

# Potresna otpornost tradicionalne zidane zgrade s obzirom na krutost stropnih konstrukcija

---

Zonta, Teo

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:157:314981>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**



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**

**Teo Zonta**

**Potresna otpornost tradicionalne zidane zgrade s obzirom na krutost  
stropnih konstrukcija**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva  
Smjer: Konstrukcije  
Potresno inženjerstvo**

**Teo Zonta  
JMBAG: 0114029216**

**Potresna otpornost tradicionalne zidane zgrade s obzirom na krutost  
stropnih konstrukcija**

**Diplomski rad**

**Rijeka, veljača 2022.**

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Hidrotehnika

Tema diplomskog rada

**POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH  
KONSTRUKCIJA**  
**EARTHQUAKE RESISTANCE OF A TRADITIONAL MASONRY BUILDING WITH REGARD TO THE STIFFNESS  
OF THE FLOOR STRUCTURES**

Kandidat: **TEO ZONTA**

Kolegij: **POTRESNO INŽENJERSTVO**

Diplomski rad broj: **K-2021-17**

**Zadatak:**

Student treba provesti proračun potresne otpornosti konstrukcije tradicionalne zidane zgrade tipologije i konstrukcije koja je karakteristična za središte grada Rijeke. Student treba napraviti nacрте zgrade koje odgovaraju navedenoj tipologiji. Zgrada treba imati prizemlje i dva kata te drveno krovništе. Izvorno zgrada ima stropnu konstrukciju tipа drvenog grednika. Nosivi i pregradni zidovi zgrade su zidani punom opekом 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. Potrebno je provesti proračun uz pretpostavku fleksibilne stropne konstrukcije tipа drveni grednik te krute armiranobetonske stropne konstrukcije.

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 izradio 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.

---

Teo Zonta

U Rijeci, 22. veljače 2022.

## 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

Ovaj rad bavi se problematikom potresne otpornosti tradicionalne zidane stambene zgrade kakva se može naći na području središta grada Rijeke. Takve zgrade nerijetka su pojava na tom području. U tradicionalnim zidanim zgradama često su stropne konstrukcije izvođene kao drvene. Cilj ovog rada jest proračunati potresnu otpornost dvije varijacije navedene zgrade; prva varijacija podrazumijeva zgradu sa spomenutom drvenom stropnom konstrukcijom, dok druga varijacija obuhvaća zgradu s armirano-betonskom pločom kao stropnom konstrukcijom. Ovakve dvije varijacije su ujedno i dva najčešća slučaja stropne konstrukcije na tradicionalnim zidanim zgradama. Rad detaljno definira sve značajke navedenih stropnih konstrukcija, posebice drvene. Uz same stropne konstrukcije, rad također razrađuje i definira nearmirano zide zajedno sa svim njegovim mehaničkim i deformacijskim karakteristikama. Na definiranu zgradu nanose se gravitacijska i potresna opterećenja koja su teorijski opisana i određena prije samog proračuna. Proračun potresne otpornosti proveden je u programskom paketu 3Muri nelinearnim statičkim proračunom metodom postupnog guranja. Rezultati proračuna ukazuju kako tipska tradicionalna zgrada ne zadovoljava uvjet potresne otpornosti prema službenoj normi HRN EN 1998-3:2008 na maksimalno prognozirano potresno opterećenje na području grada Rijeke. U usporedbi dvije varijacije proračunskog modela promatrane zgrade može se iskazati kako bolje rezultate pokazuje zgrada s armirano-betonskom pločom, no ti rezultati i dalje nisu zadovoljavajući.

**Ključne riječi:** zidana zgrada, tradicionalna, stropna konstrukcija, varijacija, potresna otpornost

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the problem of seismic resistance of a traditional masonry residential building that can be found in the center of the city of Rijeka. Such buildings are not uncommon in the area. In these traditional masonry buildings, floor structures are often made of wood. The objective of this thesis is to calculate the seismic resistance of two variations of the traditional masonry building; the first variation involves a building with mentioned wooden floor structure, while the second variation comprises a building with a reinforced concrete slab as the floor structure. These two variations are also the two most common cases of floor structures in traditional masonry buildings. The thesis accurately defines all the characteristics of mentioned floor structures, especially wooden one. In addition to the floor structures themselves, the work also elaborates and defines non-reinforced masonry along with all its mechanical and deformation characteristics. Gravitational and seismic loads are applied to the defined building, which are theoretically described and determined before the calculation. The calculation of seismic resistance was performed in the 3Muri software by nonlinear static analysis known as the „Pushover“ analysis. Results of the analysis indicate that the typical traditional masonry building does not meet the condition of seismic resistance according to the official standard HRN EN 1998-3: 2008 when the maximum predicted seismic load in the area of Rijeka is applied. Comparing the two variations of the building model, it can be seen that the building with a reinforced concrete slab shows better results, but these results are still unsatisfactory.

**Key words:** traditional masonry building, floor structure, variation, seismic resistance



## SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	9
POPIS SLIKA.....	10
1. UVOD .....	1
1.1. Predmet i cilj rada.....	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja .....	2
1.3. Sadržaj i struktura rada.....	2
2. KARAKTERISTIKE TRADICIONALNIH ZIDANIH KONSTRUKCIJA.....	3
2.1. Zidni elementi te ziđe kao cjelina.....	3
2.1.1. Općenito o zidu i zidnim elementima.....	3
2.1.2. Svojstva zidnih elemenata.....	6
2.1.3. Mort.....	8
2.1.4. Nearmirano ziđe.....	10
2.1.5. Tlačna čvrstoća ziđa.....	13
2.1.6. Vlačna čvrstoća ziđa.....	18
2.1.7. Posmična čvrstoća ziđa .....	21
2.1.8. Čvrstoća ziđa na savijanje .....	23
2.1.9. Modul elastičnosti i posmika ziđa.....	25
2.1.10. Odnos naprezanja i relativne deformacije.....	27
2.2. Drveni stropovi.....	29
2.2.1. Općenito o drvenim stropnim konstrukcijama.....	29
2.2.2. Drveni grednik .....	30
2.2.3. Drveni podovi .....	32
2.2.4. Plafoni drvenih stropova .....	34
2.2.5. Modul elastičnosti drva .....	36
2.2.6. Modul posmika drva .....	39
2.2.7. Krutost stropne konstrukcije.....	40

2.3.	Krovnna konstrukcija .....	44
2.3.1.	Općenito o drvenoj krovnoj konstrukciji.....	44
2.3.2.	Krovišta s podrožnicama na dvostrukim visuljama.....	46
3.	POTRESNO DJELOVANJE .....	52
3.1.	Nastanak potresa .....	52
3.2.	Potresno djelovanje na konstrukciju.....	56
3.3.	Potresna otpornost i oštećenja zidane konstrukcije .....	61
4.	PRORAČUN POTRESNE OTPORNOSTI ZIDANE ZGRADE .....	65
4.1.	Tehnički opis konstrukcije.....	65
4.2.	Djelovanja na konstrukciju .....	68
4.2.1.	Gravitacijsko opterećenje.....	68
4.2.2.	Potresno djelovanje .....	72
4.3.	Mehanička i deformacijska svojstva materijala.....	74
4.3.1.	Mehanička i deformacijska svojstva zida .....	74
4.3.2.	Mehanička i deformacijska svojstva stropne konstrukcije.....	76
4.4.	Proračunski model u programskom paketu <i>3Muri12</i> .....	77
4.4.1.	Princip rada programskog paketa <i>3Muri</i> .....	77
4.4.2.	Unos ulaznih parametara za proračun .....	84
5.	REZULTATI PRORAČUNA POTRESNE OTPORNOSTI PROMATRANE ZIDANE ZGRADE	95
5.1.	Model A – Realna stropna konstrukcija.....	97
5.1.1.	Turnšek/Čačović metoda - Slom prvog elementa nosivog zida.....	97
5.1.2.	Turnšek/Čačović metoda – Globalno otkazivanje konstrukcije .....	106
5.2.	Model B – Apsolutna kruta stropna konstrukcija .....	112
5.2.1.	Turnšek/Čačović metoda – Slom prvog elementa nosivog zida.....	112
5.2.2.	Turnšek/Čačović metoda - Slom prvog elementa.....	118
5.2.3.	Turnšek/Čačović metoda – Globalno otkazivanje konstrukcije .....	120

6.	ZAKLJUČAK.....	126
7.	LITERATURA.....	128
8.	POPIS NACRTA.....	132

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti faktora oblika [6] .....	6
Tablica 2. Oznake morta prema europskim normama [2].....	9
Tablica 3. Vrijednosti faktora K koje se upotrebljavaju za mortove opće namjene, tankoslojne i lagane mortove [12].....	15
Tablica 4. Izmjere malih ispitnih uzoraka na ispitivanje tlačne čvrstoće ziđa [11] .....	16
Tablica 5. Karakteristične vrijednosti mehaničkih svojstava ziđa [13] .....	20
Tablica 6. Vrijednosti početne posmične čvrstoće ziđa [7] .....	22
Tablica 7. Vrijednosti $f_{xk1}$ za ravninu sloma usporednu s horizontalnim sljubnicama [7] .....	24
Tablica 8. Vrijednosti $f_{xk2}$ za ravninu sloma okomitu na horizontalne sljubnice [7].....	24
Tablica 9. Vrijednosti parcijalnog koeficijenta za materijale [7].....	28
Tablica 10. Razredi mekog cjelovitog drva [25] .....	37
Tablica 11. Dimenzije elemenata drvene krovne konstrukcije [20].....	51
Tablica 12. Vrijednosti koeficijenta $\rho$ za proračun $\psi E, i$ [16] .....	68
Tablica 13. Vlastita težina stropne konstrukcije (Model A) .....	69
Tablica 14. Vrijednosti faktora $\Psi$ za zgrade [37] .....	70
Tablica 15. Vrijednost stalnog opterećenja (Model A) .....	70
Tablica 16. Vrijednost uporabnog opterećenja (Model A & B) .....	70
Tablica 17. Vlastita težina stropne konstrukcije (Model B) .....	71
Tablica 18. Mehanička i deformacijska svojstva ziđa [2;9] .....	75
Tablica 19. Legenda rezultata proračuna potresnog odziva konstrukcije.....	96
Tablica 20. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 12. provjeru (X smjer) ; b) 23. provjeru (Y smjer) .....	97
Tablica 21. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 9. provjeru (X smjer) ; b) 18. provjeru (Y smjer).....	106
Tablica 22. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model B) za: a) 16. provjeru (X smjer) ; b) 24. provjeru (Y smjer) .....	113
Tablica 23. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 10. provjeru (X smjer) ; b) 18. provjeru (Y smjer) .....	121
Tablica 24. Rezultantni faktori ispunjenja svih proračunskih modela.....	127

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema zidanja pregradnog zida od pune opeke normalnog formata [4] .....	5
Slika 2. Tlocrtni prikaz prvog i drugog sloja opeke u nosivom zidu [4] .....	5
Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoća ziđa [14] .....	17
Slika 4. Ispitivanje referentne vlačne čvrstoće [15] .....	18
Slika 5. Ispitivanje posmične čvrstoće ziđa [17] .....	21
Slika 6. Ravnine sloma ziđa prilikom njegovog savijanja [3] .....	23
Slika 7. Dijagram naprezanje – relativna deformacija [7] .....	25
Slika 8. Dijagram naprezanje – relativna deformacija [7] .....	27
Slika 9. Oslanjanje drvenog grednika [20] .....	31
Slika 10. Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [20] .....	32
Slika 11. Glavne osi drva [23] .....	36
Slika 12. Horizontalno pomicanje krute i fleksibilne stropne dijafragme [21] .....	40
Slika 13. Oblici urušavanja zidova izvan svoje ravnine [26] .....	41
Slika 14. Aksonometrijski prikaz dodanog sloja dasaka [26] .....	43
Slika 15. Aksonometrijski prikaz krovišta s podrožnicama na dvostrukim visuljama [21] .....	46
Slika 16. Detalj donje podrožnice [20] .....	47
Slika 17. Veza rogova u sljemenu metodom polupreklopa [24] .....	48
Slika 18. Oslanjanje kosnika na veznu gredu [20] .....	49
Slika 19. Detalj spoja visulje, kosnika i pajante [20] .....	49
Slika 20. Tektonske ploče na planetu Zemlji i njihov godišnji pomak (mm) [28] .....	52
Slika 21. Mohorovičićev diskontinuitet [14] .....	53
Slika 22. Hipocentar i epicentar potresa [14] .....	54
Slika 23. Vrste i način širenja potresnih valova [30] .....	55
Slika 24. Horizontalne inercijske sile [31] .....	57
Slika 25. Osnovni period vibracije konstrukcije [14] .....	58
Slika 26. Tipični elastični spektar odziva konstrukcije [33] .....	59
Slika 27. Torzija zgrade uslijed potresnog djelovanja [34] .....	60
Slika 28. Povezanost i pomak zidova uslijed: a) fleksibilne SD ; b) fleksibilne SD i krute obodne grede ; c) krute SD [26] .....	62
Slika 29. Oblici sloma ziđa opterećenim u vlastitoj ravnini [35] .....	63
Slika 30. Prevrtnanje zida izvan vlastite ravnine [36] .....	64

Slika 31. Karta potresnih područja Republike Hrvatske s vrijednostima vršnog ubrzanja tla $a_{GR}$ za tlo razreda A – povratni period 475 godina [39].....	73
Slika 32. Vrijednosti vršnih ubrzanja tla za različite povratne periode na području Grada Rijeke [39].....	73
Slika 33. Krivulja sposobnosti nosivosti [14] .....	79
Slika 34. Graf pomak – ubrzanje za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode i kratkoperiodični raspon [32] .....	81
Slika 35. Graf pomak – ubrzanje za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode i srednje periodični i dugoperiodični raspon [32].....	81
Slika 36. Tlocrtna shema zidova i stropa u 3Muri-ju.....	84
Slika 37. Atributi zidnog panela proračunskog modela .....	85
Slika 38. Dimenzije otvora prozora u zidu .....	85
Slika 39. Dimenzije stropne konstrukcije.....	86
Slika 40. Definiranje stropne konstrukcije (Model A).....	87
Slika 41. Osnovni parametri modela .....	89
Slika 42. Mehanička svojstva ziđa – Turnšek/Čačović metoda proračuna.....	90
Slika 43. Mehanička svojstva ziđa – Mohr/Coulomb metoda proračuna .....	91
Slika 44. Vrijednosti seizmičkog opterećenja na konstrukciju .....	92
Slika 45. Definiranje kontrolnog pomaka i tipa nelinearnog statičkog proračuna postupnim naguravanjem (Pushover analysis).....	93
Slika 46. 3D prikaz proračunskog modela u 3Muri-ju .....	94
Slika 47. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model A; Turnšek/Čačović – slom prvog elementa).....	99
Slika 48. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (12. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ) .....	100
Slika 49. Mehanizam sloma kritičnog zida u Y smjeru (23. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ) .....	101
Slika 50. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (12. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ) .....	102
Slika 51. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (23. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ).....	102
Slika 52. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (12. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ) .....	104

Slika 53. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (23. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ) .....	105
Slika 54. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model A; Turnšek/Čačović – globalno otkazivanje konstrukcije).....	107
Slika 55. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (9. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK).....	107
Slika 56. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (18. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK).....	108
Slika 57. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (9. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK) .....	108
Slika 58. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (18. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK) .....	109
Slika 59. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (9. provjera, Model A, T/Č metoda – GOK) .....	110
Slika 60. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (18. provjera, Model A, T/Č metoda – GOK) .....	110
Slika 61. Skup svih krivulja kapaciteta (Model A, T/Č metoda – GOK).....	111
Slika 62. Definiranje stropne konstrukcije (Model B).....	113
Slika 63. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model B; Turnšek/Čačović – slom prvog elementa).....	114
Slika 64. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (16. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ) .....	114
Slika 65. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ) .....	115
Slika 66. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (16. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ) .....	115
Slika 67. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ) .....	116
Slika 68. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (16. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ) .....	117
Slika 69. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (24. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ) .....	117

Slika 70. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SPE).....	118
Slika 71. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SPE) .....	119
Slika 72. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model B; Turnšek/Čačović – globalno otkazivanje konstrukcije).....	120
Slika 73. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (10. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK).....	121
Slika 74. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (18. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK).....	122
Slika 75. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (10. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK) .....	122
Slika 76. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (18. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK) .....	123
Slika 77. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (10. provjera, Model B, T/Č metoda – GOK) .....	124
Slika 78. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (18. provjera, Model B, T/Č metoda – GOK) .....	124
Slika 79. Skup svih krivulja kapaciteta (Model B, T/Č metoda – GOK).....	125



# 1. UVOD

## 1.1. Predmet i cilj rada

U ovom radu opisuje se potresna otpornost jedne tradicionalne zidane stambene zgrade kakvu možemo naći u središtu grada Rijeke. Kao primarni i osnovni korak obavljeno je istraživanje u državnom arhivu u Rijeci s ciljem pronalaska tipične zidane stambene zgrade izgrađene u ranijem 20. ili čak 19. stoljeću [1]. Za odabranu zgradu izrađuju se nacrti te se na temelju njih izrađuje i model takve zgrade u programskom paketu *3Muri12*. Predmet ovog rada jest prije svega pronaći i definirati svojstva svih materijala i elemenata povezanih s promatranom konstrukcijom, i to iz vjerodostojnih izvora. Osim materijala i elemenata, definira se i opterećenje, gravitacijsko i potresno za odgovarajuće područje. Osnovna funkcija navedenog programskog paketa *3Muri12* jest proračun potresne otpornosti konstrukcije.

Cilj ovog rada jest dobiti rezultate potresne otpornosti proračunskog modela konstrukcije u *3Muri*-ju koji na realan način odgovara postojećoj zidanoj stambenoj zgradi na području grada Rijeke. U ovom radu naglasak je na učinku krutosti stropnih dijafragma na potresnu otpornost tradicionalne zidane konstrukcije. Dakle, provesti će se proračun nad dva različita modela konstrukcije, u prvom modelu stropna konstrukcija definira se kao tradicionalna drvena kakva se izvodila u nekadašnje vrijeme, dok u drugom modelu stropna se konstrukcija definira kao apsolutna kruta dijafragma što bi odgovaralo izvedbi armiranobetonske ploče. Dobiveni rezultati će se analizirati te usporediti sa značajnijim radovima, člancima i ostalim izvorima gdje su provedena istraživanja, eksperimenti, rasprave i sl.

## 1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja

Za pisanje teorijskog dijela korištena je ponajviše domaća literatura od koje su najzastupljeniji radovi stručnih osoba tj. profesora s Građevinskih fakulteta u Rijeci, Osijeku, Zagrebu i Splitu. Manje korištene u pisanju teorijskog dijela no većim dijelom korištene za razradu proračunskog dijela jesu europske norme za proračun i projektiranje različitih vrsta građevinskih konstrukcija koji se nazivaju Eurokod-ovi. Uz domaću literaturu poslužila je dakako i strana literatura, puni popis izvora literature nalazi se u Poglavlju 7.

Za izradu ovog rada korišteno je nekoliko programskih paketa, a to su: *Microsoft Office* paket programa, *AutoCad*, *Straus7*, *AllPlan* te naravno *3Muri12*. Poseban naglasak je na *3Muri12* s obzirom da se proračun koji se dokazuje ovim radom provodi upravo putem njega. Dodatan razlog je i njegova trenutno velika popularnost na tržištu, sve ga više projektanata i institucija koristi za projekte obnova starih zidanih zgrada i kuća na području grada Zagreba, Zagrebačke te Sisačko-moslavačke županije.

## 1.3. Sadržaj i struktura rada

Ovaj je rad strukturiran u šest glavnih cjelina, uključivši Uvod i Zaključak. Druga cjelina oblikovana je teorijski, ovdje se predstavljaju, opisuju i definiraju materijali te konstrukcijski elementi od kojih se sastoji konstrukcija. U trećoj cjelini razmatra se pojava potresa te njegovo djelovanje na konstrukciju. Sljedeća cjelina definira tehnički opis konstrukcije, karakteristična opterećenja koja djeluju na promatranu konstrukciju, mehanička i deformacijska svojstva konstrukcije (karakteristične čvrstoće te deformacijski moduli za promatrano zide i drvenu stropnu konstrukciju). U četvrtoj cjelini se također nalazi i opis principa rada programskog paketa *3Muri* te se opisuju svi ulazni parametri potrebni za definiranje proračunskog modela promatrane konstrukcije. Nakon definiranog proračunskog modela, rezultati potresne otpornosti prikazani su i razrađeni u petoj cjelini. Na temelju svih opisanih cjelina predstavlja se zaključak koji je napisan kao šesta cjelina. Uz glavne cjeline, rad sadrži i naslove Popis tablica, Popis slika, Popis nacrti te Literatura.

## **2. KARAKTERISTIKE TRADICIONALNIH ZIDANIH KONSTRUKCIJA**

### **2.1. Zidni elementi te zide kao cjelina**

#### **2.1.1. *Općenito o zidu i zidnim elementima***

Zidane konstrukcije mogu se definirati kao konstrukcije izvedene od zidnih elemenata povezanih mortom ili sličnim materijalom. One mogu biti zidane na samom mjestu gradnje ili mogu biti izvedene u obliku predgotovljenog zida koje se naknadno spaja na gradilištu. Ovakva definicija zidanih konstrukcija temelji se na djelu „Zidane konstrukcije“ Z. Sorića [2]. Osnovni materijali od kojih se sastoji nearmirano zide jesu mort i zidni elementi.

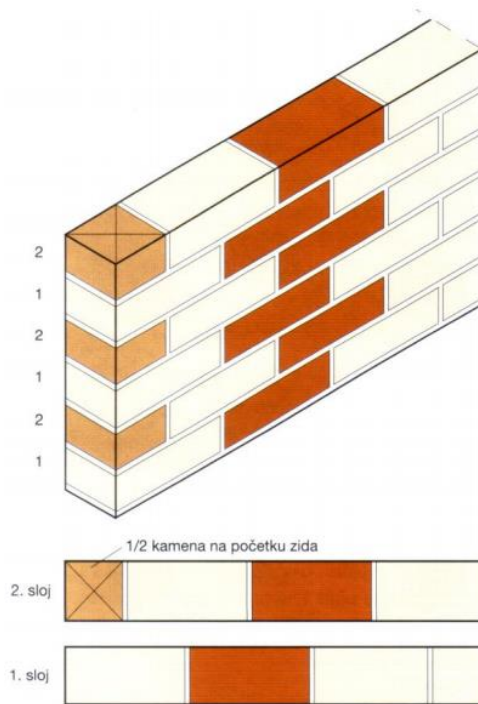
Pojam zidni element podrazumijeva svaki unaprijed oblikovan element koji je namijenjen za izgradnju zida. Zide se može definirati kao skup zidnih elemenata položenih na određenu poziciju koji su međusobno povezani mortom. Zide je materijal koji se koristi još od davne povijesti, najstarije pronađeno zide datira iz daleke 9000. godine prije Krista (Izrael)[3]. Povijesno gledajući, zidane građevine su najčešće izvođene građevine u cijelom svijetu. Od tog vremena pa sve do danas zidane građevine predstavljaju najčešće izvođene građevine kroz povijest. Zidane građevine izvodile su se raznim zidnim elementima od kojih možemo izdvojiti kamen, sušeno blato, sirovu i pečenu glina kao tradicionalne materijale te betonske, vapneno-silikatne, od porastog betona i sl. zidne elemente kao suvremene materijale. Osim podjele prema vrsti materijala, zidni elementi mogu se podijeliti prema postotku šupljina i prema kontroli proizvodnje. U nastavku biti će naglasak isključivo na tradicionalnoj punoj pečenoj opeci. S obzirom da se radi o starijoj tradicionalnoj zgradi, podjela prema šupljinama i kontroli proizvodnje nije potrebna. Jedan od prvih primjera upotrebe obrađene opeke jest nekadašnji Grčki grad Troja za čiju gradnju je upotrijebljena opeka sušena na suncu, dok prva primjena pečene opeke datira iz 2000. godine prije Krista gdje je izvedene takozvana „Kuća pločica“.

Puna opeka se zapravo proizvodi oblikovanjem, sušenjem i pečenjem mješavine glinenog materijala, pijeska i vode. Puna opeka u smislu gotovog proizvoda obiluje brojnim dobrim svojstvima poput primjerice ekonomičnosti, jednostavnosti

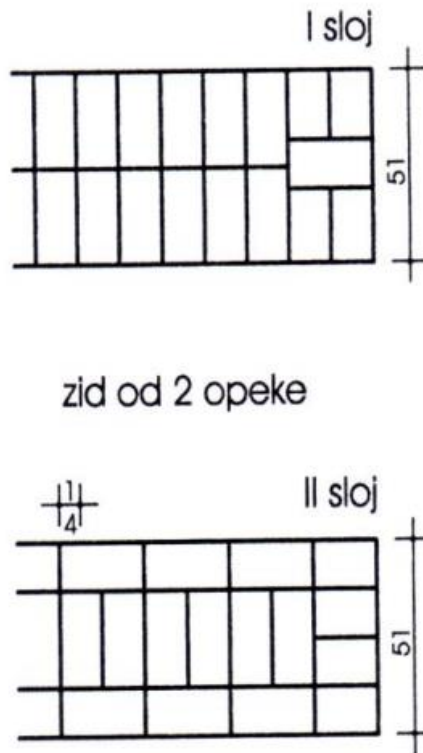
rukovanjem, trajnosti, krutosti, odličnim toplinskim i zvučnim izolacijskim sposobnostima, odlične požarne otpornosti i energijske učinkovitosti, lakoj dostupnosti materijala pa i mogućnosti kombiniranja s drugim materijalima...

Materijal s kojim se puna opeka najčešće kombinira jest upravo drvo, kao što je slučaj i u promatranoj tradicionalnoj zgradi. U tradicionalnoj zidanoj zgradi na ovim prostorima najčešće se može naći drvene stropne konstrukcije te drveno krovište, više o njima biti će obrazloženo u nastavku. Nakon istraživanja i prikupljanja podataka o tradicionalnim zidanim zgradama definirane su neke najčešće dimenzije zgrade između kojih i debljine zidova.

Prije nego se krene u dublju analizu zida i zidnih elemenata, definirati će se nekoliko osnovnih pravila zidanja punom opekam normalnog formata (dim. opeke 6,5x12x25cm). Dva najosnovnija pravila kažu da prilikom zidanja svaki sloj opeke mora biti vodoravan te da se vertikalne sljubnice dva susjedna sloja ne smiju preklapati, već moraju biti razmaknute za najmanje četvrtinu opeke [4]. Kako se vertikalne sljubnice ne bi preklapale svi neparni slojevi opeke jednaki su prvom, a svi parni drugom sloju. Pritom napomenuvši da se prvi i drugi sloj nikad ne preklapaju, već su izmaknuti ovisno o debljini zida. Elementi opeke koji se pružaju u istom smjeru kao i zid nazivaju se uzdužnjaci, dok su vežnjaci elementi opeke smješteni okomito na ravninu zida. Ta dva elementa izmjenjuju se duž lica zida. Pri debljim zidovima, kao što je primjerice nosivi zid od 51 cm, treba težiti što većoj uporabi vežnjaka. Slojevi opeke u pregradnom zidu izvode se na način kako je to prikazano na Slici 1. Nosivi zid debljine 51 cm podrazumijeva kompliciraniju izvedbu, tlocrtni prikaz parnog i neparnog sloja opeke nalazi se na Slici 2.



Slika 1. Shema zidanja pregradnog zida od pune opeke normalnog formata [4]



Slika 2. Tlocrtni prikaz prvog i drugog sloja opeke u nosivom zidu [4]

### 2.1.2. Svojstva zidnih elemenata

Kad se govori o svojstvima zidnih elemenata, konkretnije se misli na tehnička svojstva. Tehnička svojstva zidnih elemenata određuju se za svaku vrstu zidnih elemenata posebice, a temelje se na specifikacijama u normama te normiranim ispitivanjima [5]. Tehnička svojstva koja se definiraju jesu: izmjere i odstupanja; oblici zidnih elemenata; obujamska masa, bruto i neto; čvrstoće (tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća pri savijanju, čvrstoća prionjivosti); toplinska svojstva; trajnost – prema otpornosti na zamrzavanje/odmrzavanje; vodupojnost; sadržaj topljivih soli; kretanje vlage; reakcija na požar; paropropusnost. Od svih nabrojanih svojstva zidnih elemenata kao dva najbitnija i najosnovnija mogu se izdvojiti tlačna čvrstoća i trajnost. Što se svojstva trajnosti tiče, zidni elementi moraju zadovoljiti uvjete uporabljivosti tokom predviđenog životnog vijeka građevine. Zidni elementi moraju se oduprijeti utjecajima iz okoline koji ih tokom vremena nastoje oštetiti i dovesti u neuporabljivo stanje.

Tlačna čvrstoća najvažnije je konstruktivno svojstvo zidnog elementa iako su u nosivosti mjerodavne i dimenzije samog zidnog elementa te broj horizontalnih sljubnica. Pojam normalizirane tlačne čvrstoće ( $f_b$ ) uveden je zbog različitih oblika i dimenzija zidnih elemenata, a samim time i zbog načina ugradnje. Tlačna čvrstoća zidnog elementa opisuje se pomoću normalizirane tlačne čvrstoće sušenog zidnog uzorka koji ima visinu od 100 mm te istu toliku širinu. Često se ispitivanje tlačne čvrstoće ne izvodi na uzorcima navedenih dimenzija već dimenzija opisanih u Tablici 1. Ukoliko je uzorak takvih dimenzija, potrebno je rezultat ispitivanja pomnožiti s faktorom oblika kako bi se definirala nominalna tlačna čvrstoća.

Tablica 1. Vrijednosti faktora oblika [6]

Visina zidnog elementa (mm)	Najmanja horizontalna dimenzija zidnog elementa (mm)				
	50	100	150	200	≥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
≥250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Sadašnjim normama zahtjeva se da zidni elementi imaju srednju tlačnu čvrstoću najmanje  $2,5 \text{ N/mm}^2$  u smjeru okomitom na horizontalnu sljubnicu te najmanje  $2,0 \text{ N/mm}^2$  u horizontalnom smjeru. Iste ove vrijednosti definirane su prema normi HRN EN 1998-1:2011 za normaliziranu tlačnu čvrstoću zidnih elemenata u potresnim područjima. U slučaju postojeće tradicionalne zidane zgrade, teško je za očekivati da će zidni elementi zadovoljavati današnje norme.

### 2.1.3. Mort

Mort kao materijal predstavlja mješavinu agregata (npr. pijesak), vode i anorganskog veziva (npr. cement ili druge vrste vapna) te katkada i dodatnih sastojaka za poboljšanje mehaničkih svojstava. Osnovna svrha morta jest da bude vezivni materijal između zidnih elemenata [3]. Mort se tako nalazi u horizontalnoj ravnini između dva reda zidnih elemenata, mort u takvoj poziciji naziva se horizontalnom sljubnicom. Mort se nalazi i u vertikalnoj ravnini između zidnih elemenata, mort u ovoj poziciji naziva se vertikalnom sljubnicom. Mort se može razvrstati prema više kategorija kao što su sastojci ili mehanička svojstva primjerice, no prema normi HRN EN 1996-1-1:2012 [7] definirana je podjela morta za zidanje na mort opće namjene, tankoslojni mort i lagani mort. Tankoslojni mort predstavlja projektirani mort gdje je ograničen maksimalan promjer agregata propisanom vrijednošću. Lagani mort temeljen na normi HRN EN 998-2 [8] predstavlja mort koji u svom suhom stanju ima obujamsku masu manju od  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

Izvan okvira *Eurokoda* poznate su sljedeće vrste mortova:

- cementni mort
- cementno-vapneni mort (produžni mort)
- vapneni mort
- tankoslojni mort (1-3 mm)
- unaprijed pripremljeni (tvornički projektirani) mort
- lakoagregatni (lagani) mort

Mort se klasificira prema svojoj proračunskoj tlačnoj čvrstoći, oznaka klasifikacije jest veliko slovo  $M$ , a ovisno o vrijednosti proračunske tlačne čvrstoće koja se mjeri u  $\text{N/mm}^2$  odmah iza oznake  $M$  slijedi broj jednak spomenutoj vrijednosti. Velika većina normi u svijetu nalaže određivanje odnosa komponenata morta putem volumena, iako je poznato da bi odredba komponenata putem mase bio točniji način. Klasificirani mortovi zajedno sa svojim tlačnim čvrstoćama i omjerima sastojaka prikazani su u Tablici 2. Potrebno je još napomenuti kako je današnjim normama i propisima definirano da u potresnim područjima nije dopuštena uporaba morta čvrstoće manje od M5.



Tablica 2. Oznake morta prema europskim normama [2]

Vrsta morta	$f_{md}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Približni volumenski omjeri sastojaka cement : vapno : pijesak
M1	1,0	$1,0 \leq f_m \leq 2,5$	
M2,5	2,5	$2,5 \leq f_m \leq 5,0$	1:1,25 do 2,5:8 do 9
M5	5,0	$5,0 \leq f_m \leq 7,5$	1:0,5 do 1,25:5 do 6
M7,5	7,5	$7,5 \leq f_m \leq 10,0$	
M10	10,0	$10,0 \leq f_m \leq 12,5$	1:0,25 do 0,50:4 do 4,25
M12,5	12,5	$12,5 \leq f_m \leq 15,0$	
M15	15,0	$15,0 \leq f_m \leq 20,0$	
M20	20,0	$20,0 \leq f_m \leq 30,0$	
M30	30,0	$30,0 \leq f_m \leq 40,0$	
$f_{md}$ - specificirana tlačna čvrstoća $f_m$ - srednja tlačna čvrstoća u vrijeme ispitivanja			

Što se svojstva morta tiče, razlikujemo svojstva svježeg i očvrsnulog morta [5]. Bitna svojstva svježeg morta jesu: vrijeme ugradnje, sadržaj klorida, sadržaj zraka tj. udio pora, vrijeme obradivosti i veličina agregata. S druge strane, značajna svojstva očvrsnulog morta jesu: vlačna čvrstoća pri savijanju, tlačna čvrstoća, čvrstoća prijanjanja, paropropusnost, vodoupojnost, toplinska provodljivost, obujamska masa, reakcija na požar te trajnost. Svojstva morta ispituju se na kockama standardnih dimenzija 70,7x70,7x70,7 mm ili 100x100x100 mm ili pak na prizmama propisanih dimenzija 160x40x40 mm. Ispitivanjima se utvrđuju svojstva tlačne i vlačne čvrstoće dok se trajnost morta osigurava većim udjelom cementa ili dodatkom posebnih aditiva.

#### **2.1.4. Nearmirano ziđe**

Po samom nazivu ove vrste ziđa može se zaključiti kako je to klasično ziđe bez uporabe armature. Ovakav tip ziđa izražen je kao konstruktivni element izveden od dvije komponente, zidnih elemenata i morta. U ovom radu obje komponente smatraju se veoma starima s obzirom da se radi o tradicionalnoj zidanoj zgradi građenoj oko 1900. godine. Iz tog razloga se za mehanička svojstva uzima Tablica 5. definirana na temelju istraživanja od strane Z. Sorića [2]. Promatrana zgrada u ovom radu sagledava se kao da je izvedena od čistog nearmiranog ziđa, bez ikakve armature ili horizontalnih i vertikalnih serklaža. Najbitnija mehanička i deformacijska svojstva nearmiranog ziđa a i ziđa općenito su:

- tlačna čvrstoća ziđa ( $f_k$ )
- posmična čvrstoća ziđa ( $f_v$ )
- čvrstoća ziđa na savijanje ( $f_x$ )
- referentna vlačna čvrstoća ( $f_t$ )
- modul elastičnosti ( $E$ )
- odnos naprezanje–relativna deformacija ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

Mehaničke karakteristike ziđa u najvećoj mjeri ovise o svojstvima zidnih elemenata, morta te o međusobnoj vezi odnosno adheziji između ta dva elementa; kvaliteta izvedbe, njege i obrade također znatno utječu. O navedenim mehaničkim karakteristikama ziđa proveden je znatan broj ispitivanja kroz dugi niz godina. Najviše pozornosti posvećeno je svojstvu tlačne čvrstoće ziđa, to je i logično s obzirom da je osnovna zadaća ziđa preuzimanje vertikalnog opterećenja. No u potresnim područjima ziđe mora preuzeti i horizontalno opterećenje uslijed potresnog djelovanja. S obzirom da je osnovni cilj ovog rada definiranje potresne otpornosti zidane zgrade, u nastavku su opsežno opisana i druga mehanička svojstva kojima je definirana otpornost ziđa na horizontalno potresno opterećenje.

Kako bi se moglo lakše pratiti sljedeći izrazi i vrijednosti, najprije će se definirati svaka pojedina karakteristika materijala, tako je:

$E$  – kratkotrajni sekantni modul elastičnosti ziđa

G – posmični modul ziđa

w – težina ziđa

f<sub>m</sub> – srednja tlačna čvrstoća morta

τ – prosječno posmično naprezanje

f<sub>k</sub> – karakteristična tlačna čvrstoća ziđa

FC – faktor povjerenja

γ<sub>m</sub> – parcijalni faktor za ziđe

f<sub>vm0</sub> – srednja posmična čvrstoća ziđa pri nultom naprezanju

f<sub>vlim</sub> – granična vrijednost posmične čvrstoće

Ukratko će se opisati izrazi kojima programski paket 3Muri definira posmični slom i slom zbog savijanja u nearmiranom ziđu. Tako je talijanskom normom definirano kako se Turnšek-Čačović metoda proračuna koristi samo za postojeće građevine, što nam daje pravo da ju možemo koristiti. Ovom metodom posmični slom u ziđu određuje se sljedećim kriterijem:

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

Gdje su: b – omjer visine i dužine zida ( $b = h/l$ ,  $1 \leq b \leq 1,5$ )

f<sub>t</sub> i τ<sub>0</sub> – proračunske vrijednosti vlačne čvrstoće u dijagonalnom slomu zida te pripadajuća posmična vrijednost

Mohr-Coulombova metoda proračuna može se primijeniti za postojeće i novoizgrađene konstrukcije, iako je prikladnija za novoizgrađene konstrukcije. Njom se posmični slom u ziđu određuje na sljedeći način:

$$V_u = l' t f_v = l' t (f_{v0} + \mu \sigma_n) = l' t f_{v0} + \mu N \quad (2)$$

Gdje su: l' – duljina tlačnog dijela zida

t – debljina zida

f<sub>v</sub> – posmična čvrstoća ziđa

f<sub>v0</sub> – posmična čvrstoća bez vertikalnog tlačnog opterećenja

μ – koeficijent trenja (najčešće 0,4)

$\sigma_n$ – srednje normalno tlačno naprezanje

Na temelju talijanske norme [9], za nelinearni statički proračun potrebno je posmičnu čvrstoću zida ( $f_v$ ) podijeliti sa faktorom povjerenja (kasnije u radu će biti detaljnije opisan), na taj način se faktorom preko posmične čvrstoće umanjuje cjelokupna potresna otpornost zida.

Maksimalni moment savijanja koji se pojavljuje u makro-elementima proračunskog modela u *3Muri*-ju računa se prema sljedećem izrazu:

$$M_a = \frac{l^2 t \sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{\sigma_0}{0,85 f_m} \right) = \frac{Nl}{2} \left( 1 - \frac{N}{N_g} \right) \quad (3)$$

Gdje su: N – aksijalna tlačna sila (pretpostavljena pozitivna vrijednost u tlačnom području)

$\sigma_0$  – tlačno naprezanje po horizontalnoj površini zida ( $\sigma_0 = N/lt$ )

$f_m$  – prosječna tlačna otpornost zida

Treba napomenuti da se veličina prosječne tlačne otpornosti zida u programu *3Muri* dijeli sa faktorom povjerenja.

### 2.1.5. Tlačna čvrstoća ziđa

Tlačna čvrstoća ziđa ( $f_k$ ) direktan je rezultat kombinacije karakteristika pojedinih materijala od kojih se sastoji ziđe. Kako je već spomenuto, ziđe na promatranj zgradi sastoji se od dvije komponente. U pravilu tlačna čvrstoća zidnih elemenata od kojih je ziđe izvedeno jest veća od tlačne čvrstoće samog ziđa. S druge strane, tlačna čvrstoća morta upotrijebljenog u ziđu može biti znatno manja od tlačne čvrstoće samog ziđa.

Ukoliko je ziđe opterećeno jednoosnim tlakom, eventualni slom dogoditi će se zbog pojave vlačnih naprezanja okomito na smjer glavnih tlačnih naprezanja, ili će se dogoditi posmični slom duž sljubnica koje imaju znatno manju čvrstoću [5]. Kod prvog oblika sloma zbog vlačnih naprezanja pojaviti će se vlačne pukotine u paralelnom smjeru djelovanja opterećenja. Kod drugog oblika sloma dogoditi će se posmični slom u mortu gdje se posljedično formira linija sloma u smjeru djelovanja opterećenja. Može se zaključiti kako je mort osjetljivija komponenta u ziđu te upravo zato teži se tomu da se izbjegne drugi oblik sloma. Osim samih mehaničkih karakteristika morta u sljubnicama, na njegovu otpornost slomu također uvelike utječe i njegova priprema odnosno način izvedbe. Ova tvrdnja potvrđena je eksperimentalno 1971. od strane istraživača Francisa i dr. [10] koji su ustanovili kako je tlačna čvrstoća uzorka ziđa približno dvostruko veća ukoliko su sljubnice dobro pripremljene (zaglađena površina sljubnica) u usporedbi s uobičajenim sljubnicama. Pokazalo se tako da značajnu ulogu imaju deformacijske karakteristike morta što zaključno znači da čim je veći omjer debljine sljubnica i visine zida, time postoji veća mogućnost da se dogodi slom ziđa pojavom vlačnih pukotina u smjeru djelovanja opterećenja.

Karakteristična tlačna čvrstoća ziđa može se odrediti na dva načina, kao rezultat ispitivanja temeljenog na normi HRN EN 1052-1:2004 [11] ili teorijski putem sljedećeg izraza:

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

gdje je:  $f_b$  – normalizirana srednja tlačna čvrstoća zidnih elemenata, u smjeru primijenjenog učinka djelovanja [ $N/mm^2$ ]

$f_m$  – tlačna čvrstoća morta [ $N/mm^2$ ]

$K$  – konstanta koja ovisi o skupini zidnih elemenata te o tome postoje li uzdužne sljubnice

Navedeni izraz rezultat je brojnih ispitivanja, a definiran je normom HRN EN 1996-1-1 2011 [7]. Ovaj izraz predstavlja najrealniju vezu između karakteristične tlačne čvrstoće zida i kombinacije čvrstoća dviju komponenti zida. Treba napomenuti kako ovaj izraz vrijedi samo onda kad je izveden mort opće namjene ili lagani mort. U slučaju kad se izvodi tankoslojni mort u horizontalnim sljubnicama debljine 0,5 do 3,0 mm dok su pritom upotrijebljeni zidni elementi izrađeni od opeke skupine 1 i 4 ili kojeg drugog materijala; vrijedi sljedeći izraz:

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

U drugom slučaju kad je upotrijebljen tankoslojni mort u horizontalnim sljubnicama debljine 0,5 do 3,0 mm dok su pritom upotrijebljeni zidni elementi izrađeni od opeke skupine 2 i 3; vrijedi sljedeći izraz:

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

Što se tiče koeficijenta  $K$ , njegove vrijednosti prikazane su u Tablici 3. Kod debljih zidova (više od jednog zidnog elementa u poprečnom smjeru zida) gdje postoji vertikalna sljubnica koja se prostire duž cijele duljine zida ili većim dijelom duljine zida, vrijednosti koeficijenta  $K$  u Tablici 3. potrebno je pomnožiti s vrijednošću 0,8.

