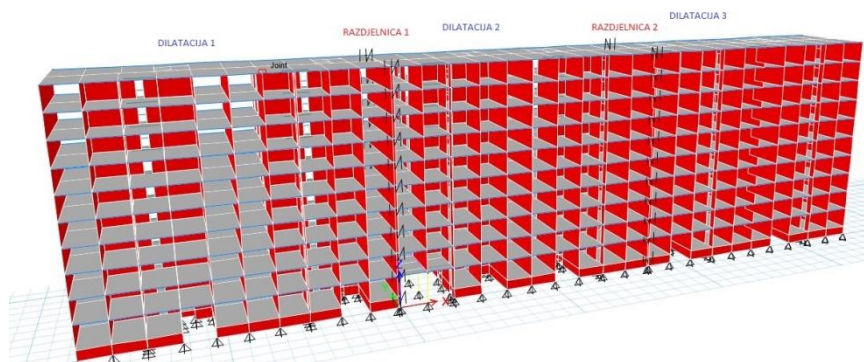
Usporedbom vrijednosti iz gornje tablice se može zaključiti da su sile u zidovima jednake za sva tri slučaja 4.-og modela jer ni u jednom slučaju ne dolazi do sudarnja treće dilatacije sa susjedima. Također, jedino značajno povećanje poprečne sile u zidu od 24% se dobije za slučaj kada je dilatacija torzijski fiksirana u jednoj osi (formiraju se ležajevi na jednom rubu). Pretpostavlja se da se takav slučaj u stvarnim uvjetima neće pojaviti na ovoj zgradi, ali se preporučuje detaljnije istraživanje za zgrade gdje je realna mogućnost njegove pojave.

Konačno, iz svih navedenih rezultata se zaključuje da kod zgrada u nizu jednakih krutosti neće doći do sudarnja tijekom potresa jer te zgrade osciliraju u fazi pa ne dolazi do njihovog međusobnog kontakta. Sudarna sila u modelu sa šest dilatacija se pojavila zbog

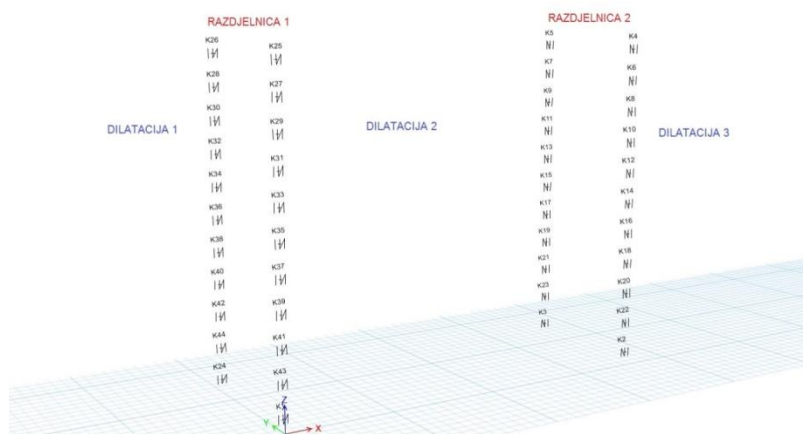
promjene krutosti rubnih dilatacija u odnosu na unutrašnje. Naime, na krajevima zgrade, odnosno na krajevima rubnih dilatacija, se umjesto poprečnog rubnog zida u prizemlju nalaze dva stupa. Stoga se krutosti rubnih i unutrašnjih dilatacija razlikuju te dolaze do sudaranja zbog njihovog asinhronog osliciranja.

8.2.3. Siget 16

Stambena grada u naselju Siget je drugi karakteristični primjer zgrada dilatiranih u nizu koje se obrađuju u ovom istraživanju. Metodom dinamičke analize u vremenu ispitivao se utjecaj razdjelnica i sudaranja zgrada na modelima s dvije i tri dilatacije. Za svaki od ta dva slučaja se promatrao model stvarnog stanja zgrade i model gdje su se definirale male preinake. Preinakama se pokušalo akrosimirati zgradu tako da se postigne što ujednačenija krutost između dilatacija te promotri koliko razlika u krutosti između susjednih zgrada utječe na sudaranje. Rezultati analize su prikazani u nastavku.



Slika 8.5. Oznake dilatacija i razdjelnica



Slika 8.6. Oznake gap elemenata na mjestima razdjelnica 1 i 2

Tablica 8.9. Uzdužne sile u *gap* elementima [kN]

| <i>gap</i> element* | Stvarno stanje | | Aproksimacija stanja s jednakim krutostima | |
|---------------------|----------------|--------------|--|--------------|
| | 2 dilatacije** | 3 dilatacije | 2 dilatacije** | 3 dilatacije |
| K25 (1) | - | 752 | - | 0 |
| K26 (1) | - | 605 | - | 0 |
| K27 (1) | - | 524 | - | 0 |
| ostalo (1) | - | 1237 | - | 0 |
| Ukupno (1) | - | 3118 | - | 0 |
| K4(2) | 1599 | 1458 | 0 | 0 |
| K5 (2) | 950 | 880 | 0 | 0 |
| K6 (2) | 1254 | 1120 | 0 | 0 |
| ostalo (2) | 4052 | 2181 | 0 | 0 |
| Ukupno (2) | 7855 | 5639 | 0 | 0 |

*broj u zagradi označava razdjelnicu na kojoj se nalazi određeni element

**model s dvije dilatacije ima samo razdjelnicu br. 2

Iz prikazanih rezultata je vidljivo da se kod modela s aproksimacijom jednakih krutosti ne javljaju sile u *gap* elementima, odnosno ne dolazi do sudaranja.

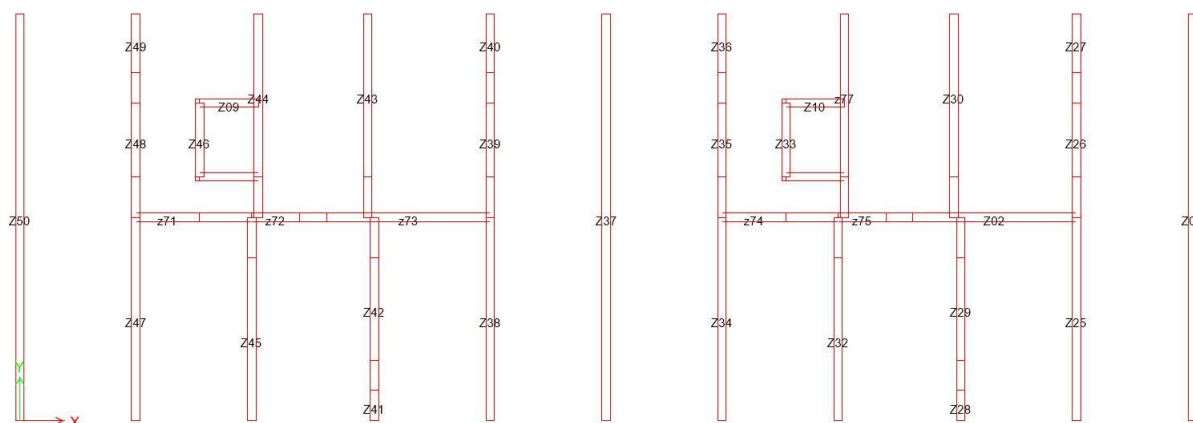
Kod stvarnog stanja, gdje dilatacija 2 ima različitu krutost u odnosu na ostale javljaju se sudarne sile u razdjelnicama. Bitno je napomenuti da se u modelu s tri dilatacije, sudaranje ne pojavljuje istovremeno u objema razdjelnicama pa se ukupna sudarna sila ne može dobiti zbrajanjem tih dviju vrijednostim nego se svaka razdjelnica mora promatrati odvojeno. Također je uočljivo da se u razdjelnici 2 javljaju veće sile nego u razdjelnici 1 jer su pomaci srednje dilatacije veći u blizini razdjelnice 2.

Kod usporedbe modela s dvije i tri dilatacije se može primjetiti da je sudarna sila veća kada je manji broj dilatacija. Pretpostavlja se da je razlog tomu činjenica da skod većeg broja dilatacija ili zgrada sličnih krutosti, zgrade međusobno spriječavaju pomake pa analogno time i veće akceleracije i sile pri sudaru.

Tablica 8.10. Ukupna poprečna sila u prizemlju [kN]

| Model | | Stvarno stanje | | Aproksimacija simetričnog stanja | |
|----------|--------------|----------------|---------|----------------------------------|---------|
| | | x smjer | y smjer | x smjer | y smjer |
| 3. Model | 2 dilatacije | 46582 | 44227 | 46806 | 44387 |
| | 3 dilatacije | 69947 | 66494 | 70172 | 66509 |
| 4. Model | 2 dilatacije | 41654 | 19381 | 41566 | 21383 |
| | 3 dilatacije | 62319 | 29234 | 62473 | 30840 |

Kod analize rezultata su se prikazali elementi u dilataciji 3 jer je ona već otprije bila predmet istraživanja u „Studiji za saniranje posljedica potresa“(LIT) pa se u konačnici mogu prikazati rezultati koji prije nisu bili dostupni. Analizirao se samo model stvarnog stanja kako bi se prikazalo koliko mala promjena krutosti kod zgrada u nizu utječe na promjenu poprečne sile u elementima.



