

# Učinak pregradnih zidova na potresnu otpornost zidane zgrade s drvenim stropovima

---

Loina, Sara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:653181>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sara Loina**

**Učinak pregradnih zidova na potresnu otpornost zidane zgrade s  
drvenim stropovima**

**Diplomski rad**

**Rijeka, veljača 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo  
Smjer: Konstrukcije**

**Potresno inženjerstvo**

**Sara Loina  
JMBAG: 0114029695**

**Učinak pregradnih zidova na potresnu otpornost zidane zgrade s  
drvenim stropovima**

**Diplomski rad**

**Rijeka, veljača 2022.**

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**  
Znanstveno područje: Tehničke znanosti  
Znanstveno polje: Građevinarstvo  
Znanstvena grana: Nosive konstrukcije

Tema diplomskog rada

**UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE  
ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA  
EFFECT OF PARTITION WALLS ON SEISMIC RESISTANCE OF A MASONRY BUILDING WITH  
TIMBER FLOOR STRUCTURES**

Kandidatkinja: **SARA LOINA**

Kolegij: **POTRESNO INŽENJERSTVO**

Diplomski rad broj: **K-2021-16**

**Zadatak:**

Studentica treba provesti proračun potresne otpornosti konstrukcije tradicionalne zidane zgrade tipologije i konstrukcije koja je karakteristična za središte grada Rijeke. Zgrada treba imati prizemlje i dva kata te drveno krovništvo. Izvorno zgrada ima stropnu konstrukciju tipa drvenog grednika. Nosivi i pregradni zidovi zgrade su zidani punom opekam u vapnenom mortu. U proračunu potresne otpornosti treba uzeti u obzir utjecaj pregradnih zidova od pune opeke koji se protežu kroz sve tri etaže zgrade i povezani su s nosivim zidovima na koje se oslanjaju stropovi. Tako određenu potresnu otpornost treba usporediti s proračunanom potresnom otpornošću bez uzimanja u obzir doprinosa pregradnih zidova.

Rad treba sadržavati: uvod, teorijski pregled, tehnički opis konstrukcije zgrade, nacрте, proračune konstrukcije i zaključak.

**Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.**

**Komentor:**

doc. dr. sc. Paulo Šćulac,  
dipl. ing. građ.

**Mentor:**

prof. dr. sc. Davor Grandić,  
dipl. ing. građ.

## ***IZJAVA***

Diplomski rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentorom i komentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Sara Loina

U Rijeci, 29. listopada 2021.

## IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija**

**(Improvement of design models for condition assessment of structures)**

Voditelj projekta prof. dr. sc. Ivana Štimac Grandić

Šifra projekta uni-tehnic-18-127

Financijer projekta Sveučilište u Rijeci

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 28. listopada 2021. godine

Mentor:

prof. dr. sc. Davor Grandić

## **SAŽETAK:**

U ovom diplomskom radu proveden je teorijski pregled i numerička analiza tradicionalne zidane zgrade iz 19. stoljeća na potresnu otpornost. Prikazuju se podaci postojećeg stanja konstrukcije koje je potrebno poznavati prije druge faze obnove zgrada oštećenih u potresu, odnosno popravka konstrukcije. Posebna pozornost posvećena je nelinearnom statičkom proračunu postupnog guranja (eng. pushover analysis) temeljenom na pomacima. Za provedbu nelinearnog statičkog proračuna konstrukcije zidane zgrade koristio se programski paket 3Muri, koji je specijaliziran za potresnu analizu konstrukcija izvedenih od zidanih i mješovitih materijala. Naglasak se stavlja na promatranje utjecaja pregradnih zidova na cjelokupnu nosivost konstrukcije, prema čemu su se modelirala dva različita modela zgrade, sa i bez pregradnih zidova. Provedbom proračuna, prikazani su dobiveni rezultati kao usporedba dvaju modela prema kojima će se zaključiti tema istraživanja ovog rada.

**Ključne riječi:** tradicionalna zidana zgrada, potres, proračun konstrukcije, pregradni zidovi, modeli, nelinearni statički proračun

## **ABSTRACT:**

In this graduate thesis, a theoretical overview and numerical analysis of a traditional masonry building from the 19th century was conducted to earthquake resistance. This thesis presents data on the current condition of the structure that need to be known before the second phase of reconstruction of buildings damaged in earthquake, ie repair of the structure. Special attention is paid to the non-linear static analysis, known as pushover analysis based on displacements. The 3Muri software package, which specializes in seismic analysis of structures made of masonry and mixed materials, was used to perform a pushover analysis of masonry building. Emphasis is placed on observing the impact of partition walls on the overall load-bearing capacity of the structure, according to which two different models of the building were modeled, with and without partition walls. By performing the calculation, the obtained results are presented as a comparison of two models according to which the research topic of this paper will be concluded.

**Key words:** traditional masonry building, earthquake, construction analysis, partition walls, models, non-linear static analysis

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O ZIDANIM KONSTRUKCIJAMA .....	2
2.1. Tipična geometrija tradicionalnih zidanih konstrukcija .....	3
2.1.1. Zide.....	4
2.1.2. Stropna konstrukcija.....	6
2.1.3. Krovna konstrukcija .....	8
3. SVOJSTVA MATERIJALA KOMPONENATA ZIDA.....	10
3.1. Zidni elementi .....	10
3.1.1. Svojstva zidnih elemenata .....	12
3.1.2. Tlačna čvrstoća zidnih elemenata.....	13
3.2. Mort .....	14
3.2.1. Svojstva morta .....	15
4. NEARMIRANO ZIDE.....	16
4.1. Mehanička svojstva zida .....	16
4.1.1. Karakteristična tlačna čvrstoća zida .....	17
4.1.2. Karakteristična posmična čvrstoća zida .....	21
4.1.3. Karakteristična čvrstoća zida na savijanje.....	25
4.1.4. Karakteristična vlačna čvrstoća zida .....	27
4.2. Deformacijska svojstva zida .....	30
4.2.1. Modul elastičnosti .....	30
4.2.2. Modul posmika.....	31
4.2.3. Odnos naprezanje – relativna deformacija .....	31
5. PONAŠANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA U POTRESU.....	32
5.1. Faktor ponašanja .....	33
5.2. Oštećenja pojedinih elemenata konstrukcije zgrade.....	34
5.2.1. Pregradni zidovi.....	34



5.2.2.	Zabatni zidovi .....	35
5.2.3.	Krovište .....	35
5.2.4.	Stropna konstrukcija .....	35
5.3.	Oštećenja glavnog nosivog sustava .....	36
5.4.	Mehanizmi sloma.....	37
5.4.1.	Mehanizam sloma u ravnini zida.....	37
5.4.2.	Mehanizam sloma izvan ravnine zida (lokalni mehanizam) .....	41
6.	TEHNIČKI OPIS KONSTRUKCIJE ZGRADE.....	43
6.1.	Opis konstrukcije .....	43
6.2.	Proračun konstrukcije na potresno djelovanje .....	45
6.2.1.	Stalna djelovanja .....	45
6.2.2.	Promjenjivo djelovanje.....	46
6.2.3.	Potresno djelovanje .....	47
6.2.4.	Kombinacije djelovanja .....	50
6.3.	Svojstva materijala za proračun u programu 3Muri .....	54
6.3.1.	Svojstva materijala ziđa.....	54
6.3.2.	Svojstva materijala stropne konstrukcije.....	55
7.	MODELIRANJE U PROGRAMSKOM PAKETU “3MURI“ .....	56
7.1.	Određivanje ciljanog pomaka u nelinearnom statičkom proračunu postupnog guranja prema EN 1998-1.....	59
7.2.	Geometrija postojeće građevine.....	62
7.3.	Definiranje stropne konstrukcije.....	65
7.4.	Opterećenje .....	68
7.5.	Definiranje zidova.....	68
7.6.	Proračun .....	74
7.6.1.	Model 1.....	77
7.6.2.	Model 2.....	88

8.	ZAKLJUČAK.....	101
9.	LITERATURA.....	103
10.	NACRTI.....	106

Slika 1: Vrste zidnih elemenata [6] .....	4
Slika 2: Vrste ziđa [7].....	5
Slika 3: Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [8].....	7
Slika 4: Aksonometrijski prikaz dvostrešne dvostruke visulje [8].....	9
Slika 5: Uzorak i dijagram za određivanje posmične čvrstoće [18].....	22
Slika 6: Ispitivanje posmične čvrstoće pomoću horizontalne preše neke postojeće građevine [6] .....	23
Slika 7: ravnina sloma paralelna s horizontalnim sljubnicama morta, $f_{xk1}$ [2].....	25
Slika 8: ravnina sloma okomita na horizontalne sljubnice morta, $f_{xk2}$ [2] .....	25
Slika 9 a) i b): Ispitivanje vlačne čvrstoće ziđa [6] .....	28
Slika 10: Dijagram naprezanje – relativna deformacija [11].....	30
Slika 11: Dijagram naprezanje – relativna deformacija [11].....	31
Slika 12: grafički prikaz odnosa potresna sila – pomak za idealno elastično i stvarno ponašanje građevine [1].....	33
Slika 13: Mehanizmi sloma ziđa: a) slom savijanjem, b) slom klizanjem po sljubnici morta, .....	38
Slika 14: Opće ponašanje nearmiranog ziđa uzrokovano kombiniranim djelovanjem tlačnih i posmičnih naprezanja [3] .....	40
Slika 15: Tipovi mehanizama otkazivanja zidova izvan ravnine [25].....	42
Slika 16: Način izvedbe dvoslojnog nosivog zida [27] .....	43
Slika 17: Tlocrt katova i smjer pružanja drvenih grednika stropne konstrukcije [vlastiti izvor] .....	44
Slika 18: Karta potresnih područja RH za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla $a_{gr}$ za tlo razreda A, poredbeni povratni period potresa 475 godina, poredbenu vrijednost prekoračenja 10% i razdoblje trajanja građevine 50 godina [21].....	47
Slika 19: Izrazi za definiranje elastičnog spektra odziva $S_e(T)$ [20].....	48
Slika 20: Elastični spektar odziva $S_e(T)$ tipa 1 za sve razrede temeljnog tla i 5%-tno prigušenje [21].....	50
Slika 21: Ravninski makroelementi zida: a) model zida b) vezne grede c) zidni stupac d) kruti elementi e) pojednostavljeni prikaz ekvivalentnog okvira [36].....	56
Slika 22: prikaz zida u programu 3Muri.....	57
Slika 23: Prikaz zida modeliranog zamjenskim okvirima (zelena boja-vezne grede, smeđa boja-zidni stupci, siva boja-kruti čvor).....	57
Slika 24: Određivanje idealiziranog perfektnog elastoplastičnog odnosa sila-pomak [20] 60	

Slika 25: Određivanje ciljanog pomaka za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode za kratkoperiodični raspon [20] .....	62
Slika 26: Određivanje ciljanog pomaka za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode za srednje i dugoperiodični raspon [20] .....	62
Slika 27: 3D vizualizacija konstrukcije s teksturama materijala .....	63
Slika 28: Proračunski model zamjenjujućih okvira .....	63
Slika 29: Tlocrtna shema zidova i stropa kata .....	64
Slika 30: Ponuđene vrste stropova u programskom paketu 3Muri .....	65
Slika 31: Definiranje stropne konstrukcije .....	66
Slika 32: Definiranje opterećenja i statičkih karakteristika stropa .....	67
Slika 33: Tablica unosa karakteristika ugrađenog materijala .....	69
Slika 34: Tablica vrijednosti karakteristika materijala za kriterij Turnšek/Čačovič i Mohr/Coulomb .....	71
Slika 35: Vrijednosti parametara unesenih u program .....	73
Slika 36: Definiranje vrste materijala i dimenzija zidova .....	73
Slika 37: Potresni parametri korišteni u proračunu .....	75
Slika 38: Vrijednosti faktora ispunjenja za model 1.1. ....	78
Slika 39: krivulja kapaciteta modela 1.1. za X i Y smjer (V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije) .....	79
Slika 40: Prikaz promatranog zida i kontrolne točke konstrukcije .....	80
Slika 41: krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja) .....	80
Slika 42: Oštećenja i slom elemenata promatranog zida za mjerodavni proračun za trenutak sloma prvog elementa u X smjeru .....	81
Slika 43: Promatrani zid P11 u Y smjeru .....	82
Slika 44: Prikaz sloma prvog elementa nosivog zida Y smjera .....	83
Slika 45: Krivulja kapaciteta za promatrani zid u Y smjeru .....	83
Slika 46: Vrijednosti faktora ispunjenja za model 1.2. ....	84
Slika 47: krivulja kapaciteta modela 1.2. za X i Y smjer (V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije) .....	85
Slika 48: Razvoj oštećenja u karakterističnom zidu od početka do kraja proračuna .....	87
Slika 49: Faktori ispunjenja modela 2.1. bez utjecaja pregradnih zidova .....	89
Slika 50: Krivulja kapaciteta modela 2 za X i Y smjer (V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije) .....	90

Slika 51: Postotak oštećenih elemenata pojedinog zida u X smjeru (lijevo) i Y smjeru (desno) .....	90
Slika 52: Tlocrt zidova s označenim promatranim zidom u X smjeru .....	91
Slika 53: Oštećenja i slomovi pojedinih elemenata u karakterističnom zidu X smjera .....	91
Slika 54: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja) .....	92
Slika 55: Tlocrt zidova s označenim promatranim zidom u Y smjeru .....	92
Slika 56: Oštećenja i slom elementa prizemlja u karakterističnom zidu Y smjera .....	93
Slika 57: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u Y smjeru.....	93
Slika 58: Faktori ispunjenja modela 2.2. bez pregradnih zidova.....	94
Slika 59: Krivulja kapaciteta modela 2.2. za X i Y smjer (V-poprečna sila, d-pomak konstrukcije).....	95
Slika 60: Tlocrt zidova s označenim zidom P5 promatranim u proračunu za X smjer .....	95
Slika 61: Oštećenja i slomovi makroelemenata u karakterističnom zidu u trenutku sloma prvog konstruktivnog elementa X smjera.....	95
Slika 62: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja) .....	96
Slika 63: Tlocrt zidova s označenim zidom P7 promatranim u proračunu za Y smjer .....	96
Slika 64: Oštećenja i slomovi makroelemenata u karakterističnom zidu Y smjera .....	97
Slika 65: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u Y smjeru (granično stanje blizu rušenja) .....	97

Tablica 1: Geometrijski zahtjevi za razvrstavanje zidnih elemenata u pripadajuće skupine [11] .....	11
Tablica 2: Volumenski sastav morta i odgovarajuća tlačna čvrstoća [15] .....	15
Tablica 3: Vrijednosti K za kombinaciju raznih zidnih elemenata i mortova [11] .....	20
Tablica 4: Vrijednosti faktora oblika, $\delta$ [11] .....	20
Tablica 5: Vrijednosti početne posmične čvrstoće zida, $f_{vk0}$ [11].....	24
Tablica 6: Vrijednosti $f_{xk1}$ za ravninu sloma paralelnu s horizontalnim sljubnicama [19] .....	26
Tablica 7: Vrijednosti $f_{xk2}$ za ravninu sloma okomitu na horizontalne sljubnice [19].....	26
Tablica 8: Karakteristične vrijednosti svojstava zida [2] .....	29
Tablica 9: Faktori ponašanja ovisni o načinu gradnje [20] .....	33
Tablica 10: Vrijednosti faktora ponašanja usvojene u Republici Hrvatskoj [21].....	34
Tablica 11: Podjela oštećenja zidanih zgrada prema EMS-98 [24].....	39
Tablica 12: Stalno opterećenje stropne konstrukcije .....	45
Tablica 13: Uporabna opterećenja u zgrada kategorije A [30].....	46
Tablica 14: Vrijednosti uporabnih opterećenja [29].....	46
Tablica 15: Tipovi temeljnog tla i pripadajuće prosječne brzine prostiranja posmičnih valova $v_{s,30}$ za tlo debljine 30m [21] .....	48
Tablica 16: Vrijednosti parametara za preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 [21] ....	49
Tablica 17: Koeficijenti kombinacije $\psi$ za zgrade prema HRN EN 1990 [33].....	52
Tablica 18: Vrijednosti $\rho$ za proračun $\psi E, i$ prema HRN EN 1998-1[20].....	53
Tablica 19: Karakteristične vrijednosti svojstava zida ( $N/mm^2$ ) [2] .....	54
Tablica 20: Razredi mekog cjelovitog drva [35] .....	55
Tablica 21: Prikaz opterećenja .....	68
Tablica 22: Provedeni proračuni i metoda za oba modela.....	77
Tablica 23: Rezultati proračuna u programu 3Muri za uvjet sloma prvog kritičnog elementa .....	100
Tablica 24: Rezultati proračuna u programu 3Muri za uvjet globalnog otkazivanja konstrukcije .....	100

## 1. UVOD

Potresi, koji su se dogodili na području Zagreba i Banovine, potaknuli su brojna zanimanja za detaljnije istraživanje i proširenje znanja o samom djelovanju potresa, ponašanju konstrukcija uslijed potresnog opterećenja te naposljetku o adekvatnim sanacijama oštećenih zgrada. Potres se definira kao gibanje tla prouzročeno iznenadnim pomacima unutar zemljine kore. Takva gibanja tla smatraju se izvanrednim djelovanjima u statistički prosječnim vremenskim razmacima. Ti vremenski razmaci nazivaju se povratna razdoblja, prema kojima se konstruiraju proračunski spektri odziva, ključni za proračun konstrukcije na potresno djelovanje. U ovom radu promatrati će se tradicionalna zidana zgrada za riječko potresno područje izgrađena u 19. stoljeću, predstavljajući arhitektonski tip zgrade s često najvećim pretrpljenim oštećenjima. Tradicionalne zidane zgrade tlocrtno su najčešće simetrične i pravokutne, nosivi i pregradni zidovi izvodili su se od klasične pune opeke povezane vapnenim mortom, a stropne konstrukcije od drvenih grednika oslonjenih na nosive zidove. U radu će se prikazati proračun potresne otpornosti zgrade primjenom nelinearne statičke metode postupnog guranja u smjeru rasprostiranja nosivih zidova. Nelinearna statička metoda postupnog guranja smatra se najprikladnijom metodom za potresni proračun postojećih zidanih konstrukcija. Korištena geometrija tradicionalne zgrade proizlazi iz detaljnog pregleda arhive i arhivskih nacrti zgrada 19. stoljeća na području grada Rijeke. U sljedećem koraku izrađeni su nacrti konstrukcije zgrade u kojima je definirana geometrija zgrade. Prije samog proračuna konstrukcije, provodi se analiza opterećenja na konstrukciju, opsežno istraživanje i pronalazak odgovarajućih mehaničkih i deformacijskih svojstva starog ziđa, drvene stropne konstrukcije kao i morta za tradicionalnu zgradu iz provjerljivih izvora. Potresni proračun konstrukcije proveden je s pomoću programskog paketa 3Muri, prilagođenog za zidane konstrukcije. Unošenjem svih potrebnih parametara u program i definiranjem geometrije konstrukcije provodi se potresni proračun s ciljem usporedbe rezultata potresne otpornosti dobivenih za istu konstrukciju zidane zgrade proračunom naprezanja i deformacija ziđa dva različita modela konstrukcije. Prvi model definira se prema stvarnom stanju konstrukcije s utjecajem pregradnih zidova od pune opeke. Pregradni zidovi protežu se u poprečnom smjeru kroz sve tri etaže povezujući se s nosivim zidovima. Drugi model definiran je bez ucrtanih pregradnih zidova, odnosno bez uzimanja u obzir njihova utjecaja na cjelokupnu nosivost konstrukcije. Dobivena potresna otpornost modela s doprinosom pregradnih zidova uspoređuje se s rezultatima potresne otpornosti bez doprinosa pregradnih zidova.

## 2. OPĆENITO O ZIDANIM KONSTRUKCIJAMA

Zidane konstrukcije su jedne od najstarijih i najraširenijih vrsta građevina od samog početka građenja pa do danas. Definicija zidanih konstrukcija (Sorić, 2016: 61) glasi: „Zidane konstrukcije su konstrukcije izvedene iz zidnih elemenata (opeke ili blokova) povezanih mortom ili nekim sličnim materijalom anorganskog ili organskog podrijetla i koje su zidane na gradilištu ili su izvedene u obliku predgotovljenog ziđa u tvornici i spojene na gradilištu u konstrukcijsku cjelinu.“ Zidni element je unaprijed oblikovan građevinski element koji zajedno s vezivnim materijalom naizmjeničnim polaganjem tvori sklop poznat kao ziđe. Najstarije ziđe potječe iz 9000. godine prije Krista, a pronađeno je na obali jezera Hullen u Izraelu. Iako su najstariji pronađeni ostaci bili od kamenih zidanih kuća, tijekom povijesti su se razvili oblici i tehnike izrade od elemenata sušenog blata, sirove i pečene gline pa sve do današnjih zidnih elemenata proizvedenih od suvremenih materijala (betonskih, vapneno-silikatnih...). Prva pojava pečene opeke sušene na suncu u Europi pronađena je na grčkoj Troji. Brojne danas povijesno poznate građevine kao što su Kineski zid (ujedno i najveća građevina), piramide u Egiptu, Koloseum u Rimu, Partenon u Grčkoj, Dioklecijanova palača u Splitu, Amfiteatar u Puli i brojne druge ukazuju na široku primjenu i dugu tradiciju građenja zidanih konstrukcija diljem svijeta [1]. Sama činjenica postojanja zidanih građevina od pamtivijeka leži u jednostavnosti njihove izvedbe, tj. postupka zidanja i dugom vijeku trajanja ziđa kao konstrukcijskog materijala. Međutim, zbog pogoršanja mehaničkih svojstava tokom vremena, nedostatne edukacije i znatnoj složenosti u ponašanju, zidane konstrukcije su se počele sve manje primjenjivati. Tek razvojem tehnologije i računalnih programa dolazi do intenzivnijeg istraživanja ziđa i njegovog ponašanja pri različitim djelovanjima. Tim činom zidane konstrukcije ponovno dolaze u uporabu dokazavši se za određene namjene boljima od armiranobetonskih. Ono što karakterizira zidane konstrukcije jest velika heterogenost, neujednačenost i raznolikost, no ujedno su i ekonomične, različitih mogućnosti oblikovanja, masivne, dobrih akustičnih i toplinskih svojstva, otporne na požar, krute, energetske štedljive, svestrane obzirom na uporabnu vrstu građevine, materijalno lako dostupne i mogu se reciklirati. Danas, kada u svijetu vlada ekološka osviještenost, zidni elementi su, za razliku od ostalih građevinskih materijala, lakše uporabljivi bez štetnih posljedica na zdravlje njihovih korisnika. Sukladno tome razvila se tehnologija izrade elemenata za zidanje i unaprijedio se način građenja što dovodi do vrhunca upotrebe zidanih konstrukcija [3].



Veliku ulogu u proračunu zidanih konstrukcija ima Eurokod 6, u kojem se nalaze svi potrebni podaci, preporuke, zahtjevi i izrazi kojima se na pravilan i siguran način određuju mehanička svojstva zida, a s time i samo dimenzioniranje zidanih građevina. Zidane konstrukcije su se kroz povijest uglavnom projektirale za preuzimanje vertikalnog opterećenja na koje su veoma otporne, no ne i na horizontalna djelovanja. Pri pojavi potresa dolazi do djelovanja horizontalnih sila na konstrukciju koja se pokazala vrlo osjetljivom na takvu vrstu opterećenja s obzirom na mehanička svojstva, geometriju te nedostatak učinkovitosti spojeva između konstrukcijskih elemenata. Stoga se za proračun na potresno djelovanje koristi Eurokod 8 uzimajući u obzir potresne karakteristike pojedinih lokaliteta.

## **2.1. Tipična geometrija tradicionalnih zidanih konstrukcija**

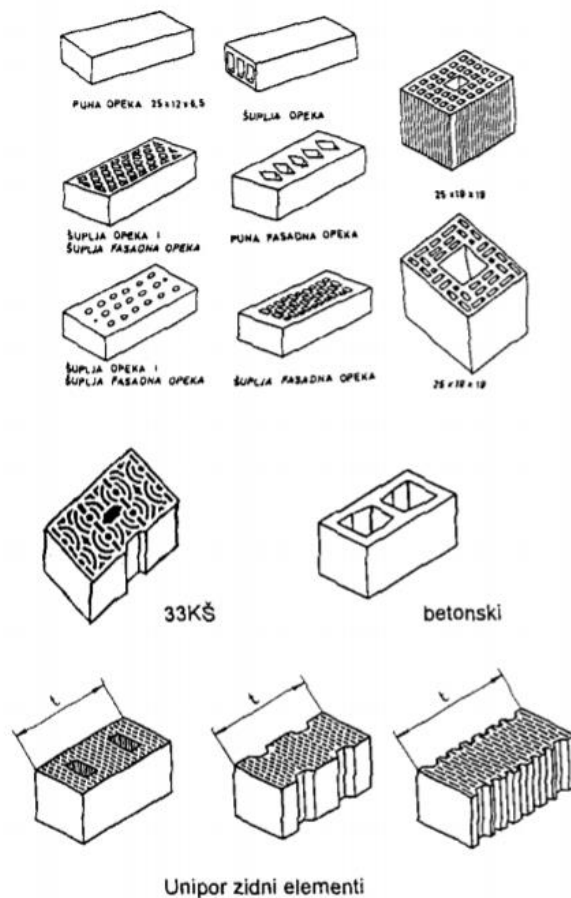
Na području Hrvatske stoljećima se kao tradicionalni građevinski materijal rabio lokalno dostupni kamen i opeka. Upotreba opeke porasla je tek u 19. stoljeću i tako zamijenila kamen kao osnovni građevni materijal zidanih konstrukcija. Zgrade su se izvodile od lomljenog kamena kao dvoslojni zidovi, s ispunom od manjih komada kamena, ili od opeke u vapnenom mortu. Najčešće su se izvodili dvoslojni zidovi od pune opeke. Stropne konstrukcije su bile izvedene od drvenih greda, a iznad otvora, podruma i prizemlja često su se izvodile konstrukcije svodova i lukova od opeke. Tradicionalne zgrade tlocrtno su bile najčešće simetrično pravokutne s visinom do pet katova. Nearmirano ziđe nije prihvatljivo za zgrade visine veće od 2 nadzemna kata. Uobičajeno su se, osobito u urbanim središtima, izvodile zgrade u nizu međusobno povezane sa zidovima susjednih zgrada. Takvo izvođenje za posljedicu ima ovisnost susjednih zgrada o međusobnim karakteristikama, što može predstavljati znatan problem pri saniranju oštećenja pojedine konstrukcije. U tom pogledu optimalnije je bilo izvođenje samostojećih zgrada, iako se koncepcija zgrada u nizu pokazala otpornijom na djelovanje potresa u pogledu oštećenja konstrukcija [5]. Krovništa zidanih zgrada učestalo su se izvodila kao dvostrešna sa zabatnim zidovima, a otvori u zidovima većinom su bili istih dimenzija i simetričnog rasporeda. U rasporedu nosive konstrukcije često se nailazilo na grube pogreške. Nosivi zidovi predviđali su se u samo jednom smjeru, dok su u suprotnom smjeru pregradni zidovi ostvarivali samo ulogu zatvaranja prostora. Takav raspored često može dovesti do rušenja konstrukcije. Međusobni razmak ili raspon između paralelnih zidova koji nose isti strop najčešće je bio 4-5 m, rjeđe 6 m te samo iznimno više [3].

### 2.1.1. Zide

Zide je sklop zidnih elemenata položenih na unaprijed određen način i povezanih mortom. Svaka komponenta zida može biti različita što se može dokazati na primjeru debljina sljubnica ispunjenih mortom. Više o samom mortu govoriti će se u poglavlju 3.2.

Zidni elementi mogu se raspodijeliti u više različitih skupina, a ona najznačajnija podjela je prema vrsti materijala (Slika 1), stoga se razlikuju:

- Opečni
- Vapnenosilikatni
- Betonski (gusti i lagani agregat)
- Zidni elementi od porastoga betona
- Zidni elementi od umjetnog kamena
- Zidni elementi od obrađenog prirodnog kamena

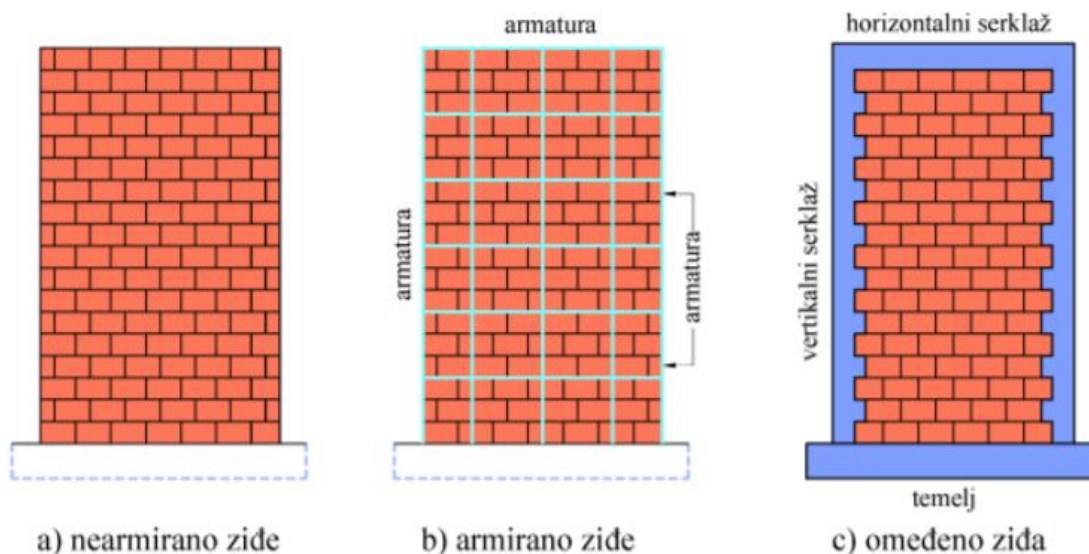


Slika 1: Vrste zidnih elemenata [6]

Zidni elementi imaju veliku tlačnu čvrstoću i krhki su te isto kao i mort vrlo malu vlačnu čvrstoću. Vrlo bitan faktor međusobnog funkcioniranja tih dviju komponenti zida čini adhezija koja se javlja na kontaktnoj površini zidnih elemenata i morta koji ujedno ima veću mogućnost deformiranja u odnosu na zidne elemente.

Vrste zida mogu se podijeliti u četiri skupine (Slika 2):

- Nearmirano zide
- Omeđeno zide – nearmirano zide omeđeno vertikalnim serklažima, horizontalnim serklažima i temeljima
- Armirano zide – s armaturom u horizontalnim i/ili vertikalnim sljubnicama
- Prednapeto zide – s ugrađenom prednapetom armaturom koja u zide unosi dodatnu tlačnu silu



Slika 2: Vrste zida [7]

Čvrstoće zida ovise o zidnim elementima kod kojih osim njihove čvrstoće treba uzeti u obzir i njihov postotak šupljina, ako one postoje, kao i omjer vanjskih dimenzija. Ovaj rad će glavnu pozornost posvetiti temeljnom proučavanju nearmiranog zida sa zidnim elementima od pune opeke za čija se svojstva kao i svojstva njegovih komponenata posebno naglašavaju zahtjevi u europskoj normi za zidane konstrukcije (EN 1996-1), pogotovo ako se nalaze u potresno aktivnim područjima (EN 1998-1).

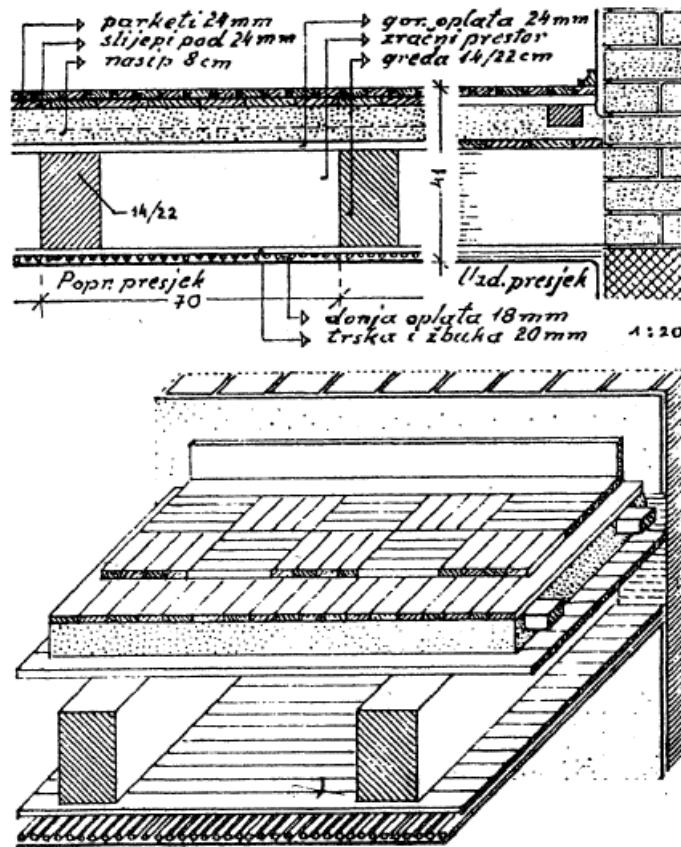
Nearmirano zide je kompozit koji se izvodi zidanjem zidnih elemenata u mortu. Ovaj tip konstrukcija ima široku povijesnu primjenu i spada u većinu današnje kulturne baštine. Nearmirano zide u osnovi predstavlja neduktilni konstrukcijski materijal. Slom kod nearmiranog zida nastupa zbog prekoračenja vlačne i posmične ili tlačne čvrstoće i ponaša se kao krhki slom pri kojem dolazi do trošenja male količine energije. Dovoljna je samo jedna dijagonalna pukotina da bi ubrzala krhki slom.

Nearmirano zide izvodi se bez horizontalnih i vertikalnih serklaža sa otvorima u zidovima. Pregradne zidove čine paralelni zidovi sastavljeni od jednog sloja pune opeke sa funkcijom zatvaranja prostora unutar zgrade. Takvi zidovi malo sudjeluju u krutosti zgrade u slučaju većih horizontalnih djelovanja te zbog male otpornosti i znatne početne krutosti ne mogu pratiti pomake cijele konstrukcije, što dovodi do njihovog pucanja.

### ***2.1.2. Stropna konstrukcija***

Stropna konstrukcija zidanih zgrada može biti kruta ili fleksibilna. Osnovni je cilj stropne dijafragme prenijeti horizontalne sile na nosivi sustav zidova ili okvir te povezati konstrukciju u jednu cjelinu tako da se ona ponaša kao jedno tijelo prilikom potresnog djelovanja. Dijafragma se može smatrati krutom onda kada je njezin progib pri bočnom opterećenju u sredini manji od dvostrukog prosječnog pomaka na krajevima konstrukcije [3]. Stropna konstrukcija se smatra fleksibilnom kada je njezin maksimalni horizontalni pomak dva puta veći od srednjeg pomaka na njezinim krajevima [3]. Kroz povijest građenja najčešće su se izvodili drveni stropovi koji su sve do 20. stoljeća bili najmasovnija vrsta stropova [10]. Od drvenih stropnih konstrukcija u prvom redu zahtijeva se da budu čvrste, da se ne ljuljaju, ne savijaju i da dobro izoliraju zvukove i toplinu te ne propuštaju zrak i plinove. Dobar strop mora biti lagan tako da ne predstavlja preveliki teret konstrukciji koja ga nosi. Sastavni dio drvenih stropova predstavljaju glavno opterećenje, a to su drvene grede ili platice koje povezane s drugim dijelovima čine drveni grednik. Donju površinu stropa čini plafon, koji mora zadovoljavati praktične, higijenske i estetske uvjete. Gornju površinu čini pod sa svrhom kretanja korisnika, postavljanja namještaja i dr. Između poda i plafona gredniku se dodaju ulošci, nasipi i drugi elementi za toplinsku i zvučnu izolaciju. Fokus rada stavit će se na proučavanje stropne konstrukcije s običnim grednikom (Slika 4) i njezinu povezanost, tj. međudjelovanje sa zidanim konstrukcijskim elementom.

Drvene stropove je tek pojava masovne primjene armiranog betona nadmoćno nadomjestila te zajedno s pojavom armirane šuplje opeke za stropove posve istisnula i na onim manjim i jednostavnijim zgradama.



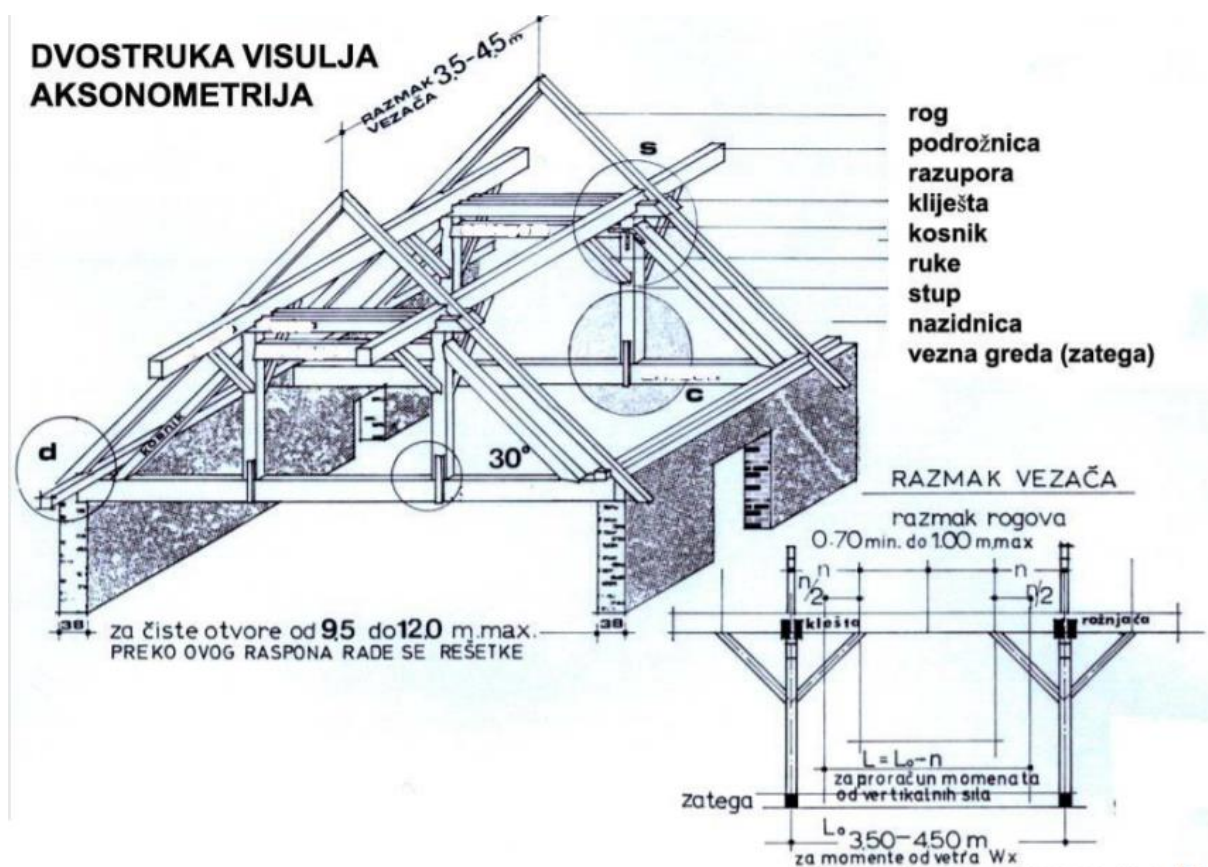
Slika 3: Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [8]

### 2.1.3. *Krovnna konstrukcija*

Krov je vrlo važan sastavni dio zgrade zbog svojih zaštitnih svojstava od vanjskih utjecaja. Krov se dijeli na dva dijela, a to su nosivi dio koji se naziva krovnna konstrukcija i krovni pokrov čiji odabir ovisi o vrsti i važnosti zgrade. Odabir vrst krovne konstrukcije ovisi o potrebnom nagibu krova, rasponu konstrukcije te vrsti pokrova. Najčešća vrsta krovne konstrukcije koja se koristi i dan danas jest drvena krovnna konstrukcija. Drvena krovništa su vrlo lagana, jednostavna za izradu, podizanje i sastavljanje te su jeftinija od suvremenih masivnih krovništa. Krovna konstrukcija, osim svoje vlastite težine, mora nositi i težinu pokrova, a također biti otporna na djelovanje snijega, udare vjetrova te opterećenje od ljudi koji se mogu zadržavati na krovu. Svako krovnište mora biti konstruirano da pretrpi prethodno spomenuta opterećenja te ih prenosi na vertikalne dijelove zgrade (zidove, stupove, temelje) i temeljno tlo. Za drvena krovništa prikladne su sve vrste pokrova pa i suvoremeni pokrovi od limova, ravnih i valovitih ploča i dr. Nagib krova promišljen je ovisno o vrsti pokrova i o klimatskim prilikama kraja u kojem se nalazi zgrada. Najčešće se izvode jednostrešna i dvostrešna krovništa, od kojih dvostrešna ipak preuzimaju popularnost tradicionalnog izvođenja. Kod dvostrešnih krovova, krovna površina podijeljena je u dva dijela, što djeluje vrlo povoljno obzirom na otjecanje kišnice izvan vanjskih zidova zgrade. Takvu vrstu krova karakterizira simetričnost ploha i kuteva nagiba s obzirom na donji rub poznat pod nazivom streha. Na gornjem rubu krovne plohe spajaju se u mjesto koje se naziva sljeme, a na bočnim strana povezuju se sa zabatnim zidovima. Odabir pravilnog statičkog sustava tradicionalnih dvostranih krovova uvelike ovisi o rasponu kojeg je potrebno savladati, važnosti zgrade te vrsti pokrova kojim se konstrukcija zaštićuje. Ako se radi o krovovima manjeg savladivog raspona tada se mogu koristiti krovovi s rogovima, takozvana prazna krovništa koja se dijele na krovništa s pajantama i roženička krovništa. Oba sustava navedenih krovništa nemaju podrožnice. Za veće raspone, potrebno je izvesti krovove s podrožnicama i punim vezovima. Takve vrste krovništa dijele se na one bez i s potporom. Ovisno o broju podrožnica i naprezanju stupova iznad kojih se one nalaze, konstrukcije krovništa s podrožnicama izvode se kao:

- Stolice – tlačni stupovi su iznad unutrašnjih nosivih zidova ili udaljeni od njih najviše 60 – 100 cm
- Visulje – vlačni stupovi ispod kojih nema nosivih zidova

Na promatranoj zidanoj zgradi u ovom radu izvoditi će se upravo sustav dvostruke visulje na rasponu od 12,6 m. Uobičajeni rasponi ovakvih sustava kreću se između 9,5 – 13,5 m bez zidova u polju i 12,5-15 m sa srednjim zidom u polju. Najveći nagib krovišta iznosi od 30 do 45 stupnjeva, a najveća duljina roga od 7 do 9 metara. Optimalan razmak punih vezova iznosi 4 metara što se u krovištu promatrane zgrade i ostvarilo. Puni vez čine vezna greda (vlačna) s donjim podrožnicama na krajevima, vlačni stupovi, dva kosnika, razupora (tlačna) i srednje podrožnice (rogovi). Stropne grede su, zajedno s rogovima, na razmaku od 80 cm, što čini svaki peti par rogova punim vezom. Na slici 5 prikazana je dvostrešna dvostruka visulja zajedno s njezinim sastavnim dijelovima.



