

Obrada i interpretacija rezultata složenih dinamičkih numeričkih proračuna

Romano Jevtić Rundek¹, izv. prof. dr. sc. **Mario Uroš²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, romano.jevtic.rundek@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mario.uros@grad.unizg.hr

Sažetak

Kod analiza oštećenja zgrade uslijed seizmičkog djelovanja traže se sve precizniji, a time složeniji modeli i proračuni. Kod složenijih modela dolazi do problema obrade i interpretacije rezultata. Softverski paketi prilagođeni projektiranju u građevinarstvu koriste štapne i plošne elemente, najčešće u linearnom području (tower, SAP, ETABS), ili s pojednostavljenom plastičnošću (ETABS, SAP, 3muri). U ovom članku prezentirane su Python skripte koje automatiziraju vađenje rezultata iz softverskog paketa Dassault Simulia – Abaqus, pri složenim dinamičkim proračunima, kod modeliranja zidnih elemenata volumnim konačnim elementima uz izrazitu geometrijsku i materijalnu nelinearnost.

Ključne riječi: Abaqus, građevinarstvo, izvoz rezultata, rezultati, skriptiranje, python

Processing and interpretation of complex dynamic numerical analysis

Abstract

There is rising demand for more precise models and analysis methods, when modelling seismic fragility of buildings. The models that offer most precision often are not adapted for use in civil engineering and offer results that are difficult to interpret. Software packets made for use in civil engineering usually use beam and shell elements, mostly with linear behaviour (tower, SAP, ETABS), or with concentrated plasticity or macroelements (3MURI, ETABS). In this article, Python scripts are presented that allow automated result processing and export from the software “Dassault Simulia – Abaqus” with a model made of 3D finite elements.

Key words: Abaqus, civil engineering, scripted output, scripts, postprocessing

1 Uvod

U svrhu provjere nosivosti građevine može se primijeniti veliki broj softvera, metoda proračuna i vrsta modela. Svaki će pružiti neke prednosti i neke mane. Između ostalog, jednostavniji modeli će pružiti znatno lakšu interpretaciju rezultata. Softverski paketi prilagođeni projektiranju u građevinarstvu obično koriste materijalnu i geometrijsku linearnost (tower [1], SAP2000 [2], ETABS [3]), neki mogu uzeti u obzir geometrijsku nelinearnost (ETABS [3], SAP2000[2]), a i materijalnu nelinearnost putem koncentrirane plastičnosti (ETABS [3], SAP2000 [2]) ili makrolemenata (3MURI [4]). Prilikom provedbe seizmičke analize u kompleksnijem modelu građevine dolazi do problema interpretacije, ali i izvoza rezultata. Ako promotrimo primjer konkretnog softvera kao što je Abaqus [6], vidi se da postoji mogućnost vađenja svih parametara koji su nam potrebni za interpretaciju, ali je postupak nepraktičan. Potrebno je ručno vaditi i računati prosjeke pomaka u vremenu, očitavati maksimume, te definirati svaku površinu na kojoj nas zanima sila te od iste očitavati maksimume za dimenzioniranje. U slučaju da se želi konstruirati histereza zida, potrebno je podatke izvaditi iz Abaqusa u drugi softver za obradu podataka. Za analizu zgrade, potrebno je izvaditi parametre za jako velik broj zidova, što bez nekakve automatizacije nije praktično. Abaqus je strukturiran vrlo otvoreno za prilagodbe, tako da je moguće Python skriptama provoditi razne zadatke te i navedenu automatizaciju.

2 Pregled stanja područja

U praksi se teži proračunima koji su intuitivni, jednostavni i pružaju gotov prikaz i ispis rezultata. To se postiže na dva načina, primjenom jednostavnih linearnih proračuna i primjenom jednostavnih štapnih ili prema potrebi plošnih konačnih elemenata. Linearni elastični proračuni temeljeni na maksimalnim silama pružaju najjednostavnije rezultate za interpretaciju. Štapni elementi pružaju laki prikaz unutarnjih sila za interpretaciju i usporedbu sa normom, dok plošni elementi u većini programskih paketa imaju ugrađenu integraciju naprezanja u presjeku što omogućuje također prikaz sila i usporedbu nosivosti sa normom.