Tablica 3. Vrijednosti faktora  $K$  koje se upotrebljavaju za mortove opće namjene, tankoslojne i lagane mortove [12]

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	*	*
Obradeni prirodni kamen	Skupina 1	0,45	*	*	*
* Kombinacija morta i zidnih elemenata obično se ne upotrebljavaju pa vrijednosti nisu dane					

Prilikom provođenja proračuna karakteristične tlačne čvrstoće potrebno je osigurati nekoliko uvjeta [3], a to su:

- sve sljubnice moraju u potpunosti biti ispunjene mortom
- normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa ( $f_b$ ) ne smije biti veća od 75 N/mm<sup>2</sup>
- tlačna čvrstoća morta ( $f_m$ ) ne smije biti veća od 20 N/mm<sup>2</sup> ni od  $2x f_b$
- tlačna čvrstoća morta ( $f_m$ ) ne smije biti veća od 10 N/mm<sup>2</sup> kad su zidni elementi položeni i lagani mort
- koeficijent varijacije čvrstoće zidnih elemenata ne smije biti veći od 25 %

Kroz ovaj rad upravo će se na temelju navedenog izraza odrediti karakteristična tlačna čvrstoća ziđa, no ukratko će se opisati i druga metoda odredbe to jest putem

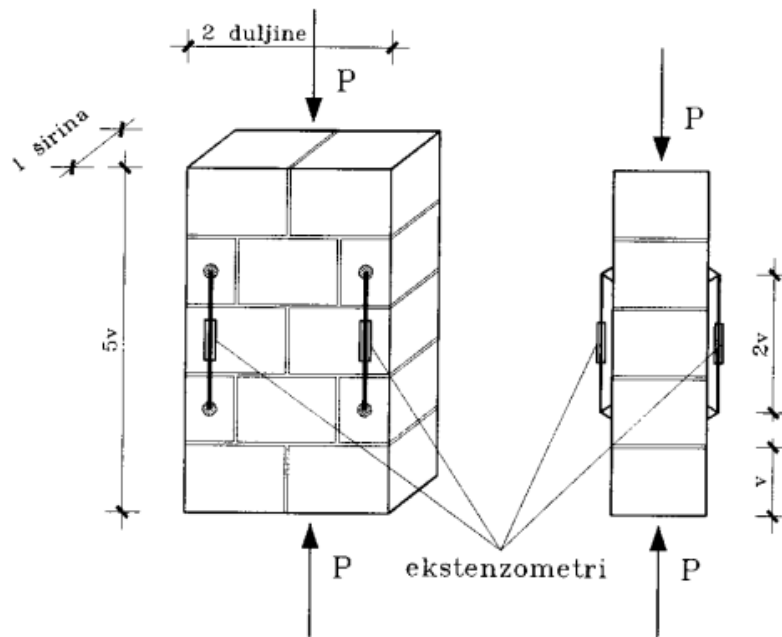
ispitivanja. Eksperimentalno tlačna čvrstoća može se odrediti iz granične čvrstoće zida visine kata ispitanog do sloma ili iz tlačne čvrstoće manjih uzoraka zida [13]. Oba slučaja podrazumijevaju uporabu identičnog materijala koji se nalazi i u konstrukciji, te isti način izvedbe. Dakle, najprije se određuje normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa te se mort sastavlja tako da se svi sastojci prvo važu u suhom stanju tako da odgovaraju projektiranoj vrsti morta. Dimenzije manjih ispitnih uzoraka također su propisane normom HRN EN 1052-1:2004 [11] a prikazane su Tablicom 4.

Tablica 4. Izmjere malih ispitnih uzoraka na ispitivanje tlačne čvrstoće zida [11]

Izmjera lica zidnog elementa		Izmjera ispitnih uzoraka zida			
$l_u$ [mm]	$h_u$ [mm]	Duljina $l_s$	Visina $h_s$		Debljina $t_s$
$\leq 300$	$\leq 150$	$\geq (2l_u)$	$\geq 5h_u$	$\geq 3t_s$ i $\leq 15t_s$ i $\geq 3l_s$	$\geq t_u$
	$> 150$		$\geq 3h_u$		
$> 300$	$\leq 150$	$\geq (1,5l_u)$	$\geq 5h_u$		
	$> 150$		$\geq 3h_u$		

Prateći standarde, potrebno je ispitati najmanje tri uzorka oblika s navedenim dimenzijama. Ispitivanje se vrši nakon 7 ili 28 dana završetka izvedbe uzorka ili kad je postignuta neka određena čvrstoća morta koju želimo ispitati. Prilikom ispitivanja postavlja se ravna čelična ploča ili greda na vrh uzorka kako bi se opterećenje pravilno i ravnopravno nanijelo na uzorak [13]. Potrebno je pripaziti da se opterećenje nanosi centrično na uzorak kako ne bi došlo do neželjene ekscentričnosti, istu stvar treba pripaziti i pri ugradnji uzorka u stroj za ispitivanje. Manji ispitni uzorak zida zajedno sa ekstenzometrima moguće je vidjeti na Slici 3. Ekstenzometri su uređaji koji služe za mjerenje pomaka, zbog njih se osim same tlačne čvrstoće mjeri i relativna deformacija uzorka što omogućuje odredbu modula elastičnosti. Za samu fazu ispitivanja, jedna od najvažnijih čimbenika jest definiranje brzine nanošenja opterećenja, taj podatak opisan je u normi po kojoj se i provodi ispitivanje. U suštini, opterećenje se kontinuirano povećava sve dok ne dođe do tlačnog sloma uzorka.





Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoća ziđa [14]

Za svaki uzorak ziđa izračunava se tlačna čvrstoća te se zaključno odredi srednja vrijednost tlačne čvrstoće ( $f'$ ) kao aritmetička sredina rezultata svih uzoraka. Tlačna čvrstoća pojedinog uzorka proračunava se prema izrazu:

$$f_i = F_{i,\max} / A_i \quad (7)$$

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

$A_i$  – površina opterećenog poprečnog presjeka i-tog uzorka ziđa

Nakon proračuna srednje tlačne čvrstoće, karakteristična tlačna čvrstoća ziđa dobiva se sljedećim izrazom (gdje je mjerodavna manja vrijednost):

$$f_k = f' / 1,2 \text{ ili } f_k = f_{i,\min} \quad (8)$$

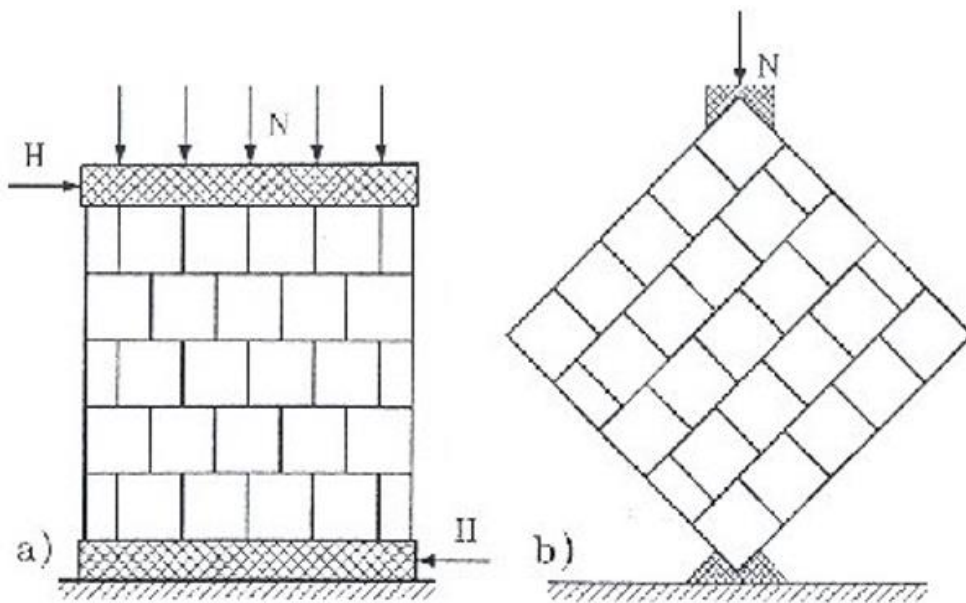
gdje je:  $f'$  – srednja vrijednost čvrstoće ispitanih uzoraka

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

### 2.1.6. Vlačna čvrstoća ziđa

Otpornost ziđa na vlačna naprezanja definirana je čvrstoćom ziđa pri kojoj nastupa vlačni slom dok je ono pritom istovremeno opterećeno vertikalnim i horizontalnim opterećenjem [15]. Takva čvrstoća naziva se referentnom vlačnom čvrstoćom ziđa. Podrazumijeva se kako je vertikalno opterećenje stalno prisutno, što zbog vlastite težine a što zbog preuzimanje opterećenja od primjerice stropova ili krovišta; dok se horizontalno opterećenje pojavljuje povremeno najčešće zbog vjetrova ili potresa. Vlačna čvrstoća relativno je mala u odnosu na druge čvrstoće ziđa, a ponajviše ovisi o adheziji između zidnog elementa i morta. Znatna učinak na adheziju ima vlažnost morta i zidnog elementa, posebnu pozornost trebalo bi obratiti na suhoću opeke i količinu vode prilikom pripreme morta.

Referentna vlačna čvrstoća određuje se na temelju ispitivanja koje se može izvesti na dva različita načina prikazana na Slici 4. Prilikom prvog načina ispitivanja [Slika 4. a)] uzorak ziđa se opterećuje konstantnim vertikalnim tlačnim opterećenjem (sila  $N$ ) i kontinuirano rastućim horizontalnim opterećenjem (sila  $H$ ). Horizontalno opterećenje povećava se sve do pojave dijagonalnog sloma, očekuje se upravo takav slom u smjeru tlačne dijagonale [13].



Slika 4. Ispitivanje referentne vlačne čvrstoće [15]

Na temelju ovakvog oblika ispitivanja autori Turnšek i Čačovič izveli su sljedeći izraz za određivanje vlačne čvrstoće zida ( $f_t$ ).

$$f_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (k * \tau)^2} \quad (9)$$

gdje je:  $\sigma_d$  – prosječno tlačno naprezanje ( $\sigma_d = N/A_m$ )  
 $\tau$  – prosječno posmično naprezanje ( $\tau = H/A_m$ ) pri slomu  
 $k$  – omjer najvećeg i prosječnoga posmičnog naprezanja ( $k=1,5$ )  
 $A_m$  – ploština presjeka zida ( $t*L$ )  
 $L$  – duljina zida  
 $t$  – debljina zida

U drugom načinu ispitivanja vlačne čvrstoće zida prikazanom na Slici 4. b) nanosi se samo jedna sila (sila  $N$ ), to je prikazana vertikalna sila koja djeluje u smjeru dijagonale uzorka zida. Vertikalna tlačna sila postepeno se povećava sve do trenutka pojave dijagonalnog sloma. Na temelju ovakvog načina ispitivanja definiran je sljedeći izraz za vlačnu čvrstoću zida ( $f_t$ ).

$$f_t = \frac{2N}{\pi * t * L * \sqrt{2}} = 0,45 \frac{N}{A_m} \quad (10)$$

gdje je:  $N = N_{max}$  – sila pri slomu

Karakteristične vrijednosti vlačne čvrstoće i ostalih svojstava, ovisno o vrsti zidnog elementa, prikazane su u Tablici 5. Vrijednosti u navedenoj tablici rezultat su istraživanja Građevinskog instituta u Zagrebu i Zavoda za raziskavo materijala in konstrukcij u Ljubljani. Ova tablica poslužiti će kao osnovna podloga odnosno referenca za definiranje mehaničkih svojstva proračunskog modela u programskom paketu *3Muri*. Prikazane vrijednosti definirane su u mjernoj jedinice  $N/mm^2$ .

Tablica 5. Karakteristične vrijednosti mehaničkih svojstava zida [13]

Zidni element	f	f <sub>m</sub>	f <sub>k</sub>	G	E	f <sub>tk</sub>
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 cm	-	5	-	-	-	0,30
Kameno ziđe, grubo klesano, t=45 cm	-	5	-	-	-	0,25
Plinobetonski	3,5	2,5	-	-	-	0,10
Porasti beton, tankoslojni beton	>2	10	-	-	-	0,08

### 2.1.7. Posmična čvrstoća zida

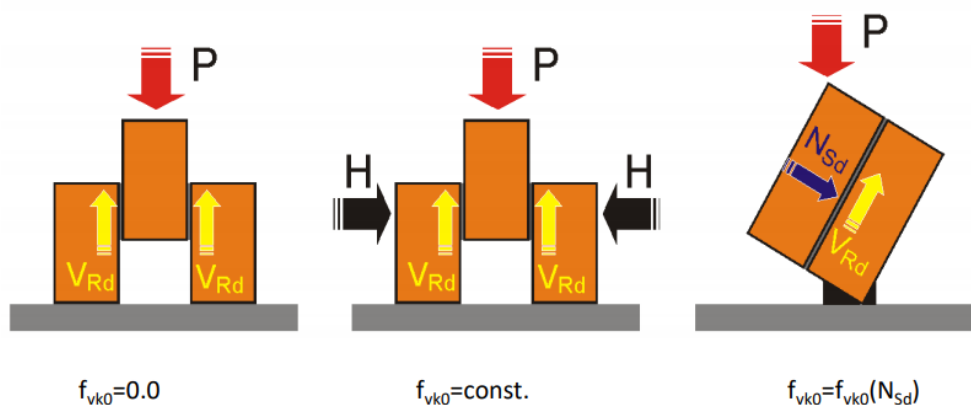
Posmična čvrstoća zida predstavlja jednu od glavnih komponenti otpornosti zida na horizontalno djelovanje. Što se posmika tiče, najslabija komponenta zida uslijed horizontalnog opterećenja jest mort odnosno povezanost morta i zidnih elemenata. Mort sudjeluje u nosivosti svojom posmičnom čvrstoćom koja se interpretira kao početna posmična čvrstoća zida ( $f_{vk0}$ ). Na posmičnu čvrstoću zida povoljno djeluje vertikalno opterećenje kojeg zide preuzima. Ova pojava može se uzeti u obzir prilikom proračuna no treba pripaziti da se uzima vrijednost vertikalnog opterećenja u stanju uporabe [5].

Vrijednost posmične čvrstoće zida može se dobiti na dva načina, eksperimentalno kao rezultat ispitivanja ili računski putem proračuna temeljenog na normi HRN EN 1996-1-1:2012 [7]. Ispitivanje se može izvoditi laboratorijski na pripremljenim uzorcima prema načelima norme HRN EN 1052-3:2004 [16] ili *in-situ* na samom zidu koji promatramo. Ukoliko se izvodi uzorak zida, on mora biti duljine između 40 i 70 cm te mu visina mora biti najmanje dvaput veća od debljine. Također mora biti zadovoljen uvjet ispunjenja sljubnica mortom. Ispitivanje posmične čvrstoće na temelju izrađenog uzorka prikazano je na Slici 5. Na temelju ispitivanja, posmična čvrstoća proračunava se izrazom:

$$f_{vi} = \frac{F_{i,max}}{2 * A_i} \quad (11)$$

gdje je:  $F_{i,max}$  – vertikalna posmična sila pri slomu

$A_i$  – površina horizontalnog presjeka ispitnog uzorka



Slika 5. Ispitivanje posmične čvrstoće zida [17]

Ukoliko nije moguće provesti ispitivanje i tako dobiti vrijednost karakteristične posmične čvrstoće, onda se ona može odrediti računski. Osnovni preduvjet za računsko određivanje posmične čvrstoće jest sigurnost da su sve horizontalne i vertikalne sljubnice u potpunosti ispunjene mortom. Karakteristična posmična čvrstoća zida ( $f_{vk}$ ) definirana je kao manja vrijednost od sljedećih.

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_d \text{ ili } f_{vk} = 0,065 f_b \quad (12)$$

gdje je:  $f_{vk0}$  – karakteristična početna posmična čvrstoća kad je  $\sigma_d=0$ , ako ne postoje eksperimentalno dobiveni rezultati za  $f_{vk0}$ , uzimaju se vrijednosti iz EN 1996-1-1

$\sigma_d$  – proračunsko vertikalno tlačno naprezanje u zidu

$f_b$  – normalizirana tlačna čvrstoća zidnog elementa

U slučaju kada početna posmična čvrstoća  $f_{vk0}$  nije određena eksperimentalno, može se uzeti minimalna vrijednost 0,1 N/mm<sup>2</sup>. No, u slučaju kad je poznata vrsta zidnog elementa i morta moguće je uzeti vrijednosti početne posmične čvrstoće iz Tablice 6.

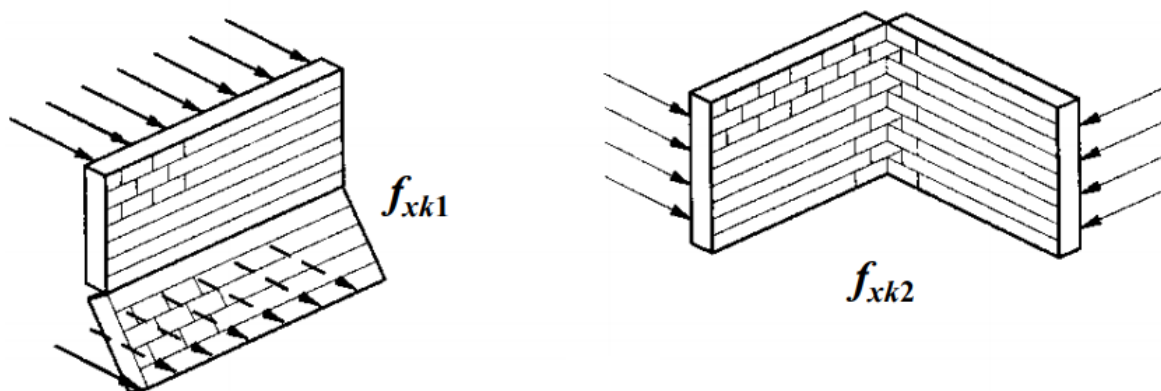
Tablica 6. Vrijednosti početne posmične čvrstoće zida [7]

Zidni element	$f_{vk0} (N/mm^2)$			
	Mort opće namjene		Lagani mort	
		Tankoslojni mort (debljine horizontalnih sljubnica $\geq 0,5$ mm i $\leq 3,0$ mm)		
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		
Kameni	M1-M2	0,10		

### 2.1.8. Čvrstoća zida na savijanje

Karakteristična čvrstoća zida na savijanje dijeli se zapravo na dvije različite čvrstoće ovisno oko koje osi se događa savijanje. Dakle razlikujemo savijanje oko horizontalne osi duž smjera zida ili savijanje oko vertikalne osi koja se nalazi u sredini debljine zida kako je to i prikazano na Slici 6. Na temelju navedena dva načina savijanja, posljedično se javljaju pripadajuće karakteristične čvrstoće zida na savijanje [3], to su dakle:

- karakteristična čvrstoća na savijanje uslijed sloma u ravnini paralelnoj s horizontalnim sljubnicama morta ( $f_{xk1}$ )
- karakteristična čvrstoća na savijanje uslijed sloma u ravnini okomitoj s horizontalnim sljubnicama morta ( $f_{xk2}$ )



Slika 6. Ravnine sloma zida prilikom njegovog savijanja [3]

Vrijednosti ovih čvrstoća mogu se dobiti provedbom eksperimentalnih ispitivanja prema načelima definiranim u normi HRN EN 1052-2:2016/Ispr.1:2017 [18; 19]. Ukoliko nije moguća provedba ispitivanja te posljedični dobitak rezultata, vjerodostojne vrijednosti karakteristične čvrstoće zida na savijanje definirane su Tablicom 7. i Tablicom 8. Treba spomenuti da se čvrstoća na savijanje primjenjuje samo u proračunima zidova gdje je mjerodavno kratkotrajno opterećenje poput primjerice opterećenja vjetrom ili potresom.

Tablica 7. Vrijednosti  $f_{xk1}$  za ravninu sloma usporednu s horizontalnim sljubnicama [7]

Zidni elementi	$f_{xk1}$ (N/mm <sup>2</sup> )			
	Mort opće namjene		Tankoslojni mort	Lagani mort
	$f_m < 5$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m \geq 5$ N/mm <sup>2</sup>		
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

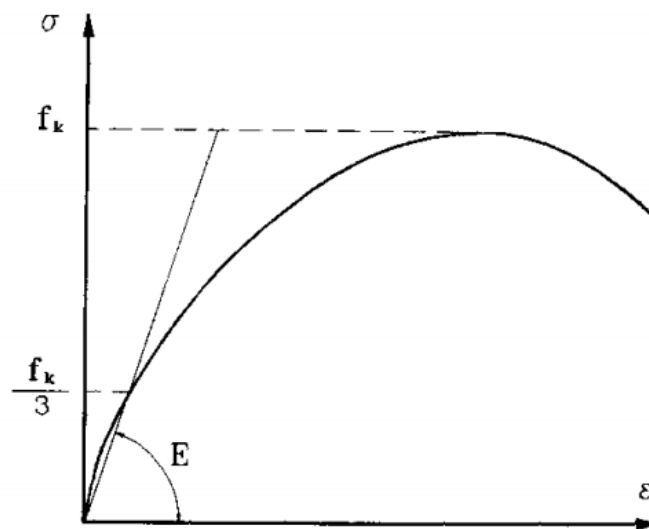
Tablica 8. Vrijednosti  $f_{xk2}$  za ravninu sloma okomitu na horizontalne sljubnice [7]

Zidni elementi		$f_{xk2}$ (N/mm <sup>2</sup> )			
		Mort opće namjene		Tankoslojni mort	Lagani mort
		$f_m < 5$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m \geq 5$ N/mm <sup>2</sup>		
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	$\rho < 400\text{kg/m}^3$	0,20	0,20	0,20	0,15
	$\rho \geq 400\text{kg/m}^3$	0,20	0,40	0,30	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



### 2.1.9. Modul elastičnosti i posmika zida

Modul elastičnosti može se odrediti eksperimentalnim ispitivanjima no češća je praksa da se određuje iz dijagrama naprezanje – deformacija ili iz izraza definiranim u normi HRN EN 1996-1-1:2012 [7]. Na temelju spomenutog dijagrama sekantni modul elastičnosti određuje se za 1/3 tlačnog opterećenja kod kojeg je došlo do sloma zidnog uzorka, Slika 7.



Slika 7. Dijagram naprezanje – relativna deformacija [7]

Drugi način odredbe modula elastičnosti jest računski putem izraza definiranog u navedenoj normi, a on glasi:

$$E = K_e * f_k \quad (13)$$

Veličina  $f_k$  već je poznata kao karakteristična tlačna čvrstoća zida, dok faktor  $K_e$  uspostavlja vezu između modula elastičnosti i karakteristične tlačne čvrstoće [5]. U navedenoj normi definirana vrijednost faktora  $K_e$  iznosi 1000.

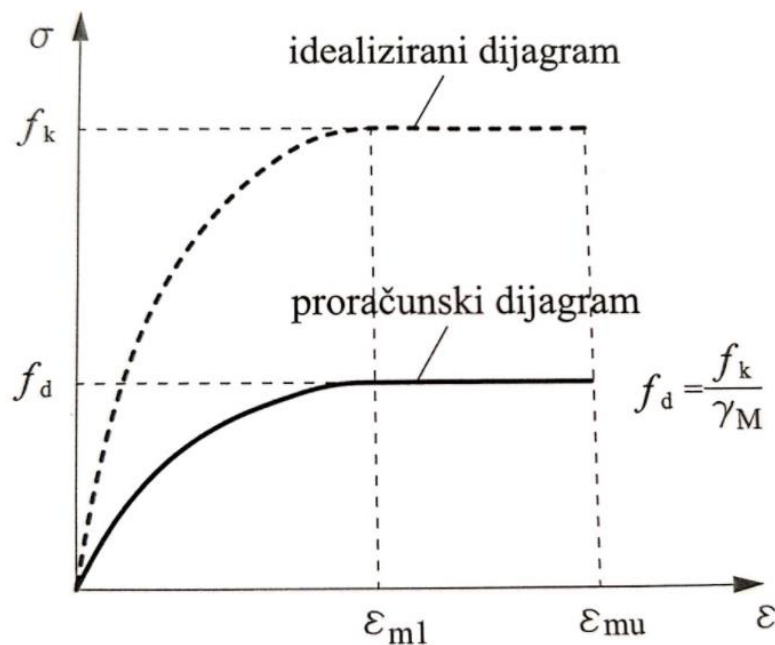
Što se tiče modula posmika ( $G$ ), on se definira kao 40 % vrijednosti modula elastičnosti  $E$  (ukoliko se radi o statičkom opterećenju). Prilikom proračuna potresnog djelovanja na zgradu, vrijednost modula posmika smanjuje se na način da se izračunava prema sljedećem izrazu [7]:

$$G = 0,167 E \quad (14)$$

Deformacijska svojstva definirana su na temelju talijanske norme NTC 2018 – Circolare 21 [9]. Navedena talijanska norma definira modul elastičnosti za stare opeke u mortu opće namjene  $E = 1200-1800 \text{ N/mm}^2$  te modul posmika  $G = 400-600 \text{ N/mm}^2$ . Navedene vrijednosti rezultat su novijih istraživanja te će se koristiti za proračune konstrukcije u ovom radu.

### 2.1.10. Odnos naprezanja i relativne deformacije

Odnos naprezanja ( $\sigma$ ) i relativne deformacije ( $\epsilon$ ) kod ziđa najlakše je opisati pomoću dijagrama prikazanog na Slici 8. Na slici se mogu uočiti dva dijagrama, idealizirani dijagram koji odgovara karakterističnoj tlačnoj čvrstoći ziđa i proračunski dijagram koji odgovara proračunskoj tlačnoj čvrstoći ziđa [5]. Proračunska tlačna čvrstoća dobiva se tako što se karakteristična čvrstoća umanjuje parcijalnim koeficijentom za materijal ( $\gamma_M$ ), vrijednosti ovog koeficijenta dane su Tablicom 9. Prilikom proračuna graničnog stanja nosivosti ziđa, kao proračunska otpornost može se upotrijebiti površina ispod parabole i pravokutnika iz dijagrama  $\sigma - \epsilon$ .



Slika 8. Dijagram naprezanje - relativna deformacija [7]

Tablica 9. Vrijednosti parcijalnog koeficijenta za materijale [7]

	Materijal	$\gamma_M$		
		Razred izvedbe		
		1	2	3
	<b>Ziđe izvedeno od:</b>			
A	zidnih elemenata kategorije I. i projektiranog morta <sup>a</sup>	1,5	2,0	2,5
B	zidnih elemenata kategorije I. i morta zadanog sastava <sup>b</sup>	1,7	2,2	2,7
C	zidnih elemenata kategorije II. i bilo kojeg morta <sup>a,b,e</sup>	2,0	2,5	3,0
	<b>Čelični dijelovi</b>			
D	sidra od čelika za armiranje	1,7	2,2	2,7
E	čelik za armiranje i čelik za prednapinjanje	1,15		
F	pomoćni dijelovi <sup>c,d</sup>	1,7	2,2	2,7
	<b>Nadvoji</b>			
G	nadvoji u skladu s normom HRN EN 845-2	1,5 do 2,5		
<sup>a</sup> Zahtjevi za projektirani mort dani su u normama HRN EN 998-2 i HRN EN 1996-2. <sup>b</sup> Zahtjevi za mort zadanog sastava dani su u normama HRN EN 998-2 i HRN EN 1996-2. <sup>c</sup> Objavljene vrijednosti su srednje vrijednosti. <sup>d</sup> Pretpostavlja se da su sljubnice za sprečavanje vlage obuhvaćene koeficijentom $\gamma_M$ za ziđe. <sup>e</sup> Vrijedi ako koeficijent varijacije zidnih elemenata kategorije II. nije veći od 25 %.				

## **2.2. Drveni stropovi**

### **2.2.1. Općenito o drvenim stropnim konstrukcijama**

Drveni stropovi su tradicionalne stropne konstrukcije kakve možemo naći u starijim zidanim zgradama. Za opis stropne konstrukcije poslužila je knjiga Đure Peulića, „Konstruktivni elementi zgrada – Drugi dio“ [20]. Drveni stropovi su najstarija i kroz vrijeme najčešće primjenjivana stropna konstrukcija. Sa mjesta prve opcije stropne konstrukcije na ovim prostorima izbačeni su tek tridesetih godina prošlog stoljeća, tada je krenula masovnija uporaba konstruktivnih elemenata od armiranog betona. Postoje razne karakteristične vrste drvenih stropova, a u nastavku se opisuje tradicionalni sustav stropa s običnim drvenim grednikom.

Kako bi se mogli definirati određeni detalji navedene stropne konstrukcije, najprije je potrebno definirati neke općenite glavne osobine stropova te sastavne dijelove drvenih stropova. Primarni zahtjev za strop je taj da mora biti čvrst, dakle mora biti u stanju podnijeti predviđena opterećenja bez da se pritom izobličuje, savija ili pak puca. Uslijed različitog promjenjivog opterećenja na njega primjerice hod ljudi po njemu, on se ne smije tresti ili ljuljati. Uz ove konstrukcijske zahtjeve treba zadovoljiti i zahtjeve građevinske fizike te trajnosti. Tako strop mora biti i gust kako bi što bolje sprječavao propuštanje zraka, plinova i topline. Uz ulogu toplinskog izolatora, mora odigrati i ulogu izolatora zvuka. Na posljetku treba zadovoljiti i zahtjev trajnosti kako bi životni vijek stropne konstrukcije bio što dulji.

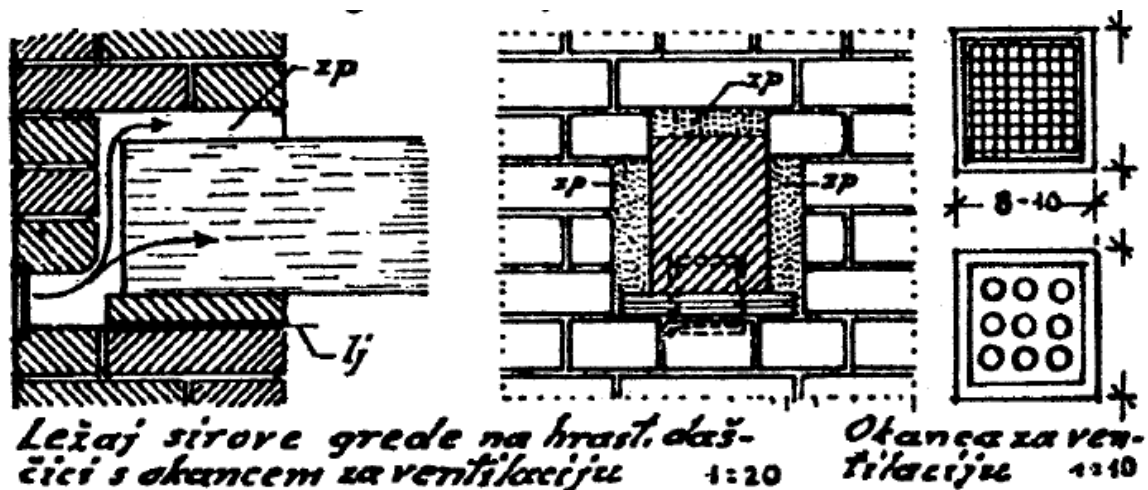
Glavni nosivi elementi stropne konstrukcije su grede ili platice koje raspoređene na potrebnom razmaku te zajedno povezane s drugim dijelovima tvore drveni grednik. Donja površina grednika zatvara se ili se obrađuje na način da se zadovolje svi estetski, higijenski i praktični zahtjevi. Ova donja površina stropa naziva se plafon te je u gotovoj prostoriji vidljiva s nižeg kata. Gornja površina stropa naziva se pod naravno, u gotovoj prostoriji ta je površina vidljiva s gornjeg kata. Na tu površinu najčešće se postavlja parket, laminat ili pak pločice kako bi se moglo lako kretati, a da pritom i estetski izgleda zadovoljavajuće. Kako bi se riješili problemi toplinske i zvučne izolacije, često se između poda i plafona gredniku dodaju nasipi ili neki drugi elementi dobrih izolacijskih svojstava.

### **2.2.2. Drveni grednik**

Za drvene grede se u pravilu koristi samo drvo jele i smreke, dok je druge vrste drva bolje upotrebljavati u druge svrhe. Prije svega, stropne grede moraju biti zdrave i žilave, ne smiju posjedovati nikakve deformacije, oslabljenja i slično. Postoji nekoliko skupina drvenih greda koje su se nekad učestalo upotrebljavale, a to su: masivne grede, uske grede, grede od platica i sastavljene grede.

Pri projektiranju ovakvih stropova, najprije se označuju uzdužne osi završnih greda. Završne grede su one grede koje se protežu uz zabatne zidove i druge nosive zidove koji su paralelni sa zabatnima. Takve završne grede ne bi se trebale pritisnuti uza sam zid, već bi se trebale odmaknuti od njega 2 do 4 cm. Iz zabatnog ili nosivog zida izvodi se onda jedan sloj opeke istaknut prema gredi tih 2 do 4 cm, razlog tomu je dobro ukrućenje zida te sprječavanje osipavanja nasipa iz stropne konstrukcije.

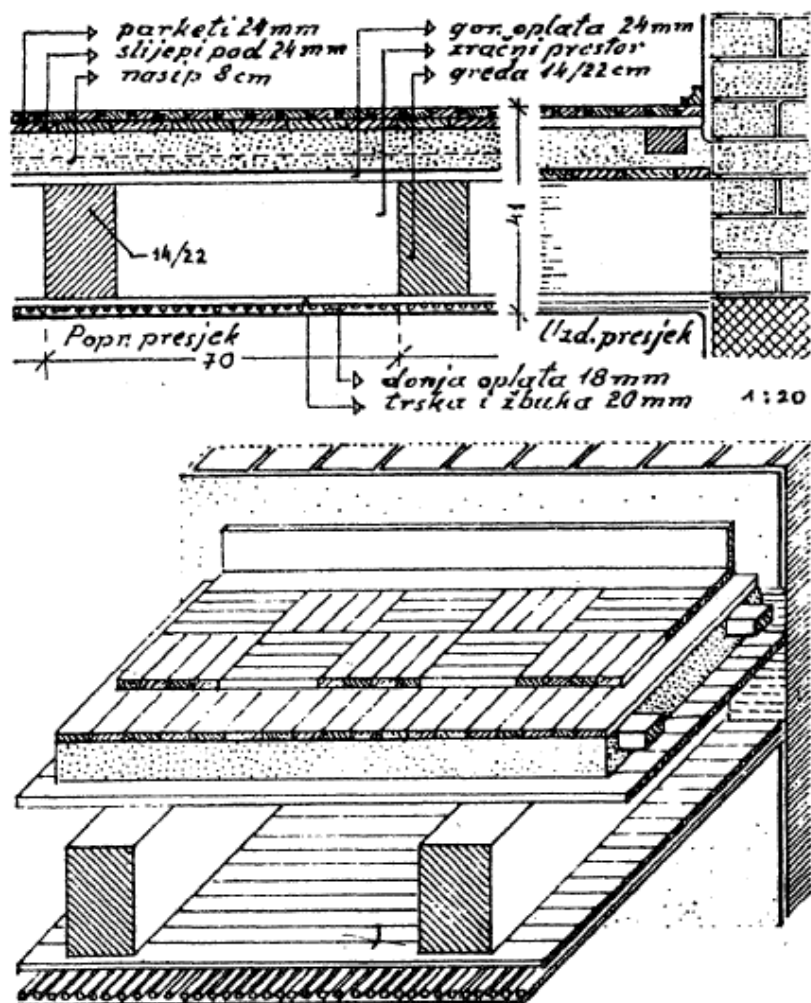
Staro zanatsko pravilo kaže da se greda mora osloniti na zid onoliko kolika je visina grede. Greda se ne oslanja direktno na ziđe, već se ovdje koristi podložak u obliku hrastove daščice. Drvo hrasta vrlo dobro podnosi vlagu te se iz tog razloga postavlja kao podložak grede, svrha mu je da preuzme vlagu iz zida i ne dopusti da ta vlaga dođe do grede. Hrastova daščica mora biti 2 do 3 centimetara šira od rubova grede. Prilikom zidanja u istom tom razmaku ostavlja se zračni prostor duž cijele visine grede kako bi se mogla slobodno širiti i skupljati uslijed temperaturnih promjena, ali i kako bi se mogla ventilirati da ne dođe do zasićenja vlage. Dakle drvena greda dimenzija 18x22 cm oslanja se na zid u duljini od 22 cm te se i s te strane ostavlja slobodnih 3 cm u zidu. Tim rečeno, ukupna udubina otvora u nosivom zidu debljine 50 cm iznosi 25 cm, dok je širina te udubine 24 cm. Vizualni prikaz opisanog spoja prikazan je na Slici 9.



Slika 9. Oslanjanje drvenog grednika [20]

Prethodni odlomak odnosi se na oslanjanje greda na vanjske zidove. Oslanjanje drvenih greda nad srednjim nosivim zidom izvodi se tako da se grede moraju međusobno sudariti, dok su pritom povezane odgovarajućim priloškom, najčešće čeličnim. Kod ovakvog oblika oslanjanja također treba pripaziti na zahtjeve zračnog prostora i odgovarajućeg podloška.

Uz spomenuta sidrenja grede u vanjske nosive zidove te njihovo sidrenje i međusobno povezivanje nad srednjim nosivim zidom, ispravno je gredu povezati i s bočnim odnosno zabatnim zidovima. Takvo povezivanje kod starijih se zgrada izvodilo metalnim sponama i zasunima na međusobnom razmaku od otprilike 1,5 m.



Slika 10. Strop s običnim grednikom, s gornjom oplatom na gredama [20]

### 2.2.3. Drveni podovi

Drveni podovi učestalo su izvođeni zbog dobrih mehaničkih svojstava kao primjerice dobra čvrstoća i elastičnost, mala težina a pritom ih krasi i lagana obradljivost. Drveni pod se može izvoditi neposredno na drvenim gredama no s obzirom da je funkcija promatrane zgrade stambena, potrebno je izvesti još koji sloj da se zadovolje uvjeti građevinske fizike.

Dakle, na drvene grede postavlja se gornja oplata koja se interpretira kao drvene daske debljine 24 mm. Gornja oplata se u ovom slučaju izvodila najjednostavnijim načinom, to jest da su se daske pribile izravno na gornje površine greda. U pravilu se navedeno



pribijanje dasaka na grede vršilo s pomoću dva čavla na svakom kraju daske. Sudaranje dasaka na gredama izvodilo se tako da to nije bio tijesan spoj, dakle bilo je potrebno omogućiti daskama slobodno širenje i skupljanje uslijed utjecaja temperature i vlage. U suprotnom može doći do progiba i izvijanja pa čak i do pucanja tih dasaka.

Kako bi se ostvarila zadovoljavajuća toplinska i zvučna izolacija stropne konstrukcije, koja je svakako bila i ostala potrebna u stambenoj zgradi, na gornjoj se oplati izvodio nasip od šljake debljine 80 mm. Osim primarne svrhe nasipa za toplinsku i zvučnu izolaciju, nasip također služi da jednoliko prenosi opterećenja poda na gornju oplatu, pa ove na grede; uz to daje i odličnu nepropusnost stropa te zaštitu od vatre. Često korišteni materijali za nasipe, prvotno zbog male cijene i lake dostupnosti, bili su pijesak, gruha i šljaka. Koji god od navedenih materijala da se koristio morao je zadovoljiti uvjet granuliranosti tako da se najveće dimenzije pojedinih zrna kreću između 0,5 i 25 mm. Razlog tomu je što se dobiva čvrsta masa sa odličnim izolacijskim svojstvima. Dakako, materijal je također morao biti potpuno čist i suh, nikako nije smio sadržavati bilo kakve organske tvari jer bi u suprotnome došlo do pojave truljenja drvenih dijelova. Za promatranu zgradu uzima se pretpostavka da je nasip izveden od šljake. Šljaka ili drozga, zgura predstavlja ostatak koji nastaje pri proizvodnji željeza u visokim pećima. Kako bi se šljaka oslobodila zaostalih kemijskih sastojaka, koji su potencijalna opasnost za drvo, ona mora bar jednu godinu odležati pod utjecajem atmosferilija. Šljaka mora biti čista, suha i granulirana te kao takva pruža odlična izolacijska svojstva, bolja od pijeska, gruhe i nekih drugih materijala koji se koriste za nasip.

U gornjoj zoni nasipa postavljaju se blazinice presjeka 76x48 mm na međusobnom razmaku od 80 cm. Svrha blazinica jest mogućnost pribijanja slijepog poda na njih, bez njih slijepi pod se ne bi mogao fiksirati na nasip. Spomenuti slijepi pod se najčešće slagao od jelovih dasaka debljine 24 mm te služio kao podloga za parketne daščice, one su pak debljine 14 mm. Daske slijepog poda prije samog pribijanja morale su se bočno podbijati na način da se postavljao par klinova između sudarne strane daske i čeonu strane pijavice, te se zatim ručnim alatima podbijala navedena pijavica.

Hrastove parketne daščice proizvode se u nekoliko različitih varijanti, a u ovom radu pretpostaviti će se da su na promatranj zgradi izvedene daščice karakteristične po peru na jednoj bočnoj i jednoj čeonj strani, a s utorom na suprotnoj bočnoj i suprotnoj

čeojoj strani. Od spomenutih različitih varijanti, ova varijanta je najčešće viđena u stambenim zgradama. Duljina ovih daščica kreće se između 200 i 500 mm, dok se dimenzija širine kreće između 26 i 65 mm. Uz zidove odnosno na rubovima parketnih podova potrebno je bilo pribiti kutne letvice parketa. Treba spomenuti još da se parketne daščice mogu polagati na razne načine to jest u različitim smjerovima tvoreći tako različite slike.

#### ***2.2.4. Plafoni drvenih stropova***

Izvedba plafona (ili podgleda) drvenih stropova može se podijeliti na dva načina: prvi način podrazumijeva da im je površina ravna, dok drugi način označava neravnu površinu što u principu podrazumijeva stropove s vidljivim gredama. Ukoliko se radi o vidljivim gredama, one moraju biti bolje obrađene primjerice izblanjane ili pak obložene s nečim. Ravna površina plafona izvodi se pribijanjem obrađenih dasaka koje su međusobno povezane. Svaka daska pribijena se s najmanje dva čavla na svaku gredu te pritom postoji razmak između susjednih dasaka od 1 do 2 cm. Ovaj sloj dasaka ispod greda se često naziva donjom oplatom. Donja oplata izvodi se najčešće od jelovih dasaka debljine 18 mm.

Na donju stranu donje oplata bilo je potrebno izvesti odgovarajući nosilac žbuke, preko kojeg bi se izvodila žbuka. Tradicionalno se tako na donju oplatu fiksirala jednostruka trska koja djeluje kao nosilac žbuke, žbuka je gruba i fina vapnena. Trska se tretira kao nosilac jer se plafonska žbuka može pouzdano zadržati na njoj, bez trske plafonska žbuka bi se zadržavala na piljenoj površini greda i dasaka koje jesu čak i hrapave, no ne u toj mjeri da bi pružale dovoljnu pouzdanost. Trska se nalazila u obliku plahte duge do 10 m, na njoj su se nalazile oko 2,5 m duge suhe, zdrave i oljuštene trske promjera 8 do 10 mm. Pojedine trske međusobno su povezane u poprečnom smjeru pocinčanom ili paljenom žicom. Preko ove žice pribijali su se na donju oplatu posebnim štukaturnim čavlima.

Nakon što bi se izveli svi ostali radovi na donjoj oplati kao što su primjerice izvedba vodova električne struje, kuka za vješanje težih svjetiljki i slično, krenulo bi se sa žbukanjem plafona. Naravno, prije samog žbukanja bilo je potrebno dobro očistiti podlogu za žbukanje, a zatim i dobro nakvasiti istu podlogu kako suho drvo ne bi upilo vodu iz morta. Najprije se izvodila gruba žbuka, najčešće kao vapneni mort smjese 1:1 (0,55 m<sup>3</sup> gašenog vapna i 0,55 m<sup>3</sup> oštrog pijeska uz 140 l/m<sup>3</sup> vode). Ona je osiguravala dobru vezu s nosiocem žbuke te nakon što bi ona očvrsnula nabacila bi se i zagladila fina žbuka. Zanimljiv podatak je da se u smjesu znala dodavati svinjska dlaka s ciljem mikroarmiranja i boljeg povezivanja s finom žbukom. Fina žbuka najčešće je bila vapneni mort smjese 1:2 (0,40 m<sup>3</sup> gašenog vapna i 0,80 m<sup>3</sup> pijeska uz 160 l/m<sup>3</sup> vode).

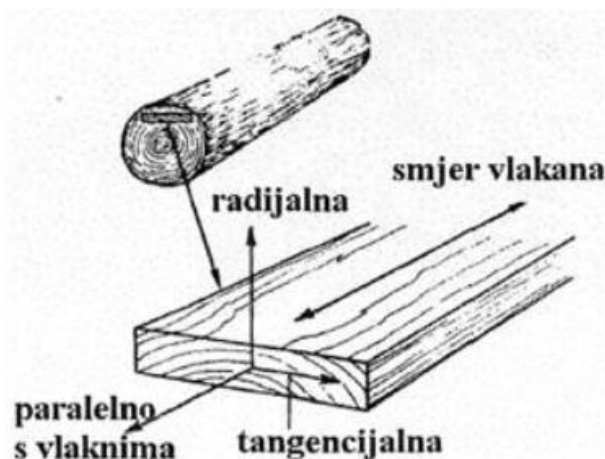
Treba spomenuti da se između gornje i donje oplata, s bočnih strana greda nalazi slobodni zračni prostor.