Slika 4: Aksonometrijski prikaz dvostrešne dvostruke visulje [8]

### **3. SVOJSTVA MATERIJALA KOMPONENATA ZIDA**

#### **3.1. Zidni elementi**

Prema europskoj normi HRN EN 1996-1-1:2012, zidni element definiran je kao unaprijed oblikovan element predviđen za uporabu u gradnji zida. Osnovni materijal zidnih elemenata je onaj koji tvori njegovu glavnu masu te mu daje najvažnije građevinsko-tehničke značajke. Postoje različiti materijali od kojih se izrađuju zidni elementi i koji im definiraju različite karakteristike. Njihova podjela očituje se iz više skupina, a to su, osim vrste materijala od kojeg su izrađeni, kontrola proizvodnje i postotak šupljina izražen preko omjera obujma šupljina i bruto obujma zidnog elementa.

Prema vrsti materijala, razlikujemo već ranije spomenute zidne elemente (potpoglavlje 2.1.1):

- opečni zidni elementi
- vapneno-silikatni zidni elementi
- betonski zidni elementi
- zidni elementi od porastog betona
- zidni elementi od umjetnog kamena
- zidni elementi od prirodnog kamena

Prema kontroli proizvodnje, postoje dvije kategorije u koje se svrstavaju:

- u kategoriju 1 pripadaju svi zidni elementi za koje je proizvođač osigurao stalnu kontrolu kvalitete i koji u pošiljci imaju deklariranu srednju tlačnu čvrstoću sa 5% fraktila
- u kategoriju 2 pripadaju zidni elementi koji imaju vrijednost srednje tlačne čvrstoće jednaku objavljenoj. Zidni elementi od prirodnog kamena svrstavaju se u tu kategoriju.

Prema postotku šupljina zidni elementi dijele se u četiri skupine: 1, 2a, 2b, 3. Spomenute skupine prikazane su u Tablici 1 gdje su dani zahtjevi koje određena grupa zidnih elemenata mora ispuniti. Debljina vanjskih stijenki ne bi smjela biti manja od 15mm te razmještaj šupljina treba odgovarati da nema rizika od oštećenja stijenki prilikom proizvodnje, rukovanja ili uporabe.



Tablica 1: Geometrijski zahtjevi za razvrstavanje zidnih elemenata u pripadajuće skupine [11]

	Materijali i ograničenja za zidne elemente							
	Skupina 1 (svi materijali)	Zidni elementi	skupina 2		skupina 3		skupina 4	
			Vertikalne šupljine				Horizontalne šupljine	
Obujam svih šupljina (% od bruto obujma)	≤ 25	opečni	>25:≤55		>25:≤70		>25:≤70	
		vapneno silikatni	>25:≤55		ne upotrebljava se		ne upotrebljava se	
		betonski	>25:≤60		>25:≤70		>25:≤50	
Obujam bilo koje šupljine (% od bruto obujma)	≤ 12,5	opečni	svaka od višestrukih šupljina ≤ 2 udubine za prihvata do ukupno 12,5		svaka od višestrukih šupljina ≤ 2 udubine za prihvata do ukupno 12,5		svaka od više šupljina ≤ 30	
		vapneno silikatni	svaka od višestrukih šupljina ≤ 15 udubine za prihvata do ukupno 30		ne upotrebljava se		ne upotrebljava se	
		betonski	svaka od višestrukih šupljina ≤ 30 udubine za prihvata do ukupno 30		svaka od višestrukih šupljina ≤ 30 udubine za prihvata do ukupno 30		svaka od višestrukih šupljina ≤ 25	
Objavljene vrijednosti debljina unutarnjih i vanjskih stijenci [mm]	Nema zahtjeva		unutarnja stijenka	vanjska stijenka	unutarnja stijenka	vanjska stijenka	unutarnja stijenka	vanjska stijenka
		opečni	≥ 5	≥ 8	≥ 3	≥ 6	≥ 5	≥ 6
		vapneno silikatni	≥ 5	≥ 10	ne upotrebljava se		ne upotrebljava se	
		betonski	≥ 15	≥ 18	≥ 15	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Objavljena vrijednost kombinirane debljine unutarnjih i vanjskih stijenci (% ukupne širine)	Nema zahtjeva	opečni	≥ 16		≥ 12		≥ 12	
		vapneno silikatni	≥ 20		ne upotrebljava se		ne upotrebljava se	
		betonski	≥ 18		≥ 15		≥ 45	

### 3.1.1. Svojstva zidnih elemenata

U ovom radu proučavati će se zidovi od tradicionalne pune opeke te njihova svojstva. Kao građevinski materijal, opeka spada u prvi i najstariji koji je umjetno proizveden. Zahvaljujući svojim vrlo dobrim svojstvima upotreba opeke je još uvijek široko rasprostranjena za zidove manjih stambenih, javnih, gospodarskih i drugih objekata. Puna opeka koristi se za zidanje unutarnjih i vanjskih nosivih i nenosivih zidova koji će se naknadno žbukati i oblagati nekim drugim materijalom. Korištenje pune opeke nije preporučljivo za konstrukcije za čije zidove nije predviđeno žbukanje i oblaganje. Što se tiče kvalitete i drugih osobina pune opeke u odnosu na današnje šuplje opeke i opekarske blokove, ona je znatno manja u pogledu postizanja potrebne nosivosti te je lošiji toplinski izolator što je zapravo i uzrok izvedbe zidova puno većih debljina nego danas. Tehnička svojstva zidnih elemenata određuju se prema normiranim specifikacijama ili se na osnovi normi ispituje svaki tip proizvoda zasebno ovisno o različitosti pojedinih zidnih elemenata. Međutim, ista tehnička svojstva definiraju se za sve zidne elemente obzirom da ona ovise o konačnoj namjeni elemenata u samoj građevini. Tehnička svojstva koja se prema propisanim normama za projektiranje zidanih konstrukcija HRN EN 1996 i projektiranje konstrukcija otpornih na potres HRN EN 1998, moraju definirati jesu:

- Oblici zidnih elemenata
- Toplinska svojstva
- Obujamska masa, bruto i neto
- Vodoupojnost
- Reakcija na požar
- Kretanje vlage
- Paropropusnost
- Izmjere i odstupanja
- Sadržaj topljivih soli
- Trajnost – prema otpornosti na zamrzavanje/odmrzavanje
- Čvrstoće: tlačna, vlačna, čvrstoća na savijanje i čvrstoća prionjivosti

Kao osnovno svojstvo zidnih elemenata ubraja se njihova tlačna čvrstoća i trajnost. U pogledu trajnosti zidni elementi moraju zadovoljiti propisanu otpornost za predviđeno vrijeme uporabe građevine u lokalnim uvjetima okoline. U proračunu se tlačna čvrstoća uzima kao normalizirana srednja tlačna čvrstoća  $f_b$ , u smjeru primijenjenog učinka djelovanja.

Razlog toga je što je bilo uobičajeno da se zidni element naziva po svojoj tlačnoj čvrstoći, poznatoj pod nazivom marka, no uz tu čvrstoću potrebno je uzeti u obzir i oblik elementa jer su za nosivost zida također mjerodavne i dimenzije elementa kao i način ugrađivanja u zide.

Sagledavajući visinu i širinu elemenata, manja visina nosi za posljedicu veći broj horizontalnih sljubnica morta i u tome leži odluka prelaska na normaliziranu tlačnu čvrstoću zidnog elementa [2].

### ***3.1.2. Tlačna čvrstoća zidnih elemenata***

Normaliziranom tlačnom čvrstoćom zidnog elementa smatra se tlačna čvrstoća prevedena na tlačnu čvrstoću na zraku sušenog zidnog uzorka širine 100 mm i visine 100 mm. Takva čvrstoća ovisi i o vlažnosti zidnog elementa u trenutku ispitivanja, stoga se dobivanje srednje tlačne čvrstoće ostvaruje ispitivanjem uzoraka koji su prethodno bili 24 sata uronjeni u vodu. Da bi se srednja tlačna čvrstoća pretvorila u normaliziranu čvrstoću suhih zidnih elemenata potrebno ju je pomnožiti s 1,10 za elemente od pečene gline, odnosno 1,20 za ostale elemente [3]. Takva se vrijednost množi s faktorom oblika zidnog elementa,  $\delta$ . Faktor oblika  $\delta$  ovisi o širini i visini zidnog elementa. Također ne smije se zaboraviti spomenuti kako je dopušteno i ispitivanje suhog uzorka u čijem se slučaju dobivena srednja tlačna čvrstoća množi faktorom koji iznosi 1,0. Zidni elementi trebaju imati srednju tlačnu čvrstoću okomito na naliježuću površinu (vertikalno) barem  $2,5 \text{ N/mm}^2$ , a u horizontalnom smjeru tlačna čvrstoća mora biti barem  $2,0 \text{ N/mm}^2$  [3]. Prema nacionalnom dodatku norme za potresno djelovanje HRN EN 1998-1 normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata ne smije biti manja od:

- okomito na horizontalnu sljubnicu  $f_b = 5,0 \text{ N/mm}^2$
- paralelno s horizontalnom sljubnicom u ravnini zida  $f_{bh} = 2,0 \text{ N/mm}^2$

### 3.2. Mort

Mort je gradivo koje se sastoji od mješavine anorganskog veziva, agregata i vode. Također, može sadržavati i određene dodatke sa svrhom poboljšanja vlastitih svojstava. Mort za zidanje razvrstava se u odnosu na njegove sastojke (vezivo, pijesak i voda) te s obzirom na mehanička svojstva koja posjeduje. Mort kao mješavina prethodno navedenih sastojaka služi za ostvarivanje čvrstoće zida.

Prema sastavu morta, općenito se razlikuju sljedeće vrste:

- Cementi mort
- Cementno-vapneni mort
- Vapneni mort
- Tankoslojni mort – unaprijed pripremljeni cementni mort s maksimalnim zrnom pijeska 1.0 mm i kemijskim dodacima, debljina ovog morta u horizontalnim sljubnicama je 1-3 mm
- Unaprijed pripremljeni (tvornički projektirani) mort
- Lakoagregatni mort – gustoće lakog agregata manje od  $1000 \text{ kg/m}^3$

Mort za zidanje se prema HRN EN 1996-1-1 može podijeliti na:

- Mort opće namjene – bez posebnih značajki
- Tankoslojni mort – projektirani mort s najvećom izmjerom agregata manjom ili jednakom propisanim vrijednostima
- Lagani mort – očvrsnuli mort s obujamskom masom u suhom manjom ili jednakom od  $1300 \text{ kg/m}^3$

Referirajući se na debljine morta, debljina tankoslojnog morta može biti nekoliko milimetara, dok debljina morta opće namjene seže i do nekoliko centimetara.

Prema normama HRN EN 1996-1-1 i HRN EN 998-2 (Specifikacija morta za zide – 2.dio: Mort za zide) mort se dijeli na tvornički projektirani mort i mort zadanog sastava, gdje se tvornički projektirani mort proizvodi prema odabiru proizvođača morta, a mort zadanog sastava prilagođava se potrebama gradilišta prema projektu zidane konstrukcije.

### 3.2.1. Svojstva morta

Mort se razvrstava prema svojoj tlačnoj čvrstoći. Označava se sa slovom M i brojem koji prikazuje iznos tlačne čvrstoće u  $\text{N/mm}^2$  kao naprimjer M5, ujedno i mort najmanje čvrstoće koji se smije upotrijebiti u potresnim područjima. Mortovi za zidanje dodatno će biti opisani svojim propisanim sastojcima u količinskom volumenu, npr. 1:1:5 cement:vapno:pjesak (Tablica 2). No, točnost volumnim omjera, u odnosu na omjere po težini je manja te je zbog toga poželjno da se koriste upravo omjeri po težini, tj. masi. Težinski omjeri dobivaju se tako da se zapreminska masa komponenta morta  $\rho$ , izmjerena na gradilištu, pomnoži s volumnim omjerima. Tlačna i vlačna čvrstoća morta utvrđuju se ispitivanjem na prizmama  $160 \times 40 \times 40$  mm ili na kockama s 70.7 mm ili 100 mm dugim stranicama. Trajnost morta regulira se većom količinom cementa i dodacima.

Adhezija između morta i zidnih elemenata jedan je od ključnih čimbenika u mehaničkom odzivu zida i zbog toga mora biti adekvatno izvedena s obzirom na propisanu namjenu. Primjerena adhezija ovisiti će o vrsti korištenog morta i o elementima zida na koje se on nanosi.

Tablica 2: Volumenski sastav morta i odgovarajuća tlačna čvrstoća [15]

Vrste mortova	Minimalna tlačna čvrstoća nakon 28 dana ( $\text{N/mm}^2$ )	Približni sastav		
		cement	hidratizirano vapno	pjesak
M20	20	treba odrediti ispitivanjem		
M15	15	1	0-1/4	3
M10	10	1	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	4-4 $\frac{1}{4}$
M5	5	1	$\frac{1}{2} - 1\frac{1}{4}$	5-6
M2,5	2.5	1	$1\frac{1}{4} - 2\frac{1}{2}$	8-9
M1	1	1	nije definirano	>9

Mort koji se nalazi u konstrukciji proučavanoj u ovom radu jest mort najmanje kvalitete M1 s tlačnom čvrstoćom od  $1 \text{ N/mm}^2$ .

## 4. NEARMIRANO ZIDE

### 4.1. Mehanička svojstva zida

Zide je kompozit sastavljen od zidnih elemenata i morta (Sorić 2016.). Karakteristike zidnih elemenata, morta, adhezija između njih, obrada i njega čine najvažnije čimbenike mehaničkog odziva zida. Među najvažnija mehanička svojstva zida spadaju:

- tlačna čvrstoća zida ( $f_k$ )
- posmična čvrstoća ( $f_v$ )
- čvrstoća zida na savijanje ( $f_x$ )
- vlačna čvrstoća ( $f_t$ )

Sve prethodno spomenute čvrstoće bile su dugi niz godina predmet velikog broja laboratorijskih ispitivanja. Mnogi znanstvenici proveli su eksperimente kako bi došli do relevantnih podataka o karakteristikama zida koja naposljetku dovode do objašnjenja u ponašanju zidanih konstrukcija. Najopširnija ispitivanja provodila su se za određivanje tlačne čvrstoće uzimajući u obzir kako su zidane konstrukcije uglavnom izložene vertikalnom opterećenju u nepotresnim područjima. Zide ima relativno veliku tlačnu čvrstoću, no opeka kao materijal nije pogodna za velika naprezanja izazvana posmikom i savijanjem. Čvrstoće zidnih elemenata i veziva između njih određuju se normiranim ispitivanjem. Takve metode ne moraju prikazivati stanje naprezanja u komponentnim materijalima pri samoj uporabi. Postoje dva načina na temelju kojih se mehanička svojstva nearmiranog zida mogu odrediti, a to su:

- Uzimajući u obzir svojstva susjednih elemenata konstrukcije, jer osim vlastitih svojstva mehanička svojstva ovise i o svojstvima susjednih elemenata zbog njihovog međudjelovanja što ih može znatno mijenjati te o samoj geometriji susjednih elemenata
- Ne uzimajući u obzir svojstva susjednih elemenata već promatrajući samo zasebna mehanička svojstva

#### **4.1.1. Karakteristična tlačna čvrstoća zida**

Prema Soriću (2016.):“ Karakteristična tlačna čvrstoća uzorka zida  $f_k$  definirana je kao čvrstoća ispod koje se bez učinka ekscentričnosti, vitkosti ili zauzdanosti (spriječenost horizontalnog pomaka u pločama preko kojih se prenosi tlak) ne očekuje više od 5% rezultata, pri čemu se očekuje da će biti 95% rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće iznad te vrijednosti.“ Brojna ispitivanja pokazala su kako tlačna čvrstoća zida direktno ovisi o karakteristikama njegovih pojedinih komponenti.

Stoga, ako se ona određuje proračunski, potrebno je poznavati čvrstoće zidnih elemenata i morta dobivene ispitivanjima jer se iz njihovih odnosa dobivaju prikladni rezultati. Koeficijent varijacije rezultata ispitivanja ne bi smio biti veći od 25%. No, prihvatljivije je, karakterističnu tlačnu čvrstoću zida odrediti eksperimentalno.

Karakteristična tlačna čvrstoća zida,  $f_k$  može se odrediti iz granične čvrstoće zida visine kata ispitivanog do sloma ili iz tlačne čvrstoće manjih uzoraka zida. Za ispitivanje se rabe materijali jednaki onima primjenjivanim u praksi te jednaka tehnologija zidanja kao i sami vez istovjetan onom u stvarnoj konstrukciji. Pri sakupljanju podataka za ispitivanje uzoraka potrebno je uzeti točne dimenzije i zapisati količinu vlage zidnog elementa. Količina vlage određuje se u trenutku polaganja zidnog elementa u sloj morta što je ključno za određivanje normalizirane tlačne čvrstoće zidnog elementa jer na nju način njege direktno utječe. Ispitivanje se vrši na najmanje tri uzoraka u kojima se rabi mort pripremljen na način da mu se sastojci važu i odrede na osnovi volumenskih omjera suhog materijala određene vrste morta. U slučaju korištenja vlažnog pijeska potrebno je u obzir uzeti njegovu količinu vlage. Visina uzoraka zida, propisana normom HRN EN 1052-1:2004, mora biti barem tri puta veća od njegove širine, pet puta veća od visine zidnog elementa te veća od duljine uzorka. Nakon pravilne pripreme uzorka za samo ispitivanje, u smislu poduzimanja prikladnih mjera protiv isušivanja uzoraka tako da ih se prekrije polietilenskom folijom prva tri dana nakon zidanja te nakon toga otkriveni u kontroliranim uvjetima laboratorija, postavljanja debele čelične ploče ravne donje plohe u isto vrijeme zidanja uzorka u protivnom će mort na gornjoj površini opterećenja morati imati barem istu čvrstoću kao i mort u zidu u vrijeme ispitivanja. Površine nanošenja opterećenja moraju biti međusobno paralelne i pod pravim kutem u odnosu na uzdužnu os uzorka. Uzorak se postavlja centrično tako da se uzdužna os uzorka i uzdužna os stroja za ispitivanje poklope.

Ispitivanje se vrši ili nakon 7 ili nakon 28 dana ili kada je postignuta neka zahtijevana čvrstoća morta. Opterećenje se nanosi centrično na površinu na vrhu i na dnu zida te se tome pridaje posebna pozornost kako ne bi došlo do neželjene ekscentričnosti. Sve ostale potrebne informacije za pravilan postupak ispitivanja zida kao što su brzina nanošenja opterećenja, određivanje modula elastičnosti pomoću ekstenzometara, određivanje relativne deformacije te svi koraci u nanošenju naprezanja definirani su u normi HRN EN 1052-1.

Tlačna čvrstoća zida ispitana za sva tri uzorka proračunava se do najbližih  $0,1 \text{ N/mm}^2$  izrazom:

$$f_i = \frac{F_{i,\max}}{A_i} \quad (1)$$

gdje je:

$F_{i,\max}$  – maksimalna sila i-tog uzorka određena ispitivanjem

$A_i$  – površina poprečnog presjeka i-tog uzorka zida

Karakteristična tlačna čvrstoća  $f_k$  određuje se iz srednje vrijednosti dobivenih rezultata iz prethodne formule za tlačnu čvrstoću  $f'$  prema izrazu:

$$f_k = \frac{f'}{1,2} \quad \text{ili} \quad f_k = f_{i,\min} \quad (2)$$

gdje su:

$f'$  - srednja vrijednost čvrstoće ispitanih uzoraka, zaokružena na najbližu vrijednost do  $0,1 \text{ N/mm}^2$

$f_{i,\min}$  – najmanja pojedinačna vrijednost čvrstoće svih ispitanih uzoraka

Karakteristična tlačna čvrstoća zida zidanog u mortu određuje se prema sljedećoj jednadžbi koja povezuje karakterističnu tlačnu čvrstoću zida i normaliziranu tlačnu čvrstoću zidnog elementa te tlačne čvrstoće morta kao i pripadnost zidnih elemenata određenim skupinama (Tablica 2):

$$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta \quad (3)$$



gdje su:

$f_b$  – normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa,  $f_b = \delta * f$  ( $\delta$  predstavlja faktor oblika s vrijednostima koje su dane u tablici 4, a  $f$  predstavlja srednju tlačnu čvrstoću zidnih elemenata)

$f_m$  – tlačna čvrstoća morta

$\alpha, \beta$  - konstante

$K$  – koeficijent koji ovisi o klasifikaciji zidnog elementa (skupine 1,2,3,) i o načinu zidanja, tj. postoje li ili ne postoje uzdužne sljubnice (kreće se između 0,45 – 0,55)

Kada se radi o mortu opće namjene ili laganom mortu, jednadžba xy određuje se prema HRN EN 1996-1-1 pomoću sljedećeg izraza:

$$f_k = K * f_b^{0,7} * f_m^{0,3} \quad (4)$$

Za tankoslojni mort u horizontalnim sljubnicama debljine 0,5mm do 3mm i opečne zidne elemente skupine 1 i 4 jednadžba glasi:

$$f_k = K * f_b^{0,85} \quad (5)$$

Za tankoslojni mort u horizontalnim sljubnicama debljine 0,5mm do 3mm i opečne zidne elemente skupine 2 i 3 jednadžba glasi:

$$f_k = K * f_b^{0,7} \quad (6)$$

Tablica 3: Vrijednosti  $K$  za kombinaciju raznih zidnih elemenata i mortova [11]

Zidni elementi		Mort opće namjene	Tankoslojni mort	Lagani mort	
				$600 \leq \sigma_d \leq 800$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$800 \leq \sigma_d \leq 1300$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Opečni	Skupina 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Skupina 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Skupina 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Skupina 4	0,35	0,35	0,20	0,25
Vapneno-silikatni	Skupina 1	0,55	0,80	*	*
	Skupina 2	0,45	0,65	*	*
Betonski	Skupina 1	0,55	0,80	0,45	0,45
	Skupina 2	0,45	0,65	0,45	0,45
	Skupina 3	0,40	0,50	*	*
	Skupina 4	0,35	*	*	*
Porasti beton	Skupina 1	0,55	0,80	0,45	0,45
Umjetni beton	Skupina 1	0,45	0,75	*	*
Obrađeni prirodni kamen	Skupina 1	0,45	*	*	*
* Kombinacija morta i zidnih elemenata obično se ne upotrebljavaju pa vrijednosti nisu dane					

Tablica 4: Vrijednosti faktora oblika,  $\delta$  [11]

Visina zidnog elementa (mm)	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa (mm)				
	50	100	150	200	$\geq 250$
50	0,85	0,75	0,70	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
$\geq 250$	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Sljubnice moraju biti u potpunosti ispunjene mortom kako bi se navedene jednadžbe uopće mogle primijeniti.

Kada vertikalne sljubnice nisu ispunjene, mogu se upotrebljavati prethodne jednadžbe uzimajući u obzir sva horizontalna djelovanja koja mogu djelovati na ziđe i ta ista ziđe prenijeti.

Pravilno i kvalitetno izvedene sljubnice veoma su važne za tlačnu čvrstoću zida. Uz izvedbu, ključnu ulogu igra i debljina sljubnice, npr. povećanje debljine sljubnice na 16-19 mm može smanjiti tlačnu čvrstoću za oko 30% u odnosu na standardnu debljinu od 10 mm [3].

Kako bi spomenute jednadžbe ispunjavale svoju svrhu potrebno je u obzir uzeti ispunjenje sljedećih zahtjeva:

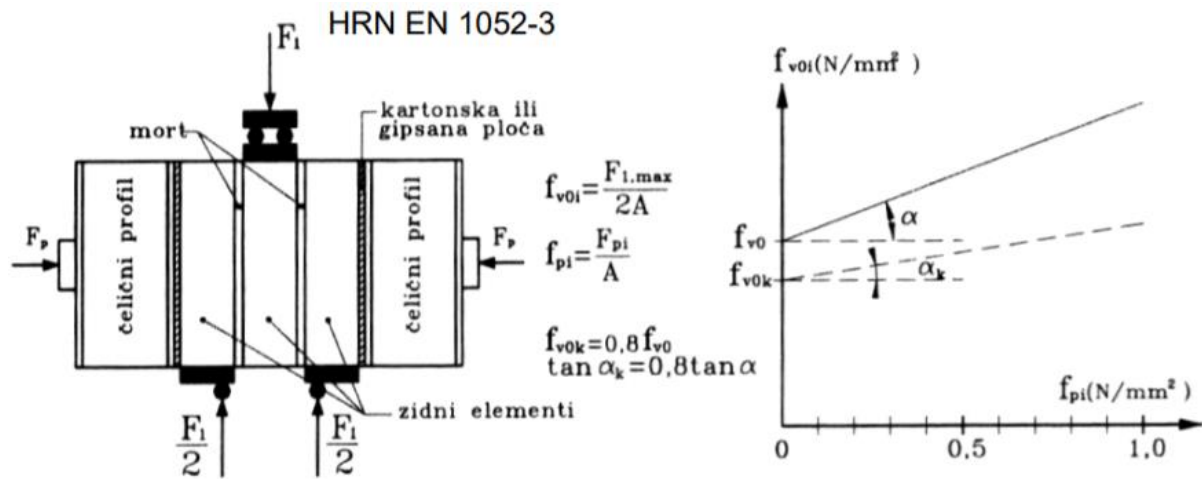
- sve sljubnice moraju biti ispunjene mortom
- koeficijent varijacije čvrstoće zidnih elemenata nije veći od 25%
- potrebno je poštivati sve propisane odredbe o zidnim elementima, mortu, vezu, minimalnim debljinama zida i dr. te sukladno tome razraditi detalje zida
- debljina zida jednaka je širini ili duljini zidnog elementa, tako da nema vertikalne sljubnice morta unutar debljine zida usporedne s licem zida na cijeloj duljini ili nekom dijelu duljine zida
- $f_b$  nije veći od  $75 \text{ N/mm}^2$  kad su zidni elementi položeni u mort opće namjene
- $f_m$  nije veći od  $20 \text{ N/mm}^2$  niti veći od  $2f_b$  kada su zidni elementi položeni u mort opće namjene
- $f_b$  nije veći od  $50 \text{ N/mm}^2$  kad su zidni elementi položeni u tankoslojni mort
- $f_m$  nije veći od  $10 \text{ N/mm}^2$  kad su zidni elementi položeni u tankoslojni mort

#### ***4.1.2. Karakteristična posmična čvrstoća zida***

Zidane konstrukcije, osim što su izložene djelovanju vertikalnog opterećenja, preuzimaju vrlo često i djelovanje horizontalnog opterećenja koje uzrokuje pojavu pomičnog naprezanja. Otpornost zida na posmična naprezanja uvelike ovisi o kontaktu između zidnih elemenata i morta, tj. utjecaju vlage u mortu i njeno prenošenje između morta i same opeke. Početna posmična čvrstoća zidnih elemenata i morta određuje se kao karakteristična vrijednost te postoje tri mogućnosti njezinog određivanja, a to su eksperimentalno na temelju uzoraka, ispitivanje in situ horizontalnom prešom te proračunsko određivanje vrijednosti.

Eksperimentalnim određivanjem karakterističnu početnu posmičnu čvrstoću zida,  $f_{vk0}$ , treba odrediti prema normi HRN EN 1052-3 i to ispitivanjem pripremljenih uzoraka. Dodavanjem normalnog tlačnog naprezanja povećava se posmična čvrstoća. Bez tlačne sile, posmična čvrstoća određuje se bez normalnog naprezanja.

Na slici 6 su prikazani uzorak i dijagrami odnosa posmičnog i normalnog napreznja za određivanje posmične čvrstoće:



Slika 5: Uzorak i dijagram za određivanje posmične čvrstoće [18]

Posmična čvrstoća  $f_{vi}$ , pri određenom tlačnom napreznju određuje se pomoću sljedećih izraza:

$$f_{vi} = \frac{F_{i,max}}{2 \cdot A} \quad (7)$$

$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A} \quad (8)$$

gdje je:

$F_{i,max}$  – maksimalna sila pri slomu i-tog uzorka

$F_{pi}$  – uzdužna sila i-tog uzorka

$A$  – površina poprečnog presjeka uzorka,  $A = t \cdot l$

$t$  - debljina uzorka jednaka širini zidnog elementa

$l$  – duljina uzorka jednaka duljini zidnog elementa

In situ ispitivanje posmične čvrstoće zida provodi se ako se želi odrediti čvrstoća neke postojeće građevine. Ova metoda vrši se primjenom horizontalne preše koja se postavlja na mjesto odstranjenog zidnog elementa (Slika 7).

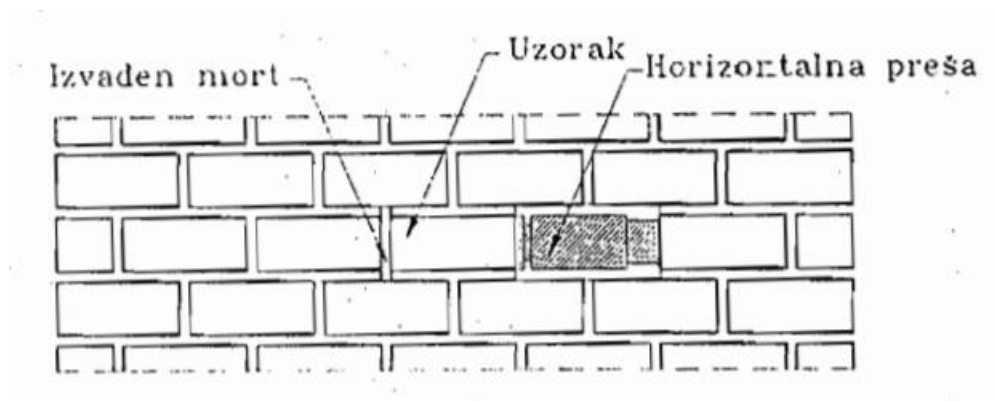
Preša funkcionira na način da nanosi silu na zidni element koji će se pomaknuti, a njezina vrijednost postupno se povećava do posmičnog sloma. Pritom se zidnom elementu odstranjuju vertikalne sljubnice morta ispred i iza. Ovim ispitivanjem procjenjuje se vertikalno naprezanje u neizvađenom elementu zida prema formuli:

$$f_v = \frac{H}{A_g * A_d} \quad (9)$$

gdje je:

H – horizontalna sila posmičnog sloma

$A_g, A_d$  – gornja i donja površina zidnog elementa povezanog mortom



*Slika 6: Ispitivanje posmične čvrstoće pomoću horizontalne preše neke postojeće građevine [6]*

Kada rezultati ispitivanja nisu dostupni, karakteristična posmična čvrstoća može se odrediti proračunskim putem. Karakteristična posmična čvrstoća s mortom opće namjene ili s tankoslojnim mortom u horizontalnim sljubnicama debljine 0,5 mm do 3,0 mm ili lakoagregatnim mortom uz uvjet da su sve sljubnice u potpunosti ispunjene mortom, određuje se prema formuli:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4\sigma_d \leq 0,065f_b \text{ ili } \leq f_{vt} \quad (10)$$

gdje je:

$f_{vk0}$  – karakteristična početna posmična čvrstoća pri nultom tlačnom naprezanju

$\sigma_d$  – proračunsko tlačno naprezanje okomito na posmik u elementu na promatranoj razini, uzimajući u obzir odgovarajuću kombinaciju opterećenja utemeljenu na prosječnom vertikalnom naprezanju na tlačnoj duljini zida  $L_c$ , koja osigurava posmičnu otpornost. U obzir se uzima stalno opterećenje  $N_g$  s povoljnim učinkom ( $\gamma_{G,inf} = 1,0$  i  $\gamma_{Q,i} = 0$ ). Iz čega slijedi:

$$\sigma_d = \gamma_{G,inf} * \frac{N_g}{(t * L_c)} \quad (11)$$

$f_b$  – normalizirana srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata okomito na naliježuću površinu

$f_{vlt}$  – granična vrijednost posmične čvrstoće (prema EN 1996-1-1 u NA pojedine države, u Hrvatskoj se rabi  $0,065f_b$ )

U slučaju nedostatka odgovarajućih podataka zasnovanih na rezultatima ispitivanja, početna posmična čvrstoća  $f_{vk0}$ , za zidove izvedene u mortu opće namjene bez dodatnih sastojaka, uzima se prema Tablici 5 danoj u HRN EN 1996-1-1.

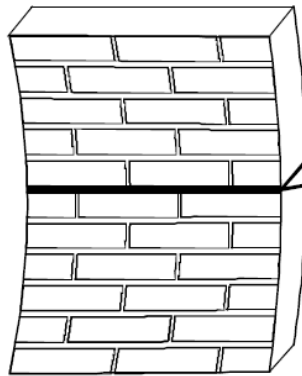
*Tablica 5: Vrijednosti početne posmične čvrstoće zida,  $f_{vk0}$  [11]*

Zidni element	$f_{vk0} (N/mm^2)$			
	Mort opće namjene		Tankoslojni mort (debljine horizontalnih sljubnica $\geq 0,5$ mm i $\leq 3,0$ mm)	
			Lagani mort	
Glina	M10-M20	0,30	0,3	0,15
	M2,5-M9	0,20		
	M1-M2	0,10		
Kalcijsko-silikatni	M10-M20	0,20	0,4	0,15
	M2,5-M9	0,15		
	M1-M2	0,10		
Betonski	M10-M20	0,20	0,3	0,15
Porasti (autoklavirani aerirani)	M2,5-M9	0,15		
	M1-M2	0,10		
Kameni	M1-M2	0,10		

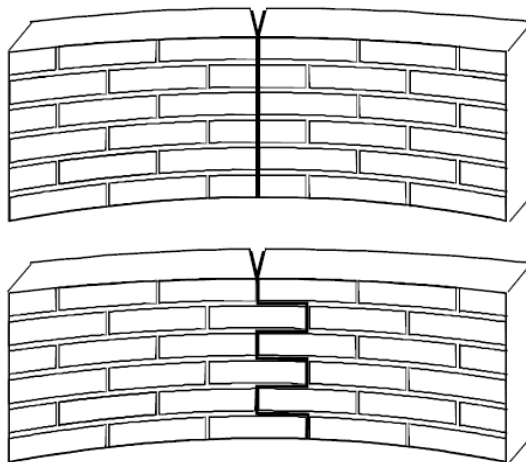
#### 4.1.3. Karakteristična čvrstoća zida na savijanje

Karakteristična čvrstoća na savijanje određuje se iz rezultata ispitivanja u skladu s normom HRN EN 1996-1-1 i raspodjeljuje se ovisno o ravni sloma u odnosu na ravninu horizontalnih sljubnica. Razlikujemo dvije karakteristične čvrstoće na savijanje, a to su:

- čvrstoća na savijanje kad je slom u ravni usporednoj s horizontalnim sljubnicama morta,  $f_{xk1}$
- čvrstoća na savijanje kad je slom u ravni okomitoj na horizontalne sljubnice morta,  $f_{xk2}$



Slika 7: ravnina sloma paralelna s horizontalnim sljubnicama morta,  $f_{xk1}$  [2]



Slika 8: ravnina sloma okomita na horizontalne sljubnice morta,  $f_{xk2}$  [2]

U slučaju kada podaci ispitivanja nisu dostupni, vrijednosti čvrstoća mogu se odrediti iz Tablica 6 i 7 vodeći se time kako je žiđe izvedeno s mortom opće namjene, tankoslojnim mortom ili laganim mortom te da su čvrstoće tankoslojnog i laganog morta M5 ili veće.

Tablica 6: Vrijednosti  $f_{xk1}$  za ravninu sloma paralelnu s horizontalnim sljubnicama [19]

Zidni elementi	$f_{xk1} (N/mm^2)$			
	Mort opće namjene		Tankoslojni mort	Lagani mort
	$f_m < 5 N/mm^2$	$f_m \geq 5 N/mm^2$		
Opečni	0,10	0,10	0,15	0,10
Vapnenosilikatni	0,05	0,10	0,20	ne upotrebljava se
Betonski	0,05	0,10	0,20	ne upotrebljava se
Porasti beton	0,05	0,10	0,15	0,10
Umjetni kamen	0,05	0,10	ne upotrebljava se	ne upotrebljava se
Obrađeni prirodni kamen	0,05	0,10	0,15	ne upotrebljava se

Tablica 7: Vrijednosti  $f_{xk2}$  za ravninu sloma okomitu na horizontalne sljubnice [19]

Zidni elementi	$f_{xk2} (N/mm^2)$			
	Mort opće namjene		Tankoslojni mort	Lagani mort
	$f_m < 5 N/mm^2$	$f_m \geq 5 N/mm^2$		
Opečni	0,20	0,40	0,15	0,10
Vapnenosilikatni	0,20	0,40	0,30	ne upotrebljava se
Betonski	0,20	0,40	0,30	ne upotrebljava se
Porasti beton	$\rho < 400 kg/m^3$	0,20	0,20	0,15
	$\rho \geq 400 kg/m^3$	0,20	0,40	0,15
Umjetni kamen	0,20	0,40	ne upotrebljava se	ne upotrebljava se
Obrađeni prirodni kamen	0,20	0,40	0,15	ne upotrebljava se



#### 4.1.4. Karakteristična vlačna čvrstoća zida

Referentna vlačna čvrstoća zida je ona kod koje dolazi do vlačnog otkazivanja zida istodobno opterećenog vertikalnim i horizontalnim opterećenjem u svojoj ravnini. Vertikalno opterećenje je stalno prisutno dok je horizontalno uzrokovano povremeno, vjetrom ili potresom. U spomenutom slučaju istodobnog naprezanja u ravnini zida dolazi do sloma zbog prekoračenja karakteristične vlačne čvrstoće što nije obrađeno u Europskoj normi EN 1996-1-1, no obrađeno je u Nacionalnom dodatku HRN EN 1996-1-1. Povećanje vlačne čvrstoće može biti uzrokovano savijanjem u ravnini zida ili izvan ravnine, kada je u pitanju savijanje u ravnini vlačna čvrstoća uvelike ovisi o adheziji između morta i zidnog elementa pa je vrlo važno voditi računa o količini vlage za vrijeme zidanja.

