

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

AMIR KARADŽIĆ

**VPLIV MODELNIH NEGOTOVOSTI NA POTISNO
ANALIZO OKVIRNE ARMIRANOBETONSKE
STAVBE**

Magistrsko delo št.:

**THE EFFECTS OF MODELLING
UNCERTAINTIES ON THE PUSHOVER
ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE
FRAME BUILDING**

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

prof. dr. Matjaž Dolšek

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

doc. dr. Anže Babič

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.41:624.012.45:624.04(043.3)
Avtor:	Amir Karadžić, dipl. inž. grad. (VS)
Mentor:	prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	doc. dr. Anže Babič, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Vpliv modelnih negotovosti na potisno analizo okvirne armiranobetonske stavbe
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	98 str., 25 pregl., 78 sl., 25 graf.
Ključne besede:	nelinearna statična analiza, metoda N2, potisna analiza, 3Muri, SAP2000, armiranobetonska okvirna stavba, modelne negotovosti, stavba SPEAR

Izvleček:

V magistrskem delu analiziramo vpliv modelih negotovosti na potisno analizo trinadstropne armiranobetonske okvirne konstrukcije, testirane v naravnem merilu v okviru evropskega raziskovalnega projekta SPEAR. Stavba predstavlja tip starejših konstrukcij v Grčiji in drugod po Sredozemlju, brez načrtovane potresne odpornosti, saj je bila projektirana samo na gravitacijske obremenitve. V kontekstu magistrskega dela izraz modelne negotovosti zajema različne pristope pri modeliranju okvirnih armiranobetonskih stavb in uporabo različne programske opreme. V ta namen sta bila uporabljena dva programa, ki omogočata izvedbo potisne analize, SAP2000 in 3Muri. Stavbo SPEAR smo modelirali na tri različne načine pri čemer smo stopnjevali natančnost modeliranja. Modele smo uporabili v analizi lastnega nihanja in potisni analizi. Rezultate potisne analize smo uporabili v okviru metode N2 s ciljem določitve pospeška pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve skladno s trenutno veljavnim Evrokodom 8, kot tudi novo delovno verzijo istega standarda. Na podlagi rezultatov sklepamo, da je program 3Muri primeren za analizo torzijsko togih armiranobetonskih konstrukcij, sestavljenih iz regularnih okvirjev. Težave nastopijo v primeru torzijsko podajnih in neregularnih okvirnih konstrukcij zaradi uporabe metode ekvivalentnih okvirjev. Ustvarjeni ekvivalentni okvirji pri neregularnih armiranobetonskih okvirnih konstrukcijah, kjer nosilci niso podprti na obeh koncih s stebri, lahko povzročijo napačno porazdelitev potresnih sil, kar lahko vodi do pristranske ocene potresne odpornosti.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	004.41:624.012.45:624.04(043.3)
Author:	Amir Karadžić, dipl. inž. grad. (VS)
Supervisor:	Prof. Matjaž Dolšek, Ph. D.
Co-supervisor:	Assist. Prof. Anže Babič, Ph. D.
Title:	The effects of modelling uncertainties on the pushover analysis of a reinforced concrete frame building
Document type:	Master Thesis
Notes:	98 p., 25 tab., 78 fig., 25 graph.
Keywords:	non-linear static analysis, N2 method, pushover analysis, 3Muri, SAP2000, reinforced concrete frame building, modelling uncertainties, SPEAR building

Abstract:

In the master's thesis, we analyze the influence of modelling uncertainties on the pushover analysis using the example of a three-storey reinforced concrete frame building, tested in full scale within the European research project SPEAR. The building represents a type of older construction in Greece and the wider Mediterranean region. It was designed solely for gravity loads, while the design for seismic resistance was not accounted for. In the context of the master's thesis, the term "modelling uncertainties" primarily encompasses various approaches to modelling frame structures and the use of different software. For this purpose, two programs capable of conducting pushover analyses, SAP2000 and 3Muri, were utilised. However, the SPEAR building was modelled in three different ways, gradually increasing the modelling accuracy. The models were employed in free vibration and pushover analysis. The pushover analysis results were applied within the N2 method to determine the limit-state acceleration causing near collapse limit state, in accordance with the currently valid Eurocode 8 and a draft of the new version of the standard. Based on the results, we conclude that 3Muri may be suitable for the analysis of torsionally rigid reinforced concrete structures consisting of regular frames. Problems arise in the case of torsionally flexible structures and structures with irregular frames due to the use of the equivalent frames method. The generated equivalent frames in structures with irregular frames, where the beams are not supported at both ends by columns, can cause incorrect distribution of seismic forces, which can lead to a biased assessment of seismic resistance.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Za mentorstvo, strokovno vodenje in namenjene ure pri nastajanju magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Matjažu Dolšku in somentorju doc. dr. Anžetu Babiču.

Zahvaljujem se tudi vsem drugim profesorjem, ki so prispevali k mojemu študijskemu razvoju z deljenjem svojega znanja.

Prav tako se zahvaljujem računalniškemu centru fakultete za stalno pomoč in hitro odzivnost pri reševanju licenčnih problemov.

Posebna zahvala gre tudi prijateljem in vsem bivšim in sedanjim študijskim kolegom za pomoč in podporo v času celotnega študija. Skupaj smo premagovali izzive in soustvarjali nepozabne trenutke, ki mi bodo za vedno ostali v spominu.

Nenazadnje želim nameniti najglobljo zahvalo svoji družini in puncu, ki sta vsa leta verjeli vame. Hvala vam, ker ste mi vedno stali ob strani, nudili toplino domačega okolja ter delili veselje ob vsakem dosežku. Ni besed, ki bi lahko izrazile, kako cenim vse, kar ste storili zame.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
2 OCENA POSPEŠKA TAL PRI NASTOPU MEJNEGA STANJA BLIZU PORUŠITVE SKLADNO S STANDARDOM EVROKOD 8	3
2.1 Ocena po trenutno veljavni verziji Evrokoda 8	3
2.2 Novosti v delovni verziji novega Evrokoda 8	6
3 KRATKA PREDSTAVITEV PROGRAMOV SAP2000 IN 3MURI	8
3.1 Programsko orodje SAP2000.....	8
3.1.1 Modeliranje linearne konstrukcije	8
3.1.2 Razširitev na nelinearni model	9
3.1.2.1 Definiranje plastičnih členkov	10
3.1.3 Algoritem pri potisni analizi	14
3.1.4 Algoritem pri izračunu mejnih pospeškov	17
3.2 Programsko orodje 3Muri.....	17
3.2.1 Modeliranje linearne konstrukcije	17
3.2.2 Razširitev na nelinearni model	20
3.2.3 Algoritem pri potisni analizi	20
3.2.4 Algoritem pri izračunu mejnih pospeškov	24
4 OPIS OBRAVNAVANE KONSTRUKCIJE IN MODELOV ZA LINEARNO ELASTIČNO ANALIZO.....	24
4.1 Opis stavbe SPEAR.....	24
4.2 Linearni elastični modeli v programu SAP2000	27
4.2.1 Model A	29
4.2.2 Model B	31
4.2.3 Model C	33
4.3 Linearni elastični model v programu 3Muri.....	38
4.3.1 Model A	40
4.3.2 Model B	42

4.4	Rezultati analize lastnega nihanja.....	42
5	PREDSTAVITEV NELINEARNIH MODELOV IN OCENA MEJNIH POSPEŠKOV.....	49
5.1	Nelinearni modeli v programu SAP2000	50
5.1.1	Model A	51
5.1.2	Model B	52
5.1.3	Model C	54
5.2	Nelinearni modeli v programu 3Muri	55
5.2.1	Model A	58
5.2.2	Model B	58
5.3	Rezultati potisne analize in ekvivalentni sistemi SDOF	58
5.3.1	Model A	59
5.3.1.1	Enakomerna razporeditev vodoravnih sil	59
5.3.1.2	Modalna razporeditev vodoravnih sil	63
5.3.2	Model B	68
5.3.2.1	Enakomerna razporeditev vodoravnih sil	68
5.3.2.2	Modalna razporeditev vodoravnih sil	73
5.3.3	Model C	79
5.3.3.1	Enakomerna razporeditev vodoravnih sil	79
5.3.3.2	Modalna razporeditev vodoravnih sil	84
5.4	Izračun mejnih pospeškov.....	90
6	ZAKLJUČEK.....	94
VIRI		97

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Efektivne širine pasnice nosilcev.	36
Preglednica 2: Rezultati modalne analize modela A.	44
Preglednica 3: Rezultati modalne analize modela B.	46
Preglednica 4: Rezultati modalne analize modela C.	47
Preglednica 5: Primerjava nihajnih časov modela C v programu SAP2000 (ta analiza) in nihajnih časov iz analize Negra in sod. [25].	48
Preglednica 6: Vzdolžna armatura nosilcev [1].	49
Preglednica 7: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela A.	52
Preglednica 8: Osne sile v stebrih modela A iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$	52
Preglednica 9: Efektivne širine pasnice nosilcev in pripadajoča armatura iz plošče.	53
Preglednica 10: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela B.	54
Preglednica 11: Osne sile v stebrih modela B iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$	54
Preglednica 12: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela C.	55
Preglednica 13: Osne sile v stebrih modela C iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$	55
Preglednica 14: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model A v programu SAP2000.	59
Preglednica 15: Primerjava rezultatov potisne analize modela A, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	63
Preglednica 16: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model A v programu SAP2000.	64
Preglednica 17: Primerjava rezultatov potisne analize modela A, modalna razporeditev vodoravnih sil.	68
Preglednica 18: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model B v programu SAP2000.	69
Preglednica 19: Primerjava rezultatov potisne analize modela B, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	73
Preglednica 20: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model B v programu SAP2000.	74
Preglednica 21: Primerjava rezultatov potisne analize modela B, modalna razporeditev vodoravnih sil.	79
Preglednica 22: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model C v programu SAP2000.	80
Preglednica 23: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model C v programu SAP2000.	84
Preglednica 24: Primerjava rezultatov potisne analize modela C, obe razporeditvi vodoravnih sil.	88
Preglednica 25: Maksimalni pospeški tal a_g [g], ki v konstrukciji povzročijo nastop mejnega stanja blizu porušitve.	91

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Potisne krivulje za model A, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	60
Grafikon 2: Potisne krivulje za model A, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	60
Grafikon 3: Potisne krivulje za model A, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	61
Grafikon 4: Potisne krivulje za model A, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	61
Grafikon 5: Potisne krivulje za model A, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	64
Grafikon 6: Potisne krivulje za model A, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	65
Grafikon 7: Potisne krivulje za model A, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	65
Grafikon 8: Potisne krivulje za model A, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	66
Grafikon 9: Potisne krivulje za model B, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	69
Grafikon 10: Potisne krivulje za model B, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	70
Grafikon 11: Potisne krivulje za model B, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	70
Grafikon 12: Potisne krivulje za model B, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	71
Grafikon 13: Potisne krivulje za model B, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	74
Grafikon 14: Potisne krivulje za model B, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	75
Grafikon 15: Potisne krivulje za model B, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	75
Grafikon 16: Potisne krivulje za model B, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	76
Grafikon 17: Potisne krivulje za model C, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	80
Grafikon 18: Potisne krivulje za model C, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	81
Grafikon 19: Potisne krivulje za model C, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	81
Grafikon 20: Potisne krivulje za model C, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	82
Grafikon 21: Potisne krivulje za model C, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	84
Grafikon 22: Potisne krivulje za model C, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	85
Grafikon 23: Potisne krivulje za model C, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	85
Grafikon 24: Potisne krivulje za model C, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	86
Grafikon 25: Vse potisne krivulje za model C.	89

KAZALO SLIK

Slika 1: Določitev idealizirane krivulje po Evrokodu 8.	5
Slika 2: Določitev bilinearne idealizacije razmerja sila-pomik v primeru (a) nepadajoče in (b) padajoče krivulje kapacitete [7].	7
Slika 3: Prostorski linijski končni element [11].	8
Slika 4: Poenostavljena zveza $M-\Theta$ v plastičnih členkih [13].	9
Slika 5: Definicija plastičnega členka za nosilec v programu SAP2000.	12
Slika 6: Potek razvoja rotacije v plastičnem členku v programu SAP2000.	13
Slika 7: Modificiran odnos $M-\Theta$	13
Slika 8: Obtežni primer modalne razporeditve vodoravnih sil.	14
Slika 9: Definicija potisne analize v programu SAP2000.	15
Slika 10: Definicija parametrov v oknu <i>Load Application</i>	16
Slika 11: Potisna krivulja v programu SAP2000.	16
Slika 12: Primer razvoja poškodb v plastičnih členkih.	17
Slika 13: Armiranobetonski elementi v programu 3Muri [4].	20
Slika 14: Definicija potresne obtežbe v programu 3Muri.	22
Slika 15: Definicija potisnih analiz v programu 3Muri.	22
Slika 16: Potisna krivulja in razvoj poškodb v programu 3Muri.	23
Slika 17: Idealizacija potisne krivulje v programu 3Muri [4].	24
Slika 18: 3D pogled na stavbo SPEAR [5].	25
Slika 19: Prerez in tloris etaž stavbe SPEAR [23].	26
Slika 20: Tipična armatura nosilcev in stebrov [23].	26
Slika 21: Materialne karakteristike uporabljenega betona v programu SAP2000.	28
Slika 22: Zmanjšana strižna in upogibna nosilnost prerezov.	28
Slika 23: Tloris konstrukcije za model A.	29
Slika 24: Prerez nosilcev za model A v programu SAP2000.	30
Slika 25: Prerez stebrov za model A v programu SAP2000.	30
Slika 26: Matematični model A v programu SAP2000.	31
Slika 27: Tloris konstrukcije za model B.	32
Slika 28: Prerez stebra C2 za model B v programu SAP2000.	32
Slika 29: Matematični model B v programu SAP2000.	33
Slika 30: Tloris konstrukcije za model C.	34
Slika 31: Sodelujoča širina pasnice b_{eff} nosilcev, ki so priključeni na stebre [6].	35
Slika 32: Modeliranje T-prereza v programu SAP2000.	36
Slika 33: Modeliranje elementa s spreminjajočim se prerezom.	37
Slika 34: Modeliranje detajla pri stebru C2 dimenzij 25x75 cm.	37
Slika 35: Matematični model C v programu SAP2000.	38
Slika 36: Definiranje armiranobetonske plošče v programu 3Muri.	39
Slika 37: Risanje toge plošče v programu 3Muri [12].	39
Slika 38: Materialne karakteristike uporabljenega betona v programu 3Muri.	40
Slika 39: Definirane etažne višine v programu 3Muri.	40
Slika 40: Prerez nosilcev za model A v programu 3Muri.	41
Slika 41: Prerez stebrov za model A v programu 3Muri.	41
Slika 42: Matematični model A v programu 3Muri.	41
Slika 43: Prerez stebra C2 za model B v programu 3Muri.	42
Slika 44: Matematični model B v programu 3Muri.	42
Slika 45: Prve štiri nihanje oblike modela A v programu SAP2000.	43

Slika 46: Prve štiri nihajne oblike modela A v programu 3Muri.	44
Slika 47: Prve štiri nihajne oblike modela B v programu SAP2000.	45
Slika 48: Prve štiri nihajne oblike modela B v programu 3Muri.	45
Slika 49: Prve štiri nihajne oblike modela C v programu SAP2000.	47
Slika 50: Uporabljeni materiali pri analizi prereza v programu SAP2000.	50
Slika 51: Primer določitve maksimalnega momenta tlačno obremenjenega stebra.....	51
Slika 52: Primer podajanja prereza in armature za stebre modela A v programu 3Muri.....	56
Slika 53: Primer podajanja prereza in armature za nosilec modela A v programu 3Muri.	57
Slika 54: Navodila za podajanje vzdolžne armature v nosilcih in stebrih v programu 3Muri [4].	57
Slika 55: Stanje blizu porušitve, model A, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	62
Slika 56: Stanje blizu porušitve, model A, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	62
Slika 57: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	62
Slika 58: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	63
Slika 59: Stanje blizu porušitve, model A, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	66
Slika 60: Stanje blizu porušitve, model A, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	67
Slika 61: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	67
Slika 62: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	67
Slika 63: Stanje blizu porušitve, model B, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	71
Slika 64: Stanje blizu porušitve, model B, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	72
Slika 65: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	72
Slika 66: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	72
Slika 67: Stanje blizu porušitve, model B, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	77
Slika 68: Stanje blizu porušitve, model B, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	77
Slika 69: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	77
Slika 70: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	78
Slika 71: Stanje blizu porušitve, model C, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.	82
Slika 72: Stanje blizu porušitve, model C, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil	83
Slika 73: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil	83
Slika 74: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil	83
Slika 75: Stanje blizu porušitve, model C, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	86
Slika 76: Stanje blizu porušitve, model C, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	87
Slika 77: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.	87
Slika 78: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.	87

LIST OF TABLES

Table 1: Effective beam flange width.....	36
Table 2: Model A modal analysis results.	44
Table 3: Model B modal analysis results.....	46
Table 4: Model C modal analysis results.....	47
Table 5: Comparison of vibration periods for model C in SAP2000 (this analysis) and vibration periods from the analysis of Negro et al. [25].	48
Table 6: Longitudinal reinforcement of the beams [1].....	49
Table 7: Compressive and tensile reinforcement in model A beams.	52
Table 8: Axial forces in the model A columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$	52
Table 9: Effective beam flange width and the corresponding slab reinforcement.....	53
Table 10: Compressive and tensile reinforcement in model B beams.	54
Table 11: Axial forces in the model B columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$	54
Table 12: Compressive and tensile reinforcement in model C beams.	55
Table 13: Axial forces in the model C columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$	55
Table 14: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model A in SAP2000.	59
Table 15: Comparison of pushover analysis results of model A, uniform horizontal force distribution.	63
Table 16: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model A in SAP2000.....	64
Table 17: Comparison of pushover analysis results of model A, modal horizontal force distribution.	68
Table 18: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model B in SAP2000.....	69
Table 19: Comparison of pushover analysis results of model B, uniform horizontal force distribution.	73
Table 20: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model B in SAP2000.....	74
Table 21: Comparison of pushover analysis results of model B, modal horizontal force distribution.	79
Table 22: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model C in SAP2000.....	80
Table 23: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model C in SAP2000.....	84
Table 24: Comparison of pushover analysis results of model C, both horizontal force distributions.....	88
Table 25: Peak ground acceleration a_g [g], which causes the occurrence of the limit state near collapse in the structure.	91

LIST OF GRAPHS

Graph 1: Model A pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	60
Graph 2: Model A pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.	60
Graph 3: Model A pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	61
Graph 4: Model A pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	61
Graph 5: Model A pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.....	64
Graph 6: Model A pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.	65
Graph 7: Model A pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.....	65
Graph 8: Model A pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.	66
Graph 9: Model B pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	69
Graph 10: Model B pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.	70
Graph 11: Model B pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	70
Graph 12: Model B pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	71
Graph 13: Model B pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.....	74
Graph 14: Model B pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.....	75
Graph 15: Model B pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.....	75
Graph 16: Model B pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.....	76
Graph 17: Model C pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	80
Graph 18: Model C pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.	81
Graph 19: Model C pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	81
Graph 20: Model C pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	82
Graph 21: Model C pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.	84
Graph 22: Model C pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.	85
Graph 23: Model C pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.	85
Graph 24: Model C pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.	86
Graph 25: All model C pushover curves.....	89

LIST OF FIGURES

Figure 1: Idealization of the pushover curve according to Eurocode 8.....	5
Figure 2: Determination of the bilinear idealization of the force-deformation relationship in the case of (a) non-decreasing and (b) decreasing capacity curve [7].....	7
Figure 3: 3D linear finite element [11].....	8
Figure 4: Simplified $M-\theta$ relationship in plastic hinges [13].	9
Figure 5: Definition of a plastic hinge for a beam in SAP2000.	12
Figure 6: Rotation development in a plastic hinge in SAP2000.	13
Figure 7: Modified $M-\theta$ relationship.	13
Figure 8: Load case of modal distributed horizontal forces.....	14
Figure 9: Definition of a pushover analysis in SAP2000.	15
Figure 10: Definition of parameters in the <i>Load Application</i> window.....	16
Figure 11: Pushover curve in SAP2000.	16
Figure 12: Example of damage development in plastic hinges.....	17
Figure 13: Reinforced concrete elements in 3Muri [4].	20
Figure 14: Definition of seismic loads in 3Muri.	22
Figure 15: Definition of pushover analyses in 3Muri.	22
Figure 16: Pushover curve and damage development in 3Muri.....	23
Figure 17: Idealization of the pushover curve in 3Muri [4].	24
Figure 18: 3D view of the SPEAR building [5].	25
Figure 19: Section and floor plan of the SPEAR building [23].....	26
Figure 20: Typical reinforcement of beams and columns [23].	26
Figure 21: Material characteristics of the used concrete in SAP2000.....	28
Figure 22: Reduced shear and bending stiffness of sections.	28
Figure 23: Floor plan of the model A.	29
Figure 24: Beam cross section of the model A in SAP2000.	30
Figure 25: Column cross section of the model A in SAP2000.	30
Figure 26: Mathematical model A in SAP2000.	31
Figure 27: Floor plan of the model B.	32
Figure 28: Column C2 cross section of the model B in SAP2000.....	32
Figure 29: Mathematical model B in SAP2000.	33
Figure 30: Floor plan of the model C.	34
Figure 31: Effective flange width b_{eff} for beams framing into columns [6].....	35
Figure 32: T-section modeling in SAP2000.	36
Figure 33: Modeling of elements with changing cross sections.	37
Figure 34: Detail modelling of the column C2 25x75 cm.....	37
Figure 35: Mathematical model C in SAP2000.....	38
Figure 36: Definition of a reinforced concrete slab in 3Muri.	39
Figure 37: Drawing of rigid slabs in 3Muri.	39
Figure 38: Material characteristics of the used concrete in 3Muri.	40
Figure 39: Defined floor heights in 3Muri.....	40
Figure 40: Beam cross section for the model A in 3Muri.	41
Figure 41: Column cross section for the model A in 3Muri.	41
Figure 42: Mathematical model A in 3Muri.	41
Figure 43: Column C2 cross section for the model B in 3Muri.	42
Figure 44: Mathematical model B in 3Muri.	42
Figure 45: First four modal shapes of model A in SAP2000.	43