Rjeđe su primjenjivani nelinearni statički proračuni, kao što je metoda postupnog guranja. Rezultati takvih analiza su dosta kvalitetni, relativno lako provedivi u praksi, ali imaju neka ograničenja u primjeni. Relativno je lako interpretirati rezultate te ovisno o softveru postoji i automatsko pisanje izvještaja. Promotrimo li nelinearni proračun metodom postupnog guranja, koji koristi makroelemente, možemo primijetiti da se nelinearno ponašanje zidova modelira koncentriranom plastičnošću. Na osnovu zadanih svojstava materijala za svaki se makroelement automatski konstruira krivulja nosivosti (engl. *backbone curve*). Tijekom analize makroelementi preuizmajuu određene sile, te se na osnovu omjera i veličina tih sila mogu ostvariti

unaprijed definirani oblici otkazivanja, kao što su lom savijanjem, lom smicanjem i lom klizanjem.

Kompleksnije metode, kao što su dinamični proračuni nelinearnih volumnih modela, koji zahtijevaju značajno kompleksniju obradu rezultata i dugo vrijeme proračuna se u inženjerskoj praksi rjeđe koriste. Nepraktičnost pri vađenju potrebnih rezultata iz takvog modela, te obrada istih je jedna od prepreka za primjenu takvih modela. Navedena mana često je rezultat namjene softvera, kao što je slučaj kod softverskog paketa Abaqus, koji je u svojoj osnovi znanstveno-inženjerski softver te nije prilagođen za građevinarstvo. Abaqus ima efikasan solver, podržava definiranje općenitog materijala, geometrije i mreže konačnih elemenata. Moguće je napraviti vrlo detaljan model za nelinearni dinamični proračun te je praktičan za izradu i analizu nepravilnih modela građevine. Takvi modeli su već u primjeni među istraživačima [7, 8], ali se koriste samo za procjenu globalnog ponašanja, lokalne fenomene, propagiranja pukotina, određivanje globalnih progiba i pomaka. Nemogućnost brzog i lakog izvoza podataka je značajno ograničavala primjenu Abaquusa u istraživanjima globalne nosivosti zgrada u području građevinarstva. Potreban je automatski ili poluautomatski izvoz sila i pomaka elemenata, jer se takvi mogu usporediti sa eksperimentima i normama. Omogućavanje takvog izvoza i obrade rezultata je svrha skripti opisanih u ovom članku. Navedene skripte također olakšavaju izradu parametarskih analiza, te se mogu prilagoditi i nadograditi za druge vrste proračuna.

3 Korištenje skriptiranih naredbi za obradu rezultata

3.1 Opis skripti

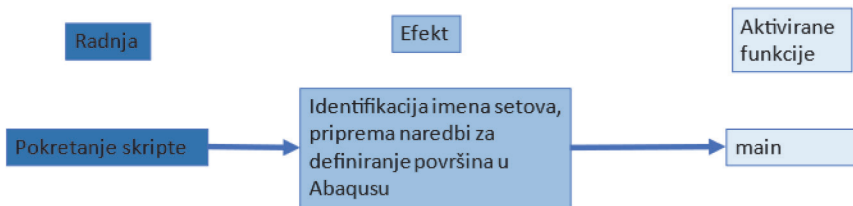
Vađenje podataka iz Abaquusa provodi se kroz 5 skripti. U osnovi, postoje dvije skripte koje se koriste za pripremu modela, dvije skripte za vađenje rezultata u bazu te jedna za vađenje i obrađivanje podataka iz baze. Prve dvije skripte pripremaju model prije provođenja analize, identificiraju pojedine elemente te omogućuju praćenje pomaka i sila označenih presjeka. Naredne dvije skripte vade sile i pomake za prethodno označene zidove i pohranjuju ih kao txt datoteke u bazu rezultata. Zadnja skripta, za obradu podataka, uzima podatke iz prethodno konstruirane baze te ih kombinira, uspoređuje i obrađene podatke daje u nekoliko txt dateoteka, složenih za lagani uvoz u Excel. Ako promotrimo rezultat iz Abaquusa, radi se o polju pomaka i sila u diskretnim čvorovima. Skripte 1 i 2 identificiraju čvorove koji su relevantni za odabrane elemente. Skripte 3 i 4 računaju rezultantu svih sila u čvorovima te prosjek pomaka tih čvorova i maksimalnu devijaciju od prosjeka za kontrolu te navedeno pohranjuju u glavnu bazu podataka. Skripta 5 otvara gotovu bazu te obrađuje podatke, gdje je potrebno traži relativne ili apsolutne pomake, deformacije, traži maksimume sila i pomaka za dimenzioniranje i slično.