Karakteristična vlačna čvrstoća,  $f_{tk}$ , određuje se ispitivanjem zida opterećenog nepromjenjivim vertikalnim opterećenjem, silom  $N$  i horizontalnom silom postupnog prirasta,  $H$ , do dijagonalnog sloma. Takav slom, nastao ispitivanjem (Slika 10), očituje se pukotinama u smjeru tlačne dijagonale. Karakteristična vlačna čvrstoća,  $f_{tk}$  i posmično naprezanje,  $\tau$ , određuju se na temelju pretpostavke elastičnog, izotropnog i homogenog ponašanja zida kod ravninskog stanja naprezanja sve dok se ne dosegne maksimalna vrijednost horizontalnog opterećenja,  $H_{max}$ . „Referentna vlačna čvrstoća“ tada iznosi:

$$f_{tk} = \sigma_t = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (k * \tau_{max})^2} - \frac{\sigma_0}{2} \quad (12)$$

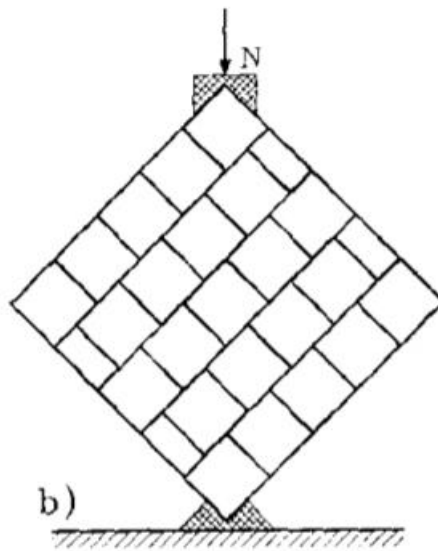
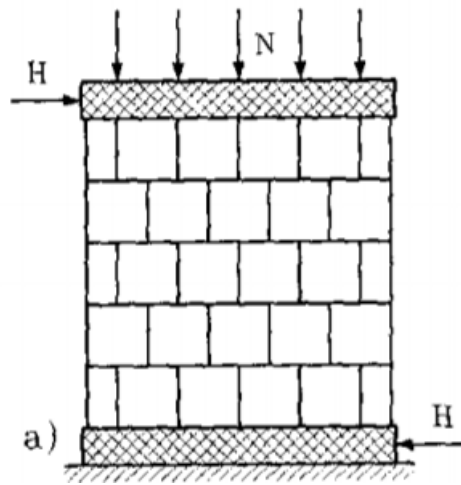
gdje je:

$\sigma_0$  - prosječno tlačno naprezanje ( $\sigma_0 = N/A_m$ )

$\tau$  – prosječno posmično naprezanje ( $\tau = H/A_m$ )

$k$  – omjer najvećeg i prosječnog posmičnog naprezanja ( $k \approx 1,5$ )

$A_m$  – površina presjeka zida ( $t * L$ ),  $L$  je duljina zida,  $t$  je debljina zida



*Slika 9 a) i b): Ispitivanje vlačne čvrstoće зида [6]*

Ako se ispitivanje vlačne čvrstoće vrši postupnim prirastom vertikalne tlačne sile duž jedne dijagonale, kao na slici 10, tada se karakteristična vlačna čvrstoća izračunava pomoću izraza:

$$f_{tk} = \frac{2 \cdot N}{\pi \cdot t \cdot L \cdot \sqrt{2}} \cong 0,45 \cdot \frac{N}{A_m} \quad (13)$$

gdje je:

$$A_m = t \cdot LS \quad (14)$$

Kada nema relevantnih eksperimentalno dobivenih rezultata, koriste se vrijednosti karakterističnih vlačnih čvrstoća prema sljedećoj tablici 8 preuzetoj iz knjige *Sorić, Zidane konstrukcije, 2016.*

Tablica 8: Karakteristične vrijednosti svojstava zida [2]

Zidni element	$f$	$f_m$	$f_k$	$G$	$E$	$f_{tk}$
Puna opeka	10	0,5	2,0	40	250	0,04
Puna opeka	15	2,5	2,5	200	800	0,18
Perforirani zidni element 19/25/25 cm	15	2,5				0,10
Perforirani zidni element 19/25/25 cm	15	5				0,15
Perforirani zidni element 25/35/24 cm	10	10				0,25
Laki keramički blok	7,5	2,0	5,0	500	4500	0,30
Opečni blok	15	2,5	2,5	300	5000	0,12
Opečni blok	15	5	3,0	300	5000	0,18
Keramzitni blok	7,5	5	3,5	500	5000	0,27
Betonski blok	7,5	5	4,0	600	6000	0,27
Puna opeka - staro ziđe	10	1,0	2,0	50	800	0,09
Dvoslojno kameno ziđe u slabom vapnenom mortu	-	-	0,3	65	200	0,02
Dvoslojno kameno ziđe u vapnenom mortu	-	-	0,5	90	3000	0,08
Miješano ziđe u vapnenom mortu	-	-	0,9	50	1000	0,08
Kameno ziđe, grubo klesano, $t = 60\text{cm}$	-	5	-	-	-	0,30
Kameno ziđe, grubo klesano, $t = 45\text{cm}$	-	5	-	-	-	0,25
Plinobetonski	3,5	2,5	-	-	-	0,10
Porasti beton, tankoslojni mort	> 2	10	-	-	-	0,08

Prema prethodno prikazanoj tablici upotrijebiti će se karakteristične vrijednosti svojstva zida od pune opeke – staro ziđe za proračun zidane konstrukcije na potresno djelovanje.

## 4.2. Deformacijska svojstva ziđa

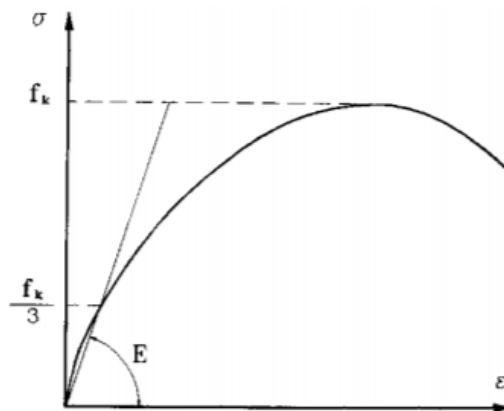
Deformacijska svojstva ziđa trebala bi se određivati eksperimentalnim ispitivanjima, no u nedostatku rezultata ispitivanja, koristi se vrijednostima iz postojećih tablica ili se proračunavaju definiranim jednadžbama. Deformacijska svojstva ziđa mogu znatno varirati te o tome posebno treba voditi računa prilikom proračuna.

### 4.2.1. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti kao deformacijsko svojstvo ziđa određuje se ispitivanjem samo ako dugotrajni učinci nisu važni. Sekantni modul elastičnosti pod opterećenjem određivati će se jednadžbom samo ako nema dostupnih rezultata eksperimentalnih ispitivanja, a određuje se za 1/3 od slomnog opterećenja zidnog uzorka. Jednadžba definirana prema HRN EN 1996-1-1 glasi:

$$E = K_E * f_k \quad (15)$$

Vrijednost  $K_E$  služi kao veza između modula elastičnosti i karakteristične tlačne čvrstoće te se kreće u velikom rasponu od 400 do 2000. Preporučena vrijednost faktora  $K_E$  prema HRN EN 1996-1-1 iznosi 1000.



Slika 10: Dijagram naprezanje – relativna deformacija [11]

#### 4.2.2. Modul posmika

Modul posmika uzima se kao 40% vrijednosti modula elastičnosti E ako se radi o statičkom opterećenju:

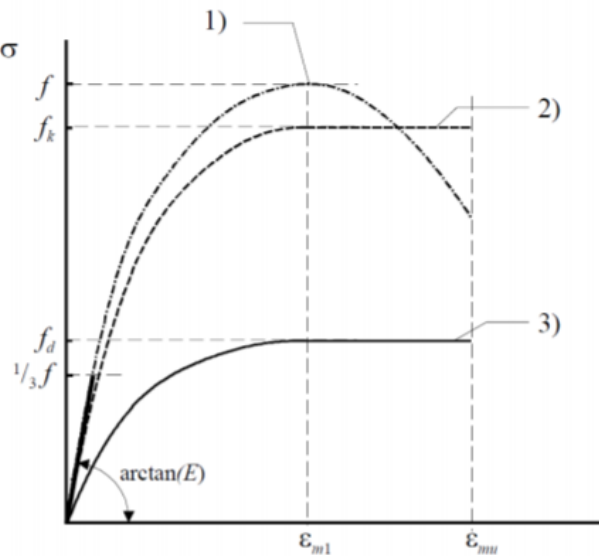
$$G = 0,4E \quad (16)$$

Ako se pak radi o potresnom djelovanju, vrijednost modula posmika znatno se smanjuje i definirana prema HRN EN 1996-1-1 glasi:

$$G = 0,167E \quad (17)$$

#### 4.2.3. Odnos naprezanje – relativna deformacija

Odnos naprezanja i deformacije ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dan je grafom na slici 12 i u proračunu se može uzeti površina ispod parabole i pravokutnika ili kao pravokutnik za provjeru presjeka kod граниčnog stanja nosivosti. Krhki slom zidnih elemenata s velikim šupljinama može se dogoditi kod relativne deformacije već od  $\epsilon = 0,002$ , prije samog horizontalnog duktilnog ponašanja.



Slika 11: Dijagram naprezanje – relativna deformacija [11]

## 5. PONAŠANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA U POTRESU

Tipovi zidanih zgrada mogu se prema vremenu gradnje podijeliti u četiri skupine:

- Zidane zgrade starog tipa
- Zidane zgrade s monolitnim stropnim konstrukcijama
- Zidane zgrade s vertikalnim serklažima i monolitnim stropnim konstrukcijama, tzv. omeđeno zide
- Armirano zide

U ovom radu opisivati će se zgrade starog tipa koje se definiraju kao sve zgrade kod kojih nosivi zidovi međusobno nisu pravilno povezani sa stropnim konstrukcijama. Stropne konstrukcije u takvim zgradama najčešće su drvene ili su to stropovi izvedeni kao lukovi ili svodovi od opeke ili kamena. Sve zgrade ovog tipa najčešće su građene na temelju zanatskog iskustva.

Zidane zgrade s drvenim međukatnim konstrukcijama najčešće su žrtve najtežih stradanja. U to su nas uvjerali i potresi koji su se nedavno dogodili u Zagrebu i na području Banovine. Njihova oštećenja najčešće nastaju zbog brojnih manjkavosti koncepcije nosive konstrukcije pri čemu se nije razmatralo djelovanje potresa. Gibanje tla u potresu uzrokuje djelovanje inercijalnih sila proporcionalne masama dijelova zgrade i potresom izazvanim ubrzanjima, uzrokujući tako vibracije konstrukcije zgrade. U konstrukciji se zbog nastalih vibracija javljaju dodatna naprezanja koja mogu prekoračiti čvrstoću materijala te tako uzrokovati oštećenja zidanih elemenata. Također, teško je procijeniti razinu rizika kojima su izložene takve građevine zbog nedostatka pouzdanih informacija o analizama ponašanja na potresna djelovanja. U situacijama izrade projekta obnove potresom oštećenih konstrukcija vrlo je važno poznavati mehanička svojstva zida. U slabijim potresima prvo se oštećuju nekonstrukcijski elementi zgrade. Najčešća takva oštećenja koja se uočavaju na zidanim zgradama jesu rušenje dimnjaka, zabatnih zidova, kao i ostalih konzolnih dijelova na vrhu te deformiranje i rušenje krovništa. Pregradni zidovi od opeke zidane na kant slamaju se izvan svoje ravnine, odlamaju se zabatni zidovi, a višeslojni zidovi mogu se međusobno razdvojiti. Stropovi od debelih slojeva morta na podlozi od trske ili letava nemaju dostatnu prionjivost te vrlo često otpadaju pri djelovanju vertikalne potresne komponente. Dolazi do odvajanja međukatnih konstrukcija zbog naginjanja zidova te izlaza grednika iz ležajnih utora.

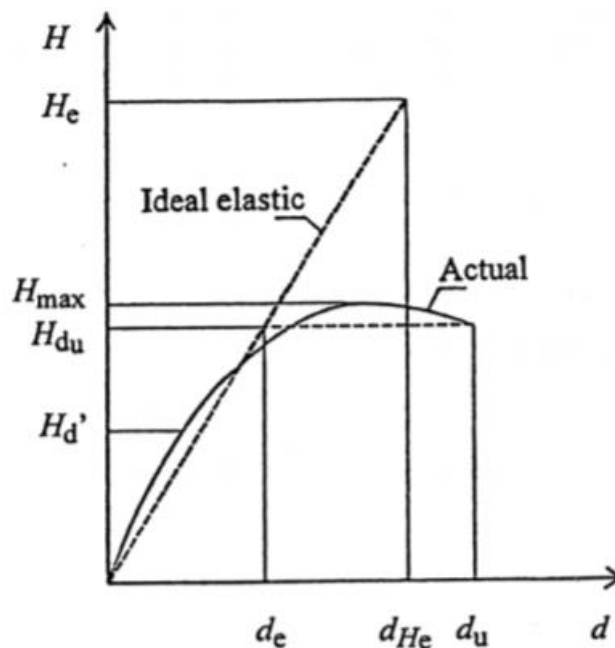
## 5.1. Faktor ponašanja

Faktor ponašanja predstavlja sposobnost konstrukcije da apsorbira i troši energiju unesenu u konstrukciju u potresu. Takva sposobnost konstrukcije ostvaruje se nelinearnim ponašanjem konstrukcije, odnosno njenim oštećenjem, no rabi se i u linearno elastičnom proračunu konstrukcije primjenom proračunskog spektra odziva.

Izraz za vrijednost faktora ponašanja glasi:

$$q = \frac{H_e}{H_{du}}, \quad (18)$$

gdje su vrijednosti  $H_e$  i  $H_{du}$  prikazane grafom na sljedećoj slici:



Slika 12: grafički prikaz odnosa potresna sila – pomak za idealno elastično i stvarno ponašanje građevine [1]

Rasponi vrijednosti faktora ponašanja, prema HRN EN 1998-1 određuju se ovisno o načinu gradnje konstrukcije zida prema tablici 9, a preporučene vrijednosti su donje granice, tj. manje vrijednosti od navedenih:

Tablica 9: Faktori ponašanja ovisni o načinu gradnje [20]

Način gradnje	Faktor ponašanja q
Nearmirano zide u skladu samo s EN 1996 (preporučljivo samo u slučaju male seizmičnosti)	1,5
Nearmirano zide u skladu s EN 1998-1	1,5 - 2,5
Omeđeno zide	2,0 - 3,0
Armirano zide	2,5 - 3,0

Prema hrvatskom Nacionalnom dodatku HRN EN 1998-1/NA vrijednosti faktora ponašanja za nearmirano ziđe usvojene u Republici Hrvatskoj prikazane su u sljedećoj tablici:

*Tablica 10: Vrijednosti faktora ponašanja usvojene u Republici Hrvatskoj [21]*

Način gradnje	Faktor ponašanja $q$
Nearmirano ziđe u skladu samo s EN 1996 (preporučljivo samo u slučaju male seizmičnosti)	1,5
Nearmirano ziđe u skladu s EN 1998-1	2,0
Omeđeno ziđe	2,5
Armirano ziđe	2,5

Ako je zgrada nepravilna po visini, vrijednosti faktora ponašanja danih prema HRN EN 1998-1 (Tablica 9) treba smanjiti za 20%, ali tako da nisu manje od 1,5.

Primjena vrijednosti većih od navedenih mora se dokazati ispitivanjima.

## **5.2. Oštećenja pojedinih elemenata konstrukcije zgrade**

### **5.2.1. Pregradni zidovi**

Poznato je kako su zidovi uzdužnog smjera uglavnom bolje nosivi, a slabi je smjer onaj koji je najčešće okomit na smjer protezanja ulice. Najčešće su u tom smjeru nosivi samo zidovi stubišta i zabatni zidovi koji nisu uvijek najbolje povezani sa stropnim pločama te iz tog razloga nemaju znatno vertikalno opterećenje. Pregradni zidovi, uz zabatne, spadaju među zidove slabijeg smjera. To su međusobno paralelni zidovi manje debljine (7-15 cm) koji kod većih horizontalnih djelovanja ne sudjeluju u krutosti zgrade. Takvi pregradni zidovi imaju malu otpornost i veliku početnu krutost što im znatno onemogućuje praćenje pomaka cijele konstrukcije te su često skloni pucanju. Radi se o unutarnjim zidovima čije je pružanje usporedno s pružanjem stropnih greda, a najčešće su to zidovi najveće krutosti za smjer protezanja kojemu pripadaju. Navedeni zidovi imaju minimalna vertikalna opterećenja, prenose samo vlastitu težinu, te vrlo mala vertikalna naprezanja. Oni su zbog svoje posmične krutosti, koja im ujedno i omogućuje preuzimanje razmjerno velikih postotaka horizontalnih sila, pretrpjeli najveća oštećenja u potresu. Ta potresna opterećenja upućuju na to da su se pregradni zidovi uključili u protupotresnu konstrukciju te su, vodeći se tom činjenicom, vrlo poželjne zidarske veze s nosivim zidovima radi pravilnije potrošnje potresne energije i smanjenja pomaka konstrukcije.



### **5.2.2. Zabatni zidovi**

Rušenje i oštećenja zabatnih zidova vrlo su česta upravo zbog neodgovarajućeg pridržanja za krovnu konstrukciju i nedostatak konstrukcijske veze sa zidovima. Zbog toga dolazi do oštećenja nepridržanih zidova okomitih na drvene grede oslonjene u utore uzdužnih zidova. Dodatnu nestabilnost imaju izvan vlastite ravnine zbog neadekvatne stabilizacije. Osim lokalnih oštećenja i rušenja, dolazi i do odvajanja zabatnih zidova po cijeloj visini ili kroz više katova. Razlog tome je već spomenuta loša povezanost zidova s međukatnom konstrukcijom kao i krovnom konstrukcijom. Iz tog razloga, zabatni zidovi imaju malo vertikalno opterećenje, što doprinosi slaboj nosivosti na djelovanje horizontalnih sila. U tom slučaju nastaju karakteristične vertikalne pukotine u okomitim zidovima i horizontalne pukotine po stropovima, pretežno na spoju stropova sa zabatnim zidom. Najgori i najopasniji slučaj za konstrukciju predstavlja prevrtanje cijelog zabatnog zida.

### **5.2.3. Krovište**

Najčešći uzrok oštećenja krovne konstrukcije jesu rušenje dimnjaka i zabatnih zidova. Teški pokrovi, kao što su kupe kanalice, kamene ploče i crijep, klize s krovova već i kod umjerenih potresa. Govori se uglavnom o lokalnim oštećenjima, osim ako krovne konstrukcije nemaju zadovoljavajuće prostorno ukrućenje pa stoga gube stabilnost i prevrću se ili gube oslonce i urušavaju se. Upravo taj rezultat gubitka oslonaca proizlazi iz nedovoljnih oslanjanja drvenih greda na zidove, često se takvi spojevi izvode oslanjanjem uz obzidavanje drvenih greda pri nastavku izvedbe zidova. Također, zbog neodržavanja i dotrajalosti, krovovi su dodatno nesigurni i ne mogu pridržati ni dimnjake ni zabatne zidove u razini tavana i krovišta. Kod zgrada s neomeđenim zidom i drvenom stropnom konstrukcijom, krovne konstrukcije izvedene su najčešće kao visulje oslonjene na obodne zidove preko nadzidnica te oslonačkih krajeva stropnih greda uzidanih na vrhu zidova. Sve navedene veze predstavljaju nedostatak u otpornosti na potres i horizontalno djelovanje općenito.

### **5.2.4. Stropna konstrukcija**

Klasično izvedene drvene stropne konstrukcije nemaju potrebna svojstva krutih dijafragmi za povezivanje zidova i ostalih sklopova zgrade u prostornu protupotresnu strukturu. Veze između drvenih grednika i zidova male su nosivosti na sva djelovanja osim pouzdanog prijenosa vertikalnih sila stalnog i dodatnog opterećenja od drvenih greda na zidove. Što se oštećenja tiče, često su prisutne pojave dugačkih i tankih pukotina u smjeru grednika najčešće nastalih zbog nejednolikog pomaka među gredama. Uz spoj stropa i zida konstrukcije često se vidi pukotina nastala zbog relevantnih pomaka između tih elemenata.

### 5.3. Oštećenja glavnog nosivog sustava

Glavni nosivi sustav oštećuje se kod nešto jačih potresa. Zidane zgrade pretežno su izložene djelovanju poprečnih sila, dok učinak momenata savijanja nije toliko bitan. Upravo zbog toga su u potresu najopterećeniji dijelovi prizemlja. Ako se iscrpi njihova nosivost može doći do drobljenja i rušenja zidova cijelog prizemlja. Oštećenja tradicijskih zidanih zgrada s međusobno povezanim nosivim zidovima, izvedenim od neomeđenog ziđa bez armiranobetonskih serklaža, i s drvenim međukatnim konstrukcijama najčešće su nastajala zbog manjkavosti koncepcije nosive konstrukcije bez razmatranja potresnog djelovanja. Neomeđeno ziđe općenito nije prihvatljivo za zgrade više od dvije nadzemne etaže, a često i za niže, što ovisi o krutosti, duktilnosti, nosivosti zidova te o pravilnosti strukture zidova. Potresnoj otpornosti takvih zidova uvelike doprinosi zidarska struktura tih zidova, ponajprije spojeva zidova, popunjenost sljubnica i dr. Općenito kvaliteta gradiva neomeđenog ziđa ovisi o, već ranije spomenutim, karakteristikama opeke i morta. Pod tim uvjetima, potrebno je provođenje ispitivanja morta i ziđa, kao i još brojne druge provjere zbog pretpostavljene nedovoljne kvalitete tih komponenata. Kako je ranije spomenuto, ovako ziđe izvedeno je bez armiranobetonskih serklaža i nadvoja, što čini zidane nadvoje najslabijim konstrukcijskim elementima u zidovima. Nadvoji su najčešće izvedeni od običnog ziđa bez vlačnog pojačanja u donjoj zoni, u nekim konstrukcija može se naići na čelične profile pa i drvene grede u donjoj zoni što, naravno, nije povoljna protupotresna struktura nadvoja. Prema brojnim analizama pokazalo se kako zgrade neomeđenih ziđa, ovisno o broju katova i strukturi zidova i konstrukcije u cjelini, nemaju dovoljnu potresnu otpornost za jedan ili čak oba smjera. Takve zidove potrebno je ojačati jer takve zgrade najčešće nemaju potrebnu strukturu u smislu povezanosti okomitih zidova za ukrućenje na glavne uzdužne zidove. Izostanak ukrutnih zidova znatno smanjuje nosivost glavnih nosivih zidova. Još jedan veliki nedostatak čine brojni otvori u glavnim nosivim zidovima što dodatno smanjuje krutost i otpornost zidova konstrukcije. Do sloma nosivog zida najčešće dolazi kod zgrada kod kojih stropovi ne povezuju zidove na zadovoljavajući način te svaki zid djeluje za sebe i deformira se u smjeru svoje manje krutosti, kod takvog ponašanja dolazi do horizontalnih pukotina na spoju stropne konstrukcije i zida i vertikalnih pukotina na spoju dvaju okomitih zidova. Iz oblika i smjera pojavljenih pukotina u nosivom zidu može se zaključiti koje su slabosti konstrukcije zgrade.

Kose pukotine pokazuju premašaj vlačne čvrstoće zida, a dvije pukotine u obliku slova “X” znak su stanja koje prethodi rušenju. “X” pukotine nastaju zbog premašaja vlačne čvrstoće i najčešće se pojavljuju u međuprozorskim stupcima.

## 5.4. Mehanizmi sloma

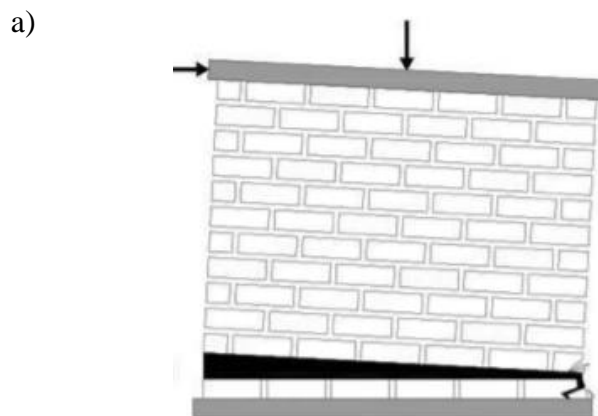
### 5.4.1. Mehanizam sloma u ravnini zida

Do sloma zida u vlastitoj ravnini zbog opterećenja potresom može doći na tri načina:

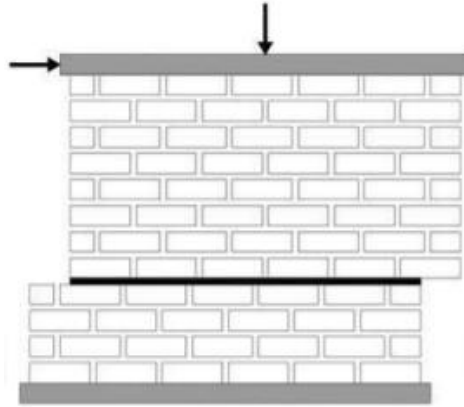
- 1) Drobljenjem tlačnog područja zida uz rub zbog djelovanja momenta savijanja i uzdužne sile (Slika 14a)
- 2) Zbog posmika zbog kojeg nastaju pukotine po horizontalnim sljubnicama, a nastaje kod zidova s malim vertikalnim opterećenjem ili kod vertikalno neopterećenih zidova (Slika 141b)
- 3) Stvaranjem kose pukotine zbog prekoračenja vlačne čvrstoće koja u smjeru zamišljene tlačne dijagonale spaja gornji kut i nasuprotni donji kut (Slika 14c)

Na koji način će nastupiti pojedini oblik sloma ovisi o geometriji zida, odnosno omjeru duljine i visine  $L/h$  i omjeru tlačnih i posmičnih naprezanja  $\sigma/\tau$ .

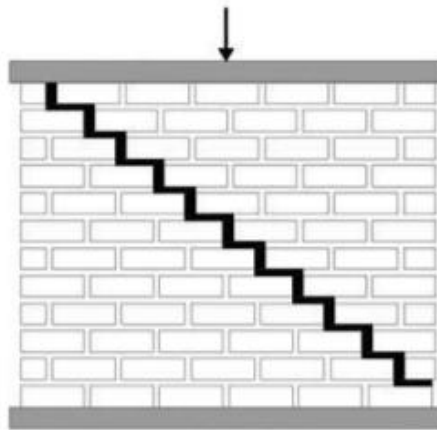
Navedeni oblici sloma prikazani su na sljedećoj slici:



b)








c)



*Slika 13: Mehanizmi sloma zida: a) slom savijanjem, b) slom klizanjem po sljubnici morta, c) slom otvaranjem kose pukotine (dijagonalni slom)[1]*

Sljedećom tablicom prikazana je razredba oštećenja zidanih zgrada prema EMS-98 (Grünthal 1998):

*Tablica 11: Podjela oštećenja zidanih zgrada prema EMS-98 [24]*

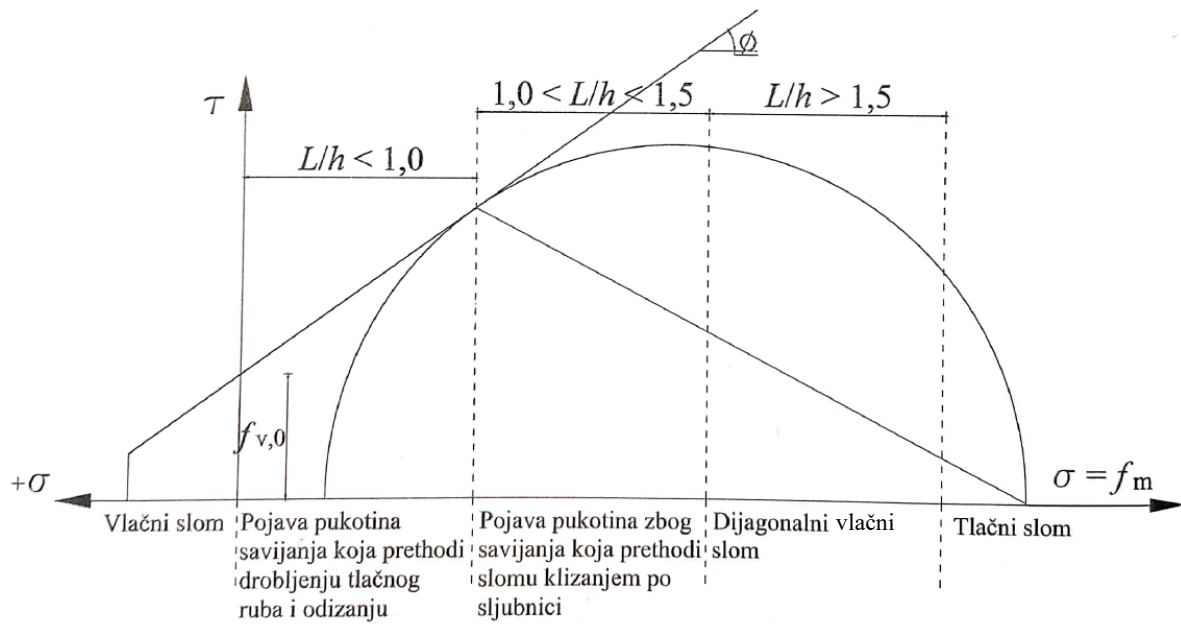
Prikaz oštećenja	Opis oštećenja
	<p><b>Stupanj 1:</b> Neznatno (zanemarivo) do malo oštećenje (bez oštećenja konstrukcijskih dijelova, malo nekonstrukcijsko oštećenje). Fine pukotine kod vrlo malog broja ziđa. Otpadanje samo manjih komada žbuke. Otpadanje labavijih komada kamena iz gornjih dijelova zgrade u malom broju slučajeva.</p>
	<p><b>Stupanj 2:</b> Umjereno oštećenje (malo konstrukcijsko oštećenje, umjereno nekonstrukcijsko oštećenje). Pukotine u mnogim zidovima. Otpadanje prilično velikih komada žbuke. Djelomični slom dimnjaka.</p>
	<p><b>Stupanj 3:</b> Znatno do teško oštećenje (umjereno konstrukcijsko oštećenje, teško nekonstrukcijsko oštećenje). Velike i široke pukotine u većini ziđa. Odvojen krovni pokrov. Slom dimnjaka u liniji krova; slom pojedinačnih konstrukcijskih elemenata (pregradno, zabatno ziđe).</p>
	<p><b>Stupanj 4:</b> vrlo teško oštećenje (teško konstrukcijsko oštećenje; vrlo teško nekonstrukcijsko oštećenje). Ozbiljni slom ziđa; djelomični konstrukcijski slom krovova i stropova.</p>
	<p><b>Stupanj 5:</b> rušenje (vrlo teško konstrukcijsko oštećenje). Potpuno ili skoro potpuno rušenje.</p>

Kod zdepastih zidova, kod kojeg je omjer  $L/h > 1,5$  uz veliko tlačno naprezanje, prevladava slom klizanjem po horizontalnoj sljubnici zbog dostizanja posmične čvrstoće sljubnice ili pak slom uzduž tlačne dijagonale zbog dostizanja vlačne čvrstoće ziđa. Takva pukotina može nastati po vertikalnim i horizontalnim sljubnicama morta (stepeničasto) ili kroz zidne elemente i mort.

Kod vitkih zidova, kod kojeg je omjer  $L/h < 1,5$  uz malo vertikalno naprezanje, slom je uzrokovan savijanjem, odnosno drobljenjem tlačnog ruba zida uz prethodnu pojavu pukotina zbog savijanja.

Moguće su i kombinacije pojedinih načina slomova, a upravo to prikazuje slika 14 kao tri osnovna načina sloma zida pri djelovanju horizontalne i vertikalne sile u ravnini promatranog zida.

Ranije je spomenuto kako pojedini oblik sloma zidova ovisi također i o omjeru tlačnih i posmičnih napreznja, a u tablici 11 prikazani su mogući oblici sloma gdje se uočava kako oni uglavnom ovise o veličini vertikalnog tlačnog napreznja.



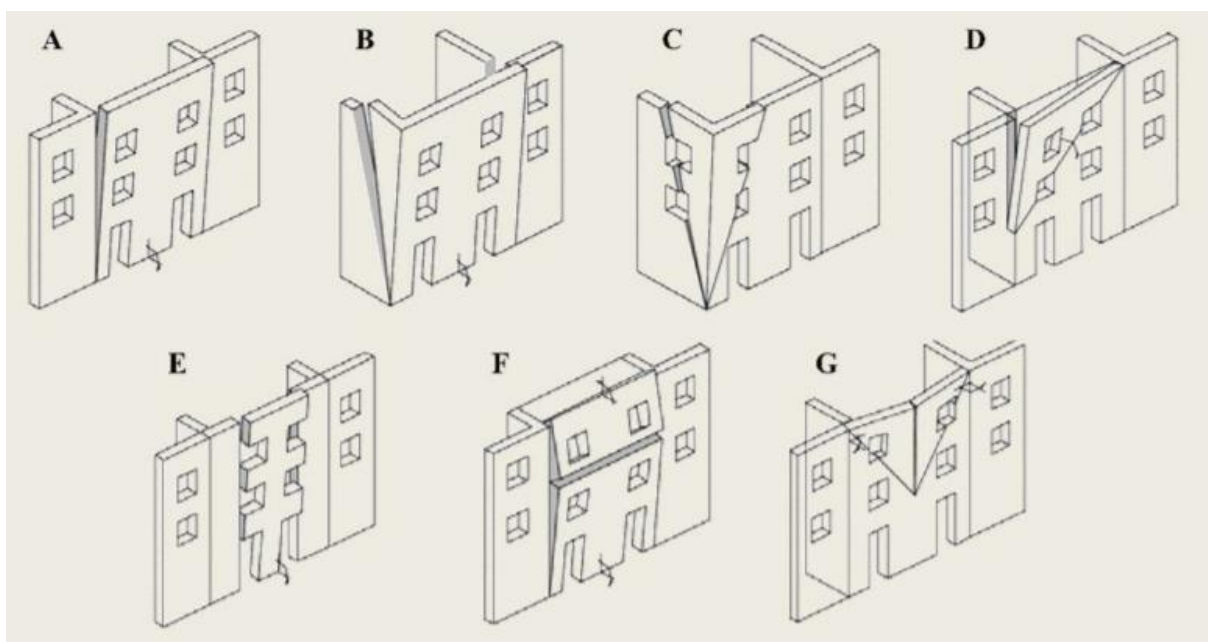
Slika 14: Opće ponašanje nearmiranog zida uzrokovano kombiniranim djelovanjem tlačnih i posmičnih napreznja [3]

#### 5.4.2. *Mehanizam sloma izvan ravnine zida (lokalni mehanizam)*

Svi prethodno navedeni nedostaci nearmiranih zidova i njihovih spojeva za posljedicu imaju nepovoljan dinamički odziv konstrukcije pri potresu. Potresne sile stropovi prenose na zidove na koje su oslonjeni te dalje na ostale zidove. Osim takvim silama, zidovi su izloženi silama okomito na njihovu ravninu uzrokovanim potresnim ubrzanjem i masama tih zidova. Također, ne smiju se zaboraviti pridodati ekscentrična opterećenja u potresna djelovanja. Sva navedena djelovanja, nepovoljan statički sustav te rubni uvjeti uzorkuju nestabilnosti i popuštanje zidova okomito na svoju ravninu.

Pojam analize lokalnih mehanizama ziđa odnosi se na potresno djelovanje okomito na smjer njihova pružanja. Adekvatnom izvedbom spojeva stropne ploče i zidova omogućava se sposobnost distribucije potresnih opterećenja sa stropova na zidove pripadajućeg kata. Sama raspodjela sila na zidove ovisi o krutosti stropne konstrukcije, no i fleksibilnosti samih zidova. Kada takva veza nije dostatna, tj. globalni integritet konstrukcije nije osiguran potrebna je verifikacija lokalnih mehanizama prevrtanja. Nepridržani fasadni zidovi s mekanom stropnom konstrukcijom drvenih grednika primjeri su dispozicija pri kojima proračun potresne otpornosti građevine mora u obzir uzeti i zidove okomite na smjer djelovanja potresa. Provjerava se moguće odvajanje zidova od podova i njihovo prevrtanje. U programskom paketu *3Muri* provjera lokalnih mehanizama moguća je u modulu „Lokalni mehanizmi“, a modul se nadovezuje na već izrađeni globalni model konstrukcije. Na taj način moguće je obaviti lokalne provjere konstrukcije na već postojećem modelu zadane geometrije, opterećenja i karakterističnih svojstva materijala. Time se omogućuje i lokalna i globalna provjera ponašanja konstrukcije na jednom modelu. Ziđe se analizira na potresno djelovanje okomito na smjer njihov pružanja te se promatra međusobna interakcija priključenih zidova okomitog smjera kao i spojeva sa stropnim konstrukcijama. Cilj izvedbe analitičkog modela je određivanje kritičnog bočnog ubrzanja okomito na zid za glavno pročelje i zabatne zidove te za sve katove. Za dobivanje kritičnih ubrzanja koja dovode do otkazivanja ziđa na savijanje unose se rubni uvjeti oslanjanja istovjetni onima u praksi. Za model ziđa na kojem se određuje kritično horizontalno ubrzanje potrebno je prvo odrediti proračunski moment zbog bočnog opterećenja,  $M_{Ed}$ , kojim se u obzir uzimaju svojstva materijala te se može primijeniti po jediničnoj visini ili duljini zida. Vrijednost tog momenta koji djeluje kao posljedica horizontalnog ubrzanja mase zida, mora biti manja ili jednaka proračunskoj otpornosti na moment savijanja,  $M_{Rd}$ , koji označava djelovanje vertikalnih sila u zidu:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$



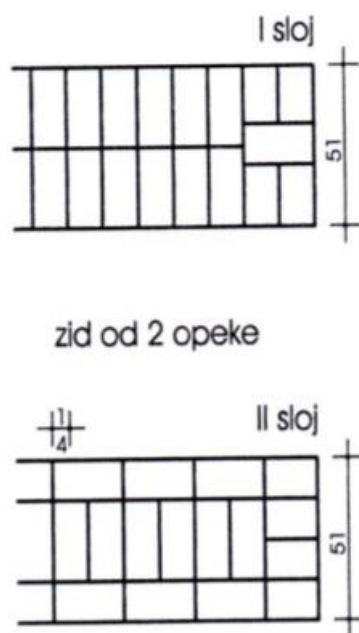
*Slika 15: Tipovi mehanizama otkazivanja zidova izvan ravnine [25]*



## 6. TEHNIČKI OPIS KONSTRUKCIJE ZGRADE

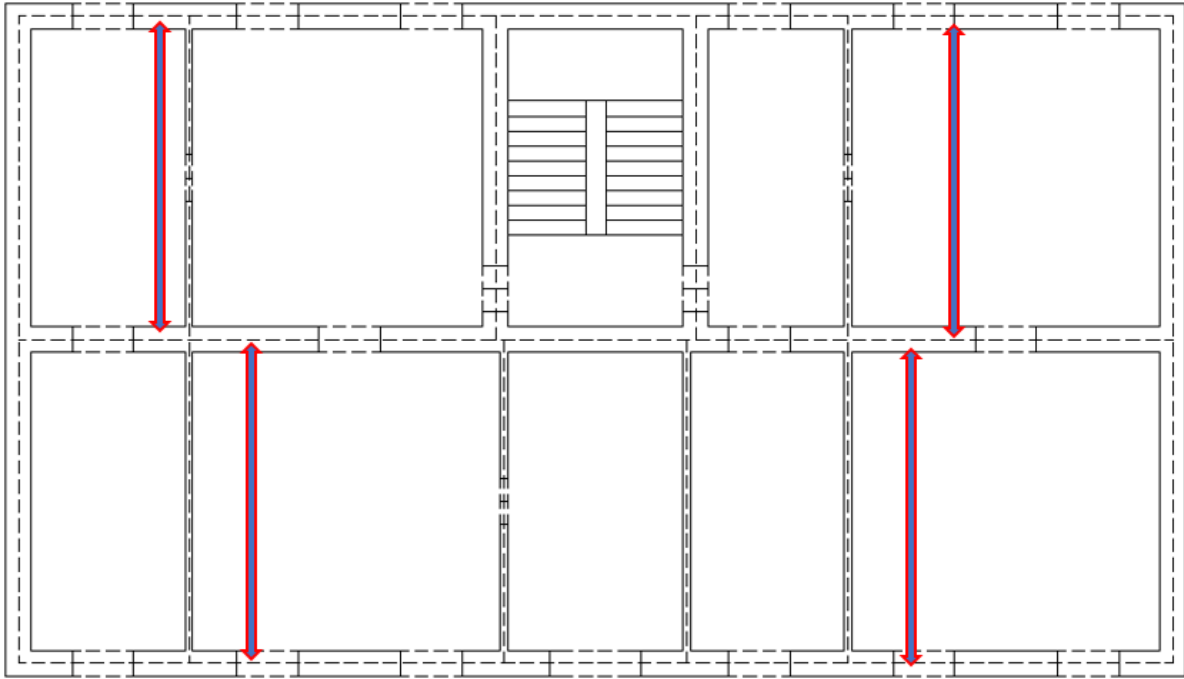
### 6.1. Opis konstrukcije

Građevina je samostojeća stambeno-poslovna građevina s tri funkcionalne jedinice smještene na tri etaže, prizemlje i dva kata. Tlocrt korišten u svrhu proračuna potresne otpornosti tipičan je prikaz tlocrta zgrade iz 19. stoljeća, pravilnog pravokutnog oblika dimenzija 22,5m x 12,6m. Primarnu konstrukciju čine zidani zidovi i međukatne konstrukcije. Nosivi zidovi su masivni i izrađeni od duple pune opeke dimenzija 25 x 12 x 6,5 cm povezanih mortom, što čini zid ukupne debljine 51 cm. Načelno se u potresu bolje ponašaju jednoslojni nego dvoslojni zidovi. Ukupna visina konstrukcije od podne ploče do vijenca iznosi 14,8 m, s prosječnom katnom visinom od 3,8 m.