### 2.2.5. Modul elastičnosti drva

Drvo kao materijal odlikuje se anatomskom građom gdje se ističu svojstva anizotropnosti, nehomogenosti, stanične građe, vlaknaste strukture te poroznosti, apsorpcije, dimenzijskih i volumnih promjena i sl. Sve ove karakteristike drva uvjet su činjenici da modul elastičnosti ne može biti jednoznačna vrijednost za sam materijal drva, već ovisi o brojnim faktorima [21]. Faktori o kojima ovisi modul elastičnosti drva su sljedeći:

- Struktura drva
- Vrsta drva
- Smjer vlakanaca
- Oblik presjeka
- Volumna težina
- Sadržaj vode
- Temperatura

Navedeni faktori razlog su zašto se kod drva definira tri modula elastičnosti ( $E_L$ ,  $E_T$ ,  $E_R$ ) ovisno o promatranoj glavnoj osi [22]. Glavne osi drva za koje se iskazuju različita mehanička svojstva, pa tako i modul elastičnosti, prikazane su na Slici 11.



Slika 11. Glavne osi drva [23]

Modul elastičnosti u smjeru vlakanca ( $E_L$ ) odnosno uzdužnom smjeru odlikuje se najvećom vrijednošću te je isto tako najbolje istražen. Njegova vrijednost u pravilu se kreće između 3 000 i 25 000 N/mm<sup>2</sup>. Vrijednost modula elastičnosti u radijalnoj

ravnini kreće se unutar granica  $1/6$  do  $1/23 E_L$ , dok se vrijednost modula elastičnosti u tangencijalnoj ravnini kreće između  $1/23$  do  $1/40 E_L$ .

Sudeći po službenim normama po kojima se proračunavaju drvene konstrukcije, mjerodavni su moduli elastičnosti u samo dva smjera [24], uzdužnom ( $E_0$ ) i poprečnom ( $E_{90}$ ). Mjerodavni moduli elastičnosti u uzdužnom i poprečnom smjeru koji odgovaraju pripadajućim razredima cjelovitog drva prikazani su u Tablici 10. Na navedenoj tablici oznaka „0“ u indeksu označava  $0^\circ$  u odnosu na smjer vlakanca, a oznaka „90“ označava kut od  $90^\circ$ . U ćelijama s modulom elastičnosti, u indeksu su također vidljive i oznake „mean“ koje u prijevodu predstavljaju srednju vrijednost, te „05“ koje predstavljaju karakterističnu vrijednost.

Konstruktivski drveni elementi rađeni od cjelovitog drva (koje se smatra mekim) označavaju se velikim slovom „C“ iza kojeg slijedi brojka koja predstavlja karakterističnu čvrstoću na savijanje [21]. Čvrstoća na savijanje ovisi o kvaliteti drvenog elementa pa tako drvene konstrukcijske elemente smatramo nisko, srednje i visoko kvalitetnima.

Tablica 10. Razredi mekog cjelovitog drva [25]

	<b>C14</b>	<b>C16</b>	<b>C18</b>	<b>C20</b>	<b>C22</b>	<b>C24</b>	<b>C27</b>	<b>C30</b>	<b>C35</b>	<b>C40</b>	<b>C45</b>	<b>C50</b>
$f_{m,k}$ (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
$\rho_k$ (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

Drveni grednik naravno ne definira cijelu stropnu konstrukciju, no on ipak predstavlja glavni nosivi element u sklopu. Iz tog su razloga najvažnija njegova mehanička svojstva,

ponajviše modul elastičnosti. No osim drvenog grednika, u stvarnosti se pojavljuje još konstrukcijskih elemenata koji doprinose nosivosti i krutosti stropne konstrukcije. Dakako, osvrnuvši se na programski paket *3Muri* i njegovu metodu proračuna stropne konstrukcije, ona se definira kao sklop drvenih grednika spojenih s jednodaščanom oplatom. Dakle, gledavši *3Muri* uz drveni grednik važan element predstavlja sloj dasaka.

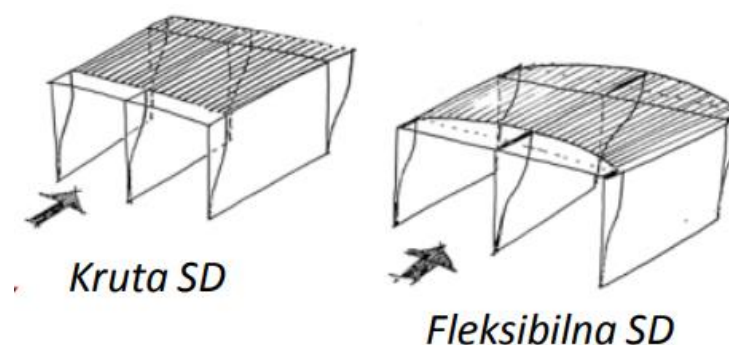
### **2.2.6. Modul posmika drva**

Modul posmika, ili modul klizanja i Coulombov modul kako ga još nazivaju, predstavlja omjer posmičnog naprezanja i posmične deformacije. Dakle, modulom posmika definira se konstanta proporcionalnosti između posmičnih naprezanja i posmičnih deformacija. Ovo je u pravilu opće obrazloženje modula posmika za bilo koji materijal, no isti naravno vrijedi i za drvo. U drvu modul posmika definira otpornost prema naprezanju u određenoj ravnini [21]. Detaljniji opis modula posmika u pojedinim ravninama te pojedinih konstrukcijskih elementa prikazan je u Poglavlju 4.3.2.

### 2.2.7. *Krutost stropne konstrukcije*

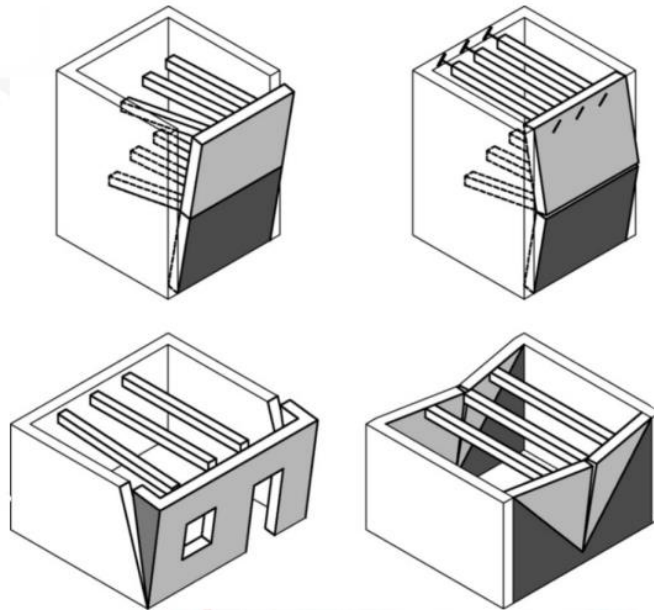
U potresnom odzivu konstrukcije važnu ulogu ima krutost konstrukcije. Osnovni cilj kod stropnih konstrukcija u zidanim zgradama jest postići njihovo kruto djelovanje kako bi zajedno sa zidovima tvorili „kutijasti“ konstrukcijski sustav [26]. Osim dostatno krutih elemenata, takav sustav podrazumijeva naravno i dobre veze tih elemenata koje mogu na siguran način pretrpjeti potresne sile. Takozvanu „kutiju“ u najjednostavnijem obliku formiraju četiri zida koji se pružaju u dva međusobno okomita smjera, nad njima se nalazi „poklopac kutije“ u obliku stropne konstrukcije.

U potresu se dakle ubrzanje tla interpretira kao ubrzanje koncentrirane mase koja zapravo predstavlja stropnu konstrukciju. Stoga masa stropne konstrukcije direktno uvjetuje veličini potresne sile, dakle veća masa znači i veća sila. Kako bi se ta sila sigurno prenijela na zidove istog usmjerenja kao i sila, potrebna je kruta stropna konstrukcija [21]. Stropna konstrukcija trebala bi predstavljati krutu stropnu dijafragmu koja se neće savijati izvan ili pak unutar svoje ravnine (Slika 12.) te tako izazivati neravnomjernu raspodjelu bočnih sila. Fleksibilne stropne konstrukcije mogu dovesti do porasta ubrzanja samog stropnog sustava pa tako i nosivih zidova. Tradicionalne drvene stropne konstrukcije smatraju se fleksibilnim stropnim dijafragmama. Uslijed takvih konstrukcija te neprikladno izvedenih priključaka između zidova i stropa može doći do jednog od oblika urušavanja zida izvan svoje ravnine prikazanih na Slici 13.



Slika 12. Horizontalno pomicanje krute i fleksibilne stropne dijafragme [21]





Slika 13. Oblici urušavanja zidova izvan svoje ravnine [26]

Krutost samog tradicionalnog drvenog stropa definirana je modulima elastičnosti, posmika te dimenzijama i mehaničkim svojstvima stropnih elemenata. Tradicionalne drvene stropne konstrukcije dakako nisu ortotropne pa krutost nije jednoznačna za smjer u kojem se pružaju grede i okomiti smjer na grede [26]. Naravno da je puno veća krutost stropa u smjeru pružanja njegovih greda, upravo tako je definirano i u programskom paketu *3Muri*. Program *3Muri* interpretira stropnu konstrukciju kao homogenu horizontalnu ploču sa definiranim parametrima debljine, modula posmika, modula elastičnosti u dva smjera te Poissonovim koeficijentom. Navedeni parametri mogu se vidjeti u Poglavlju 4.4.2. na Slici 39. pod naslovom „Computed values“. Sagledavši drvenu stropnu konstrukciju prikazanu u Poglavlju 2.2., najrealnija interpretacija takvog stropa koju možemo definirati u *3Muri*-ju jest jednoslojni daščani pod na drvenim grednicima. Takav oblik stropa u programu obilježen je standardnom debljinom  $t = 40$  mm, modulom posmika  $G = 10\ 000$  kN/m<sup>2</sup> (vrijednosti koje program sam zadaje bez mogućnosti promjene) te modulom elastičnosti u smjeru pružanja greda,  $E_x = 1\ 623\ 599$  kN/m<sup>2</sup>. Navedenu vrijednost modula elastičnosti program dobiva kao rezultat proračuna sljedećeg izraza:

$$E_x = (E \cdot b \cdot h) / (10t \cdot i) \quad (15)$$

gdje je:  $E$  – modul elastičnosti drvene grede [N/mm<sup>2</sup>]

$b$  – širina drvene grede [mm]

h – visina drvene grede [mm]

t – debljina daščanog sloja [mm]

i – osni razmak drvenih greda [mm]

Modul elastičnosti stropa u smjeru okomitom na smjer pružanja greda se zanemaruje,  $E_y = 0$  kN/m<sup>2</sup>. Ova vrijednost je opravdana s obzirom da je u tom smjeru mjerodavan element za krutost jedan sloj dasaka, koji uistinu ima zanemarivu krutost u svojoj ravnini. Navedeni parametri krutosti stropa u programu 3Muri mjerodavni su za proračunski model s realnom stropnom konstrukcijom (Model A). U ovom radu biti će analiziran još jedan model, on će imati apsolutno krutu stropnu konstrukciju (Model B).

Kako ne bi došlo do slomova prikazanih na Slici 13., stropna konstrukcija se mora dodatno ukrutiti izvedbom određenih ojačanja. Postoje razni oblici ojačanja tradicionalnih drvenih stropnih konstrukcija od kojih su najčešći sljedeći [26]:

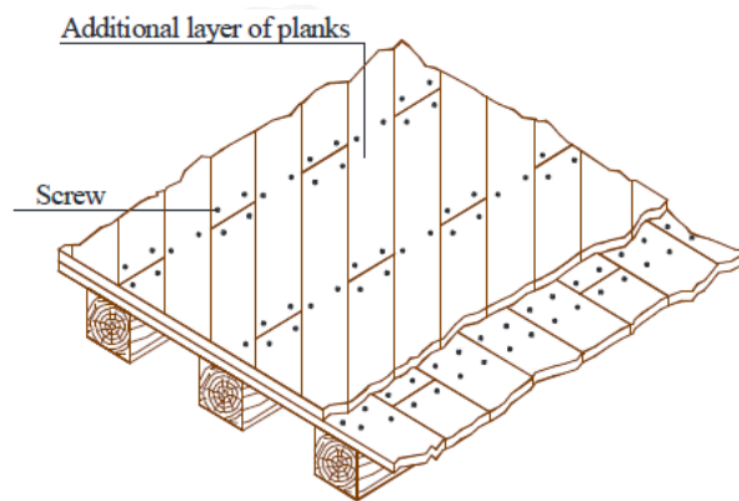
- s armiranobetonskom pločom
- s prirodnim hidrauličnim vapnom (NHL) i FRP mrežom
- s dodatnim daščanim slojem/slojevima
- s višeslojnim drvnim pločama
- s čeličnim profilima
- s FRP-om

Svaki oblik ojačanja ima svoje prednosti i mane, te svaki oblik doprinosi krutosti stropne konstrukcije u različitoj mjeri. Na temelju istraživanja (M. Mirra i sur., 2020.) [27] ustanovljene su konkretne granice poboljšanja potresnog odziva izvedbom spomenutih ojačanja. Svi oblici ojačanja izvode se kao dodatni sloj iznad postojećeg daščanog poda, a razina poboljšanja potresnog odziva ovisno o obliku ojačanja jest sljedeća:

- 3 – 10 puta za CLT ili OSB ploče
- 5 do 15 puta za primjenu tankih čeličnih traka
- 5 do 20 puta za dodatni daščani sloj pod kutem od 45°
- 5 do 20 puta za furnirsku ploču
- 25 do 100 puta za primjenu FRP (GFRP) traka

- 75 do 200 puta za ojačanje armiranobetonskom pločom

U ovom radu biti će fokus na drvenom stropu u obliku jednoslojnog daščanog poda na drvenim grednicama te na apsolutno krutoj stropnoj konstrukciji (AB ploča). Na Slici 14. prikazan je aksonometrijski prikaz navedene drvene stropne konstrukcije na koji se postavlja dodatni sloj daščane oplata. U takvim stropnim konstrukcijama potrebno je obratiti posebnu pozornost na ostvarivanje dovoljno dobrih veza između slojeva odnosno sloja dasaka te s drvenim grednicama.



*Slika 14. Aksonometrijski prikaz dodanog sloja dasaka [26]*

## **2.3. Krovna konstrukcija**

### **2.3.1. *Općenito o drvenoj krovnoj konstrukciji***

Drvena krovna konstrukcija izvodila se na građevinama još od davnih vremena pa sve do danas gdje ih također često viđamo u stambenim kućama. Na ovim prostorima, na jednoj tradicionalnoj zidanoj stambenoj zgradi bilo je skoro pod obavezno izvesti drvenu krovnu konstrukciju. To je bilo tako naravno, zbog lake dostupnosti drva, dobre obradivosti, povoljne cijene te prije svega dobrih svojstava drva koja omogućuju premošćavanje većih raspona [21].

Krovna konstrukcija najčešće se izvodila tako da formira dvostrešni krov. Dvostrešni krovovi dijele cijelu krovnu površinu na dva dijela, a to djeluje vrlo povoljno na otjecanje kišnice s krova. Dvostrešni krovovi izvođeni su u različitim oblicima i nagibima a najpopularniji oblik je dvostrešni krov sa dvije simetrične plohe jednakog nagiba. Krovne plohe sa svojim donjim rubom nalaze se na istoj razini, a linija donjeg ruba se zapravo naziva streha. Što se tiče gornjeg ruba krovnih ploha, to je mjesto gdje se one spajaju a upravo ta linija spajanja naziva se sljeme. Sa svojih bočnih strana krovne se plohe spajaju sa zabatnim zidovima.

Konstruktivni sustav drvene krovne konstrukcije ovisi o rasponu koji se mora savladati, ali i o vrsti pokrova te vrsti i važnosti zgrade [24]. Ukoliko se radi o manjim rasponima mogu se jednostavno izvesti prazna krovišta ili krovišta s pajantama, oba ova sistema nemaju podrožnice. Ukoliko se radi o većim rasponima, potrebno je izvesti konstruktivni sustav s podrožnicama i punim vezovima, ovdje se onda pojavljuju i elementi stolica, visulja itd. (detalniji opis ovih elemenata nalazi se u nastavku).

Roženička krovišta zovu se tako jer su glavni nosivi elementi takvog sustava rogovi odnosno roženice. Rogovi su zapravo drvene grede koje stoje koso u prostoru na način da se donjim krajem oslanjaju na krajeve stropnih greda ili pak zid ili nadozid, a gornjim krajem (sljeme) su međusobno povezani. Moguće je dodati i jednu horizontalnu gredu u koju se upiru rogovi svojim donjim krajevima, takva greda u toj poziciji naziva se vezna greda. Povezani rogovi i vezna greda kao cjelina tvore puni vez, kao takvi imaju bolju čvrstoću u smjeru njihove ravnine. Za još bolju čvrstoću u poprečnom smjeru, rogovi se dodatno povezuju s pajantom. Pajanta jest horizontalna

drvena greda koja se svojim krajevima spaja s rogovima i to na poziciji nešto višoj od polovice duljine roga. Njena zadaća je da spriječi savijanje rogova.

Naziv podroženička krovišta dolazi od uporabe podrožnica u konstruktivnom sustavu krovišta. U ovim sustavima i dalje postoje rogovi, no dodaj se još i podrožnice. Kako sama riječ govori, podrožnice su drvene grede koje se nalaze pod rogovima. Gledavši njihovu orijentaciju u prostoru, one su postavljene horizontalno u uzdužnom smjeru zgrade. Mogu biti pozicionirane ispod donjih krajeva rogova, ili pak neposredno ispod sljemena ili pak negdje na sredini duljine roga gdje su u tom slučaju povezane i sa stolicama ili visuljama.

Stolice su vertikalni (postoji i oblik stolica koje nisu vertikalne već kose, no konstruktivni princip je isti) elementi u drvenoj krovnoj konstrukciji koji se oslanjaju na horizontalnu veznu gredu te podupiru horizontalni element nad njima. Taj je horizontalni element zapravo pajanta, podrožnica, rog ili pak podvlaka. Podvlaka je drveni element koji se pruža u uzdužnom smjeru zgrade a služi da se na njega oslone pajante ili rogovi, ona je zapravo posrednik u prijenosu opterećenja između stolice i pajante odnosno rogova. Mjesto oslanjanja stolice na veznu gredu često se nalazi iznad unutrašnjeg nosivog zida, vezna greda koristi unutrašnji zid kao još jedan oslonac.

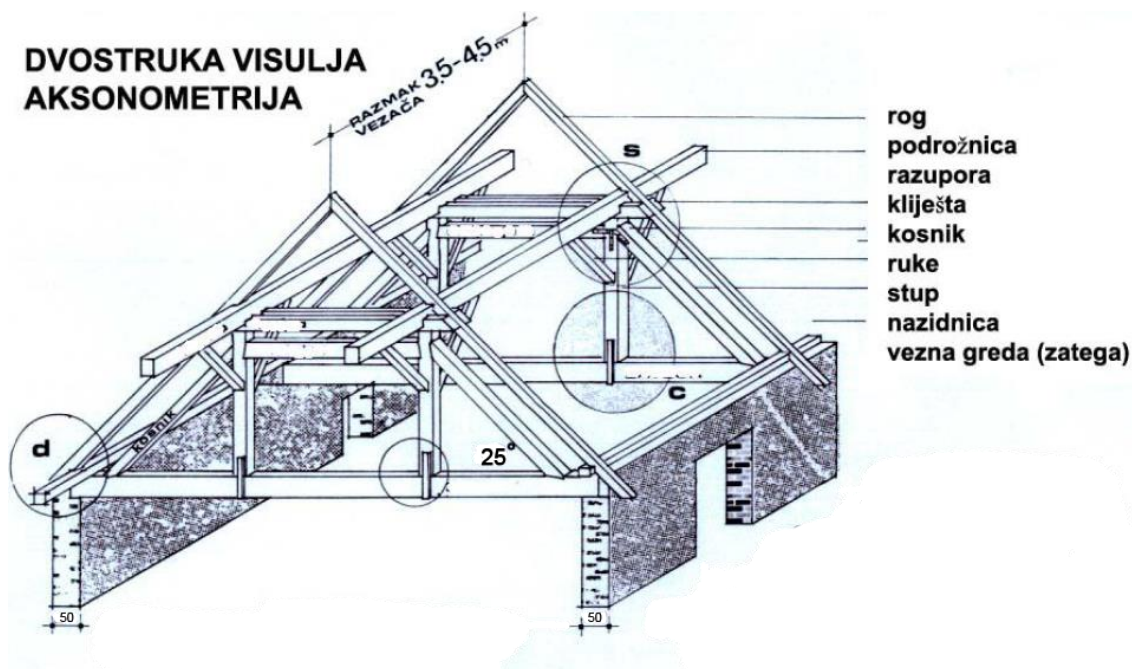
Vrlo slične stolicama jesu visulje, one su također vertikalni element koji se nalazi između vezne grede i podrožnice ili roga. Osnovna razlika između stolice i visulje je u statici, visulja je zapravo vlačni element dok je stolica tlačni. Stolica preuzima opterećenje od rogova i naliže na veznu gredu, time prenosi opterećenje na nju u vidu koncentrirane sile. Visulje s druge strane preuzima opterećenje od vezne grede koja je ovješena o nju te zatim svojim gornjim krajem prenosi to opterećenje na rogove. Rogovi tim sustavom primaju vertikalnu silu na svojem gornjem kraju i bivaju tlačno opterećeni. Kao takvi na svojem se donjem kraju upiru u veznu gredu čineći nju vlačnim elementom. Vezna greda u ovom sustavu preuzima svo opterećenje od krova, pa nekad i stropa, pritom viseći na spomenutom vertikalnom elementu koji se zato i naziva „visulja“.

Kod krovišta punog veza s visuljama ili stolicama nailazimo i na konstrukcijske elemente poput kliješta, razupore i kosnika. Kliješta i razupore jesu horizontalni elementi koji osiguravaju stabilnost u poprečnom smjeru. Kliješta su vlačni dvodijelni

element kojim se osigurava veza stolice i roga, elementi kliješta ne dopuštaju rogovima da dožive pomak prema vanjskoj strani. Razupore su tlačni element kojim se povezuju visulje i rogovi, a one s druge strane ne dopuštaju rogovima da se pomaknu prema unutarnjoj strani. Više informacija o njihovom djelovanju biti će navedeno u nastavku. Kao što i sama riječ kaže, kosnici su kosi konstrukcijski elementi u prostoru koji povezuju stolice odnosno visulje sa stropnom konstrukcijom ili veznom gredom.

### 2.3.2. Krovišta s podrožnicama na dvostrukim visuljama

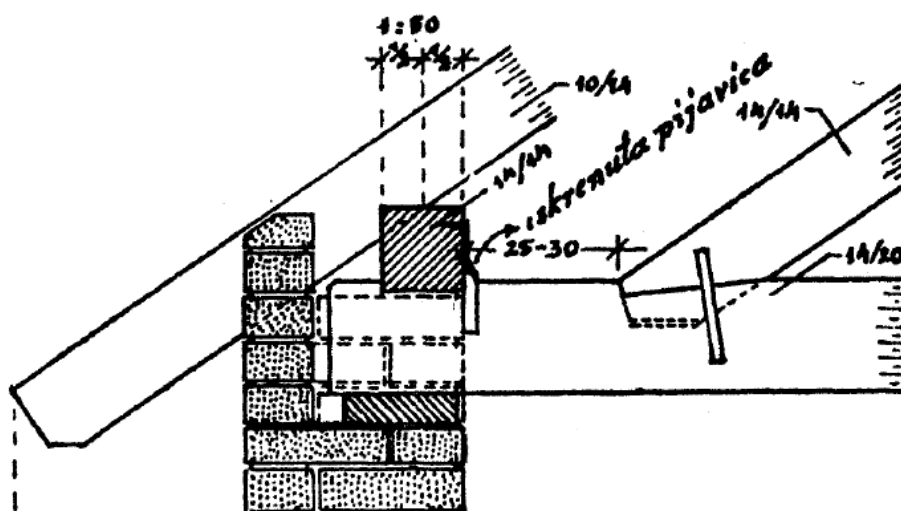
Ovaj tip krovišta vrlo je često izvođen na stambenim, uredskim i sličnim zgradama. Osnovni raspon koji krovište savladava jest 12,6 metara, što je detaljnije opisano u poglavlju 4.1. Tehnički opis konstrukcije. Vrijednost osnovnog raspona jest gornja granica koja se preporuča za ovakav tip krovne konstrukcije [24]. Kod ovog tipa krovne konstrukcije u pravilu se puni vez izvodio na razmaku od 3,5 do 4,5 m. Na slici 15. se jasno mogu vidjeti dvije podrožnice sa svake strane krovišta, donja i srednja. Donja podrožnica nalazi se između vezne grede i roga, njena svrha je da poboljšava čvrstoću u uzdužnom smjeru te da omogući pouzdani spoj između vezne grede i roga.



Slika 15. Aksonometrijski prikaz krovišta s podrožnicama na dvostrukim visuljama [21]

Izvedba bilo kojeg drvenog krovišta, pa tako i ovog, kretala je od dole prema gore; stoga priča kreće od izvedbe oslonca krovne konstrukcije. Taj oslonac se definira u elementu nazidnica. Vanjski zidovi izdizali su se dodatnih 50 cm iznad gornje površine stropne konstrukcije, a upravo taj izdignuti dio predstavlja spomenutu nazidnicu. Nazidnica se izvodila iste debljine kao nosivi zidovi ispod nje (50 cm), a vezna je greda nalijegala na samo pola njene debljine. Vezna greda nije se direktno oslanjala na nazidnicu već se izvodio određeni podložak kao što je to već opisano u poglavlju 2.2.2. Također se morao osigurati zračni prostor oko te grede na mjestu oslanjanja, a na nazidnici s vanjske strane izdizao se još jedan stupac opeke kako je to prikazano na Slici 16., njegova svrha jest da zatvara prostor krovišta te doprinosi stabilnosti rogova izvan ravnine.

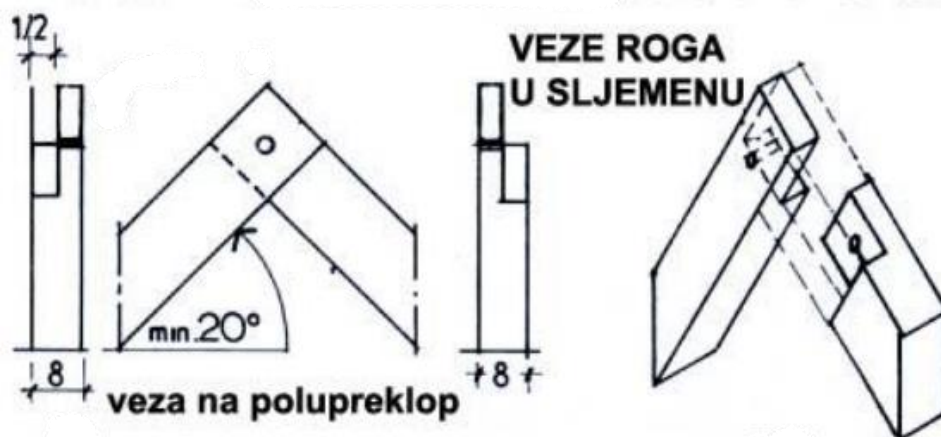
Na gornjoj površini vezne grede iznad spoja sa nazidnicom naliježe donja podrožnica. Donja podrožnica horizontalno naliježe na dvije vezne grede koje su međusobno razmaknute 4,0 metra (razmak punih vezova). Samim time može se zaključiti da je duljina donjih podrožnica također 4,0 metra. Podrožnice su u spoju s veznom gredom bivale dodatno učvršćene jakim čavlima.



Slika 16. Detalj donje podrožnice [20]

Na donje podrožnice nalijegali su rogovi na način da su se u rogovima izvodili plitki kosi zasjeci kako bi rog lijepo sjeo na podrožnicu. Kao dodatno osiguranje u ovom spoju također su bili korišteni jaki čavli. U pravilu su rogovi uvijek pušteni da vire izvan konstrukcije, stoga se ovdje uzima opravdana pretpostavka da rogovi izvire izvan konstrukcije 60 cm gledavši od vanjske površine zida. Dva roga međusobno su spojena u sljemenu klasičnom vezom polupreklopa. U ovom spoju krajevi rogova zarezivali su

se načinom kao što je prikazano na Slici 17. Dodatno su bili učvršćeni jednim mehaničkim spajalom u točki sjecišta njihovih osi. Mogla se ovdje dodati i pokoja daska da pruži dodatnu stabilnost spoja, no u ovom slučaju je zanemarena.

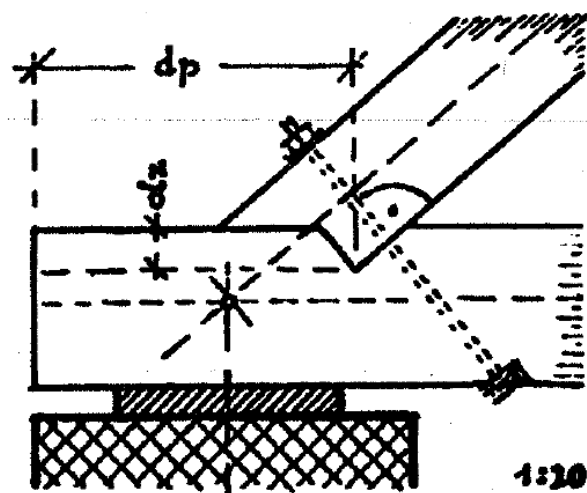


Slika 17. Veza rogova u sljemenu metodom polupreklopa [24]

Jedna bitna stavka u krovništu koja nije još spomenuta jest nagib krovnih ploha. Nagib krovnih ploha ujedno je i nagib rogova izvedenih u krovnoj konstrukciji. Nagib krova prije svega ovisi o vrsti pokrova odnosno o klimatskim prilikama u kraju gdje se zgrada nalazi.

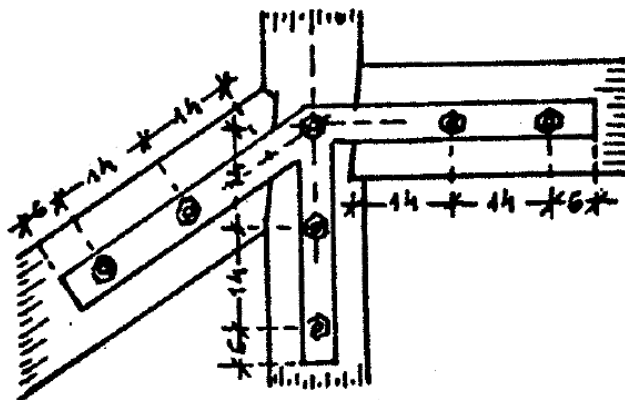
Što se tiče ustroja unutarnjih konstrukcijskih elemenata u punom vezu dvostrešnog krovništa s dvostrukom visuljom, situacija je sljedeća. Kosnici se svojim donjim krajem oslanjanju na veznu gredu u blizini njenog oslonca s nazidnicom. Spoj se izvodi na način kako je prikazano na Slici 18. uz napomenu da vezna greda nema takav oslonac, već onakav kakav je prikazan na Slici 16. Dakle vezna greda plitko se zarezala tako da je jedna ploha tog ureza paralelna s osi kosnika, a druga okomita na istu os. Dodatno bi se sve učvrstilo jakim čavlima.





Slika 18. Oslanjanje kosnika na veznu gredu [20]

Svojim gornjim krajem kosnik je povezan sa visuljom na način kako je to prikazano na Slici 19. Visulja bi se u ovom detalju zarezala kako bi se mogla osloniti na kosnik, veza se dodatno osiguravala trokrakim čeličnim prilošcima od plosnatog čelika dimenzija presjeka 60x6 mm. U ovom detalju spajao se još jedan konstruktivni element, svojevrsna pajanta između dvije visulje koja pridodaje krutosti punog veza u poprečnom smjeru te isto tako ne dopušta pomake visulje u poprečnom smjeru. U ovom detalju trebalo je pripaziti da se osi sva tri element sijeku u jednoj točki [21]. Tri kraka spomenutog čeličnog priloška obuhvaćala su visulju, kosnik i pajantu načinom kako je prikazano na Slici 19. Čelični priložak pritezao se sa spomenutim elementima s pomoću svornjaka koji su bili raspoređeni tako da su dva bila u osi kosnika, dva u osi pajante te tri u osi visulje, s napomenom da se taj treći u visulji morao nalaziti u sjecištu triju osi.



Slika 19. Detalj spoja visulje, kosnika i pajante [20]

Detalj spoja donjeg kraja visulje s veznom gredom ključan je kako bi sustav visulje mogao funkcionirati. Vezna se greda dakle mora ovjesiti o visulju, to se uspijeva uz pomoć jednodijelnog čeličnog stremena u obliku slova „U“. Čelični stremen priljubljuje se uz bočne strane vezne grede i visulje, naravno i uz donju stranu vezne grede, te se kroz visulju priteže s dva svornjaka. Visulja je pritom blago izdignuta kako ne bi bilo direktnog kontakta između nje i vezne grede.

Na gornjem kraju visulje ona je spojena sa srednjom podrožnicom i kliještima koja zapravo djeluju kao razupora. Navedena je prije definicija što su to kliješta, no u ovom slučaju izlazi se malo izvan definicije. Kliješta su u ovom sustavu izvedena na način da mogu preuzeti samo tlačna naprezanja što ih zapravo čini razuporama. Ona su pojačana u zoni između visulja drvenim uloškom koji se nalazi među dva dijela kliješta. Ova modificirana kliješta tako sprječavaju spuštanje rogova na unutarnju stranu. Da nema tih kliješta, upravo to spuštanje rogova bi se dogodilo zbog nepoduprtih veznih greda. Kliješta odnosno razupora sa rogovima i visuljama spaja se s pomoću jakih mehaničkih spajala poput primjerice čavala. Upravo ta spajala omogućuju prijenos vertikalnog opterećenja s visulja na rogove.

Srednje podrožnice zarezane su u svojoj donjoj zoni na mjestu spoja s visuljama i razuporama. Na tom istom mjestu zarezani su i rogovi kako bi prikladno legli na srednje podrožnice. Za potrebu osiguranja njihove stabilnosti i pouzdanog oslanjanja izvedeni su kraći kosi elementi koji se protežu u uzdužnom smjeru krovišta, a nazivaju se ruke. Ruke su donjim krajem usidrene u element visulje, a svojim gornjim krajem pružaju oslonac srednjoj podrožnici. Izvođene su u nagibu od 45°.

Što se tiče dimenzija svih navedenih konstrukcijskih elemenata u krovnoj konstrukciji s podrožnicama na dvostrukoj visulji referentne su one dimenzije navedene u Tablici 11.

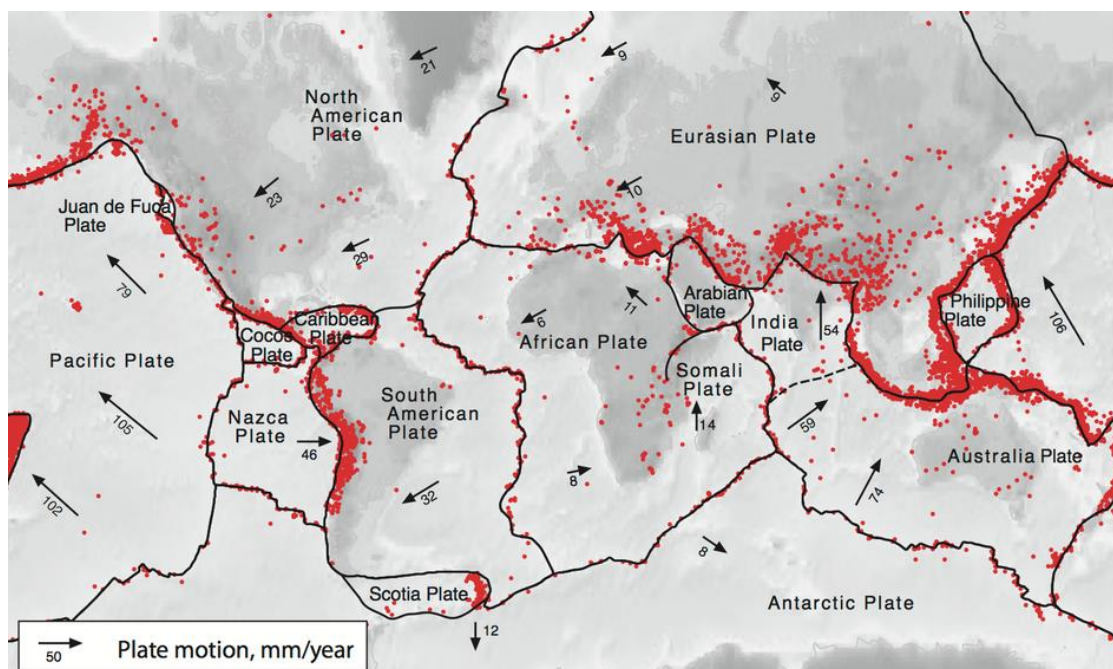
Tablica 11. Dimenzije elemenata drvene krovne konstrukcije [20]

Konstruktivni element	Visina elementa [mm]	Širina elementa [mm]	Duljina elementa [m]
<i>Rogovi</i>	140	100	7,90
<i>Donje podroženice</i>	140	140	4,00
<i>Srednje podroženice</i>	180	140	4,00
<i>Vezna greda</i>	220	160	12,80
<i>Visulje</i>	140	140	1,86
<i>Kosnici</i>	160	140	3,59
<i>Pajanta</i>	160	140	4,06
<i>Kliješta</i>	160	2 x 80	6,06
<i>Ruke</i>	140	100	1,13

### 3. POTRESNO DJELOVANJE

#### 3.1. Nastanak potresa

Kako bi se moglo govoriti o pojmu potresne otpornosti konstrukcija, najprije je potrebno definirati što je to točno potres odnosno potresno djelovanje. Potres predstavlja prirodnu nepogodu koja se interpretira kao gibanje tla prouzročeno iznenadnim pomacima ispod Zemljine površine odnosno unutar Zemljine kore. Uzroci potresa su primjerice nagli slom i pad materijala u krškim jamama ili drugdje, vulkanske erupcije i najčešći te ujedno i najpoznatiji uzrok – pomicanje tektonskih ploča. Tektonske ili litosferne ploče predstavljaju dijelove Zemljine litosfere koje se tretiraju kao kruta tijela na, u odnosu na njih, mekoj astenosferi [14].



Slika 20. Tektonske ploče na planetu Zemlji i njihov godišnji pomak (mm) [28]

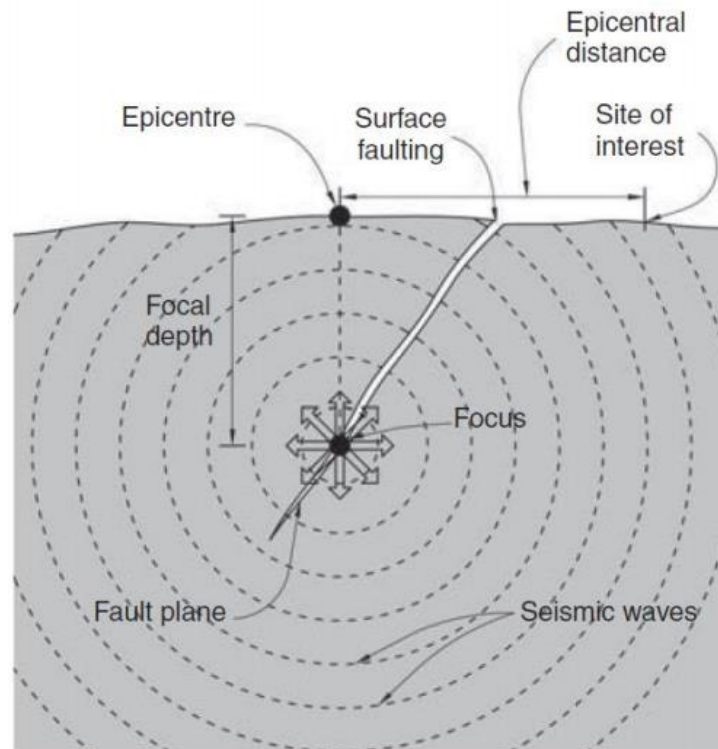
Litosfera se sastoji od dva dijela, a to su Zemljina kora i gornji dio plašta. Granična ploha između Zemljine kore i gornjeg dijela plašta naziva se Mohorovičićev diskontinuitet, tako je nazvana u čast hrvatskog meteorologa i seizmologa Andrije Mohorovičića koji je ju otkrio 1909. godine. Mohorovičić je tim otkrićem definirao da debljina Zemljine kore nije konstantna već se ta vrijednost kreće između 5 i 70-ak kilometara [29]. Naravno, tanja Zemljina kora nalazi se ispod oceana dok je ispod planina i gorja ona

deblja. Mohorovičićev diskontinuitet važan je iz razloga jer on predstavlja graničnu plohu gdje se događaju nagle promjene brzine potresnih valova.



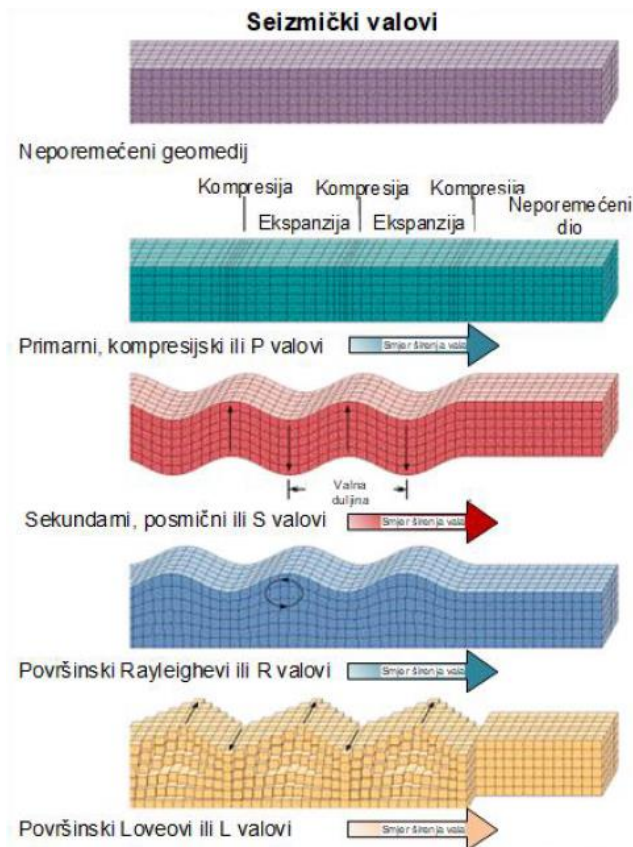
*Slika 21. Mohorovičićev diskontinuitet [14]*

Mjesto nastanka potresa odnosno mjesto otkud se počinju širiti potresni valovi naziva se žarište potresa ili hipocentar (fokus). Iz hipocentra se valovi prostorno šire u svim smjerovima, a mjesto na Zemljinoj površini koje je najbliže hipocentru i do njega prvo dolaze seizmički valovi naziva se epicentar potresa. Na Slici 22. grafički su prikazani epicentar, hipocentar i njihova veza.



*Slika 22. Hipocentar i epicentar potresa [14]*

Spomenuli smo da se potresni valovi prostorno šire kroz unutrašnjost Zemlje, stoga se takvi valovi nazivaju prostorni valovi. Kad stignu do površine Zemlje javljaju se površinski potresni valovi koji se rasprostiru po Zemljinoj površini. Površinski valovi dijele se na dvije skupine, primarne i sekundarne valove. Oni se razlikuju po načinu širenja, tako se primarni valovi šire na način da čestice osciliraju u smjeru širenja valova, a sekundarni valovi na način da čestice osciliraju okomito na smjer širenja vala. Grafički prikaz ove pojave nalazi se na Slici 23.



Slika 23. Vrste i način širenja potresnih valova [30]

Na Slici 23. uz prostorne valove mogu se vidjeti Rayleighevi i Loveovi valovi, oni predstavljaju površinski valove. Loveovi valovi šire se prikazanim načinom gdje na površini čestice osciliraju okomito na smjer širenja vala. Rayleighevi valovi šire se eliptičnom oscilacijom u vertikalnoj ravnini koja je okomita na površinu Zemlje.