Figure 46: First four modal shapes of model A in 3Muri.	44
Figure 47: First four modal shapes of model B in SAP2000.	45
Figure 48: First four modal shapes of model B in 3Muri.	45
Figure 49: First four modal shapes of model C in SAP2000.	47
Figure 50: Materials used for the cross-section analysis in SAP2000.....	50
Figure 51: Example of determining the maximum moment for a column in compression.....	51
Figure 52: Example of defining the cross section and reinforcement for model A columns in 3Muri.....	56
Figure 53: Example of defining the cross section and reinforcement for a model A beam in 3Muri.....	57
Figure 54: Instructions for defining longitudinal reinforcement for beams and columns in 3Muri [4].	57
Figure 55: Near collapse limit state, model A, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	62
Figure 56: Near collapse limit state, model A, X- direction, uniform horizontal force distribution.	62
Figure 57: Near collapse limit state, model A, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	62
Figure 58: Near collapse limit state, model A, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	63
Figure 59: Near collapse limit state, model A, X+ direction, modal horizontal force distribution.	66
Figure 60: Near collapse limit state, model A, X- direction, modal horizontal force distribution.	67
Figure 61: Near collapse limit state, model A, Y+ direction, modal horizontal force distribution.	67
Figure 62: Near collapse limit state, model A, Y- direction, modal horizontal force distribution.	67
Figure 63: Near collapse limit state, model B, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	71
Figure 64: Near collapse limit state, model B, X- direction, uniform horizontal force distribution.	72
Figure 65: Near collapse limit state, model B, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	72
Figure 66: Near collapse limit state, model B, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	72
Figure 67: Near collapse limit state, model B, X+ direction, modal horizontal force distribution.	77
Figure 68: Near collapse limit state, model B, X- direction, modal horizontal force distribution.	77
Figure 69: Near collapse limit state, model B, Y+ direction, modal horizontal force distribution.	77
Figure 70: Near collapse limit state, model B, Y- direction, modal horizontal force distribution.	78
Figure 71: Near collapse limit state, model B, X+ direction, uniform horizontal force distribution.	82

Figure 72: Near collapse limit state, model B, X- direction, uniform horizontal force distribution.	83
Figure 73: Near collapse limit state, model B, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.	83
Figure 74: Near collapse limit state, model B, Y- direction, uniform horizontal force distribution.	83
Figure 75: Near collapse limit state, model C, X+ direction, modal horizontal force distribution.	86
Figure 76: Near collapse limit state, model C, X- direction, modal horizontal force distribution.	87
Figure 77: Near collapse limit state, model C, Y+ direction, modal horizontal force distribution.	87
Figure 78: Near collapse limit state, model C, Y- direction, modal horizontal force distribution.	87

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Na področju potresnega inženirstva je iskanje uravnotežene metodologije za oceno potresnega odziva, ki usklajuje računsko učinkovitost z natančnostjo, pogosto zahtevna naloga. Največjo natančnost je možno doseči z uporabo nelinearnih dinamičnih analiz, vendar pa so tovrstne analize zapletene in časovno potratne. V praksi se zaradi tega pogosto uporabljajo linearne metode analize, ki pa ne omogočajo eksplicitne določitve dejanske nosilnosti in duktilnosti konstrukcije. Iz teh razlogov so se začele uveljavljati poenostavljene nelinearne metode. Ena takih metod je bila razvita prav na naši fakulteti na IKPIR-u. Gre za metodo N2 ([1], [2]) kjer N izhaja iz besede nelinearen, 2 pa iz števila uporabljenih matematičnih modelov, tj. modelov SDOF (ang. *single degree of freedom*) in MDOF (ang. *multi degree of freedom*). Pristop z metodo N2 spretno združuje elemente nelinearne statične (potisne analize) na sistemu MDOF in ocene potresnih zahtev s transformacijo sistema MDOF v ekvivalenten sistem SDOF.

Metodo N2 je možno izvesti s pomočjo različnih računalniških programov. Čeprav je metoda sama natančno opredeljena, uporaba različnih programov uvaja plast negotovosti, saj lahko razlike v algoritmih, računskih metodah ali privzetih nastavitvah prinašajo različne rezultate za enako konstrukcijo. Celo subtilne razlike v numeričnih približkih, diskretizaciji mreže končnih elementov ali obravnavi materialne nelinearnosti lahko bistveno spremenijo zaključke analize. Zaradi takšnih potencialnih odstopanj je pomembno, da razumemo, kako izbira programskega orodja vpliva na rezultate.

Cilj magistrskega dela je analizirati odstopanja v oceni potresne odpornosti konstrukcije, ki izhajajo iz modelnih negotovosti, povezanih z izbiro programskega orodja. Pri tem se osredotočamo na programa SAP2000 [3] in 3Muri [4], ki sta pogosto uporabljena za namen potresne analize. SAP2000 je priznано programsko orodje na področju inženirstva, razvito v Združenih državah Amerike s strani podjetja CSI. Uporablja metodo končnih elementov za modeliranje in analizo konstrukcij [3]. Program 3Muri je rezultat sodelovanja Univerze v Genovi in podjetja S.T.A. DATA. Ustvarjen je bil z namenom statične in potresne analize zidanih konstrukcij s pomočjo uporabe metode ekvivalentnih okvirjev [4].

Razlike v programih in njihovih rezultatih analiziramo na primeru okvirne armiranobetonske stavbe SPEAR, ki je bila eksperimentalno preizkušena v prejšnji študiji [5]. Stavbo SPEAR modeliramo na različne načine, pri tem pa vpeljemo različno raven modelnih poenostavitev. S tem ugotovljamo, kako poenostavitve modeliranja vplivajo na računske metode, algoritme in privzete nastavitve, ki so specifične za izbrana programa. S primerjavo rezultatov želimo v magistrskem delu odkriti tako prednosti kot omejitve uporabe različne programske opreme, kot tudi poenostavljenih modelov.

V drugem poglavju magistrskega dela predstavljamo postopek za določitev mejnega pospeška tal po metodi N2, ki je skladen s trenutno veljavnim standardom Evrokod 8 (SIST EN 1998-1:2005 [6]), kot tudi z njegovo novo delovno verzijo (prEN 1998-1-1:2023, N1269 [7]).

V tretjem poglavju predstavljamo oba uporabljena programa – SAP2000 in 3Muri. Programa na kratko opišemo, nato pa predstavimo možnosti pri linearnem in nelinearnem modeliranju. Za vsak program opišemo tudi algoritme, uporabljene pri potisni analizi.

V četrtem poglavju opisujemo obravnavano stavbo SPEAR kot tudi lastnosti in predpostavke različnih elastičnih modelov, razvitih v obeh programih. Za vse modele izvedemo tudi modalno analizo in predstavimo primerjamo rezultatov.

V petem poglavju predstavimo predpostavke pri razširitvi linearnih modelov v nelinearne. Končno predstavimo rezultate potisne analize ter izračunane mejne pospeške tal kot tudi primerjavo med njimi. Skupno izvedemo 40 potisnih analiz.

V zaključku predstavimo ugotovitve in sklep magistrskega dela. Na koncu podamo še spisek uporabljenih virov.

2 OCENA POSPEŠKA TAL PRI NASTOPU MEJNEGA STANJA BLIZU PORUŠITVE SKLADNO S STANDARDOM EVROKOD 8

Skladno z Evrokodom 8 [6] se stanje poškodovanosti konstrukcije lahko opiše s tremi mejnimi stanji: mejno stanje omejitev poškodb (ang. *Damage limitation* ali DL), mejno stanje velikih poškodb (ang. *Significant damage* ali SD) in mejno stanje blizu porušitve (ang. *Near collapse* ali NC). Slednje mejno stanje se nanaša na konstrukcije, ki so že močno poškodovane in imajo le še malo preostale nosilnosti in togosti. Vertikalni nosilni elementi so sposobni prenašati le še navpično obtežbo. Prav tako pa je tudi večina nekonstrukcijskih elementov že porušeni. V konstrukciji se pojavijo trajne deformacije. Potrebna raven zaščite konstrukcije se doseže z izbiro potresne obtežbe z ustrezno povratno dobo za izbrano mejno stanje. Za mejno stanje blizu porušitve je predpisan potres s povratno dobo 2475 let (verjetnost porušitve v petdesetih letih je 2 %) [8].

V tem poglavju predstavljamo postopek za oceno pospeška tal, pri katerem konstrukcija doseže mejno stanje blizu porušitve, s pomočjo uporabe potisne analize in metode N2. Postopek je skladen s trenutno veljavnim Evrokodom 8 ([6], [8]), metoda pa se uporablja tudi v delovni verziji novega standarda [7]. Mejno stanje blizu porušitve predstavlja največjo stopnjo poškodovanosti konstrukcije pred popolno porušitvijo in tako ponuja vpogled v največjo potresno odpornost preiskovane konstrukcije.

2.1 Ocena po trenutno veljavni verziji Evrokoda 8

Ocena pospeška tal pri nastopi mejnega stanja blizu porušitve v trenutno veljavnem Evrokodu 8 sledi metodi N2. Metoda N2 temelji na nelinearni statični oz. potisni analizi. V takšni analizi obravnavamo nelinearen model konstrukcije, ki ga obremenjujemo s statično obtežbo, ki se postopoma povečuje, sproti pa se beležijo pomiki. Pri tem se razmerje sil po konstrukciji ohranja. Rezultat je zveza med pomiki konstrukcije in silami, ki delujejo nanjo – potisna krivulja.

Osnovna predpostavka metode je, da se deformacijska oblika konstrukcije, s tem pa tudi razmerje potresnih sil nanjo, med potresom ne spreminjajo. Konstrukcije, ki izpolnjujejo ta pogoj, nihajo pretežno v svoji osnovni (prvi) nihajni obliki. Ta predpostavka je lahko omejujoča za konstrukcije, kjer imajo višje nihajne oblike pomemben vpliv na konstrukcijo, kot so npr. višje stavbe. Prav tako je metoda N2 manj uporabna v primeru prostorskih modelov za geometrijsko nepravilne in torzijsko podajne konstrukcije [9].

Rezultati potisne analize so odvisni od razporeditve vodoravnih sil po višini konstrukcije. Trenutna verzija Evrokoda zahteva vsaj dva različna primera razporeditve vodoravnih obtežb za izvedbo potisne analize:

- Enakomerno razporeditev vodoravnih sil, kjer so vodoravne sile sorazmerne masam ne glede na višino etaž
- Modalno razporeditev vodoravnih sil, kjer so vodoravne sile sorazmerne vodoravnim silam v obravnavani smeri, določenimi z elastično modalno analizo

Predpostavljena je naslednja zveza med normiranimi vodoravnimi silami $\bar{F}_i$ in normiranimi pomiki ϕ_i , kjer se indeks i nanaša na etažo:

$$\bar{F}_i = m_i \cdot \phi_i, \quad (2.1)$$

kjer je:

m_i masa v i -ti etaži

ϕ_i vrednost pomika i -tega vozlišča

Pomiki so normirani tako, da velja $\phi_n = 1$, kjer n predstavlja kontrolno točko (ponavadi masno središče vrhnje etaže). Vrednosti normiranih vodoravnih sil niso pomembne, pomembno je le razmerje med njimi, saj v postopku potisne analize krmilimo pomike.

V nadaljevanju metode N2 se uporabijo spektri odziva, ki pa so definirani za sisteme z eno prostostno stopnjo (sisteme SDOF). Zaradi tega je potrebno potisno krivuljo za sisteme z več prostostnimi stopnjami (sisteme MDOF) ustrezno pretvoriti na ekvivalenten sistem z eno prostostno stopnjo. Za to uporabimo transformacijski faktor Γ , ki je izražen kot [6]:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} = \frac{\sum \bar{F}_i}{\sum \left(\frac{\bar{F}_i^2}{m_i} \right)}, \quad (2.2)$$

V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil je predpisana konstantna nihajna oblika (vektor pomikov $\Phi = 1$) iz tega sledi $\Gamma = 1$. V primeru modalne razporeditve vodoravnih sil pa velja praviloma $\Gamma > 1$.

Masa ekvivalentnega sistema SDOF m^* je določena kot:

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i = \sum \bar{F}_i, \quad (2.3)$$

Sile in pomike ekvivalentnega sistema SDOF določimo s spodnjima enačbama:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma}, \quad (2.4)$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma}, \quad (2.5)$$

kjer je:

F_b vodoravna sila pri vpetju konstrukcije sistema MDOF

d_n pomik kontrolne točke sistema MDOF

V nadaljevanju je potrebno odnos med silo in pomikom idealizirati. V našem primeru smo se odločili za uporabo bilinearne idealizacije, kjer elastičnemu območju sledi plastično tečenje brez utrditve, kar je skladno z dodatkom B iz SIST EN 1998-1:2005 [6]. S pomočjo nove krivulje in rezultatov se lahko določi nosilnost in deformacijska kapaciteta konstrukcije.

Obravnavamo mejno stanje blizu porušitve (*NC – Near Collapse*), torej pri pomiku, ko je nosilnost na potisni krivulji zmanjšana na 80 % maksimalne nosilnosti, skladno z SIST EN 1998-3:2005 [8]. Sila tečenja F_y , ki predstavlja nosilnost idealiziranega sistema, je v našem primeru enaka maksimalni vodoravni sili na potisni krivulji (slika 1). Začetna togost idealiziranega sistema je določena tako, da sta površini pod dejansko in idealizirano potisno krivuljo enaki. Na podlagi tega je pomik na meji tečenja d_y določen z enačbo (2.6):

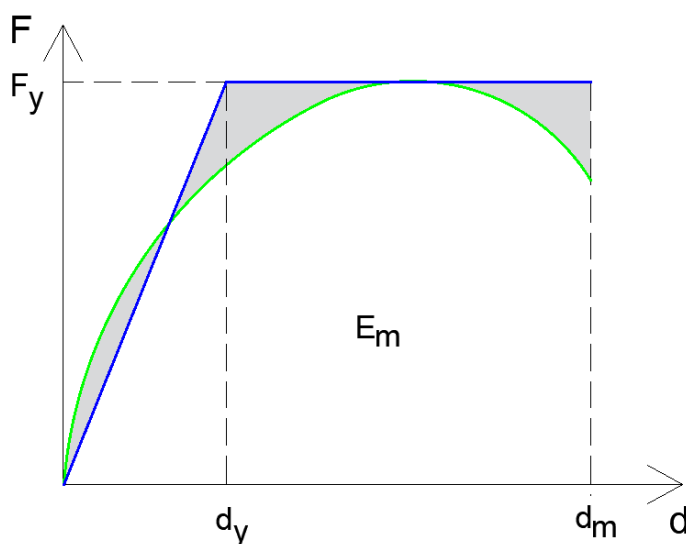
$$d_y^* = 2(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y}), \quad (2.6)$$

kjer je:

E_m^* površina pod potisno krivuljo od vrednosti 0 pa do vrednosti d_m

d_m pomik pri 80 % maksimalne nosilnosti

F_y maksimalna vodoravna sila na potisni krivulji



Slika 1: Določitev idealizirane krivulje po Evrokodu 8.

Figure 1: Idealization of the pushover curve according to Eurocode 8.

V nadaljevanju je za določitev mejnega pospeška potrebno določiti nihajni čas idealiziranega sistema v elastičnem območju. To storimo z enačbo (2.7):

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^*}{k^*}} = 2\pi\sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}}, \quad (2.7)$$

Pospešek konstrukcije na meji tečenja za idealiziran sistem z eno prostostno stopnjo določimo z enačbo (2.8):

$$S_{ay} = \frac{F_y^*}{m^*}, \quad (2.8)$$

Pri določitvi pospeška pri mejnem stanju konstrukcije je potrebno izračunati duktilnost neelastične konstrukcije μ , ki predstavlja razmerje med pomikom na vrhu konstrukcije pri določenem mejnem stanju in pomikom na meji elastičnosti:

$$\mu = \frac{d_{LS}}{d_y}, \quad (2.9)$$

kjer je:

d_{LS} pomik v kontrolni točki na vrhu konstrukcije za izbrano mejno stanje

d_y pomik na meji elastičnosti

Nato je potrebno določiti redukcijski faktor R_μ , pri čemer je uporabljen odnos $R-\mu-T$:

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T^*}{T_C} + 1, \text{ če je } T^* < T_C, \quad (2.10)$$

$$R_\mu = \mu \text{ sicer,} \quad (2.11)$$

Temu sledi še izračun elastičnega pospeška, ki povzroči mejno stanje:

$$S_{ae} = S_y \cdot R_\mu, \quad (2.12)$$

Končno lahko s pomočjo elastičnega pospeška, ki povzroči mejno stanje S_{ae} določimo pospešek tal a_g pri katerem bo konstrukcija dosegla mejno stanje. Uporabimo elastični spekter pospeškov, kot je definiran v SIST EN 1998-1:2005 [6]:

$$\text{Za } T^* \text{ med } 0 \leq T^* \leq T_B \quad a_g = a_{gR} \cdot S = \frac{S_{ae}}{1 + \frac{T^*}{T_B} (\eta \cdot 2,5 - 1)}, \quad (2.13)$$

$$\text{Za } T^* \text{ med } T_B \leq T^* \leq T_C \quad a_g = a_{gR} \cdot S = \frac{S_{ae}}{\eta \cdot 2,5}, \quad (2.14)$$

$$\text{Za } T^* \text{ med } T_C \leq T^* \leq T_D \quad a_g = a_{gR} \cdot S = \frac{S_{ae}}{\eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C}{T^*}}, \quad (2.15)$$

$$\text{Za } T^* \text{ med } T_D \leq T^* \leq 4s \quad a_g = a_{gR} \cdot S = \frac{S_{ae}}{\eta \cdot 2,5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{(T^*)^2}}, \quad (2.16)$$

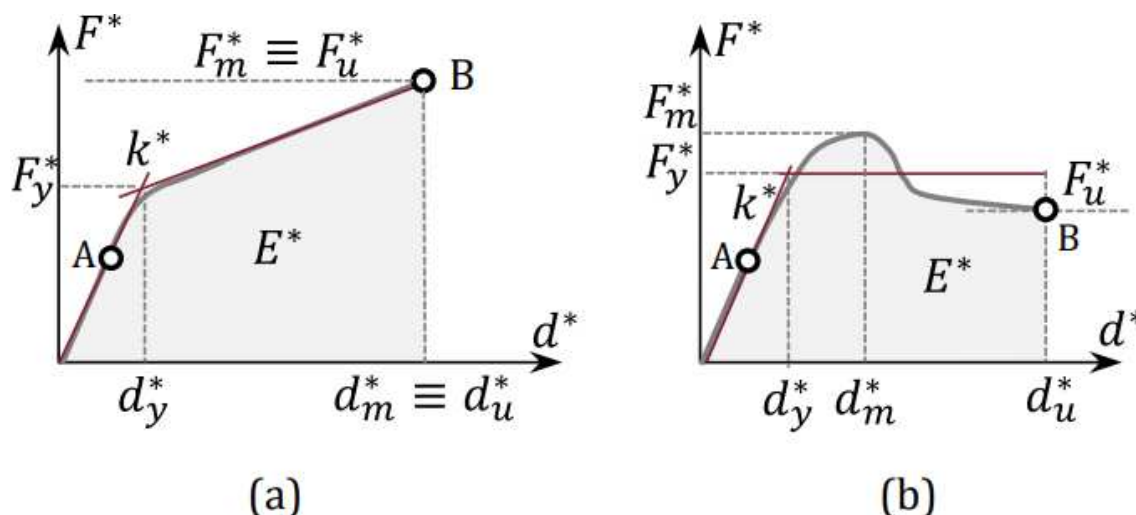
2.2 Novosti v delovni verziji novega Evrokoda 8

V novi delovni verziji standarda prEN 1998-1-1:2023, N1269, [7] so navodila za izvedbo nelinearne statične analize podana v razdelku 6.5.