Slika 8.7. Oznake elemenata zidova u prizemlju za dilataciju 3

Tablica 8.11. Poprečna sila u kritičnim elementima [kN]

| Model | | Element | |
|--|--------------|---------------|---------------|
| | | Zid Z01 | Zid Z02 |
| 1. Samostalan model | | +3061 / -3061 | +6529 / -6487 |
| 2. Model torzijski fiksiran u jednoj osi | | +3937 / -3934 | +174 / -149* |
| 3. Model | 2 dilatacije | +2648 / -2650 | +7353 / -7383 |
| | 3 dilatacije | +2578 / -2581 | +7193 / -7227 |
| 4. Model | 2 dilatacije | +3434 / -2774 | +6428 / -5848 |
| | 3 dilatacije | +3412 / -2762 | +6498 / -5894 |

*Napomena: nije mjerodavno zbog položaja u odnosi naležajeve

Usporedbom vrijednosti iz gornje tablice se može zaključiti da su sile u zidovima približno jednake za slučajeve 4.-og modela s dvije i tri dilatacije. Razlika u krutosti između zgrada ipak nije toliko velika da bi se sile značajnije promijenile.

Jedino značajno povećanje poprečne sile u zidu od 22% se dobije za slučaj kada je model torzijski fiksiran u jednoj osi (u usporedbi s samostalnim). Pretpostavlja se da se navedeni slučaj u stvarnim uvjetima neće pojaviti na ovoj zgradi, ali se preporučuje detaljnije istraživanje za zgrade gdje je realna mogućnost njegove pojave.

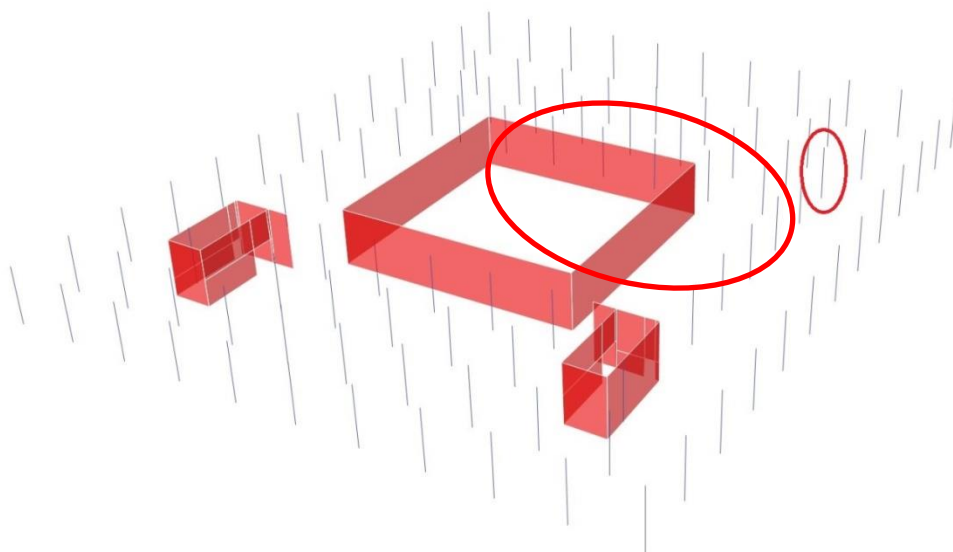
Konačno, iz svih navedenih rezultata se dolazi do istog zaključka kao i kod zgrade Područnog ureda gradske uprave Trnje. Kod zgrada u nizu jednakih krutosti ne dolazi do sudarnja tijekom potresa zbog osciliranja susjednih zgrada u fazi. Sudarna sila se pojavila u modelima stvarnog stanja jer se onda dilatacije međusobno razlikuju po krutosti, ali ne toliko puno kao na primjeru ekscentričnosti zgrade (pogalvlje xxx).

8.2.4. **KD Vatroslav Lisinski**

Koncertna dvorana Vatroslav Lisinski je po mnogočemu posebna zgrada, pa tako i po samoj konstrukciji. Iako se za sve uobičajene konstrukcije najveća poprečna sila u zidovima javlja u prizemlju, u ovom slučaju se tijekom analize rezultata uvidjelo da su zidovi najopterećeniji na prvom katu. Stoga će se u nastavku analizirati vrijednosti za tu etažu, za razliku od ostalih primjera gdje je promatrano prizemlje.

Također se prilikom proračuna metodom dinamičke analize u vremenu (4. model) pokazalo da do sudaranja između koncertne dvorane i dijela poslovne zgrade uopće ne dolazi. Razlog tomu su vrlo mali pomaci dobiveni za poslovni zgradu koji ne aktiviraju *gap* elemente čak niti za otvor od samo 1 mm. Gruba inženjerska procjena je da, čak i ako bi do sudaranja došlo, zbog premale krutosti poslovne zgrade bi sudarna sile bila relativno mala i ne bi prodonijela povećanju unutarnjih sila u kritičnim elementima koncertne dvorane.

Stoga su u nastavku prikazani rezultati samo za 1., 2. i 3. model koji analizirani metodom spektralne analize.



8.8. Prikaz kritičnih elemenata na prvom katu

Tablica 8.11. Poprečna sila u kritičnim elementima [kN]

| Model | Element | |
|--|-----------------|-------------|
| | Zid | Stup |
| 1. Samostalan model | +13086 / -13015 | +166 / -158 |
| 2. Model torzijski fiksiran u jednoj osi | +12149 / -12033 | +164 / -155 |
| 3. Model | +13459 / -13385 | +172 / -164 |

Iz prikazanih rezultata je vidljivo da je razlika sila između 1.-og modela i ostalih vrlo mala, odnosno zanemariva. Također, kod dinamičke analize u vremenu također nije došlo do povećanja poprečnih sila.

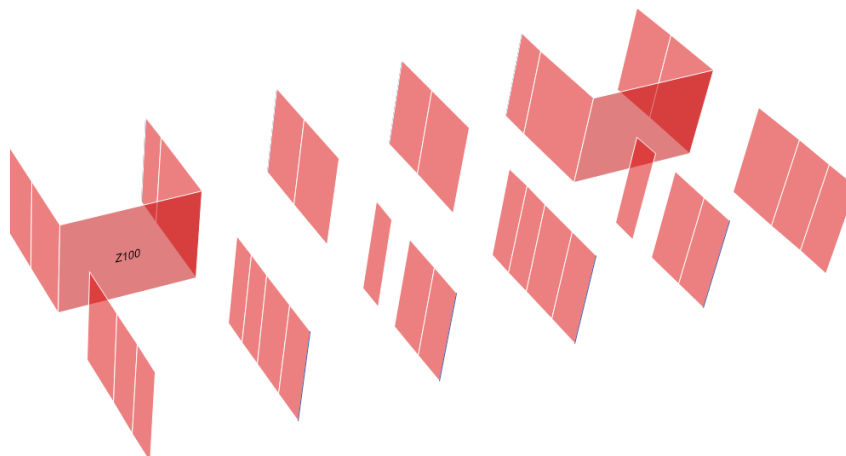
Konačni zaključak jest taj da se kod Koncertne dvorane Lisinski utjecaj sudaranja i razdjelnica može zanemariti zbog iznimno velikih razlika krutosti dviju zgrada..

8.2.5. **Zgrade s različitim brojem katova**

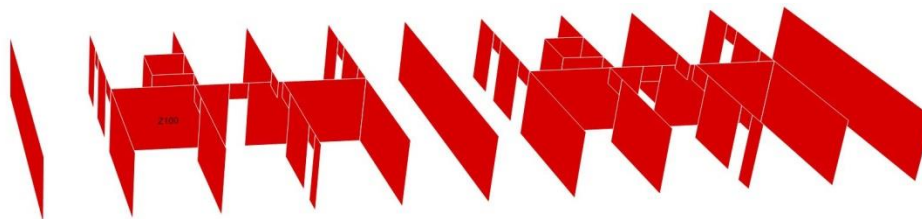
Prilikom ove analize koristili su se modificirani modeli PU gradske uprave Trnje i zgrade u naselju Siget, kako je opisano u poglavlju XXX.

Kod usporedbe rezultata zgrada s različitim brojem katova, promatrat će zgrada veće katnosti jer je ona više ugrožena uslijed sudaranja. Konkretno, prikazat će se promjena poprečne sile u zidovima više zgrade koji se nalaze u razini najviše etaže niže zgrade i etaže iznad. Naprimjer, za zgrade katnosti P+2 i P+8, promatrane etaže bit će 2. i 3. kat. Dobivene vrijednosti poprečnih sila će se usporediti s vrijednostima u istim zidovima koje se dobiju za slučaj kada nema sudaranja zgrada.

Također će se promatrati sile koje se javljaju u *gap* elementima, tako da se okvirno može usporediti ukupna sudarna sila između zgrada različitih katnosti.