Skripte su generalno formirane tako da se svaka glavna radnja odvija preko jedne glavne funkcije, koja definira globalne varijable te ih mijenja i kombinira pomoću manjih pod-funkcija.

3.2 Osnovni koraci za korištenje skripti

1. Označavanje kritičnih presjeka na konstrukciji
2. Pokretanje skripte 2 (kroz Abaqus sučelje), definiraju se odgovarajući parametri u modelu
3. Pokretanje analiza u Abaqusu
4. Pokretanje skripte 3, odabir imena output baze i kreiranje iste
5. Izvoz rezultata, pojedinačno za svaki model
6. Pokretanje skripte 4. kroz Abaqus sučelje
7. Baza je popunjena/gotova
8. Odabir traženih varijabli u konačnom outputu i pokretanje skripte 5
9. Uvoz ispisanih txt dateoteka u excel, odabrati zarez kao separator
10. Daljnje procesiranje podataka po vlastitom nahođenju

4 Prikaz tijeka rada skripti



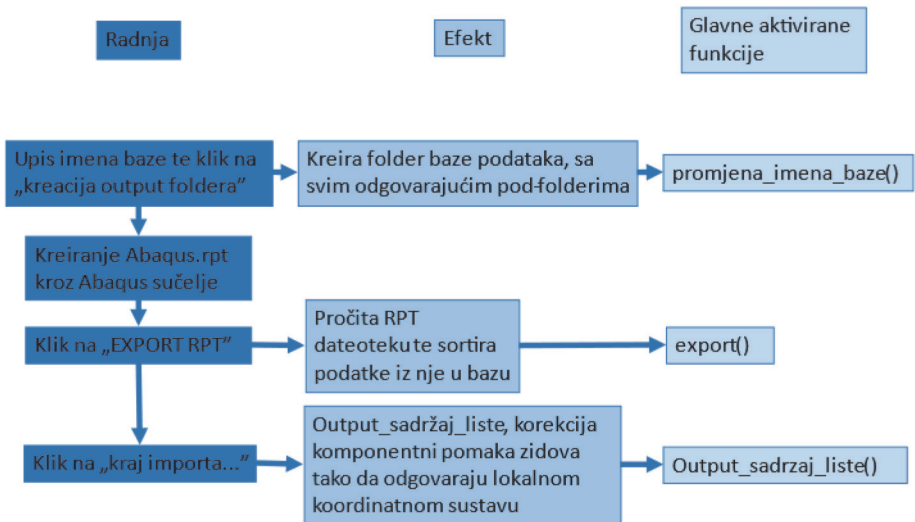
Slika 1. Dijagram rada skripte 1

Zadatak skripte 1 je pročitati abaqus replay kod, generiran tijekom označavanja presjeka, te iz njega izvući imena presjeka. Kada su definirana imena presjeka zapisuje i naredbe koje će skripta 2 koristiti za definiranje površina na mjestima označenih presjeka, te su površine potrebne za izvoz sila tih presjeka.