Nova delovna verzija Evrokoda v večini ne uvaja veliko sprememb pri nelinearni statični analizi z izjemo korekcijskih faktorjev s katerimi približno upotevamo vpliv višjih nihajnih oblik, vendar vpliva teh faktorjev v magistrskem delu nismo upoštevali. Razlika se pojavi v zahtevi, da se za

vsako obravnavano smer potresne obtežbe uporabi vsaj modalna razporeditev vodoravnih sil, z razliko od prej zahtevane enakomerne in modalne razporeditve vodoravnih sil.

Razlika v novi delovni verziji Evrokoda je tudi v natančnejših navodilih za idealizacijo razmerja sila-pomik. Z razliko od trenutno veljavne verzije Evrokoda je v novi možno zaslediti dva različna načina za idealizacijo, odvisno od tega, ali krivulja kapacitete vsebuje del s padanjem nosilnosti, kot je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Določitev bilinearne idealizacije razmerja sila-pomik v primeru (a) nepadajoče in (b) padajoče krivulje kapacitete [7].

Figure 2: Determination of the bilinear idealization of the force-deformation relationship in the case of (a) non-decreasing and (b) decreasing capacity curve [7].

Elastična togost k^* bilinearne idealiziranega sistema mora biti enaka sekantni togosti do točke potisne krivulje, kjer pride do prve točke plastifikacije (točka A na sliki 2).

Enačbe (2.1) do (2.16) ostajajo enake, z izjemo enačbe (2.6), za določitev pomika na meji tečenja. Ta je sedaj določen glede na odnos sila-pomik, kot je prikazano na sliki 2:

$$d_y^* = \frac{2E^* - F_m^* d_m^*}{k^* d_m^* - F_m^*} \quad \text{za bilinearne idealizacijo z utrjevanjem (a)} \quad (2.17)$$

$$d_y^* = d_u^* - \sqrt{(d_u^*)^2 - \frac{2E^*}{k^*}} \quad \text{za bilinearne idealizacijo brez utrjevanja (b)} \quad (2.18)$$

kjer je:

E^* površina pod potisno krivuljo od vrednosti 0 pa do vrednosti (d_u^*, F_u^*)

d_m^* pomik pri maksimalni sili F_m^*

F_m^* maksimalna vodoravna sila na potisni krivulji

3 KRATKA PREDSTAVITEV PROGRAMOV SAP2000 IN 3MURI

3.1 Programsko orodje SAP2000

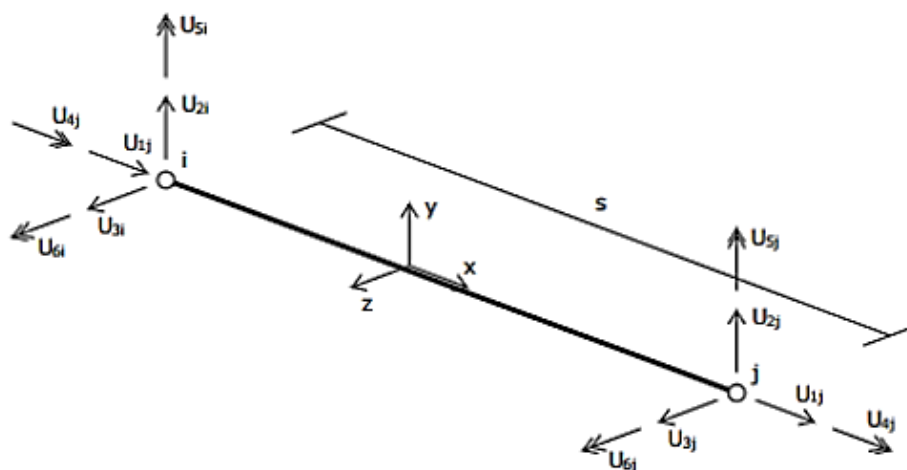
Prvi uporabljeni program znotraj magistrskega dela je bil program SAP2000 [3]. SAP2000 (ang. **Structural Analysis Program 2000**) omogoča analizo in načrtovanje vseh konstrukcijskih sistemov in gradbeno inženirskih objektov. Program je bil razvit v podjetju *Computers and Structures, Inc. (CSI)*.

3.1.1 Modeliranje linearne konstrukcije

Členi v konstrukcijskem modelu so predstavljeni z objekti (ang. *objects*). Z uporabo grafičnega uporabniškega vmesnika se v programu nariše geometrija objekta, nato pa se temu dodeli lastnosti in obremenitve. Za namen analize program SAP2000 pretvori element v enega ali več objektov (točka, črta, območje, trdna snov...).

SAP2000 temelji na metodi končnih elementov, ki izvira iz letalske in vesoljske industrije, a se je kasneje razširila tudi v področje konstrukcijskega in strojnega inženirstva [10]. Bistvo metode leži v razdelitvi kompleksnih geometrij ali struktur na manjše, enostavnejše elemente. Ti elementi so med seboj povezani na diskretnih točkah ali vozliščih in skupaj tvorijo mrežo končnih elementov. S to diskretizacijo je mogoče numerično rešiti enačbe sistema, kar omogoča hitrejšo in bolj podrobno analizo zapletenih sistemov.

V primeru ravnih elementov s konstantnim prečnim prerezom so končni elementi običajno kar celi linijski elementi (slika 3). Na vsakem koncu imajo po eno vozlišče, v katerem je prisotnih šest prostostnih stopenj – tri translacije in tri rotacije. Krajevni koordinatni sistem predstavlja kartezijski desnosučni koordinacijski sistem, kjer os X kaže v smeri poteka elementa, osi Y in Z pa pravokotno na os X [3], [11].



Slika 3: Prostorski linijski končni element [11].

Figure 3: 3D linear finite element [11].

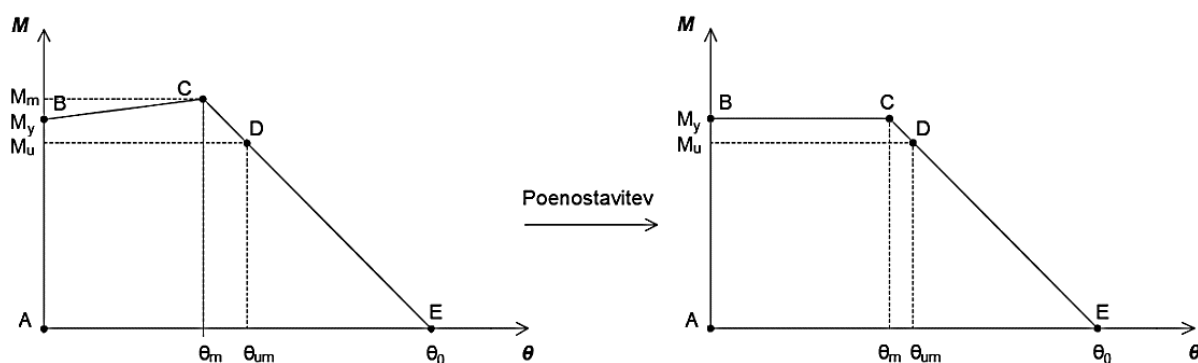
3.1.2 Razširitev na nelinearni model

Za izvedbo potisne analize v programu SAP2000 je najprej potrebno definirati nelinearni model konstrukcije, kar lahko storimo na več načinov. Pogosto upoštevamo materialno nelinearnost v diskretnih točkah linijskih elementov (plastični členki oz. v programu SAP2000 *Hinges*). Plastični členek predstavlja koncentrirano plastičnost (materialno nelinearnost). Ko pričakujemo upogibne nelinearne deformacije na obeh koncih elementov, kot na primer v stebrih in nosilcih v okvirnih konstrukcijskih sistemih, definiramo upogibne plastične členke na obeh koncih. Upogibni plastični členki so definirani kot odnos med momentom in zasukom ($M-\Theta$). S pomočjo upogibnih plastičnih členkov vsakemu elementu pripišemo način obnašanja v plastičnem območju vse do porušitve elementa.

Upogibne plastične členke v programu SAP2000 definiramo s krivuljo, ki je uporabljena v zgledu študije Žižmonda in Dolška [12]. Oblika krivulje je določena s petimi točkami:

- A – izhodišče krivulje
- B – točka tečenja (prva plastičnost členka)
- C – mejna nosilnost
- D – preostala nosilnost po delni porušitvi
- E – popolna porušitev

V tem primeru upogibne plastične členke definiramo na poenostavljen način (slika 4). Za moment na meji tečenja v plastičnem členku predpostavimo, da je enak kot maksimalni moment iz analize prereza. Post-kritično območje približno modeliramo tako, da rotacija pri ničti nosilnosti ustreza 3,5-kratniku rotacije pri maksimalnem momentu. Čeprav je nosilnost prereza odvisna od nivoja osne sile v elementu, ki se med potresom lahko spreminja, se v literaturi pogosto uporablja konstantna osna sila. V tem primeru upoštevana osna sila za stebre izhaja iz kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$, za grede pa velja, da je vrednost osne sile $N = 0$ kN.



Slika 4: Poenostavljena zveza $M-\Theta$ v plastičnih členkih [13].

Figure 4: Simplified $M-\Theta$ relationship in plastic hinges [13].

3.1.2.1 Definiranje plastičnih členkov

Osnovo pri definiranju plastičnih členkov predstavljata rotacija na meji tečenja in mejna rotacija blizu porušitve elementov. Največji moment, ki ga armiranobetonski prerez lahko prenese, lahko odčitamo iz odnosa moment-ukrivljenost. Skladno z dodatkom A iz SIST EN 1998-3:2005 [8] mejno rotacijo blizu porušitve elementov (80 % nosilnosti elementa) določimo s pomočjo enačbe (3.1).

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \bar{\omega}')}{\max(0,01; \bar{\omega})} f_c \right]^{0,225} \cdot \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} \cdot 25^{(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} (1,25^{100 \rho_d}), \quad (3.1)$$

kjer je:

γ_{el} 1,5 za primarne potresne elementi ali 1,0 za sekundarne potresne elemente

$\nu = N / bh f_c$ normirana osna sila; b = širina tlačne cone, N = pozitivna osna sila (v našem primeru iz kombinacije 1,0 G + 0,3 Q)

$\bar{\omega}, \bar{\omega}'$ mehanski delež armiranja vzdolžne armature v natezni in tlačni coni

f_c tlačna trdnost betona v MPa

f_{yw} meja tečenja stremen v MPa

$L_v = M / V$ razmerje med momentom in prečno silo na koncu prereza (pri obojestransko vpetih elementih običajno predpostavimo 0,5 dolžine elementa)

h višina prereza

α faktor učinkovitosti objetja, določen z enačbo (3.2):

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_0} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_0} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_0 b_0} \right), \quad (3.2)$$

b_0 in h_0 so dimenzije objetega betona merjeno od sredine stremen

b_i je razdalja med objetimi vzdolžnimi palicami armature

$\rho_{sx} = A_{sx} / b_w s_h$ delež strižne armature v smeri obremenjevanja
 s_h je razdalja med stremeni

ρ_d delež diagonalne armature (če obstaja) v vsaki smeri

Po predlogu študije Žižmonda in Dolška [12] lahko rotacijo na meji tečenja določimo po enačbi (3.3).

$$\theta_y = \frac{M_y L}{6EI}, \quad (3.3)$$

kjer je:

θ_y	rotacija na meji tečenja
M_y	moment na meji tečenja armature (maksimalni moment)
L	dolžina elementa
E	elastični modul
I	vztrajnostni moment razpokanega prereza

Na podlagi izračunanih rotacij in momentov elementov lahko definiramo karakteristične točke, ki definirajo plastične členke v programu SAP2000 (slika 4).

Točka A predstavlja izhodišče krivulje, zaradi tega pa sta vrednosti momenta in zasuka enaki nič.

$$M_A = 0, \quad (3.4)$$

$$\theta_A = 0, \quad (3.5)$$

Točka B predstavlja mejo tečenja (prvo plastičnost) v členku. Moment M_B predstavlja moment na meji tečenja armature M_y . Za moment na meji tečenja M_y smo v sklopu magistrskega dela predpostavili, da je enak maksimalnemu momentu iz analize prereza, ki je bila opravljena v programu SAP2000. Ker v plastičnih členkih upoštevamo le plastične deformacije, je potrebno odšteti elastične deformacije pri danem momentu. Te so določene v enačbi (3.3).

$$M_B = M_y, \quad (3.6)$$

$$\theta_B = \theta_y - \theta_y = 0, \quad (3.7)$$

Točka C predstavlja mejno nosilnost prereza. Zaradi predpostavke, da ne upoštevamo utrjevanja materiala, velja $M_C = M_B$. Zasuk v točki C (θ_m) se določi z upoštevanjem podobnih trikotnikov oz. na podlagi zasukov v točki D (θ_{um}). Točki D ustreza rotacija, ko je upogibna nosilnost elementa zmanjšana na 80 %. Elastična rotacija, ki jo odštejemo od skupne rotacije, je tudi v tem primeru enaka θ_y .

$$M_C = M_y, \quad (3.8)$$

$$\theta_C = \theta_m - \theta_y = \frac{\theta_{um}}{(3,5 - 3,5 * 0,8 + 0,8)} - \theta_y = \frac{\theta_{um}}{1,5} - \theta_y, \quad (3.9)$$

Točka D predstavlja mejno rotacijo elementa. Mejno rotacijo določimo po enačbi (3.1) skladno z razdelkom A.3.2.2 iz dodatka A iz SIST EN 1998-3:2005 [8]. V tem primeru je elastična rotacija, ki jo odštejemo od skupne rotacije, enaka 80% rotacije θ_y .

$$M_D = 0,8 \cdot M_y, \quad (3.9)$$

$$\theta_D = \theta_{um} - 0,8 \cdot \theta_y, \quad (3.10)$$

Točka E predstavlja popolno porušitev elementa. V tem stanju element ni več zmožen prevzeti obtežbe. Točka je določena ob upoštevanju linearnega mehčanja elementa. Zaradi numerične stabilnosti v programu SAP2000 upoštevamo $M_E = 10^{-3}$ namesto $M_E = 0$.

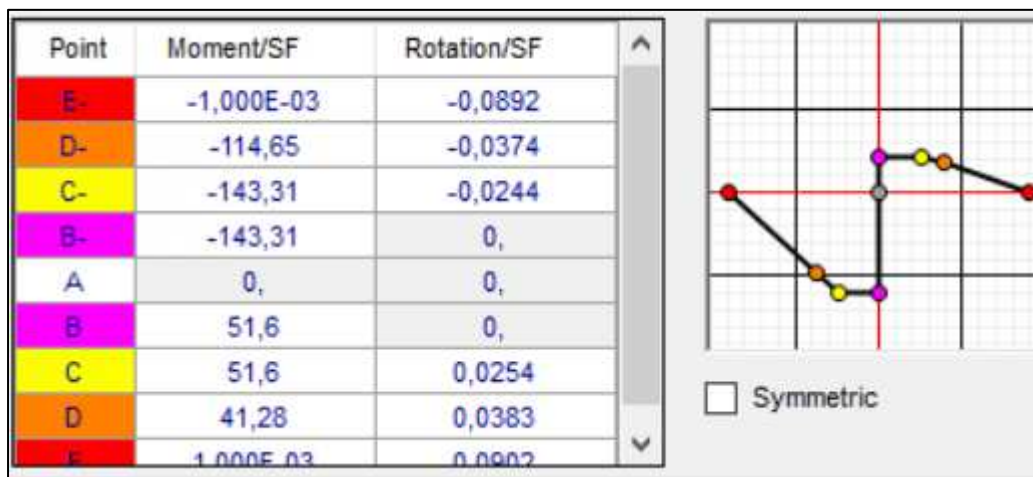
$$M_E = 0, \quad (3.11)$$

$$\theta_E = \theta_0, \quad (3.12)$$

Za določitev maksimalnega momenta prereza se lahko uporabi program SAP2000. S pomočjo orodja *Section Designer* modeliramo vsak prerez skupaj s pripadajočo armaturo. Ker imajo dejanski materiali, ki so vgrajeni v konstrukcije, bistveno večjo nosilnost od projektne nosilnosti, pri analizi odziva konstrukcije uporabimo srednje vrednosti materialnih karakteristik. Srednja tlačna trdnost betona je v skladu s SIST EN 1992-1-1:2005 [14] za 8 MPa višja od karakteristične vrednosti.

Plastične členke potem lahko definiramo v programu SAP2000. Ker nas zanimajo rezultati potisne analize tako v pozitivni kot tudi negativni smeri, je potrebno definirati odnos moment-zasuk v pozitivni in negativni smeri. V primeru simetričnih stebrov so tudi plastični členki simetrični, v primeru nosilcev pa so večinoma nesimetrični.

Na sliki 5 je prikazan primer podanega članka za nosilec v programu SAP2000.



Slika 5: Definicija plastičnega članka za nosilec v programu SAP2000.

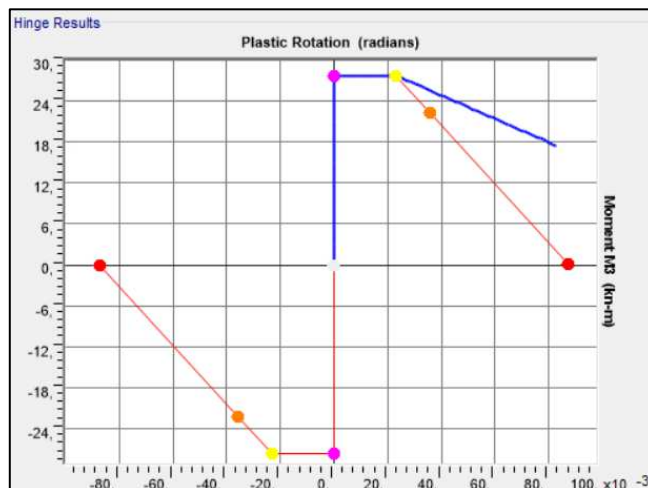
Figure 5: Definition of a plastic hinge for a beam in SAP2000.

3.1.2.1.1 Popravki v območju mehčanja

Po vnosu vseh plastičnih členkov je potrebno te namestiti na ustrezna mesta. V primeru obojestransko vpetih elementov definiramo upogibne plastične členke na obeh koncih elementa.

Pri numeričnem izračunu definiranih upogibnih plastičnih členkov v programu SAP2000 se lahko pojavijo težave, predvsem v fazi mehčanja, kjer program lahko samodejno spremeni prej

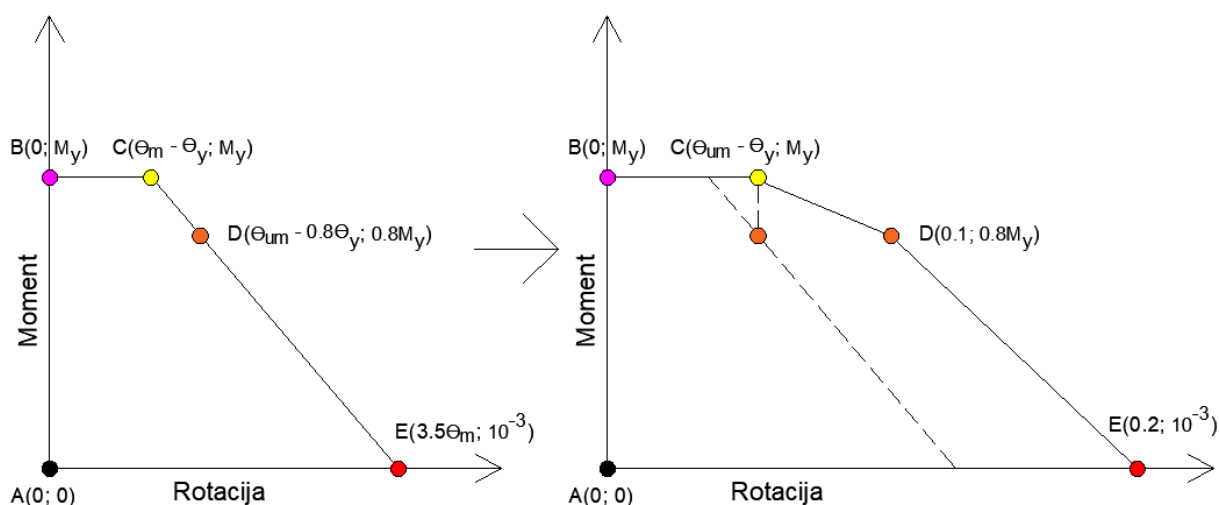
definirani naklon v odnosu med silo in pomikom. Na sliki 6 je prikazan primer spreminjanja ovojnice zaradi numeričnih težav pri izračunu. Z oranžno barvo je prikazan definirani odnos moment-zasuk, z modro barvo pa odnos moment-zasuk, ki ga je program med analizo upošteval.



Slika 6: Potek razvoja rotacije v plastičnem členku v programu SAP2000.

Figure 6: Rotation development in a plastic hinge in SAP2000.