Slika 8.10. Oznaka promatranog zida na karakterističnom katu (PU Trnje)



Slika 8.11. Oznaka promatranog zida na karakterističnom katu (Siget)

Tablica 8.12. Poprečna sila u kritičnim zidovima za katnost P+2 i P+8 [kN]

| Model | Promatrana etaža | Zid Z100 | |
|----------|------------------|---------------|---------------|
| | | Sudaranje | Bez sudaranja |
| PU Trnje | 2 | +2297 / -2605 | +2300 / -2837 |
| | 3 | +2045 / -2206 | +1656 / -2054 |
| Siget | 2 | +3793 / -3392 | +4172 / -4707 |
| | 3 | +3498 / -4538 | +3699 / -4079 |

Tablica 8.13. Poprečna sila u kritičnim zidovima za katnost P+4 i P+8 [kN]

| Model | Promatrana etaža | Zid Z100 | |
|----------|------------------|---------------|---------------|
| | | Sudaranje | Bez sudaranja |
| PU Trnje | 4 | -768 / -3612 | +1617 / -1791 |
| | 5 | -810 / -2508 | +1290 / -1499 |
| Siget | 4 | +3652 / -3159 | +3349 / -3373 |
| | 5 | +3178 / -3769 | +2901 / -2704 |

Tablica 8.14. Poprečna sila u kritičnim zidovima za katnost P+6 i P+8 [kN]

| Model | Promatrana etaža | Zid Z100 | |
|------------|------------------|---------------|---------------|
| | | Sudaranje | Bez sudaranja |
| Vukovarska | 6 | +970 / -1231 | +1036 / -1246 |
| | 7 | +665 / -828 | +699 / -833 |
| Siget | 6 | +2481 / -2165 | +2329 / -2168 |
| | 7 | +1891 / -2793 | +1599 / -1524 |

Iz gornjih tablica se može primjetiti kako se zbog sudarne sile na vrhu niže zgrade u pravilu povećavaju poprečne sile u zidovima iznad razine niže zgrade. Ovaj rezultat je bitan jer se njime potvrđuje da će prilikom sudaranja zgrada različitih katnosti doći povećanja poprečnih sila iznad razine niže zgrade i posljedično do oštećenja i eventualnog urušavanja gornjih dijelova više zgrade. Poprečna sila za neke slučajeve je porasla za čak 45%.

Uspoređujući tri promatrana slučaja različitih katnosti, primjećuje se da se najmanje razlike javljaju za katnost zgrada P+6 i P+8, gdje se zgrade razlikuju po visini za 2 kata. Iako se očekivalo da će najveće projemene sile biti za slučaj P+2 i P+8 zbog najveće razlike u broju katova, najveći porast poprečnih sila se ipak događa kod katnosti P+4 i P+8.

U tablicama 8.15., 8.16. i 8.17. prikazane su vrijednosti sila u *gap* elementima koji se nalaze u dvjema najgornjim etažama niže zgrade (4 elementa ukupno) gdje se javljaju najveće sudarne sile:

Tablica 8.15 Sile u *gap* elementima za katnost P+2 i P+8[kN]

| Etaža | PU Trnje | Siget |
|--------|----------|-------|
| 1 | 1875 | 5158 |
| | 1022 | 4580 |
| 2 | 0 | 2802 |
| | 0 | 2146 |
| Ukupno | 2897 | 14686 |

Tablica 8.16 Sile u *gap* elementima za katnost P+4 i P+8[kN]

| Etaža | PU Trnje | Siget |
|--------|----------|-------|
| 3 | 2564 | 6195 |
| | 2377 | 5373 |
| 4 | 1313 | 4954 |
| | 1477 | 3682 |
| Ukupno | 7731 | 20204 |

Tablica 8.17. Sile u *gap* elementima za katnost P+6 i P+8[kN]

| Etaža | PU Trnje | Siget |
|--------|----------|-------|
| 5 | 1337 | 4428 |
| | 447 | 3726 |
| 6 | 589 | 3397 |
| | 0 | 2529 |
| Ukupno | 2373 | 14080 |

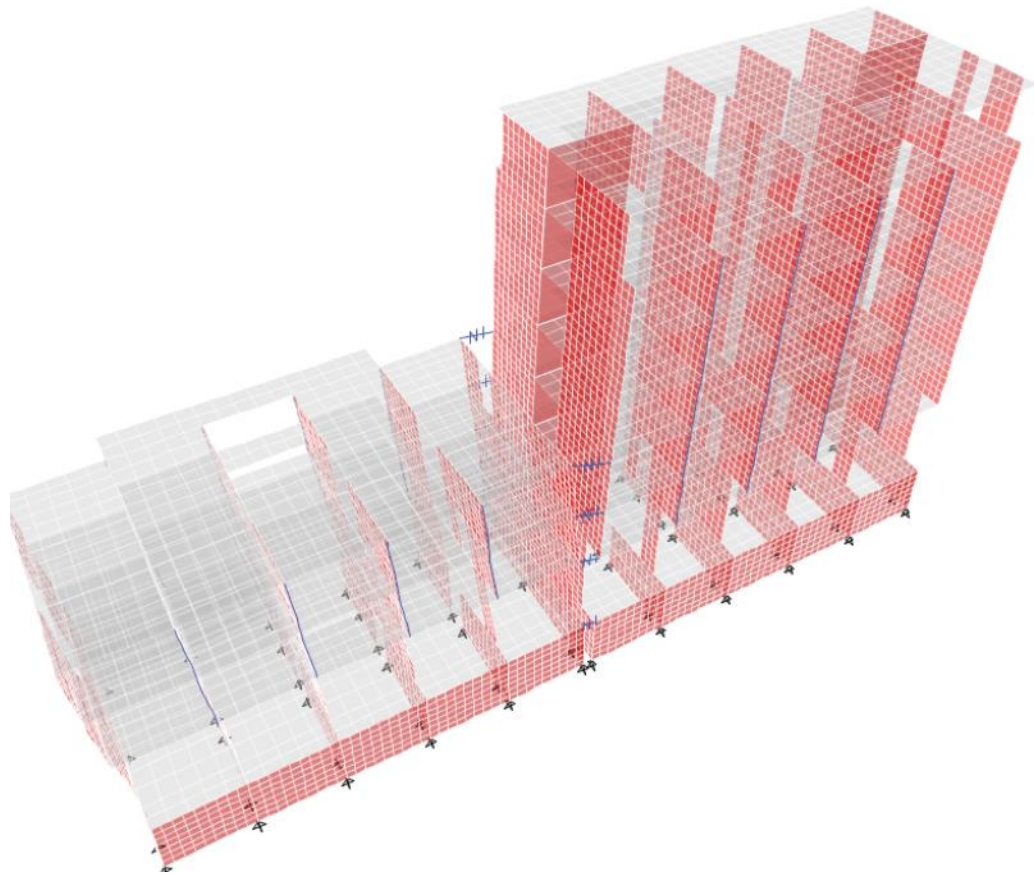
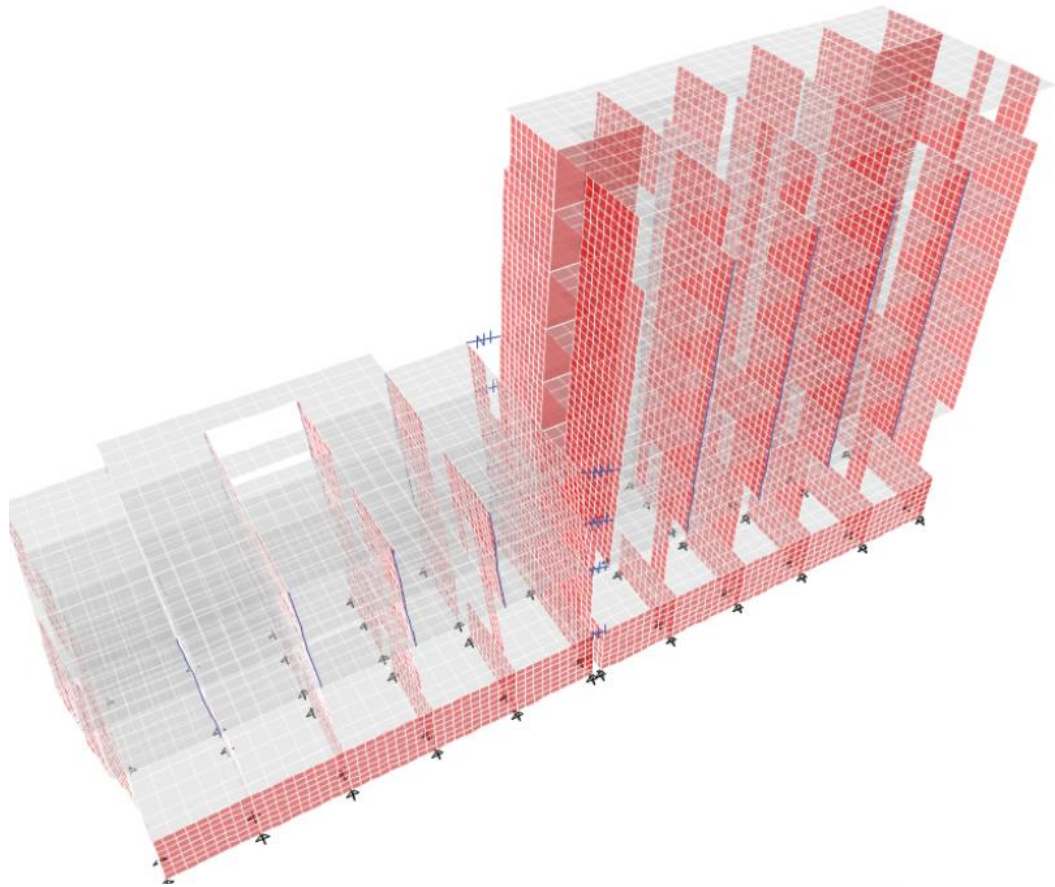
Po prikazanim vrijednostima sudarnih silama, važno je istaknuti velike vrijednosti koje ona poprima za modificirani model zgrade u naselju Siget. Iz gornjih tablica se ponavlja

činjenica da se najveći porast sila prilikom sudaranja događa za slučaj katnosti P+4 i P+8, a najmanji za P+2 i P+8.