Od svih nabrojanih vrsta potresnih valova, najkritičniji za obične građevine jesu sekundarni valovi, zatim i Loveovi i Rayleighevi valovi. Ovi valovi izazivaju bočno pokretanje tla što rezultira velikim štetama na građevinama.

### 3.2. Potresno djelovanje na konstrukciju

Definirano je da bočno pomicanje tla predstavlja najkritičnije djelovanje za konstrukciju. Bočno pomicanje tla može se podijeliti na nekoliko osnovnih svojstva [14]:

- Vršno ubrzanje tla
- Trajanje snažnog gibanja tla
- Frekventni sastav potresa

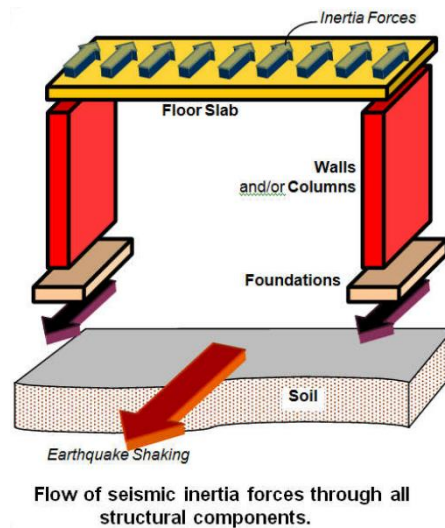
Navedena svojstva gibanja tla najvažnije su stavke koje se sagledavaju pri projektiranju potresno otpornih građevina. Sva svojstva ovise naravno o jačini potresa odnosno magnitudi potresa. Magnituda potresa označava količinu energije koja se oslobodila u hipocentru. Osim o magnitudi, svojstva vršnog ubrzanja tla i frekventnog sastava potresa ovise i o vrsti tla na kojem se građevina nalazi. Na čvrstoj se stijeni tako javlja manje ubrzanje i veća frekvencija gibanja tla nego što je to slučaj na mekom tlu. Veće ubrzanje tla i manja frekvencija gibanja svakako nije dobro za konstrukciju te se u tim slučajevima moraju izvoditi puno potresno otpornije konstrukcije. Zaključak ove teze jest da je mekano tlo svakako nepovoljnije kao podloga konstrukcije.

Trajanje snažnog gibanja tla je vrlo značajan faktor potresnog djelovanja na konstrukciju. Naravno da za konstrukciju odnosno oštećenja konstrukcije nije svejedno radi li se o gibanju tla od 10 sekundi ili 2 minute. Veće trajanje gibanja tla rezultira s većim brojem pomaka tj. njihanja konstrukcije što naravno predstavlja veća oštećenja konstrukcije jer se energija u svakom tom pomaku troši kroz plastično deformiranje konstrukcije.

Samo potresno djelovanje na konstrukciju ne može se interpretirati kao neposredno djelovanje određenih sila, već se ono predstavlja posredno preko gibanja tla. Građevina se mora oduprijeti gibanju tla kako bi ostala stajati, to ona postiže svojom inercijom odnosno tromošću. Inercijske sile građevine simuliraju se tako da djeluju u smjeru suprotnom od gibanja tla i to u poziciji horizontalne stropne konstrukcije, Slika 24. Vrijednost inercijskih sila izražava se kao umnožak mase i ubrzanja te iste mase. Masa predstavlja težinu horizontalne stropne konstrukcije gdje je osnovna opravdana



pretpostavka da stropna ploča označava koncentriranu masu u konstrukciji [31]. U trenutku kad se u tlu javi pomak u jednom smjeru, koncentrirana masa dobiva horizontalnu inercijsku silu u suprotnom smjeru gdje se veza (stupovi, zidovi) između mase i tla smatra fleksibilnom.



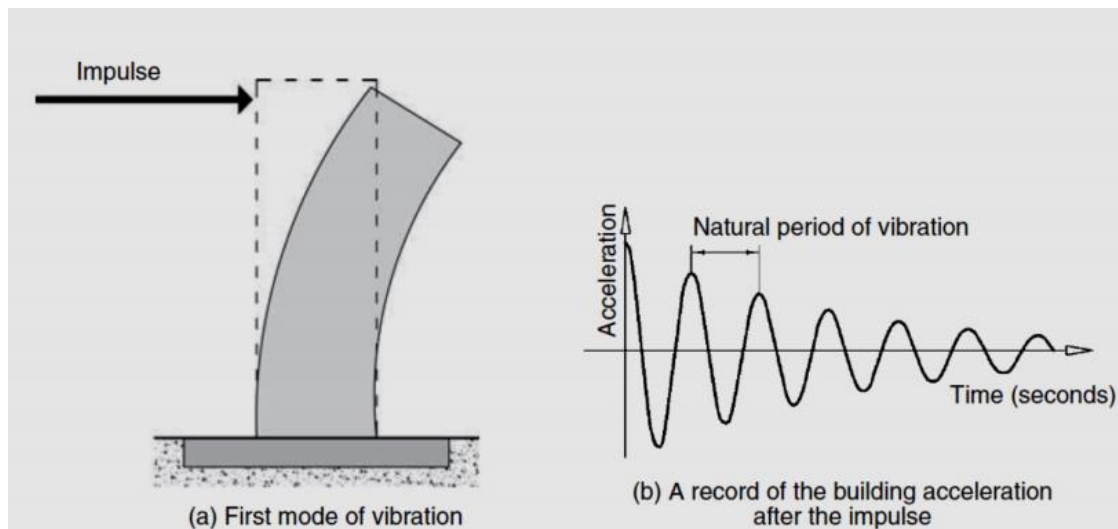
Slika 24. Horizontalne inercijske sile [31]

Spomenuli smo da je veličina inercijske sile jednaka umnošku ubrzanje mase i same mase. Kako bi veličina inercijske sile bila što manja potrebno je smanjiti vrijednost mase. Upravo zbog te direktne veze masa odnosno težina konstrukcije smatra se najvažnijim čimbenikom kod potresnog djelovanja na građevinu. Smanjenje same inercijske sile označava i smanjenje oštećenja građevine uslijed potresa. Stoga, vrlo preporučljivim se smatra načelo izvedbe čim lakših konstrukcija. Lakše konstrukcije se izvode primjenom laganih materijala kao što su čelik, drvo te gips kartonske ploče i sl.

Kod postojećih građevina ugrađen je već materijal koji je ugrađen, a to je najčešće beton, kamen ili opeka. Svi ti materijali ne smatraju se laganima te takve građevine predstavljaju masivne konstrukcije.

Još jedan važan čimbenik koji ima značajan učinak na veličinu inercijskih sila jest osnovni ili prvi period vibracija [14]. Svaka konstrukcija ima svoj vlastiti osnovni period vibracija kojeg primarno definira visina konstrukcije, ali i materijal, geometrija i konstruktivni sustav. U pravilu se može definirati okvirna vrijednost osnovnog perioda zgrade od četiri kata 0,5 sekundi, a prizemnice 0,1 sekunda. Na Slici 25. (a)

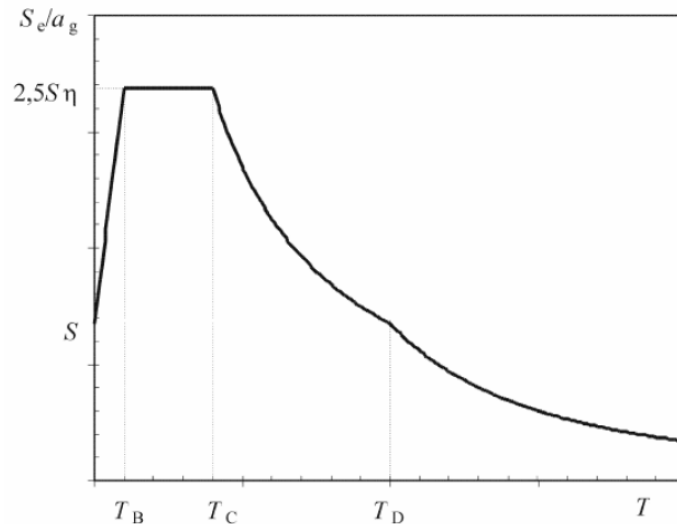
prikazan je prvi vlastiti oblik vibracija nakon nanesenog impulsa horizontalne sile. Na Slici 25. (b) može se primijetiti kako s vremenom opada ubrzanje konstrukcije dok pritom osnovni period vibracija ostaje jednak. Ubrzanje opada zbog pojave prigušenja konstrukcije, prigušenje nastoji smanjiti nastalu mehaničku energiju. Prigušenje se interpretira kao viskozno prigušenje, ili kao potrošnja potresne energije zbog trenja ili pak potrošnje potresne energije zbog plastičnog deformiranja odnosno duktilnosti konstrukcije.



Slika 25. Osnovni period vibracije konstrukcije [14]

Odziv konstrukcije na potresno djelovanje ovisi o osnovnom periodu vibracija, ubrzanju tla te o prigušenju konstrukcije. Dobar prikaz ove ovisnosti može se dobiti kroz spektar odziva koji može biti elastičan ili proračunski. Spektar odziva konstrukcije može se dobiti konkretno za jedan odgovarajući zapis potresa ili prema normi. Tipični elastični spektar odziva prikazan je na Slici 26. Dakle na ordinati se nalaze vrijednosti ubrzanja tla dok se na apscisi nalaze pripadajuće vrijednosti perioda. Primjećujemo kako prva linija krivulje linearno raste do vršne vrijednosti ubrzanja, nakon dosizanja te vrijednosti druga linija horizontalno je ravna sve dok ne krene nelinearno padati. Proračunski spektar odziva jest reducirani elastičan spektar odziva gdje se redukcija izvodi pomoću posebnog faktora ponašanja  $q$ . Ovaj faktor smatra se jednim od najvažnijih pojmova u Eurokodu 8 [32]. Faktor ponašanja ovisi o tipu konstrukcije te o materijalu od kojeg je ista izvedena. Faktorom je uzeto u obzir svojstvo duktilnosti konstrukcije kojim se omogućuje apsorpcija i trošenje potresne energije kroz plastično deformiranje njenih elemenata. Dakle zbog svojstva

duktilnosti, koje je opširnije opisano u nastavku, ovim faktorom reducira se elastični spektar odziva a time i same potresne sile što rezultira s projektiranjem konstrukcije manjih dimenzija.



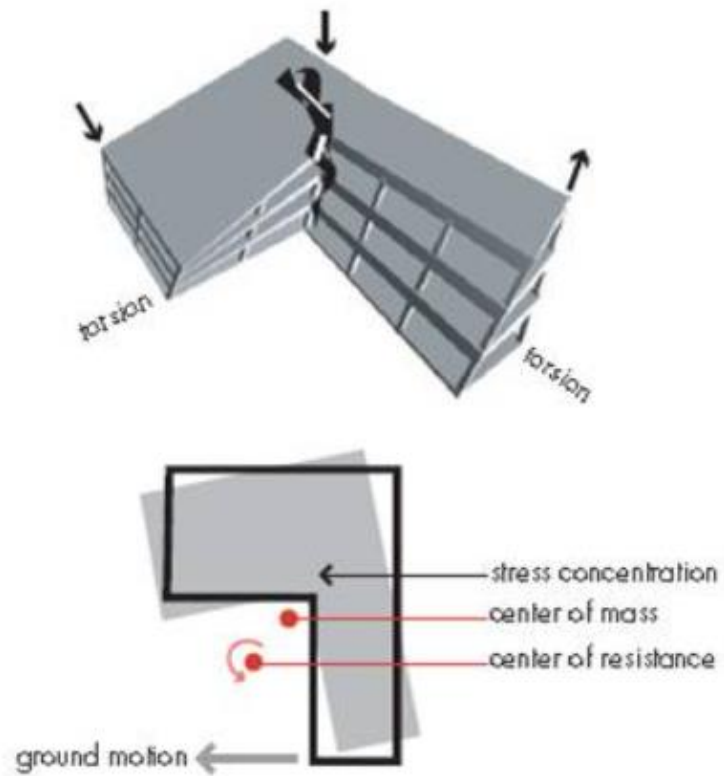
Slika 26. Tipični elastični spektar odziva konstrukcije [33]

Kao jednu od varijanti prigušenja definirali smo maloprije duktilnost konstrukcije, to je svojstvo konstrukcije koje daje mogućnost konstrukciji da se plastično deformira prije nego što doživi slom. Upravo kroz to plastično deformiranje troši se potresna energija unesena u konstrukciju.

Još jedan važan čimbenik koji ima utjecaj na veličinu potresnog djelovanja jest krutost konstrukcije. Logično je da se kruće konstrukcije manje deformiraju što nije nužno uvijek povoljno jer tada se javljaju veće unutarnje sile u konstrukciji. Kruće konstrukcije imaju kraće periode vibracija dok manje krute konstrukcije imaju dulje što u konačnici rezultira s većim deformacijama. Velike deformacije mogu dovesti do nestabilnosti građevine kao i oštećenja nekonstrukcijskih elemenata. U normama se zato ograničuju pomaci konstrukcija, a treba pritom paziti i da konstrukcija ne bude prekruta. Podrazumijeva se naravno da uslijed svih pomaka i preuzimanja opterećenja i energije konstrukcija mora zadržati svoju nosivost te nikako ne smije doći do njenog sloma odnosno gubitka nosivosti.

Zadnji čimbenik koji može djelovati na veličinu potresnog djelovanja na konstrukciju jest pojava torzije. Torzija se događa ukoliko se centar masa ne podudara s centrom krutosti. Dakle, ukupna potresna odnosno inercijalna sila djeluje u centru masa te tako

nastoji lateralno pomaknuti konstrukciju. No konstrukcija se nastoji rotirati oko centra krutosti što rezultira pojavom torzijskih momenata ukoliko se centar masa i centar krutosti ne nalaze u istoj točki.



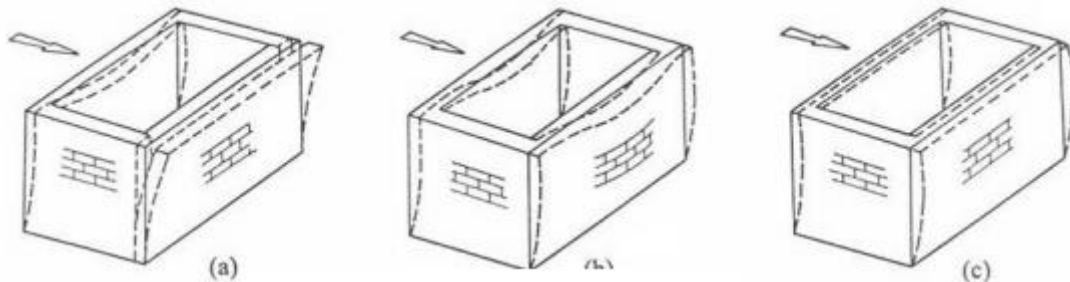
Slika 27. Torzija zgrade uslijed potresnog djelovanja [34]

### 3.3. Potresna otpornost i oštećenja zidane konstrukcije

Dobro je poznato da su zidane zgrade najranjivije uslijed potresa zbog svoje slabije otpornosti na horizontalna opterećenja. No unatoč toj činjenici, promatrajući zidane konstrukcije kroz moze se zaključiti da su upravo takve neke od najstarijih građevina koje danas poznajemo. Jedan od glavnih razloga kojim se taj navod može opravdati jest pravilno projektiranje i izvođenje građevina u smislu jednostavnosti, simetričnosti, jednolike krutosti u tlocrtu te po visini, izbjegavanje izduženih zgrada ili takvih istaka u tlocrtu i sl [14]. Kroz povijest ponašanje zidanih zgrada u potresu nastojalo se poboljšati različitim metodama kao primjerice boljom obradom zidnih elemenata i pravilnijim zidanjem na kutovima zgrada, uporabom određenih veznih zidnih elemenata te kovanih spona kako bi se ostvarila bolja veza između zidova.

Zidni elementi povezani u cjelinu predstavljaju ziđe, ziđe tako, sukladno zidnim elementima, ima relativno veliku tlačnu čvrstoću. No uslijed potresnog djelovanja javljaju se horizontalna opterećenja koja u ziđu izazivaju posmična naprezanja i naprezanja od savijanja. Ziđe ima relativnu malu otpornost na takva naprezanja stoga može doći do prekoračenja čvrstoće morta ili zidnog elementa što rezultira oštećenjem konstrukcije. U današnje vrijeme posmična i savojna čvrstoća novih zidanih zgrada puno je bolja zbog razvijenijih mortova i zidnih elemenata boljih karakteristika, ali se danas izvode i armiranobetonski vertikalni i horizontalni serklaži, armiranobetonske monolitno izvedene ploče, armira se ziđe itd. S obzirom da se u ovom radu sagledava tradicionalna zidana zgrada za koju se pretpostavlja da je izgrađena prije komercijalne uporabe betona, ona se može svrstati u kategoriju zidanih zgrada starog tipa. Ova kategorija označava stare zgrade u kojima nosivi zidovi nisu međusobno povezani stropnom konstrukcijom. Stropna konstrukcija izvedena je od drva na način kojim je to opisano u poglavlju 2.2. Ona kao takva predstavlja relativno fleksibilnu horizontalnu dijafragmu koja nema učinak da međusobno poveže nosive zidove te ih tako ukruti [26]. Ovaj efekt nije dobar zbog toga što svaki zid djeluje za sebe uslijed gibanja tla, stoga se on deformira i savija u smjeru svoje manje krutosti to jest u smjeru okomitom na svoju ravninu. Na Slici 28. grafički je prikazan spomenuti efekt. Uslijed pomaka stropne dijafragme u smjeru okomitom na vlastitu ravninu nastaju horizontalne

pukotine na mjestu spoja stropne ploče i zida te vertikalne pukotine na mjestu spoja dva međusobno okomita zida.



*Slika 28. Povezanost i pomak zidova uslijed: a) fleksibilne SD ; b) fleksibilne SD i krute obodne grede ; c) krute SD [26]*

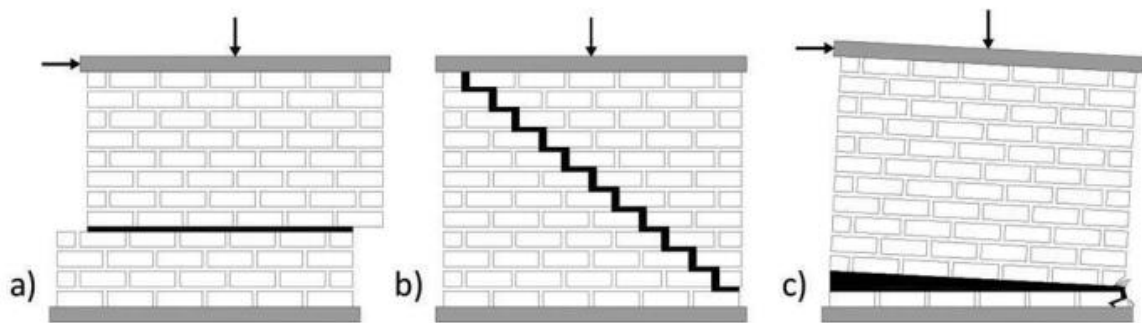
Stropne dijafragme pružaju prostorno ukrućenje elementima koje povezuju, elementi koji nisu prostorno ukrućeni vrlo lako gube stabilnost i prevrću se ili gube oslonce. Takvi elementi su primjerice dimnjaci ili zabatni zidovi. U nacrtima se može vidjeti da promatrana zgrada ne sadrži dimnjak, ali zabatne zidove da. Elementi zabatnih zidova imaju vrlo malu krutost izvan svoje ravnine te stoga može veoma lako doći do njihovog prevrtanja čak i pri slabijim potresima. Još jedan kritičan element zidane konstrukcije koji ima malu potresnu otpornost jesu pregradni zidovi. Oni zbog neposrednog povezivanja s nosivom konstrukcijom doživljavaju iste pomake kao i ona. Zbog znatno manje krutosti ne mogu podnijeti takve pomake bez da pritom ne dožive znatna oštećenja.

Krute stropne dijafragme omogućuju zidovima da se suprotstavljaju potresnim silama svojom krutošću oko jače osi. Svaki zid tako snosi naprezanja samo unutar svoje ravnine, što znači da cjelokupna konstrukcija može pretrpjeti veće potresne sile. Slom zida unutar vlastite ravnine može se podijeliti na tri osnovna uzroka:

- slom dostizanjem vlačne čvrstoće зида [Slika 29. b)]
- slom dostizanjem posmične čvrstoće зида [Slika 29. a)]
- slom dostizanjem tlačne čvrstoće зида pri savijanju зида [Slika 29. c)]

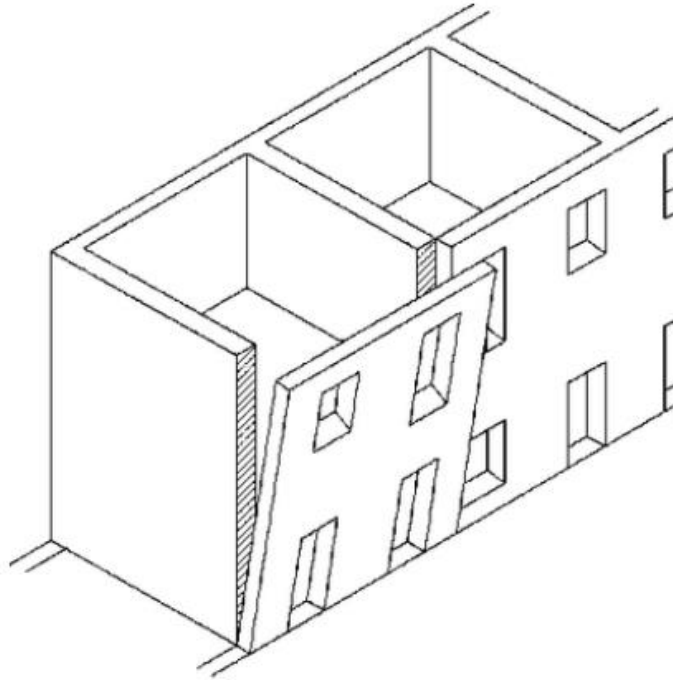
Prekoračenje vlačne čvrstoće зида može se prepoznati po kosoј pukotini duž зида, kosa pukotina može biti formirana u oba smjera, takozvana „x“ pukotina. Ukoliko je formirana pukotina duž horizontalnih sljubnica onda je jasno da je prekoračena

posmična čvrstoća ziđa. Ova pojava je poprilično rijetka, a nastaje ukoliko je vertikalno opterećenje na zid relativno malo ili ga uopće nema. Savijanje u ravnini ziđa prepoznatljivo je po tlačnom drobljenju ziđa u donjem kutu, te pojavi vlačnih pukotina u suprotnom gornjem kutu.



*Slika 29. Oblici sloma ziđa opterećenim u vlastitoj ravnini [35]*

Tradicionalna zidana zgrada promatrana ovim radom nema krutu stropnu dijafragmu kao što je to već spomenuto, stoga nije posve opravdano očekivati navedene oblike sloma u ravnini zbog činjenice da nepovezani zidovi imaju tendenciju deformiranja u smjeru okomitom na vlastitu ravninu. Rezultat takvog deformiranja jest međusobno odvajanje zidova gdje nakon odvajanja svaki zid djeluje konzolno kao što je prikazano na Slici 30. Zid kao takav nije sposoban prenijeti potresne sile već može lako doći do prevrtanja zida izvan ravnine.



*Slika 30. Prevrtnanje zida izvan vlastite ravnine [36]*

Jasno je već kako jedna tipična zidana zgrada koja datira iz ranog 20. stoljeća ili čak 19. nema brojne protupotresne značajke za poboljšanje otpornosti koje su danas definirane u službenim normama prema kojim se projektiraju konstrukcije. Zbog svega nabrojenog također je jasno kako zidana zgrada promatrana ovim radom neće imati dovoljnu potresnu otpornost. No, taj podatak potvrditi će se putem proračuna potresne analize modela zgrade u programskom paketu „3Muri12“. Dakako, već se sada može naslutiti kako će biti neophodno izvođenje ojačanja konstrukcije kako bi stekla odgovarajuću potresnu otpornost.



## 4. PRORAČUN POTRESNE OTPORNOSTI ZIDANE ZGRADE

### 4.1. Tehnički opis konstrukcije

Konstrukcija promatrana u ovom radu zidana je zgrada stambene namjene. Konstrukcija svojim karakteristikama odgovara tradicionalnoj stambenoj zgradi na lokaciji središta Grada Rijeke. Zgrada se sastoji od ukupno tri kata zajedno sa krovijem. Svjetla visina svakog kata iznosi 3,40 m, a visina stropne konstrukcije iznosi 0,40 m. Ukupna visinska razlika od poda do poda dvaju susjednih katova iznosi 3,80 m. Ukupna visina zgrade, gledano od vrha temeljne ploče do sljemena krovijšta, iznosi 14,96 m.

Tlocrtno gledano, zgrada je pravilnog pravokutnog oblika definirana osnim rasponima 12,6 x 22,5 m. Sva četiri vanjska zida predstavljaju nosive zidove. Uz vanjske zidove, i jedini unutarnji zid koji se pruža u uzdužnom smjeru je također nosivi, kao i dva zida u poprečnom smjeru koji zatvaraju jezgru oko stubišta. Nosivi zidovi izvedeni su od pune opeke u debljini od 51 cm, dok su pregradni zidovi također izvedeni od pune opeke no u debljini od 12 cm (debljina jednog elementa opeke). Za povezivanje pune opeke korišten je mort opće namjene. Treba napomenuti da nikakva armatura nije korištena u izvedbi zidova, kao ni u izvedbi stropova i krovne konstrukcije.

Osni razmak između dva susjedna zida u uzdužnom smjeru iznosi 6,30 m, dok se osni razmak između zidova u poprečnom smjeru kreće od 3,00 m do 6,00 m. Točni razmaci (kao i debljine zidova) između zidova, ali i između otvora, mogu se vidjeti u nacrtima (poglavlje Popis Nacrta).

Otvori u zidovi na promatranoj zgradi služe u svrhu vrata i prozora. Na dva vanjska uzdužna zida u prizemlju ima ukupno 12 otvora za prozor dimenzija 120 x 120 cm uz visinu parapeta 90 cm, dok na gornja dva kata ima ukupno 13 otvora za prozor sa istim dimenzijama. Otvor za ulazna vrata u zgradu dimenzija su 120x220 cm, a istih dimenzija su i svi ostali otvori za vrata u uzdužnim nosivim zidovima. Otvori za vrata u poprečnim zidovima dimenzija su 90x220 cm, takvih ima 5 po katu.

Opravdana pretpostavka je da promatrana zgrada u ovom radu nema izvedene armirano betonske stropove, već drvene. Ukratko će se opisati sastavni dijelovi drvene

stropne konstrukcije na promatranoj zgradi. Osnovni konstrukcijski element stropne konstrukcije jesu masivne drvene grede visine 220 mm i širine 180 mm. Grede se postavljaju u smjeru kraćeg raspona (poprečni smjer) pa tako osni razmak između oslonaca iznosi 6,3 metara. Razmak između greda u pravilu ne bi trebao biti veći od 90 cm, iznimno 100 cm, no u ovoj zgradi taj je razmak jednak 80 cm. Na grede je s donje strane postavljena oplata u obliku drvenih dasaka debljine 18 mm. Ispod donje oplata nalazi se sloj trske i žbuke koji je za oplatu pričvršćen čavlima. Na gornju površinu greda postavlja se oplata u obliku drvenih dasaka debljine 24 mm. Iznad gornje oplata izveden je sloj nasipa od šljunčanog materijala u debljini 8 cm. U nasip su utisnute drvene daske poprečnog presjeka 76 x 48 mm međusobno razmaknute 80 cm, takve daske nazivaju se blazinice. Na blazinice se pribijaju daske debljine 24 mm koje predstavljaju slijepi pod. U ovom slučaju daske su izvedene duljine 160 cm tako da premošćuju dva raspona razmaka između blazinica. Daske dvaju susjednih redova postavljene su naizmjenice kako sudarnica nastavljenih dasaka ne bi formirala isti pravac. Kao završni sloj poda postavlja se parket odnosno parketne daske debljine 14 mm proizvedene od drva hrasta.

Sa svim navedenim elementima, konstrukcija stropa ukupne je visine 40 cm. Ova vrijednost predstavlja veliku visinu stropa u usporedbi sa armiranobetonskim, polumontažnim stropovima ili nekim drugim tipom drvenih stropova.

U ovom radu promatrana zgrada sadrži osni raspon od 12,6 metara, što se smatra velikim rasponom za drvenu krovnu konstrukciju. Za svladavanje tako velikog raspona izvedena je konstrukcija krovništa s podrožnicama na dvostrukim visuljama. Detaljan opis ovakvog tipa krovne konstrukcije prikazan je u Poglavlju 2.3. Dimenzije svakog pojedinog konstrukcijskog elementa u krovnoj konstrukciji prikazane su u Tablici 11. S obzirom da je pretpostavljen razmak stropnih greda od 80 cm, isti toliki je i razmak rogova. U tom slučaju opravdan je razmak punog veza od 4,0 m, što znači da je svaki peti par rogova zapravo puni vez sa dvostrukim visuljama. Aksonometrijski prikaz ovakvog tipa krovništa prikazan je na Slici 15.

S obzirom da se radi o zgradi smještenoj u Gradu Rijeci, razumno je reći da na ovaj krov godišnje padne puno oborina. Doduše, oborina u ovom kontekstu označava kišu, dok snijega na ovom području gotovo nikad nema. Zaključno može se reći kako obilna kiša podrazumijeva strmiji krov ali nedostatak snijega podrazumijeva blaži krov. Granična

vrijednost koja odvaja krov blagog nagiba od strmog, a ona iznosi 25°. Upravo pod takvim kutom izvedena je krovna konstrukcija u promatranoj zgradi.

Velika debljina nosivih zidova ( $t=51$  cm), zajedno sa svojom specifičnom težinom, označava ovu zgradu kao masivnu konstrukciju iako su na njoj izvedene drvene stropne konstrukcije i drveno krovište. Pritom treba spomenuti da drveni stropovi u sebi sadrže sloj nasipa debljine 8 cm, nasip dakako predstavlja težak materijal. Veća masa konstrukcije je nepovoljniji slučaj uslijed potresnog djelovanja na konstrukciju. U svrhu proračuna potresne otpornosti promatrane zgrade, vrijednosti tlačne čvrstoće zida i ostala potrebna svojstva uzeta su iz Tablice 5. Z. Sorića.

## 4.2. Djelovanja na konstrukciju

### 4.2.1. Gravitacijsko opterećenje

Gravitacijskim opterećenjem smatra se stalno opterećenje vlastite težine stropne konstrukcije te promjenjivo uporabno opterećenje koje djeluje na istu stropnu konstrukciju. Ukupno stalno opterećenje ( $G_d$ ) jedne stropne konstrukcije na promatranoj zgradi prikazano je u Tablici 15., stalno opterećenje rezultat je proračuna vlastite težine stropne konstrukcije prikazanog Tablicom 13. Uporabno opterećenje određuje se na temelju norme HRN EN 1991-1-1:2012 [12] gdje se uzima mjerodavna vrijednost od 2,0 kN/m<sup>2</sup>. S obzirom da za proračun potresne otpornosti zgrade stalno i uporabno opterećenje stropne konstrukcije djeluje povoljno, parcijalni faktori sigurnosti za oba opterećenja iznose 1,0. Izraz za proračun kombinacije stalnog i promjenjivog djelovanja glasi:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,1} \quad (16)$$

$$\psi_{E,i} = \rho \cdot \psi_{2i} \quad (17)$$

Koeficijent kombinacije  $\psi_{E,i}$  odnosi se na postojanje promjenjivih opterećenja u trenutku pojave potresnog djelovanja. Ovaj koeficijent također obuhvaća smanjenje sudjelovanja uporabnog opterećenja u masi stropne konstrukcije zbog popuštanja veza između ta dva elementa. Njegove vrijednosti vidljive su u Tablici 12.

Tablica 12. Vrijednosti koeficijenta  $\rho$  za proračun  $\psi_{E,i}$  [16]

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		

Navedena kombinacija djelovanja ujedno označava i težinu stropne konstrukcije ( $W$ ), ukoliko težinu podijelimo s gravitacijskim ubrzanjem ( $g$ ) dobit ćemo ukupnu masu stropne konstrukcije.

Što se tiče drugog faktora u navedenom izrazu, vrijednosti faktora redukcije ( $\Psi_{2i}$ ) [37] prikazane su u Tablici 14. Stalno opterećenje se ne može reducirati stoga faktor redukcije za stalno opterećenje iznosi 1,0, no za kvazistatično odnosno promjenjivo opterećenje u stambenim zgradama, njegova vrijednost iznosi 0,3 kao što možemo vidjeti u Tablici 14.

Tablica 13. Vlastita težina stropne konstrukcije (Model A)

Element stropne konstrukcije	Debljina * duljina * širina * specifična težina (izuzetak drvena greda)	Težina	Mjerna jedinica
<i>parket</i>	0,014 m * 22,5 m * 12,6 m * 7 kN/m <sup>3</sup>	27,78	kN
<i>slijepi pod</i>	0,024 m * 22,5 m * 12,6 m * 4,1 kN/m <sup>3</sup>	27,90	kN
<i>nasip</i>	0,08 m * 22,5 m * 12,6 m * 12 kN/m <sup>3</sup>	272,16	kN
<i>gornja oplata</i>	0,024 m * 22,5 m * 12,6 m * 4,1 kN/m <sup>3</sup>	27,90	kN
<i>drvena greda</i>	0,18 m * 0,22 m * 12,6 m * 29 kom * 7,5 kN/m <sup>3</sup>	108,52	kN
<i>donja oplata</i>	0,018 m * 22,5 m * 12,6 m * 4,1 kN/m <sup>3</sup>	23,25	kN
<i>trska i žbuka</i>	0,02 m * 22,5 m * 12,6 m * 15 kN/m <sup>3</sup>	85,05	kN
<i>čavli</i>		1,00	kN
<b>UKUPNO:</b>		573,56	kN

Tablica 14. Vrijednosti faktora  $\psi$  za zgrade [37]

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 15. Vrijednost stalnog opterećenja (Model A)

UKUPNA VLASTITA TEŽINA PO m <sup>2</sup> : 573,56 / (22,5m * 12,6m)	G =	2,02	kN/m <sup>2</sup>
FAKTOR REDUKCIJE	$\psi_2 =$	1,00	/
UKUPNO STALNO OPTEREĆENJE PO m <sup>2</sup> :	G <sub>d</sub> =	2,02	kN/m <sup>2</sup>

Tablica 16. Vrijednost uporabnog opterećenja (Model A & B)

UKUPNA UPORABNO OPTEREĆENJE PO m <sup>2</sup> :	Q =	2,00	kN/m <sup>2</sup>
FAKTOR REDUKCIJE	$\psi_2 =$	0,30	/
UKUPNO STALNO OPTEREĆENJE PO m <sup>2</sup> :	Q <sub>d</sub> =	0,60	kN/m <sup>2</sup>

Gravitacijska opterećenja predstavljaju vrlo bitnu varijablu prilikom proračuna potresnog djelovanja odnosno potresne otpornosti zgrade. Navedene vrijednosti gravitacijskih opterećenja jedne su od varijabli kojima se definira proračunski model u *3Muri*-ju, u Poglavlju 4.4.2. detaljno su objašnjeni svi ulazni podaci.

Treba napomenuti kako je u Tablici 13. proračunata vlastita težina realne stropne konstrukcije, koja je mjerodavna za prvi proračunski model u *3Muri*-ju – Model A. Vlastita težina kod drugog modela nije jednaka kao kod Modela A. Stoga slijedi Tablica 17. kojom je definirana vlastita težina apsolutno krute stropne konstrukcije (Model B). Detaljniji opis stropnih konstrukcija u modelima A i B vidljiv je u Poglavlju 5.

*Tablica 17. Vlastita težina stropne konstrukcije (Model B)*

Element stropne konstrukcije	Debljina * duljina * širina * specifična težina (izuzetak drvena greda)	Težina	Mjerna jedinic a
<i>AB ploča</i>	0,20 m * 22,5 m * 12,6 m * 7 kN/m <sup>3</sup>	1417,50	kN
UKUPNO:		1417,50	kN
UKUPNA VLASTITA TEŽINA PO m <sup>2</sup> : 1417,5 / (22,5m * 12,6m)	G =	5,00	kN/m <sup>2</sup>
FAKTOR REDUKCIJE	Ψ <sub>2</sub> =	1,00	/
UKUPNO STALNO OPTEREĆENJE PO m <sup>2</sup> :	G <sub>d</sub> =	5,00	kN/m <sup>2</sup>

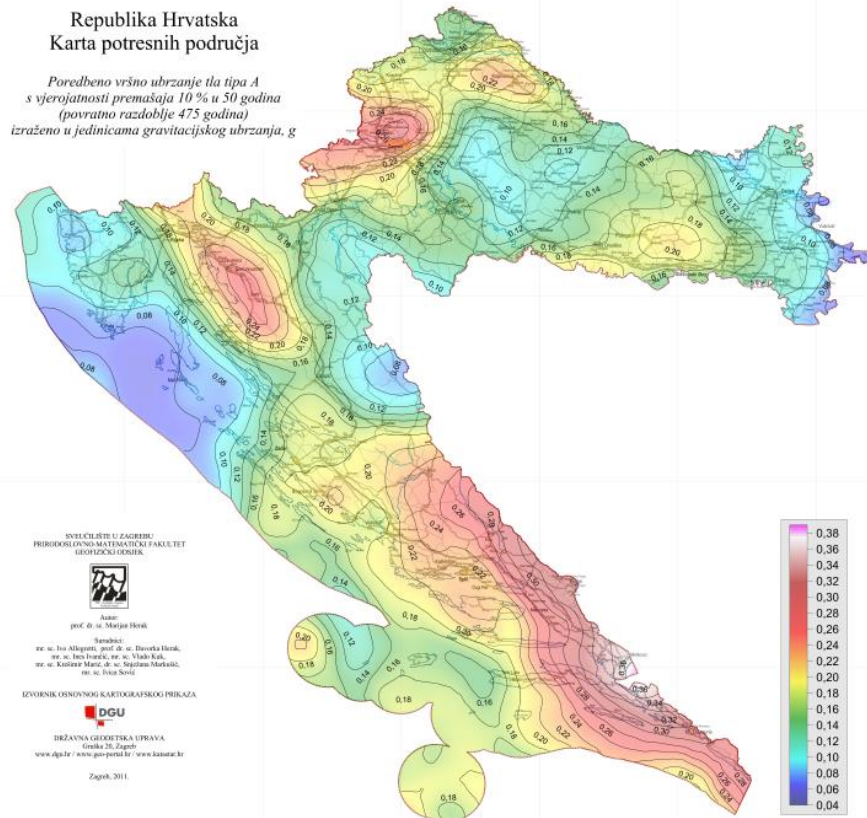
#### 4.2.2. Potresno djelovanje

Potresno djelovanje već je opširno opisano u Poglavlju 3. no što se tiče potresnog opterećenja na konstrukciju, gledano iz perspektive *3Muri-ja*, najvažnije je definirati vrijednosti vršnog ubrzanja tla i mase elemenata konstrukcije. Programski paket *3Muri* samostalno računa ukupnu težinu zidova nakon što se ručno unesu podaci o specifičnoj težini ziđa i dimenzijama zidova. Težina stropnih i krovnih konstrukcija mora se ručno unijeti u proračunski model načinom prikazanim u Poglavlju 4.4.2.

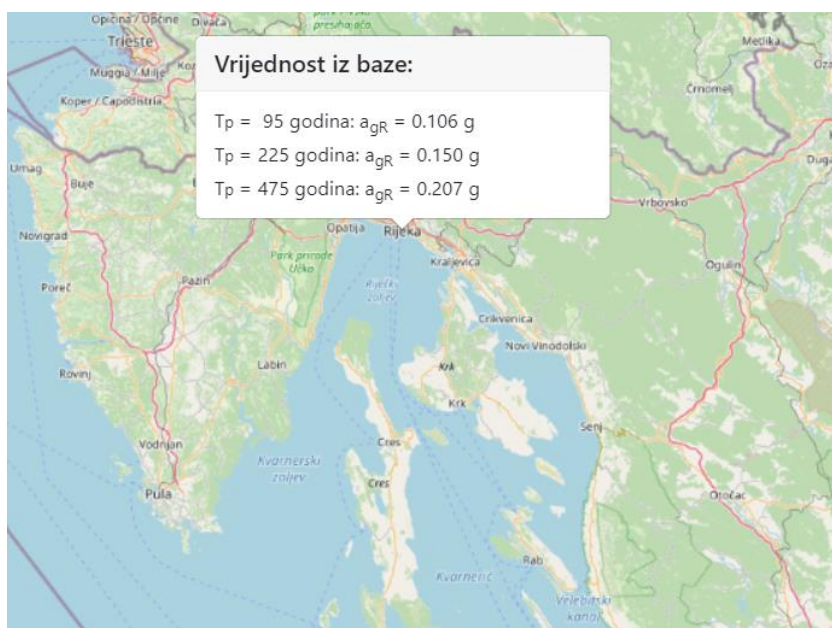
Zbog principa rada kojim *3Muri* vrši proračun, potrebno je definirati tri vršna ubrzanja tla zbog tri granična stanja [38] koja se provjeravaju u *3Muri-ju* (opširnije objašnjenje u Poglavlju 4.4.1). Dakle, sagledavaju se vršno ubrzanje tla koje odgovara povratnom periodu od 95 godina, vršno ubrzanje tla koje odgovara povratnom periodu od 475 godina te vršno ubrzanje tla kojim se definira granično stanje blizu rušenja (BR). Posljednje navedeno ubrzanje dobiva se tako što se vrijednost vršnog ubrzanja tla za povratni period od 475 godina množi s parcijalnim faktorom sigurnosti  $\gamma_P=1,5$ . Vrijednosti vršnih ubrzanja tla iščitavaju se iz karta potresnih područja Republike Hrvatske, takva karta za povratni period od 475 godina prikazana je na Slici 31. Naravno, podrazumijeva se promatranje područja Grada Rijeke na kartama potresnih područja. Vrijednosti vršnih ubrzanja tla s pripadajućim povratnim periodima za Grad Rijeku prikazane su na Slici 32.

U stvarnosti, prilikom pregleda konstrukcija oštećenih potresom, granicu između graničnih stanja znatnog oštećenja (ZO) i blizu rušenja (BR) predstavlja širina pukotine od 3 milimetra. Pojedini zid na kojem je nastala pukotina smatra se znatno oštećenim ukoliko je ta ista pukotina širine manje od 3 mm. Suprotno tome, zid se smatra da je u stanju blizu rušenja ukoliko je ta pukotina širine veće od 3 mm.





Slika 31. Karta potresnih područja Republike Hrvatske s vrijednostima vršnog ubrzanja tla  $a_{GR}$  za tlo razreda A – povratni period 475 godina [39]



Slika 32. Vrijednosti vršnih ubrzanja tla za različite povratne periode na području Grada Rijeke [39]

### 4.3. Mehanička i deformacijska svojstva materijala

#### 4.3.1. Mehanička i deformacijska svojstva ziđa

Ovo poglavlje bavi se mehaničkim i deformacijskim svojstvima koje će se koristiti u proračunu potresne otpornosti promatrane konstrukcije. U Poglavlju 4.4.2 detaljno se opisuje svaki ulazni podatak u programskom paketu 3Muri, tako je jedan od osnovnih ulaznih podataka i sam materijal zidova i stropnih konstrukcija.

Nakon što se definira materijal, on se zadaje modeliranim konstruktivnim elementima poput zidova, greda, ploča, stupova... Osim samih svojstva materijala može se primijetiti da je stanje materijala definirano kao postojeće (Slika 42, 43). Odabrano je također raspucalo stanje materijala što znači da se krutost umanjuje faktorom redukcije zbog raspucalosti, faktor redukcije detaljnije je objašnjen u Poglavlju 4.4.2. Prikazane vrijednosti karakteristika materijala unesene su ručno na temelju talijanske norme NTC 2018 – Circolare 21 [9] i Tablice 5. koja je uzeta iz knjige „Zidane konstrukcije“, Z. Sorića 2016 [2]. U navedenoj tablici promatra se puna opeka starog ziđa sa svojim karakterističnim čvrstoćama, iz ove tablice izvlače se podaci o mehaničkim svojstvima ziđa. Iz norme NTC 2018 – Circolare 21 [9] izvlače se podaci o deformacijskim svojstvima ziđa s obzirom da su te vrijednosti realnije. Treba napomenuti kako se u Tablici 5. nalaze karakteristične vrijednosti dok programski paket 3Muri prepoznaje samo srednje vrijednosti istoimenih čvrstoća. Zbog ove pojave potrebno je karakteristične vrijednosti iz Tablice 5. podijeliti s 0,8 kako bi se mogla ispravno izvesti nelinearna statička analiza naguravanjem.