Takšnim težavam se lahko izognemo tako, da modificiramo odnos moment-zasuk za vsak plastičen členek tako, da popravimo naklon linearnega mehčanja prereza. To storimo, kot je prikazano na sliki 7. Na tak način naredimo napako glede na predpostavljeno ovojnico, saj je mejno stanje blizu porušitve elementa doseženo pri večji nosilnosti (M_y namesto $0,8M_y$). Še večja napaka pa se pojavi po nastopu mejnega stanja blizu porušitve, ko se element dodatno mehča, saj je na tem področju upoštevana bistveno večja nosilnost. Omenjene napake nimajo pomembnega vpliva na rezultat, če mejno stanje blizu porušitve na nivoju celotne konstrukcije definiramo z nastopom mejne rotacije v prvem elementu, torej, ko prvi element doseže novo definirano točko C, namesto točke D.

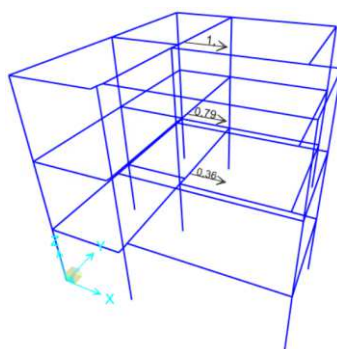


Slika 7: Modificiran odnos $M-\Theta$.

Figure 7: Modified $M-\Theta$ relationship.

3.1.3 Algoritem pri potisni analizi

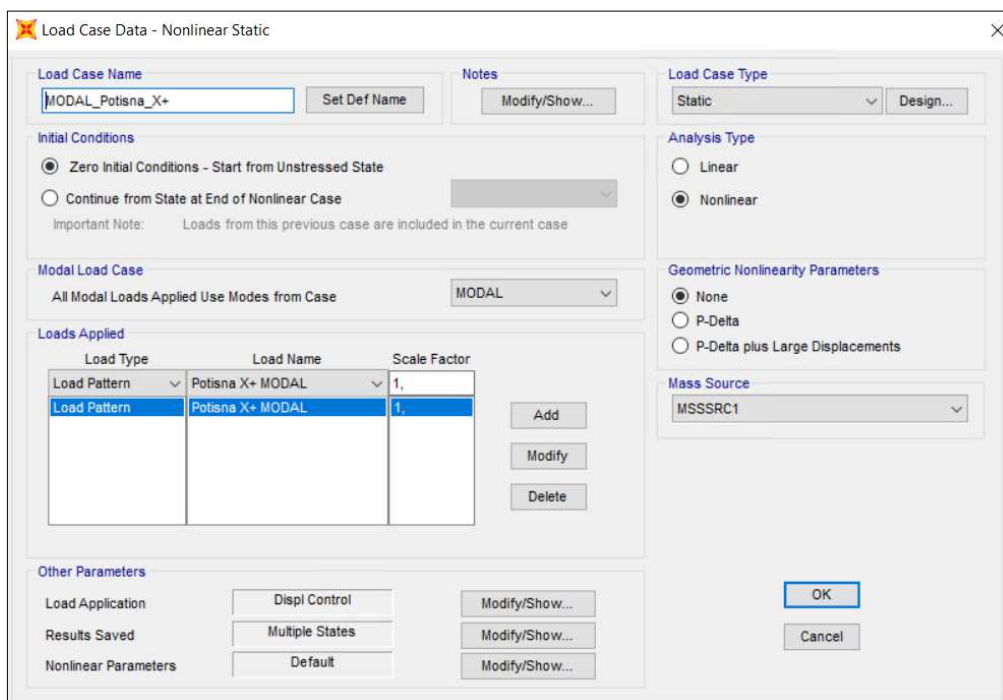
Ko je v programu SAP2000 ustvarjen nelinearni model z definiranimi plastičnimi členki, je izvedba potisne analize enostavna. Najprej definiramo obtežni vzorec s pomočjo ukaza *Define* → *Load Patterns*. Obtežnemu vzorcu podamo ime in vrsto obtežbe, kjer je pomembno, da izberemo, da se lastna teža ne upošteva (*Self Weight Multiplier* = 0). S pomočjo definirane obtežnega vzorca lahko konstrukciji priredimo obtežbo. V centru mase posameznih etaž namestimo točkovne sile. Razporeditev in smer točkovnih sil je odvisna od izbrane razporeditve vodoravnih sil, ki je lahko enakomerna ali modalna. Točkovne sile namestimo s pomočjo ukaza *Assign* → *Joint Loads* → *Forces*. Na sliki 8 je prikazan obtežni vzorec modalne razporeditve vodoravnih sil v smeri X+ (v nadaljevanju poimenovan Potisna X+ MODAL).



Slika 8: Obtežni primer modalne razporeditve vodoravnih sil.

Figure 8: Load case of modal distributed horizontal forces

Zatem je potrebno definirati vrsto analize (slika 9), kar storimo z ukazom *Define* → *Load Cases*. V novem oknu, ki se odpre ob izbiri opcije *Add New Load Case*, lahko ustvarimo novo vrsto analize za izvedbo potisne analize. Pri definiranju analize je potrebno spremeniti vhodne parametre, ki nam jih program SAP2000 ponudi. Desno v oknu pod *Load Case Type* pustimo podano opcijo *Static*, le da moramo spremeniti tip analize v *Nonlinear*, saj je potisna analiza nelinearna statična analiza. Pod ukazom *Loads Applied* je potrebno izbrati predhodno definirani obtežni primer, kar je v našem primeru obtežni primer, ki je poimenovan Potisna X+ MODAL.

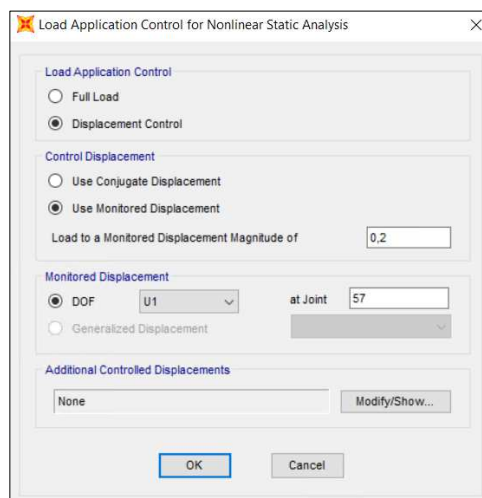


Slika 9: Definicija potisne analize v programu SAP2000.

Figure 9: Definition of a pushover analysis in SAP2000.

Na dnu okna se nam ponuja opcija definiranja dodatnih parametrov, ki jih definiramo po spodnjih navodilih:

- **Load Application:** Pod to opcijo izberemo način krmiljenja. Pri nelinearni analizi zaradi lastne teže se običajno krmili sila (*Full Load*), pri nelinearni analizi zaradi vodoravnih sil oz. potisni analizi pa se krmilijo pomiki (*Displacement Control*) [4]. V našem primeru izberemo slednjo opcijo. Pod opcijo *Control Displacement* izberemo *Use Monitored Displacement*, v spodnjem oknu pa vnesemo približen končni pomik konstrukcije (v našem primeru smo definirali 0,2 m oz. 20 cm). V polju *Monitored Displacement* pod opcijo *DOF* izberemo smer obremenjevanja, ki je odvisna od lokalne osi točke, v kateri beležimo pomik. Kontrol točka je praviloma v centru mase zgornje etaže (v tem primeru točka 57). Izbrana smer obremenjevanja je *U1*, saj lokalna os 1 točke 57 kaže v pozitivni smeri X. Vsi definirani parametri so prikazani na sliki 10.

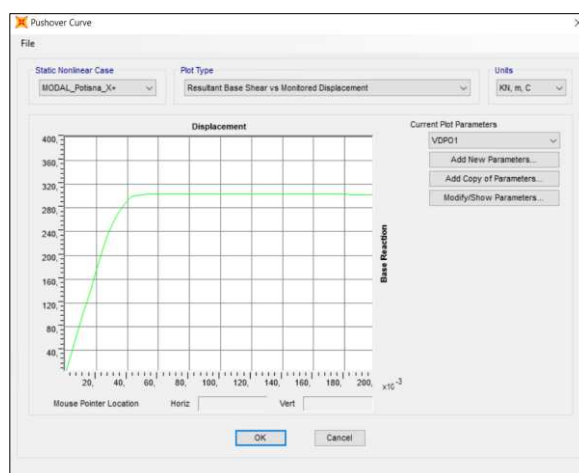


Slika 10: Definicija parametrov v oknu *Load Application*.

Figure 10: Definition of parameters in the *Load Application* window.

- **Results Saved:** Ponuja se nam opcija izbire glede načina shranjevanja rezultatov. V tem oknu izberemo opcijo *Multiple States*, saj želimo, da program shrani tudi vmesne rezultate analize. S pomočjo definiranja števila minimalnih in maksimalnih shranjenih rezultatov lahko povečamo natančnost analize. S prevelikim številom shranjenih rezultatov lahko bistveno podaljšamo čas računanja.
- **Nonlinear Parameters:** Pod opcijo nelinearnih parametrov lahko spreminjamo parametre analize, ki se navezujejo na numerično reševanje analize. Lahko spreminjamo število iteracij, tolerance pri konvergenци ali na splošno povečamo večjo natančnost rezultatov.

Na ta način se v programu SAP2000 definira nelinearna statična potisna analiza. S pritiskom na gumb *Run Analysis* poženemo izračun za definirane obtežne primere in vrste analize. Rezultate potisne analize lahko prikazujemo na različne načine. Potisno krivuljo posamezne analize preverimo pod opcijo *Display* → *Show Static Pushover Curve*. Program nam prikaže izrisano potisno krivuljo za našo analizo (slika 11).

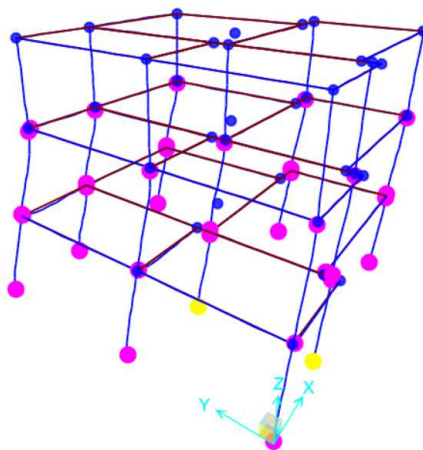


Slika 11: Potisna krivulja v programu SAP2000.

Figure 11: Pushover curve in SAP2000.

Potisno krivuljo lahko tudi izvozimo iz programa SAP2000 v npr. program Excel s pomočjo izbiri opcije *File* → *Display Tables* → *Export Current Table* → *To Excel*.

Poleg potisne krivulje pa nas v programu zanima tudi porazdelitev poškodb v konstrukciji. Pod opcijo *Show Deformed Shape* si lahko pogledamo razvoj poškodb v definiranih plastičnih členkih za vsak korak potisne analize. Primer za uporabljeno potisno analizo je prikazan na sliki 12. Razvoj poškodb v plastičnih členkih je skladen z načinom definiranja karakterističnih točk odnosa moment – rotacija za posamezen členek iz razdelka 3.1.2.1 oz. 3.1.2.1.1.



Slika 12: Primer razvoja poškodb v plastičnih členkih.

Figure 12: Example of damage development in plastic hinges.

3.1.4 Algoritem pri izračunu mejnih pospeškov

SAP2000 ne omogoča samodejnega izračuna mejnega pospeška, možno pa je izvoziti potisno krivuljo, ki jo nato lahko uporabimo v postopku, opisanem v poglavju 2.

3.2 Programsko orodje 3Muri

Program 3Muri [4] je bil posebej ustvarjen za potresne in statične analize zidanih konstrukcij skladno s švicarskimi (SIA) in italijanskimi standardi (NTC) ter EC6 [15] in EC8 [6], [8]. Razvit je bil v Italiji, na Univerzi v Genovi s sodelovanjem profesorja Sergia Lagomarsina in podjetja S.T.A DATA.

3.2.1 Modeliranje linearne konstrukcije

Program 3Muri omogoča analizo 3D konstrukcij. Konstrukcijski elementi so modelirani s pomočjo linijskih elementov, ki prenašajo vodoravno obtežbo. Medetažne plošče so modelirane s ploskovnimi elementi, ki služijo prenosu vertikalne obtežbe in vztrajnostnih sil na navpične elemente. Prenos obtežbe in osna togost sta odvisni od togosti plošče v svoji ravnini. Program ima vgrajen širok nabor že vnaprej definiranih stropov, kot so AB plošče, rebričasti stropi, zidani oboki, leseni stropi itd. Program je prvotno namenjen obravnavi zidanih konstrukcij, omogoča pa tudi modeliranje armiranobetonskih stebrov, nosilcev in sten, kot tudi jeklenih in lesenih nosilcev. Možno je tudi definirati opečnate zidove s horizontalnimi armiranobetonskimi prekladami ali jeklenimi vezmi [16].

3Muri omogoča linearno statično, modalno in nelinearno statično analizo konstrukcij. Program uporablja inovativno metodo ekvivalentnih okvirjev (ang. *Frame by Macro Elements* ali FME) in omogoča analizo globalne odpornosti ter lokalnih odzivov konstrukcije. Rezultat generiranja enakovrednega okvirnega modela je predstavitev mreže, ki strukturo konstrukcije shematizira v stebre, preklade, tramove in vezne drogove.

Pri modeliranju armiranobetonskih elementov obstaja izbor definiranja armature elementov. V primeru linearno elastičnega modela definiranje armature ni potrebno. V primeru izbire opcije definiranja armature imamo na voljo omejene možnosti. Pri modeliranju armiranobetonskih stebrov je možno podati armaturo za obe strani stebra, za nosilce pa obstaja možnost definiranja tlačne in natezne armature ločeno. V obeh elementih je obvezno tudi podati premer stremen, kot tudi razdaljo med njimi. Za vso uporabljeno armaturo v elementu je možno izbrati samo en tip jekla, s prej definiranimi materialnimi karakteristikami. Prikaz modeliranja prereзов in armature je prikazan v razdelku 5.2.

Začetna elastična veja je, podobno kot pri zidanih elementih, neposredno določena s prispevki strižne in upogibne togosti, pri čemer je zanemarjen vpliv armature. Togostna matrika elementov je definirana s pomočjo enačbe (3.13):

$$\begin{Bmatrix} T_i \\ N_i \\ M_i \\ T_j \\ N_j \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{h^3(1+\Psi)} & 0 & -\frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & -\frac{12EI}{h^3(1+\Psi)} & 0 & -\frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} \\ 0 & \frac{EA}{h} & 0 & 0 & -\frac{EA}{h} & 0 \\ -\frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & 0 & \frac{EI(4+\Psi)}{h(1+\Psi)} & \frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & 0 & \frac{EI(2-\Psi)}{h(1+\Psi)} \\ -\frac{12EI}{h^3(1+\Psi)} & 0 & \frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & \frac{12EI}{h^3(1+\Psi)} & 0 & \frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} \\ 0 & -\frac{EA}{h} & 0 & 0 & \frac{EA}{h} & 0 \\ -\frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & 0 & \frac{EI(2-\Psi)}{h(1+\Psi)} & \frac{6EI}{h^2(1+\Psi)} & 0 & \frac{EI(4+\Psi)}{h(1+\Psi)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ \phi_i \\ u_j \\ w_j \\ \phi_j \end{Bmatrix}, \quad (3.13)$$

kjer je:

T_i, N_i, M_i notranje sile v i -tem vozlišču (prečna sila, osna sila, upogibni moment)

T_j, N_j, M_j notranje sile v j -tem vozlišču (prečna sila, osna sila, upogibni moment)

u_i, u_j pomik v i/j -tem vozlišču elementa v smeri prečne sile T_i oz. T_j

w_i, w_j pomik v i/j -tem vozlišču elementa v smeri osne sile N_i oz. N_j

ϕ_i, ϕ_j zasuk v i/j -tem vozlišču elementa v smeri momenta M_i oz. M_j

Ψ	koeficient, določen z enačbo $\Psi = 1.2 \cdot \frac{E \cdot b^2}{G \cdot h^2}$
E	elastični modul materiala
G	strižni modul materiala
A	površina prečnega prereza elementa
I	vztrajnostni moment prereza elementa
h	višina elementa
b	širina elementa

Zmanjšanje togosti zaradi vpliva razpokanosti prerezov se lahko upošteva s koeficientom g , ki med analizo ostane konstanten. S koeficientom se zmanjšata upogibna in strižna trdnost prereza, njegova vrednost pa je po osnovnih nastavitvah enaka 0,5, kar je tudi skladno z Evrokodom 8 [6].

Čeprav je metoda ekvivalentnih okvirjev koristna, ima v določenih situacijah številne omejitve in morebitne težave, ki jih je treba upoštevati. Temelji na predpostavki, da so povezave med posameznimi elementi idealizirane in preproste ter, da so spoji popolnoma togi. V resničnih konstrukcijah so povezave lahko bolj zapletene, zato z uporabo metode ekvivalentnih okvirjev morda ne zagajemo pravega obnašanja teh povezav. Najbolj primerna je za preproste okvirne konstrukcije, kot so večnadstropne stavbe z doslednim ponavljanjem tlorisov etaž. V takih primerih so predpostavke metode o linearnem obnašanju in preprostih povezavah bolj verjetno izpolnjene. Uporaba metode ni primerna v primeru konstrukcij z nepravilno geometrijo ali kompleksnimi obremenitvami, saj mogoče ne zajame obnašanje dejanskega sistema. Druga pomembna predpostavka je, da so nosilci popolnoma poravnani s stebri. V primerih, ko nosilci ne ležijo na stebrih ali niso poravnani, ta predpostavka ne drži in posledično je rezultat analize lahko napačen. Pri takih neregularnih okvirjih nastopijo težave tudi pri prenosu obtežb na elemente. Metoda ekvivalentnih okvirjev običajno tudi predpostavlja, da so torzijski učinki na konstrukcijo zanemarljivi. V konstrukcijah, kjer je torzijsko obnašanje pomembno, kot npr. v zgradbah z nepravilnimi oblikami ali asimetričnimi obremenitvami, ima metoda lahko težave pri zajemu torzijskih učinkov [17].

Program 3Muri uporablja vnaprej določene materialne lastnosti in geometrijske karakteristike prereza za izračun mase posameznih konstrukcijskih elementov. Izračun izhaja iz gostote in prostornine materiala. Poleg lastne mase konstrukcijskih elementov program omogoča tudi podajanje dodatnih mas v obliki točkovnih ali ploskovnih obtežb, z integracijo vseh vnesenih mas pa sestavi globalno masno matriko.

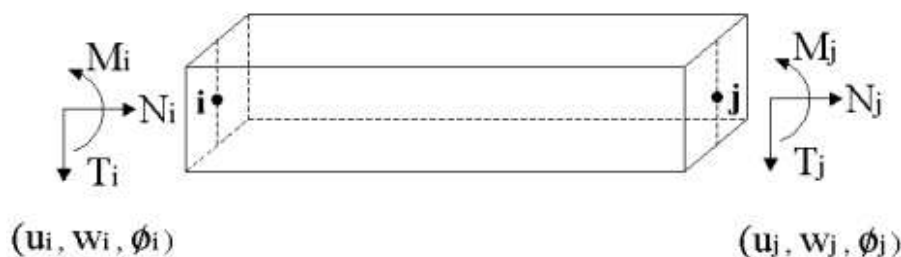
Lokalna vozlišča posameznih elementov, kjer ni presečišč, se obravnavajo kot 2D vozlišča, medtem, ko se presečišča ali povezave med elementi obravnavajo kot 3D vozlišča, s petimi prostostnimi stopnjami v globalnem koordinatnem sistemu (u_x , u_y , u_z , φ_x in φ_y) [16]. Navpične obremenitve se, ne glede na to, ali so posledica konstrukcije (lastna teža) ali zunanjih obtežb (npr. spremenljiva obtežba), upoštevajo z uvedbo dodatne mase v vozliščih. Porazdelitev dodatne mase se izračuna na podlagi vplivnega območja vsakega vozlišča, ki je odvisno od lokacije vozlišča in pogojev obremenjevanja. Masa iz 2D vozlišč posameznih elementov se

prenese na sosednja 3D vozlišča, s čimer se zmanjša število prostostnih stopenj konstrukcije, kar omogoča hitrejšo in učinkovitejšo analizo v bistveno krajšem času. Izračunane mase v programu 3Muri so skladne z Evrokodom 8 [4], [16]. Ta avtomatizirani pristop je časovno učinkovit in zmanjšuje možnost človeške napake, čeprav zahteva večjo natančnost s strani uporabnika, da se zagotovi fizična natančnost modela. S takim načinom razporedite mase se program 3Muri razlikuje od nekaterih drugih programov, kjer se ponavadi masa poda le v eni točki etaže, ki je zastopana s togo diafragmo.

3.2.2 Razširitev na nelinearni model

Razširitev na nelinearni model v programu 3Muri poteka avtomatsko. V primeru izbora nelinearne analize program zahteva podano armaturo za armiranobetonske nosilce in stebre. Pri razširitvi na nelinearni model nimamo možnosti vpogleda ali kontrole delovanja programa.