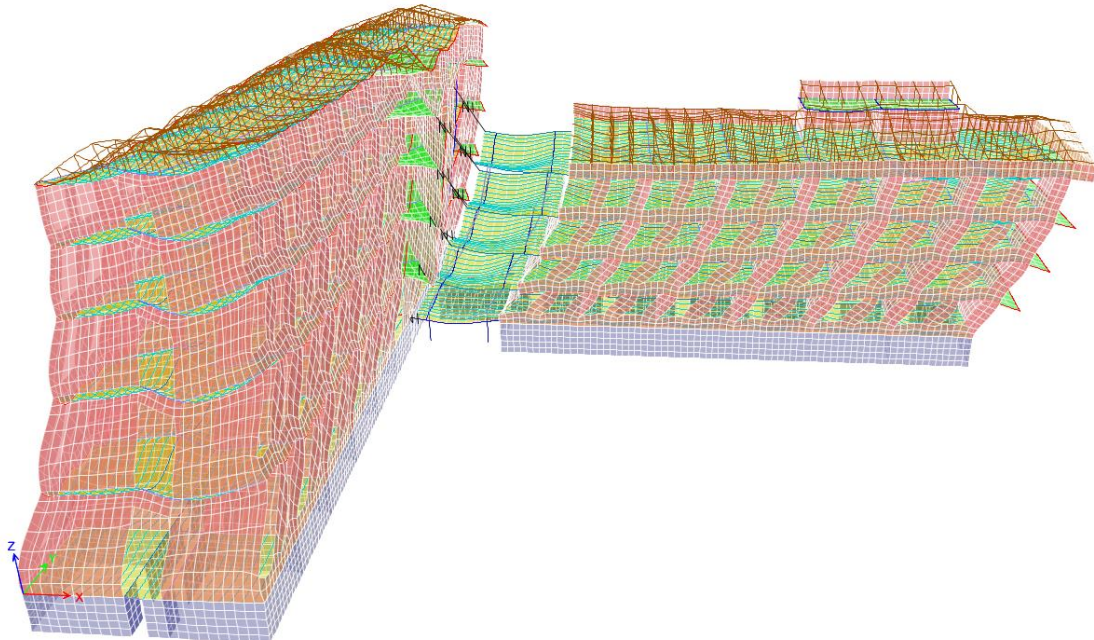
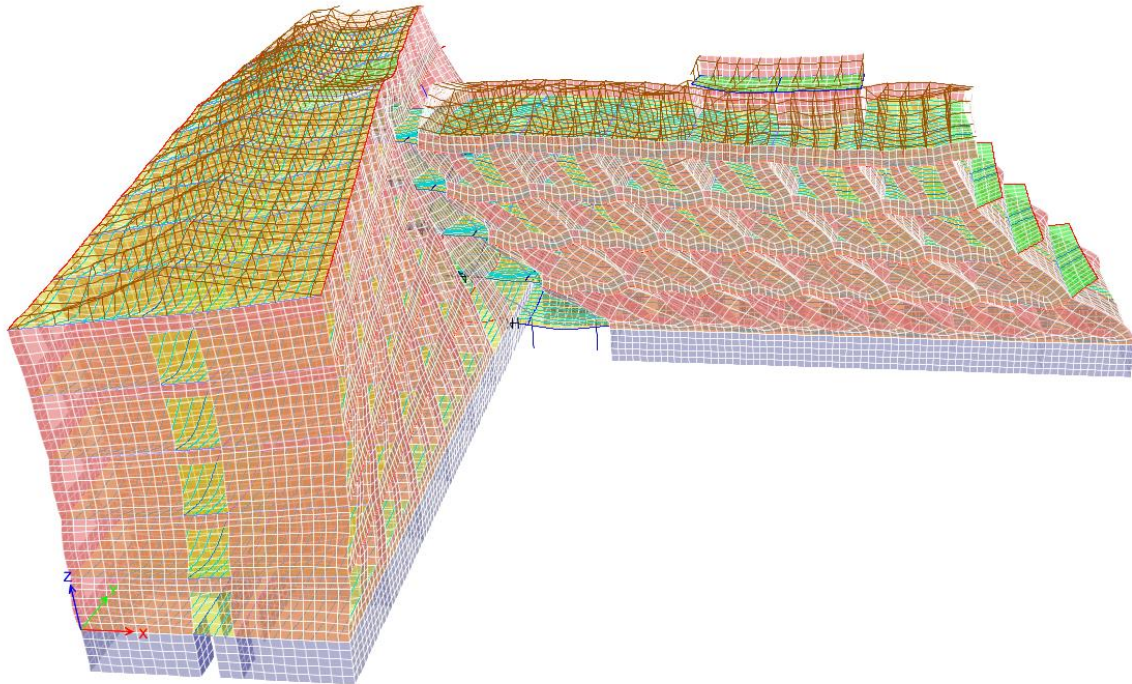
Detaljnou usporedbom i analizom rezultata zaključeno je da povećanje sudarnih sila i poprečnih sila u zidovima ovisi o dvama faktorima. Prvi je razlika u broju katova, odnosno razlika u visini zgrada. Što je ona veća, veće će se sile javiti prilikom sudaranja na mjestu razdjelnica. Drugi faktor je visina zgrade. Što je visina veća, javit će se veći pomaci i veće ubrzanje viših djelova zgrade prilikom potresa, što sa sobom povlači i veće sile kada dođe do sudaranja.

8.3. Prikaz sudaranja zgrada

U ovom poglavlju će se prikazati karakteristični trenutci „udara“ zgrada (najveća sila u *gap* elementu) i trenutak "otvaranja" *gap* elementa (sila u *gap* elementu je nula) koji su se dobili generiranjem video zapisa u programskom paketu ETABS na temelju modela zgrada različitih visina i ekscentričnih zgrada.



Slika 8.12. Trenutak „otvaranja“ *gap* elemenata



Slika 8.13. Trenutak „udara“

9. PRIMJENA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

9.1. Nadopuna Obrasca za inicijalnu procjenu potresne oštjetljivosti

Na temelju rezultata istraživanja prikazanih u poglavlju 9, grubom inženjerskom procjenom su se odredile približne vrijednosti povećanja potresne oštjetljivosti zgrada koje se javljaju zbog utjecaja razdjelnica i sudaranja zgrada prilikom potresa.

Tablica 9.1 Povećanje potresne oštjetljivosti

| Analizirani slučajevi susjednih zgrada | | Povećanje potresne oštjetljivosti |
|--|-------------------|-----------------------------------|
| Krutost | Jednaka | 0% |
| | Približno jednaka | 5% |
| Razlika u broju etaža | 6 | 10% |
| | 4 | 15% |
| | 2 | 20% |
| Ekscentričnost | | 30% |

Vrijednosti iz Tablice 9.1. implementirane su u „Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštjetljivosti“ na način da se Obrazac nadopunio s novim parametrom koji uzima u obzir utjecaj razdjelnice ukoliko ona postoji na ocjenjivanoj zgradi. Važno je napomenuti da Obrazac funkcionira na temelju parametarske analize pa su se vrijednosti povećanja potresne oštjetljivosti morale prilagoditi u odnosu na ostale parametre.

Novi dobiveni parametar sa svojim vrijednostima je ubačen u Obrazac, a prikazan je u formi Tablice 9.2.

Tablica 9.2. Novi parametar u Obrascu

| | | | |
|-------------------------|-----------------------------|---|-------------|
| Razdjelnica | Adekvatna | 0 | RAZ |
| | Neadekvatna | 1 | Odaberi RAZ |
| Oblici osciliranja | Istovjetni | 0 | OSC |
| | različiti | 1 | Odaberi OSC |
| Visina susjednih zgrada | Jednake visine | 0 | Odaberi VIS |
| | manje od 3 etaže razlike | 1 | |
| | više od 3 etaže razlike | 2 | |
| Sudaranje | Centri masa se sudaraju | 0 | SUD |
| | Sudaranje masa ekscentrično | 2 | Odaberi SUD |

| | | |
|-----------|----------------------------------|----|
| Ukupno US | $US = 3/5 * (OSC + VIS + SUD) =$ | US |
|-----------|----------------------------------|----|

Izlazni arametar VR je također izmjenjen te sada ima sljedeći oblik:

| | |
|------------|-----------------------|
| Ukupno VR: | $VR = TPP * ODN + US$ |
|------------|-----------------------|

Iz priloženog se vidi da će vrijednost VR utjecati parametar US koji je određen pomoću rezultata ovog istraživanja.