Za dobivanje potrebnog prosječnog posmičnog naprezanja ( $\tau$ ); osim dijeljenja faktorom 0,8; vrijednost  $f_t$  iz Tablice 5. umanjuje se i faktorom 1,5. Parcijalni faktor sigurnosti za materijal (ziđe) određuje se na temelju norme HRN EN 1996-1-1:2012/NA [40]; on ovisi o mortu, kategoriji zidnog elementa te razredu izvedbe. S obzirom da se radi o starom ziđu uzima se kombinacija koja je najviše na strani sigurnosti, dakle faktor sigurnosti za ziđe ( $\gamma_M$ ) jednak je 3.

Za Mohr/Coulomb-ovu metodu proračuna vrijednost srednje posmične čvrstoće ziđa pri nultom naprezanju dobiva se na temelju Tablice 6. Uzeta je mjerodavna vrijednost karakteristične posmične čvrstoće za opečni zidni element i mort opće namjene

razreda čvrstoće M1,  $f_{vk0} = 0,10 \text{ N/mm}^2$ . Karakteristična vrijednost se zatim dijeli s faktorom 0,8 kako bi se dobila potrebna srednja vrijednost.

Na temelju svih navedenih pretvorbi definirana je Tablica 18. gdje su prikazane vrijednosti mehaničkih i deformacijskih svojstava koje se unose u programski paket 3Muri.

*Tablica 18. Mehanička i deformacijska svojstva zida [2;9]*

Svojstvo materijala	Oznaka	Postupak pretvorbe	Vrijednost	Mjerna jedinica
Modul elastičnosti zida	E	1200	1200	MPa
Modul posmika zida	G	400	400	MPa
Specifična težina zida	$\gamma$	1800	1800	kg/m <sup>3</sup>
Srednja tlačna čvrstoća zida	$f_m$	2000 / 0,8	2,5	MPa
Karakteristična tlačna čvrstoća zida	$f_k$	2000	2	MPa
Srednja posmična čvrstoća zida	$\tau$	0,09 / (0,8*1,5)	0,075	MPa
Srednja početna posmična čvrstoća zida	$f_{vm0}$	0,10 / 0,8	0,125	MPa
Granična vrijednost posmične čvrstoće	$f_{vm0}$	0,065*10	0,650	MPa
Faktor sigurnosti materijala zida	$\gamma_M$		3	/

### 4.3.2. Mehanička i deformacijska svojstva stropne konstrukcije

Za drvene grede stropnih konstrukcija u promatranoj tradicionalnoj zgradi može se navesti pretpostavka da su one srednje kvalitete to jest razred C24. No s obzirom da se u Tablici 10. podrazumijeva uporaba novih drvenih konstruktivnih elemenata, za potrebe proračuna referirati će se na rad „Experimental and analytical evaluation of the in-plane behaviour of as-built and strengthened traditional wooden floors“ [32]. U tom radu izvedeno je istraživanje krutosti tradicionalne drvene stropne konstrukcije, na temelju ispitivanja utvrđeni su rezultati modula elastičnosti drvenog grednika i daščanog sloja. Vrijednost modula elastičnosti drvenog grednika jednaka je  $E = 13120$  MPa, a drvene daske  $E = 11210$  MPa.

Normom HRN EN 338:2016 [25] definirana je samo jedna vrijednost modula posmika koja ovisi o kvaliteti drvnog materijala. Na siguran i pravilan način određena je jednoznačna veličina modula posmika koja u obzir uzima sva tri smjera drvenog elementa (Slika 11.). U Tablici 10. prikazane su srednje vrijednosti modula posmika, no kao što je to već spomenuto, te vrijednosti vrijede za uporabu novih drvnih konstruktivnih proizvoda. Ipak, promatravši omjere srednjih vrijednosti modula elastičnosti (u smjeru vlakanca) i posmika različitih razreda drva u Tablici 10. može se zaključiti jednoznačna vrijednost omjera  $E_{0,mean}/G_{mean}=0,0625$ ; oscilacije ove vrijednosti su zanemarive. Uz ovaj podatak određuje se modul posmika drvenih grednika i dasaka na temelju njihovih prethodno definiranih modula elastičnosti.

$$G_{G,mean} = 0,0625 E_{G,0,mean} = 0,0625 * 13120 = 820 \text{ MPa} \quad (18)$$

$$G_{D,mean} = 0,0625 E_{D,0,mean} = 0,0625 * 11210 = 700 \text{ MPa} \quad (19)$$

Programski paket *3Muri* za definiranje drvene stropne konstrukcije s jednoslojnom daščanom oplatom automatski definira vrijednost modula posmika koja se ne može korigirati, ona iznosi  $G = 10\ 000$  kN/m<sup>2</sup> odnosno  $G = 10$  N/mm<sup>2</sup> (Slika 39). No za definiranje drvene stropne konstrukcije s višeslojnom daščanom oplatom uzima pretpostavku kako je modul posmika same stropne konstrukcije jednak modulu posmika daščane oplata, stoga je moguć ručni unos navedene vrijednosti  $G_{mean} = 700$  N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.4. Proračunski model u programskom paketu 3Muri12

##### 4.4.1. Princip rada programskog paketa 3Muri

Programski paket 3Muri prilagođen je za prostorni proračun postojećih zidanih zgrada gdje su one opisane pomoću ravninskih makroelemenata. Zgrade se uvode u program u obliku prostornog modela koji se zapravo predstavlja kao skup zamjenskih ravninskih okvira (najčešće se pružaju u dva ortogonalna smjera). Ravninski okviri definirani su dimenzijama zidova i otvora u njima te mehaničkim karakteristikama samog materijala.

Prostorni model konstrukcije proračunava se nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja (eng. Pushover analysis) koja se temelji na načelima norme HRN EN 1998-1:2004 [32]. Ovakav proračun provodi se za stalna gravitacijska opterećenja i konstantno rastuće horizontalno opterećenje. Horizontalno opterećenje se kroz pravilno rastuće inkremente nanosi na model te se nakon svakog inkrementa računa nelinearni odziv svih pojedinih makroelemenata. Proračunom nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja potrebno je odrediti odnos između bočne sile u podnožju i kontrolnog pomaka. Kontrolni pomak u pravilu može poprimiti vrijednosti između 0 i 150% ciljanog pomaka ( $d_t$ ). Točka u kojoj se promatra kontrolni pomak smije se uzeti kao točka u središtu mase krova zgrade. Ciljani pomak izveden je iz elastičnog spektra odziva kao pomak istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode [14], njegovo definiranje biti će opširnije opisano u nastavku.

Proračun kreće računanjem normaliziranih bočnih sila ( $F_i$ ) po katovima zgrade sljedećim izrazom:

$$F_i = m_i \Phi_i \quad (20)$$

gdje je:  $m_i$  – masa i-tog kata

$\Phi_i$  – normaliziran pomak kontrolnog čvora na i-tom katu

Normalizirani pomaci kontrolnih čvorova ostvaruju se tako da se pomak kontrolnog čvora  $n$ , gdje  $n$  označuje razinu najvišeg kata zgrade, normalizira na vrijednost 1 ( $\Phi_n = 1$ ). Kako bi se ostvarila pretvorba stvarnog sustava u sustav s jednim stupnjem slobode,

određuje se masa istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode ( $m^*$ ) sljedećim izrazom:

$$\mathbf{m}^* = \sum \mathbf{m}_i \Phi_i = \sum \mathbf{F}_i \quad (21)$$

U istovrijednom sustavu s jednim stupnjem slobode veličine sile  $F^*$  i pomaka  $d^*$  računaju se uz pomoć faktora pretvorbe  $\Gamma$ . Sila  $F^*$  i pomak  $d^*$  proračunavaju se na temelju sljedećeg izraza:

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{F}_b / \Gamma \quad (22)$$

$$\mathbf{d}^* = \mathbf{d}_n / \Gamma \quad (23)$$

gdje je:  $F_b$  – poprečna sila u podnožju

$d_n$  – pomak kontrolnog čvora sustava s više stupnjeva

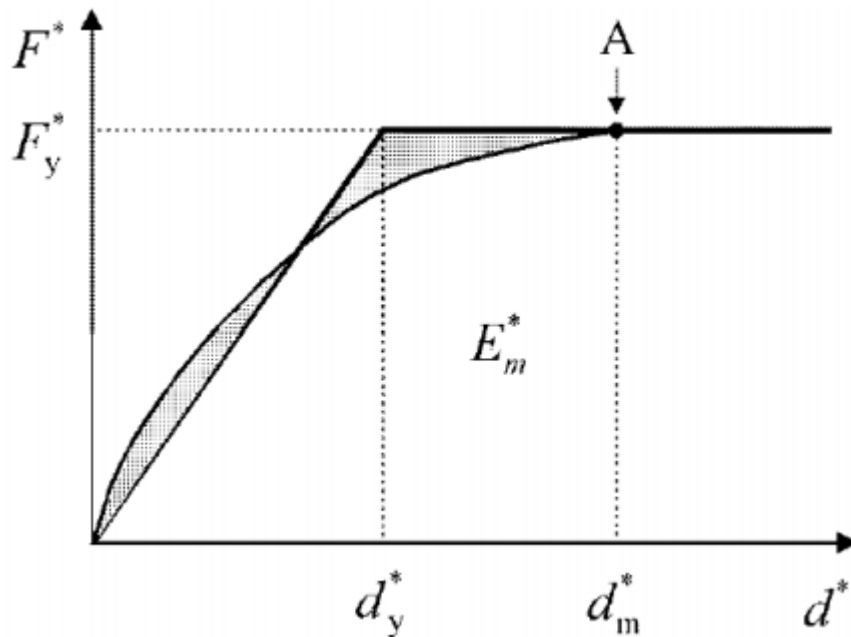
Veličinu faktora pretvorbe definiraju više varijabli, što možemo uočiti u sljedećem izrazu.

$$\Gamma = \frac{\mathbf{m}^*}{\sum \mathbf{m}_i \Phi_i^2} = \frac{\sum \mathbf{F}_i}{\sum \left( \frac{\mathbf{F}_i^2}{\mathbf{m}_i} \right)} \quad (24)$$

Na Slici 33. može se vidjeti tipska krivulja sposobnosti nosivosti koja povezuje bočnu silu u podnožju i kontrolni pomak u istovrijednom sustavu s jednim stupnjem slobode. Na krivulji se može primijetiti sila pri popuštanju ( $F_y$ ) koja ujedno predstavlja i graničnu nosivost idealiziranog sustava. Navedena sila u istom trenu označava i vrijednost bočne sile u podnožju koja djeluje u trenutku pojave plastičnog mehanizma. Trenutak nastanka plastičnog mehanizma na Slici 33. označen je oznakom „A“. Pomak pri popuštanju idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode ( $d_y^*$ ) temelji se na pretpostavci da je početna krutost idealiziranog sustava definirana uvjetom da su jednake površine ispod stvarne i idealizirane krivulje sila – deformacija [14]. Na osnovi navedenog, za izračun pomaka  $d_y^*$  dan je izraz:

$$\mathbf{d}_y^* = 2 \left( \mathbf{d}_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (25)$$

gdje  $E_m^*$  predstavlja stvarnu utrošenu energiju deformiranja prije pojave plastičnog mehanizma.



Slika 33. Krivulja sposobnosti nosivosti [14]

Spomenuta je prije i veličina ciljanog pomaka ( $d_t$ ), on se definira kao zahtjev kojeg konstrukcija mora zadovoljiti kako bi zadovoljila uvjet potresne otpornosti.. Kako bi se odredio ciljani pomak najprije je potrebno odrediti period  $T^*$  idealiziranog istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode na sljedeći način:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (26)$$

Nakon odredbe vrijednosti navedenog perioda, sljedeći korak u „Pushover“ analizi jest određivanje ciljanog pomaka istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode ( $d_t^*$ ). Kako bi se proračunao traženi ciljani pomak najprije se mora odrediti vrijednost ciljanog pomaka konstrukcije s periodom  $T^*$  s neograničenim elastičnim ponašanjem, on se proračunava na sljedeći način:

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (27)$$

gdje veličina  $S_e(T^*)$  predstavlja elastični spektar odziva konstrukcije za vršno ubrzanje koje odgovara periodu  $T^*$ .

Definiranju veličine ciljanog pomaka  $d_t^*$  prethodi uvjet ovisan o duljini perioda  $T^*$ . Radi se o tome da se ciljani pomak  $d_t^*$  računa drugačijim izrazima ovisno o tome je li

vrijednost perioda  $T^*$  veća ili manja od graničnog perioda između kratkoperiodičnog i srednjeperiodičnog raspona ( $T_C$ ). Ukoliko se radi o srednje ili dugoperiodičnom rasponu ( $T^* \geq T_C$ ) vrijedi sljedeći izraz:

$$\mathbf{d}_t^* = \mathbf{d}_{et}^* \quad (28)$$

U drugom slučaju kad se radi o kratkoperiodičnom rasponu ( $T^* < T_C$ ) postavljen je dodatni uvjet o tome je li odziv elastičan ili nelinearan. Stoga u slučaju kad je odziv elastičan ( $F_y^*/m^* \geq S_e(T^*)$ ) vrijedi izraz:

$$\mathbf{d}_t^* = \mathbf{d}_{et}^* \quad (29)$$

U suprotnom slučaju kad je odziv nelinearan ( $F_y^*/m^* < S_e(T^*)$ ) vrijedi izraz:

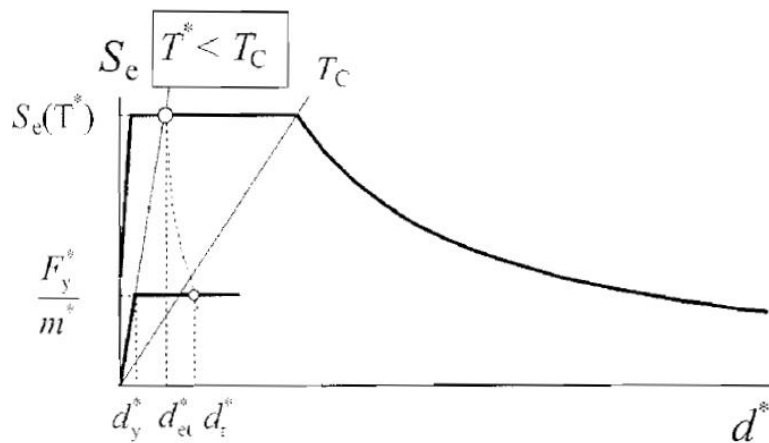
$$\mathbf{d}_t^* = \frac{\mathbf{d}_{et}^*}{q_u} \left[ 1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right] \geq \mathbf{d}_{et}^* \quad (30)$$

U posljednjem izrazu može se uočiti jedna još nedefinirana veličina,  $q_u$ . Ova veličina predstavlja omjer ubrzanja konstrukcije s neograničenim elastičnim ponašanjem  $S_e(T^*)$  i konstrukcije s ograničenom čvrstoćom  $F_y^*/m^*$ . Vrijednost navedenog omjera proračunava se sljedećim izrazom:

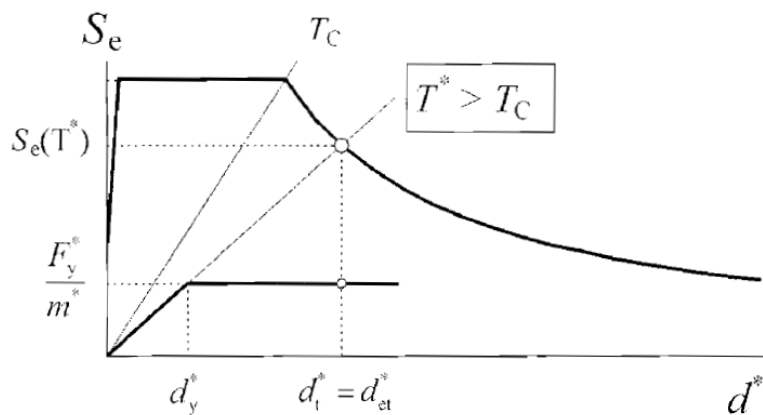
$$q_u = \frac{S_e(T^*)m^*}{F_y^*} \quad (31)$$

Za sve prethodne izraze proračuna ciljanog pomaka vrijedi pravilo da njegova vrijednost mora biti manja od triput veće vrijednosti ciljanog pomaka konstrukcije s neograničenim elastičnim ponašanjem. Sve navedene veličine predstavljene su grafički na Slici 34. i Slici 35. Na grafovima se također mogu uočiti međusobni odnosi između opisanih veličina. Grafovi su definirani s apcismom na kojoj se nalaze pomaci i ordinatom na kojoj se nalaze ubrzanja.





Slika 34. Graf pomak – ubrzanje za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode i kratkoperiodični raspon [32]



Slika 35. Graf pomak – ubrzanje za istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode i srednje periodični i dugoperiodični raspon [32]

Krajnji cilj „Pushover“ proračuna jest definiranje vrijednosti ciljanog pomaka za sustave s više stupnjeva slobode, koji odgovara promatranom kontrolnom čvoru. Ta se vrijednost dobiva umnoškom ciljanog pomaka istovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode i faktora pretvorbe, što možemo vidjeti sljedećim izrazom:

$$\mathbf{d}_t = \Gamma \mathbf{d}_t^* \quad (32)$$

Programski paket *3Muri* definira vrijednost ciljanog pomaka  $d_t$  kao pomak koji proračunski model konstrukcije mora moći podnijeti bez dosezanja graničnog stanja nosivosti. Sagledavaju se tri različita granična stanja nosivosti koja odgovaraju trima različitim vršnim ubrzanjima tla definiranim u Poglavlju 4.2.1. Tri različita granična stanja nosivosti jesu [38]:

- granično stanje ograničenog oštećenja (OO)
- granično stanje znatnog oštećenja (ZO)
- granično stanje blizu rušenja (BR)

Svako granično stanje ima odgovarajuće vrijednosti ciljanog pomaka ( $d_c$ ) i maksimalnog pomaka proračunskog modela u trenutku dosezanja zadanog uvjeta graničnog stanja ( $d_m$ ). U programskom paketu *3Muri* zadaje se uvjet kojim se definira maksimalan mjerodavan pomak. Navedeni pomak tako može odgovarati pojavi prvog sloma nekog elementa modela konstrukcije (eng. First Element Failed) ili globalnog otkazivanja konstrukcije (eng. Decay). Pojam „globalno otkazivanje konstrukcije“ poprilično je neprecizan i objektivn, njime je definirano očitavanje maksimalnog pomaka modela u trenutku kad se dostigne jedan kriterij: „čvrstoća konstrukcije na poprečnu silu (eng. base shear) je pala ispod 80% maksimalne, uslijed progresivnog oštećenja i otkazivanja elemenata“

Očitavanje maksimalnog mjerodavnog pomaka konstrukcije prethodno definiranim uvjetima završetka proračuna ne može biti mjerodavan iz razloga što takvi uvjeti nisu realno opravdani [14]. Prvi uvjet – slom prvog elementa konstrukcije nije opravdan iz razloga što u većini slučajeva taj makro-element, gdje se događa slom, predstavlja pregradni zid (posebice u Y smjeru); u ostalim slučajevima taj kritičan makro-element je često „spandrel“ element na najvišoj etaži što u stvarnosti ne može predstavljati narušenje stabilnosti cijele konstrukcije. Drugi uvjet – pad poprečne sile ispod 80% maksimalne nije opravdan iz razloga što se po pravilu taj uvjet ne može promatrati ukoliko se ne radi o apsolutno krutoj stropnoj konstrukciji; te u slučajevima kad se radi o apsolutno krutoj stropnoj konstrukciji iz sigurnosne perspektive nije opravdan uvjet jer dopušta prevelike pomake i potpuni slom previše makro-elemenata. Iz ovih razloga mjerodavan uvjet će biti ručno pronalaženje makro-elementa nosivog zida gdje se dogodio prvi slom u kritičnoj provjeri za pojedini smjer. Osnovni preduvjet ručnom pronalaženju kritičnog makro-elementa jest da se koriste kritične provjere u rezultatima dobivenim uvjetom sloma prvog elementa, ne uvjetom globalnog otkazivanja konstrukcije. U trenutku sloma iščitati će se pomak koji će se zatim podijeliti s pomakom danim od strane programa (u trenutku prvog sloma bilo kojeg elementa). Nadalje, njihov omjer će se pomnožiti s faktorom ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja dobivenim od strane programa (u trenutku prvog sloma bilo kojeg

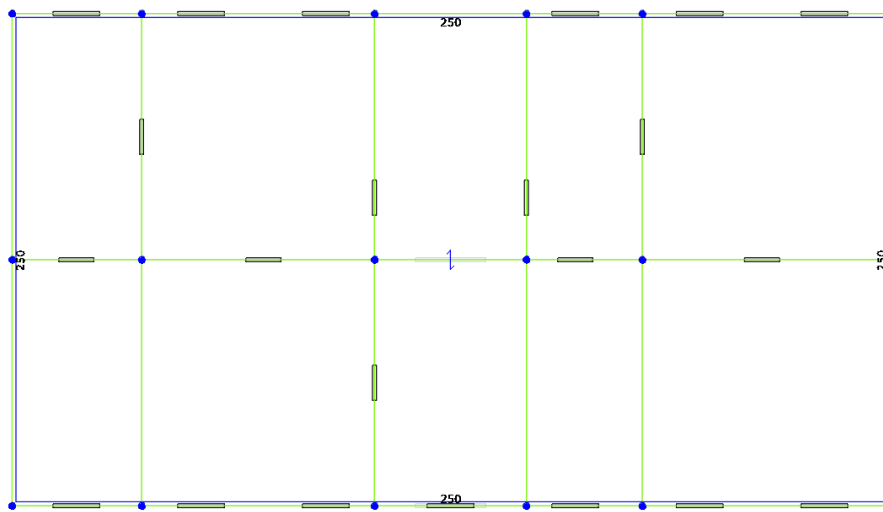
elementa). Takav produkt definira mjerodavan faktor ispunjenja koji predstavlja potresnu otpornost proračunskog modela.

Treba napomenuti da je za granično stanje ograničenog oštećenja mjerodavan pomak pri popuštanju idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode ( $d_y^*$ ).

U suštini kako bi se promatrana zgrada mogla smatrati sasvim sigurnom i otpornom na potres koji se očekuje na području te zgrade, morala bi zadovoljiti sva tri navedena granična stanja. Najkritičnije granično stanje jest granično stanje blizu rušenja, ukoliko je ovo granično stanje prekoračeno opravdano je smatrati kako promatrana zgrada ne bi „preživjela“ potres odnosno došlo bi do sloma konstruktivnog sustava te vjerojatno i do potpunog kolapsa zgrade.

#### 4.4.2. Unos ulaznih parametara za proračun

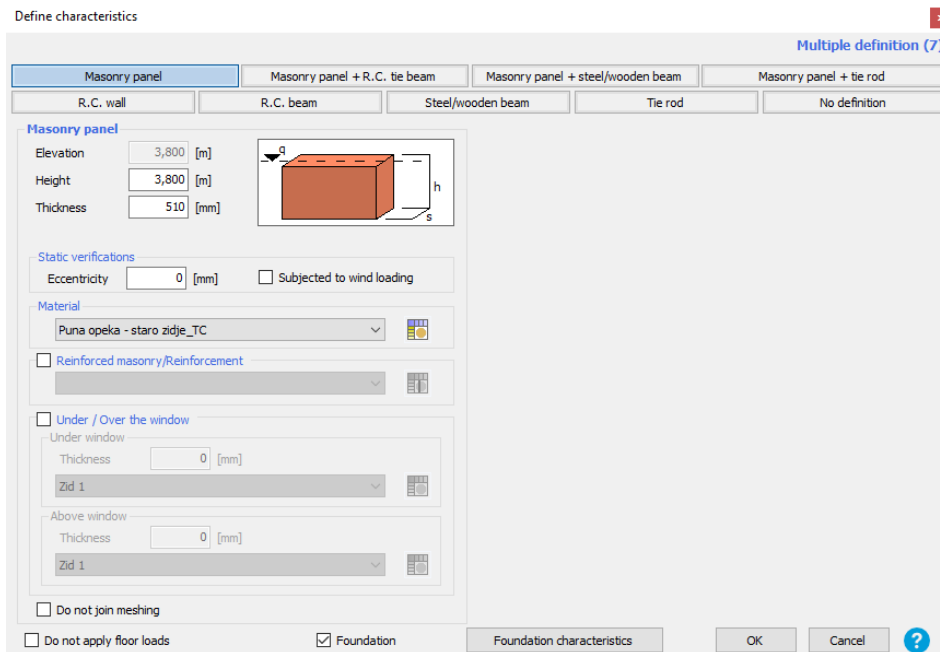
U prijašnjim poglavljima definiran je put i način kojim se došlo do vanjskih gabarita konstrukcije i ostalih dimenzija kao što su katna visina, međusobne udaljenosti pregradnih i nosivih zidova, razmak između otvora, visina i širina samih otvora, dimenzije stubišta i sl. Sve ove dimenzije naznačene su na nacrtima koji se nalaze u prilogu Popis Nacrta. Osi zidova u *3Muri*-ju definirane su tako da se preklapaju s osima zidova iz *AutoCad* nacrtu koji je ubačen u *3Muri* u *dxf* formatu kao podloga (Slika 36).



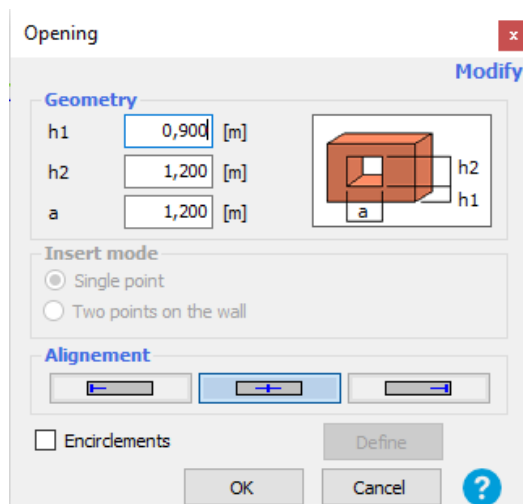
Slika 36. Tlocrtna shema zidova i stropa u *3Muri*-ju

Zadana je debljina nosivih zidova od 51 cm, a pregradnih 12 cm. Unesena je visina kata od 3,8 m što znači da je i visina vanjskih i unutarnjih zidova jednaka 3,8 m kao što to možemo vidjeti na Slici 37.

U zidovima su naravno definirani i otvori - vrata i prozori. Unesene dimenzije otvora tipskog prozora na zgradi mogu se vidjeti na Slici 38. Mogu se uočiti tri ćelije u koje se upisuju dimenzije kojima se definira otvor prozora, to su redom dimenzije parapeta, visine otvora te širine otvora. Otvor vrata se definira na isti način uz jednu dimenziju manje, to je parapet.

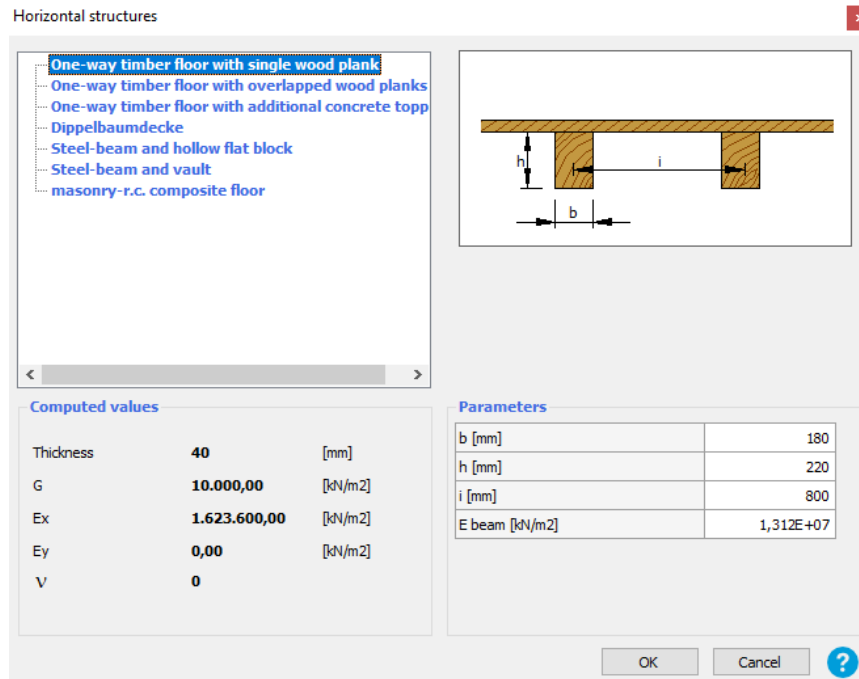


Slika 37. Atributi zidnog panela proračunskog modela



Slika 38. Dimenzije otvora prozora u zidu

Stropna konstrukcija definirana je kao jednoslojni daščani pod oslonjen na drvenim grednicima koji se protežu u jednom smjeru. Dimenzije i međusobni razmak grednika shematski zajedno s modulom elastičnosti grednika prikazani su na Slici 39. Ovakav oblik stropne konstrukcije najrealniji je prikaz stvarne stropne konstrukcije definirane u Poglavlju 2.2.



Slika 39. Dimenzije stropne konstrukcije

Na prethodnoj slici s desne strane pod naslovom „Parameters“ vidljive su definirane karakteristike stropne konstrukcije, na temelju njih programski paket *3Muri* određuje proračunane vrijednosti (eng. Computed values) interpretirane stropne ploče vidljive s lijeve strane. Naime, *3Muri* u bilo kojem slučaju strop interpretira kao horizontalnu ploču okarakteriziranu s pet parametara pod naslovom „Computed values“, to su dakle:

- Debljina ploče, **Thickness**
- Modul posmika, **G**
- Modul elastičnosti u smjeru pružanja greda, **Ex**
- Modul elastičnosti u okomitom smjeru na grede, **Ey**
- Poissonov koeficijent, **v**

Program *3Muri* automatski zadaje debljinu ploče i modul posmika, vrijednosti su vidljive na Slici 39. Parametar modula elastičnosti u smjeru pružanja greda proračunan je s obzirom na unesene parametre, a modul elastičnosti u okomitom smjeru na grede zanemaruje se odnosno definira se vrijednost 0. S obzirom da je modul posmika definiran, opravdana je i vrijednost Poissonovog koeficijenta koja je jednaka nuli.

Nakon određenih dimenzija stropne konstrukcije potrebno je odrediti stalno opterećenje od vlastite težine stropa te promjenjivo uporabno opterećenje. Stalno i

uporabno opterećenje definirano je u Poglavlju 4.2.1. Na Slici 40. ispod naslova „Static verifications“ nalazi se skica s naznačenom osi stropne dijafragme. S obzirom da je visina drvenog grednika 22 cm sugerira se da os prolazi kroz sredinu grednika, stoga su definirane jednake visine ekstradosa i intradosa od 11 cm. Kako bi se gornji rub ovakve stropne dijafragme poklapao s ravninom poda u sljedećem katu, definirana je visina (eng. elevation) od 3,760 m. Razlog takvoj vrijednosti visine jest što „3Muri“ sagledava ravninu donjeg lica interpretirane ploče kao referentnu ravninu kojoj korisnik određuje visinu. Budući da program sam definira debljinu interpretirane ploče od 40 mm, visina referentne ravnine predstavlja krajnju visinu kata umanjenju za navedenih 40 mm.

The screenshot shows the 'Floor' dialog box with the following sections and values:

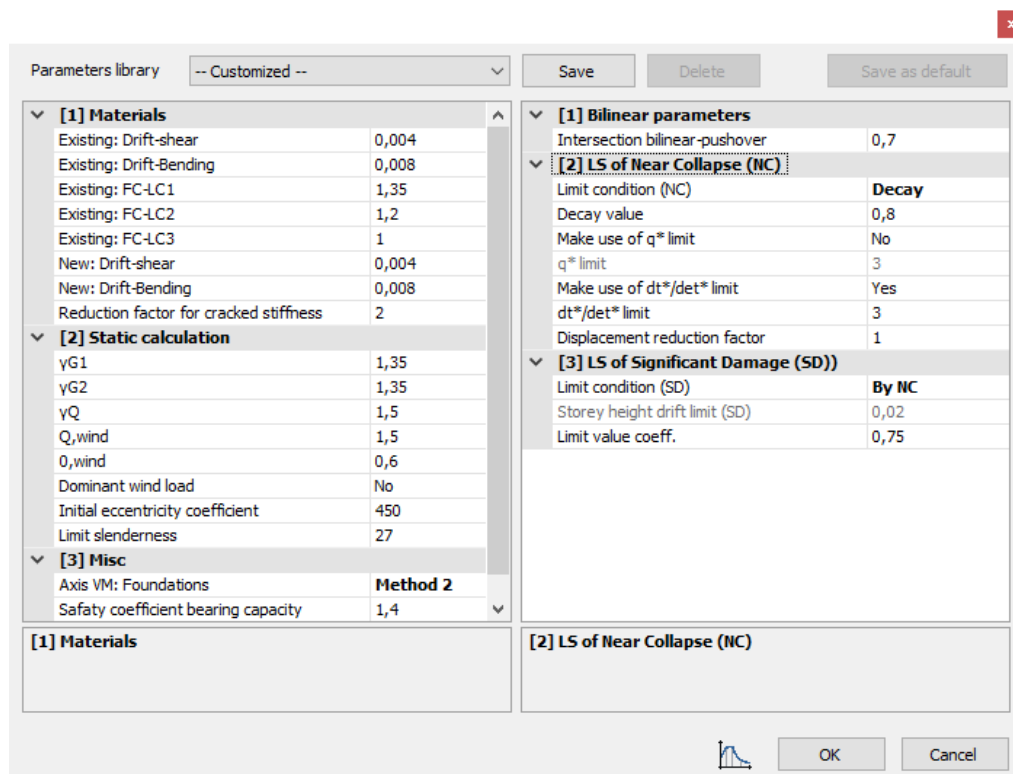
- Loads:**
  - Qk: 2,00 [kN/m<sup>2</sup>]
  - Gk2: 0,00 [kN/m<sup>2</sup>]
  - Gk: 2,02 [kN/m<sup>2</sup>]
  - Elevation: 11,360 [m]
- Static verifications:**
  - Support length: 250 [mm]
  - Δ extrados elevation: 0,110 [m]
  - Δ intrados elevation: 0,110 [m]
- EC:**
  - ψ<sub>2</sub>: 0,30
  - ψ<sub>0</sub>: 0,70
  - φ: 0,80
- Type:**
  - One-way timber floor with single wood p
  - Thickness: 40 [mm]
  - G: 10.000,00 [kN/m<sup>2</sup>]
  - Ex: 1.623.599, [kN/m<sup>2</sup>]
  - Ey: 0,00 [kN/m<sup>2</sup>]
  - V: 0,00
- Mass loading:**
  - Unidirectional (selected)
  - Bidirectional
  - Main direction loading: 100 %
- Display:**
  - Material colour: [Reddish-brown swatch]
  - Texture: [Wood grain swatch]

Slika 40. Definiranje stropne konstrukcije (Model A)

Prije definiranja svih geometrijskih značajki odabiru se parametri modela prikazani na Slici 41. Kao prvi početni korak navodi se je li zgrada nova i postojeća, u ovom slučaju radi se o postojećoj. Definira se i na temelju koje norme će se odvijati proračun modela, odabire se Eurokod no uz male preinake. Te preinake mogu se vidjeti na Slici 41. gdje su promijenjene vrijednosti u rubrikama „Drift-shear“ i „Drift-Bending“. Izraz „drift“ se može prevesti kao granični omjer relativnog pomaka u zidanom elementu i njegove visine odnosno duljine; nastavak „shear“ označava da se pomak dogodio zbog posmične sile, a nastavak „bending“ zbog savijanja u zidu. Prikazane vrijednosti dobivene su prema načelima HRN EN 1998-3:2008 [38] gdje je u poglavlju C.4.2 definirano kako se postojeći pomaci zbog posmika i savijanja u zidu množe s vrijednosti  $4/3$ . Prijašnje vrijednosti 0,004 i 0,008 tako bi sada iznosile 0,0053 i 0,0107; no one se naknadno dijele još s faktorom povjerenja (eng. confidence factor) koji iznosi  $FC = 1,35$  (razina 3) te u konačnici poprimaju vrijednosti 0,004 i 0,008. „Drift“ se dijeli s faktorom povjerenja ručno iz razloga što *3Muri* nepravilno uzima faktor povjerenja u proračun.

Iste vrijednosti pomaka zbog posmika u zidu i pomaka zbog savijanja u zidu definiraju se za novo i postojeće stanje. Pod naslovom „Materials“ primjećujemo i tri različite vrijednosti za faktor povjerenja (FC-LC1, FC-LC2, FC-LC3). Tri razine ovog faktora definiraju koliko informacija i podataka je prikupljeno za promatrano postojeće zide. Razina 1 podrazumijeva ograničeno poznavanje podataka, razina 2 šire poznavanje a razina 3 detaljno poznavanje. Za svaku razinu veže se određena vrijednost faktora povjerenja, njime se umanjuje potresna otpornost zida. Još jedan faktor kojim se umanjuje potresna otpornost konstrukcije jest faktor redukcije zbog raspucalosti. Njegova vrijednost vidljiva je na Slici 41., s tom vrijednošću dijeli se ukupna krutost zida ukoliko se radi o postojećoj zgradi s vidljivim pukotinama. U ovom konkretnom slučaju faktor redukcije krutosti zbog raspucalosti uzet je u obzir, kao što je vidljivo na Slici 42. Pod naslovom „Static calculation“ vide se standardni koeficijenti sigurnosti za stalno ( $\gamma G1$ ;  $\gamma G2 = 1,35$ ) i promjenjivo djelovanje ( $\gamma Q = 1,5$ ).





Slika 41. Osnovni parametri modela

Na Slici 41. pod naslovom „LS of Near Collapse (NC)“ (hrv. Granično stanje blizu rušenja) može se uočiti još jedan vrlo bitan parametar za proračun, a to je „Limit condition (NC)“. Ovim parametrom se definira granični uvjet kojim završava nelinearna statička analiza naguravanjem (eng. Pushover analysis). Na Slici 41. odabrana je opcija „Decay“ za ovaj parametar, u ovom slučaju automatski se za svrhu proračuna veže i parametar „Decay value“. U toj rubrici stoji vrijednost 0,8; ona označava 80 % najveće otpornosti konstrukcije zbog progresivnog oštećenja i sloma elemenata koji preuzimaju bočno opterećenja. Dakle trenutak završetka proračuna označen je trenutkom kad ukupna bočna otpornost konstrukcije tj. poprečna sila u podnožju pada ispod navedenih 80 % ukupne bočne otpornosti konstrukcije. Druga opcija za granični uvjet završetka proračuna jest „First element failed“ što u prijevodu znači slom prvog elementa. U skladu s nazivom, nelinearni statički proračun naguravanjem završava u trenutku sloma prvog zidanog makro-elementa. U svrhu ovog rada i proračuna promatrane zgrade provjerava se prethodno definirana opcija s ručnim pronalaženjem prvog konstruktivnog makro-elementa koji je doživio slom. No u Modelu B će se prikazati i druge dvije opcije završetka proračuna ako bi se usporedili rezultati.

Na Slici 42. nalaze se svojstva materijala zida, njih je moguće definirati pod opcijom „Materials“. Ovdje se mogu jednostavno definirati već postojeći materijali kao što su beton, drvo, opeka, čelik i sl. ili se može definirati novi materijal gdje se zatim ručno unose karakteristike. Karakteristike materijala zida prikazane na Slici 42. i 43. odgovaraju istima u Poglavlju 4.3.1., gdje su definirane njihove vrijednosti.


Programski paket *3Muri* nudi dvije metode proračuna sloma makro-elementa na temelju definiranih karakteristika materijala, Turnšek-Čačović i Mohr-Coulomb metoda. Na Slici 42. prikazana je Turnšek-Čačović metoda te se za proračun potresne otpornosti promatrane konstrukcije sagledava samo ova metoda, no ipak je ukratko objašnjena i Mohr-Coulomb metoda te su njeni parametri prikazani na Slici 43.


Material properties x

**Modify**

Type **Masonry**

Name

Material colour 

Texture 

E [kN/m <sup>2</sup> ]	1200000
G [kN/m <sup>2</sup> ]	400000
w [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
f <sub>m</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	2500
τ [kN/m <sup>2</sup> ]	75
f <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	2000
FC	1
γ <sub>m</sub>	3
Shear drift	0,004
Bending drift	0,008
φ ∞	∞

**The material's condition**


Existing  New

Cracked stiffness

User defined

**Constitutive law**

Description


Library    


Slika 42. Mehanička svojstva zida – Turnšek/Čačović metoda proračuna

Material properties x

Type **Masonry** Modify

Name

Material colour 

Texture 

E [kN/m <sup>2</sup> ]	1200000
G [kN/m <sup>2</sup> ]	400000
w [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
f <sub>m</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	2500
f <sub>vm0</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	125
f <sub>vlm</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	650
f <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	2000
FC	1
γ <sub>m</sub>	3
Shear drift	0,004
Bending drift	0,008
φ ∞	0

The material's condition

Existing  New

Cracked stiffness

User defined

Constitutive law

Description

Library

Slika 43. Mehanička svojstva zida – Mohr/Coulomb metoda proračuna

Nakon uspješno definiranih svih geometrijskih karakteristika zgrade i mehaničkih svojstava materijala i elemenata prelazi se na sljedeću i posljednju kategoriju ulaznih podataka, globalna analiza. Ovdje se ponajprije definira seizmičko opterećenje na konstrukciju. Pod ovom rubrikom definiraju se tri vršna ubrzanja tla za tri granična stanja opisana u Poglavlju 4.4.1. Definirane vrijednosti vršnih ubrzanja tla mogu se vidjeti na Slici 44. Uz vršna ubrzanja u ovoj rubrici također se definira kategorija tla, za koju se onda vežu podaci koji definiraju elastični spektar odziva. U konačnici na dnu postoji i rubrika prikazana na Slici 44. gdje je moguće unijeti i faktor važnosti.

Seismic load

Spectrum Shape: Parametric

Spectrum Diagram

	NC	SD	DL
Verification	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
▶ a <sub>gR</sub> [m/s <sup>2</sup> ]	3,05	2,03	1,04
Soil type	A	A	A
S	1,00	1,00	1,00
T <sub>B</sub> [s]	0,15	0,15	0,15
T <sub>C</sub> [s]	0,40	0,40	0,40
T <sub>D</sub> [s]	2,00	2,00	2,00

Importance Factor: 1,00

Load default OK Cancel ?

Slika 44. Vrijednosti seizmičkog opterećenja na konstrukciju

Prije pokretanja samog proračuna program *3Muri* automatski raspodjeljuje konstrukciju u svojevrsnu modalnu mrežu (eng. Model mesh). Ovom funkcijom svi zidovi se raspoređuju na „spandrel“ i „pier“ elemente. „Spandrel“ elementi predstavljaju dio ziđa vertikalno omeđen s otvorima koji se nalaze na istoj vertikalnoj osi, dok su horizontalnom smjeru definirani širinom navedenih otvora. S druge strane, „pier“ elementi horizontalno su omeđeni otvorima ili krajevima zida, dok im je vertikalna dimenzija jednaka visini otvora ili pak visini kata ukoliko nema definiranih otvora. Model konstrukcije raspodijeljen u modalnu mrežu u nastavku ovog rada nazivati će se „ekvivalentni proračunski model s makroelementima“.