V programu 3Muri so nelinearni armiranobetonski elementi modelirani kot 2D ali 3D elementi, ki so idealizirani s predpostavko popolno elasto-plastičnih členkov, koncentriranih na koncih elementov (slika 13).



Slika 13: Armiranobetonski elementi v programu 3Muri [4].

Figure 13: Reinforced concrete elements in 3Muri [4].

Program omogoča simulacijo odziva konstrukcijskih elementov do porušitve. Strižne ter tlačne in natezne porušitve se štejejo za krhke porušitve, medtem ko se upogibna porušitev obravnava kot duktilna porušitev. V primeru kombinacije osne sile in upogibnega momenta se pri izračunu interakcijskega diagrama $M-N$ upošteva popolna sprijemnost med betonom in armaturnimi palicami. V primeru armiranobetonskih sten in nosilcev se upošteva dvoosno upogibno stanje. V tem primeru se interakcijski diagram M_x-M_y-N določi z ovojnico izračunanih odpornostnih momentov ločeno za obe smeri – M_x in M_y , ob upoštevanju osne sile in s predpostavko ustreznega razmerja med njima. Ob morebitni porušitvi vertikalnih elementov, tako pri krhki kot tudi duktilni, se element pretvori v palico, ki ne nudi odpornosti na potresno obtežbo, vendar pa še vedno lahko prenaša vertikalne obremenitve. Učinki teorije drugega reda niso upoštevani [18].

Pri upogibni porušitvi elementa je ključna njegova rotacijska kapaciteta, ki je določena skladno z italijanskimi standardi (aneks 11.A *Ordinance* 3274/03 [19]). Ta je enaka točki A.3.2.2 iz aneksa A iz SIST EN 1998-3:2005 [8]. Določena je z enačbo (3.1) iz razdelka 3.1.2.1.

3.2.3 Algoritem pri potisni analizi

Pred izvedbo potisne analize je potrebno določiti kontrolno vozlišče, katerega pomik se opazuje v nadaljevanju. V nadaljevanju program v skladu z definirano razporeditvijo vodoravnih sil v vozlišča konstrukcije začne nanašati obtežbo. Obnašanje konstrukcije je sprva

še elastično. Ko obtežba narašča, se pojavijo prve poškodbe v elementih. Pri nadaljnjem naraščanju horizontalne obtežbe se začnejo porušitve v elementih. Po porušitvi se elementi so upoštevani kot palice, ki prenašajo le še vertikalne obtežbe in ne več horizontalne. Ko se število elementov, ki dosežejo mejno nosilnost, poveča, je dosežen vrh potisne krivulje. Vrednost T_{max} na sliki 17 predstavlja doseženo maksimalno vodoravno nosilnost konstrukcije. Konec analize predstavlja točka, ko že večina elementov doseže porušitev in vodoravna sila v potisni krivulji predstavlja le še 80 % maksimalne vodoravne nosilnosti konstrukcije. Ta točka je definirana kot porušitev konstrukcije [20]. Na podlagi odnosa med horizontalno silo in pomikom se izriše krivulja, ki predstavlja potisno krivuljo konstrukcije, tj. obnašanje konstrukcije pri spreminjanju vodoravnih obremenitev [21].

Program 3Muri omogoča hkratno izvedbo 24 potisnih analiz, definiranih s štirimi smermi vodoravnih sil (+X, -X, +Y in -Y) z različnimi vrstami porazdelitve vodoravnih sil ter možnim upoštevanjem 5% ekscentričnosti mas. Program skupno omogoča tri različne vrste porazdelitve vodoravnih sil:

- Enakomerna porazdelitev vodoravnih sil ali *UNIFORM*, kjer so vodoravne sile sorazmerne masam po višini.
- Statična porazdelitev vodoravnih sil ali *STATIC FORCES*, kjer so vodoravne sile sorazmerne produktu mas in kot etaž.
- Modalna porazdelitev vodoravnih sil ali *MODAL*, kjer so vodoravne sile sorazmerne masi in modalnim pomikom v obravnavani smeri, določenim s predhodno modalno analizo.

Pred definicijo potisnih analiz v programu 3Muri je potrebno podati obtežni primer v obliki spektra pospeškov v oknu *Seismic Load*. Tu lahko izberemo opcijo elastičnega spektra pospeškov, ki je definiran v Evrokodu 8 ali pa ročno vnesemo poljuben spekter pospeškov (slika 14). Na podlagi definirane potresne obtežbe program kasneje tudi preveri odpornost ter razmerje med obremenitvijo in odpornostjo konstrukcije. Program omogoča kontrolo odpornosti za vsa tri mejna stanja poškodovanosti, ki so definirana v Evrokodu 8-3 [8]: mejno stanje omejitev poškodb (*DL*), mejno stanje velikih poškodb (*SD*) in mejno stanje blizu porušitve (*NC*). Za vsa tri mejna stanja je možno podati različne spektre pospeškov oz. vrednosti pospeška tal. Pozornost je potrebna pri izbiri tipa tal, saj je končni izračunani pospešek tal, pri nastopu izbranega mejnega stanja odvisen od faktorja tal *S*.

	NC	SD	DL
Verification	☒	☐	☐
a_{gR} [m/s ²]	2,70	2,70	0,00
Soil type	A	A	A
S	1,00	1,00	1,00
T_B [s]	0,15	0,15	0,15
T_C [s]	0,40	0,40	0,40
T_D [s]	2,00	2,00	2,00

Importance Factor: 1,00

Buttons: Load default, OK, Cancel, ?

Slika 14: Definicija potresne obtežbe v programu 3Muri.

Figure 14: Definition of seismic loads in 3Muri.

Naslednji korak je definicija potisnih analiz. Pri izboru analiz pod *Seismic Load* je možno izbrati enakomerno porazdelitev vodoravnih sil in eno izmed statične ali modalne porazdelitve vodoravnih sil. Za uporabo modalne porazdelitve je najprej potrebno opraviti modalno analizo konstrukcije ter definirati katere modalne oblike naj program upošteva za posamezne smeri obtežb (X ali Y). Na sliki 15 je prikazan način definiranja potisne analize v programu 3Muri.

No.	Compute analysis	Seism dir.	Seismic load	Eccentricity [cm]
1	☒	+X	Uniform	0,0
2	☒	+X	Modal distribution	0,0
3	☒	-X	Uniform	0,0
4	☒	-X	Modal distribution	0,0
5	☒	+Y	Uniform	0,0
6	☒	+Y	Modal distribution	0,0
7	☒	-Y	Uniform	0,0
8	☒	-Y	Modal distribution	0,0
9	☐	+X	Uniform	51,3
10	☐	+X	Uniform	-51,3
11	☐	+X	Modal distribution	51,3
12	☐	+X	Modal distribution	-51,3
13	☐	-X	Uniform	51,3
14	☐	-X	Uniform	-51,3
15	☐	-X	Modal distribution	51,3
16	☐	-X	Modal distribution	-51,3
17	☐	+Y	Uniform	45,0
18	☐	+Y	Uniform	-45,0
19	☐	+Y	Modal distribution	45,0
20	☐	+Y	Modal distribution	-45,0
21	☐	-Y	Uniform	45,0
22	☐	-Y	Uniform	-45,0
23	☐	-Y	Modal distribution	45,0
24	☐	-Y	Modal distribution	-45,0

Control node: Level [3] Level 3, Node 42, Displacement Use weighted average displacement

Definition by seism angle: Rot. angle 0 [°], Add, Increases, Delete

General data: Land level 0,0000 [cm], Maximum iteration no. 500, Self weight precision 0,0500

Computation parameters: Apply to All, Substeps 200, Precision 0,0050, Maximum displacement 20,00 [cm], Eccentricity [cm]

Select analysis: Seism dir., Seismic load, Eccentricity, Select all, Deselect all

Seismic load: ☐ Proportional static forces, ☒ Modal distribution

Buttons: OK, ?

Slika 15: Definicija potisnih analiz v programu 3Muri.

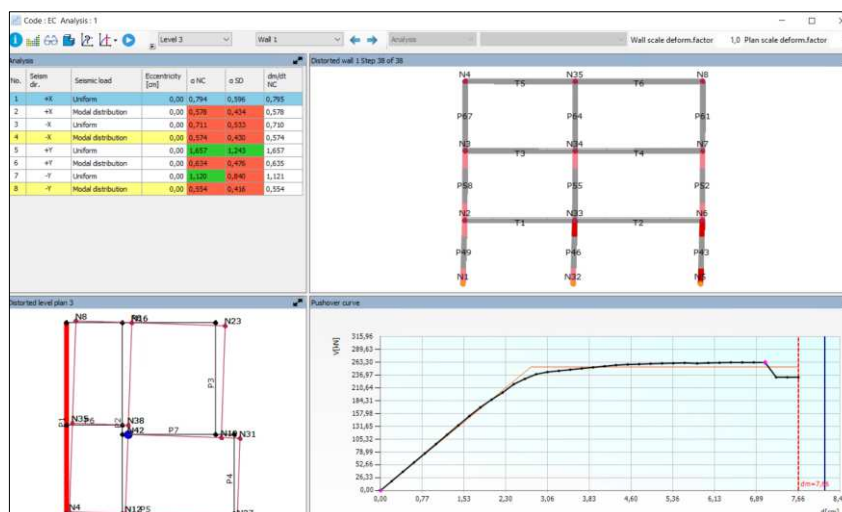
Figure 15: Definition of pushover analyses in 3Muri.

Na vrhu ukaznega okna je potrebno podati informacije glede izbire kontrolnega vozlišča. Za razliko od programa SAP2000, kjer lahko izberemo poljubno točko etaže, v programu 3Muri lahko izbiramo le med vozlišči eksplicitno modeliranih elementov konstrukcije. Poleg tega 3Muri s pomočjo izbire opcije *Use weighted average displacement* pod vrstico *Displacement* omogoča, da narišemo potisno krivuljo na podlagi povprečnega uteženega pomika vseh vozlišč izbrane etaže. Navodila programa 3Muri navajajo, da ta točka v primeru definirane toge diafragme ustreza pomiku točke v centru mase etaže [4].

Točnih informacij o primerni izbiri kontrolnega vozlišča program 3Muri ne podaja, a se na spletni strani podjetja S.T.A. Data da zaslediti priporočilo v obliki odgovora na pogosto zastavljena vprašanja (ang. *frequently asked questions* ali FAQ). Priporočilo pravi, da je kontrolno vozlišče potrebno izbrati glede na najbolj deformabilno točko konstrukcije. Ker pred izvedbo potisne analize ta točka še ni znana, jo je potrebno določiti na podlagi inženirskih izkušenj. Za vsako smer izvedbe potisne analize je priporočljivo izbrati drugo kontrolno vozlišče, saj obnašanje konstrukcije ni enako v obeh smereh [22].

Poleg definicije smeri in razdelitve vodoravnih sil nam program omogoča spremembo nekaterih drugih parametrov. Pod *General Data* lahko spremenimo maksimalno število iteracij, ki jih program izvede, preden ustavi numerične reševanje, če ni dosežena konvergenca. Spremenimo lahko tudi natančnost upoštevanja lastne teže. Pod *Computation parameters* pa lahko spremenimo število izvedenih korakov ter velikost koraka pri krmiljenju pomika med analizo. Velikost koraka mora biti dovolj majhna, da lahko točno zajamemo razvoj poškodb, pa tudi, da lahko rezultati nelinearne statične analize konvergirajo. Pod opcijo *Maximum Displacement* pa, podobno kot v programu SAP2000, določimo maksimalni pomik opazovane kontrole točke.

Rezultate potisne analize lahko pogledamo s pritiskom na opcijo *Pushover analysis verification*. V novem oknu nam program prikaže izrisano potisno krivuljo, kot tudi razvoj poškodb v elementih konstrukcije (slika 16).

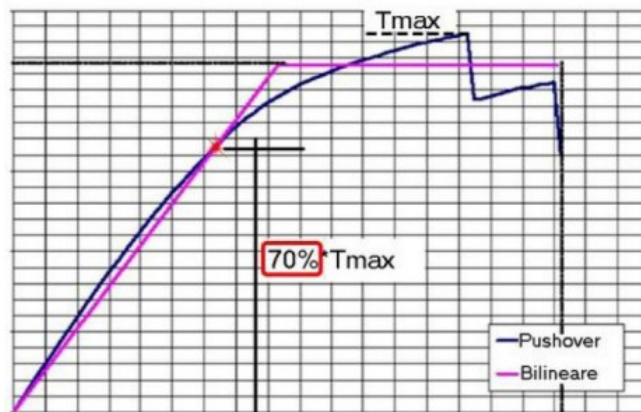


Slika 16: Potisna krivulja in razvoj poškodb v programu 3Muri.

Figure 16: Pushover curve and damage development in 3Muri.

Idealizacija potisne krivulje v programu 3Muri poteka avtomatsko in skladno z metodo N2. Po osnovnih nastavitvah programa je idealizirani mejni pomik določen s točko, ko nosilnost

konstrukcije pade na 80 % maksimalne nosilnosti. Presečišče potisne krivulje in bilinearne idealizacije je definirano pri 70 % vrednosti maksimalne prečne sile T_{max} . Obe vrednosti se lahko v nastavitvah tudi poljubno drugače definira [4].



Slika 17: Idealizacija potisne krivulje v programu 3Muri [4].

Figure 17: Idealization of the pushover curve in 3Muri [4].

3.2.4 Algoritem pri izračunu mejnih pospeškov

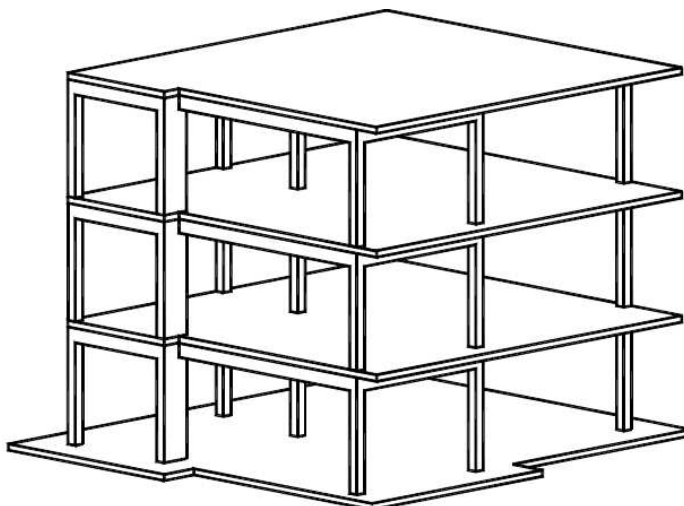
Program 3Muri samodejno določi pospešek tal a_g , pri katerem konstrukcija doseže izbrano mejno stanje, neodvisno od definiranega spektra pospeškov. Točne enačbe v ozadju programa niso podane, a je po naši interpretaciji priročnika programa [4] pospešek določen skladno z Evrokodom 8 in metodo N2. To smo v nadaljevanju tudi preverili.

4 OPIS OBRAVNAVANE KONSTRUKCIJE IN MODELOV ZA LINEARNO ELASTIČNO ANALIZO

4.1 Opis stavbe SPEAR

V magistrski nalogi obravnavamo konstrukcijo, ki je bila testirana v okviru evropskega raziskovalnega projekta SPEAR (Seismic performance assessment and rehabilitation of existing buildings). Gre za trinadstropno armiranobetonsko okvirno konstrukcijo v realni velikosti (slika 18), ki jo imenujemo stavba SPEAR [1].

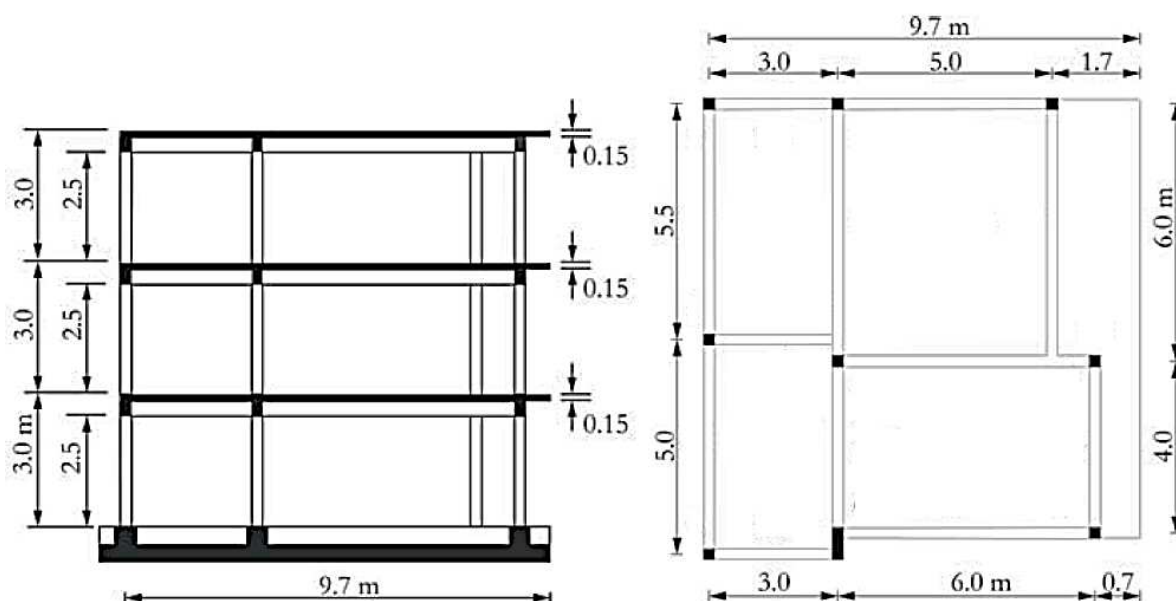
Testno konstrukcijo je projektiral Michael N. Fardis leta 2002 in predstavlja tip starejših konstrukcij v Grčiji in drugod po Sredozemlju, brez načrtovane potresne odpornosti. Konstrukcija je bila zasnovana samo za gravitacijske obremenitve z uporabo standardov za betonske konstrukcije, ki je veljal v Grčiji med letoma 1954 in 1995, skladno z gradbeno prakso in materiali, uporabljenimi v Grčiji v zgodnjih 70-ih letih. Tudi konstrukcijska konfiguracija je značilna za gradnjo tistega časa [5].



Slika 18: 3D pogled na stavbo SPEAR [5].

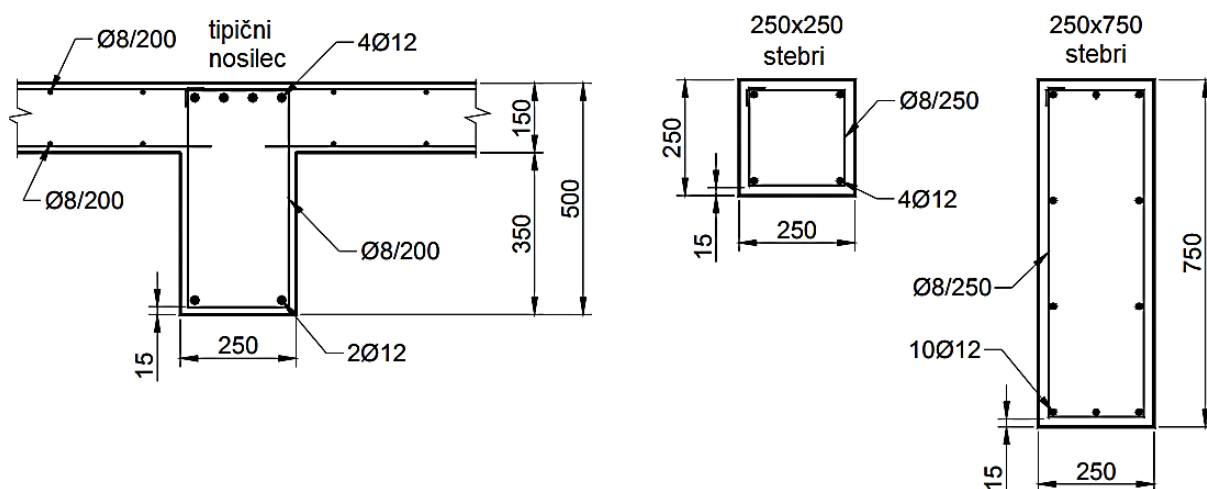
Figure 18: 3D view of the SPEAR building [5].