9.2. Web aplikacija SeiHAZ-a


Tijekom ovog istraživanja povedena je inicijativa za izradu aplikacije. Izrađena je u skladu s modernim web tehnologijama i prilagođena korištenju na osobnom računalu, mobitelu te tabletu, u cilju praktičnijeg i bržeg ispitivanja na ternu. U njoj je implementirana logika potrebna za izračun oštećenja građevine uslijed potresa prema skali EMS-98.

Podijeljena je na 8 komponenti od kojih su 7 za upis informacija, a u posljednjoj imamo responzivnu tablicu koja nam daje uvid u rezultate tokom ispunjavanja obrasca. Korisnik upisuje sve tražene podatke putem aplikacijskog sučelja a izračuni se odvijaju u pozadini aplikacije te nisu vidljivi samom korisniku. Ukoliko na pojedinim mjestima korisnik unese vrijednosti koje su izvan okvira ili ne odgovaraju traženim podacima o tome ga obavještava skočni prozor.

Svi upisani podatci i izračuni mogu se ispisati u obliku .xls i.pdf formata klikom na zeleni ili crveni gumb na vrhu responzivne tablice. Kada aplikacija kreira jedan od ta dva file-a moguće ih je preuzeti i spremiti na osobno računalo. Pristup aplikaciji biti će omogućen putem web adrese www.grad.hr/potres/ uz posjedovanje potrebne šifre.


SeiHAZ-A OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

OCJENJIVAČ



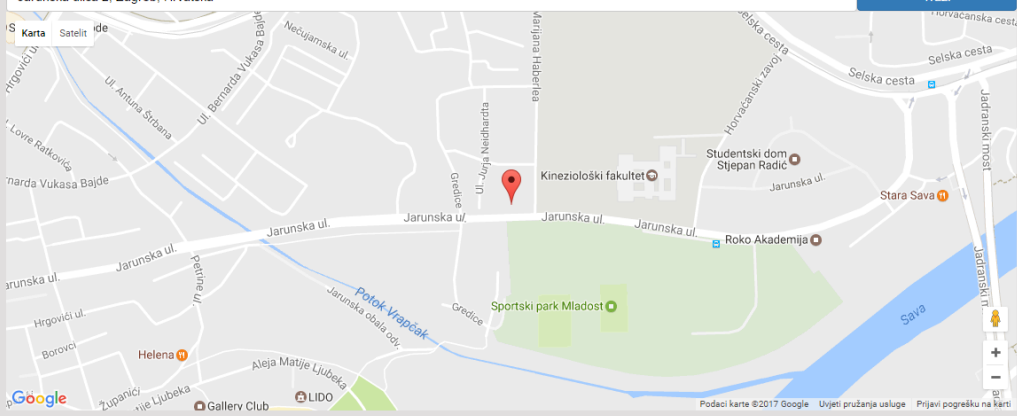
Ime i prezime: Kod: Datum:

OPĆI PODACI



SeiHAZ-A OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

Jarunska ulica 2, Zagreb, Hrvatska Traži



Podaci karte ©2017 Google Uvjeti pružanja usluge Prijavi pogrešku na karti

Opis / naziv građevine koja se pregledava:

Kod građevine:

Informacije dobivene:

Tip ocijenjene građevine:

Podtip građevine:

Period izgradnje:

Katnost iznad terena:

Slika 9.1. Prikaz slijeda zadavanja parametara u SeiHAZ-a web aplikaciji (1)

SeiHAZ-A OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

PROCJENA MATERIJALNE I NEMATERIJALNE ŠTETE



Bruto razvijena površina u m²

Stradavanje korisnika

Važnost zgrade

SeiHAZ-A OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

TLO POTRESNE ZONE I VRIJEME PROJEKTIRANJA




Potresna zona (vršno ubrzanje)

Tip tla

SeiHAZ-A OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

UDIO ZIDOVA I KATNOST



Horizontalno ukrućenje

Tipovi nosive konstrukcije

Površina zidova prizemlja - smjer osi X - UzX [m²]

Površina zidova prizemlja - smjer osi Y - UzY [m²]

Površina etaža iznad prizemlja [m²]

Slika 9.2. Prikaz slijeda zadavanja parametara u SeiHAZ-a web aplikaciji (2)

SeiHAZ-A

OCJENJIVAČ OPĆI PODACI OMNS TPZVP ZIK O KONSTRUKCIJI REZ

PODACI O KONSTRUKCIJI

Vertikalno ukrućenje
Kontinuirano

Horizontalna razvijenost
Razvijena

Temelji
Trakasti

REZULTATI

Izvoz u excel Izvoz u pdf

Slika 9.3. Prikaz slijeda zadavanja parametara u SeiHAZ-a web aplikaciji (3)

Na sljedećim slikama će se prikazati usporedba procjene potresne oštetljivosti i izlaznog parametra VR (vjerojatnost rušenja) sa i bez nadopune Obrasca na primjeru 1.-og paviljona Studentskog doma Stjepan Radić.

| | |
|------------------------|---------------------------|
| Opis / naziv građevine | studentski dom |
| Kod građevine | 12345 |
| Informacije dobivene | iz arhitektonskih podloga |
| Tip ocijenjene zgrade | Stambena zgrada |
| Period izgradnje | 1965-1987 |
| Katnost iznad terena | 5 |

OČEKIVANE MATERIJALNE I NEMATERIJALNE ŠTETE

| | | |
|-----------------------|---|------|
| Vrijednost zgrade | BRP = 4584,00m ² CKI = 430€ | 1,97 |
| Stradavanje korisnika | Z = 54,00 | 5,40 |
| Važnost zgrade | VZ1 (1) - bez javnih okupljanja - bez predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - bez ekoloških rizika | 1 |
| | VZ2 (2) - mjesto javnih okupljanja - predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - važna infrastrukturna vrijednost - ograničen ekološki rizik | |
| | VZ3 (5) - vitalna infrastrukturna vrijednost - zgrade sa velikim utjecajem na ekološki sustav | |
| Očekivane štete | | 7,37 |

TLO, POTRESNE ZONE I VRIJEME PROJEKTIRANJA

| | | |
|----------------|---|------|
| Vrijednost VPP | PZ = P3 (<0,25g) | 3,00 |
| Tip tla | TL1 - Kameno tlo - Velika povr. cement. rasutog kamenog tla | 2 |
| | TL2 - Šljunak i pijesak bez mulja - Nekonsolidirani fini pijesak, silit ili glina - Nanosni materijal prethodnih dvaju tipova | |
| | TL3 - Aluvijalni nanosi organskog porijekla - Potencijalna klizišta | |
| VPP * TL | | 6,00 |

Slika 9.4. Procjena potresne oštećljivosti 1. paviljona
Studentskog doma Stjepan Radić prema prvotnom Obrascu (1)

UDIO ZIDOVA I KATNOST

| | | |
|---|-----------------|----------------|
| Horizontalno ukrućenje | Povoljno | 0 |
| Tip nosive konstrukcije | Zide | 4,00 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi X - Uz _x [m ²] | | 29,50 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi Y - Uz _y [m ²] | | 27,50 |
| Površina etaža iznad prizemlja [m ²] | | 3588,00 |
| (KAT / UZ) * (TU + HU) | | 252,00 |
| Ocjena ODN | | 4,00 |

PODACI O KONSTRUKCIJI

| | | |
|--------------------------|---------------------|-------------|
| Vertikalno ukrućenje | Kontinuirano | 0 |
| Horizontalna razvijenost | Razvijena | 1 |
| Temelji | Trakasti | 1 |
| Ukupno POK | | 2,00 |

VRIJEDNOSTI ZA GRADACIJU

| | |
|---|----------------------------|
| Ukupno VR | 8,00 |
| Ukupno RIZ | 73,70 |
| Očekivani broj stradalih pri totalnom kolapsu | 5,40 |
| Očekivana razina oštećenja prema EMS-98 skali | 4. razina oštećenja |

Slika 9.5. Procjena potresne oštetiivosti 1. paviljona
Studentskog doma Stjepan Radić prema prvotnom Obrascu (2)

| | | |
|--------|---|-------------|
| Adresa | Jarunska ul. 2, 10000, Zagreb, Hrvatska | 28.04.2017. |
|--------|---|-------------|

OPĆI PODACI

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Opis / naziv građevine | studentski dom |
| Kod građevine | 12345 |
| Informacije dobivene | Arhitektonske podloge |
| Tip ocijenjene zgrade | Stambena zgrada |
| Period izgradnje | 1965-1987 |
| Katnost iznad terena | 5 |

OČEKIVANE MATERIJALNE I NEMATERIJALNE ŠTETE

| | | |
|-----------------------|---|------|
| Vrijednost zgrade | BRP = 4584,00m ² CKI = 430€ | 1,97 |
| Stradavanje korisnika | Z = 54,00 | 5,40 |
| Važnost zgrade | VZ1 (1) - bez javnih okupljanja - bez predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - bez ekoloških rizika | 1 |
| | VZ2 (2) - mjesto javnih okupljanja - predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - važna infrastrukturna vrijednost - ograničen ekološki rizik | |
| | VZ3 (5) - vitalna infrastrukturna vrijednost - zgrade sa velikim utjecajem na ekološki sustav | |
| Očekivane štete | | 7,37 |