Posljednji potrebni ulazni parametri definiraju se odabirom opcije „Pushover analysis“. Pritiskom te opcije program automatski računa katnu težinu te ukupnu masu konstrukcije. Nakon toga pojavljuje se izbornik prikazan na Slici 45. Ovim izbornikom se prije svega definira mjerodavan čvor za kontrolni pomak. U ovom slučaju odabran je čvor broj 20 koji se nalazi na trećem katu u središtu tlocrta zgrade. S obzirom da se za kontrolni pomak koristi metoda prosječnog pomaka kata može se odabrati koji god čvor sa trećeg kata. Nakon kontrolnog pomaka označuju se sve provjere nelinearnog statičkog proračuna postupnim guranjem za koji želimo znati rezultat. Kroz 24 različite provjere kombiniraju se četiri smjera djelovanja bočnih sila (+X, -X, +Y, -Y) sa dvije vrste raspodjele bočnih sila (modalna ili uniformna) te sa ili bez ekscentričnosti

djelovanja potresnih bočnih sila, koja može biti pozitivna ili negativna. Ekscentričnost djelovanja bočnih sila definirana je vrijednošću od 5 % najveće dužine zgrade okomite na smjer djelovanja bočne sile. Ekscentričnost se definira kako bi se uzeli u obzir slučajni torzijski učinci s pomoću prikazane 24 provjere kombiniraju se sve navedene mogućnosti te se iz tog razloga sagledavaju sve 24 provjere.

Analysis

**Control node**

Level: [3] Level 3 Node: 20

Displacement: Use average displacement

No.	Compute analysis	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	0
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	0
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	0
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	0
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	0
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	0
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	630
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	-630
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	630
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	-630
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	630
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	-630
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	630
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	-630
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	1.125
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	-1.125
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	1.125
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	-1.125
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	1.125
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	-1.125
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	1.125
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	-1.125

Definition by seism angle

Rot. angle: 0,00 [°]

Add, Increases, Delete

**General data**

Land level: 0,0000 [m]

Maximum iteration no.: 500

Self weight precision: 0,0050

**Computation parameters**

Apply to All

Substeps: 200

Precision: 0,0050

Maximum displacement: 120,00 [mm]

Eccentricity: [ ] [mm]

**Select analysis**

Seism dir., Seismic load, Eccentricity

Select all, Deselect all

**Seismic load**

Proportional static forces

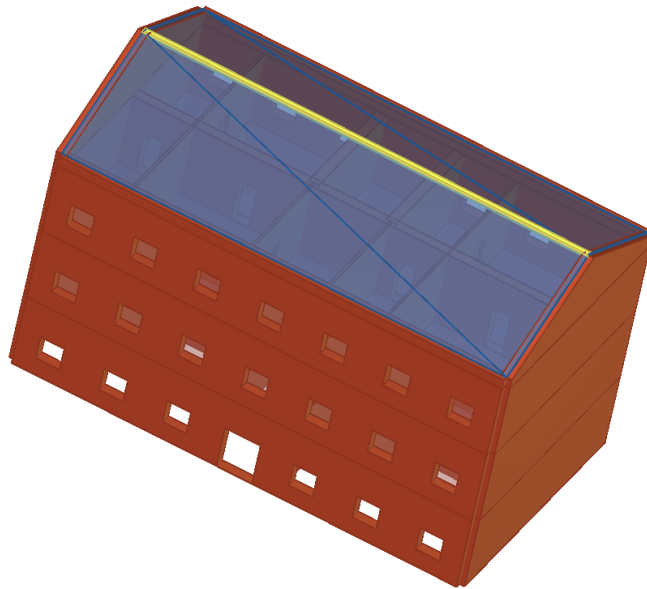
Modal distribution

OK ?

Slika 45. Definiranje kontrolnog pomaka i tipa nelinearnog statičkog proračuna postupnim naguravanjem (Pushover analysis)

S ovim korakom unesen je i posljednji ulazni podatak potreban za proračun modela promatrane zidane konstrukcije. Programski paket *3Muri* zatim proračunava model načinom objašnjenim u Poglavlju 4.4.1. za sve 24 provjere te zatim izdvaja najkritičniju provjeru u X i Y smjeru. Upravo se te dvije provjere razmatraju kao konačni rezultat proračunskog modela.

Na Slici 46. prikazan je 3D proračunski model u programskom paketu *3Muri* koji odgovara promatranj tradicionalnoj zgradi te svim karakteristikama navedenim kroz prošla poglavlja.



*Slika 46. 3D prikaz proračunskog modela u 3Muri-ju*

Treba napomenuti kako je na prethodnoj slici prikazan model kakvog pojedinac definira u *3Muri*-ju, taj se model pretvara u ekvivalentni proračunski model s makroelementima prije pokretanja samog proračuna. Ekvivalentni model ne sadrži zabat i krovšte, već ih uzima u obzir samo kao opterećenje.

## 5. REZULTATI PRORAČUNA POTRESNE OTPORNOSTI PROMATRANE ZIDANE ZGRADE

U ovom radu provode se proračuni potresne otpornosti promatrane zidane zgrade uporabom dva različita proračunska modela zgrade. Dva proračunska modela razlikuju se po stropnoj konstrukciji odnosno po krutosti stropne konstrukcije. Stoga Model A ima definiranu realnu stropnu konstrukciju kakva je i opisana u Poglavlju 4.4.2. U programskom paketu *3Muri* definirana stropna konstrukcija posjeduje određenu krutost samo u jednom smjeru, dakle smjer u kojem se pružaju grednici. Model B ima apsolutno krute stropne konstrukcije. U stvarnosti apsolutno krutim stropnim konstrukcijama mogu se smatrati armirano-betonske ploče.

Kao što je to već spomenuto, proračun potresne otpornosti nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja uvjetuje se završetkom u trenutku kad se pojavi slom prvog makro-elementa nosivog zida, te će se tim uvjetom provesti usporedba dva modela. No ipak će se izdvojiti i rezultati dobiveni kroz druga dva uvjeta završetka proračuna kako bi se moglo prokomentirati rezultate sva tri uvjeta, a to su dakle:

- Turnšek/Čačović metoda – Slom prvog elementa nosivog zida (SNZ)
- Turnšek/Čačović metoda – Slom prvog elementa (SPE)
- Turnšek/Čačović metoda – Globalno otkazivanje konstrukcije (GOK)

U svrhu boljeg snalaženja kroz ukupne rezultate proračuna potresnog odziva konstrukcije, definirana je Tablica 19.

Prije sagledavanja rezultata proračuna ukratko će se opisati način definiranja potresne otpornosti odnosno faktora ispunjenja pri uvjetu završetka slomom prvog makro-elementa nosivog zida. Prije iščitavanja rezultata treba napomenuti kako se isti iščitavaju u kritičnim provjerama u proračunu uvjetovanim slomom prvog elementa. U trenutku sloma prvog konstrukcijskog elementa iščitava se doživljeni pomak modela, taj se pomak zatim dijeli s pomakom koji je model doživio u trenutku prvog sloma bilo kojeg elementa. Omjer navedenih pomaka se zatim množi s faktorom ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja koji je dobiven uvjetom prvog sloma bilo kojeg elementa

u modelu. Konačni produkt pokazat će pravo rješenje to jest rezultat potresne otpornosti konstrukcije.

*Tablica 19. Legenda rezultata proračuna potresnog odziva konstrukcije*

<b>Poglavlje</b>	<b>Potpoglavlje</b>	<b>Model</b>	<b>Metoda proračuna</b>
5.1.	5.1.1.	Model A	Turnšek/Čačović – Slom prvog elementa nosivog zida
	5.1.2.	Model A	Turnšek/Čačović – Globalno otkazivanje konstrukcije
5.2.	5.2.1.	Model B	Turnšek/Čačović – Slom prvog elementa nosivog zida
	5.2.2.	Model B	Turnšek/Čačović – Slom prvog elementa
	5.2.3.	Model B	Turnšek/Čačović – Globalno otkazivanje konstrukcije



## 5.1. Model A – Realna stropna konstrukcija

### 5.1.1. Turnšek/Čačović metoda - Slom prvog elementa nosivog zida

Proračunskim paketom *3Muri* izvršava se proračun nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja (opisanoj u Poglavlju 4.4.1.) za svaki označeni tip provjere. Nakon izvedenog proračuna, iskazuju se rezultati za svaki označeni tip provjere, što se može vidjeti na Slici 47. Žutom bojom označene su kritične provjere za X i Y smjer, upravo one će biti detaljno analizirane i opisane kroz ovo poglavlje. Za ove dvije kritične provjere (X smjer – 12. provjera; Y smjer – 23. provjera) u Tablici 20. prikazani su proračunski parametri za ekvivalentne sustave s jednim stupnjem slobode. Treba napomenuti da proračunski parametri vrijede za uvjet sloma prvog elementa (globalno), što u ovom slučaju u X smjeru zapravo predstavlja i element nosivog zida.

Tablica 20. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 12. provjeru (X smjer) ; b) 23. provjeru (Y smjer)

#### a) 12. provjera (X smjer)

T* [s]	0,701
m* [kg]	1005999,334
w [kN]	13986
M [kg]	1415335,264
m*/M [%]	71,079
$\Gamma$	1,01
F*y [kN]	791
d*y [mm]	9,81
d*m [mm]	11,42

#### b) 23. provjera (Y smjer)

T* [s]	0,407
m* [kg]	883130,48
w [kN]	13986
M [kg]	1415335,264
m*/M [%]	62,397
$\Gamma$	1,15
F*y [kN]	1263
d*y [mm]	6
d*m [mm]	6

U navedenoj tablici mogu se uočiti i proračunane vrijednosti ukupne mase konstrukcije  $M$ , te ukupne težine konstrukcije  $w$ . Vrijednosti su to koje su ključne za uspješnu provedbu „Pushover“ proračuna.

Na Slici 47. kroz faktor ispunjenja  $\alpha$  mogu se uočiti tri rezultata za svaki tip provjere, faktor ispunjenja mora biti veći od 1,0 da se provjera graničnog stanja smatra zadovoljenom. Rezultati faktora ispunjenja vidljivi su u posljednja četiri stupca gdje je zadnji stupac zapravo jednak prvom od navedenih četiri, ta dva stupca predstavljaju granično stanje blizu rušenja. Tri različita rezultata predstavljaju naravno tri granična

stanja koja se provjeravaju. Vrijednosti faktora ispunjenja u tablici predstavljaju odnos maksimalnog pomaka ( $d_m$ ) i ciljanog pomaka ( $d_t$ ) za svako granično stanje. Navedeni pomaci vidljivi su u stupcima pod naslovom „dt NC“ i „dm NC“ za granično stanje blizu rušenja (BR) (eng. near collapse), a za granično stanje znatnog oštećenja (ZO) vidljivi su u stupcima pod naslovom „dt SD“ i „dm SD“ (eng. significant damage). Na temelju Hrvatskog nacionalnog dodatka HRN EN 1998-1:2011/NA:2011 [39] uvjetuju se granična stanja znatnog oštećenja i ograničenog oštećenja kao mjerodavna. Unatoč tome, zbog neadekvatnog očitavanja rezultata od strane programa, ručno očitavanje sloma prvog elementa nosivog zida moguće je samo za granično stanje blizu rušenja. Stoga mjerodavno je ipak granično stanje blizu rušenja.

Za granično stanje ograničenog oštećenja (OO) mjerodavan je stupac pod naslovom „d\*y DL“ (eng. damage limitation) gdje prikazana vrijednost označava pomak pri popuštanju idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode ( $d^*y$ ) u centimetrima. Čelija s vrijednošću pomaka  $d^*y$  označena je zelenom bojom ukoliko je pomak  $d^*y$  veći od zahtijevanog pomaka za granično stanje ograničenog oštećenja ( $Sd(T^*)$ ), te crvenom bojom ukoliko je manji. Općenito ćelije s vrijednostima maksimalnog pomaka kod provjera svih graničnih stanja označavaju se crvenom ili zelenom bojom ovisno o tome je li navedeni pomak manji ili veći od ciljanog pomaka. Na Slici 47. jasno je vidljivo kako su apsolutno sve ćelije označene crvenom bojom. To je zbog toga što je u programu namješten uvjet sloma prvog elementa pa se u većini slučajeva događa slom elementa u pregradnom zidu uslijed poprilično malog pomaka konstrukcije. Upravo to je jedan od glavnih razloga zašto ovaj uvjet ne može biti mjerodavan.

No.	Insert in report	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	dt NC [mm]	dm NC [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	d*y DL [mm]	$\alpha$ NC	$\alpha$ SD	$\alpha$ DL	dm/dt NC
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	0,00	47,49	10,59	31,61	7,94	0,89	0,223	0,251	0,553	0,223
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	0,00	53,39	11,32	35,53	8,49	0,95	0,212	0,239	0,526	0,212
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	0,00	32,58	14,05	21,68	10,54	0,46	0,431	0,486	0,419	0,431
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	0,00	33,00	17,80	21,97	13,35	0,38	0,539	0,608	0,338	0,539
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	0,00	31,09	13,06	20,45	9,80	0,54	0,433	0,497	0,637	0,420
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	0,00	34,52	11,67	22,92	8,75	0,59	0,341	0,386	0,585	0,338
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	0,00	33,56	8,86	22,22	6,65	0,67	0,272	0,308	0,701	0,264
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	0,00	36,51	7,24	24,30	5,43	0,63	0,198	0,223	0,582	0,198
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	630,00	46,38	10,31	30,87	7,73	0,86	0,222	0,250	0,546	0,222
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	-630,00	48,53	10,83	32,30	8,12	0,92	0,223	0,252	0,560	0,223
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	630,00	52,19	11,04	34,74	8,28	0,92	0,212	0,238	0,522	0,212
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	-630,00	54,52	11,49	36,29	8,62	0,98	0,211	0,237	0,531	0,211
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	630,00	34,48	12,84	22,95	9,63	0,55	0,373	0,420	0,470	0,372
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	-630,00	33,05	14,52	21,99	10,89	0,47	0,440	0,495	0,418	0,439
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	630,00	32,66	17,97	21,74	13,48	0,37	0,550	0,620	0,338	0,550
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	-630,00	34,75	17,75	23,13	13,31	0,42	0,511	0,576	0,353	0,511
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	1.125,00	31,02	10,54	20,40	7,91	0,53	0,355	0,409	0,636	0,340
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	-1.125,00	31,23	17,20	20,57	12,90	0,47	0,560	0,638	0,561	0,551
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	1.125,00	34,50	12,45	22,90	9,34	0,59	0,364	0,412	0,592	0,361
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	-1.125,00	34,56	11,43	22,95	8,58	0,56	0,334	0,378	0,554	0,331
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	1.125,00	33,15	8,22	21,92	6,17	0,64	0,258	0,292	0,684	0,248
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	-1.125,00	33,91	9,93	22,47	7,45	0,67	0,299	0,340	0,689	0,293
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	1.125,00	36,18	6,90	24,08	5,18	0,60	0,191	0,215	0,560	0,191
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	-1.125,00	36,80	7,60	24,49	5,70	0,66	0,207	0,233	0,606	0,207

Slika 47. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model A; Turnšek/Čačović – slom prvog elementa)

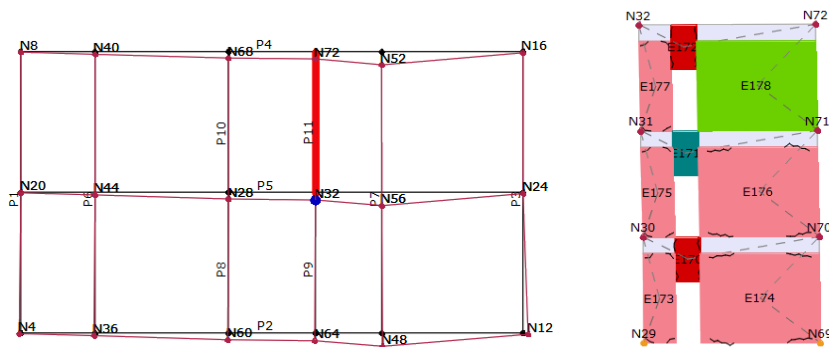
Crvena boja prevodi jasno nezadovoljenje uvjeta nosivosti graničnih stanja što se dogodilo iz više razloga. Prije svega treba napomenuti kako se radi o staroj zidanoj konstrukciji pa su sukladno s tom činjenicom u programskom modelu definirane su lošije mehaničke značajke samog konstrukcijskog materijala. No osim te varijable i ostalih faktora redukcije, povjerenja itd., znatan učinak ima tlocrtni raspored zidova te krutost stropne konstrukcije. Što se rasporeda nosivih zidova tiče, može se zaključiti kako je puno manja tlocrtna površina poprečnih zidova (Y smjer), a samim time i krutost. Ovo je razlog zašto bi potresna otpornost zgrade u poprečnom smjeru trebala biti manja nego u uzdužnom smjeru, no postoji i pojam stropne dijafragme. Stropna dijafragma predstavlja kruti horizontalni element koji povezuje zidove na koje se oslanja. Stropna dijafragma promatrane zgrade u programskom paketu 3Muri definirana je drvenim grednicima s jednoslojnom daščanom oplatom koji se protežu u Y smjeru. Parametri takve stropne konstrukcije vidljivi su na Slici 39. gdje se može uočiti kako realnu vrijednost modula elastičnosti, time i krutosti, ima samo Y smjer stropne konstrukcije, dok je krutost u X smjeru jednaka nuli. Valja napomenuti da se moduli elastičnosti prikazani navedenom slikom odnose na lokalne osi, lokalna os x definirana je smjerom pružanja greda a ona zapravo predstavlja globalnu os Y, tako je i lokalna os y zapravo globalna os X.

To naravno nije posve realan model stropne konstrukcije, no ipak dovoljno je opravdan činjenicom da se radi o drvenim gredama koje se protežu samo u jednom smjeru (Y smjer), dok u drugom smjeru (X smjer) krutost definira samo daščana oplata. Iz tog razloga potresnoj otpornosti u Y smjeru pridonosi efekt stropne dijafragme koji povezuje mjerodavne zidove. Ova tvrdnja se ne može navesti i za mjerodavne zidove uslijed potresnog opterećenja u X smjeru, no ovi su zidovi ipak puno krući od poprečnih.

Osjetna razlika u vrijednostima može se uočiti u usporedbi „+“ i „-“, smjera potresnog djelovanja. Vidljivo je kako su za isto potresno opterećenje vrijednosti u stupcu pod naslovom „dm/dt SD“ za X smjer znatno manje uslijed djelovanja opterećenja u „+“, smjeru osi, dok su za Y smjer znatno manje u „-“, smjeru osi. To je i logično s obzirom da zgrada tlocrtno nije simetrična u nijednom smjeru. Tako je uslijed potresnog opterećenja u „+“, X smjeru kritično opterećen rubni desni vertikalni stupac zida. Navedeno se može grafički vidjeti na Slici 48. gdje je prikazan mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru. Što se Y smjera tiče, u 23. provjeri kritičan je makro-element nad otvorom na prvoj etaži u središnjem nosivom zidu (Slika 49.). Na slici se vidi kako su uz njega pukli zapravo svi „spandrel“ u tom zidu, a osim puknuća velika većina ostatka zida doživjela je oštećenje zbog savijanja.



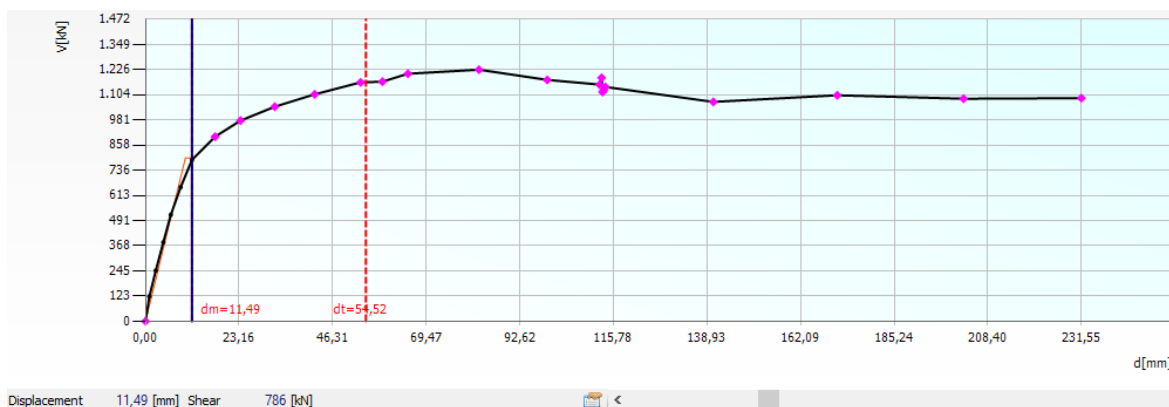
Slika 48. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (12. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ)



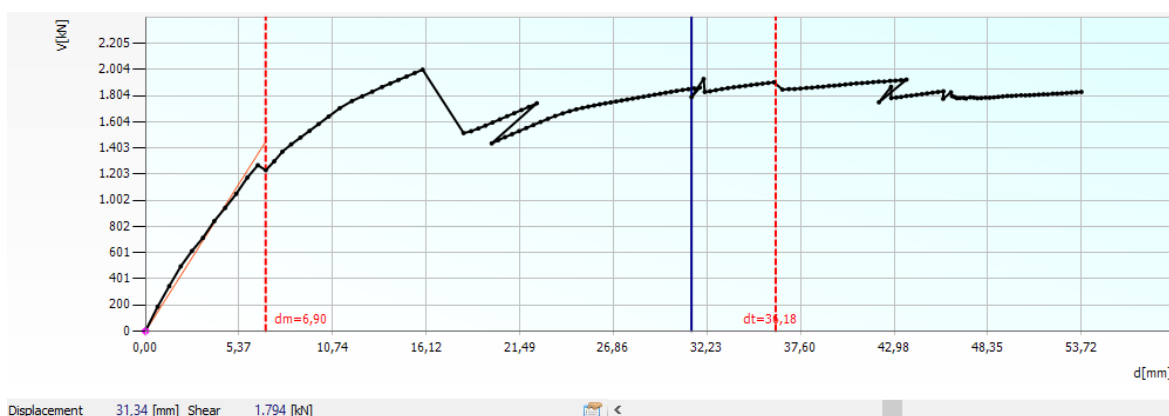
Slika 49. Mehanizam sloma kritičnog zida u Y smjeru (23. provjera, Model A; T/Č metoda – SNZ)

Slika 48. i Slika 49. lijevo prikazuju tlocrtnu dispoziciju zidova zgrade s naznačenim zidom koji je prikazan na desnoj strani slika, ovdje je prikazan zid duž cijele svoje visine i duljine sa svim svojim otvorima. Naznačeni zid prikazan je kroz makro-elemente od kojih je sastavljen, oni su označeni različitim bojama jer upravo te boje označavaju njihovo neoštećenje, oštećenje ili slom uslijed djelovanja potresnog opterećenja. Zelena boja tako označava neoštećeni element, roza boja oštećeni element zbog savijanja, crvena boja slom elementa zbog savijanja te plava boja označava slom elementa tijekom elastične faze. Siva boja označava makro-elemente koji se smatraju apsolutno krutim iz razloga što ti elementi nisu podložni doživljavanju oštećenja (u usporedbi sa „spandrel“ i „pier“ elementima). Model na Slici 48. rezultat je 12. provjere gdje je nanoseno potresno opterećenje kroz modalnu raspodjelu u „+“, X smjeru s ekscentrom u negativnom smjeru. Model na Slici 49. rezultat je 23. provjere gdje je nanoseno potresno opterećenje kroz modalnu raspodjelu u „-“, Y smjeru s ekscentrom u pozitivnom smjeru. Prikazani modeli zgrade na navedenim slikama nalaze se u deformiranom stanju zbog doživljenih horizontalnih pomaka.

S obzirom da se u ovom poglavlju sagledavaju rezultati nelinearnog statičkog proračuna naguravanjem s uvjetom završetka proračuna u trenutku sloma prvog makro-elementa nosivog zida, Slika 48. i Slika 49. prikazuju kritični zid u tom trenutku gdje se i dogodio navedeni slom. To su u oba slučaja „spandrel“ elementi pod oznakama E110 i E170, gdje su oba elementa doživjela slom zbog savijanja. Trenutak sloma prvog elementa u nosivom zidu mjerodavan je za očitavanje maksimalnog pomaka proračunskog modela  $dm$  kod provjere uvjeta nosivosti graničnog stanja blizu rušenja. Navedeni pomak vidljiv je u donjem lijevom kutu na krivulji kapaciteta (eng. *Pushover curve*) prikazanoj na Slici 50. za 12. provjeru te Slika 51. za 23. provjeru.



Slika 50. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (12. provjera, Model A;  
T/Č metoda – SNZ)



Slika 51. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (23. provjera, Model A;  
T/Č metoda – SNZ)

Vrijednost ciljanog pomaka  $dt$  u 12. provjeri iznosi 54,52 mm za granično stanje blizu rušenja, dok u 23. provjeri ista iznosi 36,18 mm. Treba napomenuti kako se na prikazanim grafovima na apcisi nalaze vrijednosti pomaka kontrolnog čvora [mm], dok se na ordinati nalaze vrijednosti horizontalne poprečne sile [kN] nanošene na proračunski model. Završetak krivulje kapaciteta definiran je padom sile ispod 80 % maksimalne horizontalne sile. Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za kritičnu provjeru u X i Y smjeru uvjetom sloma prvog makro-elementa u nosivom zidu iznosi:

$$\alpha_{BR,x,SNZ} = d_{m,x,SNZ} / d_{m,x,SPE} * \alpha_{BR,x,SPE} = 11,49 / 11,49 * 0,211 = 0,211 \quad (33)$$

$$\alpha_{BR,y,SNZ} = d_{m,y,SNZ} / d_{m,y,SPE} * \alpha_{BR,y,SPE} = 31,34 / 6,90 * 0,191 = 0,868 \quad (34)$$

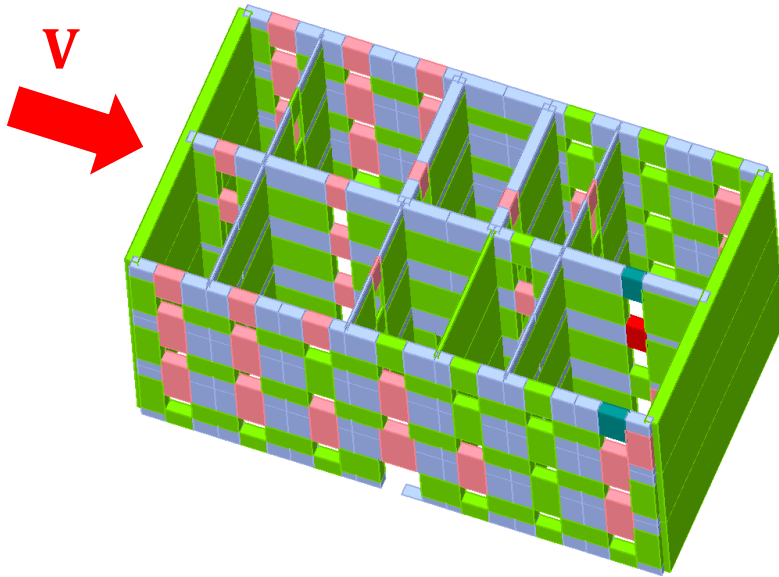
Gdje su:

- $\alpha_{BR,x,SNZ}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za X smjer uz uvjet sloma prvog elementa nosivog zida
- $d_{m,x,SNZ}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku sloma prvog elementa nosivog zida (prilikom kritične provjere u X smjeru)
- $d_{m,x,SPE}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku sloma prvog elementa (prilikom kritične provjere u X smjeru)
- $\alpha_{BR,x,SPE}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za X smjer uz uvjet sloma prvog elementa
- $\alpha_{BR,y,SNZ}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za Y smjer uz uvjet sloma prvog elementa nosivog zida
- $d_{m,y,SNZ}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku sloma prvog elementa nosivog zida (prilikom kritične provjere u Y smjeru)
- $d_{m,y,SPE}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku sloma prvog elementa (prilikom kritične provjere u Y smjeru)
- $\alpha_{BR,y,SPE}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za Y smjer uz uvjet sloma prvog elementa

Na prikazanim krivuljama kapaciteta iščitavaju se granične nosivosti na poprečnu silu, tako vrijednost nosivosti za X smjer iznosi 786 kN dok za Y smjer iznosi 1 794 kN. Osjetno je veća nosivost na poprečnu silu u Y smjeru, no s obzirom da je u metodi postupnog guranja mjerodavna deformacijska sposobnost konstrukcije (GS BR), zaključuje se kako je otpornost konstrukcije u Y smjeru veća za 311 % u odnosu na X smjer. Navedeni postotak odnosi se na usporedbu vrijednosti faktora ispunjenja ( $\alpha_{BR,SNZ}$ ) graničnog stanja blizu rušenja 23. provjere gdje on iznosi 0,868 tj. 86,8 % i 12. provjere gdje on iznosi 0,211 tj. 21,1 %. Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja predstavlja koliki postotak proračunskog (pomnožen s faktorom 1,5) projektiranog vršnog ubrzanja tla za povratni period od 475 godina može izdržati konstrukcija do trenutka sloma prvog elementa u nosivom zidu.

Razlog zašto je središnji zid kritičan u provjeri potresnog djelovanja u X smjeru je jednostavan, naime svi definirani otvori u ovome zidu su otvori vrata što znači da su to otvori većih dimenzija nego otvori prozora koje imamo na bočnim zidovima. Iako otvora prozora u bočnim zidovima ima više, otvori vrata su kritičniji jer ostavljaju „spandrel“ element sa nedovoljno dobrim dimenzijama. Kritični „spandrel“ makro-

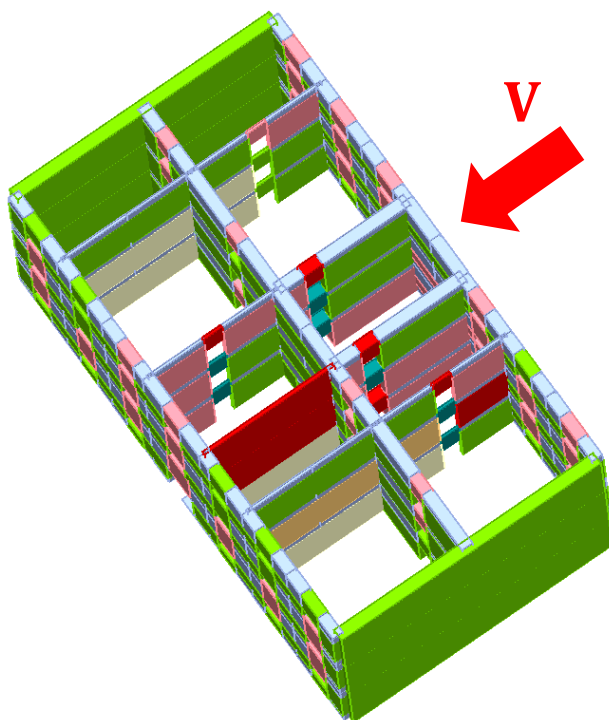
element E110 opisan je dimenzijama  $B \times H \times \check{S} = 900 \times 1600 \times 510$  mm. Posljedično upravo ovi „spandrel“ elementi su prvo mjesto gdje će se dogoditi slom. Na Slici 52. može se vidjeti 3D prikaz ekvivalentnog proračunskog modela s okvirima mjerodavnim za 12. provjeru proračuna, također je prikazan i smjer djelovanja poprečne sile ( $V$ ). Na zamjenskom modelu s okvirima vidljiva su stanja oštećenja svih makro-elemenata.



*Slika 52. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (12. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ)*

U 23. provjeri proračuna, ujedno i kritičnoj provjeri u Y smjeru, slom se događa u jednom od dva središnja nosiva zida. U trenutku sloma u navedenom zidu, na Slici 53. može se uočiti kako je došlo i do sloma pregradnog zida. Slika 53. prikazuje 3D ekvivalentnog proračunski model promatrane zgrade zajedno sa naznačenim smjerom djelovanja poprečne sile ( $V$ ) kritične provjere za Y smjer.





*Slika 53. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (23. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ)*

### 5.1.2. Turnšek/Čačović metoda – Globalno otkazivanje konstrukcije

Uvjet završetka proračuna nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja opisivan ovim poglavljem neće biti mjerodavan za usporedbu rezultata kao što je to već definirano. Dakle, uvjet globalnog otkazivanja konstrukcije kao završetak proračuna a samim time i očitavanje maksimalnog pomaka proračunskog modela  $dm$  opisano je u Poglavlju 4.4.1. Ovaj će uvjet rezultirati s većim vrijednostima maksimalnih pomaka  $dm$  jer se prvi slom elementa u nosivom zidu događa znatno prije definiranih kriterija kojim proračun završava (Poglavlje 4.4.1). Prikazane vrijednosti na slici 54. dokazuju tu tvrdnju u usporedbi s vrijednostima na slici 47. Neposredno povezani s rezultatima navedenih pomaka jesu proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode, oni se već znatnije razlikuju u usporedbi s onima u proračunu s uvjetom završetka slomom prvog elementa. Njihove vrijednosti prikazane su u Tablici 21.

Tablica 21. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 9. provjeru (X smjer) ; b) 18. provjeru (Y smjer)

#### a) 9. provjera (X smjer)

T* [s]	0,881
m* [kg]	1005999,334
w [kN]	13986
M [kg]	1415335,264
m*/M [%]	71,079
$\Gamma$	1,01
F*y [kN]	1659
d*y [mm]	32,41
d*m [mm]	84,48

#### b) 18. provjera (Y smjer)

T* [s]	0,358
m* [kg]	883130,48
w [kN]	13986
M [kg]	1415335,264
m*/M [%]	62,397
$\Gamma$	1,15
F*y [kN]	1461
d*y [mm]	5,38
d*m [mm]	7,82

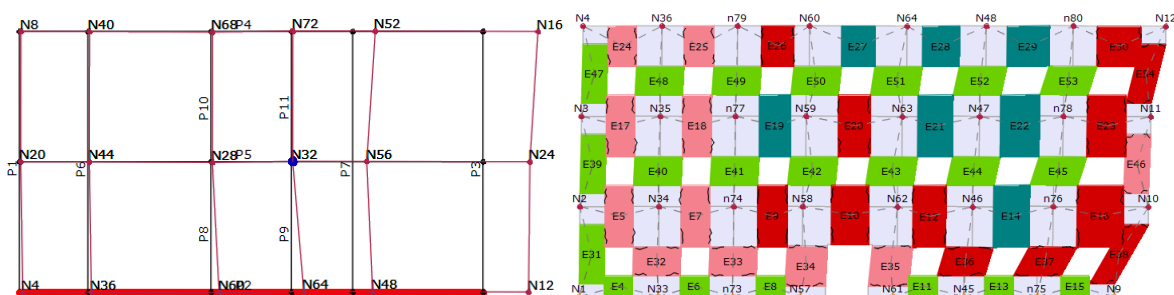
Gledano iz perspektive graničnog stanja blizu rušenja ili znatnog oštećenja, rezultati na sljedećoj slici pokazuju kako čak više od polovica provjera zadovoljava uvjet nosivosti. Čak je i kritična provjera u X smjeru zadovoljava uvjet nosivosti sa vrijednošću faktora ispunjenja  $\alpha = 1,241$ . Maksimalni pomak proračunskog modela je drastično veći u usporedbi s proračunom uvjetovanim slomom prvog elementa u nosivom zidu, vidljivo je to na sljedećoj slici gdje je on jednak  $dm = 85,00$  mm.

No.	Insert in report	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	dt NC [mm]	dm NC [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	d*y DL [mm]	a NC	a SD	a DL	dm/dt NC
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	0,00	62,16	88,08	41,37	66,06	2,33	1,417	1,597	1,106	1,417
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	0,00	65,03	204,88	43,28	153,66	2,08	3,151	3,550	0,944	3,151
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	0,00	42,98	714,51	28,60	535,88	1,02	16,625	18,734	0,701	16,624
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	0,00	69,41	1.340,06	46,20	1.005,04	2,50	19,306	21,755	1,064	19,306
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	0,00	31,06	10,45	20,42	7,84	0,56	0,352	0,406	0,660	0,336
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	0,00	34,52	16,59	22,92	12,44	0,60	0,483	0,546	0,603	0,481
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	0,00	34,07	43,39	22,57	32,55	0,74	1,271	1,436	0,755	1,274
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	0,00	40,09	52,65	26,69	39,49	1,05	1,313	1,480	0,886	1,313
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	630,00	68,47	85,00	45,57	63,75	3,24	1,241	1,399	1,397	1,241
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	-630,00	56,31	178,66	37,48	133,99	1,63	3,172	3,575	0,856	3,173
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	630,00	69,63	111,62	46,34	83,72	2,67	1,603	1,806	1,131	1,603
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	-630,00	65,01	231,55	43,27	173,66	1,97	3,562	4,014	0,892	3,562
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	630,00	42,69	754,95	28,41	566,21	1,06	17,685	19,928	0,733	17,684
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	-630,00	42,38	667,42	28,20	500,56	0,96	15,750	17,748	0,667	15,748
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	630,00	61,60	749,60	41,00	562,20	1,93	12,169	13,713	0,926	12,169
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	-630,00	66,70	1.228,97	44,40	921,73	2,22	18,424	20,761	0,980	18,425
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	1.125,00	31,00	12,97	20,38	9,73	0,55	0,432	0,496	0,655	0,418
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	-1.125,00	31,14	9,00	20,49	6,75	0,54	0,305	0,352	0,636	0,289
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	1.125,00	34,51	15,82	22,91	11,87	0,57	0,461	0,522	0,568	0,458
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	-1.125,00	34,57	14,33	22,96	10,75	0,53	0,417	0,472	0,530	0,415
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	1.125,00	34,28	44,13	22,73	33,10	0,71	1,285	1,451	0,717	1,287
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	-1.125,00	35,18	41,70	23,39	31,28	0,77	1,185	1,336	0,739	1,185
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	1.125,00	39,89	53,72	26,55	40,29	1,00	1,347	1,517	0,845	1,347
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	-1.125,00	41,63	55,09	27,71	41,32	1,11	1,323	1,491	0,896	1,323

Slika 54. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model A; Turnšek/Čačović – globalno otkazivanje konstrukcije)

Na Slici 55. prikazan je mehanizam sloma kritičnog zida za 9. provjeru (X smjer). Naime, u ovom slučaju pojam kritični zid označava zid koji je doživio najveća oštećenja, ne i zid koji je doživio najveći pomak. Bočna sila djeluje u „+“, X smjeru s ekscentrom u „+“, Y smjeru što logično daje veće pomake središnjem i gornjem nosivom zidu u odnosu na donji nosivi zid.

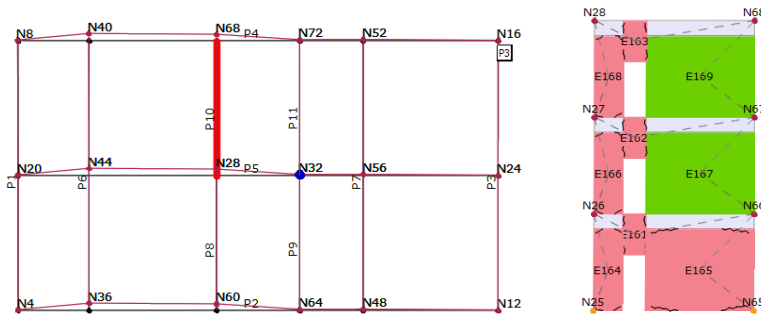
Na navedenoj slici također se može uočiti kako je došlo do djelomičnog sloma prizemlja, gdje su nastradali „pier“ elementi na desnoj strani konstrukcije. U ostatku zida primjećuje se da je velika većina „spandrel“ elementa doživjela slom.



Slika 55. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (9. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK)

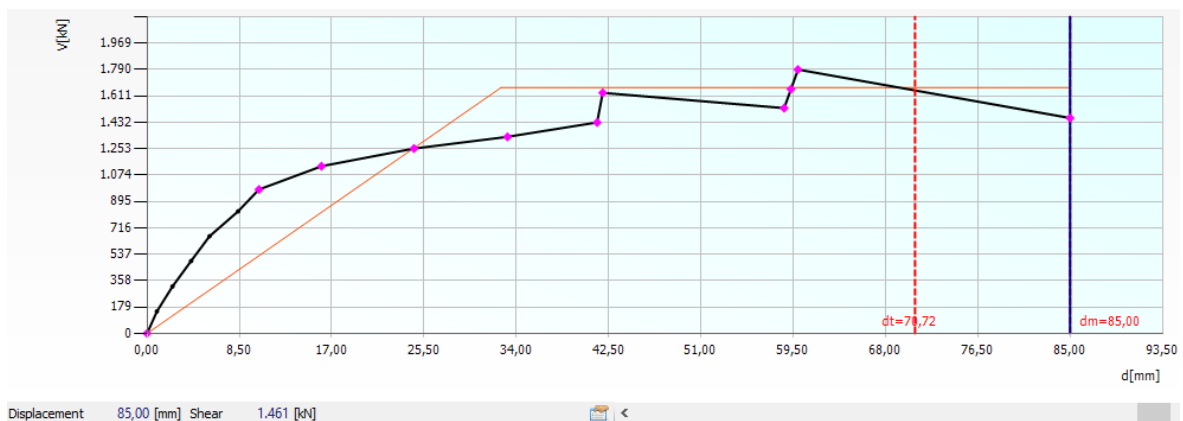
Najranjiviji nosivi zid uslijed kritične provjere u Y smjeru ostao je isti kao i u prošlim metodama, to je jedan od dva središnja zida prikazan na Slici 56. Zanimljivo je kako u

ovom slučaju nije došlo do sloma ni jednog element u trenutku završetka proračuna, već su samo doživjeli oštećenja zbog savijanja. Detaljnim uvidom u model uočeno je kako čak ni u pregradnim zidovima nije došlo do sloma ni jednog elementa. Ovo je još jedan razlog zašto ovaj uvjet završetka proračuna ne može biti mjerodavan.



Slika 56. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (18. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK)

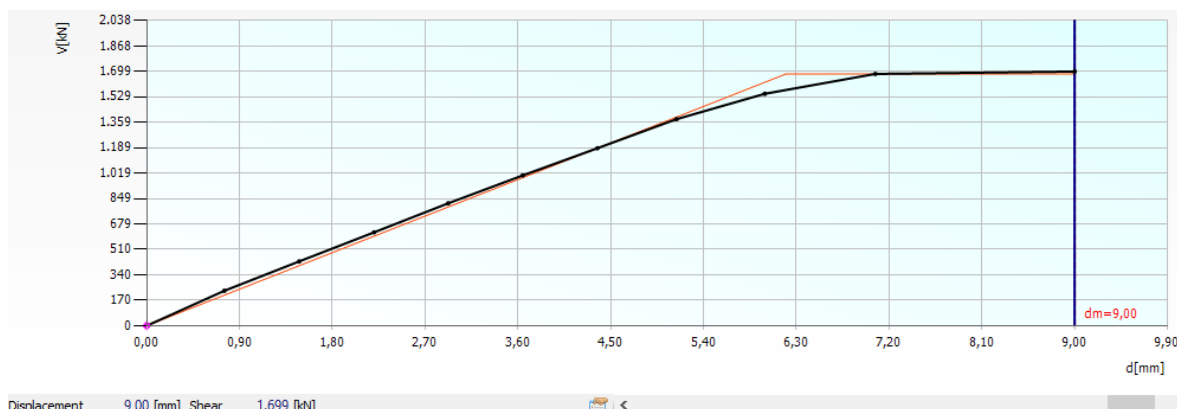
Krivulja kapaciteta proračunskog modela za 9. provjeru (X smjer) prikazana je na Slici 57. Vidljiva je jasna razlika bilinearne krivulje u usporedbi s istom krivuljom u proračunu provedenom u poglavlju 5.1.1. Na sljedećoj slici jasno je naznačen prekid između linearnog dijela krivulje i horizontalne linije koja završava u trenutku dosezanje kriterija globalnog otkazivanja konstrukcije. Nagib linearnog dijela definiran je tako da linearni pravac sječe krivulju kapaciteta u točki gdje doseže 70 % maksimalne poprečne sile.



Slika 57. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (9. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK)

Na sljedećoj slici (Slika 58.) prikazana je krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru. Na krivulji je jasno vidljivo kako nije došlo do pada ni u kojem trenutku, već je

proračunski model došao do ispunjenja uvjeta završetka proračuna prije nego što se dogodio bilo kakav pad.