Dimenzije konstrukcije so prikazane na sliki 19. Etažna višina je 3 m, z 2,5 m svetle višine stebrov med nosilci. Dimenzije večine stebrov so 25/25 cm. Izjema je le spodnji, srednji stebel, ki je dimenzij 25/75 cm. Širina nosilcev je enaka 25 cm, upoštevajoč debelino plošče pa je njihova višina enaka 50 cm. Srednja tlačna trdnost betona je $f_c = 25 \text{ N/mm}^2$. Projektne gravitacijske obremenitve plošč znašajo $0,5 \text{ kN/m}^2$ za zaključne obloge ter 2 kN/m^2 za koristno obtežbo. V vsaki etaži je prisotna armiranobetonska plošča debeline 150 mm, ki je vlita monolitno in armirana s palicami 8 mm na medsebojnem razponu 200 mm. Vzdolžna armatura stebrov je sestavljena iz ravnih palic debeline 12 mm, ki so prekrivno spojene na 400 mm v vsaki etaži, vključno s prvo. Spojene palice so ukrivljene pod kotom 180° . Stremena stebrov so palice premera 8 mm, nameščena pa so na razponu 250 mm ter zaključena pod kotom 90° . Tipična vzdolžna ojačitev nosilcev je prikazana na sliki 20. Sestavljena je iz dveh palic premera 12 mm na dnu prereza, ki sta zasidrani s kavli pod kotom 180° na skrajnem koncu stebra. Zgornjo armaturo predstavljata dve palici premera 12 mm, ki sta zasidrani na koncu stebrov s kavli pod kotom 180° , in drugih dveh palic premera 12 mm, ki sta upognjeni navzgor proti nosilcem. Slednji se na zunanjih stikih sidrajo z zavoji navzdol v spodnjo jedro, na notranjih stikih pa se nadaljujejo v naslednji razpon. Za nekatere težje obremenjene nosilce se uporablja dodatna vzdolžna armatura (palice premera 20 mm). Stremena gred so sestavljena iz palic premera 8 mm na razdalji 200 mm, zaključena so pod kotom 90° . Srednja meja tečenja armature znaša $f_{ym} = 459 \text{ MPa}$ za palice premera 12 mm in $f_{ym} = 377 \text{ MPa}$ za palice premera 20 mm [5]. Slika 20 prikazuje prerez nosilcev in stebrov in tipično armaturo le teh.



Slika 19: Prerez in tloris etaž stavbe SPEAR [23].

Figure 19: Section and floor plan of the SPEAR building [23].



Slika 20: Tipična armatura nosilcev in stebrov [23].

Figure 20: Typical reinforcement of beams and columns [23].

Na podlagi ugotovitev iz tretjega poglavja smo se v nadaljevanju odločili za izvedbo treh različnih modelov konstrukcije SPEAR. S pomočjo prvega modela (model A) smo hoteli izvesti primerjavo najbolj poenostavljenega modela konstrukcije v obeh programih. Pri drugem modelu (model B) smo hoteli izkoristiti in preveriti največje zmožnosti modeliranja konstrukcije SPEAR v programu 3Muri. Potrebne poenostavitve smo potem upoštevali tudi v programu SAP2000. Tretji model (model C) pa je bil izdelan samo v programu SAP2000. Modeliran je bil brez poenostavitev v zasnovi, z njim pa smo želeli ovrednotiti vplive poenostavitev v modelih A in B na natančnost analize.

Pri modeliranju konstrukcije SPEAR so bili v obeh programih uporabljeni prostorski modeli. Evrokod 8-1 v razdelku 4.3.3.1 [6] navaja, da je dovoljeno konstrukcijo analizirati z uporabo dveh ravninskih modelov, od katerih vsak velja za eno od glavnih smeri, če so izpolnjeni vsi pogoji, navedeni v (8). V nasprotnem primeru, je potrebno uporabiti prostorski model, pri čemer se lahko opravi dve neodvisni analizi z vodoravno obtežbo v posamezni glavni smeri.

4.2 Linearni elastični modeli v programu SAP2000

Podatki o konstrukciji in uporabljenih materialih so podani v razdelku 4.1.

Pri modeliranju konstrukcije so bili uporabljeni prostorski modeli. V vseh treh modelih so bile uporabljene mere med osmi nosilec in stebrov. Tako smo modelirali prvo etažo z višino 2,75 m, drugo in tretjo pa z višino 3,0 m. To je tudi skladno z načinom modeliranja v analizi Dolška in Fajfarja [23].

Zaradi načina generiranja in upoštevanja mase v programu 3Muri (opisano v razdelku 3.2.1), smo se odločili, da tudi v programu SAP2000 ne modeliramo mase le v eni točki, temveč pustimo programu, da sam določi lastno težo elementov in jo upošteva vzdolž teh. Prav tako smo na nivoju vsake etaže upoštevali vpliv stalne in koristne obtežbe ter težo armiranobetonske plošče kot porazdeljeno obtežbo na površino. Teža armiranobetonske plošče je tako bila enaka $0,15 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3 = 3,75 \text{ kN/m}^2$. Porazdeljeno obtežbo smo upoštevali tako, da smo v programu SAP2000 definirali ploskovni element tipa membrana. Med posameznimi gredami smo narisali končni element, kateremu smo potem s pomočjo ukaza *Assign* → *Area Loads* → *Uniform to Frame (Shell)* pripisali obtežbo, ki je podana v razdelku 4.1. Pomembno je bilo, da smo obkljukali opcijo *Two-Way*, da nam je obtežbo preko vseh stranic ploskovnega končnega elementa preneslo na grede. Ta način podajanja obtežbe je skladen z navodili Žižmonda in Dolška [12].

Vpliv monolitnih armiranobetonskih plošč smo upoštevali s pomočjo toge diafragme na nivoju posamezne etaže.

Uporabljena karakteristična tlačna trdnost betona za vse tri modele je bila enaka $f_{ck} = 16,9 \text{ MPa}$. Podane materialne karakteristike za beton v programu SAP2000 so prikazane na sliki 21.

Slika 21: Materialne karakteristike uporabljenega betona v programu SAP2000.

Figure 21: Material characteristics of the used concrete in SAP2000.

Vsi nosilni elementi v programu SAP2000 so bili modelirani s pomočjo linijskih elementov. Uporabljeni prerezi v posameznih modelih so prikazani v razdelkih 4.2.1, 4.2.2 in 4.2.3. Stebri na dnu konstrukcije so bili togo vpeti.

Za vse elemente smo tudi upoštevali razpokanost betonskega prereza. Skladno z Evrokodom 8 smo zmanjšali strižno in upogibno nosilnost prerezov na 50 % prvotne vrednosti (slika 22). Prav tako smo skladno z Evrokodom 2 upoštevali, da je Poissonov količnik betona enak 0 [14].

Slika 22: Zmanjšana strižna in upogibna nosilnost prerezov.

Figure 22: Reduced shear and bending stiffness of sections.

4.2.1 Model A

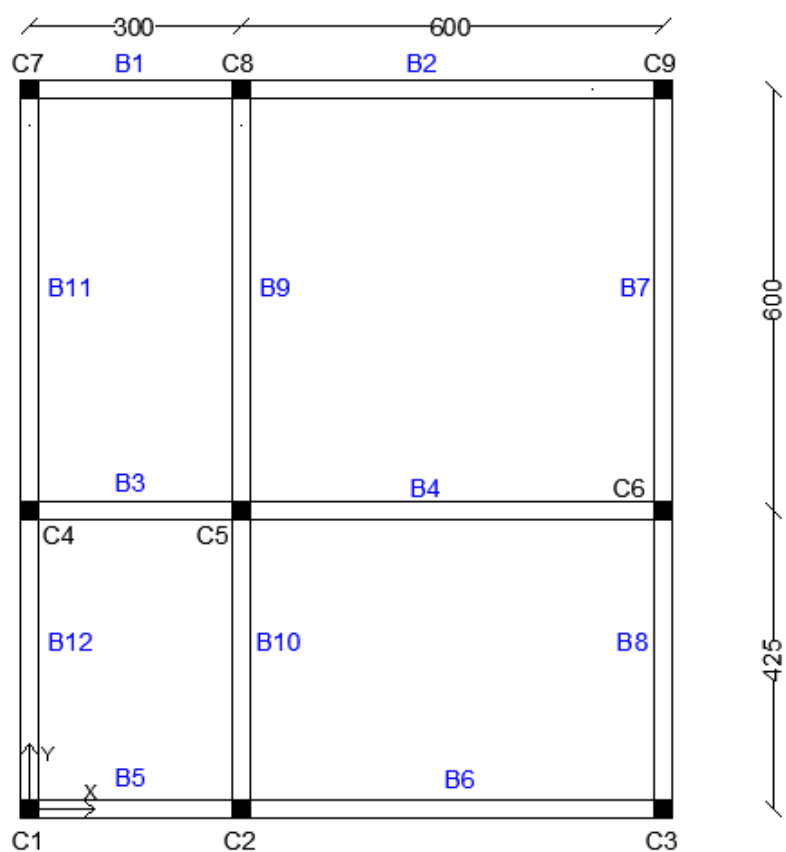
V prvem modelu oz. modelu A smo hoteli konstrukcijo čim bolj poenostaviti. Odločili smo se, da osi konstrukcije zamaknemo tako, da so vsi nosilci obojestransko vpeti v stebre in se na ta način v programu 3Muri izognemo težavam pri generiranju ekvivalentnih okvirjev. S tem smo zmanjšali število končnih elementov nosilcev iz 14 na 12.

Prav tako smo se odločili, da v modelu A ne upoštevamo vpliva efektivnih širin pasnice nosilcev. To pomeni, da so bili vsi nosilci modelirani s pravokotnim prerezom 25x50 cm.

Tretja poenostavitev je bila ta, da smo spremenili dimenzije stebra C2 iz 25x75 cm na 25x25 cm. Tako imajo sedaj vsi stebri v konstrukciji enak prerez. Na ta način smo zmanjšali nesimetričnost konstrukcije čez os X.

V modelu A smo se tudi odločili, da ne upoštevamo balkona in njegovega vpliva na vzhodni strani konstrukcije.

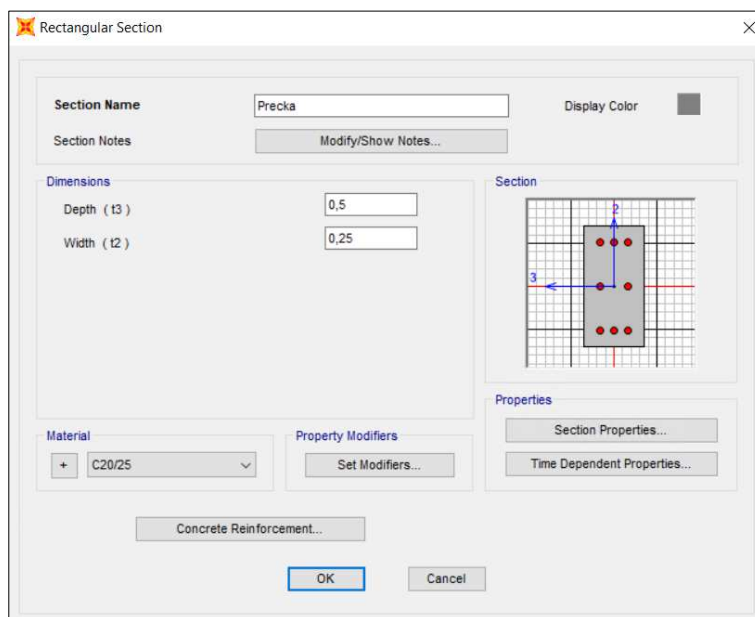
Tloris modela A in oznake stebrov in nosilcev so prikazani na sliki 23.



Slika 23: Tloris konstrukcije za model A.

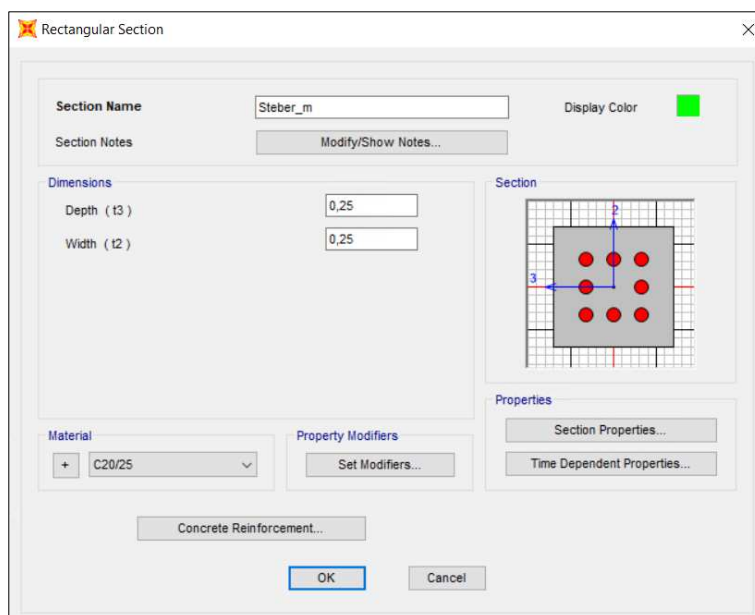
Figure 23: Floor plan of the model A.

Na slikah 24 in 25 so prikazani podatki o prerezu za nosilce in stebre. Vsi stebri so bili istega prereza, enako velja tudi za nosilce.



Slika 24: Prerez nosilcev za model A v programu SAP2000.

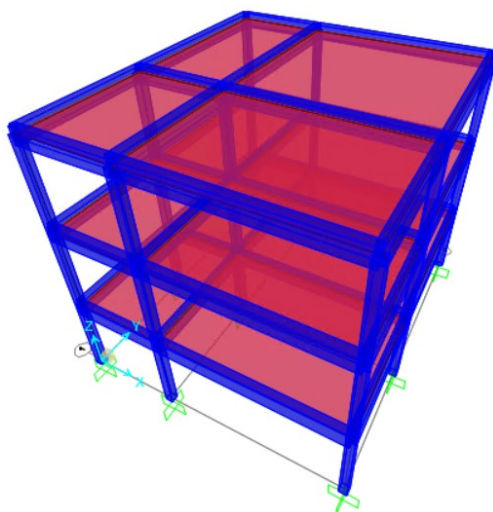
Figure 24: Beam cross section of the model A in SAP2000.



Slika 25: Prerez stebrov za model A v programu SAP2000.

Figure 25: Column cross section of the model A in SAP2000.

Dobljen matematični model A v programu SAP2000 je prikazan na sliki 26.



Slika 26: Matematični model A v programu SAP2000.

Figure 26: Mathematical model A in SAP2000.

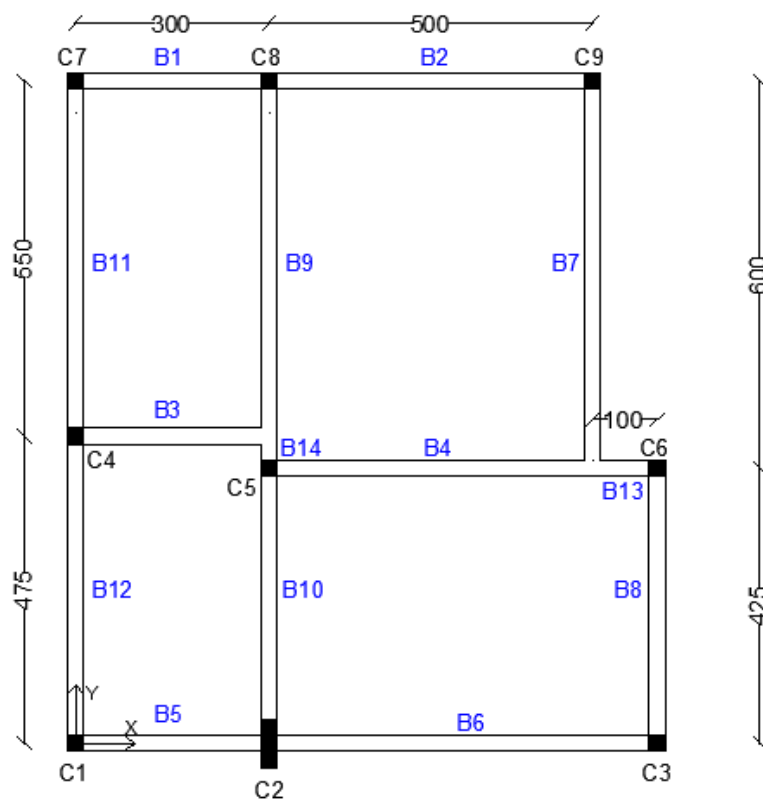
4.2.2 Model B

S pomočjo modela B smo hoteli preizkusiti maksimalne zmožnosti modeliranja programa 3Muri. Z razliko od modela A, kjer smo namerno premaknili osi nosilcev in stebrov, da pri metodi generiranja ekvivalentnih okvirjev v programu 3Muri dobimo ustrezne okvirje, kjer so vsi nosilci vpeti v stebre, smo se pri modelu B odločili, da pustimo osi takšne, kot so. Edina sprememba je bila izvedena pri skrajno spodnji osi, zaradi ekscentričnega naleganja nosilcev B5 in B6 na steber C2. Os je bila zamaknjena v središče stebra C2, enako kot pri modelu A. Program 3Muri zaradi uporabe metode ekvivalentnih okvirjev omogoča upoštevanje povezave med stebri in nosilci le, če se osi stebra in nosilca stikujeta, s čimer je posledično lahko togost konstrukcije podcenjena.

Druga poenostavitev pri modelu B je bila ta, da smo prereze nosilcev upoštevali samo kot pravokotne prereze, brez upoštevanja efektivnih širin nosilcev, saj nam program 3Muri ne omogoča modeliranja T-prerezov.

Enako kot pri modelu A tudi v tem modelu nismo upoštevali balkona in njegovega vpliva na vzhodni strani konstrukcije.

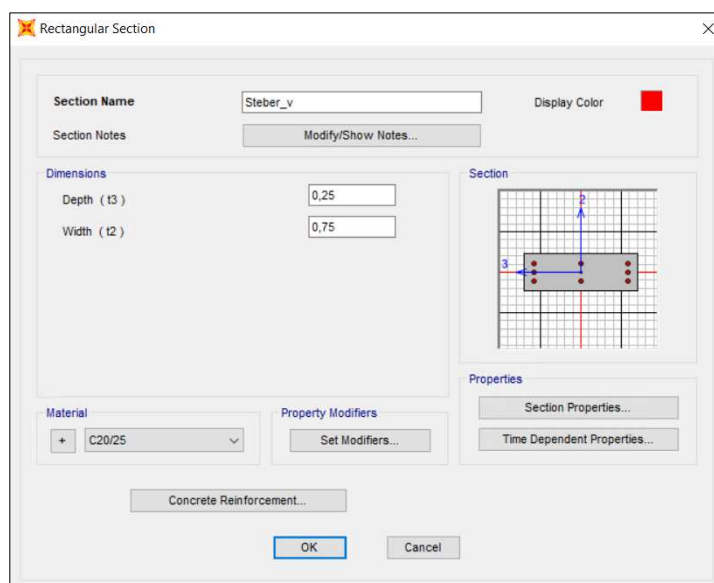
Tloris modela B je prikazan na sliki 27.



Slika 27: Tloris konstrukcije za model B.

Figure 27: Floor plan of the model B.

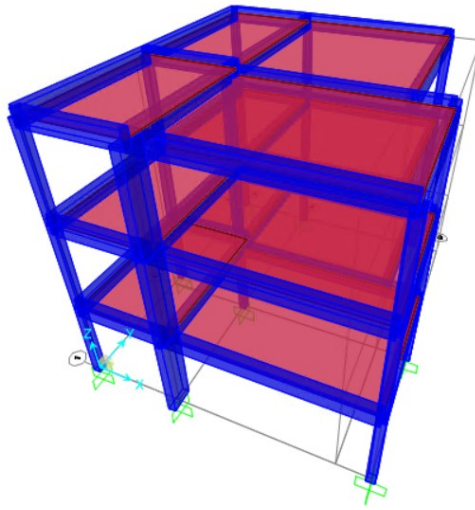
Enako kot pri modelu A so bili vsi nosilci modelirani z enakim prerezom, ki je prikazan na sliki 24. Vsi stebri so prav tako modelirani enako kot v modelu A (slika 25), z izjemo stebra C2, ki je v tem modelu upoštevan skladno z razdelkom 4.1, torej je stebel C2 dimenzij 25/75 cm. Karakteristike prereza stebra C2 so prikazane na sliki 28.



Slika 28: Prerez stebra C2 za model B v programu SAP2000.

Figure 28: Column C2 cross section of the model B in SAP2000.

Matematični model B v programu SAP2000 je prikazan na sliki 29.