TLO, POTRESNE ZONE I VRIJEME PROJEKTIRANJA

| | | |
|----------------|---|------|
| Vrijednost VPP | PZ = P3 (<0,25g) | 3,00 |
| Tip tla | TL1 - Kameno tlo - Velika povr. cement. rasutog kamenog tla | 2 |
| | TL2 - Šljunak i pijesak bez mulja - Nekonsolidirani fini pijesak, silit ili glina - Nanosni materijal prethodnih dvaju tipova | |
| | TL3 - Aluvijalni nanosi organskog porijekla - Potencijalna klizišta | |
| VPP * TL | | 6,00 |
| Ocjena TPP | | 2,00 |

Slika 9.6. Procjena potresne oštetljivosti 1. paviljona
Studentskog doma Stjepan Radić prema nadopunjenom Obrascu (1)

UDIO ZIDOVA I KATNOST

| | | |
|---|----------|---------|
| Horizontalno ukrućenje | Povoljno | 0 |
| Tip nosive konstrukcije | Zide | 4,00 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi X - Uz _x [m ²] | | 29,50 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi Y - Uz _y [m ²] | | 27,50 |
| Površina etaža iznad prizemlja [m ²] | | 3588,00 |
| (KAT / UZ) * (TU + HU) | | 252,00 |
| Ocjena ODN | | 4,00 |

PODACI O KONSTRUKCIJI

| | | |
|--------------------------|--------------|------|
| Vertikalno ukrućenje | Kontinuirano | 0 |
| Horizontalna razvijenost | Razvijena | 1 |
| Temelji | Trakasti | 1 |
| Ukupno POK | | 2,00 |

UTJECAJ SUSJEDNIH ZGRADA

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------|------|
| Razdjelnica | Neadekvatna | 1 |
| Oblici osciliranja | Različiti | 1 |
| Visina susjednih zgrada | Manje od 3 etaže razlike | 1 |
| Sudaranje | Sudaranje masa ekscentrično | 2 |
| Ukupno utjecaj susjednih zgrada | | 3,00 |

VRIJEDNOSTI ZA GRADACIJU

| | |
|---|---------------------|
| Ukupno VR | 11,00 |
| Ukupno RIZ | 95,81 |
| Očekivani broj stradalih pri totalnom kolapsu | 5,40 |
| Očekivana razina oštećenja prema EMS-98 skali | 4. razina oštećenja |

Slika 9.7. Procjena potresne oštetljivosti 1. paviljona

Studentskog doma Stjepan Radić prema nadopunjenom Obrascu (2)

Uzimanjem u obzir neadekvatno izvedene razdjelnice i ekscentričnog sudaranja dvaju krila, vidljivo je značajno povećanje parametra Vjerojatnost rušenja te se on pomaknuo prema gornjoj graničnoj vrijednosti za prijelaz u višu razinu oštećenja zgrade.

Na sljedećim slikama će se prikazati usporedba procjene potresne oštetljivosti i izlaznog parametra VR (vjerojatnost rušenja) sa i bez nadopune Obrasca na primjeru zgrada različite katnosti (P+4 i P+8).

| | | |
|--------|--|-------------|
| Adresa | Siget ul. 16A, 10000, Zagreb, Hrvatska | 28.04.2017. |
|--------|--|-------------|

OPĆI PODACI

| | |
|------------------------|-------------------------------------|
| Opis / naziv građevine | opis |
| Kod građevine | 54321 |
| Informacije dobivene | iz arhitektonskih podloga / pregled |
| Tip ocijenjene zgrade | Stambena zgrada |
| Period izgradnje | 1965-1987 |
| Katnost iznad terena | 10 |

OČEKIVANE MATERIJALNE I NEMATERIJALNE ŠTETE

| | | |
|-----------------------|---|------|
| Vrijednost zgrade | BRP = 4233,00m ² CKI = 430€ | 1,82 |
| Stradavanje korisnika | Z = 54,00 | 5,40 |
| Važnost zgrade | VZ1 (1) - bez javnih okupljanja - bez predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - bez ekoloških rizika | 1 |
| | VZ2 (2) - mjesto javnih okupljanja - predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - važna infrastrukturna vrijednost - ograničen ekološki rizik | |
| | VZ3 (5) - vitalna infrastrukturna vrijednost - zgrade sa velikim utjecajem na ekološki sustav | |
| Očekivane štete | | 7,22 |

TLO, POTRESNE ZONE I VRIJEME PROJEKTIRANJA

| | | |
|----------------|---|------|
| Vrijednost VPP | PZ = P3 (<0,25g) | 3,00 |
| Tip tla | TL1 - Kameno tlo - Velika povr. cement. rasutog kamenog tla | 2 |
| | TL2 - Šljunak i pijesak bez mulja - Nekonsolidirani fini pijesak, silit ili glina - Nanosni materijal prethodnih dvaju tipova | |
| | TL3 - Aluvijalni nanosi organskog porijekla - Potencijalna klizišta | |
| VPP * TL | | 6,00 |
| Ocjena TPP | | 2,00 |

Slika 9.8. Procjena potresne oštetljivosti zgrada različitih katnosti
prema prvotnom Obrascu (1)

UDIO ZIDOVA I KATNOST

| | | |
|---|----------------|---------|
| Horizontalno ukrućenje | Povoljno | 0 |
| Tip nosive konstrukcije | Pomični okviri | 2,00 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi X - Uz _x [m ²] | | 19,40 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi Y - Uz _y [m ²] | | 30,00 |
| Površina etaža iznad prizemlja [m ²] | | 3798,00 |
| (KAT / UZ) * (TU + HU) | | 154,00 |
| Ocjena ODN | | 4,00 |

PODACI O KONSTRUKCIJI

| | | |
|--------------------------|--------------|------|
| Vertikalno ukrućenje | Kontinuirano | 0 |
| Horizontalna razvijenost | Kompaktna | 0 |
| Temelji | Trakasti | 1 |
| Ukupno POK | | 1,00 |

VRIJEDNOSTI ZA GRADACIJU

| | |
|---|---------------------|
| Ukupno VR | 8,00 |
| Ukupno RIZ | 64,98 |
| Očekivani broj stradalih pri totalnom kolapsu | 5,40 |
| Očekivana razina oštećenja prema EMS-98 skali | 4. razina oštećenja |

Slika 9.9. Procjena potresne oštetljivosti zgrada različitih katnosti

prema prvotnom Obrascu (2)

| | | |
|--------|-----------------------------------|-------------|
| Adresa | Siget ulica 16A, Zagreb, Hrvatska | 28.04.2017. |
|--------|-----------------------------------|-------------|

OPĆI PODACI

| | | |
|------------------------|---------------------------------|--|
| Opis / naziv građevine | opis | |
| Kod građevine | 54321 | |
| Informacije dobivene | Arhitektonske podloge / pregled | |
| Tip ocijenjene zgrade | Stambena zgrada | |
| Period izgradnje | 1965-1987 | |
| Katnost iznad terena | 10 | |

OČEKIVANE MATERIJALNE I NEMATERIJALNE ŠTETE

| | | |
|-----------------------|---|------|
| Vrijednost zgrade | BRP = 4233,00m ² CKI = 430€ | 1,82 |
| Stradavanje korisnika | Z = 54,00 | 5,40 |
| Važnost zgrade | VZ1 (1) - bez javnih okupljanja - bez predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - bez ekoloških rizika | 1 |
| | VZ2 (2) - mjesto javnih okupljanja - predmeti i instalacije od značajne vrijednosti - važna infrastrukturna vrijednost - ograničen ekološki rizik | |
| | VZ3 (5) - vitalna infrastrukturna vrijednost - zgrade sa velikim utjecajem na ekološki sustav | |
| Očekivane štete | | 7,22 |

TLO, POTRESNE ZONE I VRIJEME PROJEKTIRANJA

| | | |
|----------------|---|------|
| Vrijednost VPP | PZ = P3 (<0,25g) | 3,00 |
| Tip tla | TL1 - Kameno tlo - Velika povr. cement. rasutog kamenog tla | 2 |
| | TL2 - Šljunak i pijesak bez mulja - Nekonsolidirani fini pijesak, silit ili glina - Nanosni materijal prethodnih dvaju tipova | |
| | TL3 - Aluvijalni nanosi organskog porijekla - Potencijalna klizišta | |
| VPP * TL | | 6,00 |
| Ocjena TPP | | 2,00 |

Slika 9.10. Procjena potresne oštetljivosti zgrada različitih katnosti
prema nadopunjenom Obrascu (1)

UDIO ZIDOVA I KATNOST

| | | |
|---|----------------|---------|
| Horizontalno ukrućenje | Povoljno | 0 |
| Tip nosive konstrukcije | Pomični okviri | 2,00 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi X - Uz _x [m ²] | | 19,40 |
| Površina zidova prizemlja - smjer osi Y - Uz _y [m ²] | | 30,00 |
| Površina etaža iznad prizemlja [m ²] | | 3798,00 |
| (KAT / UZ) * (TU + HU) | | 154,00 |
| Ocjena ODN | | 4,00 |