Slika 16: Način izvedbe dvoslojnog nosivog zida [27]

Stropna konstrukcija izvedena je od drvenih grednika postavljenih na razmaku od 80 cm, gornje i donje oplata, rahlog nasipa te žbuke s trskom na donjoj strani i slijepog poda i parketa s gornje strane stropa. Drveni grednici, koji se oslanjaju na glavne nosive zidove u uzdužnom smjeru, premošćuju raspon od 6,3 m. Smjer nanošenja grednika prikazan je na slici 18.



*Slika 17: Tlocrt katova i smjer pružanja drvenih grednika stropne konstrukcije [vlastiti izvor]*

Poprečni zidovi debljine 12 cm imaju funkciju pregradnih zidova, tj. funkciju zatvaranja prostora sa značajnim utjecajem na nosivost konstrukcije, no uzdužni zidovi predstavljaju jači nosivi smjer i za horizontalna djelovanja, dok su u poprečnom smjeru nosivi samo zidovi stubišta i zabatni zidovi sa neznatnim vertikalnim opterećenjem, u smislu loše povezanosti sa stropnom konstrukcijom.

Armiranobetonsko stubište je dvokrako i oslanja se na poprečne nosive zidove debljine 51 cm.

Krovna konstrukcija zgrade klasično je drveno krovništvo izvedeno kao dvostruka visulja, a analiza zgrade, zbog pojednostavljenja modela, provedena je s krovništem kao nenosivim elementom, tj. neuključivanjem njegovih elemenata u numerički model.

Otvori u konstrukciji na vanjskim zidovima dimenzija su 120x120 cm na međusobnoj udaljenosti rubova od 200 cm, s parapetom od 90 cm.

## 6.2. Proračun konstrukcije na potresno djelovanje

Općenito se djelovanja dijele na stalna, promjenjiva i izvanredna djelovanja, a analiza predmetne građevine proračunava se obzirom na granično stanje nosivosti i uporabivosti za potresnu situaciju.

### 6.2.1. Stalna djelovanja

U stalna djelovanja ubrajaju se sva ona djelovanja za koja se smatra da će djelovati na konstrukciju tijekom cijelog njenog uporabnog vijeka uz zanemarive promjene intenziteta obzirom na njihovu srednju vrijednost. Pod stalna opterećenja uvrštavaju se vlastita težina konstrukcije u koju se ubrajaju zidovi, ploče, grede, stupovi i stubišta, dodatno stalno opterećenje kao što su slojevi poda, krov, nepokretna oprema te opterećenja od pritiska tla, vode, slijeganje oslonaca itd.

#### 6.2.1.1. Vlastita težina konstrukcije

Vlastita težina zidova uzeta je automatski u sklopu programskog paketa 3Muri definirajući dimenzije elemenata konstrukcije i specifične težine materijala. Specifična težina za opeku iznosi  $18 \text{ kN/m}^3$ .

#### 6.2.1.2. Dodatno stalno djelovanje

### Stropna konstrukcija

Tablica 12: Stalno opterećenje stropne konstrukcije

Stalno opterećenje stropne konstrukcije				
	Dimenzije [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Specifična težina [kN/m <sup>2</sup> ]	Težina [kN]
Parket	0,014 x 22,5 x 12,6	3,969	7	27,78
Slijepi pod	0,024 x 22,5 x 12,6	6,804	4,1	27,90
Nasip	0,08 x 22,5 x 12,6	22,68	12	272,16
Gornja oplata	0,024 x 22,5 x 12,6	6,804	4,1	27,90
Drvena greda	0,18 x 0,22 x 12,6	0,49896	7,5	108,52
Donja oplata	0,018 x 22,5 x 12,6	5,103	4,1	20,92
Trska i žbuka	0,02 x 22,5 x 12,6	5,67	15	85,05
Čavli				1,00
<b>Ukupno</b>				<b>571,23</b>

Slijedom dobivenih vrijednosti težina elemenata stropne konstrukcije u prethodnoj tablici, za površinu stropa od  $283,5 \text{ m}^2$  dobivamo ukupno stalno opterećenje od  $2,02 \text{ kN/m}^2$ .

### 6.2.2. Promjenjivo djelovanje

Uporabna opterećenja stropova, balkona i stubišta u zgradama dana su u nacionalnom dodatku HRN EN 1991-1-1 u Tablici 6.1 i dijele se u pet osnovnih kategorija i nekoliko podrazreda s pripadajućom vrijednosti opterećenja. Osnovni razred A predstavlja prostore za stanovanje i kućanske djelatnosti te vrijede sljedeća opterećenja:

Tablica 13: Uporabna opterećenja u zgrada kategorije A [30]

Stupac	1	2	3	4	5
Redak	Kategorija	Namjena	Primjer	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k^a$ [kN]
1	A1	Nastambena potkrovlja	Neprikladna za stanovanje no pristupačna potkrovlja do 1,8 m svijetle visine	1,5	1
2	A2	Prostori za stanovanje i kućanske djelatnosti	Stropovi sa zadovoljavajućom poprečnom raspodjelom opterećenja u stambenim zgradama i kućama, sobama s krevetima, bolnicama (spavaonicama), sobama u hotelima i prenoćištima i pripadajuće kuhinje i kupaonice	1,5	-
3	A3		A2, ali bez zadovoljavajuće poprečne raspodjele opterećenja	2	1

Općenito su prema EN 1991-1-1 preporučene vrijednosti za kategoriju A sljedeće:

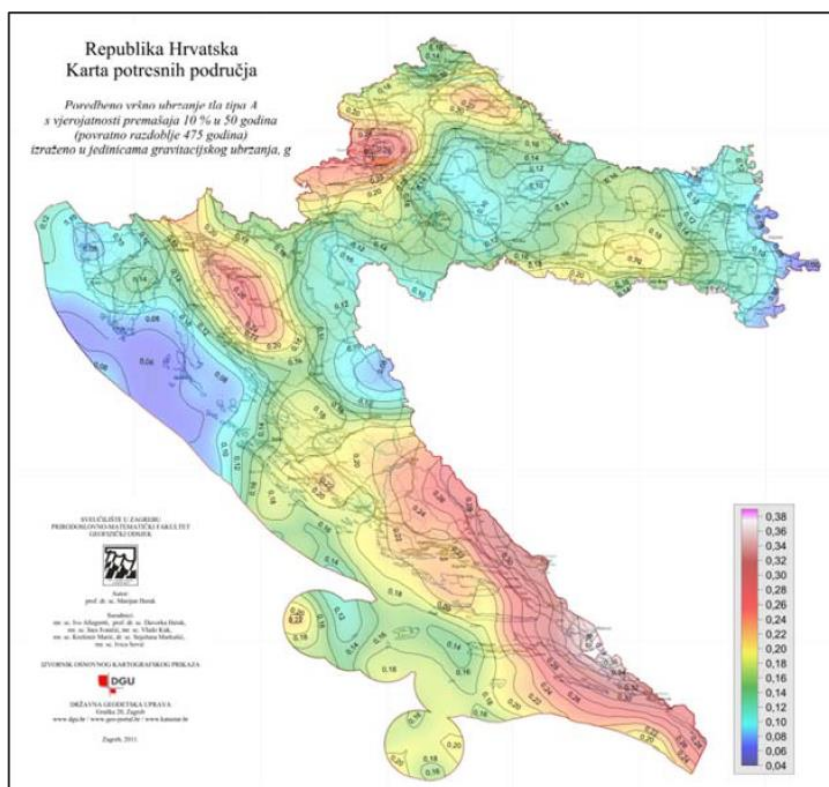
Tablica 14: Vrijednosti uporabnih opterećenja [29]

Kategorija A	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k^a$ [kN]
Podovi/stropovi	2,0	2,0
Stubišta	3,0	2,0
Balkoni	4,0	2,0

U daljnjem proračunu ovog rada, za promatranu konstrukciju zgrade kategorije A stambeno-poslovne namjene usvaja se uporabno opterećenje  $q_k$  u iznosu od 2,0 kN/m<sup>2</sup> po cijeloj površini stropa.

### 6.2.3. Potresno djelovanje

Potresno djelovanje određuje se u skladu s HRN EN 1998 uz nacionalni dodatak. Karta potresnih područja RH za poredbeno vršno ubrzanje tla tipa A s vjerojatnosti premašaja 10% u 50 godina, odnosno za poredbeno povratno razdoblje od 475 godina koje za lokaciju promatrane građevine, točnije grad Rijeku daje akceleracijsko ubrzanje izraženo jedinicom gravitacijskog ubrzanja od  $a_{gr} = 0,207g$ .

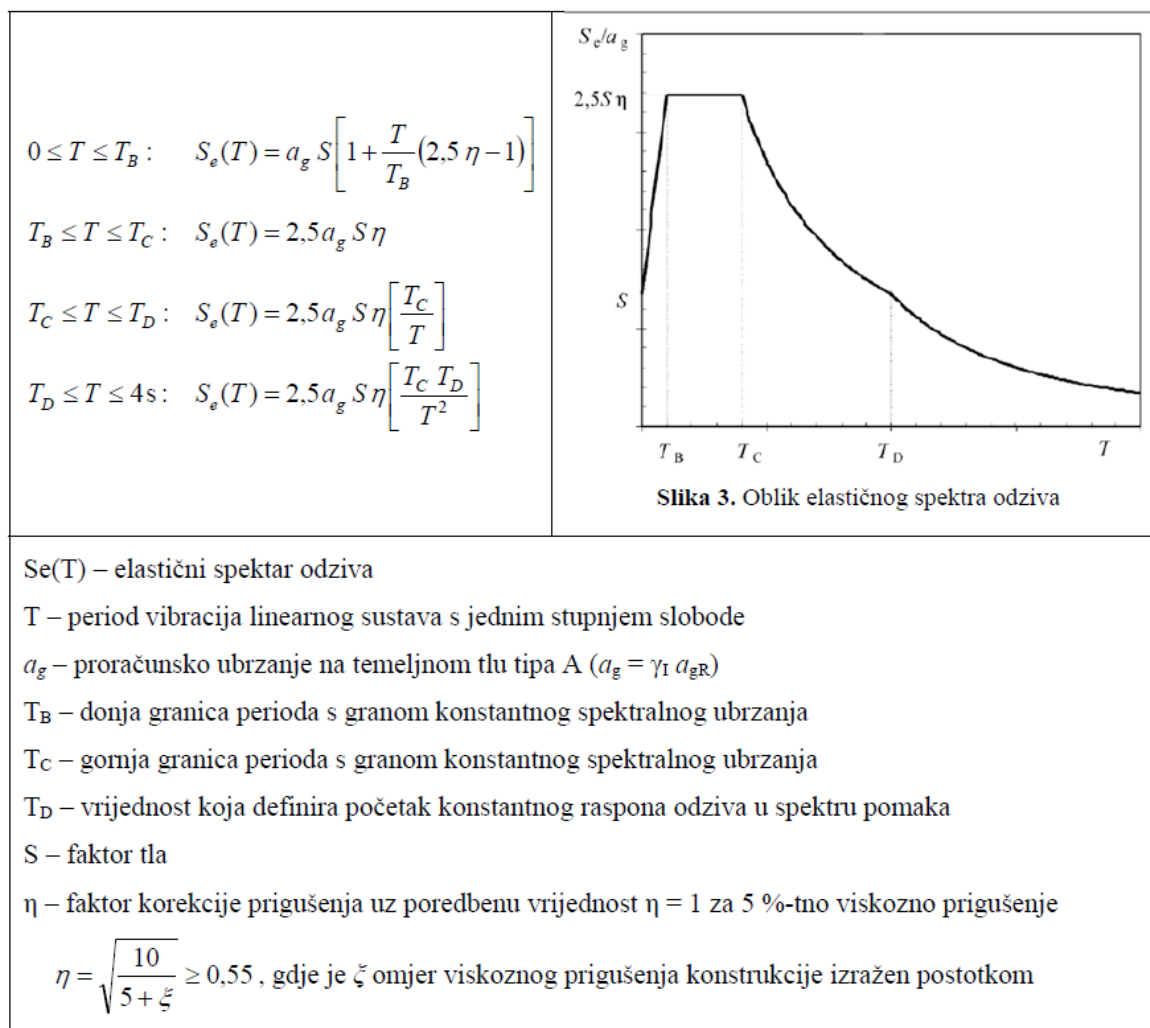


Slika 18: Karta potresnih područja RH za poredbena vršna ubrzanja temeljnog tla  $a_{gr}$  za tlo razreda A, poredbeni povratni period potresa 475 godina, poredbenu vrijednost prekoračenja 10% i razdoblje trajanja građevine 50 godina [21]

### 3.1.4. Horizontalni elastični spektar odziva

Horizontalna gibanja tla na površini Zemlje u potresu modeliraju se elastičnim spektrima odziva ubrzanja podloge obzirom na promatrano potresno područje. Horizontalna potresna djelovanja predstavljena su s dvije okomite neovisne komponente istog spektra odziva te treća komponenta u vertikalnom pravcu s posebnim elastičnim spektrom odziva ubrzanja podloge.

Elastični spektar odziva određuje se analitički i kvalitativno prema slici 20.



Slika 19: Izrazi za definiranje elastičnog spektra odziva Se(T) [20]

U Republici Hrvatskoj primjenjuje se elastični spektar tipa 1 (Ms > 5,5, EN 1998-1), za odgovarajuća temeljna tla definirana u sljedećoj tablici:

Tablica 15: Tipovi temeljnog tla i pripadajuće prosječne brzine prostiranja posmičnih valova vs,30 za tlo debljine 30m [21]

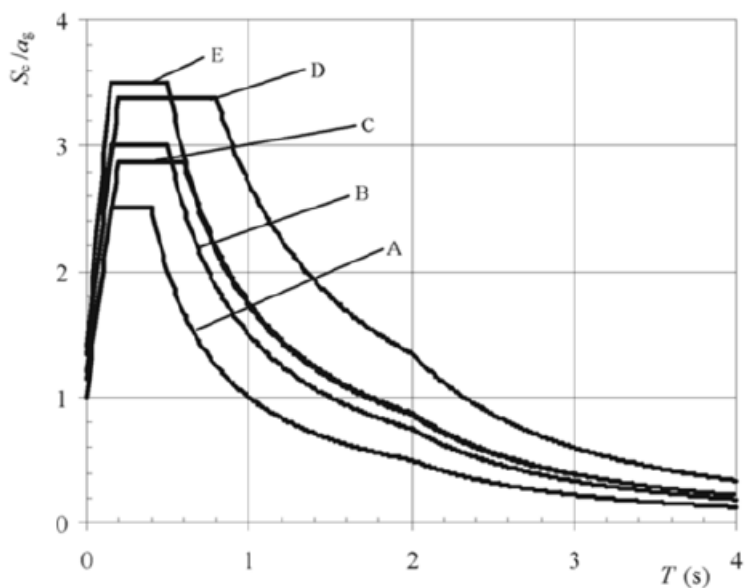
Tip temeljnog tla	Opis stratigrafskog profila	vs,30 (m/s)
A	Stijena ili druga geološka formacija poput stijene, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	> 800
B	Nanosi vrlo gustog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, s postupnim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom	360 - 800
C	Duboki nanosi gustog ili srednje gustog pijeska, šljunka ili krute gline debljine od nekoliko desetaka metara do više stotina metara	180 - 360
D	Nanosi rahlog do srednje zbijenog nekoherentnog tla (s nešto mekih koherentnih slojeva ili bez njih), ili pretežno meko do dobro koherentno tlo	< 180
E	Profil tla koji se sastoji od površinskog aluvijskog sloja s vrijednostima vs za tipove C ili D i debljinom između 5 i 20 m ispod kojeg je krući materijal s vs > 800 m/s	

U sljedećoj tablici dane su vrijednosti parametara kojima se opisuje horizontalni elastični spektar odziva za tip 1:

*Tablica 16: Vrijednosti parametara za preporučeni elastični spektar odziva tipa 1 [21]*

Tip temeljnog tla	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Odabran je tip temeljnog tla A, čime su definirane vrijednosti perioda  $T_B=0,15s$ ,  $T_C=0,4s$  i  $T_D=2,0s$ , te parametar tla  $S=1,0$ . Promatranj građevini odgovara razred važnosti II (obične zgrade koje ne pripadaju drugim kategorijama) iz čega slijedi faktor važnosti  $g_1 = 1,0$ . Stoga je vršno ubrzanje tla jednako referentnom  $a_g = a_{gR} * g_1 = 0,207g$ . Prigušenje je definirano s 5%.



Slika 20: Elastični spektar odziva  $S_e(T)$  tipa 1 za sve razrede temeljnog tla i 5%-tno prigušenje [21]

#### 6.2.4. Kombinacije djelovanja

Kod projektiranja građevina u potresnim područjima potrebno je u obzir uzeti dva osnovna zahtjeva kojima se provjerava potresna otpornost zidanih konstrukcija na temelju dvaju graničnih stanja definiranih u seizmičkim normama.

Ta dva granična stanja jesu:

- Građevina se ne smije srušiti

Konstrukciju građevine potrebno je proračunati i izgraditi tako da ne dođe do globalnog rušenja ili rušenja pojedinih njezinih dijelova pri potresnom djelovanju, nego da se zadrži konstrukcijska cjelovitost i određena preostala nosivost.

- Oštećenja moraju biti ograničena

Konstrukcija građevine mora se proračunati i izgraditi tako se pri potresnom djelovanju ne pojave oštećenja i pridružena ograničenja pri uporabi, već da se odupre potresnom djelovanju kako trošak ne bi bio nesrazmjerno velik u odnosu na vrijednost same građevine.



Stoga se pri proračunu konstrukcija na potresno djelovanje provjeravaju kombinacije za dva temeljna granična stanja:

Kombinacije opterećenja za granično stanje uporabljivosti glasi:

$$1,0 * (G_0 + G_1) + 1,0 * Q , \quad (19)$$

koristi se za proračun progiba armiranobetonskih ploča i za kontrolu naprezanja u tlu.

Kombinacije opterećenja za granično stanje nosivosti glasi:

$$1,35 * (G_0 + G_1) + 1,5 * Q, \quad (20)$$

koristi se za proračun vertikalnih djelovanja zidova i ploča konstrukcije.

U većini slučajeva zidanih konstrukcija granična stanja uporabljivosti automatski su zadovoljena ako su zadovoljena granična stanja nosivosti.

Prema HRN EN 1990 kombinacija djelovanja za potresnu proračunsku situaciju definira se na sljedeći način:

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} Q_{ki} \quad (21)$$

Gdje su:

- “+“ - oznaka za “da bude kombiniran sa“
- $\Sigma$  – oznaka za “kombinirani učinak“
- $G_{kj}$  – karakteristične vrijednosti stalnih djelovanja
- $P_k$  – karakteristična vrijednost djelovanja prednapinjanja
- $Q_{ki}$  – karakteristična vrijednost ostalih promjenjivih djelovanja
- $A_{Ed}$  – proračunska vrijednost izvanrednoga (seizmičkog) djelovanja
- $\gamma_I$  – koeficijent važnosti (EN 1998)

Razlikovanje pouzdanosti provodi se razredbom konstrukcija u različite razrede važnosti. Svakom razredu pouzdanosti dodjeljuje se faktor važnosti  $\gamma_I$ . Kada je opravdan razlog, faktor važnosti konstrukcije treba izvesti tako da odgovara većoj ili manjoj vrijednosti povratnog razdoblja potresa koji odgovara proračunu određene kategorije konstrukcije. Poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla odabrano za svako potresno područje odgovara poredbenom povratnom

razdoblju  $T_{NCR}$  potresnog djelovanja za zahtjev da ne smije doći do rušenja (poredbena vrijednost premašaja u 50 godina,  $P_{NCR}$ ). Vrijednost faktora važnosti u iznosu 1 odgovara poredbenom povratnom razdoblju prethodno navedenom. Za povratna razdoblja različita od poredbenog proračunsko ubrzanje tla temeljnog tla tipa A,  $a_g$  jednako je  $\gamma_I * a_{gR}$ .

Učinci inercije proračunskog potresnog djelovanja trebaju se odrediti uzimanjem u obzir mase građevine koja proizlazi iz svih gravitacijskih opterećenja sljedeće kombinacije djelovanja:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} * Q_{k,1} \quad (22)$$

$$\psi_{E,i} = \rho * \psi_{2i} \quad (23)$$

Vrijednosti  $\psi_{2i}$  dane su u EN 1990, a vrijednosti  $\rho$  za proračun  $\psi_{E,i}$  u EN 1998-1.

*Tablica 17: Koeficijenti kombinacije  $\psi$  za zgrade prema HRN EN 1990 [33]*

Djelovanje	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Uporabna opterećenja u zgradama kategorije (EN 1991-1-1)			
Kategorija A: kuće, stambene zgrade	0,7	0,5	0,3
Kategorija B: uredi	0,7	0,5	0,3
Kategorija C: područja za skupove	0,7	0,7	0,6
Kategorija D: trgovine	0,7	0,7	0,6
Kategorija E: skladišta	1,0	0,9	0,8
Kategorija F: prometna područja, težina vozila $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Kategorija G: prometna područja, $30 \text{ kN} \leq$ težina vozila $\leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Kategorija H: krovovi	0	0	0
Opterećenje snijegom u zgradama (EN 1991-1-3)*:			
Finska, Island, Norveška, Švedska	0,70	0,50	0,20
Ostale države članice CEN-a za gradilišta na visini $H > 1000$ m.n.m.	0,70	0,50	0,20
Ostale države članice CEN-a za gradilišta na visini $H \leq 1000$ m.n.m.	0,50	0,20	0
Opterećenja vjetrom na zgrade (EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (osim požara) u zgradama (EN 1991-1-5)	0,6	0,50	0
NAPOMENA: Vrijednosti $\psi$ mogu se odrediti u nacionalnom dodatku.			
*Za države koje nisu navedene, vidjeti odgovarajuće mjesne uvjete			

Tablica 18: Vrijednosti  $\rho$  za proračun  $\psi_{E,i}$  prema HRN EN 1998-1[20]

Tip promjenjivog djelovanja	Kat	$\rho$
Kategorije A-C*	Krov	1,0
	Katovi s povezanom zauzetošću	0,8
	Neovisno zauzeti katovi	0,5
Kategorije D-F* i arhivi		1,0
*Kategorije su definirane u normi EN 1991-1-1:2002		

Za proračun promatrane konstrukcije ovog rada odabrana vrijednost koeficijenta kombinacije  $\psi_{2i}$  za kategoriju A: kuće, stambene zgrade iznosi 0,3. Odabrana vrijednost  $\rho$  za područje stropa (katovi s povezanom zauzetošću) iznosi 0,8.

Što se tiče slučajnih torzijskih učinaka, kao dodatak stvarnoj ekscentričnosti, da bi se obuhvatile prostorna promjenjivost potresnog djelovanja i nepravilnost u razmještanju masa uzima se kako je proračunsko središte masa svakog kata  $i$ , pomaknuto sa svoga početnog mjesta u svakome smjeru za dodatnu slučajnu ekscentričnost:

$$e_{ai} = \pm 0,05L_i \quad (24)$$

Gdje su:

- $e_{ai}$  – slučajna ekscentričnost katne mase “ $i$ ” od njezina početnog mjesta, a uzima se u istome smjeru za sve katove
- $L_i$  – izmjera kata okomito na smjer potresnog djelovanja

U skladu s EN 1998-1 proračun horizontalne komponente potresnog djelovanja  $A_{Ed}$  iz potresne proračunske situacije određuje se prema kombinaciji proračunskih horizontalnih komponenti potresnog djelovanja za dva smjera. Općenito se uzima da te dvije komponente djeluju istodobno, a kombinacija se uzima kao korijen zbroja kvadrata odziva za svaku horizontalnu komponentu:

$$E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2} \quad (25)$$

Moguće je također korištenje sljedećih kombinacija:

$$E_{Edx} + 0,3 E_{Edz} \quad \text{za smjer x} \quad (26)$$

$$0,3 E_{Edx} + E_{Edz} \quad \text{za smjer z} \quad (27)$$

Gdje su:

- $E_{Edx}$  – proračunski učinci potresnog djelovanja u smjeru osi x konstrukcije
- $E_{Edz}$  - proračunski učinci potresnog djelovanja u smjeru osi y konstrukcije

### 6.3. Svojstva materijala za proračun u programu 3Muri

#### 6.3.1. Svojstva materijala ziđa

Budući da se mehanička svojstva ziđa određuju eksperimentalno te ih nije najbolja opcija proračunavati, koristiti ćemo se materijalima čije su karakteristike već ispitane i proračunane za zgrade slične geometrije i starosti, kao glavni izvor informacija poslužiti ćemo se parametrima ziđa iz knjige „Zidane konstrukcije“, Sorić 2016. Proučavat će se zidni elementi od pune opeke starog ziđa s vrijednostima čvrstoća navedenih u Tablici 20 s promjenama u iznosu modula elastičnosti s 800 N/mm<sup>2</sup> na 1200 N/mm<sup>2</sup> te modula posmika s 50 N/mm<sup>2</sup> na 400 N/mm<sup>2</sup>. Za kvalitetu morta koristiti će se mort M1. Vrijednosti koje su u tablici dane kao karakteristične u programu 3Muri za pushover analizu unositi će se kao srednje.

Srednja vrijednost dobit će se tako da se karakteristična vrijednost određene čvrstoće umanjuje za 0,8. Stoga će se za vrijednost srednje tlačne čvrstoće ziđa, koju u programskom paketu predstavlja oznaka  $f_m$ , uzimati vrijednost  $\frac{f_k}{0,8}$ .

Tablica 19: Karakteristične vrijednosti svojstava ziđa (N/mm<sup>2</sup>) [2]

Zidni element	$f$	$f_m$	$f_k$	$G$	$E$	$f_{tk}$
Puna opeka	10	0,5	2,0	40	250	0,04
Puna opeka	15	2,5	2,5	200	800	0,18
Perforirani zidni element 19/25/25 cm	15	2,5				0,10
Perforirani zidni element 19/25/25 cm	15	5				0,15
Perforirani zidni element 25/35/24 cm	10	10				0,25
Laki keramički blok	7,5	2,0	5,0	500	4500	0,30
Opečni blok	15	2,5	2,5	300	5000	0,12
Opečni blok	15	5	3,0	300	5000	0,18
Keramzitni blok	7,5	5	3,5	500	5000	0,27
Betonski blok	7,5	5	4,0	600	6000	0,27
Puna opeka - staro ziđe	10	1,0	2,0	50	800	0,09
Dvoslojno kameno ziđe u slabom vapnenom mortu	-	-	0,3	65	200	0,02
Dvoslojno kameno ziđe u vapnenom mortu	-	-	0,5	90	3000	0,08
Miješano ziđe u vapnenom mortu	-	-	0,9	50	1000	0,08
Kameno ziđe, grubo klesano, $t = 60\text{cm}$	-	5	-	-	-	0,30
Kameno ziđe, grubo klesano, $t = 45\text{cm}$	-	5	-	-	-	0,25
Plinobetonski	3,5	2,5	-	-	-	0,10
Porasti beton, tankoslojni mort	> 2	10	-	-	-	0,08

### 6.3.2. Svojstva materijala stropne konstrukcije

Drvene grede stropne konstrukcije promatrane zidane zgrade pripadaju razredu srednje kvalitete C24. Prema radu „Experimental and analytical evaluation of the inplane behaviour of as-built and strengthened traditional wooden floors“ [34] usvajaju se, na temelju istraživanja krutosti tradicionalne stropne konstrukcije, vrijednosti modula elastičnosti drvenog grednika i daščanog sloja. Stoga, vrijednost modula elastičnosti drvenog grednika iznosi  $E = 13120$  MPa, a drvene daske  $E = 11210$  MPa.

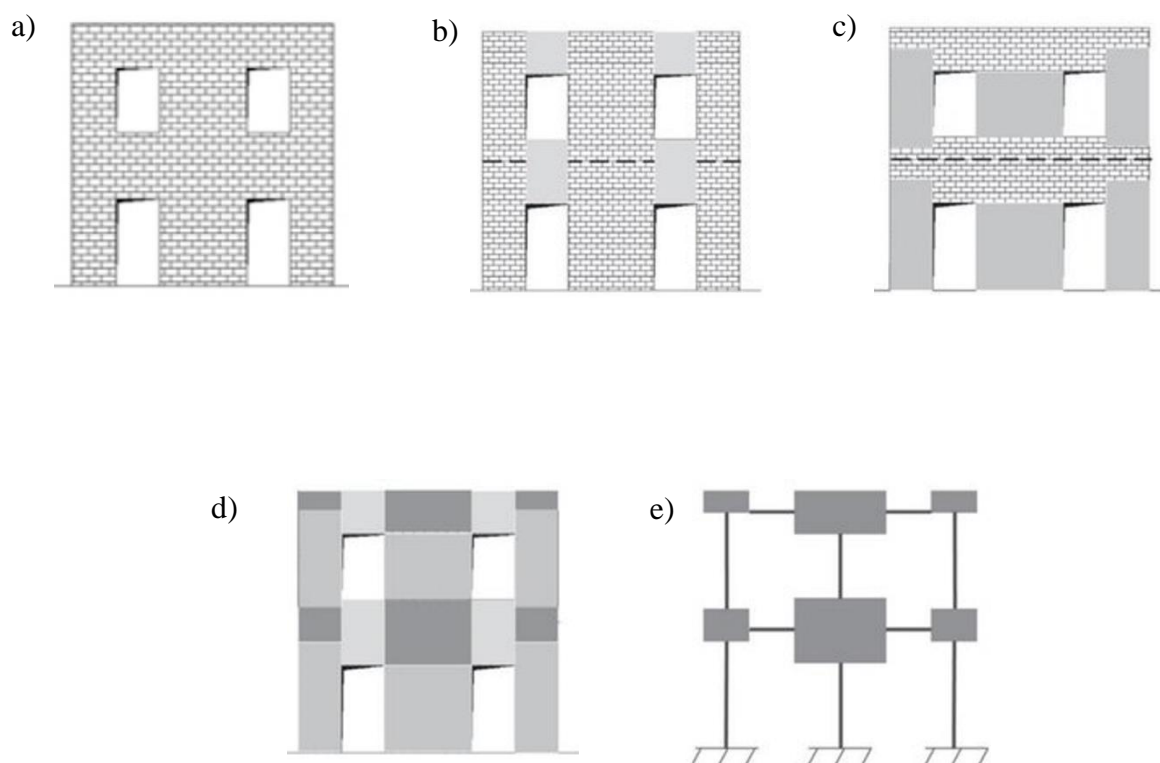
Modul posmika određuje se kao umnožak omjera srednjih vrijednosti modula elastičnosti i posmika danih u tablici 20. za nove drvene konstrukcijske elemente te prethodno navedenih vrijednosti modula elastičnosti. Jednoznačna vrijednost omjera iznosi  $\frac{E_{0,mean}}{G_{mean}} = 0,0625$  što pomnoženo s modulom elastičnosti drvenog grednika  $E_{G,0,mean} = 13120$  MPa daje posmik od 820 MPa, a s modulom elastičnosti drvene daske  $E_{D,0,mean} = 11210$  MPa posmik od 700 MPa.

Tablica 20: Razredi mekog cjelovitog drva [35]

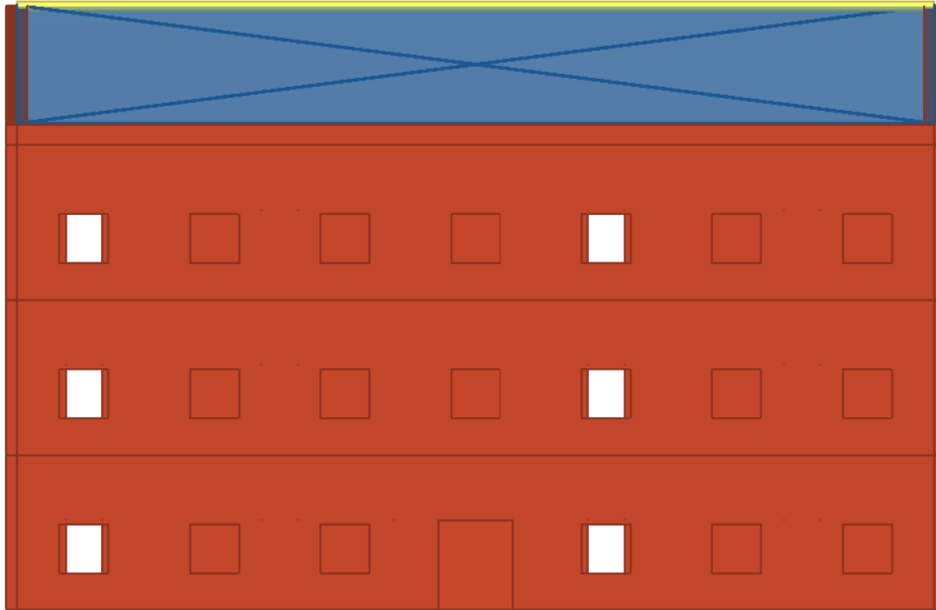
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
$f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
$f_{t,0,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
$f_{t,90,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$f_{c,0,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	16	17	18	19	20	21	22	23	25	27	28	30
$f_{c,90,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
$f_{v,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
$E_{0,mean}$ (N/mm <sup>2</sup> )	7000	8000	9000	9500	10000	11000	11500	12000	13000	14000	15000	16000
$E_{0,05}$ (N/mm <sup>2</sup> )	4700	5400	6000	6400	6700	7400	7700	8000	8700	9400	10100	10700
$E_{90,mean}$ (N/mm <sup>2</sup> )	230	270	300	320	330	370	380	400	430	470	500	530
$G_{mean}$ (N/mm <sup>2</sup> )	440	500	560	590	630	690	720	750	810	880	940	1000
$G_{0,05}$ (N/mm <sup>2</sup> )	295	335	375	395	420	460	480	500	540	590	630	670
$\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> )	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
$\rho_{mean}$ (kg/m <sup>3</sup> )	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

## 7. MODELIRANJE U PROGRAMSKOM PAKETU “3MURI“

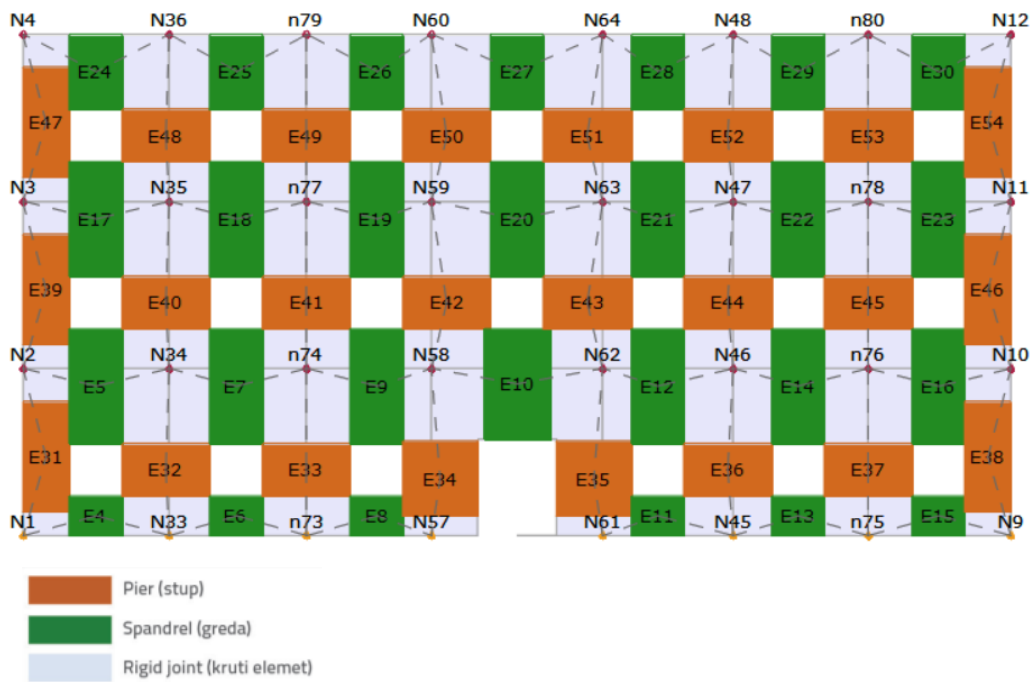
Za analizu postojeće zidane konstrukcije u pogledu dokaza mehaničke otpornosti i stabilnosti te potresne otpornosti konstrukcije korišten je programski paket *3muri*. To je inženjerski program koji je prilagođen za prostornu analizu zidanih konstrukcija i konstrukcija mješovitih materijala čije se zide opisuje pomoću ravninskih makroelemenata (Slika 22) postavljenih u dva okomita smjera. Ravninski makroelementi dijele se na tri međusobno povezana elementa, a to su: zidni stupac (eng. pier), vezna greda (eng. spandrel) i kruti čvor (eng. rigid joint). Zidni stupci ili deformabilni stupovi predstavljaju vertikalne elemente između otvora i između otvora i krajeva zidova, dok vezne grede (nadvoji, parapeti) predstavljaju horizontalne elemente ispod i iznad otvora poredanih u jednakoj vertikalnoj ravnini. Njih međusobno povezuju kruti čvorovi što sve zajedno čini pojednostavljeni prikaz modela kao ekvivalentnog okvira.



Slika 21: Ravninski makroelementi zida: a) model zida b) vezne grede c) zidni stupac d) kruti elementi e) pojednostavljeni prikaz ekvivalentnog okvira [36]



Slika 22: prikaz zida u programu 3Muri



Slika 23: Prikaz zida modeliranog zamjenskim okvirima (zeleno boja-vezne grede, smeđa boja-zidni stupci, siva boja-kruti čvor)

Programski paket *3muri* temelji se na nelinearnoj statičkoj metodi postupnog guranja (eng. Pushover analysis), koja se smatra jednom od najprimjerenijih metoda za potresni proračun postojećih zidanih konstrukcija [38]. Nelinearna statička metoda postupnog guranja bazira se na podvrgnutosti konstrukcije opterećenju u obliku horizontalnih sila koje zapravo predstavljaju inercijske sile koje mogu djelovati na konstrukciji uslijed potresa. Proračun funkcionira na način da se pomoću niza nelinearnih statičkih proračuna za jednolično rastuće horizontalne sile podvrgava pojedine presjeke plastičnom tečenju, što dovodi do povećanja deformacija i promjene u krutosti konstrukcijskog sustava. Ciljani pomak konstrukcije određuje se iz elastičnog spektra odziva. Proračun se odvija sve dok konstrukcija ne otkáže ili dosegne maksimalni pomak. Otkazivanje konstrukcije dolazi dostizanjem plastične vrijednosti otpornosti elementa koji se unatoč nemogućnosti rasta unutarnje sile u njemu, nastavlja deformirati. U programskom paketu postoje dva modela raspodjele horizontalnih sila. Prvi model predstavlja jednoličnu raspodjelu bočnih sila proporcionalnih masi, neovisno o visini, dok drugi model predstavlja modalnu raspodjelu bočnih sila proporcionalnih prvom obliku titranja konstrukcije. Prednost korištenog programa, osim jednostavnosti, leži u metodi računanja koja se temelji na metodi zamjenjujućih ravninskih okvira gdje se svaki zid dijeli prema navedenom uzorku te se kao idealizirani ekvivalentni okvir sastoji od veznih greda (parapeta ili nadvoja), eng. *spandrels*, zidnih stupaca (eng. *piers*) i krutih elemenata neosjetljivih na oštećenja (eng. *rigid joints*). Kako bi se utvrdila najveća sposobnost pomaka, odabire se kontrolni čvor te se na osnovi njegovog pomaka konstruira krivulja sposobnosti nosivosti (eng. *pushover curve*). Krivulja sposobnosti predstavlja grafički prikaz odnosa između poprečne sile u podnožju i pomaka kontrolnog čvora, a mjerodavnom za procjenu potresne otpornosti zgrade smatra se ona koja rezultira manjom sposobnošću konstrukcije u pogledu deformacije, krutosti i nosivosti. Kontrolni čvor odabire se na najvišem katu zgrade, što bliže centru masa. Pomak kontrolnog čvora predstavlja pomak pri kojem je ukupna poprečna sila u podnožju pala ispod 80% otpornosti konstrukcije te on odgovara najvećoj sposobnosti pomaka konstrukcije. Nelinearni statički proračun postupnog guranja temelji se na pretpostavci da se neelastični odgovor konstrukcije može usporediti s odgovorom istovjetnog sustava s jednim stupnjem slobode. Upravo u tome leži postupak proračuna u programskom paketu *3Muri*, gdje se konstrukcija modelira kao sustav s više stupnjeva slobode, a maksimalni pomak određuje se pretvorbom sustava s više stupnjeva slobode u ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode, pod pretpostavkom jednakog deformiranja uslijed potresnog djelovanja. Tako posložen sustav konstrukcije pruža informacije o stvarnom ponašanju zidane konstrukcije uslijed potresnog opterećenja.