Slika 58. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (18. provjera, Model A; T/Č metoda – GOK)

Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za kritičnu provjeru u X i Y smjeru uvjetom globalnog otkazivanja konstrukcije iznosi:

$$\alpha_{BR,x} = d_{m,x} / d_{t,x} = 85,00 / 68,47 = 1,241 \quad (35)$$

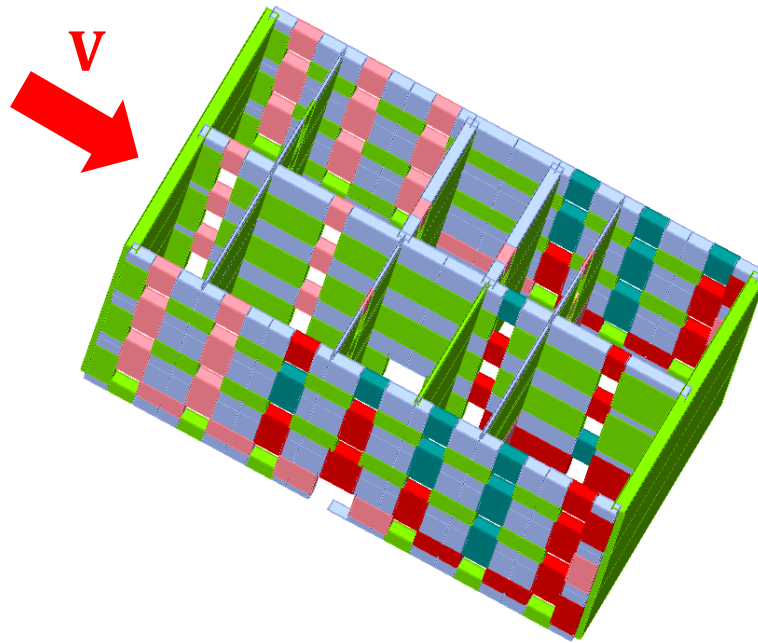
$$\alpha_{BR,y} = d_{m,y} / d_{t,y} = 9,00 / 31,14 = 0,289 \quad (36)$$

Gdje su:

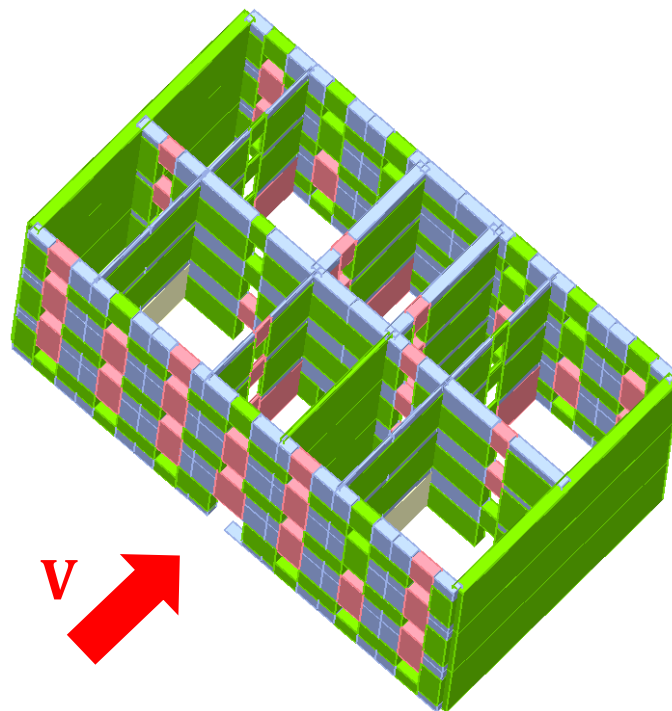
- $\alpha_{BR,x}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za X smjer
- $d_{m,x}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku globalnog otkazivanja konstrukcije (prilikom kritične provjere u X smjeru)
- $d_{t,x}$  – ciljani pomak proračunskog modela (za kritičnu provjeru u X smjeru)
- $\alpha_{BR,y}$  – faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za Y smjer
- $d_{m,y}$  – maksimalni pomak proračunskog modela u trenutku globalnog otkazivanja konstrukcije (prilikom kritične provjere u Y smjeru)
- $d_{t,y}$  – ciljani pomak proračunskog modela (za kritičnu provjeru u Y smjeru)

Faktori ispunjenja veći su nego kod uvjeta sloma prvog elementa u nosivom zidu, posebice u X smjeru gdje je razlika drastična. Proračun potresne otpornosti u X smjeru ovim uvjetom završio je daleko kasnijem trenutku nego što se dogodio prvi slom elementa, to se može grafički vidjeti na Slici 59. gdje je prikazan 3D ekvivalentni model s makroelementima u trenutku završetka proračuna. Na Slici 60. prikazan je 3D

ekvivalentni model s makroelementima u trenutku završetka proračuna za 18. provjeru, vidljivo je sad i na cijelom modelu kako nije došlo do sloma ni jednog makroelementa.

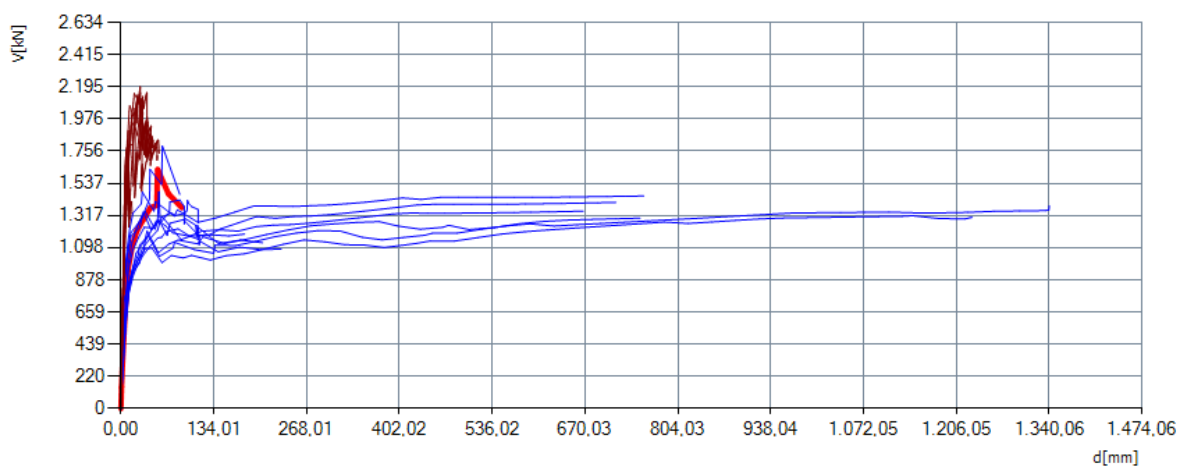


*Slika 59. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (9. provjera, Model A, T/Č metoda – GOK)*



*Slika 60. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (18. provjera, Model A, T/Č metoda – GOK)*

Kao krajnji rezultat proračuna s uvjetom globalnog otkazivanja konstrukcije predstavljen je skup svih krivulja kapaciteta tj. skup krivulja kapaciteta svih 24. provjera. Takav skup prikazan je na Slici 61. gdje se mogu uočiti neke nerealne vrijednosti maksimalnog pomaka na nekolicini krivulja. Iz nekog razloga, *3Muri* proračunava model sve do maksimalnog pomaka konstrukcije od čak 1 340 mm u jednoj provjeri, a slična situacija se događa i kod nekoliko drugih provjera. Taj razlog može biti zato što je ovaj uvjet završetka proračuna u pravilu definiran samo za konstrukcije s apsolutno krutim stropnim konstrukcijama. Bio to razlog ili ne, nikako se ovaj uvjet završetka proračuna ne može smatrati mjerodavnim i vjerodostojnim.



Slika 61. Skup svih krivulja kapaciteta (Model A, T/Č metoda – GOK)

## 5.2. Model B – Apsolutna kruta stropna konstrukcija

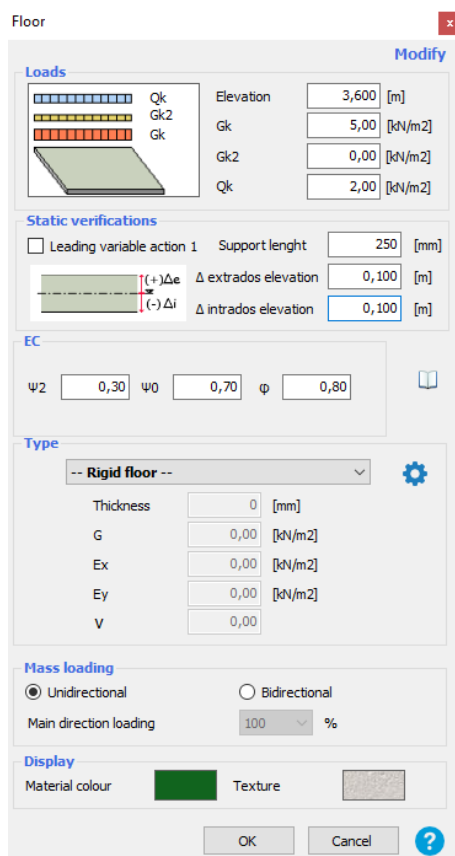
### 5.2.1. *Turnšek/Čačović metoda – Slom prvog elementa nosivog zida*

Drugi proračunski model – Model B predstavlja promatranu zidanu zgradu s izmjenom stropnih konstrukcija. Stropne konstrukcije u ovom proračunskom modelu djeluju kao apsolutno krute stropne dijafragme. Dakle, jedini ulazni parametar koji se mijenja prikazan je na Slici 62., ispod naslova tip stropne konstrukcije definiran je kruti pod (eng. Rigid floor).

U stvarnosti takva krutost se može opravdati ukoliko je stropna konstrukcija izvedena kao betonska ploča. Prije samog proračuna i dobivenih vrijednosti rezultata, mogu se navesti osnovne pretpostavke i očekivanja od rezultata promatranog modela. S obzirom da je u ovom modelu definirana apsolutno kruta stropna konstrukcija, povećava se i globalna krutost cijelog proračunskog modela. Uzdužni i poprečni zidovi ukrućeni su i međusobno povezani krutom stropnom konstrukcijom tako da djeluju kao cjelina u većoj mjeri nego što je to bio slučaj s fleksibilnom stropnom konstrukcijom (Model A).

Tablica 22. prikazuje proračunske parametre ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode za Model B. Navedena tablica prikazuje kraći period ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode za kritičnu provjeru u Y smjeru usporedivši ga s istim oblikom proračuna kod Modela A. To se može povezati s činjenicom da Model B pruža puno bolju povezanost zidova u tom smjeru te samim time i veću krutost.





Slika 62. Definiranje stropne konstrukcije (Model B)

Tablica 22. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model B) za: a) 16. provjeru (X smjer) ; b) 24. provjeru (Y smjer)

**a) 16. provjera (X smjer)**

$T^*$ [s]	0,451
$m^*$ [kg]	1063740,235
$w$ [kN]	16511
$M$ [kg]	1672760,189
$m^*/M$ [%]	63,592
$\Gamma$	1,27
$F^*y$ [kN]	1958
$d^*y$ [mm]	9,47
$d^*m$ [mm]	9,47

**b) 24. provjera (Y smjer)**

$T^*$ [s]	0,397
$m^*$ [kg]	1069027,371
$w$ [kN]	16511
$M$ [kg]	1672760,189
$m^*/M$ [%]	63,908
$\Gamma$	1,26
$F^*y$ [kN]	2863
$d^*y$ [mm]	10,7
$d^*m$ [mm]	10,7

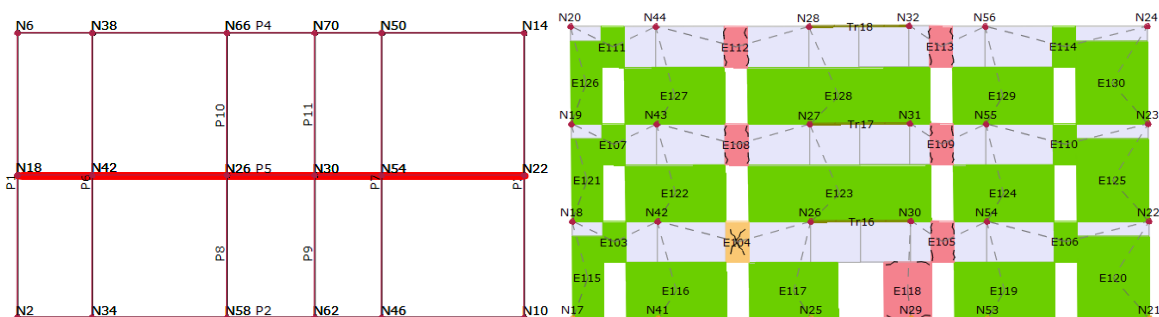
Rezultati proračuna uvjetovanim sa slomom prvog elementa svih provedenih provjera vidljivi su na Slici 63. Izdvojivši dvije kritične provjere (16. i 24.) vidljivo je kako ni u ovom modelu ne zadovoljavaju uvjet nosivosti nijednog graničnog stanja. Dvije kritične

provjere izdvojiti će se te u njima pronaći maksimalni pomak u trenutku sloma prvog elementa u nosivom zidu.

No.	Insert in report	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	dt NC [mm]	dm NC [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	d*y DL [mm]	α NC	α SD	α DL	dm/dt NC
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	0,00	39,61	14,37	26,36	10,78	1,04	0,363	0,409	0,978	0,363
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	0,00	43,79	13,78	29,14	10,33	1,09	0,315	0,355	0,923	0,315
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	0,00	39,88	11,39	26,54	8,54	0,90	0,286	0,322	0,838	0,286
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	0,00	44,08	12,00	29,34	9,00	0,95	0,272	0,307	0,798	0,272
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	0,00	34,70	18,59	22,75	13,94	0,87	0,549	0,630	0,991	0,536
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	0,00	39,37	16,79	26,21	12,59	1,05	0,426	0,481	0,986	0,426
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	0,00	34,00	14,95	22,18	11,21	1,02	0,461	0,526	1,182	0,440
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	0,00	38,62	13,77	25,67	10,33	1,04	0,358	0,404	1,003	0,357
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	630,00	39,35	14,37	26,19	10,78	1,02	0,365	0,412	0,965	0,365
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	-630,00	39,88	14,37	26,54	10,78	1,07	0,360	0,406	1,000	0,360
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	630,00	43,64	13,78	29,05	10,33	1,09	0,316	0,356	0,926	0,316
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	-630,00	43,88	13,78	29,21	10,33	1,09	0,314	0,354	0,921	0,314
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	630,00	39,66	11,39	26,40	8,54	0,84	0,287	0,324	0,784	0,287
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	-630,00	39,98	11,39	26,61	8,54	0,90	0,285	0,321	0,836	0,285
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	630,00	43,66	12,00	29,06	9,00	0,87	0,275	0,310	0,742	0,275
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	-630,00	44,11	12,00	29,36	9,00	0,95	0,272	0,306	0,798	0,272
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	1.125,00	34,71	17,94	22,76	13,45	0,86	0,531	0,609	0,979	0,517
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	-1.125,00	34,71	18,11	22,76	13,58	0,87	0,536	0,614	0,984	0,522
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	1.125,00	39,19	17,25	26,08	12,93	1,01	0,440	0,496	0,959	0,440
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	-1.125,00	39,40	16,89	26,22	12,67	1,02	0,429	0,483	0,961	0,429
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	1.125,00	33,98	15,48	22,17	11,61	0,99	0,476	0,547	1,145	0,456
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	-1.125,00	34,12	14,98	22,28	11,23	0,99	0,459	0,526	1,144	0,439
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	1.125,00	38,50	14,01	25,58	10,51	1,02	0,366	0,413	0,989	0,364
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	-1.125,00	38,65	13,52	25,69	10,14	1,03	0,352	0,396	0,991	0,350

Slika 63. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model B; Turnšek/Čačović – slom prvog elementa)

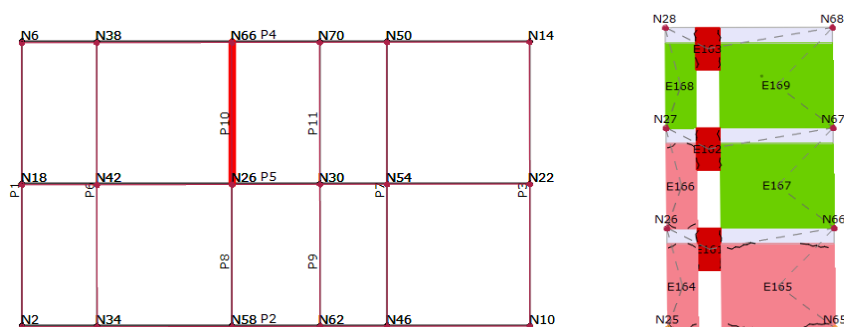
Mehanizmi loma kritičnih zidova za dvije najgore provjere prikazani su na Slici 64. (X smjer) i Slici 65. (Y smjer). Isti zidovi kao u Modelu A pokazali su se kritičnima, i to u oba smjera. U 16. provjeri došlo je do posmičnog sloma u „spandrel“ elementu E104 na najnižoj etaži. Posmični slom makro-elementa u 3Muri-ju definiran je narančastom bojom kao što je to vidljivo u ovom slučaju. Zanimljiva je činjenica da je slom prvog elementa u nosivom zidu ujedno i prvi slom elementa na cijeloj konstrukciji, baš kao i u kritičnoj provjeri u X smjeru kod Modela A.



Slika 64. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (16. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ)

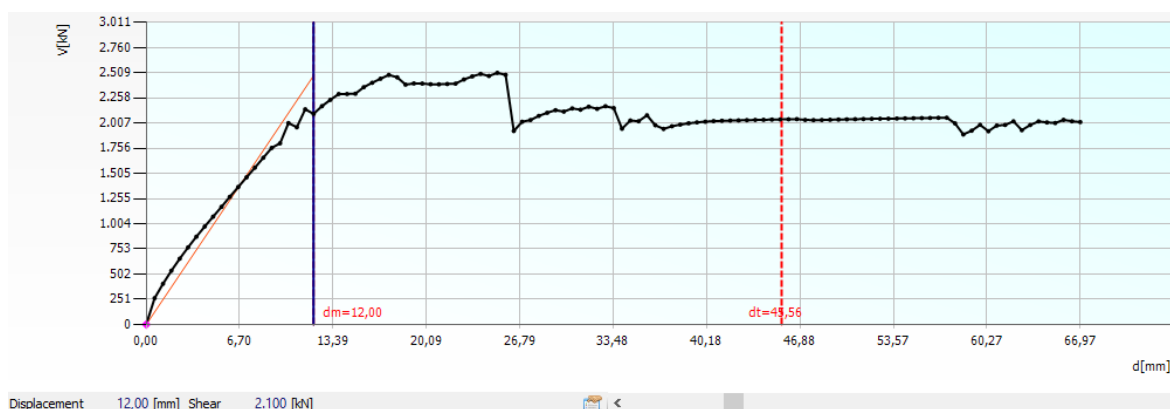
Gledavši mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru na Slici 65., vidi se slom sva tri „spandrel“ elementa (E161, E162 i E163). Slom se dogodio zbog savijanja, a osim tih

elementa još su tri „pier“ elementa oštećena zbog savijanja. Ovaj trenutak sloma odabran je kao kritičan zbog toga što se u tom trenutku dogodio slom „spandrel“ elementa u najnižoj etaži. Prije toga dogodio se slom „spandrel“ elementa u gornje dvije etaže, što se ne može smatrati ugrožavanjem graničnog stanja blizu rušenja konstrukcije.

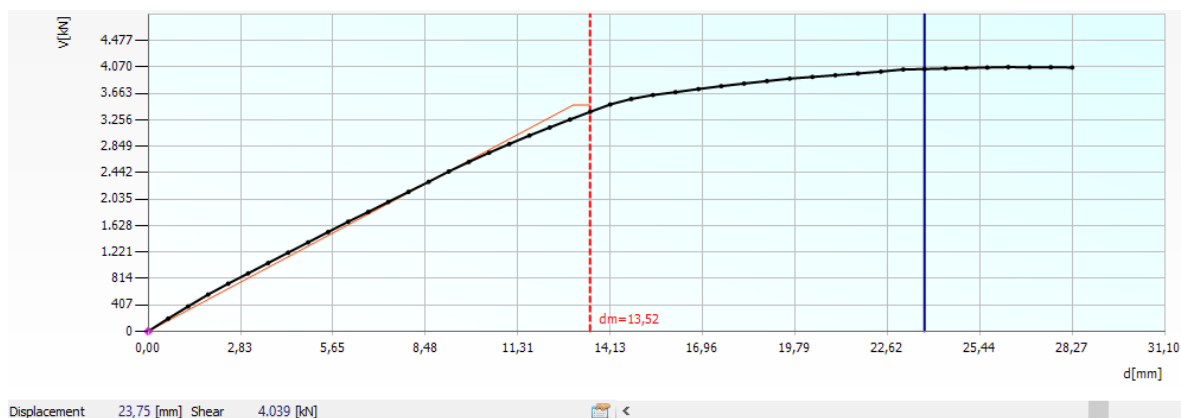


Slika 65. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ)

Krivulje kapaciteta za kritične provjere u X i Y smjeru prikazane su na Slikama 66. i 67. Na krivuljama je plavom linijom označen maksimalni pomak u trenutku pojave sloma prvog elementa u nosivom zidu. Taj pomak je u ovom modelu veći za Y smjer, a s obzirom da je ciljani pomak u Y smjeru manji nego u X smjeru, jasno je kako je i faktor ispunjenja veći u Y smjeru. Osim pomaka i faktora ispunjenja, maksimalna poprečna sila u X smjeru iznosi 2 100 kN, što je manje u odnosu na Y smjer gdje ona iznosi 4 039 kN. Usporedivši ove dvije vrijednosti maksimalne poprečne sile s onima iz Modela A, zaključuje se da je sila u X smjeru veća za 167% ( $V_{A,X,max} = 786$  kN), a u Y smjeru za 125% ( $V_{A,Y,max} = 1 794$  kN).



Slika 66. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (16. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ)



Slika 67. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SNZ)

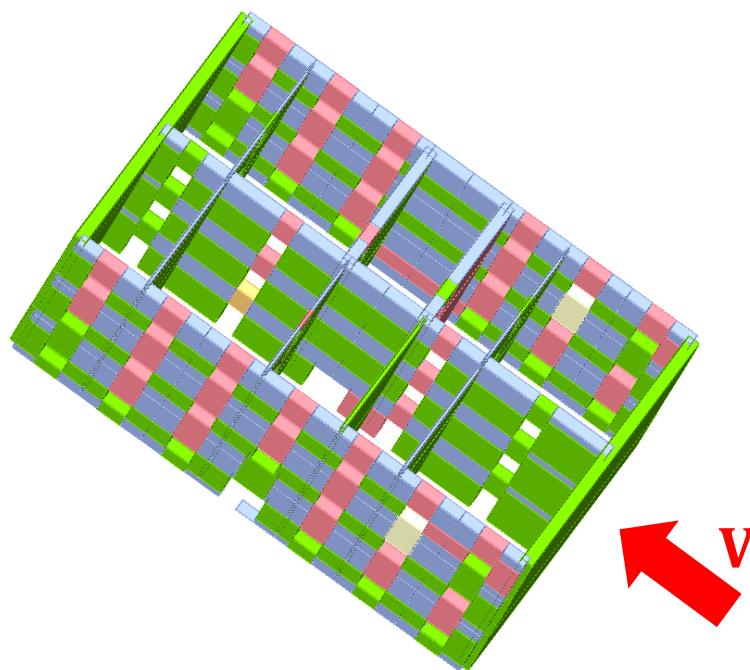
Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za kritičnu provjeru u X i Y smjeru uvjetom sloma prvog makro-elementa u nosivom zidu iznosi:

$$\alpha_{BR,x,SNZ} = d_{m,x,SNZ} / d_{m,x,SPE} * \alpha_{BR,x,SPE} = 12,00 / 12,00 * 0,272 = 0,272 \quad (37)$$

$$\alpha_{BR,y,SNZ} = d_{m,y,SNZ} / d_{m,y,SPE} * \alpha_{BR,y,SPE} = 23,75 / 13,52 * 0,352 = 0,618 \quad (38)$$

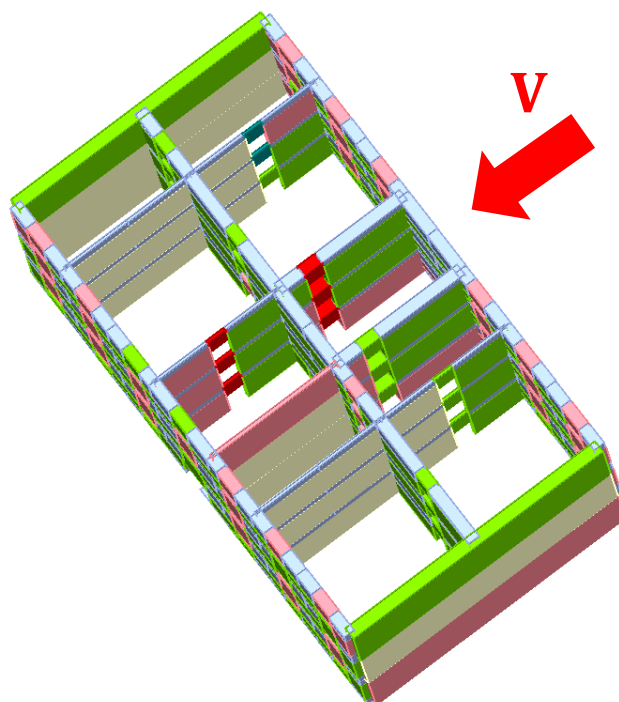
U usporedbi prikazanih faktora ispunjenja s istima kod Modela A,  $\alpha_{BR,x,SNZ}$  veći je za 30%, dok je  $\alpha_{BR,y,SNZ}$  manji za 29% u Y smjeru. Ovakvi rezultati u X smjeru su i očekivani s obzirom da je kroz ovaj rad utvrđeno da kruta stropna dijafragma pridodaje većoj globalnoj stabilnosti konstrukcije u usporedbi s fleksibilnom stropnom dijafragmom. No rezultati u Y smjeru su pomalo začuđujući s obzirom da je model s krutom stropnom konstrukcijom postigao manju potresnu otpornost. Glavni razlog tome je taj što se u Modelu A prvi slom bilo kojeg elementa dogodi pri dvaput manjem globalnom pomaku modela (Model A -  $d_{m,y,SPE} = 6,90$  mm) pa je time manji i djelitelj u jednadžbi (34).

Na Slici 68. vidljiv je globalni prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima u trenutku sloma prvog elementa u nosivom zidu (16. provjera, X smjer). Može se uočiti „spandrel“ element E104 koji je doživio slom zbog posmika. Vidljivo je i kako su gotovo svi „spandrel“ elementi u zidovima usmjerenima u X smjeru doživjeli oštećenje.



*Slika 68. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (16. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ)*

Na sljedećoj slici (Slika 69.) prikazan je 3D ekvivalentni model kritične provjere u Y smjeru. Vidljiv je slom tri „spandrel“ elementa u jednom od dva središnja nosiva zida. Na istoj osi tog zida nalazi se i jedan pregradni zid, on je također doživio slom zbog savijanja sva tri „spandrel“ elementa.

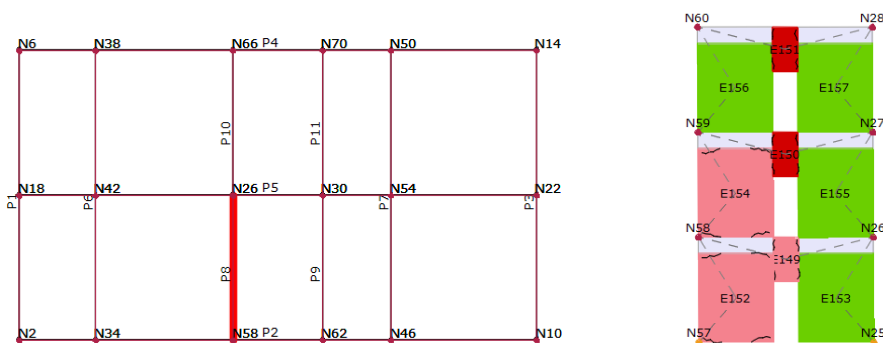


*Slika 69. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (24. provjera, Model A, T/Č metoda – SNZ)*

### 5.2.2. Turnšek/Čačović metoda - Slom prvog elementa

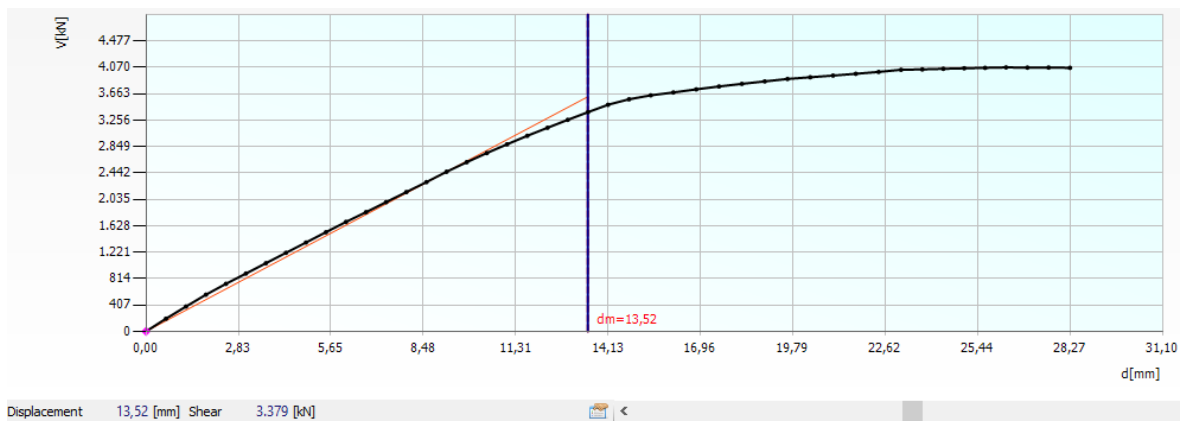
U ovom poglavlju usporediti će se vrijednosti rezultata proračuna s vrijednostima iz prošlog poglavlja te ukratko prokomentirati razlike i sličnosti. U prošlom poglavlju već je definirano kako je slom prvog elementa u X smjeru zapravo i slom prvog konstruktivnog elementa. Temeljem te činjenice, rasprave vezane za X smjer neće ni biti. Rezultati proračuna nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja jednaki su onima iz Poglavlja 5.2.1. prikazanim na Slici 63.

Kritičnu provjeru u Y smjeru i dalje predstavlja 24. provjera, no u proračunu uvjetovanim slomom prvog elementa maksimalni pomak očitava se ranije. Posljedica je to sloma prvog elementa koji se nalazi u jednom od dva središnja pregradna zida. Na Slici 70. prikazan je mehanizam loma spomenutog pregradnog zida. Na slici je vidljiv slom zbog savijanja „spandrel“ elementa E150 i E151 na gornje dvije etaže. Dakako, slom elementa u pregradnom zidu se ne može smatrati ugrozom globalne stabilnosti cijele konstrukcije. Upravo iz tog razloga proračun s ovim uvjetom završetka ne može biti mjerodavan.



Slika 70. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SPE)

Krivulja kapaciteta vidljiva je na Slici 71., ona izgleda posve jednako kao u prošlom poglavlju osim što se maksimalni pomak očitava ranije (plava linija). Maksimalni pomak na sljedećoj krivulji iznosi  $dm = 13,52$  mm. Prilikom navedenog pomaka, model preuzima poprečnu silu u vrijednosti 3 379 kN.



Slika 71. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (24. provjera, Model B; T/Č metoda – SPE)

Posve je jasno kako je na prošlom grafu bilinearna krivulja ostvarila samo linearan dio, te se maksimalni pomak očitao prije prelaska krivulje u horizontalno zaravnanje.

Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za kritičnu provjeru u Y smjeru uvjetovanim slomom prvog elementa iznosi:

$$\alpha_{BR,y} = d_{m,y} / d_{t,y} = 13,52 / 39,76 = 0,340 \quad (39)$$

### 5.2.3. Turnšek/Čačović metoda – Globalno otkazivanje konstrukcije

Posljednji proveden proračun potresne otpornosti konstrukcije jest proračun Turnšek-Čačović metodom uvjetovan s globalnim otkazivanjem konstrukcije. Rezultati provedenih provjera nad Modelom B prikazani su na Slici 72. Prvi pogled ukazuje na manji broj zelenih ćelija u usporedbi s istom provjerom kod Modela A. Isto tako može se uočiti da u ovom slučaju nema ni jednog nerealno velikog maksimalnog pomaka, ova pojava može se i grafički vidjeti na Slici 79. To možemo povezati s pravilom da se ovaj uvjet završetka proračuna može koristiti samo u modelima s krutom stropnom dijafragmom. Tim rečeno, moglo bi se zaključiti da su rezultatni maksimalni pomaci svih provjera u ovom modelu vjerodostojni. No ipak takvi rezultati ne pružaju dovoljnu sigurnost stabilnosti konstrukcije, stoga ne mogu biti mjerodavni.

No.	Insert in report	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	dt NC [mm]	dm NC [mm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	d*y DL [mm]	a NC	a SD	a DL	dm/dt NC
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	0,00	41,08	32,38	27,39	24,28	0,93	0,788	0,887	0,605	0,788
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	0,00	45,84	35,47	30,56	26,60	0,96	0,774	0,871	0,558	0,774
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	0,00	42,95	32,32	28,63	24,24	1,02	0,752	0,847	0,631	0,753
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	0,00	46,67	66,34	31,12	49,75	0,98	1,421	1,599	0,557	1,421
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	0,00	35,88	20,39	23,58	15,29	0,87	0,580	0,663	0,682	0,568
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	0,00	40,67	24,01	27,11	18,01	1,03	0,590	0,664	0,676	0,590
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	0,00	35,19	23,95	23,00	17,96	1,06	0,693	0,794	0,850	0,681
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	0,00	40,43	32,91	26,95	24,68	1,22	0,814	0,916	0,801	0,814
9	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	630,00	40,78	29,98	27,18	22,49	0,92	0,735	0,827	0,602	0,735
10	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniform	-630,00	41,72	28,17	27,81	21,12	1,01	0,675	0,760	0,641	0,675
11	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	630,00	45,52	35,47	30,35	26,61	0,94	0,779	0,877	0,547	0,779
12	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Static forces	-630,00	46,13	36,65	30,75	27,49	1,01	0,794	0,894	0,580	0,794
13	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	630,00	42,82	54,39	28,55	40,79	1,02	1,270	1,429	0,632	1,270
14	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniform	-630,00	43,02	54,39	28,68	40,79	1,01	1,264	1,422	0,627	1,264
15	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	630,00	47,24	66,37	31,50	49,78	1,01	1,405	1,581	0,571	1,405
16	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Static forces	-630,00	46,81	66,97	31,21	50,23	0,99	1,431	1,609	0,561	1,431
17	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	1.125,00	35,90	20,32	23,59	15,24	0,86	0,578	0,660	0,673	0,566
18	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniform	-1.125,00	35,89	19,97	23,59	14,97	0,86	0,569	0,650	0,676	0,556
19	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	1.125,00	40,47	24,06	26,98	18,04	1,02	0,594	0,669	0,672	0,595
20	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Static forces	-1.125,00	40,70	23,94	27,13	17,96	1,03	0,588	0,662	0,674	0,588
21	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	1.125,00	35,15	22,67	22,97	17,00	1,04	0,658	0,755	0,838	0,645
22	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniform	-1.125,00	35,31	22,17	23,09	16,63	1,05	0,642	0,736	0,839	0,628
23	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	1.125,00	40,43	29,54	26,95	22,16	1,19	0,731	0,822	0,779	0,731
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Static forces	-1.125,00	40,50	28,27	27,00	21,20	1,19	0,698	0,785	0,781	0,698

Slika 72. Rezultati „Pushover“ proračuna (Model B; Turnšek/Čačović – globalno otkazivanje konstrukcije)

Dvije kritične provjere proračuna Modela B s uvjetom pada poprečne sile jesu 10. za X smjer te 18. za Y smjer. Karakteristike tih provjera vidljive su na posljednjoj slici, dok su na Tablici 23. prikazani proračunski parametri ekvivalentnih sustava. Navedena tablica ukazuje na popriličnu sličnost veličina osnovnih perioda ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode u X i Y smjeru.



Tablica 23. Proračunski parametri ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode (Model A) za: a) 10. provjeru (X smjer) ; b) 18. provjeru (Y smjer)

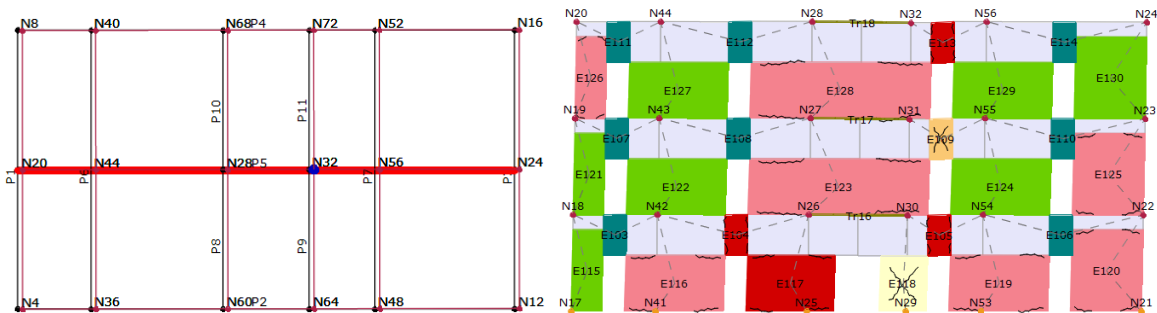
a) 10. provjera (X smjer)

T* [s]	0,413
m* [kg]	1063740,235
w [kN]	16511
M [kg]	1672760,189
m*/M [%]	63,592
$\Gamma$	1,27
F*y [kN]	2480
d*y [mm]	10,06
d*m [mm]	22,23

b) 18. provjera (Y smjer)

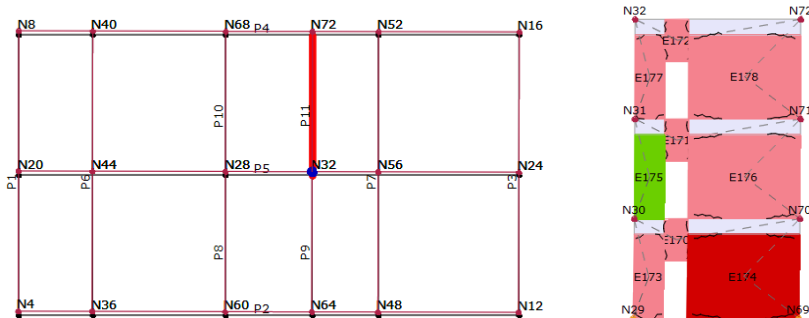
T* [s]	0,366
m* [kg]	1069027,371
w [kN]	16511
M [kg]	1672760,189
m*/M [%]	63,908
$\Gamma$	1,26
F*y [kN]	2710
d*y [mm]	8,59
d*m [mm]	15,79

U trenutku završetka proračuna (10. provjera) kao najkritičniji zid pokazao se središnji zid, kao i u prošlim slučajevima. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru prikazan je na Slici 73. Na slici je vidljivo mnoštvo različitih boja od kojih jedna još nije bila viđena u ovom radu, to je vrlo svjetla narančasta koja označava oštećenje elementa zbog posmika (E118). Mehanizam loma prikazuje otkazivanje apsolutno svih „spandrel“ elemenata uz slom još jednog „pier“ elementa u prizemlju (E117).



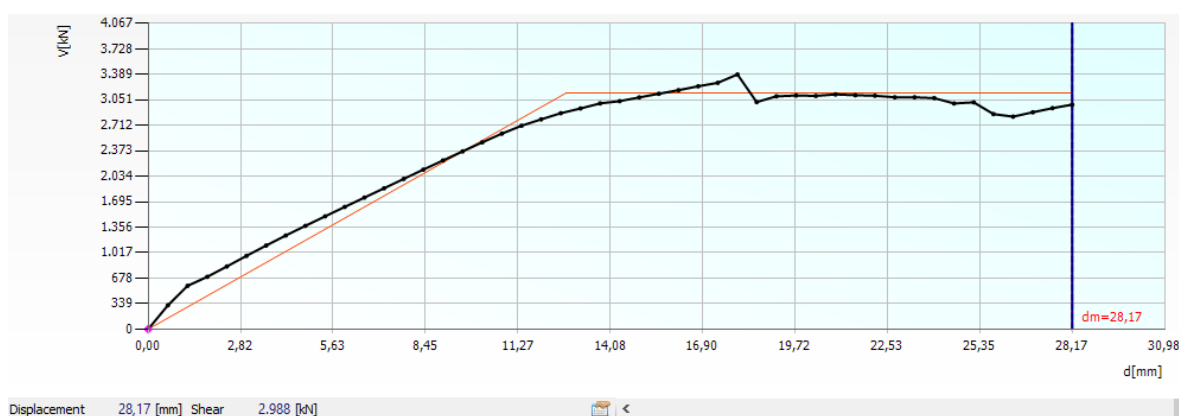
Slika 73. Mehanizam loma kritičnog zida u X smjeru (10. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK)

Mehanizam loma najkritičnijeg nosivog zida u trenutku završetka proračuna 18. provjere može se vidjeti na Slici 74. Kao najkritičniji zid pokazao se jedan od središnjih dva nosiva zida pruženi u Y smjeru. Kod ovog mehanizma loma zanimljivo je što nije došlo do otkazivanja ni jednog „spandrel“ elementa, već je otkazao „pier“ element E174 u prizemlju. Doduše, gotovo svi ostali elementi doživjeli su oštećenje zbog savijanja (izuzetak je „pier“ element E175).



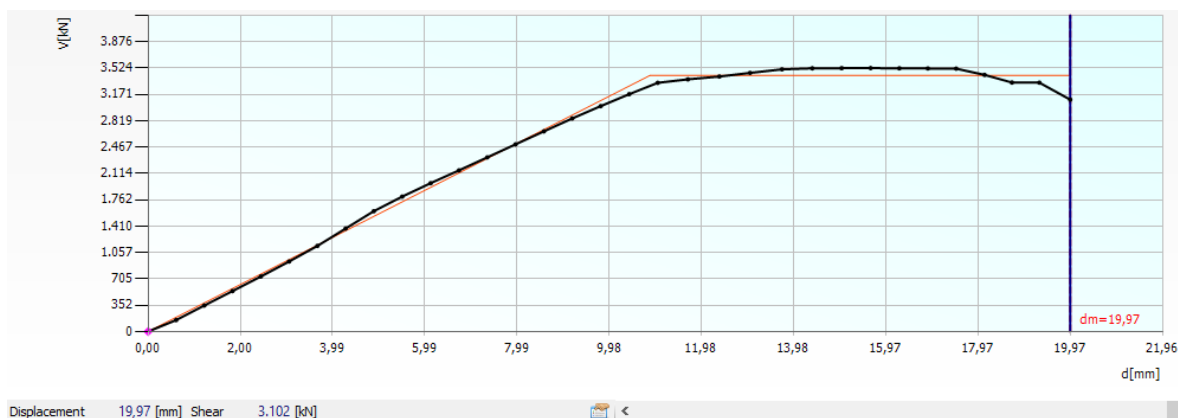
Slika 74. Mehanizam loma kritičnog zida u Y smjeru (18. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK)

Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru prikazana je na sljedećoj slici (Slika 75.), na njoj se jasno vide dva dijela bilinearne krivulje. Maksimalni pomak modela označen je na samom kraju krivulje, on iznosi  $dm = 28,17$  mm. Ciljani pomak nije vidljiv na grafu zbog toga što je njegova vrijednost prevelika da bi stala na graf koji je prikazan do granice od 30,98 mm, no vrijednost ciljanog pomaka vidljiva je na Slici 72.



Slika 75. Krivulja kapaciteta kritične provjere u X smjeru (10. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK)

Što se Y smjera tiče, krivulja kapaciteta kritične provjere vidljiva je na Slici 76. Na ovoj su krivulji također jasno izražena dva dijela bilinearne krivulje, ona je označena crvenom linijom. U trenutku završetka proračuna vrijednost poprečne sile iznosi 3 102 kN, te tome odgovara maksimalni pomak  $dm = 19,97$  mm.