PODACI O KONSTRUKCIJI

| | | |
|--------------------------|--------------|------|
| Vertikalno ukrućenje | Kontinuirano | 0 |
| Horizontalna razvijenost | Kompaktna | 0 |
| Temelji | Trakasti | 1 |
| Ukupno POK | | 1,00 |

UTJECAJ SUSJEDNIH ZGRADA

| | | |
|---------------------------------|-------------------------|------|
| Razdjelnica | Neadekvatna | 1 |
| Oblici osciliranja | Različiti | 1 |
| Visina susjednih zgrada | Više od 3 etaže razlike | 2 |
| Sudaranje | Centri mase se sudaraju | 0 |
| Ukupno utjecaj susjednih zgrada | | 2,40 |

VRIJEDNOSTI ZA GRADACIJU

| | |
|---|---------------------|
| Ukupno VR | 10,40 |
| Ukupno RIZ | 82,31 |
| Očekivani broj stradalih pri totalnom kolapsu | 5,40 |
| Očekivana razina oštećenja prema EMS-98 skali | 4. razina oštećenja |

Slika 9.11. Procjena potresne oštetljivosti zgrada različitih katnosti
prema nadopunjenom Obrascu (2)

Uzimanjem u obzir neadekvatno izvedene razdjelnice na primjeru zgrada različitih katnosti, vidljivo je značajno povećanje parametra Vjerojatnost rušenja za 2.4, te se on i na ovom primjeru pomaknuo prema gornjoj graničnoj vrijednosti za prijelaz u višu razinu oštećenja zgrade.

10. ZAKLJUČAK

10.1. Zaključci iz provedenog istraživanja

Na temelju rezultata istraživanja, potvrdilo se da razdjelnice imaju negativan utjecaj na potresnu otpornost zgrada ukoliko nisu adekvatno projektirane i izvedene, što je bio slučaj s analiziranim zgradama. Najveći problem kod zgrada s razdjelnicama pri potresu predstavlja dodatna sila koja se javlja pri sudaranju dviju susjednih zgrada ili dilatacija. Ona u većini slučajeva poprima izrazito velike vrijednosti te će zasigurno uzrokovati oštećenja konstrukcije na mjestu dodirnih ploha zgrada, a lako moguće i otkazivanje cijele konstrukcije. Taj problem je posebno izražen kod tlocrtno nepravilnih (ekscentričnih) zgrada i susjednih zgrada različitih visina.

Kod ekscentričnih zgrada, zbog asinhronog osciliranja dijelova zgrada odvojenih razdjelnicom će gotovo sigurno doći do njihovog međusobnog sudaranja. Pretpostavlja se da je u takvim slučajevima moguće formiranja ležaja mjestu razdjelnice. Posljedica toga je povećani efekt torzije koje značajno ugrožava nosivost elemenata konstrukcije koji su najudaljeniji od razdjelnice (obično na suprotnom kraju zgrade).

Što se tiče zgrada različitih visina, povećanje potresne oštetljivosti prilikom sudaranja ovisi o dva faktora: razlici visina susjednih zgrada i samoj visini svake od susjednih zgrada. Točna korelacija tih dvaju faktora se nije mogla odrediti zbog malog broja ispitivanih modela, ali se iz rezultata istraživanja pretpostavlja da veći utjecaj ima razlika u visini susjednih zgrada. Kritično mjesto kod sudaranja se nalazi na višoj zgradi, u razini krova niže zgrade, gdje se zbog najvećih sudarnih sila može očekivati lokalno otkazivanje elemenata konstrukcije, koje posljedično može izazvati urušavanje dijela nosive konstrukcije na svim etažama iznad te točke.

Susjedne zgrade ili zgrade u nizu, koje su jednakih krutosti nisu ozbiljnije ugrožene sudaranjem uslijed potresa. Razlog tome je što zgrade jednakih krutosti pri potresu osciliraju u fazi, stoga su i sami rezultati istraživanja pokazali da u tom slučaju ne dolazi do međusobnog sudaranja. Međutim, u stvarnim uvjetima se teško može postići potpuno jednaka krutost susjednih zgrada zbog toga što su se u većini slučajeva izvodile rekonstrukcije i preinake prostora. Taj problem je pogotovo izražen kod starijih stambenih građevina koje su bile jedan od predmeta ovog istraživanja. Stoga je preporučljivo donijeti konzervativniji zaključak i pretpostaviti da će se potresna oštetljivost zgrada u nizu ipak povećati.

Nosiva konstrukcija koncertne dvorane Vatroslav Lisinski je izniman primjer konstrukcije u ovom istraživanju, za kojeg se na kraju ispostavilo da ipak neće doći do povećanja potresne oštećljivosti zbog utjecaja razdjelnice. Iako na koncertnoj dvorani postoji razdjelnica na koju se naslanja susjedna poslovna zgrada, rezultati su pokazali da u ovom specifičnom slučaju neće doći do sudaranja zgrada radi velike razlike u krutosti pa takve posebne primjere treba promatrati zasebno.

Na temelju svih rezultata istraživanja, nadopunio se „Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštećljivosti“ dodavanjem parametra koji predstavlja utjecaj razdjelnice u zgradama. Navedeni parametar će svakako pridonijeti preciznijim rezultatima pri inicijalnom ocjenjivanju potresne oštećljivosti kod zgrada, kao što je

10.1. Smjernice za daljnja istraživanja

Rezultati istraživanja i nova dobivena saznanja uvelike mogu pomoći kao smjernice za buduća istraživanja koja se bave istom ili sličnom problematikom.

Postojeća baza dostupnih modela za daljnje se nadupunila s modelima koji su se ispitivali za potrebe ovog istraživanja. Oni će stoga biti dostupni za daljnja istraživanja ovog ili nekog drugog problema vezanih uz razdjelnice i procjenu potresne oštećljivosti zgrada.

Priloženi su i detaljni opisi načina modeliranja samih razdjelnica u programskom paketu i opisi metoda dinamičke analize koje su korištene. Oni također mogu služiti kao podloga za buduća istraživanja te se eventualno prilagoditi u slučaju da se obrađuju primjeri koji nisu analizirani u ovom radu.

Nadopunjeni „Obrazac za inicijalnu procjenu potresne oštećljivosti“ poslužit će za daljnje potrebe „Studije za saniranje posljedica od potresa“. U slučaju njegove daljnje nadopune, preporuča se provesti istraživanje na većoj bazi modela za ispitivanje kako bi se dobili još precizniji i još detaljniji rezultati koji nisu bili mogući u ovom istraživanju.

11. LITERATURA

- [1] Elnashai A.S., Di Sarno L. (2008) Fundamentals of Earthquake Engineering, John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] Kramer, S.L. (1996) Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall - Civil engineering and engineering mechanics series
- [3] Arsovski M, Gojcic N, Mitrev T, Hadzijeovski D 1968: Seismo-geological investigations in Skopje valley. Earthquake of Skopje July 26, 1963 (Summary). Union of Yugoslav Laboratories, Beograd, Volume 2, 93-97.
- [4] Simović V. (2000) „Potresi na zagrebačkom području“, Građevinar, Vol. 52, No. 11 , pp. 637-645.
- [5] <http://www.mgz.hr/hr/izlozbe/potres-u-zagrebu-1880-i-izgradnja-nakon-potresa,301.html> (20.03.2017.)
- [6] Aničić, D. i suradnici (2014) „Potresni rizik grada Zagreba - Infrastruktura, stanovništvo, građevine i kulturna dobra,“ Prijedlog projekta - verzija 3.0, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Ured za upravljanje u hitnim situacijama Grada Zagreba.
- [7] <http://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework> (23.04.2017.)
- [8] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, CEN, Brussels , EN 1998-1 (2004)
- [9] Čaušević, M. (2014), Dinamika konstrukcija, drugo dopunjeno izdanje, Zagreb, Golden Marketing- Tehnička knjiga
- [10] Sorić, Z. (2016), Zidane konstrukcije, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu
- [11] Meštović, D., » Potresno inženjerstvo « [Mrežno]. Available: http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Potresno_inzenjerstvo.pdf. Updated 2016. (Pokušaj pristupa 23.02.2017.)
- [12] Armin , Č. Ponašanje građevinskih konstrukcija pod dejstvom potresa , Završni diplomski rad, Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać
- [13] HRN EN 1998-1:2011. Eurokod 8. Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – Dio 1.: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade. (EN 1998-1:2004)
- [14] Aničić, Dražen, osobni intervju, 07.02.2017.
- [15] Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima, Službeni list SFRJ 39/64
- [16] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, Službeni list SFRJ 31/81