### 7.1. Određivanje ciljanog pomaka u nelinearnom statičkom proračunu postupnog guranja prema EN 1998-1

Odnos normaliziranih bočnih sila  $\bar{F}_i$  i normaliziranih pomaka  $\Phi_i$  pretpostavlja se kao:

$$\bar{F}_i = m_i * \Phi_i \quad (28)$$

Gdje je:

- $m_i$  – masa u i-tom katu

Pomaci se normaliziraju tako da je  $\Phi_n = 1$ , gdje indeks  $n$  predstavlja kontrolni čvor, odnosno razina promatranog kata, posljedica toga je da je  $\bar{F}_n = m_n$ .

Kada se sustav pretvori u istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode, masa tog sustava  $m^*$  određuje se izrazom:

$$m^* = \sum m_i * \Phi_i = \sum \bar{F}_i, \quad (29)$$

a faktor pretvorbe izrazom:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i * \Phi_i^2} = \frac{\sum \bar{F}_i}{\sum \left( \frac{\bar{F}_i^2}{m_i} \right)} \quad (30)$$

Sila istovrijednoga sustava s jednim stupnjem slobode dobiva se kao:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma}, \quad (31)$$

a pomak kao:

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma}. \quad (32)$$

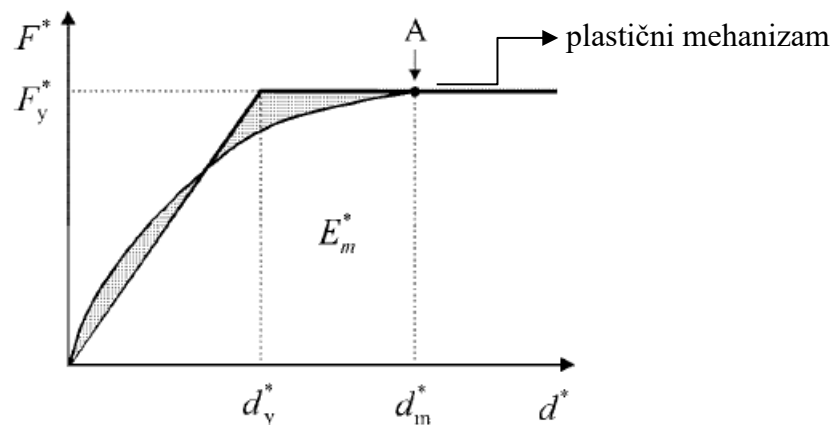
Gdje je  $F_b$  poprečna sila u podnožju, a  $d_n$  pomak kontrolnog čvora sustava s više stupnjeva slobode.

Grafična čvrstoća idealiziranog sustava jednaka je poprečnoj sili u podnožju pri stvaranju plastičnog mehanizma, ta sila naziva se sila pri popuštanju  $F_y^*$ . Početna krutost idealiziranog sustava određuje se tako da su površine ispod stvarne i idealizirane krivulje sile – deformacije jednake. Uzimajući u obzir takvu pretpostavku, pomak pri popuštanju sustava s jednim stupnjem slobode  $d_y^*$  dan je izrazom:

$$d_y^* = 2 * \left( d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right), \quad (33)$$

gdje je:

- $E_m^*$  - stvarna energija deformiranja od početka stvaranja plastičnog mehanizma.



Slika 24: Određivanje idealiziranog perfektnog elastoplastičnog odnosa sila-pomak [20]

Period  $T^*$  sustava s jednim stupnjem slobode određuje se izrazom:

$$T^* = 2\pi * \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}}, \quad (34)$$

dok se ciljani pomak konstrukcije s periodom  $T^*$  s neograničenim elastičnim ponašanjem određuje prema:

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2, \quad (35)$$

gdje je:

- $S_e(T^*)$  – elastični spektar odziva za ubrzanje za period  $T^*$ .

Za konstrukcije s kratkoperiodičnim rasponom i konstrukcija sa srednjim i dugoperiodičnim rasponom, ciljani pomak  $d_t^*$  određuje se upotrebom niže navedenih izraza, a granični period između kratkoperiodičnog i srednjeperiodičnog raspona je  $T_c$ .

- Za  $T^* < T_c$  (kratkoperiodični raspon)

Ako je  $\frac{F_y^*}{m^*} \geq S_e(T^*)$  odziv je elastičan stoga slijedi:

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (36)$$

Ako je  $\frac{F_y^*}{m^*} < S_e(T^*)$  odziv je nelinearan stoga slijedi:

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left( 1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \geq d_{et}^* \quad (37)$$

Gdje je:

- $q_u$  – omjer ubrzanja konstrukcije s neograničenim elastičnim ponašanjem  $S_e(T^*)$  i konstrukcije s ograničenom čvrstoćom  $\frac{F_y^*}{m^*}$ .

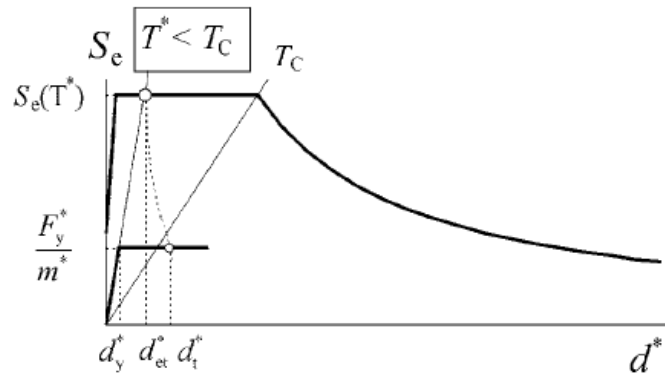
$$q_u = \frac{S_e(T^*)m^*}{F_y^*} \quad (38)$$

Vrijednost  $d_t^*$  ne treba prijeći  $3d_{et}^*$ .

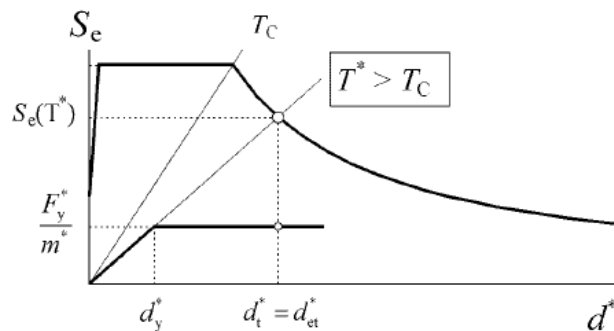
- Za  $T^* \geq T_c$  (srednji i dugoperiodični raspon) slijedi:

$$d_t^* = d_{et}^* \quad (36)$$

Na sljedećim slikama dani su grafički prikazi odnosa različitih veličina. Prikazani su grafovi s odnosom ubrzanje – pomak. Period  $T^*$  prikazan je radijalnom linijom iz ishodišta koordinatnog sustava do točke elastičnog spektra odziva definiranog koordinatama  $d_t^* = S_e(T^*) \left( \frac{T^*}{2\pi} \right)^2$  i  $S_e(T^*)$ .



Slika 25: Određivanje ciljanog pomaka za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode za kratkoperiodični raspon [20]



Slika 26: Određivanje ciljanog pomaka za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode za srednje i dugoperiodični raspon [20]

Određivanje ciljanog pomaka za sustav s više stupnjeva slobode provodi se sjedećim izrazom:

$$d_t = \Gamma d_t^* \quad (37)$$

Gdje ciljani pomak odgovara kontrolnom čvoru.

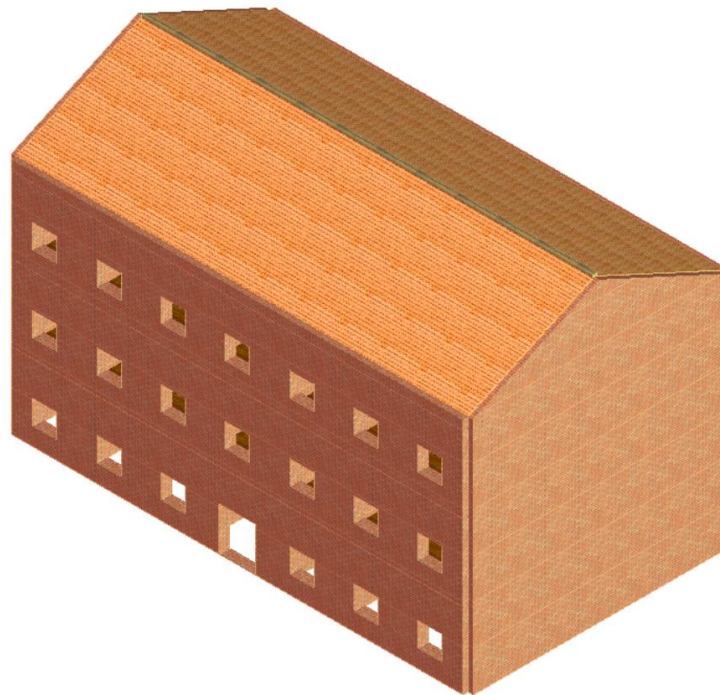
## 7.2. Geometrija postojeće građevine

U programski paket unesena je dxf datoteka s tlocrtnim dimenzijama konstrukcije kao podlogom prema kojoj su se formirale osi zidova, a s time i njihova debljina i visina formirajući naposljetku zgradu od 3 kata sa svim potrebnim geometrijskim značajkama. Primjećujemo prema tlocrtnoj dispoziciji kako konstrukcija nije simetrična u oba smjera što će rezultirati prisustvo ekscentričnosti pri nelinearnom statičkom proračunu.

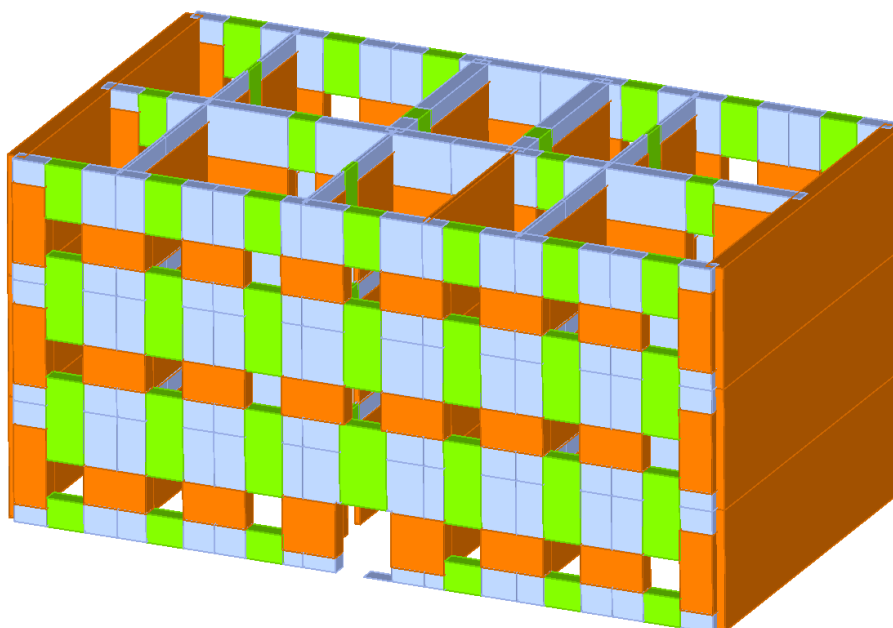
Ovaj programski paket zahtjeva što jednostavnije, a opet što točnije i pravilnije modeliranje konstrukcije. Cilj takvog modeliranja je izbjegavanje poremećaja vlastitih frekvencija konstrukcije i poremećaja u raspodijeli masa, stoga se elementi bez značajnijeg utjecaja na

otpornost konstrukcije poput balkona i stubišta često se unose u model. S obzirom da su zidovi modelirani kao makroelementi, ti makroelementi dijele se u tri podelementa: gornji i donji sloj (koncentracija utjecaja savijanja i uzdužne sile) i središnji sloj (posmične deformacije).

U poglavlju 6.1. tehničkog opisa konstrukcije zgrade spomenuto je kako se, zbog pojednostavljenja modela, proračun modela zgrade proveo s neuključivanjem elemenata krovišta u nosivost konstrukcije. Sukladno tome, krovna konstrukcija uzimat će se u obzir samo kao opterećenje na konstrukcijske elemente zgrade u numeričkom modelu konstrukcije (slika 29).

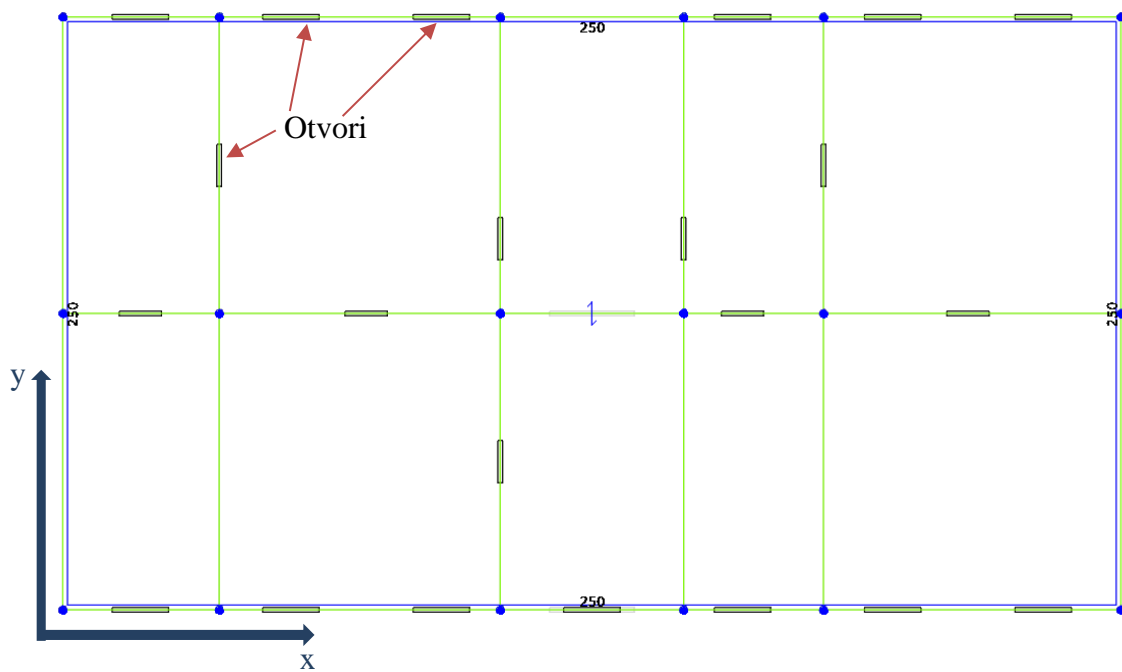


*Slika 27: 3D vizualizacija konstrukcije s teksturama materijala*



*Slika 28: Proračunski model zamjenjujućih okvira*

Na sljedećoj slici je prikazan tlocrt zidova i stropa zajedno s rasporedom otvora u programskom paketu 3Muri. Zelene linije označavaju zidove, dok plavi pravokutnik označava stropnu konstrukciju.

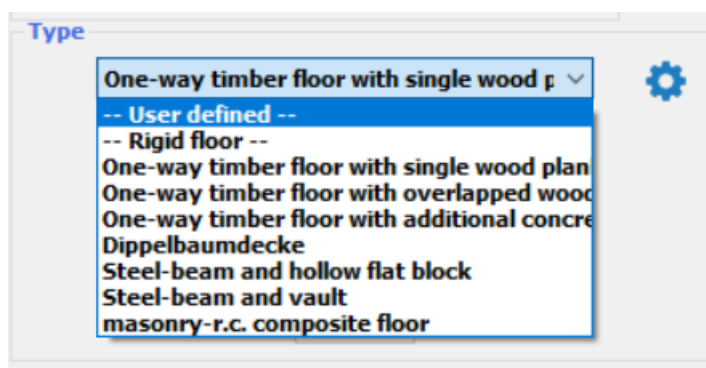


*Slika 29: Tlocrtna shema zidova i stropa kata*

### 7.3. Definiranje stropne konstrukcije

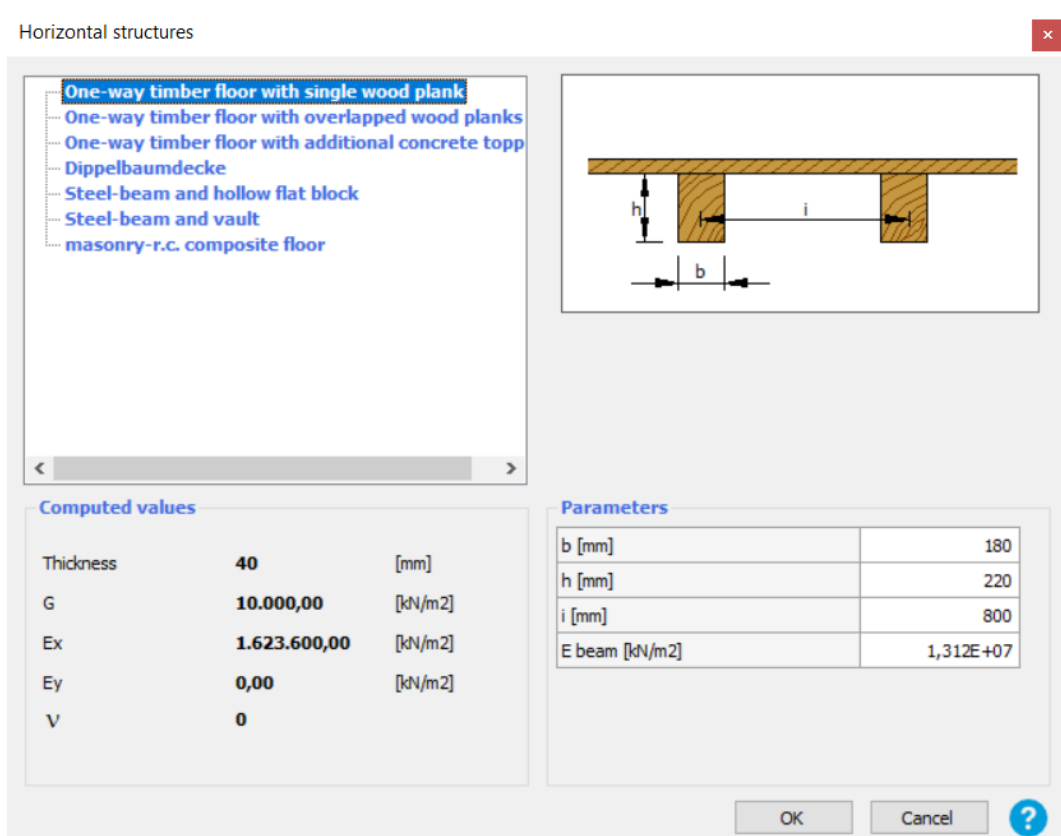
S obzirom da programski paket 3Muri modul posmika definirane stropne konstrukcije s jednoslojnom daščanom oplatom automatski uzima kao vrijednosti  $G=10\ 000\ \text{kN/m}^2$  (Slika 32), ta vrijednost se u programu ne može mijenjati.

Za definiranje stropne konstrukcije postoji osam ponuđenih tipskih stropova unutar samog programskog paketa koji se mogu odabrati, uz opciju definiranja vlastitog stropa, tj. unosa vlastitih podataka za drugačiju vrstu stropa (Slika 31). U slučaju promatrane konstrukcije odabire se međukatna konstrukcija kao jednoslojni daščani pod s drvenim grednicima kao nosivim elementima položenima u jednom smjeru ( Y smjer).



*Slika 30: Ponuđene vrste stropova u programskom paketu 3Muri*

Odabrani oblik stropne konstrukcije prikazuje najrealniji slučaj stvarne stropne konstrukcije promatrane građevine, a dimenzije i međusobni razmak drvenih grednika dani su na slici 32 koja jasno prikazuje definirane karakteristike stropa.



Slika 31: Definiranje stropne konstrukcije

Nakon što se odrede dimenzije, definiraju se opterećenja koja djeluju na strop. Na slici 33 vidljive su vrijednosti opterećenja od vlastite težine stropa i uporabnog opterećenja.

Programski paket 3Muri definira visinu stropa kao referentnu visinu između grednika i daščanog sloja, a visina stropne dijafragme jednaka je visini grednika kao nosivog elementa.

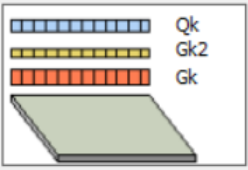
U programu se definiraju visine ekstradosa i intradosa koje se u ovom slučaju uzimaju na pola visine grede od 11 cm. Radi preklapanja visine stropa s ravinom poda sljedećeg kata unosi se osna visina stropa od 3,76m. Taj rezultat proizašao je iz umanjenja krajnje visine kata za 40 mm debljine sloja dasaka definiranih u programu.



Floor ✕

**Modify**

**Loads**




Qk  
Gk2  
Gk

Elevation	7,560	[m]
Gk	2,02	[kN/m2]
Gk2	0,00	[kN/m2]
Qk	2,00	[kN/m2]

**Static verifications**

Leading variable action 1    Support length  [mm]



Δ extrados elevation	0,110	[m]
Δ intrados elevation	0,110	[m]

**EC**

ψ2	0,30	ψ0	0,70	φ	0,80
----	------	----	------	---	------

**Type**

**One-way timber floor with single wood p** ⚙️

Thickness	40	[mm]
G	10.000,00	[kN/m2]
Ex	1.623.600,	[kN/m2]
Ey	0,00	[kN/m2]
V	0,00	

**Mass loading**

Unidirectional     Bidirectional

Main direction loading  %

**Display**

Material colour  Texture

OK    Cancel    ?

Slika 32: Definiranje opterećenja i statičkih karakteristika stropa

## 7.4. Opterećenje

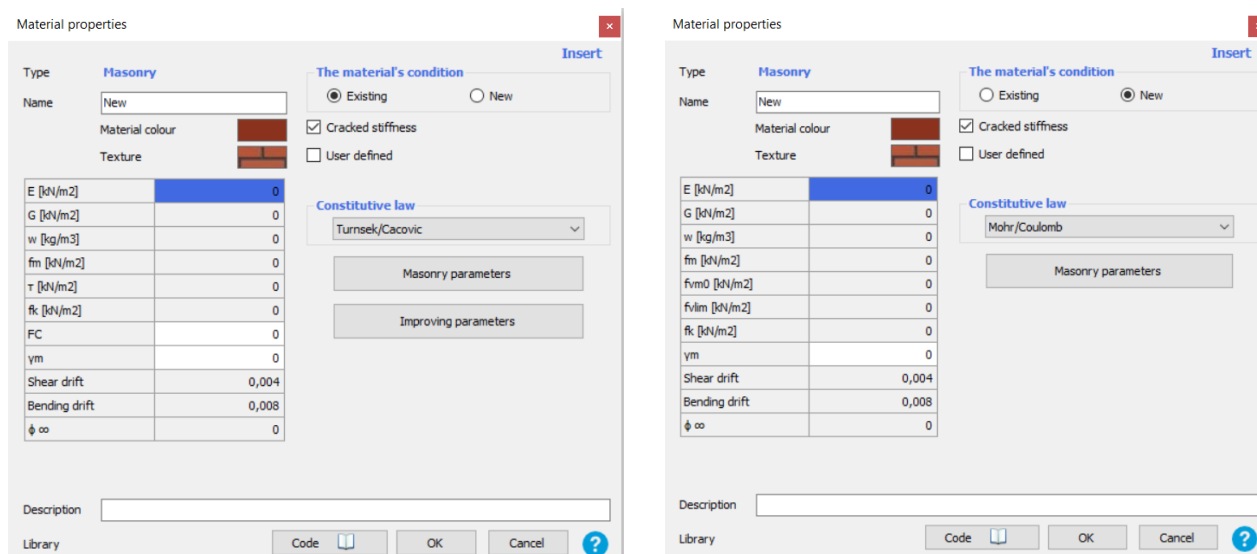
U obzir je uzeto gravitacijsko opterećenje koje uključuje težinu podova i korisno opterećenje za prostore stanovanja i uredskih djelatnosti. Preglednost iznosa navedenih opterećenja predočena je u tablici 9 gdje faktor redukcije  $\psi_2$  za korisno opterećenje stambenih zgrada iznosi 0,3 za potresnu kombinaciju opterećenja prema normi HRN EN 1990. Više o provedenoj analizi opterećenja zgrade nalazi se u poglavlju 6.2.

*Tablica 21: Prikaz opterećenja*

Opterećenje	Nominalno opterećenje [Kn/m2]	Faktor redukcije $\psi_2$	$G_k + \psi_2 * Q_k$ [kN/m2]
Težina stropa	2,02	1	2,02
Korisno opterećenje	2	0,3	0,6
Ukupno			2,62

## 7.5. Definiranje zidova

Karakteristike materijala konstrukcije definiraju se pod opcijom „Materials“ u kojoj postoje razne mogućnosti odabira materijala (beton, čelik, drvo, opeka) za formiranje elemenata poput zidova, greda, stupova i podova. Postoji također mogućnost unošenja vlastitih vrijednosti mehaničkih karakteristika čime se definira novi materijal željenih karakteristika. Kod unosa novog tipa zidnih elemenata postoje opcije odabira novog i postojećeg materijala ovisno o stanju konstrukcije (Slika 34), u našem slučaju izabrati ćemo postojeći materijal (eng. existing) obzirom da analiziramo postojeću zgradu.



Slika 33: Tablica unosa karakteristika ugrađenog materijala

Nakon odabrane opcije za postojeće stanje materijala, vlastoručno se upisuju vrijednosti karakteristika materijala prikazane na slici 34.

Gdje su:

- E - kratkotrajni sekantni modul elastičnosti zida
- G - posmični modul zida
- w - težina zida
- $f_m$  - srednja tlačna čvrstoća zida
- $\tau$  - prosječno posmično naprezanje
- $f_k$  - karakteristična tlačna čvrstoća zida
- FC - faktor povjerenja
- $\Gamma_m$  - parcijalni faktor za zide
- $f_{vm0}$  - srednja posmična čvrstoća zida pri nultom naprezanju
- $f_{vlim}$  - granična vrijednost posmične čvrstoće

Za proračun zidova konstrukcije postoje dvije metode mogućeg proračuna: metoda Turnšek Čačović i metoda prema Mohr-Coulombu. Metoda Turnšek Čačović prema talijanskoj normi [40] koristi se samo za postojeće građevine.

Posmični slom moguće je izračunati prema kriteriju definiranom od strane Turnška i Čačovića koji glasi:

$$V_u = l_t \frac{1,5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1,5\tau_0}} = l_t \frac{f_t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}} = l_t \frac{1,5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{N}{1,5\tau_0 l_t}} \quad (38)$$

Gdje su:

- $f_t$  i  $\tau_0$  - vrijednosti posmične čvrstoće za dijagonalni slom zida
- $b$  – koeficijent definiran obzirom na omjer visine i dužine zida ( $b = \frac{h}{l}$ ,  $1 \leq b \leq 1,5$ ).

Prema Mohr-Coulombovom kriteriju posmični slom definira krajnji posmik kao:

$$V_u = l' t f_v = l' t (f_{v0} + \mu \sigma_n) = l' t f_{v0} + \mu N \quad (39)$$

Gdje su:

- $l'$  - duljina tlačnog dijela zida  $t$  je debljina
- $f_v$  - posmična čvrstoća zida
- $f_{v0}$  - predstavlja posmičnu čvrstoću bez pritiska
- $\mu$  - koeficijent trenja  $t$
- $\sigma_n$  - srednje normalno tlačno naprezanje

U ovom radu provesti će se proračun prema metodi Turnšek Čačović, primjerenijoj za staro zide.

U nelinearnoj statičkoj analizi, prema talijanskoj normi, posmična čvrstoća dijeli se faktorom povjerenja, FP. Vrijednost faktora povjerenja određuje se obzirom na količinu informacija i podataka prikupljenih za stanje promatranog postojećeg zida. Postignutom razinom znanja određuju se i dopuštene metode proračuna. Postoje tri razine znanja (RZ) podataka, a to su:

- RZ1 – ograničeno znanje  $\rightarrow$  FP = 1,35
- RZ2 – uobičajeno znanje  $\rightarrow$  FP = 1,2
- RZ3 – potpuno znanje  $\rightarrow$  FP = 1,0

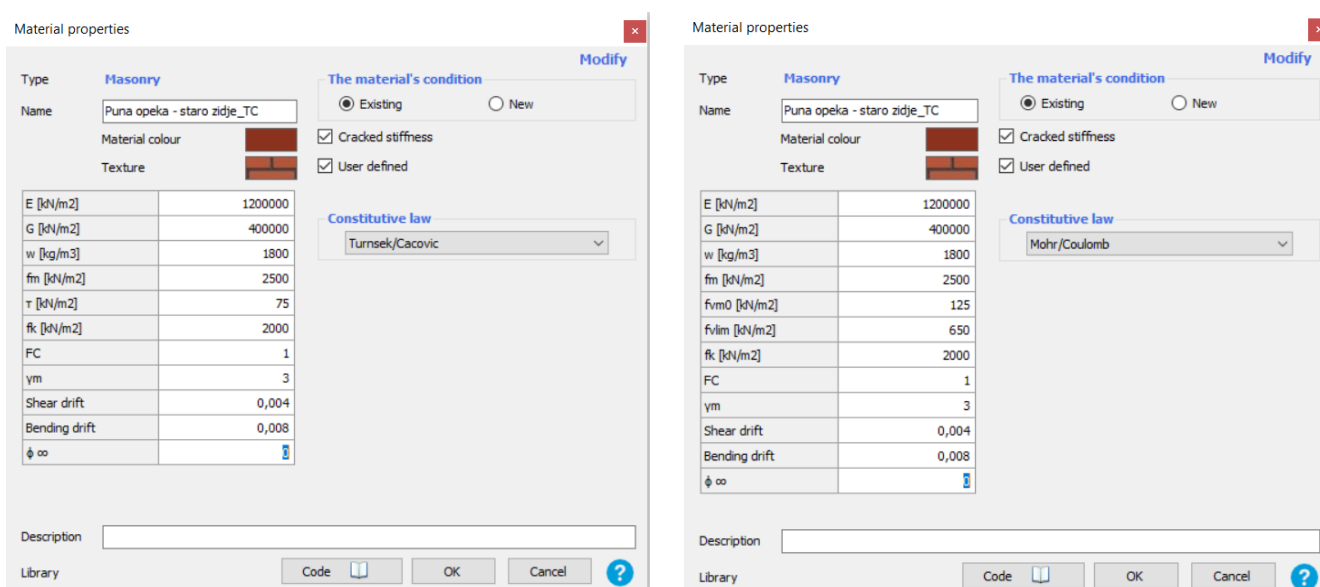
Postoje brojni faktori prema kojima se određuje odgovarajuća razina znanja, a neki od njih jesu:

- Mehanička svojstva sastavnih materijala
- Geometrijska svojstva konstrukcijskoga sustava i nekonstrukcijskih elemenata

- Spojevi stropnih konstrukcija s konstrukcijom koja preuzima bočne sile, prionjivost i sljubnice u zidu...

U našem slučaju koristiti će se faktor povjerenja  $FP = 1,35$  kojim će se umanjivati potresna otpornost zida. Ovaj faktor povjerenja se prema EN 1998-3 rabi za kriterij sposobnosti preko deformiranja.

Pri definiranju samog materijala i unosu vrijednosti njegovih karakteristika koristiti ćemo se s opcijom „cracked stiffness“ koja faktorom redukcije ispucale krutosti umanjuje potresnu otpornost konstrukcije. Vrijednost faktora prikazana je na slici 35, a njome se dijeli ukupna krutost zida ukoliko se radi o postojećoj zgradi s vidljivim pukotinama.

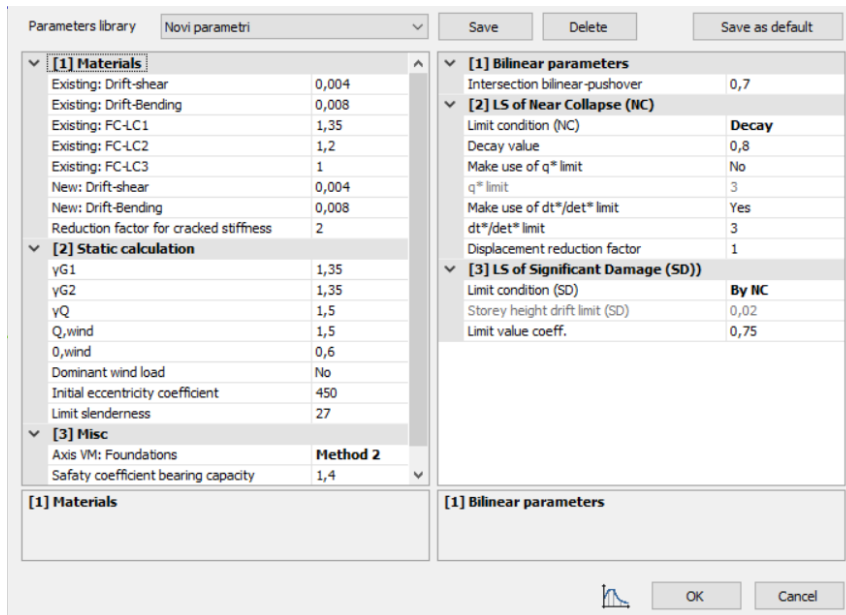


Slika 34: Tablica vrijednosti karakteristika materijala za kriterij Turnšek/Čačović i Mohr/Coulomb

Na slici 36 prikazane su sve unesene početne vrijednosti materijala prema vrijednostima definiranim u Eurokodu, no s promjenama u vrijednostima za „drift-shear“ ili u prijevodu „pomak u zidu zbog posmika“ i „drift-bending“ ili „pomak u zidu zbog savijanja“. Prema HRN EN 1998-3, poglavlju C.4.2. vrijednosti postojećih posmičnih pomaka i pomaka zbog savijanja množe se s vrijednosti od 4/3 pri čemu se rezultati za „drift-shear“ mijenjaju s 0,004 na 0,0053, a za „drift-bending“ s 0,008 na 0,0107. Dobivene vrijednosti potrebno je umanjiti za faktor povjerenja  $FP = 1,35$  čime se vraćamo na vrijednosti koje su već prethodno definirane u programu. Dakle, zaključak je kako bi se zapravo trebale unositi vrijednosti „drifta“ definirane Eurokodom (0,0053 i 0,0107) i definiranjem faktora povjerenja automatski proračunati programom, no programski paket nepravilno uzima faktor povjerenja u proračun te se ove vrijednosti moraju unositi ručno, a faktor povjerenja definira se kao 1. Još jedan bitna stavka pri unošenju parametara jest definiranje graničnog uvjeta kojim završava proračun, tj. nelinearni statički proračun postupnim guranjem. Definiranje tog uvjeta nalazi se pod rubrikom „[2] LS of Near Collapse (NC)/Limit condition (NC)“ što označava da će se za rezultate proračuna modela zgrade promatrati granično stanje blizu rušenja. Moguće je definirati dvije vrste graničnog uvjeta, „decay“ i „first element failed“ u prijevodu „decay“ označava završetak proračuna kada otpornost konstrukcija padne ispod 80% ukupne bočne otpornosti konstrukcije, tj. kada poprečna sila padne na 80% maksimalno dosegnute vrijednosti sile. Krajnji kapacitet pomaka  $\Delta_{NC}$  za granično stanje blizu rušenja uzima se za pomak donjeg kontrolnog čvora za koji je postignut sljedeći uvjet:

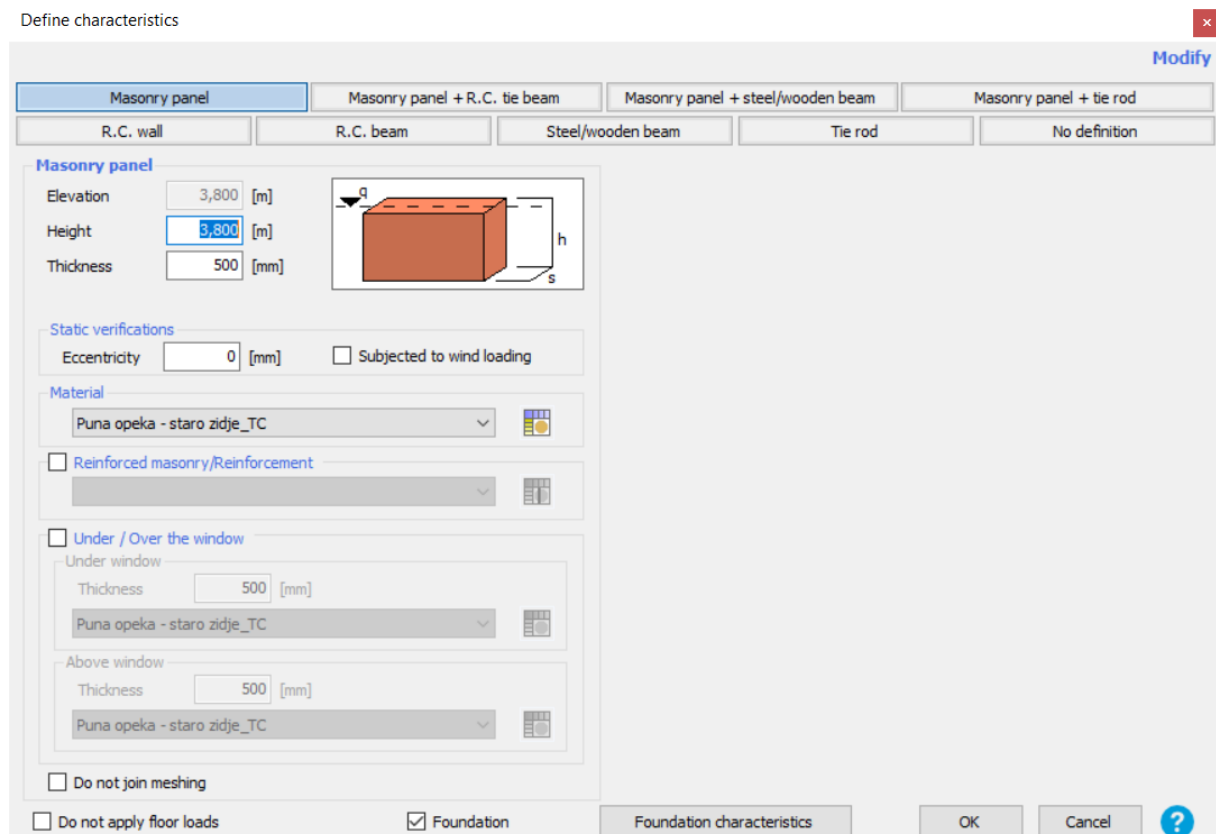
- Ukupna bočna otpornost („base shear“) pala je ispod 80% ukupne otpornosti konstrukcije zbog progresivnog oštećenja i sloma elemenata otpornih na bočno opterećenje

Druga opcija graničnog uvjeta jest „first element failed“ odnosno provedba proračuna do sloma prvog makroelementa zida, pri kojem programski paket bilježi iznos pomaka i sile u tom trenutku. U ovom radu analizirati će se oba granična slučaja te naposljetku usporediti rezultati.