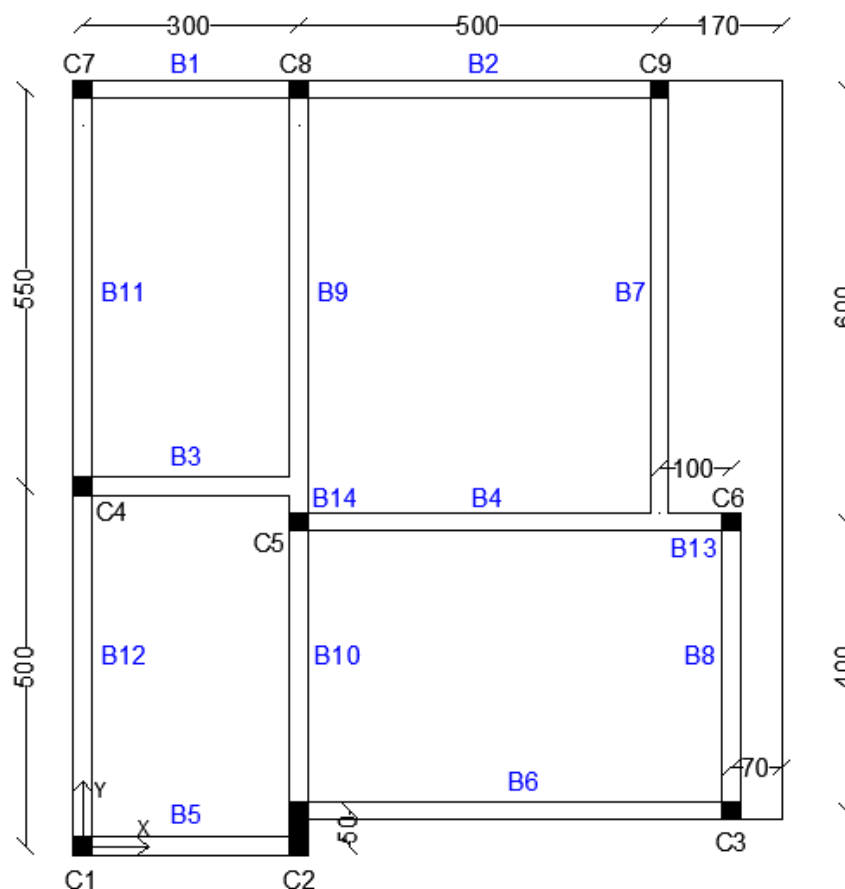
Slika 29: Matematični model B v programu SAP2000.

Figure 29: Mathematical model B in SAP2000.

4.2.3 Model C

Model C je bil izdelan z namenom, da analiziramo konstrukcijo brez poenostavitev v zasnovi. Model smo lahko samo izdelali v programu SAP2000, saj smo maksimalne zmožnosti programa 3Muri za modeliranje konstrukcije SPEAR že izkoristili pri modelu B.

Tloris konstrukcije in oznake nosilcev in stebrov so prikazani na sliki 30. Osi nosilnih elementov nismo premikali ali zamikali. Pri modelu C je bil upoštevan tudi vpliv balkona na vzhodni strani konstrukcije.



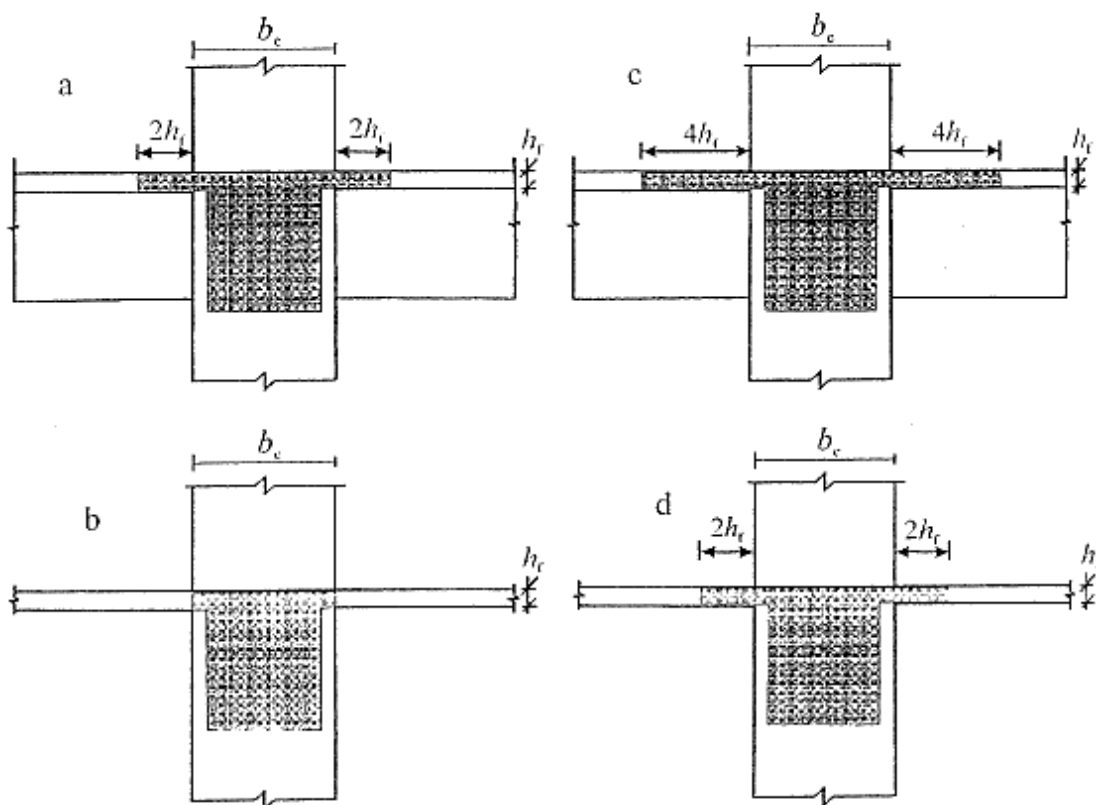
Slika 30: Tloris konstrukcije za model C.

Figure 30: Floor plan of the model C.

Stebri so bili modelirani enako kot v modelu B. Vsi stebri so dimenzij 25/25 cm, z izjemo stebra C2, ki je dimenzij 25/75 cm.

V modelu C smo modelirali nosilce tako, da smo upoštevali tudi efektivne širine pasnic, ki pripadajo nosilcem iz armiranobetonske plošče. Modelirani so bili s T-prerezi.

Efektivno širino pasnice nosilca lahko določimo in modeliramo na več različnih načinov: po priporočilih SIST EN 1992-1-1:2005 [14], SIST EN 1998-1:2005 [6], Paulay in Priestley [24] in podobno. V primeru naše konstrukcije smo se odločili za upoštevanje priporočil iz razdelka 5.4.3.1.1 standarda SIST EN 1998-1:2005 [6] (slika 31). Širino stojine nosilca b_{eff} lahko predpostavimo po sledečih priporočilih:



Slika 31: Sodelujoča širina pasnice b_{eff} nosilcev, ki so priključeni na stebre [6].

Figure 31: Effective flange width b_{eff} for beams framing into columns [6].

- Pri primarnih potresnih nosilcih ob zunanjih stebrih upoštevamo, da je sodelujoča širina pasnice nosilca enaka širini stebra b_c , če v prečni smeri ni priključene grede (slika 31, primer b). Če je v prečni smeri priključena greda, pa se lahko sodelujoča širina pasnice poveča za največ $2h_f$ na vsaki strani, kjer je priključen nosilec (slika 31, primer a).
- Pri primarnih potresnih nosilcih ob notranjih stebrih se lahko v prejšnji točki navedene sodelujoče širine povečajo še za $2h_f$ na vsaki strani nosilca (slika 31, primera c in d).

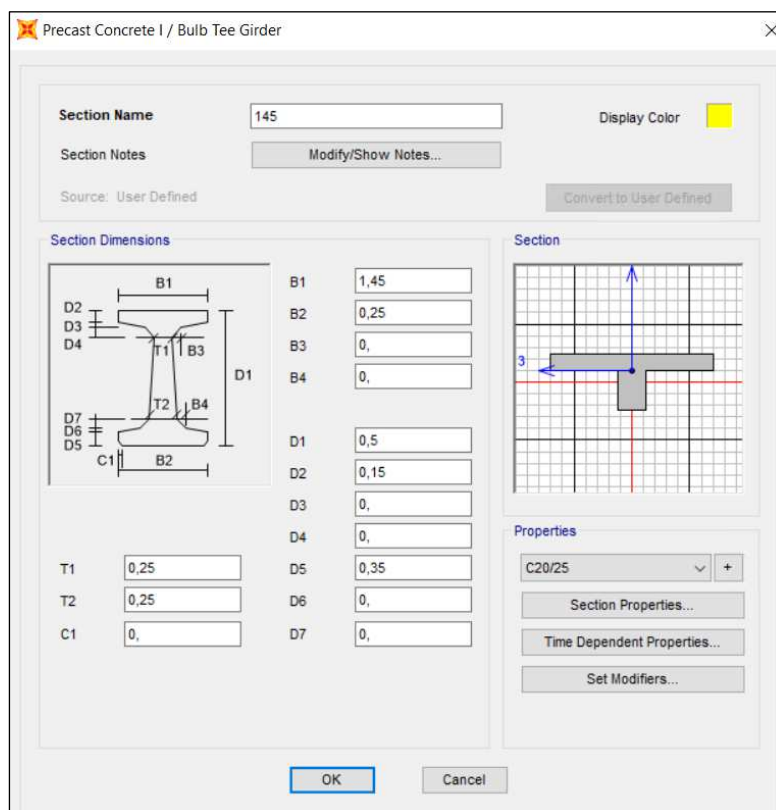
V primeru naše konstrukcije se pojavi nekaj primerov, kjer nosilec ni priključen na steber, temveč na drug nosilec. V takih primerih Evrokod 8 ne podaja navodil za upoštevanje efektivne širine pasnice nosilca. Predpostavili smo, da v takih primerih vseeno upoštevamo priporočila kot, da bi bil nosilec priključen na steber. Izračunane in upoštevane efektivne širine nosilcev so podani v preglednici 1. S podatki iz preglednice 1 smo modelirali prereze nosilcev v programu SAP2000. Oznake nosilcev so prikazane na sliki 30. Konci nosilcev (i in j) so skladni s koordinatnim sistemom iz iste slike, kjer je i začetek elementa in j njegov konec.

Preglednica 1: Efektivne širine pasnice nosilcev.

Table 1: Effective beam flange width.

Nosilec (i)	ef. širina [cm]	Nosilec (j)	ef. širina [cm]
B1	55	B1	85
B2	85	B2	55
B3	85	B3	145
B4	145	B4	85
B5	55	B5	85
B6	85	B6	55
B7	145	B7	55
B8	55	B8	85
B9	85	B9	85
B10	55	B10	85
B11	85	B11	55
B12	55	B12	85
B13	85	B13	55
B14	85	B14	85

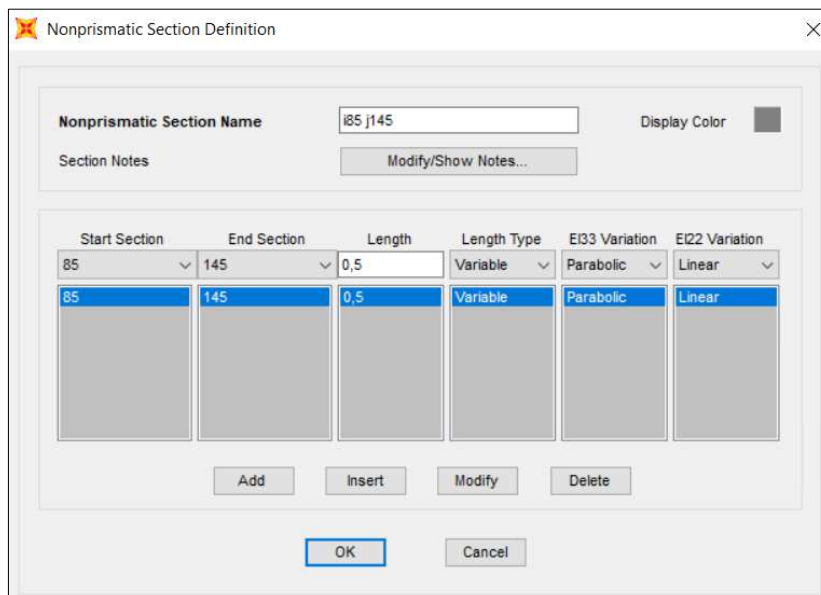
Na sliki 32 je prikazan način modeliranja T-prereza za nosilec z efektivno širino 145 cm. Ostali nosilci so bili modelirani na enak način.



Slika 32: Modeliranje T-prereza v programu SAP2000.

Figure 32: T-section modeling in SAP2000.

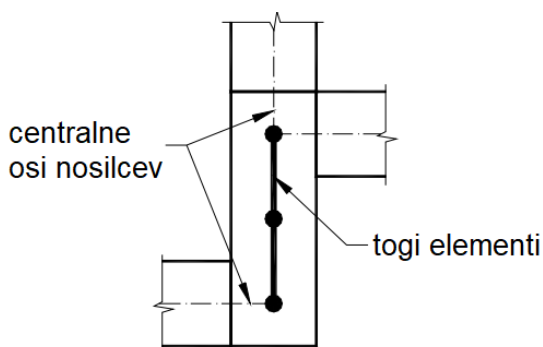
Da bi potem lahko definirali elemente s spreminjajočimi se prerezi, je potrebno ustvariti nov element, kateremu se dodelijo lastnosti definiranega prereza na i in j koncu. Primer je prikazan na sliki 33.



Slika 33: Modeliranje elementa s spreminjajočim se prerezom.

Figure 33: Modeling of elements with changing cross sections.

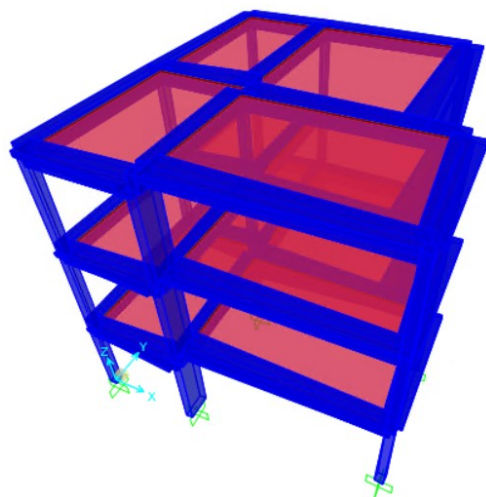
Posebno pozornost smo morali nameniti tudi detajlu, kjer se stikajo steber C2 ter nosilca B5 in B6. Zaradi ekscentričnega naleganja nosilcev na steber smo uporabili toge elemente pri modeliranju povezave nosilcev, kot je prikazano na sliki 34. To je tudi skladno z načinom modeliranja stika iz analize Dolška in Fajfarja [23].



Slika 34: Modeliranje detajla pri stebri C2 dimenzij 25x75 cm.

Figure 34: Detail modelling of the column C2 25x75 cm.

Matematični model C v programu SAP2000 je prikazan na sliki 35.



Slika 35: Matematični model C v programu SAP2000.

Figure 35: Mathematical model C in SAP2000.

4.3 Linearni elastični model v programu 3Muri

Kot opisano v razdelku 4.1, smo v programu 3Muri izdelali samo dva modela – model A in B. Model A je bil najbolj poenostavljen, medtem ko smo pri modelu B izkoristili največje zmožnosti za modeliranje konstrukcije SPEAR v programu 3Muri. Modela C v programu na žalost ni bilo možno izdelati, saj program nekaterih možnosti, potrebnih za izdelavo dejanskega modela, ne ponuja. Pri modeliranju konstrukcije SPEAR so bili uporabljeni prostorski modeli.

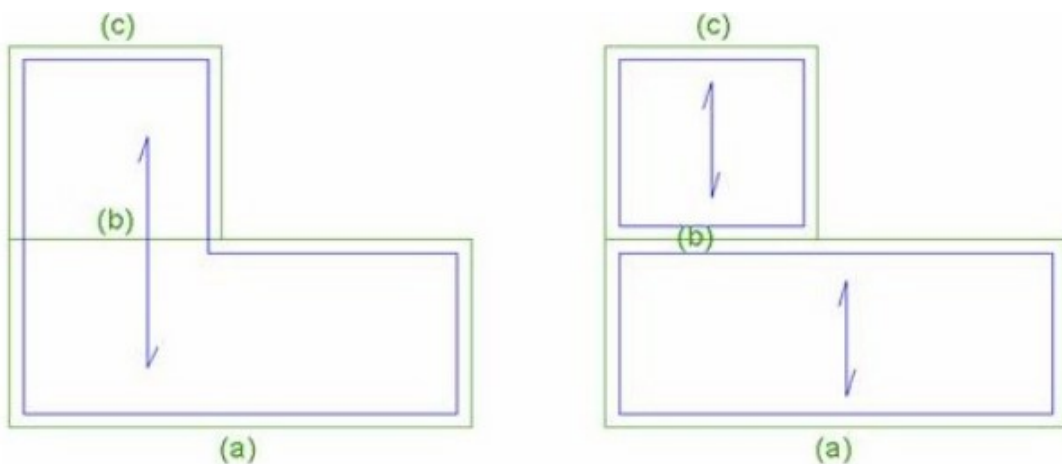
Modeliranje v programu 3Muri poteka nekoliko drugače kot v programu SAP2000. Konstrukcijo najlažje modeliramo tako, da v programu AutoCAD narišemo tloris osi nosilnih elementov ter načrt shranimo v tipu datoteke *.dxf*. To datoteko potem uvozimo v program 3Muri ter poljubno spremenimo merilo (izhodiščno so nastavljeni centimetri). Pod oknom *Alignments* potem po uvoženih oseh potegnemo linijske elemente ter na mestih stebrov podamo točke (v presečiščih osi se točke narišejo samodejno). V naslednjem koraku nastavimo etažno višino. Pod oknom *Structure* potem linijskim elementom dodelimo prereze, prerezom pa materialne karakteristike. V primeru armiranobetonskih elementov v tem oknu podamo tudi vzdolžno in prečno armaturo. S pomočjo ukaza *Column* pa lahko na enak način definiramo stebre v prej podanih točkah. Za vsako etažo je potem možno tudi izbrati tip stropne konstrukcije, pri čemer izbiramo med več tipskimi stropovi.

Program 3Muri generira in upošteva maso avtomatsko. Več o tem je napisano v razdelku 3.2.1. Lastno težo elementov program upošteva samodejno. Stalno in koristno obtežbo ter težo armiranobetonske plošče smo v našem primeru upoštevali tako, da smo v vsaki etaži definirali togo ploščo, kateri smo definirali obojestranski raznos obtežbe. Na togo ploščo smo potem nanесли ploskovno obtežbo. Z izbiro takšnega tipa stropne konstrukcije smo tudi upoštevali osno togost armiranobetonske plošče na nivoju etaž. Primer definiranja plošče je prikazan na sliki 36.

Slika 36: Definiranje armiranobetonske plošče v programu 3Muri.

Figure 36: Definition of a reinforced concrete slab in 3Muri.

Pri risanju toge plošče je dovolj, da poudarimo zunanji obod objekta (slika 37). Program samodejno prepozna nosilne konstrukcijske elemente, na katere potem razdeli maso [4]. Več o temu je napisano v razdelku 3.2.1.



Slika 37: Risanje toge plošče v programu 3Muri [12].

Figure 37: Drawing of rigid slabs in 3Muri.

Materialne karakteristike so podane v razdelku 4.1. Uporabljena karakteristična tlačna trdnost betona za vse tri modele je bila enaka $f_{ck} = 16,9$ MPa. Podane materialne karakteristike za beton v programu 3Muri so prikazane na sliki 38.

Property	Value
E [kN/cm ²]	2900
G [kN/cm ²]	1208,3
w [kN/m ³]	25
f _{cm} [kN/m ²]	25000
f _{ck} [kN/m ²]	16900

Slika 38: Materialne karakteristike uporabljenega betona v programu 3Muri.

Figure 38: Material characteristics of the used concrete in 3Muri.

Za vse elemente smo upoštevali razpokanost betonskega prereza. Na sliki 38 je razvidno, da je označena opcija *Cracked stiffness*, s katero smo zmanjšali strižno in upogibno togost prerezov za 50 %. V nastavitvah programa se da ta vrednost tudi poljubno spremeniti.

Ko je etaža narisana, jo lahko enostavno kopiramo in ji po potrebi tudi spremenimo etažno višino v oknu *Levels management* (slika 39). V vseh treh modelih so bile uporabljene dimenzije med osmi nosilcev in stebrov. Etažna višina prve etaže je bila enaka 2,75 m, druge in tretje pa 3,0 m.

	Level	Visible	Description	Height [cm]	Elevation [cm]	Q wind [kN/m ²]	Roof
	1	☒	Level 1	275	275	0,00	☐
	2	☒	Level 2	300	575	0,00	☐
▶	3	☒	Level 3	300	875	0,00	☐

Slika 39: Definirane etažne višine v programu 3Muri.

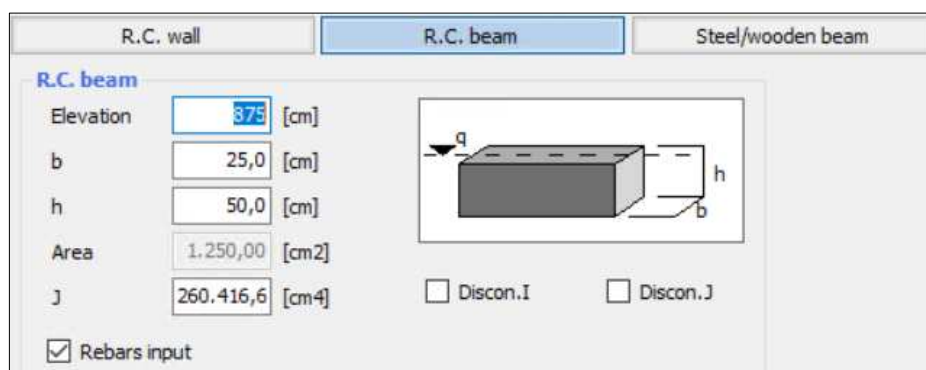
Figure 39: Defined floor heights in 3Muri.