Slika 76. Krivulja kapaciteta kritične provjere u Y smjeru (18. provjera, Model B; T/Č metoda – GOK)

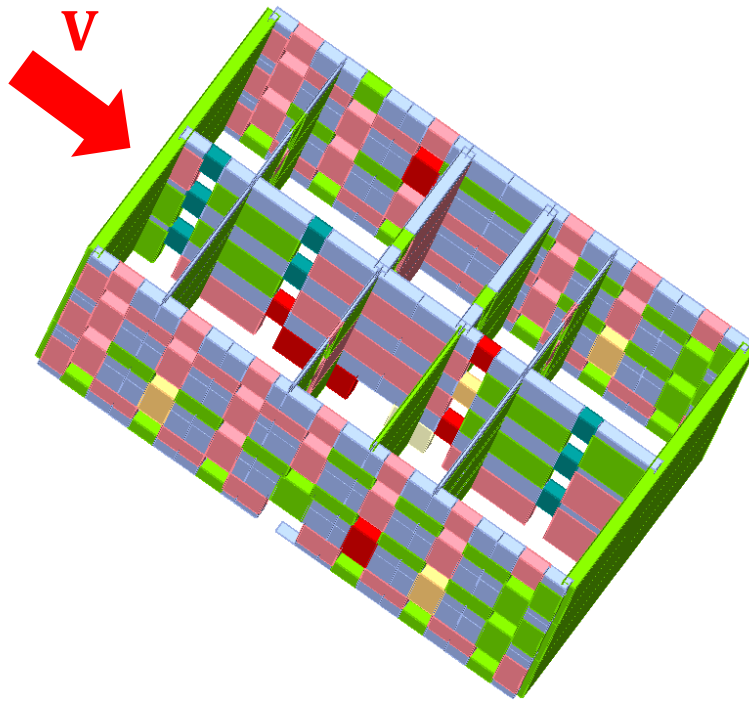
Faktor ispunjenja graničnog stanja blizu rušenja za kritičnu provjeru u X i Y smjeru uvjetom globalnog otkazivanja konstrukcije iznosi:

$$\alpha_{BR,x} = d_{m,x} / d_{t,x} = 28,17 / 41,72 = 0,675 \quad (40)$$

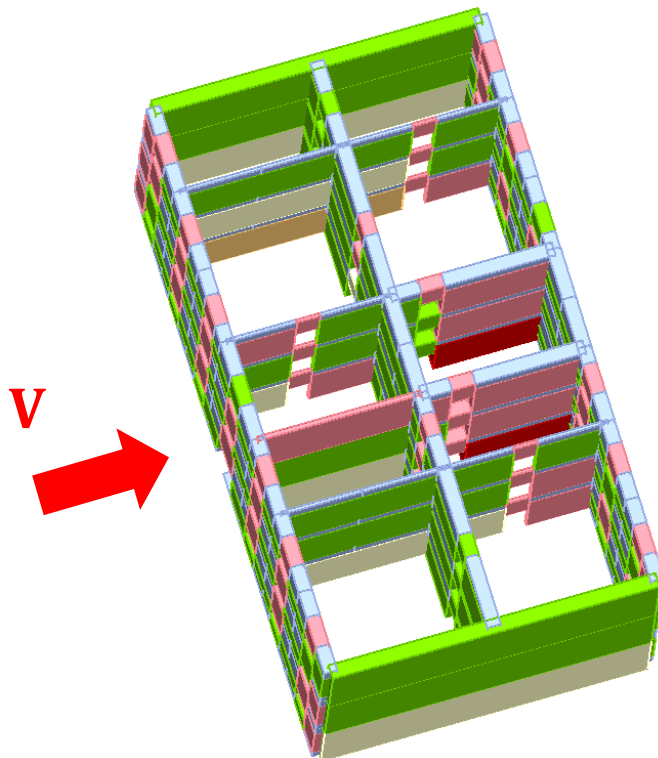
$$\alpha_{BR,y} = d_{m,y} / d_{t,y} = 19,97 / 35,89 = 0,556 \quad (41)$$

Faktori ispunjenja prikazani jednadžbama (41; 42) posjeduju veće vrijednosti od istih u slučaju proračuna uvjetovanim sa slomom prvog konstruktivnog elementa. Posebice je vidljivo povećanje vrijednosti u X smjeru, od  $\alpha_{BR,x,SNZ} = 0,272$  (Poglavlje 5.2.1.) povećanje je u iznosu od 148%. Na Slici 77. vidljiv je 3D ekvivalentni model s makroelementima gdje su naznačeni makro-elementi koji su doživjeli oštećenje ili slom u trenutku završetka proračuna (10. provjera). Primjećuje se slom više konstruktivnih makro-elemenata što je zapravo i razlog znatno većeg faktora ispunjenja.

Što se tiče 3D ekvivalentnog modela s makroelementima uslijed kritične provjere u Y smjeru, on je prikazan na Slici 78. Jasno se mogu vidjeti „pier“ elementi dva središnja nosiva zida u Y smjeru koja su doživjela slom zbog savijanja. Uz navedena dva zida čak su i vanjski zabatni zidovi doživjeli oštećenja zbog posmika u „pier“ elementima na najnižem katu.

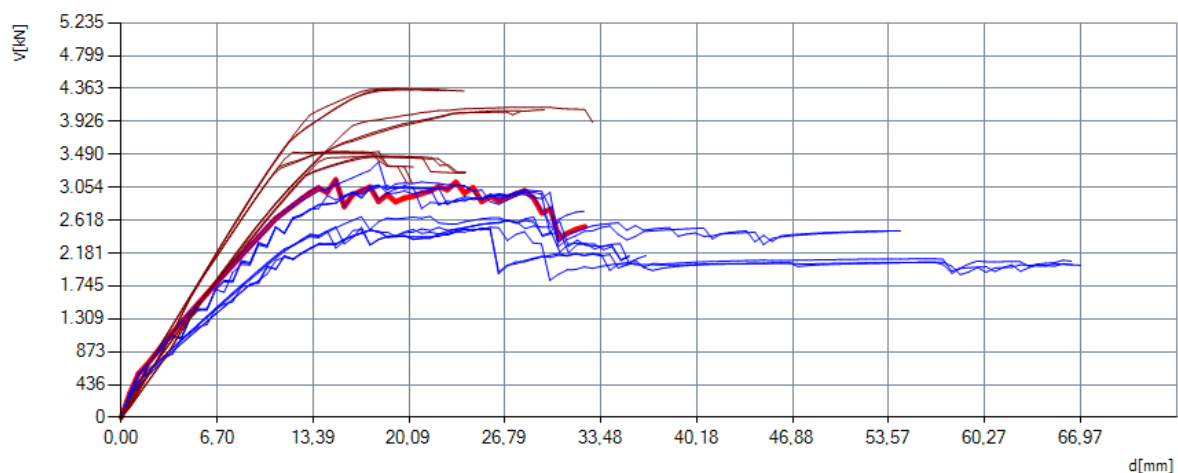


*Slika 77. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (10. provjera, Model B, T/Č metoda – GOK)*



*Slika 78. 3D prikaz ekvivalentnog modela s makroelementima (18. provjera, Model B, T/Č metoda – GOK)*

Na temelju svih 24. provjere napravljene ovim proračunom definiran je skup krivulja kapaciteta koji odgovara tim provjerama. Skup svih 24 krivulje kapaciteta prikazan je na sljedećoj slici (Slika 79.). Za razliku od Modela A, na ovom gradu nema nekih sumnjivih nerealnih vrijednosti, već je najveća dostignuta vrijednost pomaka jednaka 67 mm. Može se uočiti kako bi uvjet globalnog otkazivanja konstrukcije mogao biti primjeren samo za konstrukcije s krutom stropnom dijafragmom. Uočivši kod Modela A kako su se nerealno velike vrijednosti pomaka dogodile samo kod provjera u X smjeru, svojevrsno se dokazuje prethodno navedeno zapažanje. Razumno je reći kako programski paket *3Muri* nepravilno izvodi nelinearni proračun metodom postupnog naguravanja s uvjetom globalnog otkazivanja konstrukcije u slučaju kad model konstrukcije nema definiranu krutost (tj. modul elastičnosti) stropne dijafragme u jednom smjeru.



Slika 79. Skup svih krivulja kapaciteta (Model B, T/Č metoda – GOK)

## 6. ZAKLJUČAK

Razmatravši ovaj rad dobija se uvid u problematiku proračuna potresne otpornosti jedne tipične tradicionalne zidane zgrade. Kroz rad su detaljno opisani: nearmirano ziđe te njegove mehaničke i deformacijske karakteristike; tradicionalne drvene stropne i krovne konstrukcije zajedno s njihovim mehaničkim i deformacijskim karakteristikama; potresno djelovanje i njegov učinak na konstrukciju te naravno sam proračun i pojam potresne otpornosti zidane konstrukcije. Krenuvši od same zgrade prvotno je bilo bitno definirati sve potrebne dimenzije zgrade te materijale od kojih se zgrada sastoji, a da oni odgovaraju jednom klasičnom primjeru tradicionalne zidane zgrade na području Rijeke. Što bolja korelacija stvarne tipične zgrade i definirane zgrade u ovom radu omogućuje rješavanje realne problematike potresne otpornosti zgrada na području grada Rijeke. Potres na kvarnerskom području nije rijetka pojava, a prognozirano maksimalno ubrzanje tla uslijed potresa jest značajno; što definira veliku opasnost od oštećenja ili pak rušenja zidanih konstrukcija.

Cilj ovog rada bio je definirati potresnu otpornost dvije zidane konstrukcije, koje se razlikuju samo po stropnoj konstrukciji, kako bi se moglo zaključiti u kojoj mjeri su te iste konstrukcije podložne oštećenjima uslijed potresa. Nadalje je cilj bio usporediti rezultate potresne otpornosti dvije varijacije iste zidane zgrade, te zaključiti koja je bolja, i u kojoj mjeri. Dakle, prva varijanta podrazumijeva tradicionalnu drvenu stropnu konstrukciju; dok druga podrazumijeva armirano-betonsku ploču kao stropnu konstrukciju. Potresna otpornost konstrukcije računala se pomoću talijanskog programskog paketa 3Muri, kojeg u vrijeme pisanja ovog rada označava popularnost na tržištu.

Kao što je već spomenuto u prijašnjem poglavlju, rezultati proračuna očitavaju se u trenutku sloma prvog elementa u nosivom zidu. S tim uvjetom kao mjerodavnim, potresna otpornost nijedne varijacije zidane zgrade nije se pokazala zadovoljavajućom. Radi jednostavnijeg praćenja rezultata definirana je Tablica 24. koja sadrži resultantne faktore ispunjenja svih proračunskih modela.

Tablica 24. Rezultantni faktori ispunjenja svih proračunskih modela

Model	Uvjet završetka proračuna	Faktor ispunjenja u X smjeru	Faktor ispunjenja u Y smjeru
Model A	Slom prvog elementa nosivog zida	0,211	0,868
	Globalno otkazivanje konstrukcije	1,241	0,289
Model B	Slom prvog elementa nosivog zida	0,272	0,618
	Slom prvog elementa	0,272	0,340
	Globalno otkazivanje konstrukcije	0,675	0,556

Jedini faktor ispunjenja čija je vrijednost veća od 1,0 ne može se uzeti u obzir zbog spomenutog neadekvatnog definiranja krutosti stropne konstrukcije (u X smjeru) od strane programskog paketa 3Muri. Dakle može se zaključiti kako tradicionalna stambena zidana zgrada građena u središtu grada Rijeke ne bi uspješno „preživjela“ maksimalni prognozirani potres. Usporedivši dva modela zgrade s različitim stropnim konstrukcijama vidljiv je porast faktora ispunjenja u X smjeru (izostavivši navedenih 1,241) za zgradu s AB pločom. U Y smjeru faktor ispunjenja je čak manji gledavši slom prvog elementa nosivog zida, to se događa zbog vrlo male vrijednosti maksimalnog pomaka pri slomu prvog makroelementa u Modelu A (izraz 34). No gledavši uvjet globalnog otkazivanja konstrukcije vidljivo je kako je faktor ispunjenja modela s AB pločom gotovo dvostruko veći u Y smjeru.

Zaključno na prikazane rezultate može se reći kako je potresna otpornost zgrade s AB stropnim konstrukcijama veća u usporedbi sa zgradom s drvenim stropnim konstrukcijama. Ovakav rezultat je očekivan i opravdan od strane izvora navedenih u literaturi. Unatoč tome, tradicionalna stambena zidana zgrada na području središta Rijeke nije zadovoljila uvjet potresne otpornosti već se uslijed maksimalnog prognoziranog potresa mogu očekivati teža oštećenja na takvim zgradama.

## 7. LITERATURA

- 1) Državni arhiv u Rijeci; <https://www.riarhiv.hr>; pristup 05.01.2022.
- 2) Sorić Z.; *Zidane konstrukcije*; Tiskara Zelina; Zagreb; 2016.; p. 543
- 3) Grandić D.; *prezentacije iz kolegija Betonske i zidane konstrukcije 1*; Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet Rijeka; <https://moodle.srce.hr/2019-2020/>; pristup 14.06.2021.
- 4) Đurić D.; *predavanje Zidovi od opeke*; Graditeljska, prirodoslovna i rudarska škola, Varaždin; <https://www.rudarska.hr>; pristup 17.06.2021.
- 5) Hadzima-Nyarko M. & Ademović N. & Jeleč M.; *Konstruktivska pojačanja zidanih zgrada, metode i primjeri*; Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek; Osijek, 2020.; p. 418
- 6) HRN EN 772-1:2015+A1:2016; *Metode ispitivanja zidnih elemenata -- 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće*; EN 772-1:2011+A1:2015 (CEN); p. 14
- 7) 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 (CEN); p. 117
- 8) HRN EN 998-2:2016; *Specifikacija morta za zide -- 2. dio: Mort za zide*; EN 998-2:2016 (CEN); p. 29
- 9) NTC 2018 – *Circolare 21*, 11-2-2019, Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, Roma, Italia
- 10) Arash S.; *Mechanical properties of masonry samples for theoretical modeling*; 15th International Brick and BlockMasonry Conference, Florianópolis – Brazil, 2012.
- 11) HRN EN 1052-1:2004; *Metode ispitivanja ziđa -- 1. dio: Određivanje tlačne čvrstoće*; EN 1052-1:1998 (CEN); p. 14
- 12) 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; EN 1991-1-1:2002/AC:2009 (CEN); p. 40
- 13) Sorić Z.; *Mehanička svojstva nearmiranog ziđa*; Građevinar 52; 2000.; p. 12



- 14) Grandić D.; *prezentacije iz kolegija Potresno inženjerstvo*; Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet Rijeka; <https://moodle.srce.hr/2020-2021/>; pristup 23.06.2021.
- 15) Varevac D.; *predavanje Oblikovanje konstrukcija*; Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek; <https://slidetodoc.com/oblikovanje-konstrukcija-izv-prof-dr-sc-damir-varevac-4/> pristup 22.10.2021.
- 16) HRN EN 1052-3:2004; *Metode ispitivanja ziđa -- 3. dio: Određivanje početne posmične čvrstoće*; EN 1052-3:2002 (CEN); p. 15
- 17) Trogrlić B.; *prezentacije iz kolegija Zidane konstrukcije*; Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; <http://gradst.unist.hr> pristup 22.10.2021
- 18) HRN EN 1052-2:2016; *Metode ispitivanja ziđa -- 2. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju*; EN 1052-2:2016 (CEN); p. 12
- 19) HRN EN 1052-2:2016/Ispr.1:2017; *Metode ispitivanja ziđa -- 2. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju*; EN 1052-2:2016/AC:2017 (CEN); p. 3
- 20) Peulić Đ.; *Konstruktivni elementi zgrada, II dio*; Tehnička knjiga Zagreb; Zagreb, 1980.; p. 498
- 21) Bjelanović A.; *prezentacije iz kolegija Drvene konstrukcije*; Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet Rijeka; <https://moodle.srce.hr/2019-2020/>; pristup 04.06.2021.
- 22) Duboković M.; *Analiza ponašanja konstrukcije od drva metodom konačnih elemenata*; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.; p. 86
- 23) Zulbeari G.; *Ispitivanje izotropnih i anizotropnih materijala*; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Zagreb
- 24) Rajčić V.; *prezentacije iz kolegija Drvene konstrukcije*; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Zagreb; <https://www.grad.unizg.hr>; pristup 10.06.2021.
- 25) HRN EN 338:2016; *Konstruktivsko drvo -- Razredi čvrstoće*; EN 338:2016 (CEN); p. 12
- 26) Bjelanović A.; *predavanje Tradicijski drveni stropni sustavi i ojačanja – doprinos potresnoj otpornosti postojećih zidanih zgrada*; Savjetovanje 6: Obnova Zagreba nakon potresa - Zagrebu od Rijeke; <https://www.hcpi.hr>; pristup 03.07.2021

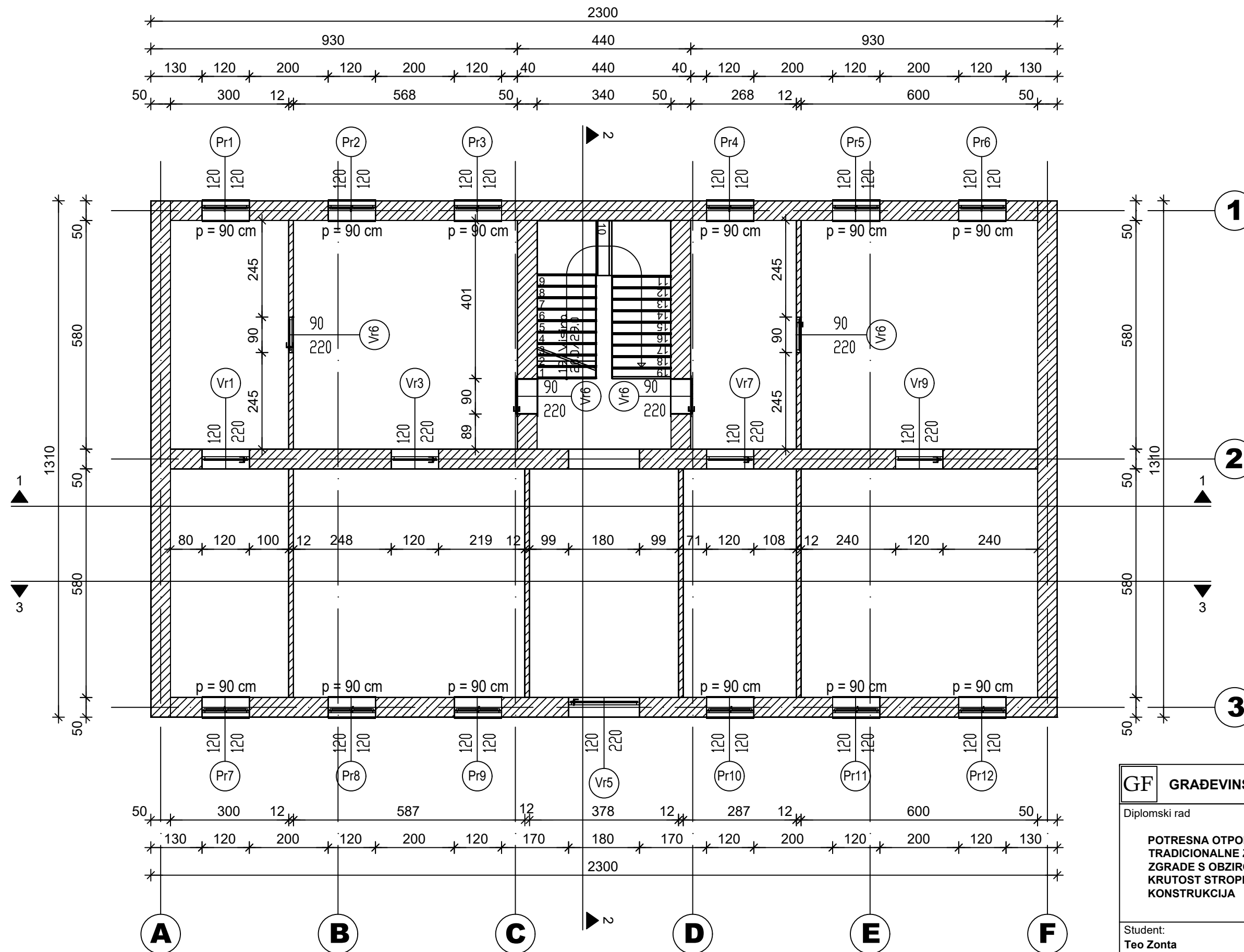
- 27) Mirra M. & Ravenshorst G. & van de Kuilen J. W.; *Experimental and analytical evaluation of the in-plane behaviour of as-built and strengthened traditional wooden floors*; Delft University of Technology; 2020.
- 28) Incorporated Research Institutions for Seismology; <https://www.iris.edu/hq/>; pristup 23.06.2021.
- 29) Aničić D.; *Andrija Mohorovičić – osnivač hrvatskog potresnog inženjerstva*; Građevinar 49; 1997.; p. 9
- 30) Sciury S.; *Earthquakes and Waves (Online)*, <https://suesciury.wixsite.com/tvscience8/copy-of-plate-tectonics>; pristup 25.06.2021.
- 31) Chandradhara G. P.; *Earthquake effects on structures*; S. J. College of Engineering Mysuru; Mysuru, Indija, 2018.
- 32) HRN EN 1998-1:2011; *Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade*; EN 1998-1:2004; EN 1998-1:2004/AC:2009 (CEN); p. 197
- 33) Kraus I. & Morić D. & Džakić D.; *Seizmički proračun armiranobetonskog okvira prema EN 1998-1*; Građevinar 63; 2011.; p. 11
- 34) Taranath B. S.; *Tall Building Design - Steel, Concrete, and Composite Systems*; CRC Press, Taylor & Francis Group; SAD, 2016.; p. 898
- 35) Carić M. & Kišiček T.; *Pojačanja nearmiranog ziđa na posmik tkaninom armiranim mortovima*; Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Zagreb; 2017.; p. 11
- 36) Mollaioli F. & co.; *Masonry Building Performance in the 2002 Molise Earthquake*; Earthquake Spectra, Volume 20, No. S1, 2004.; p. S191-S220
- 37) HRN EN 1990:2011; *Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija*; EN 1990:2002, EN 1990:2002/A1:2005, EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 (CEN); p. 104
- 38) HRN EN 1998-3:2008; *Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada*; EN 1998-3:2005+AC:2010 (CEN); p. 81
- 39) 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*; HRN EN 1998-1:2011; p. 23

40) 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*; HRN EN 1996-1-1:2005; p. 11

## **8. POPIS NACRTA**

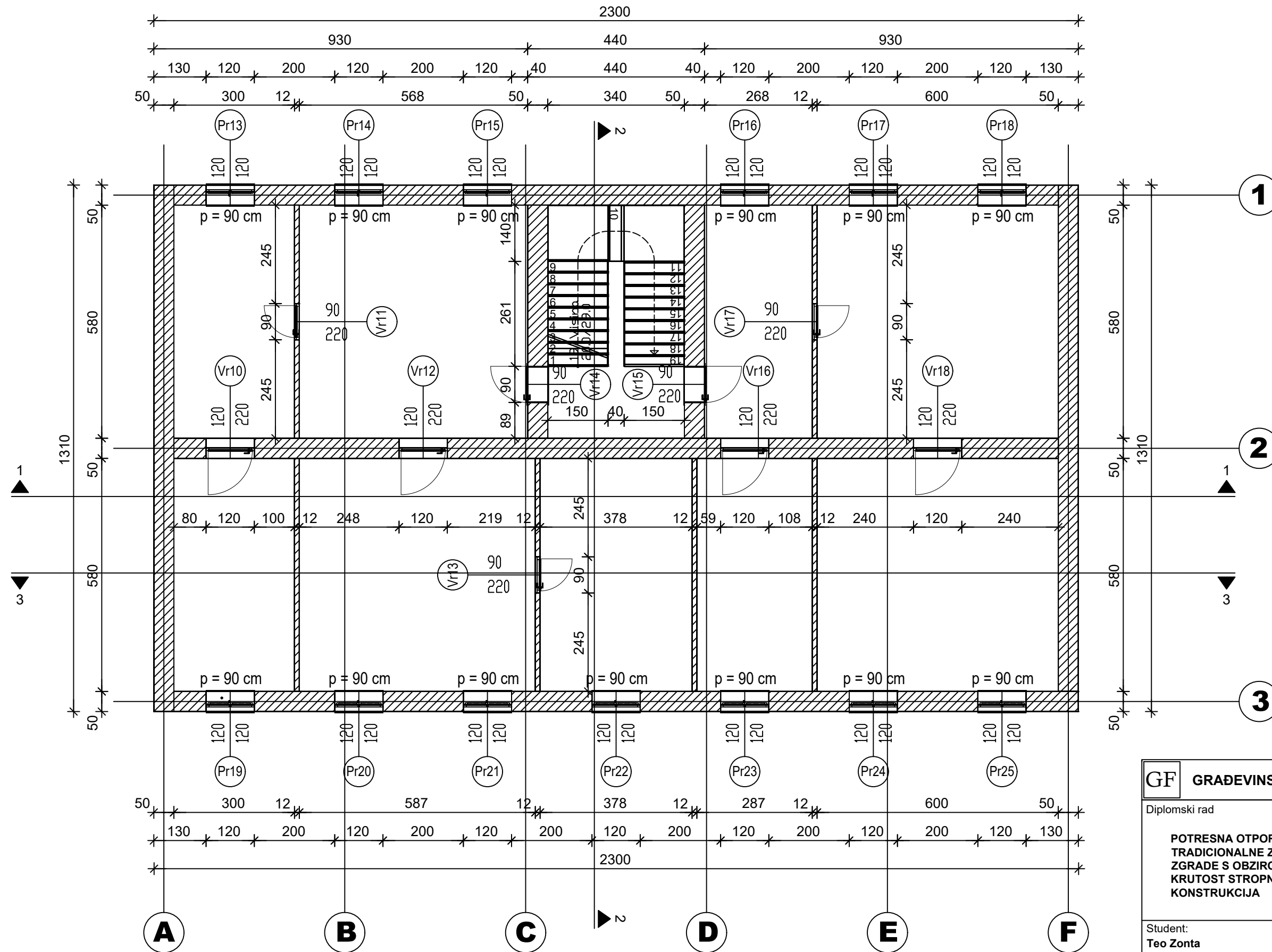
- 1) Tlocrt prizemlja; MJ 1:100
- 2) Tlocrt 1. kata; MJ 1:100
- 3) Tlocrt 2. kata; MJ 1:100
- 4) Presjek 2-2, Poprečni presjek konstrukcije & Poprečni presjek stropne konstrukcije; MJ 1:100 & MJ 1:20
- 5) Presjek 1-1, Uzdužni presjek konstrukcije; MJ 1:100
- 6) Presjek 3-3, Uzdužni presjek konstrukcije; MJ 1:100

# TLOCRT PRIZEMLJA ; MJ 1:100



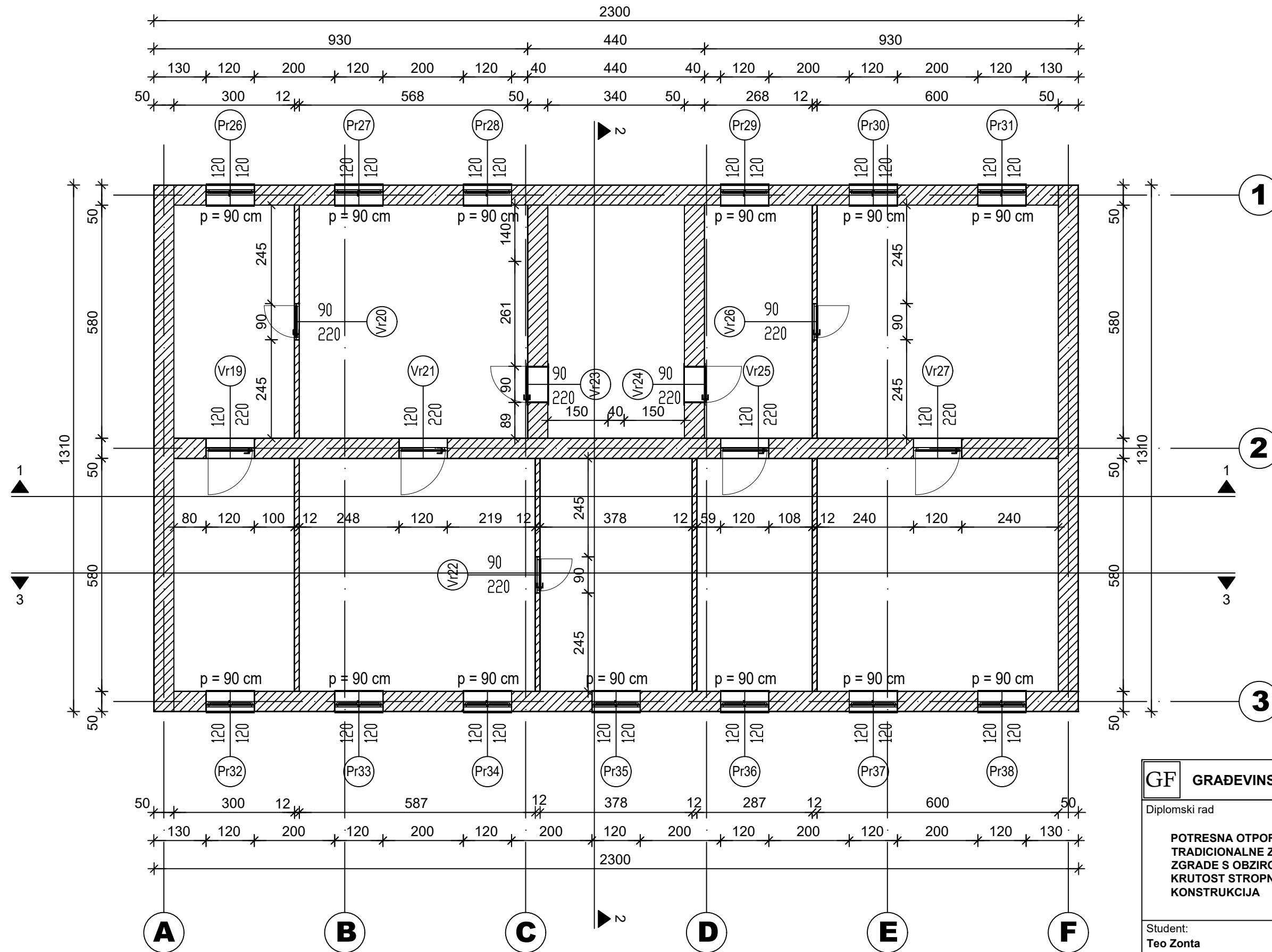
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>TLOCRT PRIZEMLJA</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100	List: 1

# TLOCRT 1. KATA ; MJ 1:100



<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>TLOCRT 1. KATA</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100
			List: 2

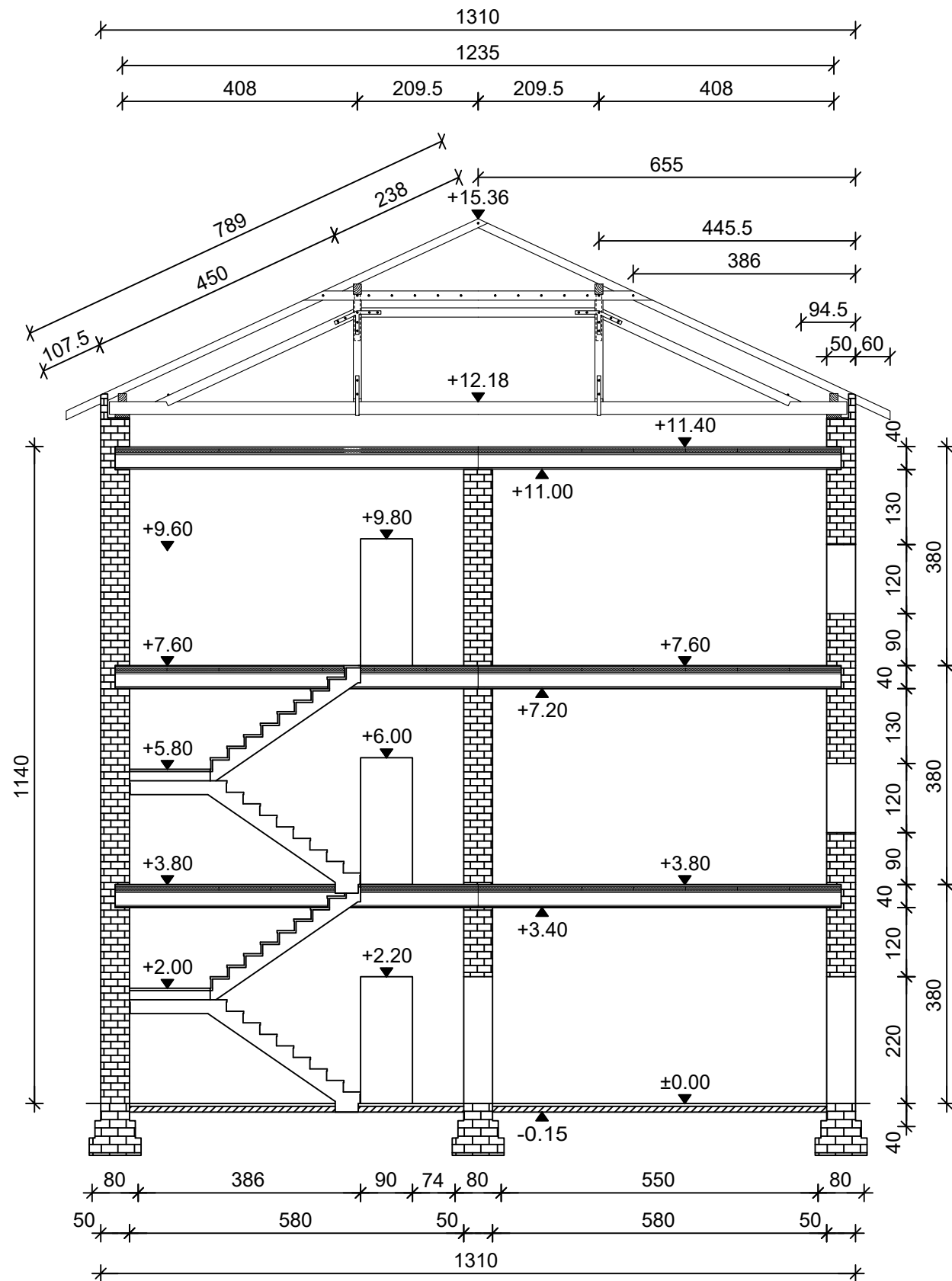
# TLOCRT 2. KATA ; MJ 1:100



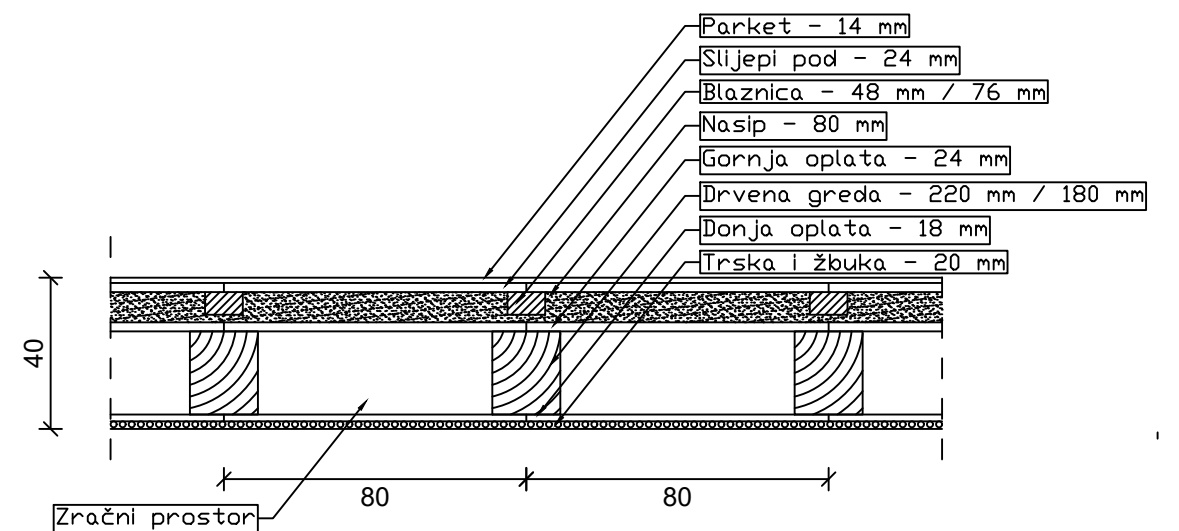
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OZBIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>TLOCRT 2. KATA</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100	List: 3

# POPREČNI PRESJEK KONSTRUKCIJE MJ 1:100

2 - 2



## POPREČNI PRESJEK STROPNE KONSTRUKCIJE MJ 1:20



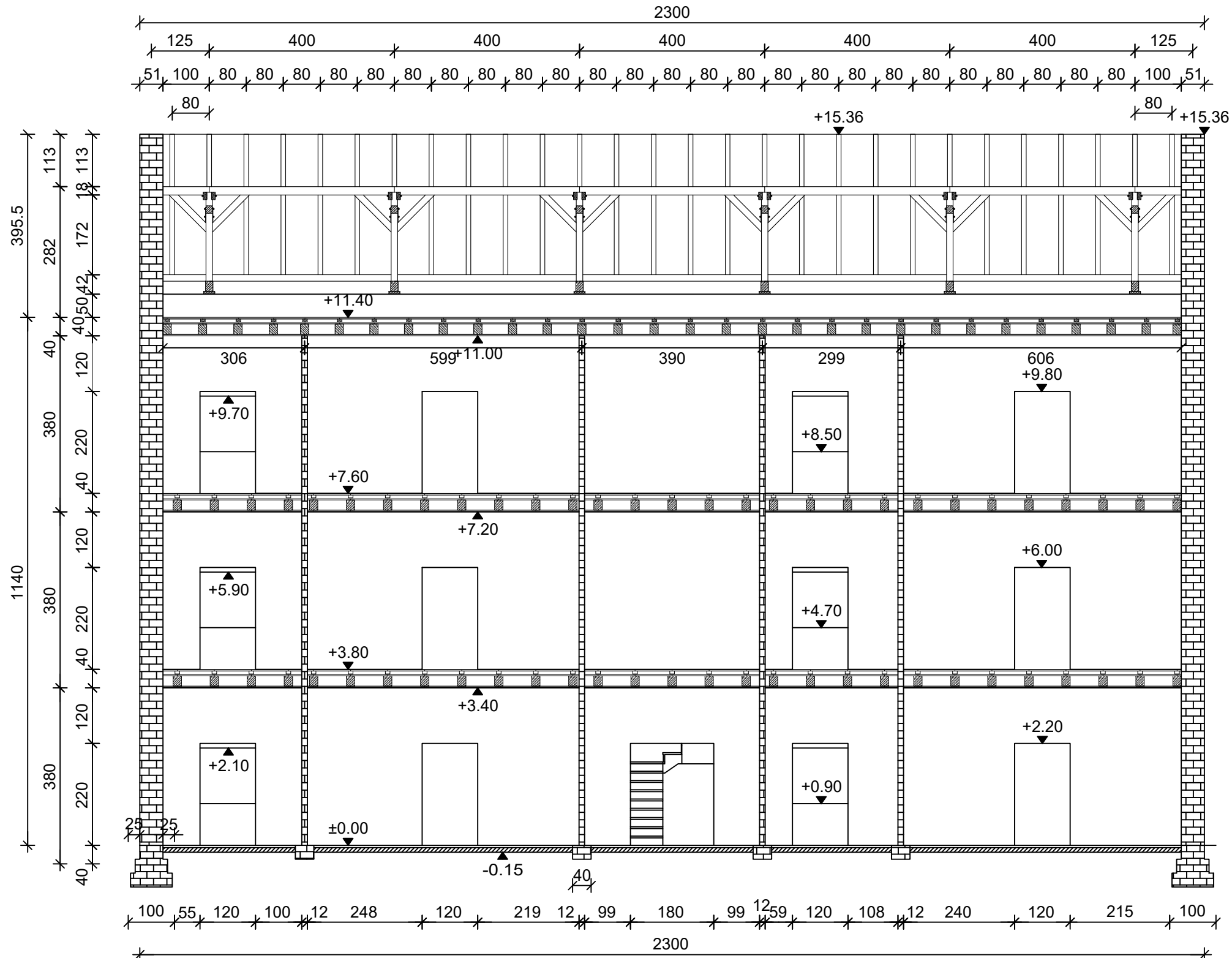
<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacрта:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>POPREČNI PRESJEK KONSTRUKCIJE; STROPNE KONSTRUKCIJE</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>		Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100 ; 1:20
		List: 4	



# UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE

## MJ 1:100

1 - 1

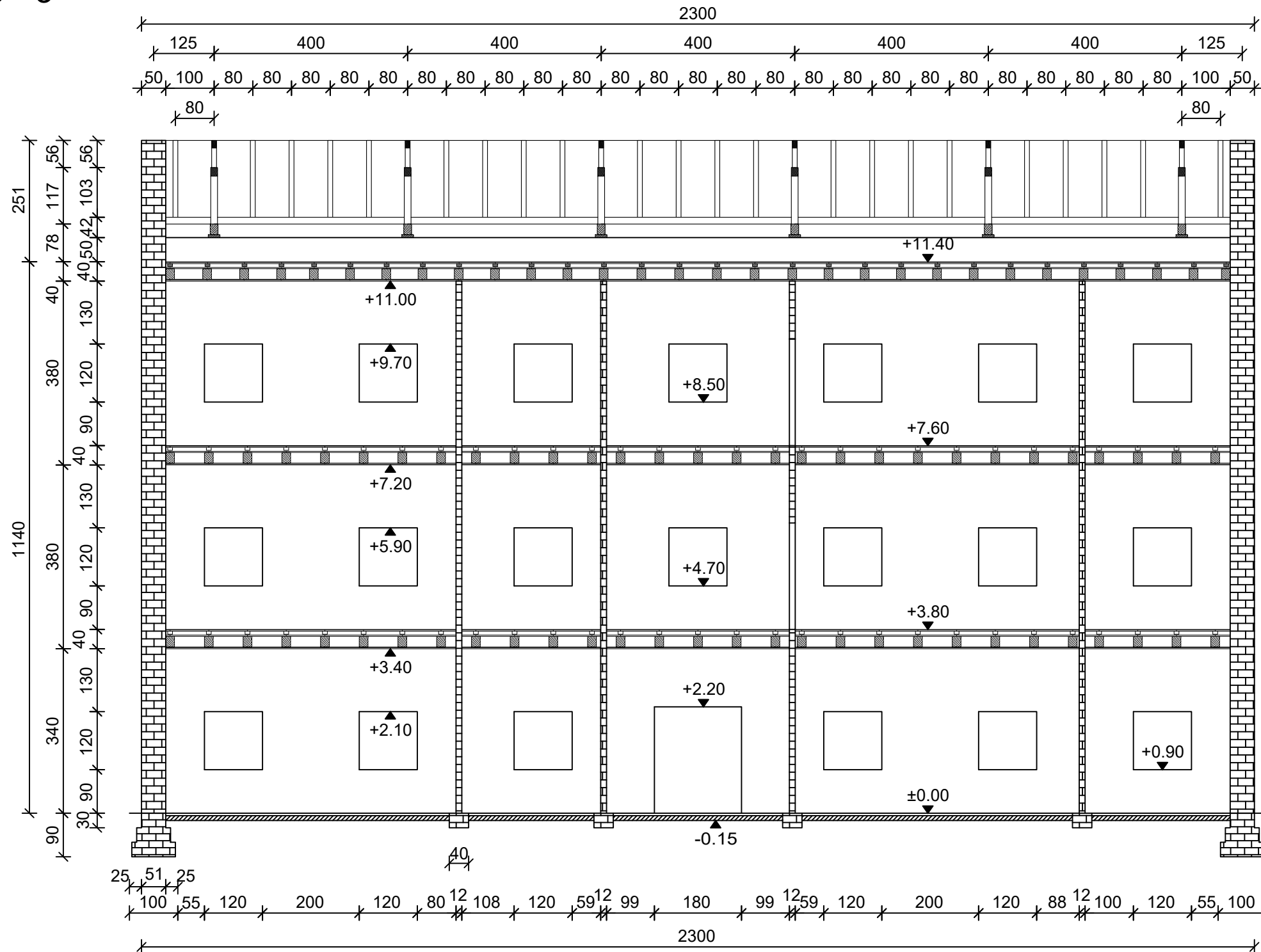


<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacrt:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100	List: 5

# UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE

## MJ 1:100

3 - 3



<b>GF GRAĐEVINSKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI</b>			
Diplomski rad		Sadržaj nacrt:	
<b>POTRESNA OTPORNOST TRADICIONALNE ZIDANE ZGRADE S OBZIROM NA KRUTOST STROPNIH KONSTRUKCIJA</b>		<b>UZDUŽNI PRESJEK KONSTRUKCIJE</b>	
Student: <b>Teo Zonta</b>		Kolegij: <b>POTRESNO INŽENJERSTVO</b>	
Mentor/Komentor: prof. dr. sc. <b>Davor Grandić</b> doc. dr. sc. <b>Paulo Ščulac</b>	Datum: 12.02.2022	Mjerilo: 1:100	List: 6