- [17] Bensafi, M., Pironneau G., Sieffert J.G., (1998), Pounding of a building against a rigid wall, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3
- [18] Chandra Sekhara Reddy T. , Kiran Kumar Reddy K , Pradeep Kumar R, Pounding problems in urban areas , IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308
- [19] Rosenblueth, E., Meli, R.: The 1985 Earthquake: Causes and Effects in Mexico City, Concrete International, 8, pp. 23–34, 1986.
- [20] Kasai, K., Maison, B.F.: Observation of Structural Pounding Damage from 1989 Loma Prieta Earthquake, Proceeding Of 6th Canadian Conference of Earthquake Engineering, Toronto, Canada, pp. 735-742, 1991.
- [21] Crowley H., Ozcebe S., Baker H., Foulser-Piggott R., Spence R. (2014) D7.2 State of the Knowledge of Building Inventory Data in Europe, NERA - Seventh Framework Programme EC project number: 262330
- [22] Coburn A., Spence R. (2002) Earthquake Protection, Second Edition Wiley and Sons.
- [23] Bal I.E., Crowley H., Pinho R. (2010.) Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock, Research Report Rose 2010/02, IUSS Press, Pavia, Italy.
- [24] Studija za saniranje posljedica od potresa
- [25] Lisinski. [Mrežno] <http://www.lisinski.hr/hr/> (22.04.2017)
- [26] Hrvoje Smoljanović, Nikolina Živaljić, Željana Nikolić, »Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija,« Građevinar, svez. 7, pp. 603-618, 2013.
- [27] d. i. g. Hrvoje Smoljanović, »Seizmička analiza zidanih konstrukcija metodom konačno-diskretnih elemenata,« Split, 2013..
- [28] C. A.K., Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, New Jersey, USA, 1995.
- [29] L. Herceg, »Ocjena realnog stanja konstrukcija određivanjem dinamičkih parametara,« Zagreb, 1993.
- [30] Brian J. Schwarz & Mark H. Richardson, »Experimental modal analysis,« u CSI Reliability Week, Orlando, 1999.
- [31] HRN EN 1998-3:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (EN 1998-3:2005+AC:2010)
- [32] HRN EN 1998-1:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)
- [33] Pravilnik o metodologiji za izradu procjena ugroženosti i planova zaštite i spašavanja (Narodne novine 38/2008)

[34] Lazarević, D., Uroš, M., Šavor Novak, M.» Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo « [Mrežno]. Available: http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/dk1%5B1%5D.pdf . Updated Oct. 2016 (Pokušaj pristupa 23.02.2017.)

[35] Lazarević, D., Uroš, M., Šavor Novak, M.» Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo « [Mrežno]. Available:http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/dk2%5B1%5D.pdf . Updated Dec. 2016 [Pokušaj pristupa 23 April 2017]. [36] Mrežno <http://www.seissoft.com/seismoartif> (23.04.2017.)

[37] ETABS, Integrated Building Design Software Tutorial, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2003.

[38] Davorin Pleše, Ivana Barić, Vladimir Sigmund, »Usporedba rezultata numeričkog proračuna zgrade dobivenih različitim programima,« e-GFOS, svez. 4, pp. 37-45, 2012.

[39] 52, K. J. Bathe and E. L. Wilson 1976. No. of pages:. Numerical methods in finite element analysis. s.l. : Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J, 1976. 528.

[40] SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Analysis reference manual, CSI: Berkeley, 2002.

12. SAŽETAK

Božen Mušterić, Jakov Oreb

Analiza utjecaja razdjelnica pri djelovanju potresa na primjerima karakterističnih zgrada u Gradu Zagrebu

Problem definiranja razdjelnica i utjecaja susjednih zgrada smo susreli prilikom izrade naših Završnih radova pa nas je to motiviralo za dodatna istraživanja koje smo napravili u okviru ovog rada. Stoga smo prvo proučili dostupnu znanstvenu i stručnu literaturu vezanu za temu rada, a sve prema preporukama mentora i s obzirom na konzultacije sa stručnjacima vezanim za problematiku. Primijetivši da se u literaturi (posebice stranoj) problem razdjelnica većinom istražuje na reološkim dvodimenzijskim (2D) modelima, odlučili smo pokušati primijeniti jedan od osnovnih i najčešće primjenjivanih modela razdjelnice s elementima veze (engl. GAP elementima) na karakterističnim primjerima zgrada u Gradu Zagrebu.

Za analize smo odabrali primjenu **numeričkih modela** koristeći programski paket ETABS (CSI Berkley, California) koji se često koristi za projektiranje zgrada u područjima izloženim potresom i u kojem je omogućeno definiranje seizmičkog proračuna primjenom zapisa ubrzanja tla u vremenu (engl. *time history analysis*) i nelinearnih elemenata veze (engl. *GAP elements*). Alternativna mogućnost je bila izrada trodimenzijskih modela za ispitivanje u laboratoriju, ali ista se pokazala neprimjenjiva s obzirom na složenost odabranih zgrada i nepouzdanost ulaznih parametara, a posebice troškove izrade modela.

Za svaki od odabranih primjera, prije izrade modela, se obradila arhivska građa i napravljeni su vizualni pregledi razdjelnica (čak i nekoliko puta ponavljani) itd. Posebice su bila značajna **eksperimentalna ispitivanja** ambijentalnih vibracija odnosno operacionalna modalna analiza koja je poslužila za kalibraciju modela. Ostali nepouzdana parametri su dodatno testirani na nizu različitih numeričkih modela.

Za aproksimaciju djelovanja potresa prvenstveno je korišten **umjetni potresni zapis** sukladno EC 8 definiran na osnovu stvarnog potresnog zapisa u nedavnoj prošlosti (Ston). Rezultati su uspoređivani s uobičajenim metodama proračuna koji se primjenjuju u praksi (primjenom spektra odziva i proračun s bočnim silama). Ukupno je analizirano preko 50 numeričkih modela za različite karakteristične primjere zgrada. Dobiveno je preko 6TB rezultata numeričkih modela, a proračun pojedinog modela je često trajao više od jednog dana (24 h). Dobiveni su brojni zanimljivi rezultati, a za potrebe ovog rada su obrađeni i prezentirani samo karakteristični.

Dodatno, karakteristične rezultate smo i primijenili na način da su ubačeni u *Obrazac za procjenu potresne oštetljivosti* preko **ново definiranog parametra** koji opsuje utjecaj razdjelnice odnosno susjedne zgrade. Kako bi modernizirali postupak proračuna potresne oštetljivosti dali smo prijedlog i pokrenuli izradu **web aplikacije** koja će pomoći u modernizaciji postupka i izradi kvalitetne baze podataka, kao i kontrole ispitivača na osnovu koda.

Ključne riječi: potres, potresna oštetljivost, razdjelnica, sudaranje, obrazac

13. SUMMARY

Božen Mušterić, Jakov Oreb

Influence of expansion joints on seismic behaviour of characteristic buildings in City of Zagreb

We first met the issue of expansion joints and of the influence of conjoining buildings during an earthquake while writing our undergraduate thesis. This motivated us to deepen our knowledge and the research we have done during the creation of our undergraduate thesis. In order to, once again, initiate the new research on expansion joints and their influence on conjoining buildings, we have researched the scientific and professional literature on what was already known on the topic. Additionally, expert knowledge was collected using interviews.

During the research we noticed that the issue of expansion joints was mainly analyzed using two-dimensional (2D) rheological models, which encouraged us to try modeling and analyzing real-world buildings using GAP elements to describe expansion joints behavior.

For the conducted analyzes, finite elements models were used. The analyzes were conducted in ETABS software (CSI Berkley, California), which is often in use for building model analysis seismically prone regions. The ETABS software also enables the use of Time-History analyses in combination with GAP elements. Alternative was to model 3D models for laboratory testing. However, this method was discarded as a further possibility due to testing expenses, complexity of analyzed buildings, and the incapability to collect enough adequate data which would enable such tests.

Archive documentation collection, visual inspection of expansion joints, and other data collection methods were used to collect the initial data for each model which was to be analyzed. As extremely important data collection procedure, ambient vibration screening was conducted for each building, which was further on used for building model calibration.

For the finite element model testing artificial time-history data was created in accordance with EC8, which was defined using the real seismic activity recorded in Ston (Croatia). The results gained from these analyses were compared with analysis method usually used in civil engineering as spectral analysis or replacement forces applied in story mass centers. In total, more than 50 finite element models were analyzed for different types of characteristic buildings. More than 6TB of analyses results were created, where more than one day (24h) was used or the analysis of only one finite element model. Research presented us with a number of interesting results, however for the needs of this research only characteristic results were analyzed and presented here.

These, here presented characteristic results, were additionally implemented in the initial (parametrical) evaluation procedure for quick building vulnerability assessment. In the initial evaluation procedure, an additional parameter was added, which describes the influence of expansion joints on adjoining buildings. Additionally, in order to modernize the process of initial building evaluation procedure, we have developed a web based application, which is also shown here. The web application modernizes the assessment process, enables quick and simple database creation and enables result controls.

Key words: earthquake, seismic vulnerability, expansion joint, pounding, initial seismic evaluation

14. ZAHVALE

Mentorima doc. dr. sc. Josipu Ataliću, dipl. ing. građ. i dr. sc. Zvonku Sigmundu, dipl. ing. građ. na vrijednim savjetima.

Prof. dr.sc. Dražen Aničić na vrijednim savjetima

Doc. dr.sc. Marta Šavor Novak na pomoći pri izradi umjetnog potresnog zapisa

Ivanu Anti Traljiću, studentu FESB-a za korisne savjete prilikom izrade web aplikacije