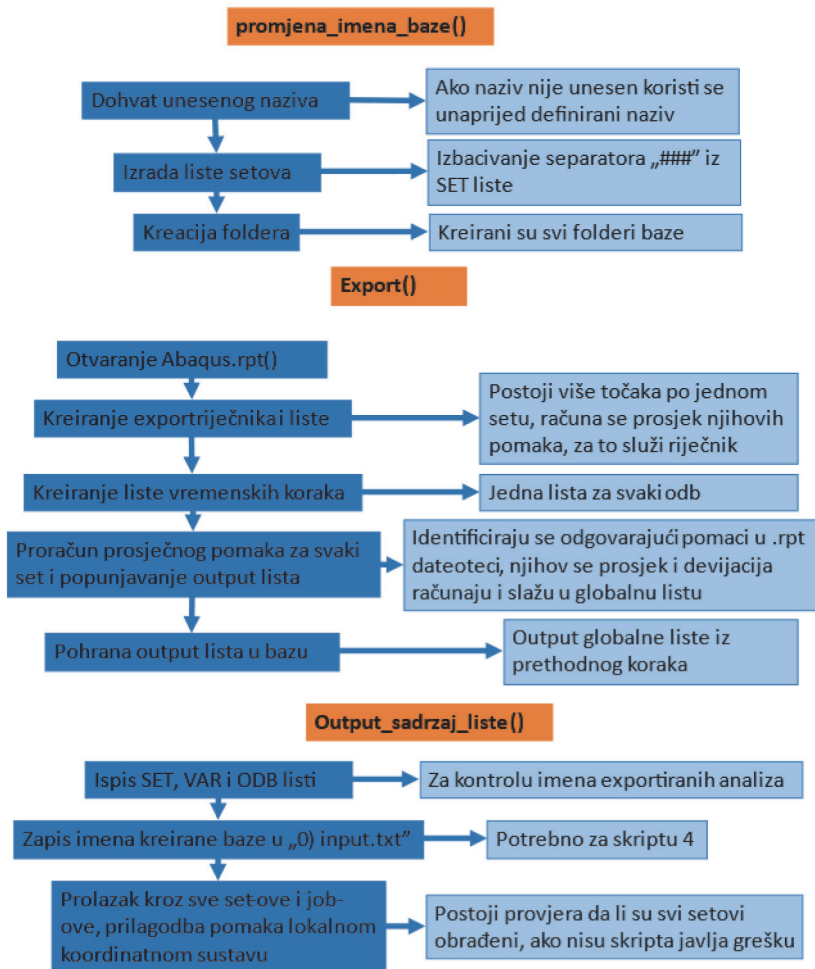
Slika 2. Dijagram rada skripte 2

Skripta 2 definira sve parametre unutar Abaqusa potrebne za daljnji izvoz rezultata. To uključuje ponovno definiranje setova, definiranje površina na presjecima, definiranje field i history outputa za sve setove.



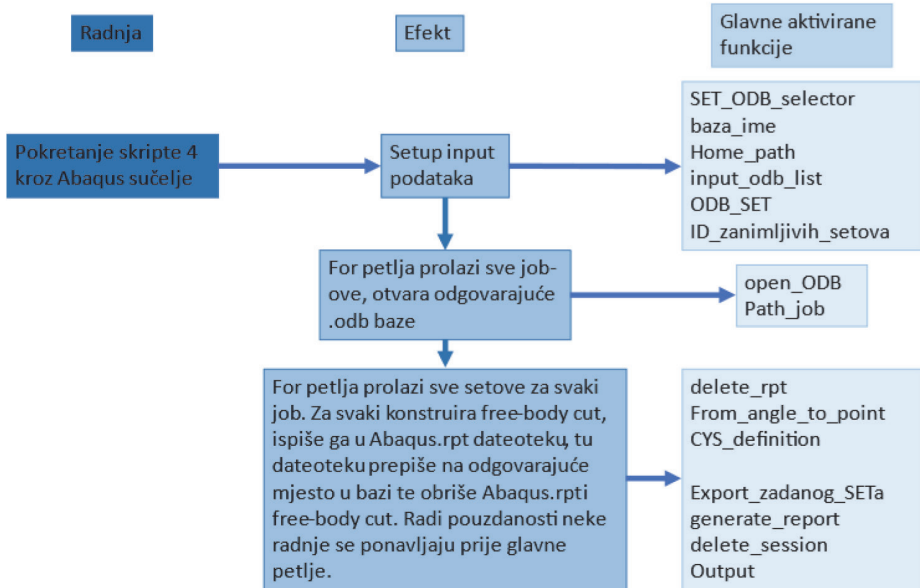
Slika 3. Dijagram rada skripte 3

Skripta 3 se koristi za definiranje baze podataka i popunjavanje iste pomacima iz modela. Također se kreira lista vremenskih koraka za svaku analizu, jer ista zna varirati između različitih analiza.