Slika 35: Vrijednosti parametara unesenih u program

Nakon svih unesenih parametara i definiranja osi zidova, određuje se vrsta materijala kao i debljina zidova (slika 37), među svim opcijama koje program nudi za definiranje materijala, odabrali smo klasični zidni element bez horizontalnih armiranobetonskih serklaža te unijeli vrijednosti debljine zida od 51 cm i njegove visine od 3,8 m.



Slika 36: Definiranje vrste materijala i dimenzija zidova

## 7.6. Proračun

Potresni proračun provodi se za zidove u smjeru njihova pružanja tj. u dva glavna ortogonalna smjera u globalnom potresnom proračunu. Temeljni zahtjev proračuna odnosi se na stanje oštećenja konstrukcije definirano trim graničnim stanjima. Ta tri granična stanja odnose se na granično stanje blizu rušenja (BR), granično stanje znatnog oštećenja (ZO) i granično stanje ograničenog oštećenja (OO).

Granično stanje ograničenog oštećenja (OO) odgovara laganom oštećenju konstrukcije čiji elementi znatno ne popuštaju te zadržavaju vlastitu krutost i čvrstoću. Bit ovog stanja leži u mogućnosti popravka oštećenja. U nekonstrukcijskim elementima dozvoljene su pojave pukotina, a pomaci su zanemarivi.

Granično stanje znatnog oštećenja (ZO) označava i znatno oštećenu konstrukciju. Konstrukcija zadržava preostalu bočnu čvrstoću i krutost, a vertikalni elementi sposobni su nositi vertikalna opterećenja. U ovom slučaju ostaju trajni umjereni pomaci, nekonstruktivni elementi djelomično su oštećeni, popravak konstrukcije najvjerojatnije bi bio neekonomičan.

Granično stanje blizu rušenja (BR) odgovara najstrožem stanju pri kojem je konstrukcija teško oštećena s vrlo malom preostalom bočnom čvrstoćom i krutošću. Većina nekonstruktivnih elemenata je srušena, no vertikalni elementi i dalje mogu nositi vertikalna opterećenja. Konstrukcija se nalazi u stanju blizu rušenja, s velikim trajnim pomacima i teško da bi preživjela novo potresno opterećenje.

Prema propisanom Hrvatskom nacionalnom dodatku HRN EN 1998-3:2011/NA potrebno je pri ocjenjivanju i obnovi zgrada kontrolirati granično stanje znatnog oštećenja i granično stanje ograničenog oštećenja. No, programskim paketom 3Muri razmatrati će se rezultati proračuna za granično stanje blizu rušenja koje i sam program nudi kao mjerodavne. Dapače, dobivene rezultate pomaka i sila iz krivulje kapaciteta moguće je očitati samo za to stanje, dok za druga dva stanja to nije slučaj.



Globalni proračun proveden je za vrstu tla razreda A, za kvalitetu morta  $f_{vk0} = 0,10$  MPa i za različitu raspodjelu bočnih sila po visini konstrukcije u X i Y smjeru. Kao potresno područje uzeto je područje grada Rijeke s vršnim ubrzanjem tla za povratno razdoblje od 475 godina u iznosu  $a_{gR} = 0,207g$  ( $2,03 \text{ m/s}^2$ ) za kontrolu graničnog stanja znatnog oštećenja (SD), a za kontrolu graničnog stanja ograničenog oštećenja (DL) korišteno je vršno ubrzanje tla za povratni period od 95 godina koje iznosi  $0,106g$  ( $1,04 \text{ m/s}^2$ ). Sve vrijednosti očitane u iz karte potresnih područja Republike Hrvatske prema normi HRN EN 1998-1:2011/NA. Granično stanje blizu rušenja (NC) dobiveno je množenjem vršnog ubrzanja tla za granično stanje znatnog oštećenja s faktorom 1,5 što naposljetku daje vrijednost vršnog ubrzanja tla od  $3,05 \text{ m/s}^2$ .

Seismic load

Spectrum Shape: Parametric

Spectrum Diagram

	NC	SD	DL
► Verification	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
$a_{gR}$ [ $\text{m/s}^2$ ]	3,05	2,03	1,04
Soil type	A	A	A
S	1,00	1,00	1,00
$T_B$ [s]	0,15	0,15	0,15
$T_C$ [s]	0,40	0,40	0,40
$T_D$ [s]	2,00	2,00	2,00

Importance Factor: 1,00

Buttons: Load default, OK, Cancel, ?

Slika 37: Potresni parametri korišteni u proračunu

Zahtjev za granično stanje znatnog oštećenja (SD) glasi:

$$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}, \quad (40)$$

gdje je:

- $d_t^{SD}$  – ciljani ili zahtijevani pomak
- $d_m^{SD}$  – sposobnost pomaka za granično stanje znatnog oštećenja.

Zahtjev za granično stanje ograničenog oštećenja (DL) glasi:

$$S_d(T^*) \leq d_y^*, \quad (41)$$

gdje je:

- $S_d(T^*)$  – ciljani pomak zahtijevan u normi za  $T = T^*$ , a  $T^*$  je period sustava s jednim stupnjem slobode
- $d_y^*$  – sposobnost plastične deformacije ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode

Za svako pojedino granično stanje izračunava se faktor ispunjenja  $\alpha$  kao omjer kapaciteta akceleracije i pripadnog vršnog ubrzanja. Navedeni pojam predstavlja najveću moguću vrijednost opterećenja koje konstrukcija može izdržati u odgovarajućim graničnim stanjima:

- $\alpha_{SD} = \frac{PGA_{CSD}}{PGA_{DSD}} \quad (42)$

- $\alpha_{DL} = \frac{PGA_{CDL}}{PGA_{DDL}} \quad (43)$

Gdje je  $PGA_{CSD}$  kapacitet ubrzanja koji odgovara graničnom stanju znatnog oštećenja,  $PGA_{CDL}$  kapacitet ubrzanja koji odgovara graničnom stanju ograničenog oštećenja,  $PGA_{DSD}$  vršno ubrzanje tla graničnog stanja znatnog oštećenja i  $PGA_{DDL}$  vršno ubrzanje tla graničnog stanja ograničenog oštećenja.

U proračunu se sagledavaju četiri smjera djelovanja bočnih sila (+X, -X, +Y, -Y) za ukupno 24 *pushover* proračuna. Već ranije su spomenute dvije moguće vrste raspodjele bočnih sila (jednolika i modalna raspodjela) koje mogu i ne moraju uključivati ekscentricitet djelovanja bočnih sila kao slučajnih torzijskih efekata.

Proračun ovog rada bazirati će se na proučavanju utjecaja rezultata dva modela iste zgrade na njeno ponašanje pri potresnom djelovanju. Model 1 predstavlja konstrukciju s uključenim pregradnim zidovima te utjecajem istih na cjelokupnu nosivost konstrukcije. Model 2 isključuje pregradne zidove iz nosivosti i sagledava se ponašanje zgrade bez njihova utjecaja.

Na kraju provedenih proračuna za oba modela, usporedit će se rezultati na temelju kojih će se utvrditi stupanj povećanja potresne otpornosti zgrade s obzirom na postojanje utjecaja pregradnih zidova te bez njihova utjecaja.

U sljedećoj tablici prikazani su svi proračunski modeli za sve metode i granična stanja provedena u programu 3Muri:

*Tablica 22: Provedeni proračuni i metoda za oba modela*

Proračun do sloma prvog kritičnog elementa	Proračun do globalnog sloma
<b>Metoda Turnšek/Čačović</b>	
Model 1	
Model 2	

### **7.6.1. Model 1**

Proračun prvog modela provodi se s obzirom na utjecaj pregradnih zidova na globalnu nosivost konstrukcije. Pregradni zidovi postavljeni su okomito na glavne nosive zidove i jednaki su karakteristika materijala. Drveni grednici stropne konstrukcije rasprostiru se paralelno s rasprostiranjem pregradnih zidova, koji prenose uglavnom opterećenje od vlastite težine. Međukatnu konstrukciju čini drvena stropna konstrukcija, odabrana u programskom paketu, čiji se drveni grednici oslanjaju na nosive zidove. Nakon definiranja svih ulaznih parametara konstrukcije provodi se proračun globalnog odziva konstrukcije na ekvivalentnom sustavu s jednim stupnjem slobode.

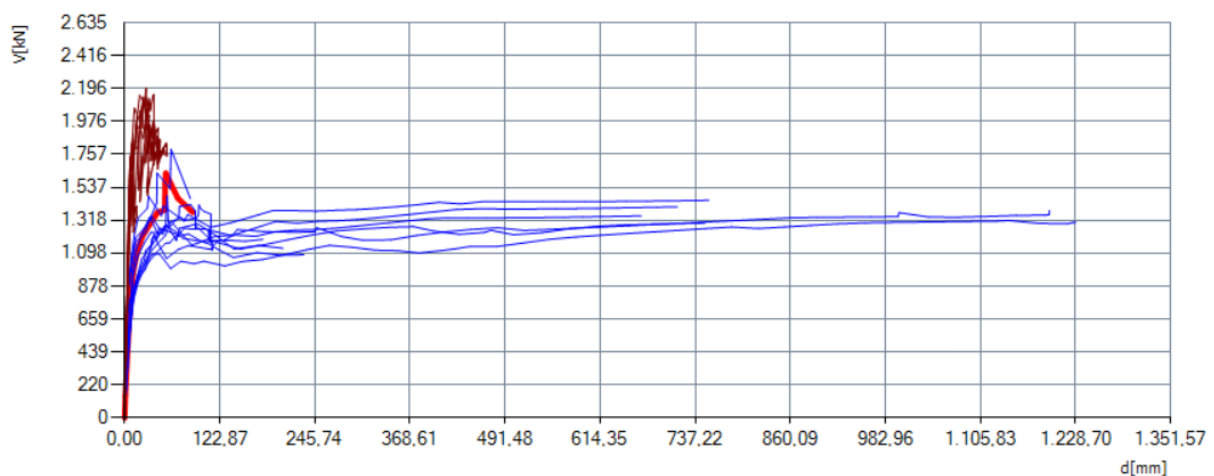
Nakon provedenog proračuna prikazuje se tablica s vrijednostima faktora ispunjenja za sva 24 provedena proračuna (uključujući ekscentričnost centara masa i krutosti) i za tri granična stanja (Slika 39). Žutom bojom označena su dva mjerodavna proračuna, jedan u X i drugi u Y smjeru. Uvjet nosivosti smatra se zadovoljenim ako vrijednost faktora ispunjenja prelazi vrijednost 1. Zelenom bojom označeni su zadovoljeni uvjeti analize, što na promatranom modelu nije slučaj, a crvenom bojom označena je analiza čiji uvjeti proračuna nisu zadovoljeni. Kada bi vrijednost faktora ispunjena bila veća od 1, u tom slučaju smatralo bi se da konstrukcija posjeduje dostatnu sposobnost preuzimanja potresnih sila te da su pomaci konstrukcije manji od graničnih pomaka definiranih normom. Dobiveni rezultati razmatrati će se za metodu proračuna prema Turnšek Čačoviću. Također, za proračun graničnog stanja blizu rušenja promatrati će se proračun do sloma prvog elementa i proračun do globalnog sloma konstrukcijskog sustava.

#### 7.6.1.1. Model 1.1 - slom prvog elementa

No.	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	$\alpha$ NC	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL	dm/dt NC
1	+X	Uniform	0,00	0,223	0,251	0,553	0,223
2	+X	Static forces	0,00	0,212	0,239	0,526	0,212
3	-X	Uniform	0,00	0,431	0,486	0,418	0,431
4	-X	Static forces	0,00	0,539	0,608	0,338	0,539
5	+Y	Uniform	0,00	0,433	0,497	0,637	0,420
6	+Y	Static forces	0,00	0,341	0,386	0,585	0,338
7	-Y	Uniform	0,00	0,272	0,308	0,701	0,264
8	-Y	Static forces	0,00	0,198	0,224	0,582	0,198
9	+X	Uniform	630,00	0,222	0,250	0,546	0,222
10	+X	Uniform	-630,00	0,223	0,252	0,560	0,223
11	+X	Static forces	630,00	0,212	0,238	0,522	0,212
12	+X	Static forces	-630,00	0,211	0,238	0,531	0,211
13	-X	Uniform	630,00	0,373	0,420	0,470	0,372
14	-X	Uniform	-630,00	0,440	0,495	0,418	0,439
15	-X	Static forces	630,00	0,550	0,620	0,338	0,550
16	-X	Static forces	-630,00	0,511	0,576	0,353	0,511
17	+Y	Uniform	1.125,00	0,355	0,409	0,636	0,340
18	+Y	Uniform	-1.125,00	0,560	0,638	0,561	0,551
19	+Y	Static forces	1.125,00	0,364	0,413	0,592	0,361
20	+Y	Static forces	-1.125,00	0,334	0,378	0,554	0,331
21	-Y	Uniform	1.125,00	0,259	0,294	0,667	0,249
22	-Y	Uniform	-1.125,00	0,299	0,340	0,689	0,293
23	-Y	Static forces	1.125,00	0,191	0,215	0,560	0,191
24	-Y	Static forces	-1.125,00	0,207	0,233	0,606	0,207

Slika 38: Vrijednosti faktora ispunjenja za model 1.1.

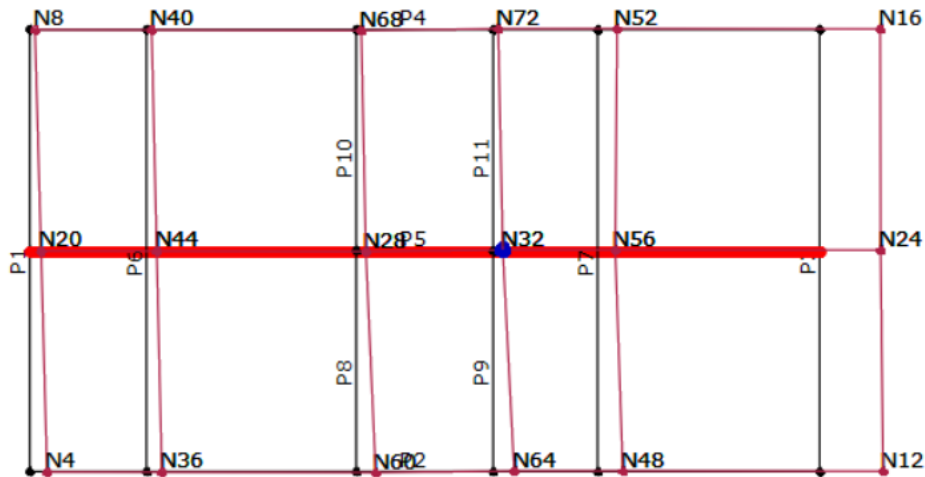
Prvo će se prikazati proračun zgrade za slom prvog elementa. Vrijednosti parametara proračuna ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode u programskom paketu jesu sljedeće: period titranja  $T^* = 0,701$  s, sila pri popuštanju  $F_y = 792$  kN, pomak pri popuštanju  $d_y^* = 9,81$  mm te maksimalni pomak  $d_m^* = 11,42$  mm u X smjeru, a za Y smjer vrijede sljedeće vrijednosti:  $T^* = 0,407$  s, popuštanju  $F_y = 1263$  kN,  $d_y^* = 6,0$  mm,  $d_m^* = 6,0$  mm. Na slici 40 prikazan je graf s krivuljama kapaciteta za oba smjera djelovanja potresnih sila, gdje plava boja označava smjer X, a crvena smjer Y.



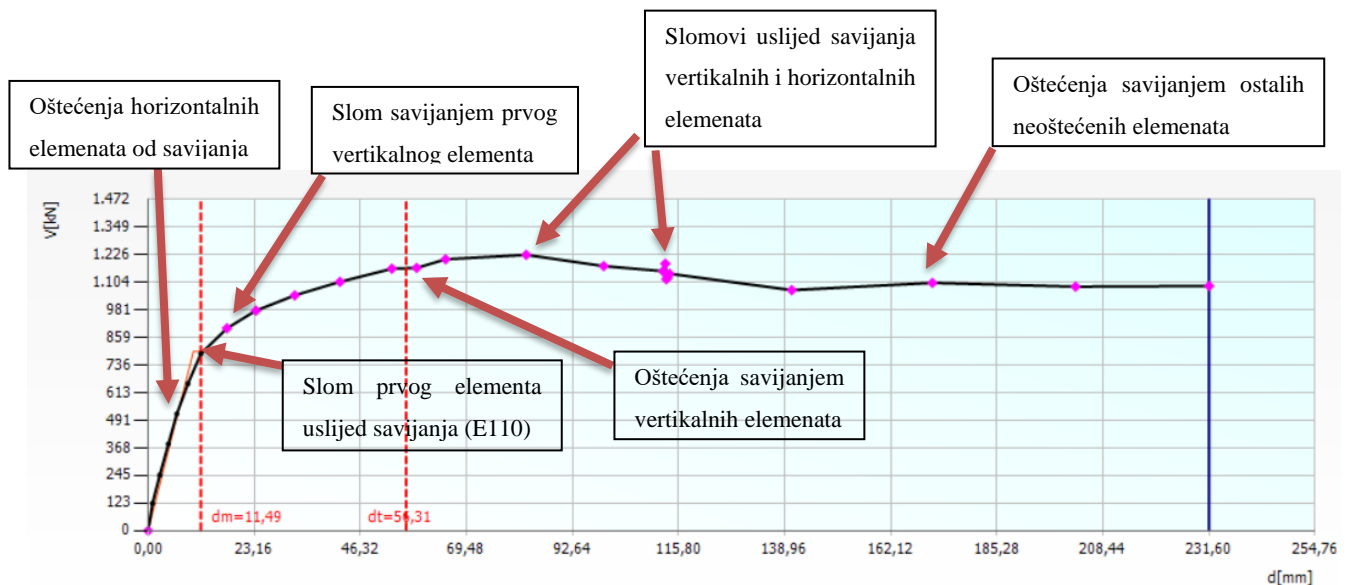
*Slika 39: krivulja kapaciteta modela 1.1. za X i Y smjer  
(V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije)*

Sagledavajući rezultate krivulja primjećujemo kako konstrukcija ima veću deformacijsku sposobnost u X smjeru. Zidovi se u X smjeru zbog mnogobrojnih otvora ponašaju kao okviri nosivi na savijanje, dok su zidovi u Y smjeru uglavnom posmični s manjim otvorima. U prikazanoj tablici na slici 39 kao mjerodavni proračun s najmanjom vrijednosti faktora ispunjenja u Y smjeru pokazao se onaj pod rednim brojem 23, a u X smjeru pod rednim brojem 12. Sudeći po rezultatima konstrukcija ima veću otpornost u X smjeru s 21,1% sposobnosti izdržljivosti vršnog ubrzanja tla za povratni period od 475 godina, s obzirom na slabiju otpornost u Y smjeru s 19,1%. Promatrati će se unutarnji nosivi zid P5, označen na slici 39, u X smjeru za mjerodavni proračun pod rednim brojem 12. Prema rezultatima krivulje kapaciteta prikazane za promatran proračun cijele konstrukcije (slika 42) možemo primijetiti kako se povećanjem pomaka konstrukcije, odnosno povećanjem deformacije krivulja izravnava što označava prelazak u nelinearno ponašanje konstrukcije.

Pomak pri slomu prvog konstrukcijskog elementa označen je crvenom crtkanom vertikalnom linijom i oznakom  $d_m$  i iznosi 11,49 mm za granično stanje blizu rušenja, a vertikalna sila pri tom pomaku iznosi 787 kN. Svaka ružičasta točka na krivulji označava iznos pomaka i veličinu sile pri kojoj se taj pomak dogodio. Nagli pad krivulje kapaciteta prikazuje otkazivanje pojedinih elemenata zidova, a krajnji pad krivulje otkazivanje cijele konstrukcije te time i kraj proračuna.

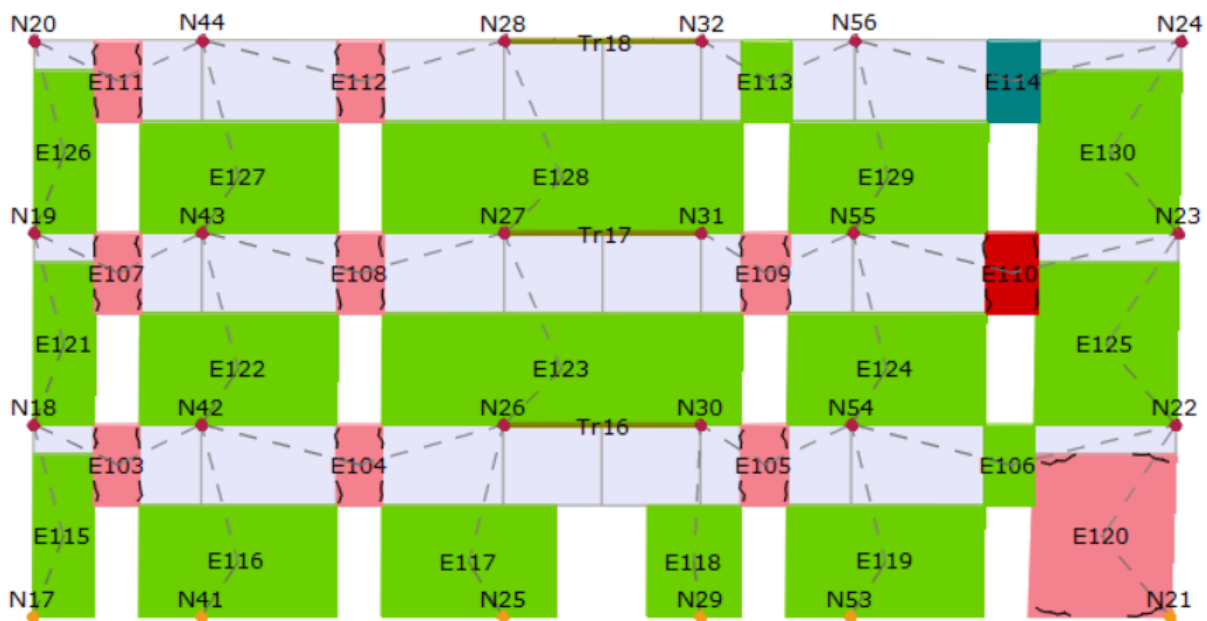


Slika 40: Prikaz promatranog zida i kontrolne točke konstrukcije



Slika 41: krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja)

Na slici 41 prikazan je promatrani zid u kojem se dogodio slom prvog elementa konstrukcije. Slom se dogodio uslijed savijanja i odgovara pomaku od 8,62 mm za granično stanje znatnog oštećenja. Već se u početnim koracima proračuna može vidjeti pojavljivanje oštećenja uslijed savijanja u horizontalnim elementima, no proračun se i dalje nastavlja jer se oštećenja tih elemenata mogu smatrati prihvatljivima. Na slici 43 prikazan je zid uslijed otkazivanja prvog kritičnog elementa gdje je većina horizontalnih elemenata (eng. spandrels) već doživjela oštećenje od savijanja. Prema zadanim uvjetima proračun bi se trebao odvijati do sloma prvog elementa, no 3Muri program nastavlja proračun do potpunog gubitka nosivosti zidova obzirom na smjer protezanja zidova. Rezultati krivulje kapaciteta prikazuju, prema zadanim uvjetima, maksimalni pomak konstrukcije pri slomu prvog kritičnog elementa  $d_m$  te ciljani, tj. zahtijevani pomak konstrukcije  $d_t$ . Omjerom tih dviju vrijednosti  $\frac{d_m}{d_t}$  dobiva se vrijednost manja od 1 što označava kako konstrukcija nije zadovoljila uvjete proračuna. Bez obzira što se proračun odvija do potpunog sloma, na grafu je označen pomak pri slomu prvog elementa što nam omogućuje poznavanje tih vrijednosti.



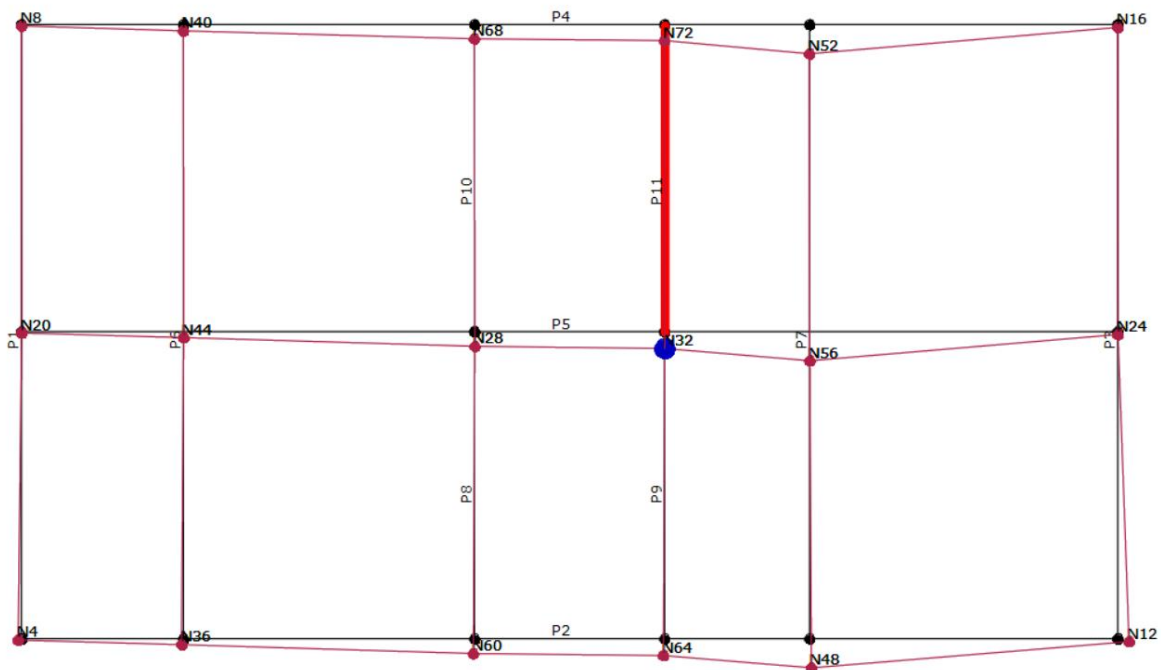
*Slika 42: Oštećenja i slom elemenata promatranog zida za mjerodavni proračun za trenutak sloma prvog elementa u X smjeru*

Za Y smjer promatrat će se ponašanje zida P11 u kojem se dogodio slom prvog konstrukcijskog elementa unutar nosivog zida (Slika 44). Zid P11 doživio je oštećenja uslijed savijanja u većini svojih vertikalnih elemenata. Već pri samom početku proračuna pojavila su se oštećenja

savijanjem u najgornjem elementu nosivog zida, napredovanjem proračuna oštećuju se i ostali elementi zida, a slom prethodno oštećenog horizontalnog elementa na trećem katu dogodio se pri pomaku zida od 8,36 mm i poprečnoj sili od 1432 kN, no obzirom da je mjerodavnije promatrati slom kritičnijih elemenata važnije funkcije unutar konstrukcije, za slom prvog elementa promatrati će se slom vezne grede u prizemlju konstrukcije. Taj slom dogodio se pri pomaku od 31,13 mm i ukupnoj potresnoj sili od 1797 kN. Novim rezultatima dobiva se i nova vrijednost faktora ispunjenja za granično stanje blizu rušenja (BR). Proračun nove vrijednosti povezan je s postupkom određivanja ciljanog pomaka prema EN 1998-1 objašnjenog u poglavlju 6.1.1. ovog rada. Za vrijednost  $T^* > T_C$  vrijedi jednakost pomaka  $d_t^* = d_{et}^*$ , prema čemu se faktor ispunjenja dobiva omjerom pomaka prvog konstrukcijskog elementa ( $d_{et2} = 31,13$  mm) s pomakom u trenutku sloma prvog elementa danog prema krivulji kapaciteta ( $d_{et1} = 6,9$  mm) i to sve pomnoženo s faktorom ispunjenja NC danog u tablici sa slike 39 ( $\alpha_1 = 0,191$ ). Prema tome, faktor ispunjenja glasi:

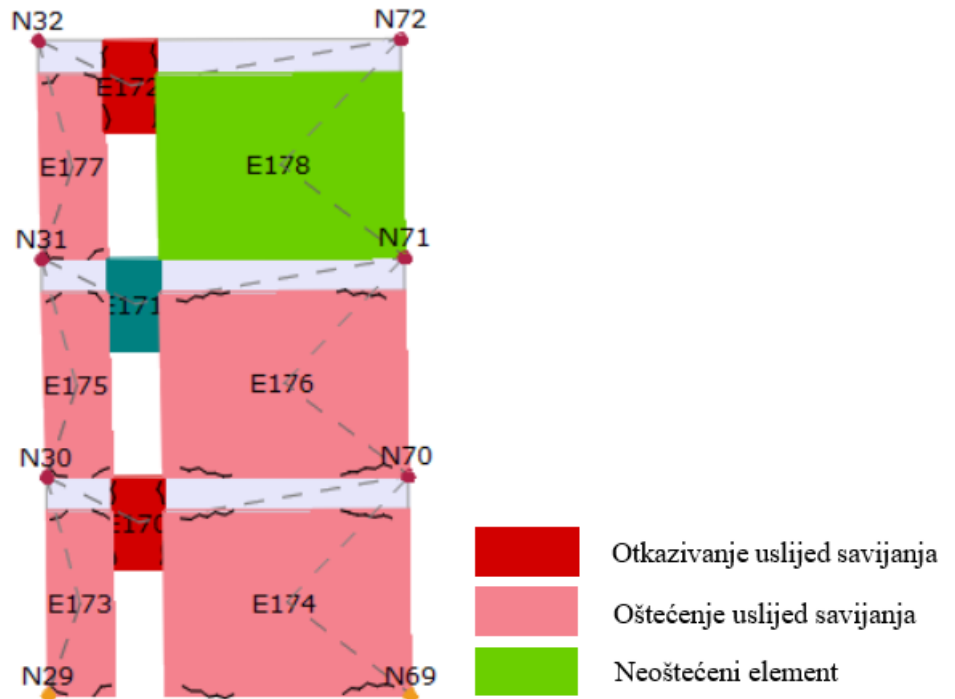
$$\alpha_2 = \frac{d_{et2}}{d_{et1}} * \alpha_1 = \frac{31,13}{6,9} * 0,191 = 0,86 \quad (44)$$

Svaki negativni pad krivulje kapaciteta označava slom pojedinog elementa zida, no krivulja kapaciteta zajednička je za sve zidove Y smjera tako da se neki podaci na krivulji ne odnose samo na promatrani zid, ali će biti spomenuti na prikazu krivulje kapaciteta (Slika 46).

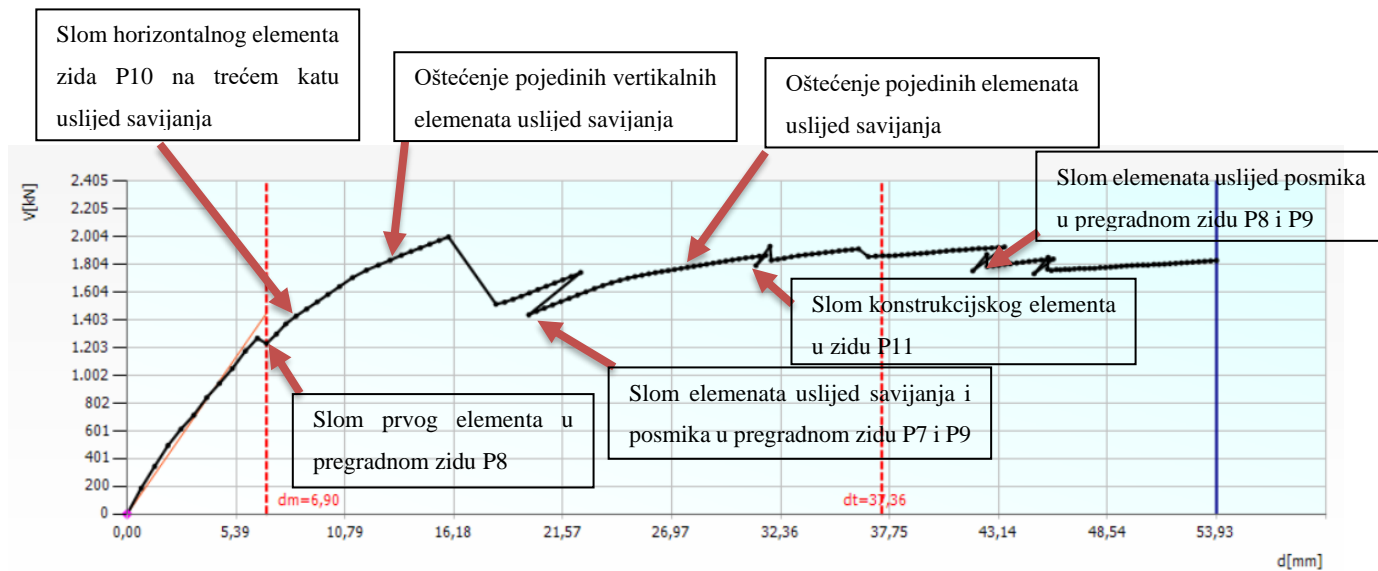


Slika 43: Promatrani zid P11 u Y smjeru





Slika 44: Prikaz sloma prvog elementa nosivog zida Y smjera



Slika 45: Krivulja kapaciteta za promatrani zid u Y smjeru

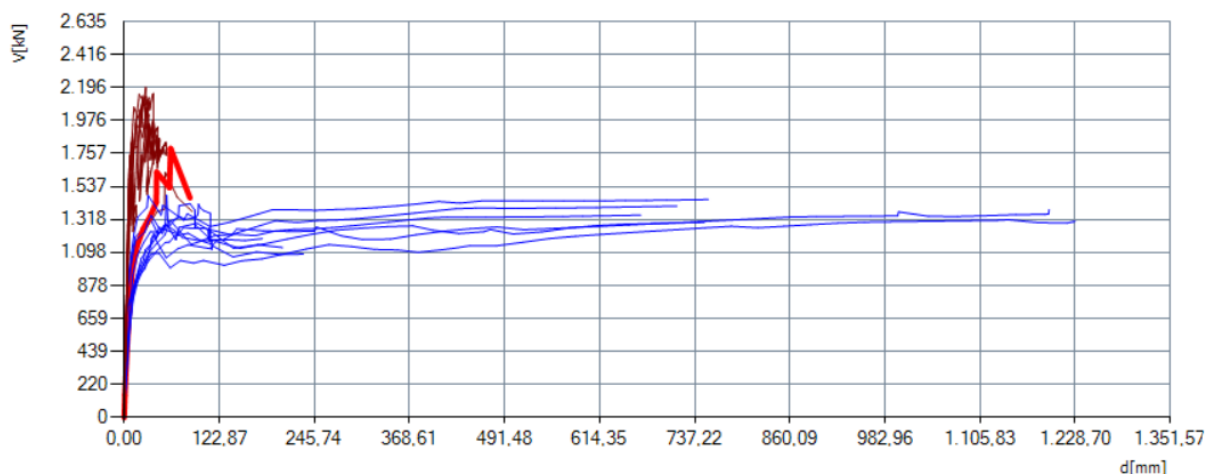
### 7.6.1.2. Model 1.2. – globalni slom konstrukcije

U ovom slučaju prikazati će se analiza zgrade za metodu prema Turnšek Čačoviću i proračun dok sila ne padne ispod 80% maksimalne sile. Provedba ovog proračuna izvodi se za sljedeće proračunske parametre dviju najkritičnijih provjera: period titranja  $T^* = 0,881$  s, sila pri popuštanju  $F_y = 1659$  kN, pomak pri popuštanju  $d_y^* = 32,42$  mm te maksimalni pomak  $d_m^* = 84,49$  mm za X smjer, dok za smjer Y parametri glase:  $T^* = 0,358$  s, sila pri popuštanju  $F_y = 1461$  kN, pomak pri popuštanju  $d_y^* = 5,38$  mm te maksimalni pomak  $d_m^* = 7,82$  mm.

Nakon provedenog proračuna tablično se prikazuju vrijednosti faktora (Slika 47) ispunjenja kao i krivulja kapaciteta cijele zgrade za mjerodavni proračun u oba smjera (Slika 48).

No.	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	$\alpha$ NC	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL	dm/dt NC
1	+X	Uniform	0,00	1,417	1,597	1,106	1,417
2	+X	Static forces	0,00	3,150	3,550	0,945	3,150
3	-X	Uniform	0,00	16,618	18,726	0,701	16,616
4	-X	Static forces	0,00	17,215	19,398	1,090	17,216
5	+Y	Uniform	0,00	0,352	0,406	0,660	0,336
6	+Y	Static forces	0,00	0,483	0,546	0,603	0,481
7	-Y	Uniform	0,00	1,271	1,436	0,755	1,273
8	-Y	Static forces	0,00	1,308	1,474	0,887	1,308
9	+X	Uniform	630,00	1,241	1,399	1,397	1,241
10	+X	Uniform	-630,00	3,175	3,578	0,856	3,175
11	+X	Static forces	630,00	1,603	1,806	1,131	1,603
12	+X	Static forces	-630,00	3,562	4,014	0,892	3,563
13	-X	Uniform	630,00	17,682	19,925	0,733	17,681
14	-X	Uniform	-630,00	15,748	17,745	0,667	15,748
15	-X	Static forces	630,00	12,171	13,715	0,926	12,170
16	-X	Static forces	-630,00	18,413	20,749	0,981	18,413
17	+Y	Uniform	1.125,00	0,427	0,490	0,655	0,413
18	+Y	Uniform	-1.125,00	0,305	0,352	0,636	0,289
19	+Y	Static forces	1.125,00	0,462	0,522	0,568	0,459
20	+Y	Static forces	-1.125,00	0,417	0,472	0,530	0,415
21	-Y	Uniform	1.125,00	1,259	1,422	0,715	1,261
22	-Y	Uniform	-1.125,00	1,185	1,336	0,739	1,186
23	-Y	Static forces	1.125,00	1,352	1,523	0,845	1,352
24	-Y	Static forces	-1.125,00	1,324	1,491	0,896	1,323

Slika 46: Vrijednosti faktora ispunjenja za model 1.2.