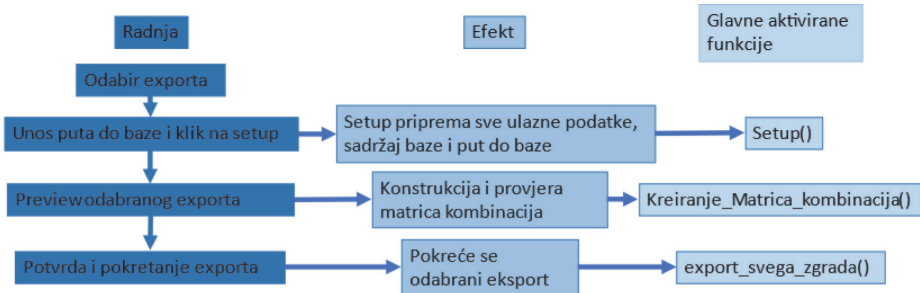


Slika 4. Opis glavnih funkcija skripte 3

Skripta 4 kreira presjeke na kojima integrira sile čvorova konačnih elemenata. Silu rastavi na komponente po odgovarajućem lokalnom koordinatnom sustavu, te ju zapisuje u bazu definiranu skriptom 3. Skripta 4 sama otvara Abaqus baze podataka tako da nije obavezno imati rezultate otvorene prilikom pokretanja.

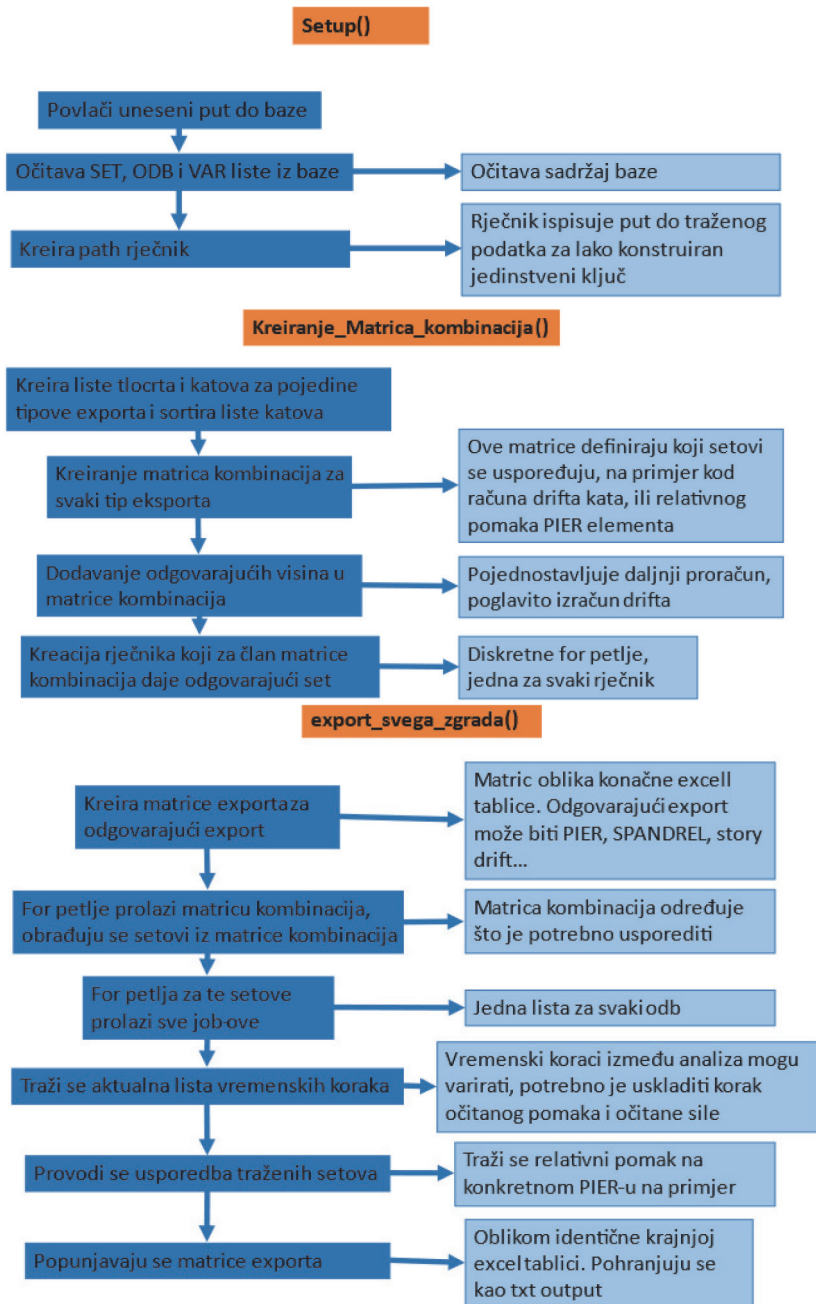


Slika 5. Dijagram rada skripte 4



Slika 6. Dijagram rada skripte 5

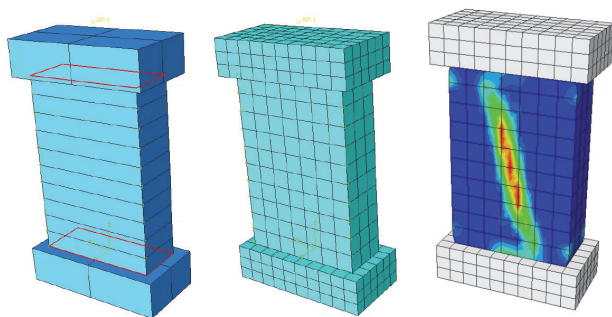
Skripta 5 obrađuje sirove podatke iz baze i oblikuje ih u rezultate koje je lako interpretirati. Najduža je i najkompleksnija, izgrađena je modularno radi lakših modifikacija.



Slika 7. Opis glavnih funkcija skripte 5

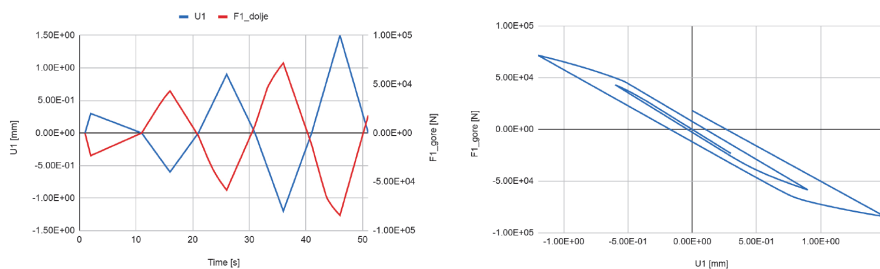
5 Numerički primjer

Na slici 8 prikazan je model kalibriran sukladno eksperimentu opisanom u članku [9]. Zid je dimenzija $1 \times 0,4 \times 1,5$ [m], izrađen od opeke. Na slici 8 mogu se vidjeti promatrani presjeci (crveno, lijevo), mreža konačnih elemenata (sredina) te prikaz plastičnih deformacija na zidu nakon provedene analize. Setovi su kombinirani tako da se promatraju krajnje vanjske površine kao jedan PIER element. Promatraju se sila i pomak u ravnini, za proizvoljno opterećenje, radi demonstracije izvoza rezultata ovakvog kompleksnijeg modela.

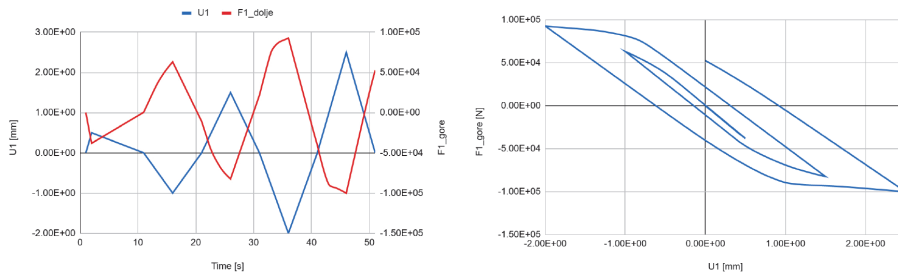


Slika 8. Zid obrađen za primjer. Označeni setovi/mesh/rezultati

Na grafovima (slika 9 i slika 10) su prikazane poprečna sila i pomak u ravnini, za dva slučaja opterećenja prisilnim pomakom baze. Naneseni pomak i ostvarena sila tijekom analize mogu se vidjeti na lijevom grafu (slika 9 i slika 10), a oblik histereze zida na desnom (slika 9 i slika 10). Prikazani su rezultati dobiveni importiranjem rezultata pomoću opisanih skripti u excel, bez daljnje obrade. Klasično Abaqus sučelje omogućava ovakav prikaz histereze zida, ali takav ručni postupak zahtjeva puno vremena. Pri analizi konkretne građevine sama brojnost zidova znači da bi takav postupak vađenja i obrade podataka bio neracionalna upotreba vremena. Automatizacija navedenih koraka omogućava sistematizirani izvoz podataka iz Abaqusa, sa histerezama konkretnih elemenata te maksimalnim i minimalnim vrijednostima sila i pomaka za dimenzioniranje ili provjeru faktora sigurnosti.