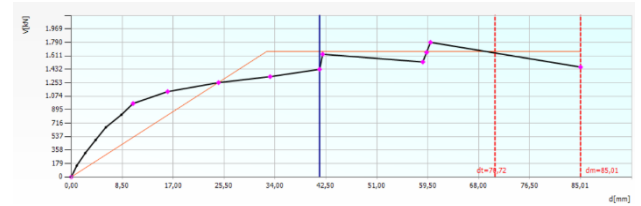
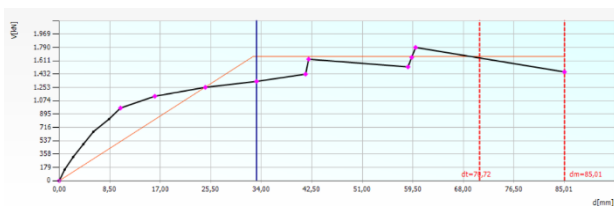
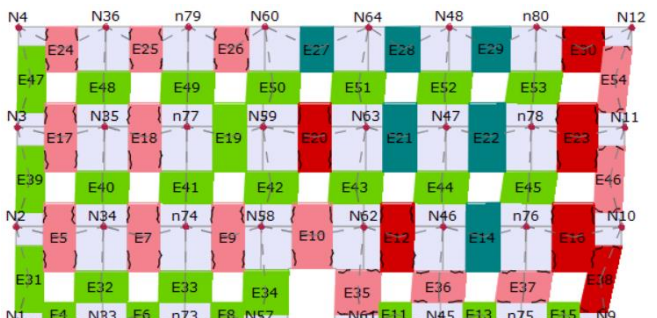
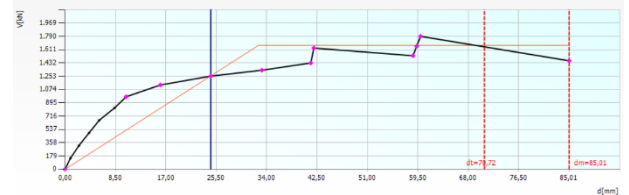
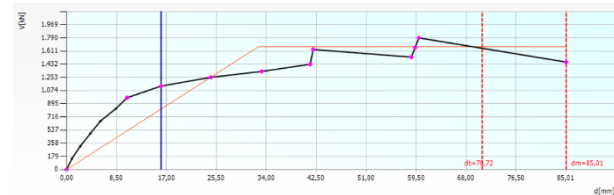
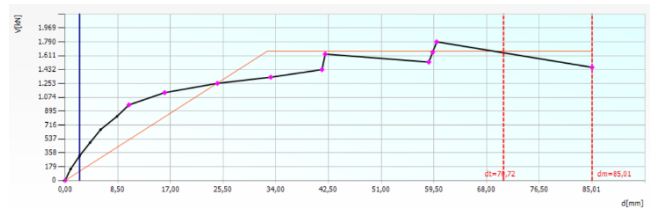
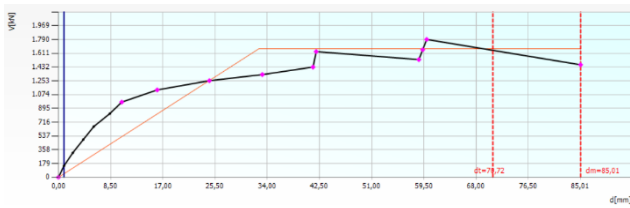
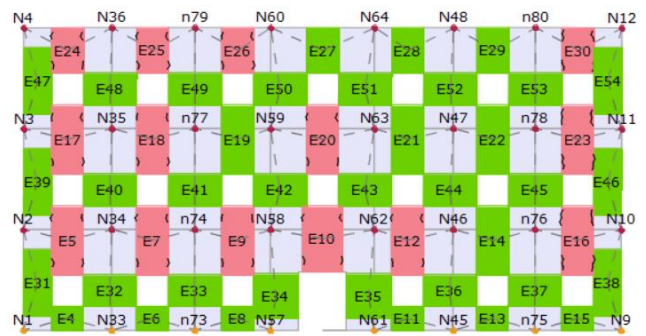
*Slika 47: krivulja kapaciteta modela 1.2. za X i Y smjer  
(V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije)*

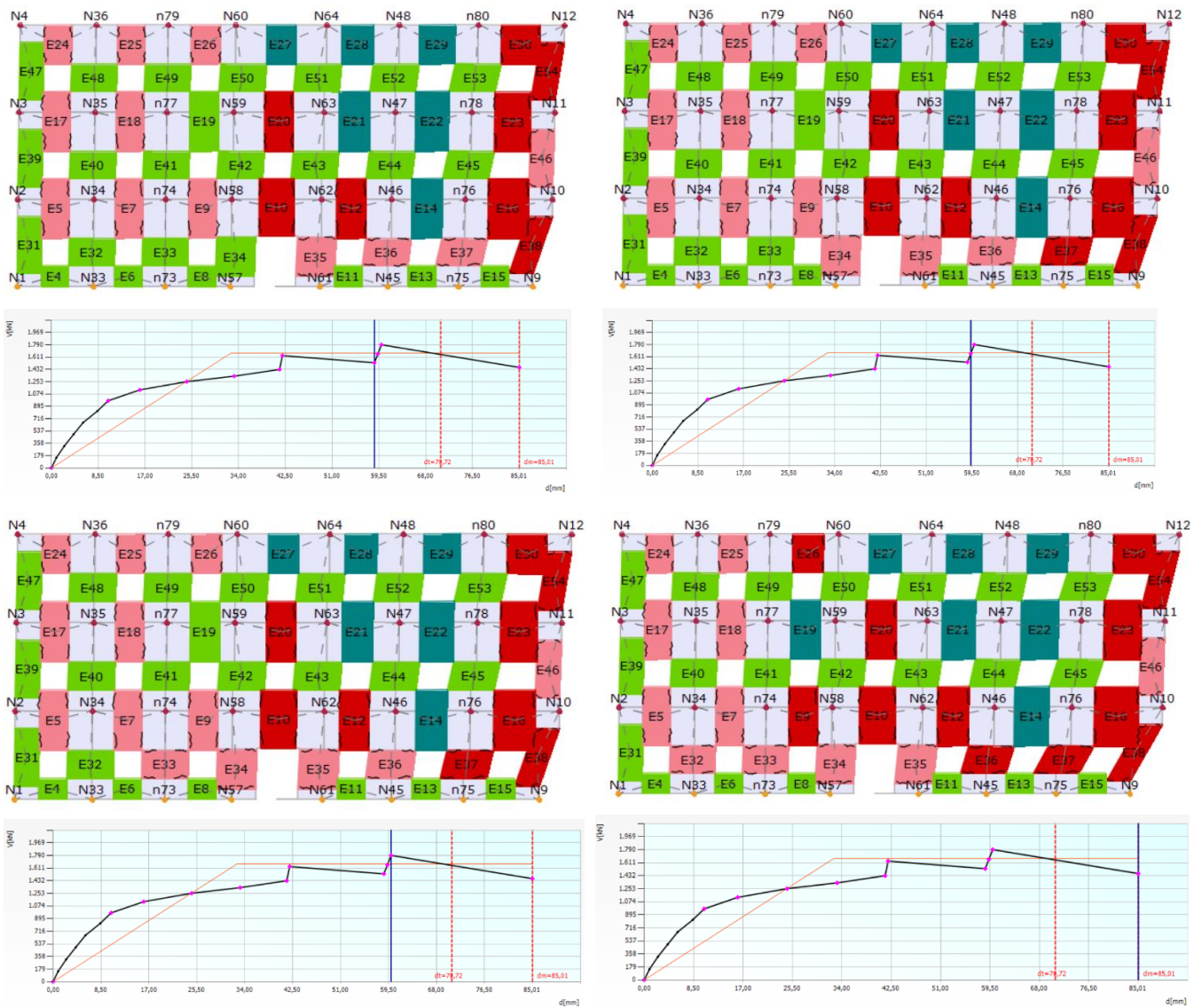
Rezultati pokazuju kako konstrukcija ima veću deformacijsku sposobnost u X smjeru, nego u Y, što nam i dokazuju rezultati faktora ispunjenja sa slike 47. Sudeći po dobivenim vrijednostima za proračun pod rednim brojem 9 konstrukcija u X smjeru ima preko 100% sposobnosti izdržljivosti za granično stanje znatnog oštećenja i granično stanje blizu rušenja što zadovoljava uvjete proračuna i označava dostatnu sposobnost konstrukcije za preuzimanje potresnih sila, no isto ne zadovoljava za granično stanje ograničenog oštećenja. Proračunom pod rednim brojem 18 konstrukcija u Y smjeru ima sposobnost izdržljivosti za granično stanje blizu rušenja od 30,5% što označava da promatrana analiza ne zadovoljava uvjete proračuna. U ovom slučaju zadano je da se proračun proteže do pada sile ispod 80% maksimalne poprečne sile.

U nastavku će se prikazati postepeni prikaz razvoja oštećenja elemenata u karakterističnom zidu s napredovanjem proračuna obzirom na pomak konstrukcije u X i Y smjeru od početka do kraja proračuna.

Analizirati će se zid pročelja P2 kao najoštećeniji u X smjeru s 42,5% oštećenih elemenata zida. Promatrati će se proračun za mjerodavnu analizu gdje se već u početnim koracima proračuna javljaju oštećenja uslijed savijanja na pojedinim elementima ( zid E24, E26, E30, E17, E18, E20, E23, E5, E7, E9, E10, E12 i E16). Napredovanjem proračuna dolazi do sloma elemenata E30 i E23 savijanjem pri pomaku od 24,58 mm i sili  $V = 1254$  kN. Većina horizontalnih elemenata (eng. spandrel) tijekom proračuna otkazala je ili je oštećena uslijed savijanja, dok su vertikalni elementi pretrpjeli oštećenja nešto kasnije.

Prvo oštećenje vertikalnog elementa (eng. pier) u zidu P2 dogodio se za pomak od 33,19 mm i silu  $V = 1334$  kN uslijed savijanja (E38).





Slika 48: Razvoj oštećenja u karakterističnom zidu od početka do kraja proračuna

Oštećenja i slom pojedinih elemenata označava se pomoću različite palete boja, gdje svaka boja označava uzrok oštećenja ili sloma, odnosno stanje zidnog elementa. Točno značenje pojedinih boja ovisno o vrsti oštećenja, odnosno sloma glasi:

- Otkazivanje uslijed savijanja
- Oštećenje uslijed savijanja
- Neoštećeni element

### **7.6.2. Model 2**

Model 2 odnosi se na građevinu u kojoj pregradni zidovi ne utječu na nosivost u potresu. Takav model u programskom paketu definirat će se brisanjem svih pregradnih zidova, ostavljajući tako u poprečnom smjeru samo nosive zidove stubišta i zabatne zidove konstrukcije. Međukatna konstrukcija i dalje ostaje jednaka kao i karakteristike materijala zidova. Ponovno se provodi proračun na ekvivalentnom sustavu s jednim stupnjem slobode za slom prvog elementa i pad sile ispod 80% maksimalne sile i to sve za metodu Turnšek Čačović. Promatrati će se ponašanje konstrukcije bez utjecaja pregradnih zidova na njenu nosivost uslijed djelovanja potresnog opterećenja. Rezultati dobiveni provedbom proračuna analizirati će se i usporediti s prethodnim modelom.

#### **7.6.2.1. Model 2.1. – globalno otkazivanje konstrukcije**

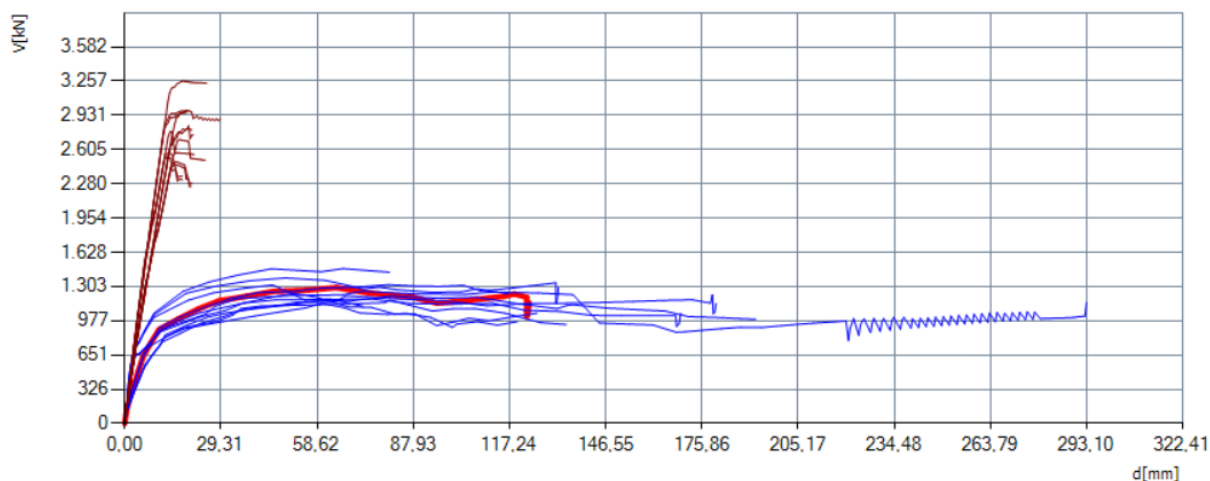
U prethodnim smo se poglavljima već upoznali s proračunom do maksimalnog pomaka konstrukcije, odnosno dostizanjem najveće sposobnosti pomaka pri kojem poprečna sila u podnožju padne ispod 80% maksimalne otpornosti konstrukcije. Takva vrsta proračuna predstavlja znatno blaže uvjete proračuna obzirom na uvjet prestanka proračuna slomom prvog elementa. Dozvoljava konstrukciji zadovoljavajuće ispunjenje uvjeta nosivosti bez obzira na prethodne slomove konstruktivnih elemenata zida, no prikazuje ponašanje konstrukcije do potpunog kolapsa i gubitka nosivosti iz čega se поближе mogu analizirati potresno posljedični slučajevi zidnih elemenata. Proračunski parametri promatranog nosivog zida u X smjeru jesu sljedeći: period titranja  $T^* = 0,643$  s, sila pri popuštanju  $F_y = 834$  kN, pomak pri popuštanju  $d_y^* = 9,81$  mm te maksimalni pomak  $d_m^* = 9,81$  mm. Na slici 50 tablično su prikazani faktori ispunjenja za model bez pregradnih zidova za svaku analizu i za sva granična stanja.

No.	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	$\alpha$ NC	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL	dm/dt NC
1	+X	Uniform	0,00	2,270	2,558	0,802	2,270
2	+X	Static forces	0,00	2,861	3,224	0,793	2,861
3	-X	Uniform	0,00	2,685	3,025	0,693	2,684
4	-X	Static forces	0,00	3,559	4,010	0,744	3,559
5	+Y	Uniform	0,00	0,585	0,665	0,977	0,577
6	+Y	Static forces	0,00	0,589	0,663	1,044	0,589
7	-Y	Uniform	0,00	0,720	0,823	1,193	0,711
8	-Y	Static forces	0,00	0,726	0,818	1,096	0,726
9	+X	Uniform	630,00	2,376	2,677	0,862	2,376
10	+X	Uniform	-630,00	2,389	2,692	0,723	2,389
11	+X	Static forces	630,00	2,615	2,947	0,974	2,615
12	+X	Static forces	-630,00	2,015	2,270	0,755	2,015
13	-X	Uniform	630,00	1,800	2,029	0,778	1,800
14	-X	Uniform	-630,00	1,691	1,906	0,641	1,691
15	-X	Static forces	630,00	5,349	6,028	0,815	5,350
16	-X	Static forces	-630,00	2,220	2,502	0,808	2,220
17	+Y	Uniform	1.125,00	0,503	0,576	0,894	0,492
18	+Y	Uniform	-1.125,00	0,492	0,561	0,926	0,482
19	+Y	Static forces	1.125,00	0,498	0,561	0,921	0,498
20	+Y	Static forces	-1.125,00	0,503	0,567	0,938	0,503
21	-Y	Uniform	1.125,00	0,548	0,628	1,082	0,534
22	-Y	Uniform	-1.125,00	0,557	0,638	1,090	0,543
23	-Y	Static forces	1.125,00	0,521	0,588	1,039	0,521
24	-Y	Static forces	-1.125,00	0,512	0,577	1,043	0,512

Slika 49: Faktori ispunjenja modela 2.1. bez utjecaja pregradnih zidova

U prethodno prikazanoj tablici mjerodavni proračun u Y smjeru pokazao se pod rednim brojem 18 s jednolikom raspodjelom opterećenja, dok se kao mjerodavan u X smjeru pokazao proračun 14 također s jednolikom raspodjelom opterećenja. U ovom slučaju konstrukcija je ostala nepromijenjena u uzdužnom smjeru te taj smjer ima veću otpornost s više od 100% sposobnosti izdržljivosti vršnog ubrzanja tla za granično stanje blizu rušenja i znatnog oštećenja što zadovoljava zadane uvjete proračuna. Y smjer ima sposobnost izdržljivosti 47,6% za granično stanje blizu rušenja, 54,2% za granično stanje znatnog oštećenja i 64,2% za granično stanje ograničenog oštećenja. Kao mjerodavan, promatra se ponovno zid P2 u X smjeru s najviše pretrpljenih oštećenja.

Prema danim krivuljama kapaciteta prikazanih na zajedničkom dijagramu, uočavamo kako se i u ovom slučaju X i Y smjer ne deformiraju podjednako.



Slika 50: Krivulja kapaciteta modela 2 za X i Y smjer  
(V -poprečna sila, d - pomak konstrukcije)

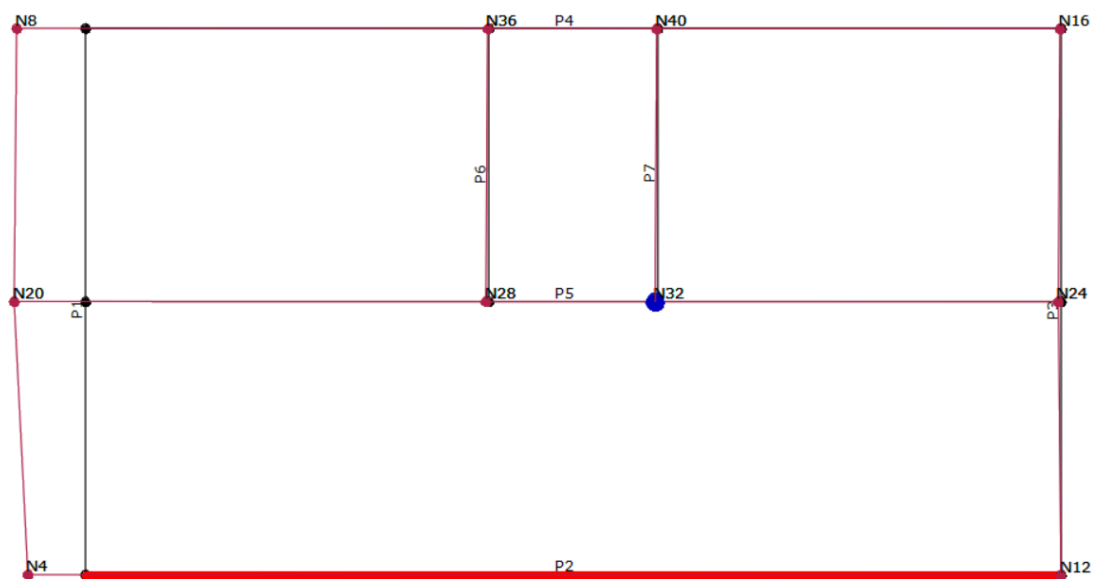
Na sljedećim slikama prikazani su promatrani mjerodavni zidovi u X i Y smjeru koji su pretrpjeli najviše oštećenja, kao i krivulja kapaciteta koja prikazuje pomak pri slomu svakog pojedinog elementa za granično stanje blizu rušenja. Promatrati će se zidovi P2 u X smjeru i P6 u Y smjeru

Wall	Insert in report	Masonry % Wall	Masonry % Building
2	<input type="checkbox"/>	61,5	15,4
4	<input type="checkbox"/>	26,8	6,5
5	<input type="checkbox"/>	14,6	2,8
1	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
3	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
6	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
7	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0

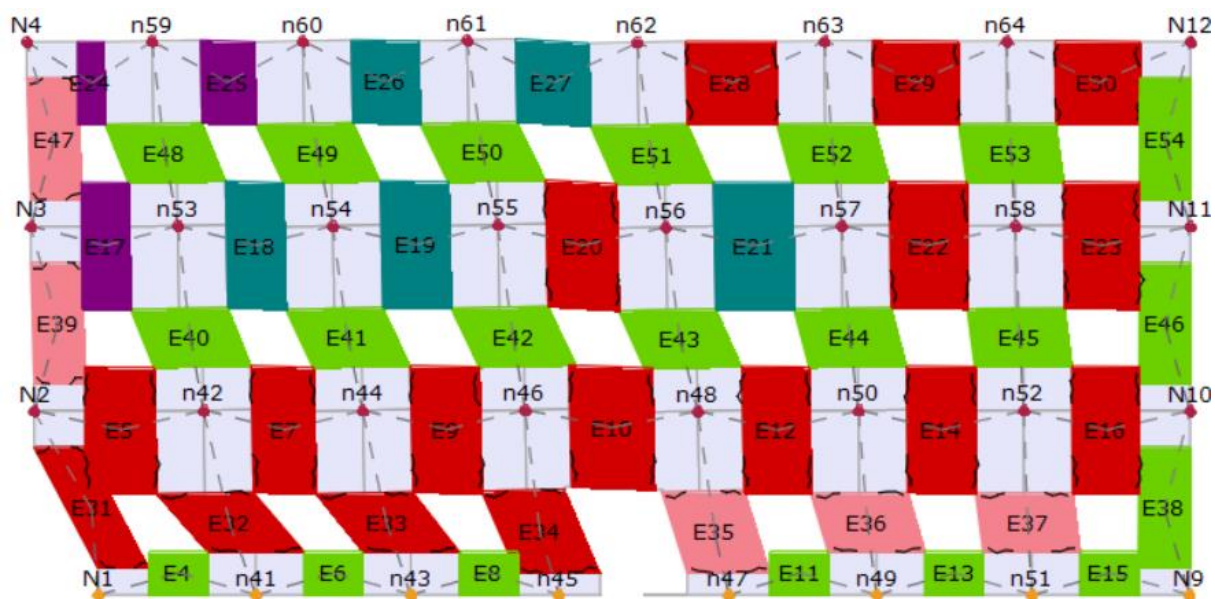
Wall	Insert in report	Masonry % Wall	Masonry % Building
6	<input type="checkbox"/>	20,3	1,1
7	<input type="checkbox"/>	20,3	1,1
1	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
2	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
3	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
4	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0
5	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0

Slika 51: Postotak oštećenih elemenata pojedinog zida u X smjeru (lijevo) i Y smjeru (desno)

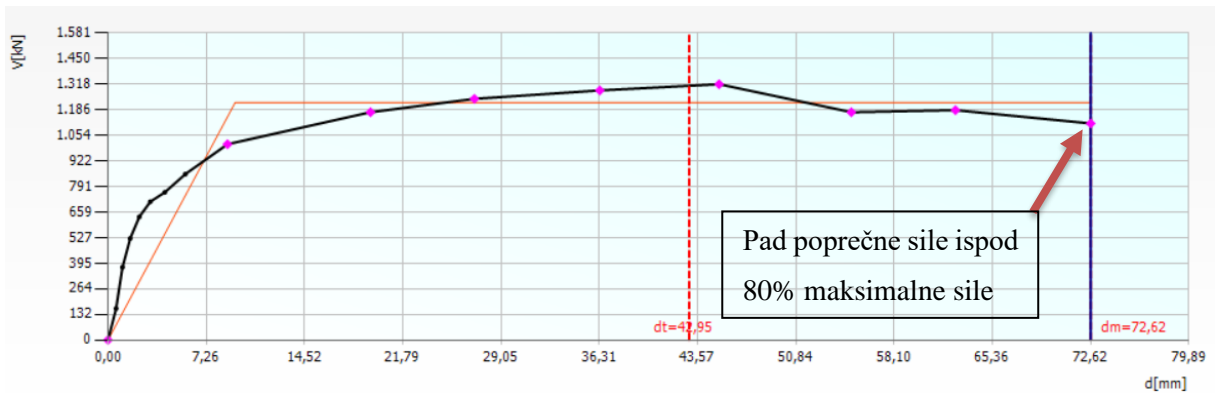




Slika 52: Tlocrt zidova s označenim promatranim zidom u X smjeru



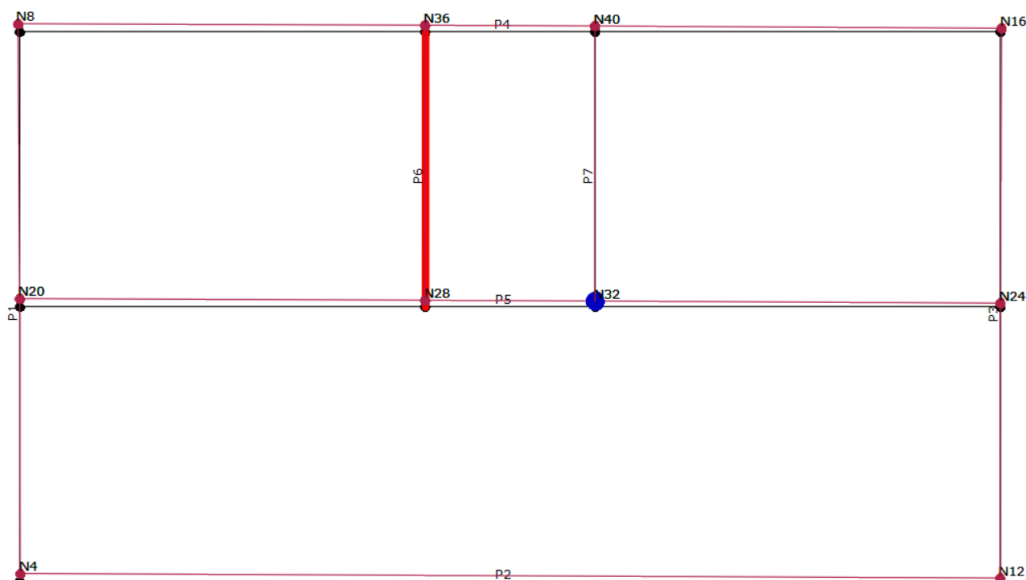
Slika 53: Oštećenja i slojevi pojedinih elemenata u karakterističnom zidu X smjera



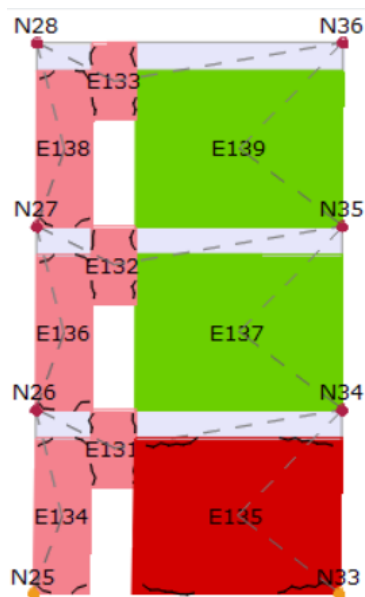
Slika 54: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja)

Početni prirast krivulje označava oštećenja pojedinih horizontalnih elemenata zida zbog savijanja, napretkom proračuna prvi slom savijanjem dogodio se u zidovima E30 i E17, a napretkom porasta poprečne sile i pomaka konstrukcije pucanje prethodno oštećenih elemenata. Nakon što je konstrukcija dosegla ciljani pomak  $d_t = 42,95$  mm u prizemlju promatranog zida pojavile su se nestabilnosti u prizemlju što se na grafu očituje naglim padom krivulje. Daljnjim razvojem proračuna konstrukcija doživljava sve veće pomake sve do maksimalno dosegnutog pomaka  $d_m = 72,62$  mm. Razlomkom tih dviju vrijednosti dobiva se vrijednost veća od 1 i time proračun zadovoljava.

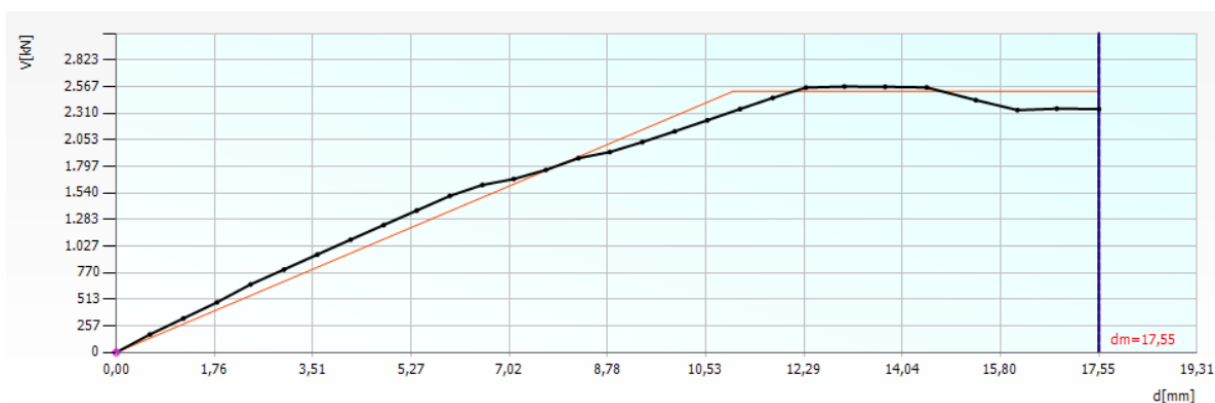
Proračunski parametri promatranog nosivog zida u Y smjeru jesu sljedeći: period titranja  $T^* = 0,379$  s, sila pri popuštanju  $F_y = 2266$  kN, pomak pri popuštanju  $d_y^* = 10,04$  mm te maksimalni pomak  $d_m^* = 11,66$  mm.



Slika 55: Tlocrt zidova s označenim promatranim zidom u Y smjeru



Slika 56: Oštećenja i slom elementa prizemlja u karakterističnom zidu Y smjera



Slika 57: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u Y smjeru  
(granično stanje blizu rušenja)

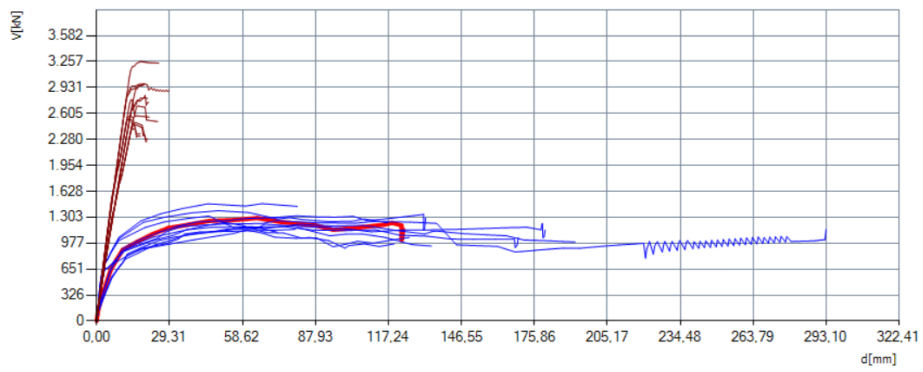
Linearni prirast krivulje kapaciteta označava razvoj oštećenja horizontalnih i vertikalnih elemenata promatranog zida, dok se naglim padom krivulje označava slom vertikalnog elementa prizemlja pri pomaku od 15,35 mm te oštećenja do sada neoštećenih elemenata. Krajnji pomak konstrukcije u Y smjeru iznosi  $d_m = 17,55$  mm. U ovom slučaju na krivulji se ne vidi zahtijevani pomak konstrukcije  $d_t$  iz razloga što on u poprečnom smjeru nije dosegnut.

### 7.6.2.2. Model 2.2. – slom prvog elementa

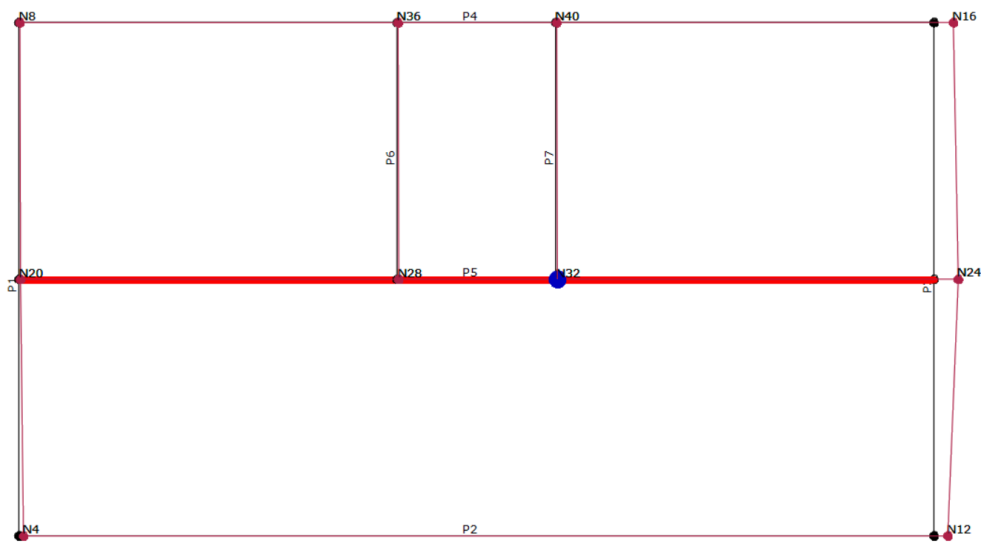
U sljedećim prikazima predočiti će se rezultati proračuna modela bez pregradnih zidova za proračun do sloma prvog konstruktivnog elementa u X i Y smjeru, u sljedećoj tablici s vrijednostima faktora ispunjenja primjećuje se kako je uvjet graničnog stanja ograničenog oštećenja po prvi puta zadovoljio za zidove u Y smjeru za mjerodavni proračun.

No.	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	$\alpha$ NC	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL	dm/dt NC
1	+X	Uniform	0,00	0,341	0,385	0,563	0,341
2	+X	Static forces	0,00	0,212	0,239	0,462	0,212
3	-X	Uniform	0,00	0,467	0,526	0,583	0,467
4	-X	Static forces	0,00	0,334	0,377	0,318	0,334
5	+Y	Uniform	0,00	0,416	0,473	1,060	0,405
6	+Y	Static forces	0,00	0,479	0,540	1,108	0,479
7	-Y	Uniform	0,00	0,579	0,664	1,195	0,565
8	-Y	Static forces	0,00	0,464	0,523	1,116	0,464
9	+X	Uniform	630,00	0,236	0,266	0,485	0,236
10	+X	Uniform	-630,00	0,328	0,370	0,546	0,328
11	+X	Static forces	630,00	0,222	0,250	0,470	0,222
12	+X	Static forces	-630,00	0,203	0,229	0,455	0,204
13	-X	Uniform	630,00	0,440	0,495	0,608	0,440
14	-X	Uniform	-630,00	0,499	0,562	0,534	0,499
15	-X	Static forces	630,00	0,342	0,385	0,326	0,342
16	-X	Static forces	-630,00	0,519	0,585	0,334	0,519
17	+Y	Uniform	1.125,00	0,418	0,480	0,916	0,405
18	+Y	Uniform	-1.125,00	0,433	0,495	0,957	0,422
19	+Y	Static forces	1.125,00	0,460	0,518	0,935	0,459
20	+Y	Static forces	-1.125,00	0,466	0,526	0,954	0,467
21	-Y	Uniform	1.125,00	0,548	0,628	1,082	0,534
22	-Y	Uniform	-1.125,00	0,557	0,638	1,090	0,543
23	-Y	Static forces	1.125,00	0,447	0,504	1,041	0,447
24	-Y	Static forces	-1.125,00	0,442	0,498	1,042	0,442

Slika 58: Faktori ispunjenja modela 2.2. bez pregradnih zidova



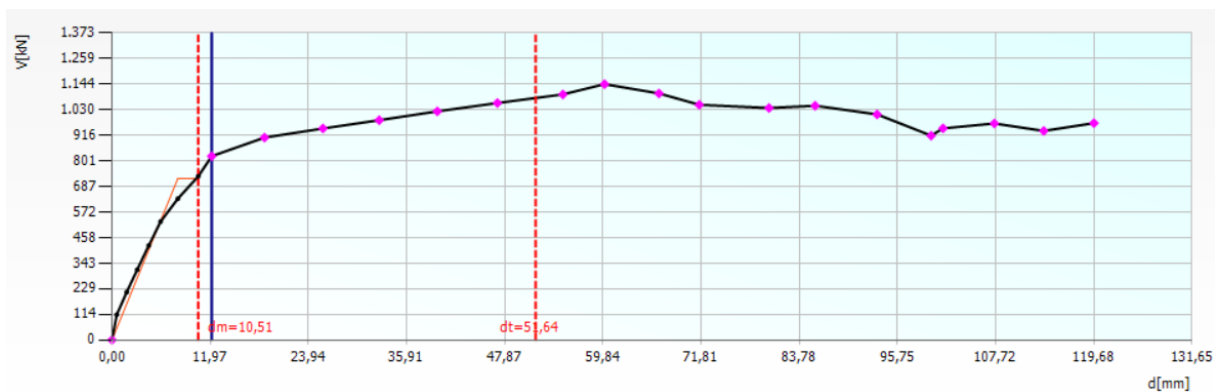
Slika 59: Krivulja kapaciteta modela 2.2. za X i Y smjer (V-poprečna sila, d-pomak konstrukcije)



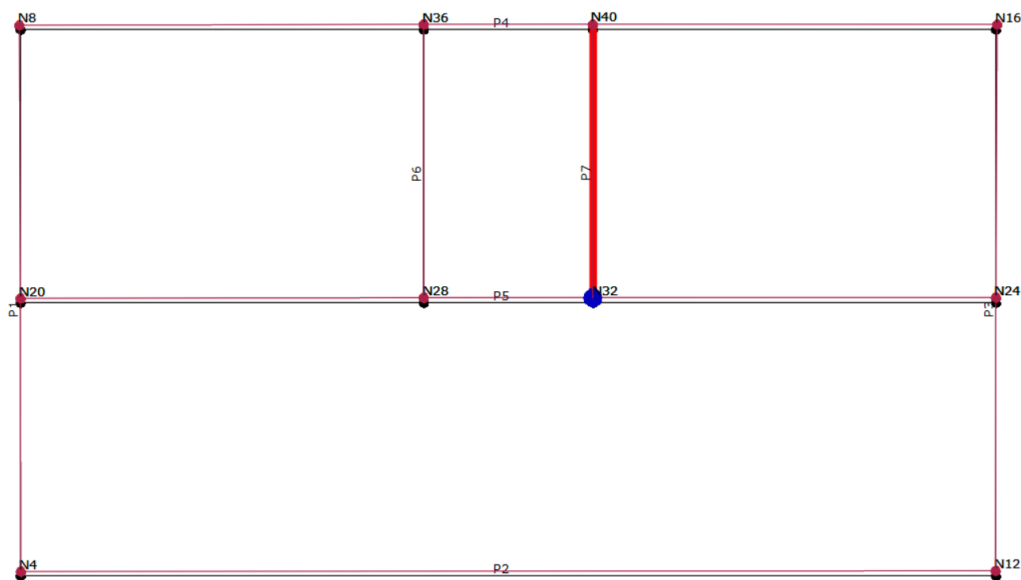
Slika 60: Tlocrt zidova s označenim zidom P5 promatranim u proračunu za X smjer



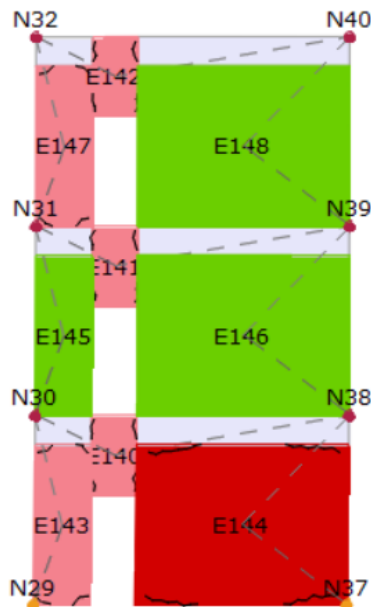
Slika 61: Oštećenja i slomovi makroelemenata u karakterističnom zidu u trenutku sloma prvog konstruktivnog elementa X smjera



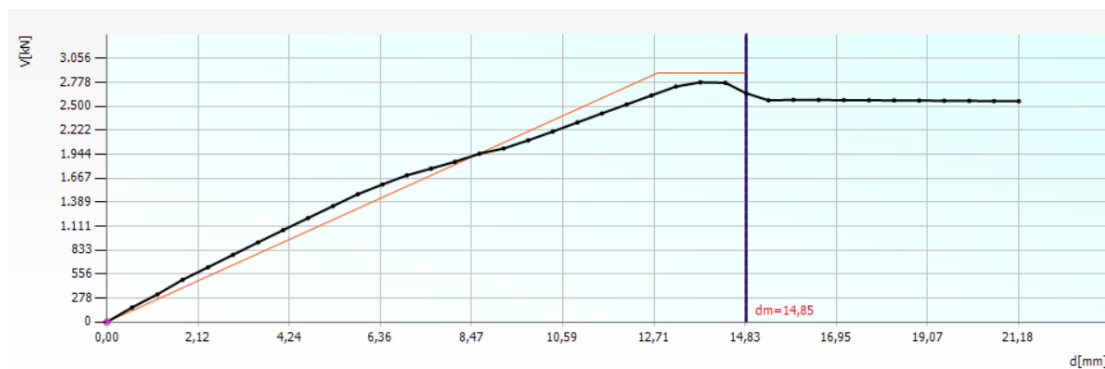
Slika 62: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u X smjeru (granično stanje blizu rušenja)



Slika 63: Tlocrt zidova s označenim zidom P7 promatranim u proračunu za Y smjer



Slika 64: Oštećenja i slomovi makroelemenata u karakterističnom zidu Y smjera



Slika 65: Krivulja kapaciteta za mjerodavni proračun u Y smjeru (granično stanje blizu rušenja)

Slom prvog konstruktivnog elementa zida u X i u Y smjeru dogodio se uslijed savijanja pri kojem je konstrukcija pretrpjela pomak od 12,16 mm u X i 14,85 mm u Y smjeru za granično stanje blizu rušenja kao što je prikazano na grafovima sa slika 63 i 66. Prvi konstruktivni elementi koji su se slomili u X smjeru jesu zid E110 i E120, a u Y smjeru je to zid E135. Svako veće izravnjanje krivulje označava oštećenje i/ili slom pojedinih elemenata zida.

Dakle, prema provedenom proračunu modela bez pregradnih zidova konstrukciji su znatno smanjena deformacijska svojstva u Y smjeru, čak skoro dva puta manje nego model s pregradnim zidovima. Veći dio vertikalnih elemenata nije otkazao pri promatranom pomaku, ali su pokazali znakove oštećenja uslijed savijanja.

Sudeći po rezultatima dalo bi se zaključiti kako je konstrukcija puno izdržljivija u smjeru Y, to nam dodatno dokazuje i veći pomak koji je konstrukcija pretrpjela do sloma prvog elementa u smjeru Y od čak 11,14 mm, dok je u smjeru X pretrpjela pomak od 7,88 mm za granično stanje znatnog oštećenja koje odgovara povratnom periodu od 475 godina. Slom prvog konstruktivnog elementa zida dogodio se u prizemlju i na drugom katu istovremeno u X smjeru, dok se u Y smjeru prvi slomio element prizemlja, dok su elementi viših katova u tom trenutku ostali neoštećeni ili s blagim oštećenjima.



### 7.6.2.3. *Usporedba modela 1 i modela 2*

Prema dobivenim rezultatima provedenih proračuna zaključujemo kako je sigurnije i mjerodavnije promatrati i analizirati podatke dobivene za konzervativniji uvjet sloma prvog elementa. Proračun prema uvjetu globalnog sloma konstrukcije predstavlja blaže kriterije koji dopuštaju prevelike pomake i mnogobrojna oštećenja i slomove elemenata prije nego se konstrukcija proglasi kritičnom, što svakako ne želimo kao mjerodavne rezultate. Za oba modela, konstrukcija je za granično stanje blizu rušenja zadovoljila uvjet proračuna samo u proračunima za 80% maksimalne sile u X smjeru, no ne i za Y smjer gdje je konstrukcija zadovoljila samo u modelu bez pregradnih zidova za slom prvog elementa i granično stanje ograničenog oštećenja, što i čini jedini slučaj zadovoljenja tog uvjeta. Model 1.1. nije zadovoljio ni u jednom proračunu ni jednog graničnog stanja, a najnepovoljnija analiza u kojoj je konstrukcija imala sposobnost izdržati samo 19,1% vršnog ubrzanja tla jest proračun za Y smjer, iako ni najnepovoljniji proračun u X smjeru nije bio nešto puno većih sposobnosti. Konstrukcija se u modelu 1.1. pokazala nešto slabijom u smjeru Y, no gledajući slom prvog konstruktivnog elementa ona je pretrpjela znatno veći pomak u odnosu na zidove u X smjeru. Pa tako slijedi da je pomak pri slomu prvog kritičnog elementa u X smjeru iznosio 11,49 mm, a pomak kritičnog elementa u Y smjeru 31,13 mm. Što znatno mijenja vrijednosnu situaciju faktora ispunjenja u Y smjeru konstrukcije, povećavši ga s 0,191 na 0,86 i time uvelike poboljšati sposobnost izdržljivosti konstrukcije. Najnepovoljnija analiza modela 2.2. bila je ona u kojoj je konstrukcija imala sposobnost izdržati čak 20,3% projektiranog vršnog ubrzanja tla za granično stanje blizu rušenja. Konstrukcija se u ovom modelu pokazala znatno otpornijom u Y smjeru s 41,6% sposobnosti izdržljivosti vršnog ubrzanja, što čini Y smjer dva puta jačim. Pomak pri prvom slomu elementa zida smjera X iznosio je 12,16 mm, a za smjer Y 14,85 mm što ponovno drži Y smjer konstrukcije u prednosti. Iznos poprečne sile pri kojem se dogodio slom prvog elementa za granično stanje blizu rušenja kod modela 1.1. za X smjer iznosi 787 kN, a za smjer Y 1797 kN, dok su se kod modela 2.2. te vrijednosti povećale te za X smjer maksimalna poprečna sila iznosi 822 kN, a za Y smjer 2650 kN. Usporedbom ova dva modela, dolazimo do zaključka kako se za provjeru sposobnosti nosivosti do sloma prvog elementa konstrukcija bez pregradnih zidova pokazala dvostruko lošijom od konstrukcije s pregradnim zidovima. Takav rezultat, bitan je dokaz veličine utjecaja pregradnih zidova na cjelokupnu nosivost konstrukcije. Konstrukcija je u slučaju modela s pregradnim zidovima uspjela izdržati dva puta veći pomak, prije pojave nestabilnosti, od modela bez pregradnih zidova. Rezultati

dobiveni proračunom za potresnu otpornost konstrukcije sa pregradnim zidovima (PZ) i bez pregradnih zidova (BPZ) dati su u sljedećim tablicama:

*Tablica 23: Rezultati proračuna u programu 3Muri za uvjet sloma prvog kritičnog elementa*

SLOM PRVOG KRITIČNOG ELEMENTA					
Model	Smjer	Analiza	Faktor ispunjenja (granično stanje blizu rušenja) $\alpha$	Zahtjevani pomak $d_t$ [mm]	Dosegnuti pomak konstrukcije $d_m$ [mm]
Model 1.1 (PZ)	X	12	0,211	54,31	11,49
	Y	23	0,86	37,36	31,13
Model 2.2 (BPZ)	X	12	0,203	51,64	12,16
	Y	5	0,416	36,64	14,85

*Tablica 24: Rezultati proračuna u programu 3Muri za uvjet globalnog otkazivanja konstrukcije*

GLOBALNO OTKAZIVANJE KONSTRUKCIJE					
Model	Smjer	Analiza	Faktor ispunjenja (granično stanje blizu rušenja) $\alpha$	Zahtjevani pomak $d_t$ [mm]	Dosegnuti pomak konstrukcije $d_m$ [mm]
Model 1.2 (PZ)	X	9	1,241	68,48	85,01
	Y	18	0,305	31,14	9
Model 2.1 (BPZ)	X	14	1,691	42,95	72,62
	Y	18	0,492	36,4	17,55

## 8. ZAKLJUČAK

Osvrnuvši se na ovaj rad, pružen je detaljan uvid u odziv tradicionalne zidane zgrade grada Rijeke na potresno djelovanje. Proveden je teorijski pregled od povijesti zidanih konstrukcija, klasične geometrije tipskih zgrada, općenitog ponašanja konstrukcija uslijed potresa pa do definiranja samih mehaničkih karakteristika ziđa. S obzirom da pregled i ispitivanja na samoj građevini nisu bila moguća, određivanje adekvatnih svojstva materijala starog ziđa zahtijevalo je opsežno i detaljno istraživanje literature kako bi se iz povjerljivih izvora usvojili odgovarajući parametri. Konačnim usvajanjem geometrijskih i mehaničkih karakteristika podvrgnulo se ka dobivanju rezultata određenih zadatkom ovog rada. Cilj ovog rada bio je kvalitetnom usporedbom dvaju modela iste tipske zgrade prikazati kako zapravo pregradni zidovi utječu na potresnu otpornost konstrukcije te prikazati komparaciju rezultata dvaju modela u programskom paketu 3Muri. Rezultati modela s i bez doprinosa pregradnih zidova analizirani su kroz faktore ispunjenja konstrukcije koji se nadovezuju na sposobnost izdržljivosti konstrukcije uslijed potresa. Obzirom da se proračun temelji na nelinearnom statičkom proračunu postupnog guranja koji se pak temelji na pomacima, dane su vrijednosti zahtijevanog pomaka kao i dosegnutog pomaka konstrukcije definiranih uvjetom proračuna. Poznata su dva uvjeta proračuna: pomak pri slomu prvog elementa te pomak pri globalnom otkazivanju konstrukcije. Analizirajući rezultate obaju uvjeta, proračun koji uvjetuje globalni slom konstrukcije prikazuje se kao neprikladan i nedovoljno pouzdan. Stoga će se u obzir za promatrani utjecaj pregradnih zidova uzimati rezultati dobiveni uvjetom sloma prvog elementa za granično stanje blizu rušenja koji odgovara povratnom periodu od 95 godina. Prije konačnog zaključka ovog rada, iznosi se osvrt na činjenicu kako se proračun svih modela ovog rada u programu 3Muri radio usporedno učeći, istražujući i proučavajući sve programske mogućnosti, nedostatke, izvorne formule proračuna, vukla se paralela između talijanske norme NTC 2018 i važećeg Eurokoda, sve kako bi proračun bio što realniji i sigurniji. Temeljem toga, neosporno je kazati kako su rezultati proračuna nadasve promišljeni i smisleni. Završetkom ovog rada i slijedom dobivenih rezultata, može se zaključiti kako pregradni zidovi u sklopu konstrukcije imaju značajan doprinos i utjecaj na potresnu otpornost. Sagledavajući rezultate modela sa i bez pregradnih zidova uviđamo kako se otpornost konstrukcije čak dvostruko povećala u modelu sa pregradnim zidovima, dok je konstrukcija modela bez pregrada uspjela pretrpjeti znatno manji pomak. Dakle, obzirom na velik utjecaj pregradnih zidova na nosivost, potrebno je općenito težiti pravilnoj raspodjeli pregradnih zidova u tlocrtu te pravilnim izvođenjem spojeva

tih zidova sa nosivim zidovima kao i sa stropnom konstrukcijom. To sve potiče zajedničko ponašanje konstrukcije u potresu i adekvatan prijenos sila što značajno doprinosi kvalitetnijem otporu konstrukcije na potresno opterećenje.

## 9. LITERATURA

1. Grandić, D.: materijali s predavanja, kolegij: *Potresno inženjerstvo*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
2. Sorić, Z.: *Zidane konstrukcije*, Vlast. nakl., Zagreb 2016.
3. Hadzima-Nyarko, M; Ademović, N; Jeleč, M; *Konstruktivna pojačanja zidanih zgrada*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Osijek 2020.
4. Tomažević, M.: *Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina*, Građevinar 52 (2000) 11, 683-693.
5. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.: *Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2021.
6. Grandić, D.: materijali s predavanja, kolegij: *Betonske i zidane konstrukcije I*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
7. Radnić, J., Harapin, A., Matešin, D., Trogrlić, B., Smilović M., Grgić N., Baloević, G.: *Numerički model za statički i dinamički proračun zidanih konstrukcija*, Građevinar 63 (2011) 6, 529-546.
8. Peulić, Đ.: *Konstruktivni elementi zgrada, II dio*; Tehnička knjiga Zagreb, travanj 1980.
9. Bjelanović, A., Rajčić, V.: *Drvene konstrukcije prema europskim normama*, Hrvatska sveučilišna naklada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
10. Bjelanović, A.: materijali s predavanja, kolegij: *Drvene konstrukcije*, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci.
11. HRN EN 1996-1-1:2012. Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije (EN 1996-1-1:2005+A1:2012). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
12. HRN EN 1996-1-1:2012/NA:2012. Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije -- Nacionalni dodatak. Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
13. HRN EN 771-1:2015. Specifikacija za zidane elemente – 1.dio: Opečni zidni elementi (EN 771-1:2011+A1:2015). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
14. HRN EN 772-1:2015. Metode ispitivanja zidnih elemenata – 1.dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 772-1:2011+A1:2015). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
15. HRN EN 998-2:2016. Specifikacija morta za zide – 2.dio: Mort za zide (EN 998-2:2016). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
16. Sorić, Z.: *Mehanička svojstva nearmiranog ziđa*, Građevinar 52 (2000) 2, 67-78.
17. HRN EN 1052-1:2004. Metode ispitivanja ziđa – 1.dio: Određivanje tlačne čvrstoće (EN 1052-1:1998). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
18. HRN EN 1052-3:2004/A1:2008. Metode ispitivanja ziđa – 3.dio: Određivanje početne posmične čvrstoće (EN 1052-3:2002/A1:2007). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
19. HRN EN 1052-2:2016. Metode ispitivanja ziđa – 2.dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju. Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
20. 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). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.

21. HRN EN 1998-1:2011/NA:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade -- Nacionalni dodatak. Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
22. The Constructor: *Partition walls in construction: Important features and specifications*, <https://theconstructor.org/building/partition-walls-building-construction/217914/> (posjeta 11.10.2021.)
23. Galić, J., Vukić, H., Andrić D., Stepinac, L.: *Tehnike popravaka i pojačanja zidanih zgrada*, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
24. *European Macroseismic Scale 1998, EMS-1998*. Ur. Grünthal, Gottfried; Musson, Roger M.W.; Schwarz, J., Stucchi, M., Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Volume 15. Luxembourg 1998.
25. Demšić, M., Sruck, M.: *Proračun zidova na otkazivanje izvan ravnine*, predavanje na 15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva, Opatija 2021.
26. Državni arhiv u Rijeci, <https://dar.topoteka.net/> (posjeta 20.5.2021.)
27. Đurić, D.: *Zidovi od opeke*, Graditeljska, prirodoslovna i rudarska škola, Varaždin; [http://www.rudarska.hr/wp-content/uploads/2018/05/5-2\\_Zidovi-od-opeke-NF.pdf](http://www.rudarska.hr/wp-content/uploads/2018/05/5-2_Zidovi-od-opeke-NF.pdf) (posjeta 18.06.2021.)
28. Perić, Lj., Matorić, I.: *Pouzdanost tradicionalnih zidanih građevina s drvenim stropovima na potresno djelovanje*, *Građevinar* 72 (2020) 10, 869-893.
29. HRN EN 1991-1-1:2012. Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja zgrada (EN 1991-1-1:2002+AC:2009). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
30. HRN EN 1991-1-1:2012/NA:2012. Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- Dio 1-1: Opća djelovanja -- Obujamske težine, vlastite težine i uporabna opterećenja za zgrade -- Nacionalni dodatak. Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
31. HRN EN 1998-3:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada (EN 1998-3:2005+AC:2010). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
32. HRN EN 1998-3:2011/NA:2011. Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada -- Nacionalni dodatak. Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
33. HRN EN 1990:2011. Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija (EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
34. Mirra, M., Ravenshorst, G., van de Kuilen, J. W.; *Experimental and analytical evaluation of the in-plane behaviour of as-built and strengthened traditional wooden floors*, Delft University of Technology, 2020.
35. HRN EN 338:2016. Konstrukcijsko drvo – Razredi čvrstoće (EN 338:2016 (CEN)). Hrvatski zavod za norme, Zagreb.
36. Semantic Scholar; *TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*, <https://www.semanticscholar.org/paper/TREMURI-program%3A-An-equivalent-frame-model-for-the-Lagomarsino-Penna/7012f49603edd0a36258b181f00fef366e95337e> (posjeta 02.11.2021.)
37. AdriaBIM; *3Muri*, <https://www.adriabim.com/hr/3muri/> (posjeta 17.7.2021.)
38. Pojatina, J., Barić, D., Andić, D., Bjegović, D.: *Obnova građevinske konstrukcije stambene zgrade u Zagrebu nakon potresa 22. ožujka 2020*; *Građevinar* 73 (2021) 6, 633-648.

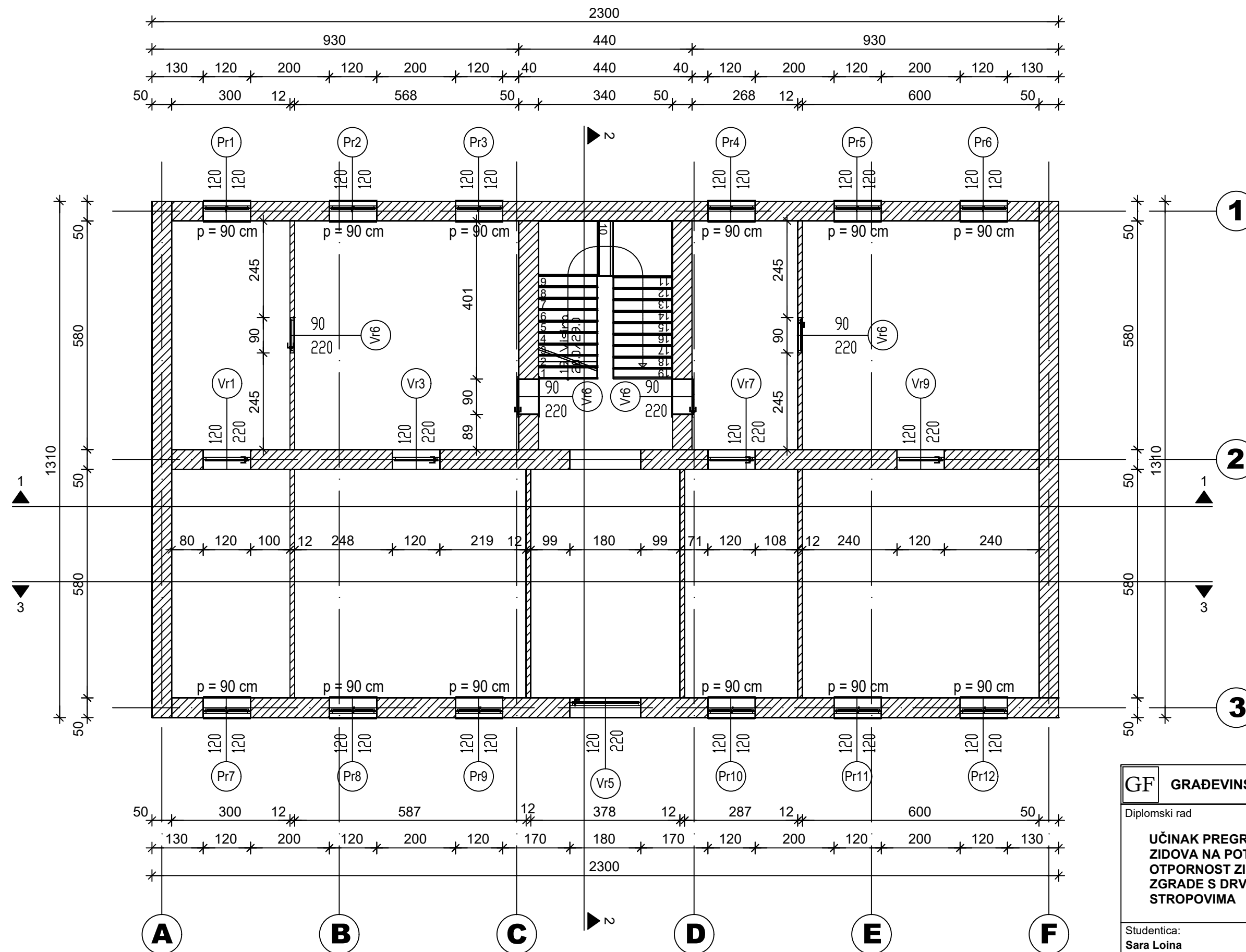
39. 3Muri User Manual 12.6.0, S.T.A. DATA, Torino.
40. NTC 2018 – Circolare 21, 11-2-2019, Ministero delle infrastrutture edei trasporti, Roma. Italia.

## 10. NACRTI

1. Tlocrt prizemlja	1/6
2. Tlocrt 1. kata	2/6
3. Tlocrt 2. kata	3/6
4. Poprečni presjek konstrukcije	4/6
5. Uzdužni presjek konstrukcije 1-1	5/6
6. Uzdužni presjek konstrukcije 3-3	6/6

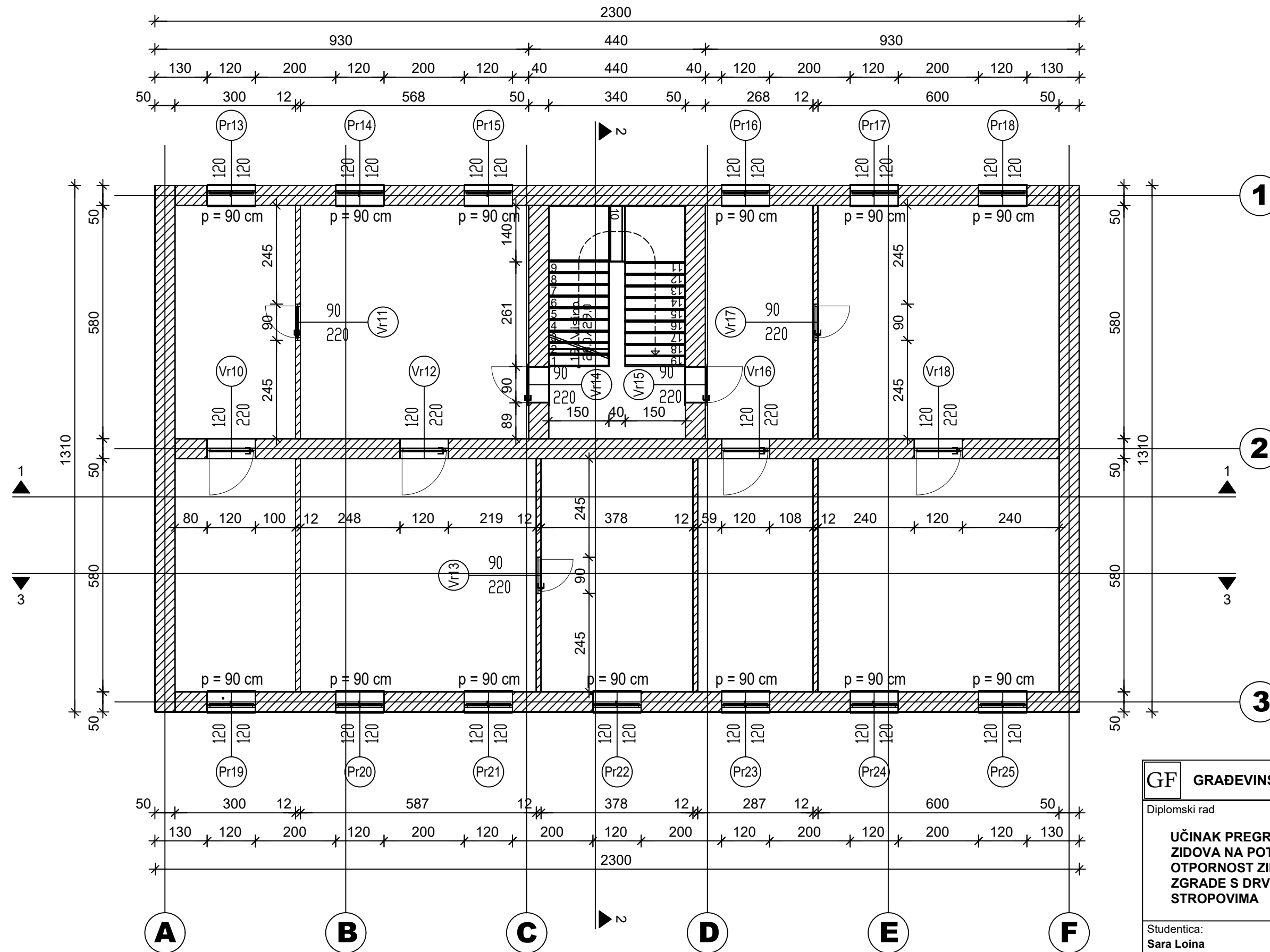


# TLOCRT PRIZEMLJA ; MJ 1:100



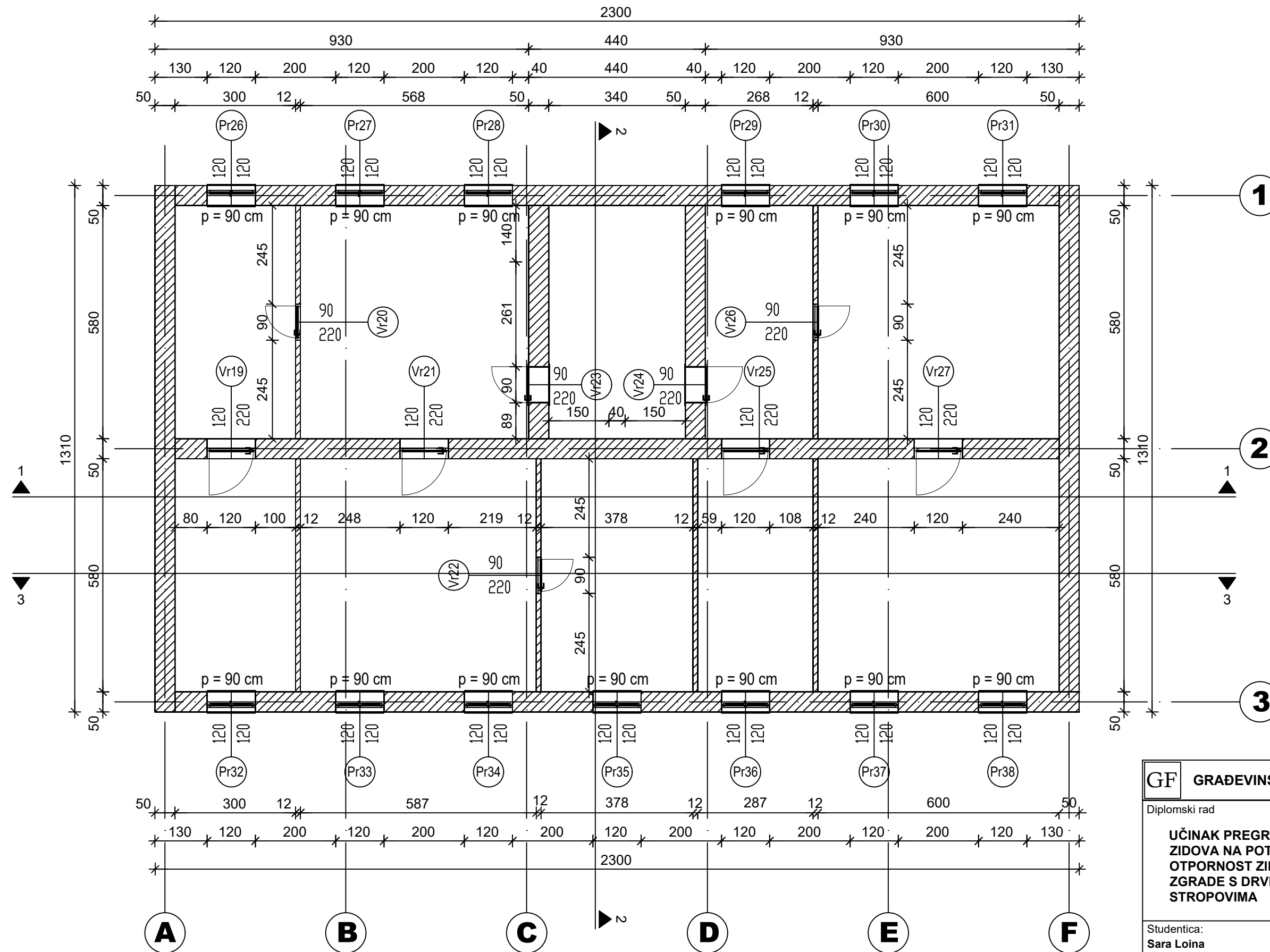
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		<b>TLOCRT PRIZEMLJA</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 14.07.2021	Mjerilo: 1:100
			List: 1

# TLOCRT 1. KATA ; MJ 1:100



<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		<b>TLOCRT 1. KATA</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 14.07.2021	Mjerilo: 1:100	List: 2

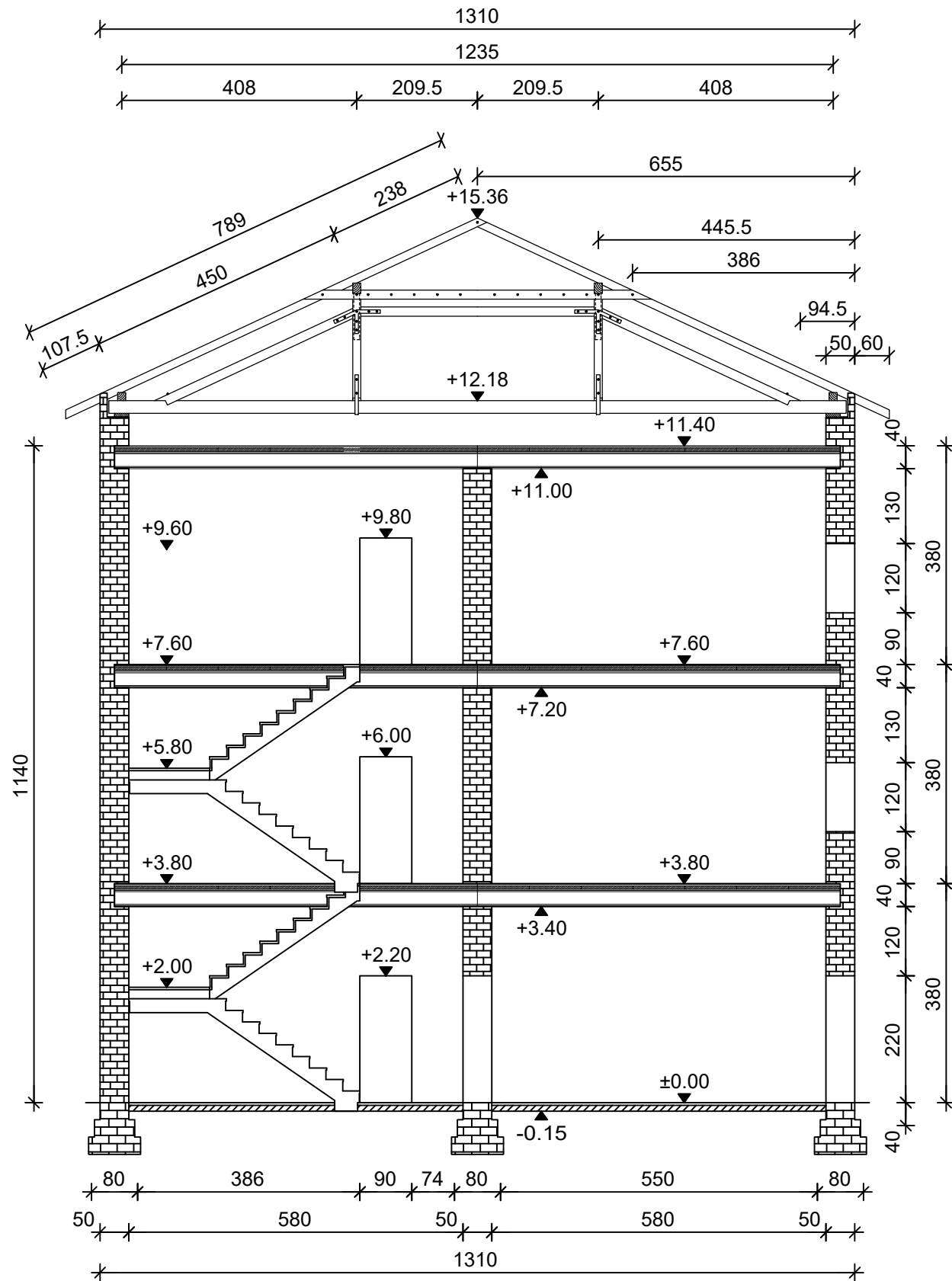
# TLOCRT 2. KATA ; MJ 1:100



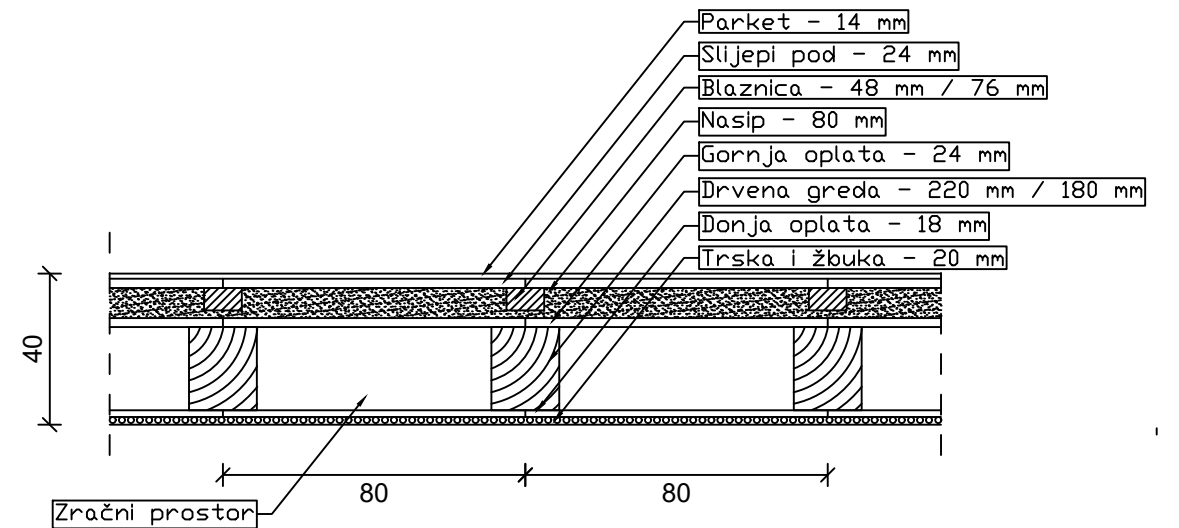
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		<b>TLOCRT 2. KATA</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 14.07.2021	Mjerilo: 1:100	List: 3

# POPREČNI PRESJEK KONSTRUKCIJE MJ 1:100

2 - 2



## POPREČNI PRESJEK STROPNE KONSTRUKCIJE MJ 1:20

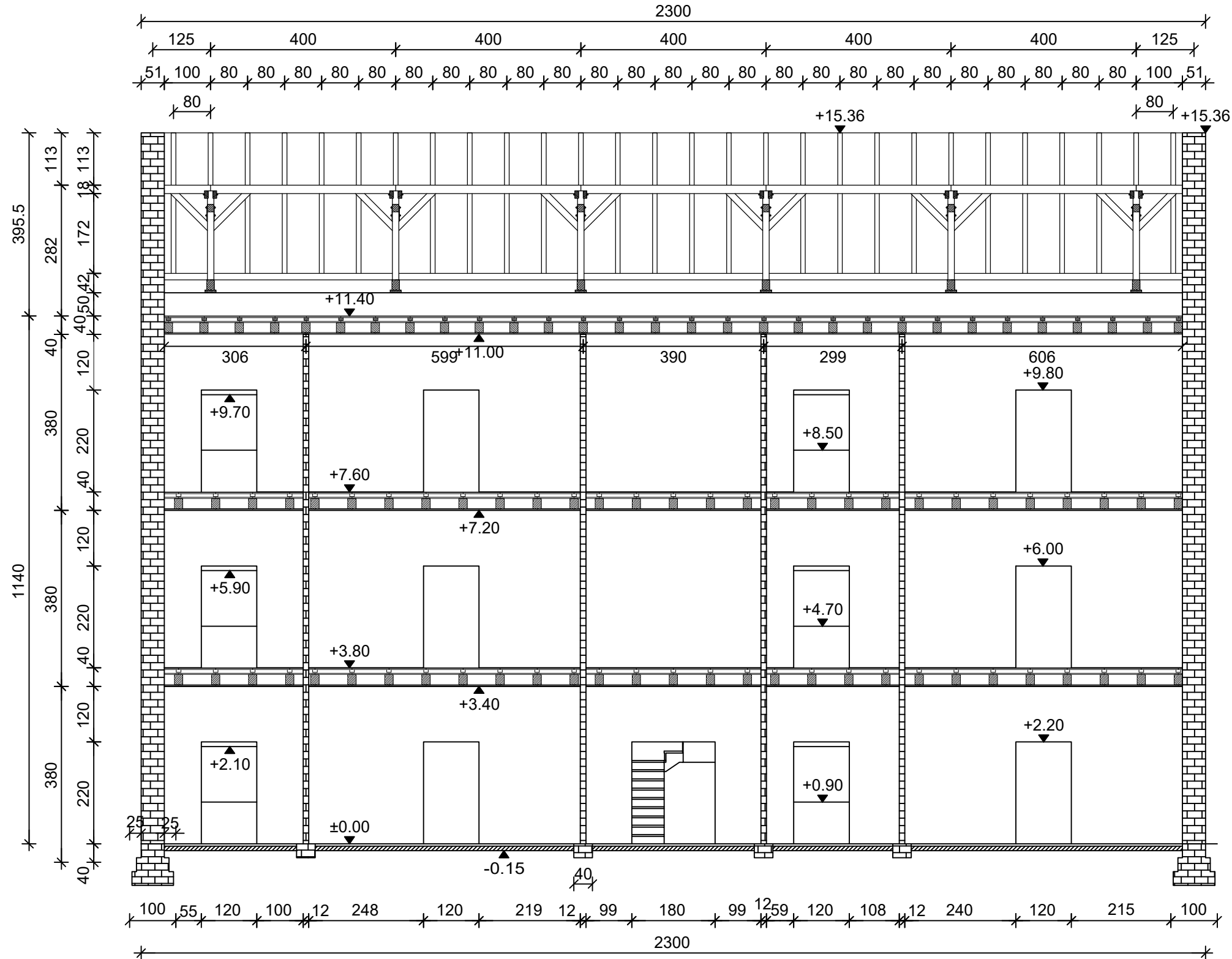


<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacrt:	
<b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		<b>POPREČNI PRESJEK KONSTRUKCIJE; STROPNE KONSTRUKCIJE</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 26.10.2021	Mjerilo: 1:100 ; 1:20
		4	4

# UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE 1-1

## MJ 1:100

1 - 1

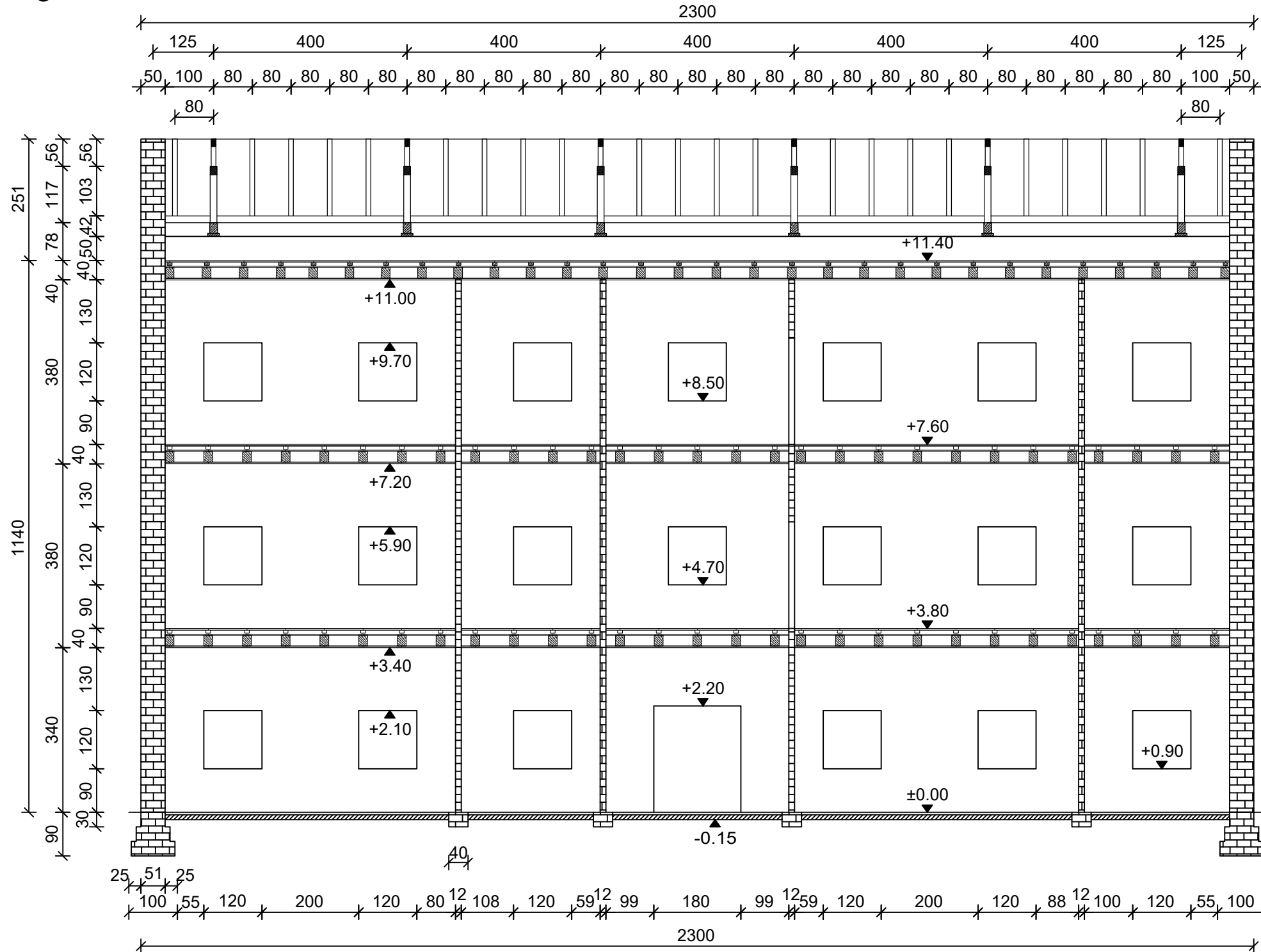


<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad <b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		Sadržaj nacрта: <b>UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE 1-1</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 26.10.2021	Mjerilo: 1:100
			List: 5

# UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE 3-3

## MJ 1:100

3 - 3



<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacrt:	
<b>UČINAK PREGRADNIH ZIDOVA NA POTRESNU OTPORNOST ZIDANE ZGRADE S DRVENIM STROPOVIMA</b>		<b>UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE 3-3</b>	
Studentica: <b>Sara Loina</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 26.10.2021	Mjerilo: 1:100
		List: 6	