Slika 9. Rezultati u vremenu (lijevo) i kao histereza (desno), za maksimalni pomak od 1,5 mm



Slika 10. Rezultati u vremenu (lijevo) i kao histereza (desno), za maksimalni pomak od 2,5 mm

6 Zaključak

Opisane skripte su u trenutnom obliku u stanju izvaditi rezultate za veći model, sa više različitih zidova i katova, zidovima pod raznim kutevima te za više različitih složenih dinamičkih proračuna i sve navedeno složiti u jednu excell tablicu za daljnju analizu. Da se takav izvoz podataka pokuša ručno izvesti, ovisno o veličini modela, to bi moglo trajati danima, ako ne i tjednima. Ručno vađenje takvih podataka bi također povećalo vjerojatnost pogreške. Skriptiranjem izvoza i obrade podataka značajno proširujemo primjenu Abaqus softvera u građevinarstvu, a opisane skripte imaju dosta potencijala i za daljnji razvoj. Izvozom sila i pomaka označenih presjeka, skripte omogućavaju provjeru oblika histereza pojedinih zidova, prikaza maksimalnih sila u presjeku, prikaza međusobne ovisnosti bilo kojih izvedenih veličina, kao na primjer ovisnost poprečne sile i momenta u ravnini zida. Mogućnost ispisa histereze također olakšava kalibraciju zakona ponašanja materijala izloženog cikličkom opterećenju. Ispis maksimalnih vrijednosti sila i pomaka omogućava brzu provjeru nosivosti po normi. Također ako se radi o ispisu većeg broja analiza, moguće je promatranje utjecaja nekih ulaznih parametara na konstrukciju, kao što su modul elastičnosti, prigušenje, opterećenje itd. Obzirom da skripte prate pomake konkretnih čvorova, neovisno o ostalim parametrima modela, moguće je koristiti proizvoljan zakon ponašanja, proizvoljna opterećenja te složenu geometriju. Potrebno je spomenuti i ograničenja trenutnih skripti, šablonski su primjenjive na uobičajene zidove i nadvoje. Ako se radi o drugačijim elementima za dimenzioniranje potrebno je primijeniti nešto kreativnosti. Primjer elementa na koji je skripta lako primjenjiva je zid u zgradi, kojemu vlastita težina ne doprinosi značajno ukupnoj uzdužnoj sili te koji ima klasične rubne uvjete, odnosno kontakt sa konstrukcijom na vrhu i na dnu. Primjer gdje je upotreba ograničena bi bio nosivi fasadni zid bez otvora, koji se proteže od dna do vrha građevine i na koji se nastavlja zid sa otvorima. Takav zid nema jednostavne rubne uvjete i analiza nije šablonska po trenutnim skriptama. No moguće je definirati nekoliko presjeka po visini takvog zida i dobiti dijagrame njegovih unutarnjih sila i deformacija te na osnovu njih provjeriti nosivost zida. Za

kraj treba spomenuti da s riješenim definiranjem presjeka i vađenjem sila iz istih, postojeće skripte se mogu prilagoditi za drugačiji output. Na prethodnom primjeru fasadnog zida, bilo bi potrebno dodati kod u skripti 5 koji bi odgovarajuće presjeke složio tako da nacрта dijagrame unutarnjih sila te u skripti 2 dodati novi tip presjeka za crtanje tih dijagrama. Ostatak koda može ostati nepromijenjen.

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP – 2020-02-1128.

Literatura

- [1] RADIMPEX – Tower, <https://www.radimpex.rs/en/tower>
- [2] SAPFIRE SAP2000, <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- [3] SAPFIRE ETABS, <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- [4] STA DANA 3MURI, <https://www.3muri.com/s-t-a-data/>
- [5] Python, <https://www.python.org/>
- [6] Dassault Simulia – Abaqus, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [7] Roudane, B., Adanur, S., & Altunışık, A. C.: Numerical modeling of masonry infilled reinforced concrete building during construction stages using Abaqus software. *Buildings* 9(8), 2019, 181.
- [8] Raza, A., & Ahmad, A.: Numerical investigation of load-carrying capacity of GFRP-reinforced rectangular concrete members using CDP model in ABAQUS. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [9] Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., & Bosiljkov, V. (2015). Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings. *Bulletin of earthquake engineering*, 13(1), 203-236.