Program 3Muri omogoča le podajanje pravokotnih prerezov armiranobetonskih elementov. Podajanje T ali I-prerezov ni na voljo. Program sicer ponuja možnost spreminjanja vztrajnostnega momenta, a se pri generiranju ekvivalentnih okvirjev ta vnos ponovno samodejno izračuna iz podane višine in širine elementa in tako povozi morebitna sprememba. Prav tako v programu ni mogoče definirani ločenih prerezov za konca elementa *i* in *j*.

4.3.1 Model A

Model A je modeliran, kot opisano v razdelku 4.3. Tloris modela A je enak kot v programu SAP2000 (slika 23). Upoštewane poenostavitve so opisane v razdelku 4.2.1.

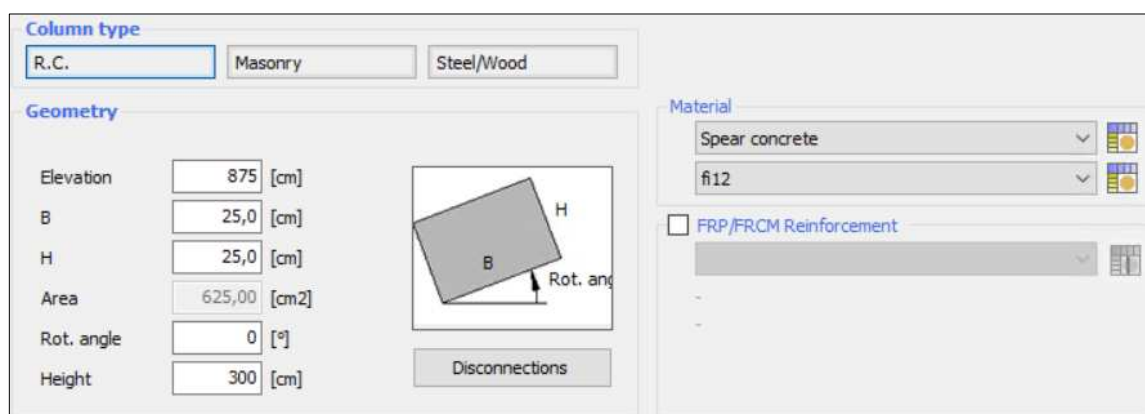
Prerezi vseh nosilcev so enaki, in sicer dimenzij 25/50 cm. Način podajanja prerezov za nosilce je prikazan na sliki 40.



Slika 40: Prerez nosilcev za model A v programu 3Muri.

Figure 40: Beam cross section for the model A in 3Muri.

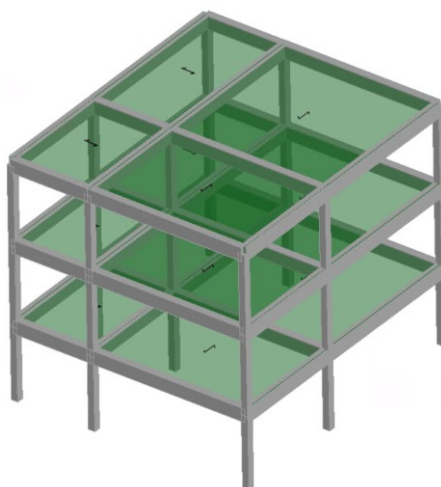
Tudi vsi stebri v modelu A so enakih dimenzij – 25/25 cm. Podajanje dimenzij elementov je podobno kot v primeru nosilcev, prikazano pa je na sliki 41.



Slika 41: Prerez stebrov za model A v programu 3Muri.

Figure 41: Column cross section for the model A in 3Muri.

Matematični model A v programu 3Muri je prikazan na sliki 42.



Slika 42: Matematični model A v programu 3Muri.

Figure 42: Mathematical model A in 3Muri.

4.3.2 Model B

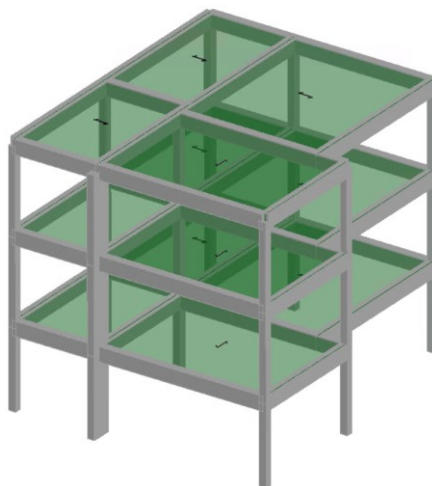
Model B je izdelan na enak način kot model A. Upoštevane so vse predpostavke in poenostavitve, ki so bile upoštevane v točki 4.2.2. Tloris modela B je prikazan na sliki 27.

Vsi nosilci so modelirani kot pravokotni nosilci prereza 25/50 cm. Vsi stebri z izjemo stebra C2 so kvadratnega prereza 25/25 cm, stebel C2 pa je dimenzij 25/75 cm. Na sliki 43 je prikazan vnos prereza stebra C2 v programu 3Muri.

Slika 43: Prerez stebra C2 za model B v programu 3Muri.

Figure 43: Column C2 cross section for the model B in 3Muri.

Izdelan matematični model B je prikazan na sliki 44. Izdelan je po največji zmožnosti programa 3Muri za modeliranje stavbe SPEAR.



Slika 44: Matematični model B v programu 3Muri.

Figure 44: Mathematical model B in 3Muri.

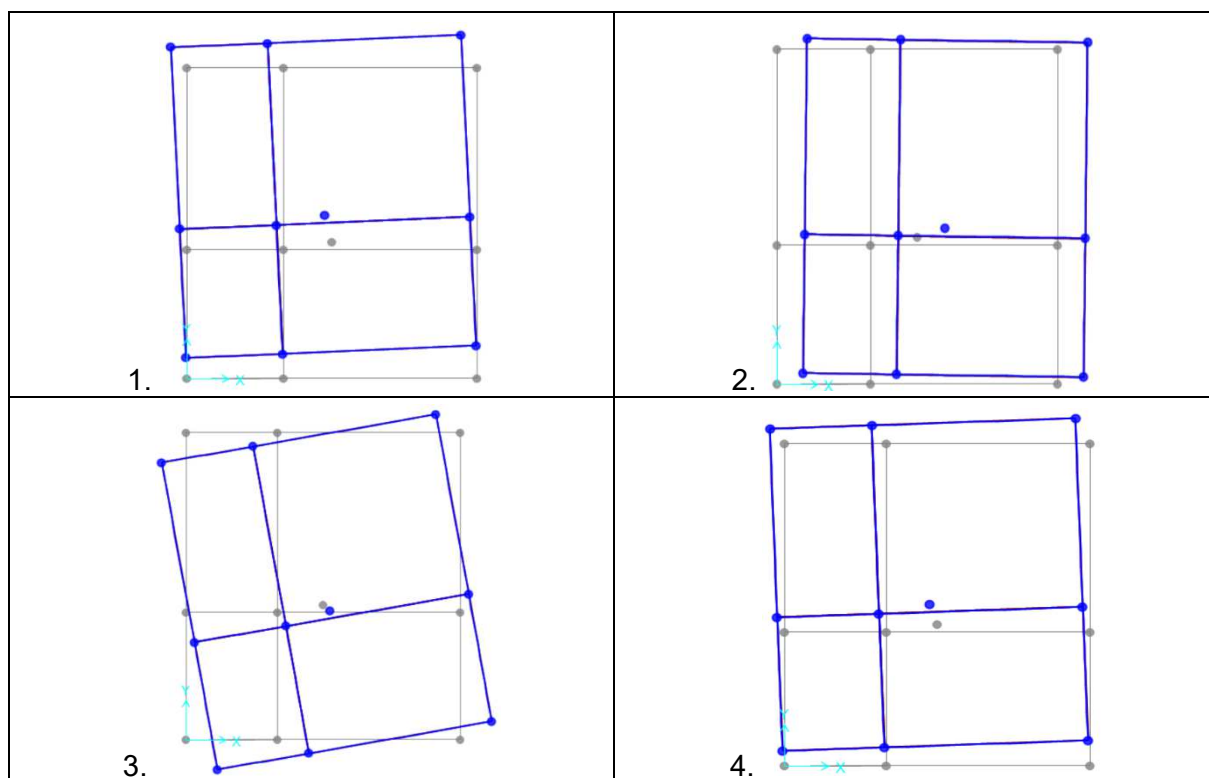
4.4 Rezultati analize lastnega nihanja

S pomočjo modalne analize določimo osnovno nihajno obliko konstrukcije, ki je ključnega pomena pri izvedbi potisne analize, kjer so vodoravne sile razporejene skladno z nihajno obliko (modalna razporeditev vodoravnih sil).

Za modela A in B smo v obeh programih opravili modalno analizo, za model C pa le v programu SAP2000. V nadaljevanju so prikazane nihajne oblike in nihajni časi za vse modele ter primerjava med njimi. Program 3Muri pod rezultati modalne analize izpiše tudi maso celotne konstrukcije. Iz tega razloga smo se odločili, da primerjamo tudi mase konstrukcij iz obeh programov v razdelku 4.4, čeprav je ta neodvisna od modalne analize.

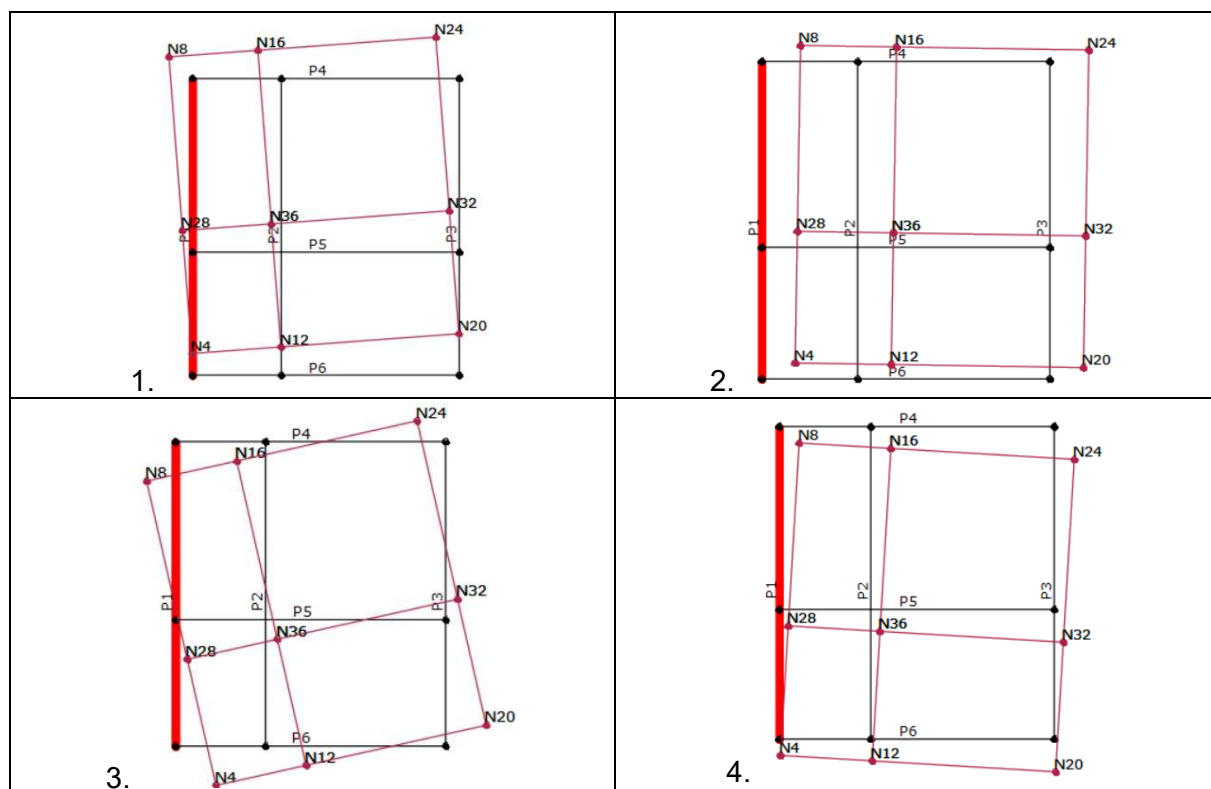
- **Model A**

Na slikah 45 in 46 so prikazane prve štiri nihajne oblike v programih SAP2000 in 3Muri za model A.



Slika 45: Prve štiri nihajne oblike modela A v programu SAP2000.

Figure 45: First four modal shapes of model A in SAP2000.



Slika 46: Prve štiri nihajne oblike modela A v programu 3Muri.

Figure 46: First four modal shapes of model A in 3Muri.

V preglednici 2 so prikazani rezultati modalne analize modela A.

Preglednica 2: Rezultati modalne analize modela A.

Table 2: Model A modal analysis results.

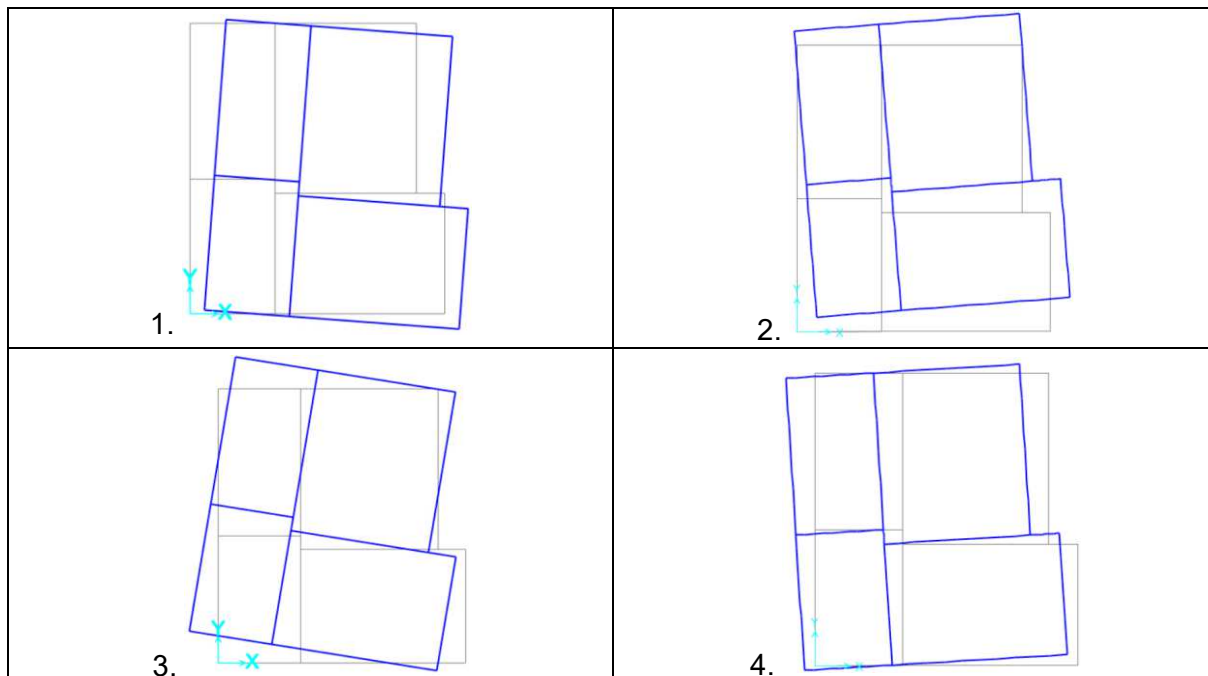
Program	Mode	T [s]	Mx [%]	My [%]	SumMx [%]	SumMy [%]
SAP2000	1	0,90	6,4	75,2	6,4	75,2
	2	0,88	78,9	7,6	85,3	82,8
	3	0,77	1,7	4,0	87,0	86,9
	4	0,31	1,2	8,4	88,2	95,3
	5	0,31	8,9	1,4	97,1	96,7
3Muri	1	0,91	9,2	68,8	9,2	68,8
	2	0,89	75,0	11,5	84,2	80,3
	3	0,80	2,7	6,5	86,9	86,9
	4	0,32	1,5	7,8	88,4	94,6
	5	0,31	8,6	1,8	97,0	96,4

Iz slik in preglednice je razvidno, da se model A obnaša zelo podobno v obeh programih. Prva nihajna oblika je translacijska v smeri Y, druga pa translacijska v smeri X. Iz tega sklepamo, da konstrukcija ni torzijsko podajna. Tudi nihajni časi v obeh programih so si med seboj podobni (povprečno 2 % višji nihajni časi so bili dobljeni v programu 3Muri).

Masa celotne konstrukcije v programu SAP2000 je enaka 198,91 t, medtem ko je v programu 3Muri enaka 196,05 t (razlika 1,5 %).

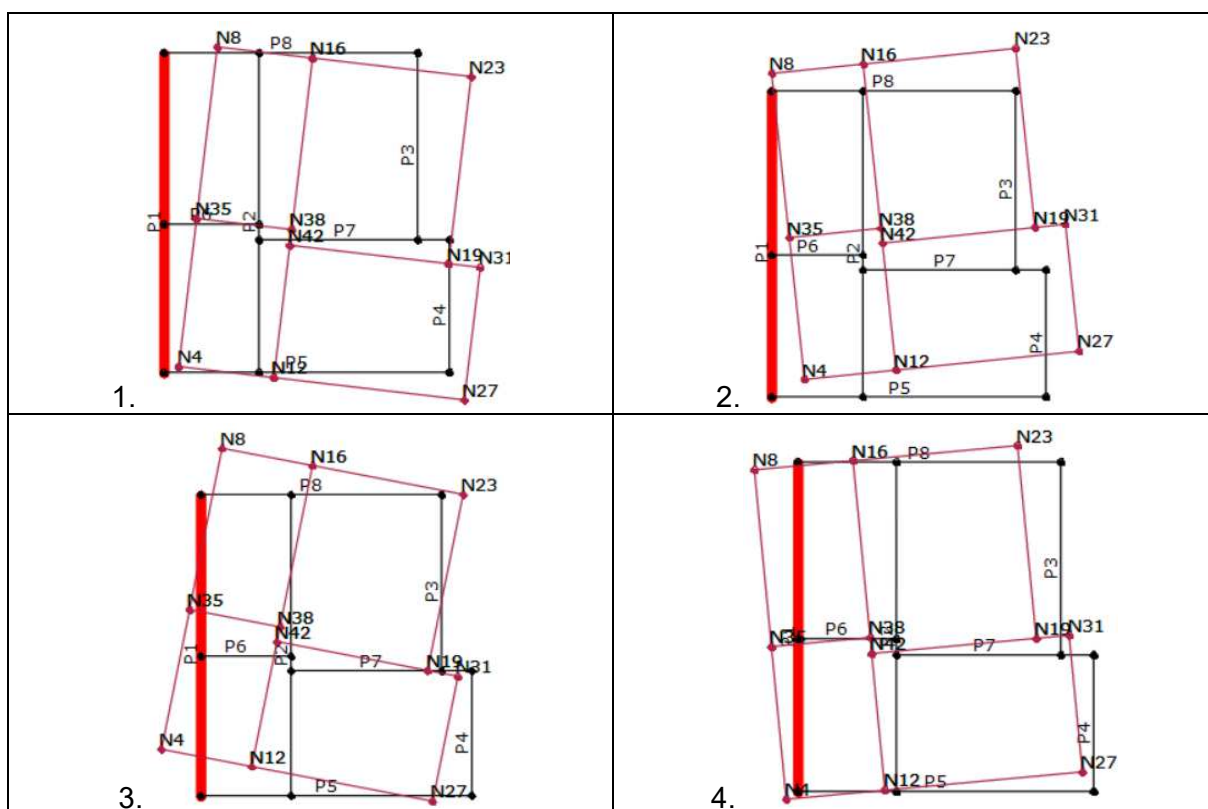
• Model B

Na slikah 47 in 48 so prikazane prve štiri nihajne oblike v programih SAP2000 in 3Muri za model B.



Slika 47: Prve štiri nihajne oblike modela B v programu SAP2000.

Figure 47: First four modal shapes of model B in SAP2000.



Slika 48: Prve štiri nihajne oblike modela B v programu 3Muri.

Figure 48: First four modal shapes of model B in 3Muri.

V preglednici 3 so prikazani rezultati modalne analize modela B.

Preglednica 3: Rezultati modalne analize modela B.

Table 3: Model B modal analysis results.

Program	Mode	T [s]	Mx [%]	My [%]	SumMx [%]	SumMy [%]
SAP2000	1	0,83	71,4	2,7	71,4	2,7
	2	0,74	9,9	59,4	81,3	62,2
	3	0,66	5,5	19,7	86,8	81,9
	4	0,29	8,4	0,2	95,2	82,1
	5	0,25	1,8	3,7	97,1	85,8
3Muri	1	0,85	63,2	4,9	63,2	4,9
	2	0,77	17,1	52,4	80,3	57,3
	3	0,68	6,3	24,4	86,6	81,7
	4	0,29	7,9	0,7	94,5	82,4
	5	0,25	2,6	6,4	97,1	88,8

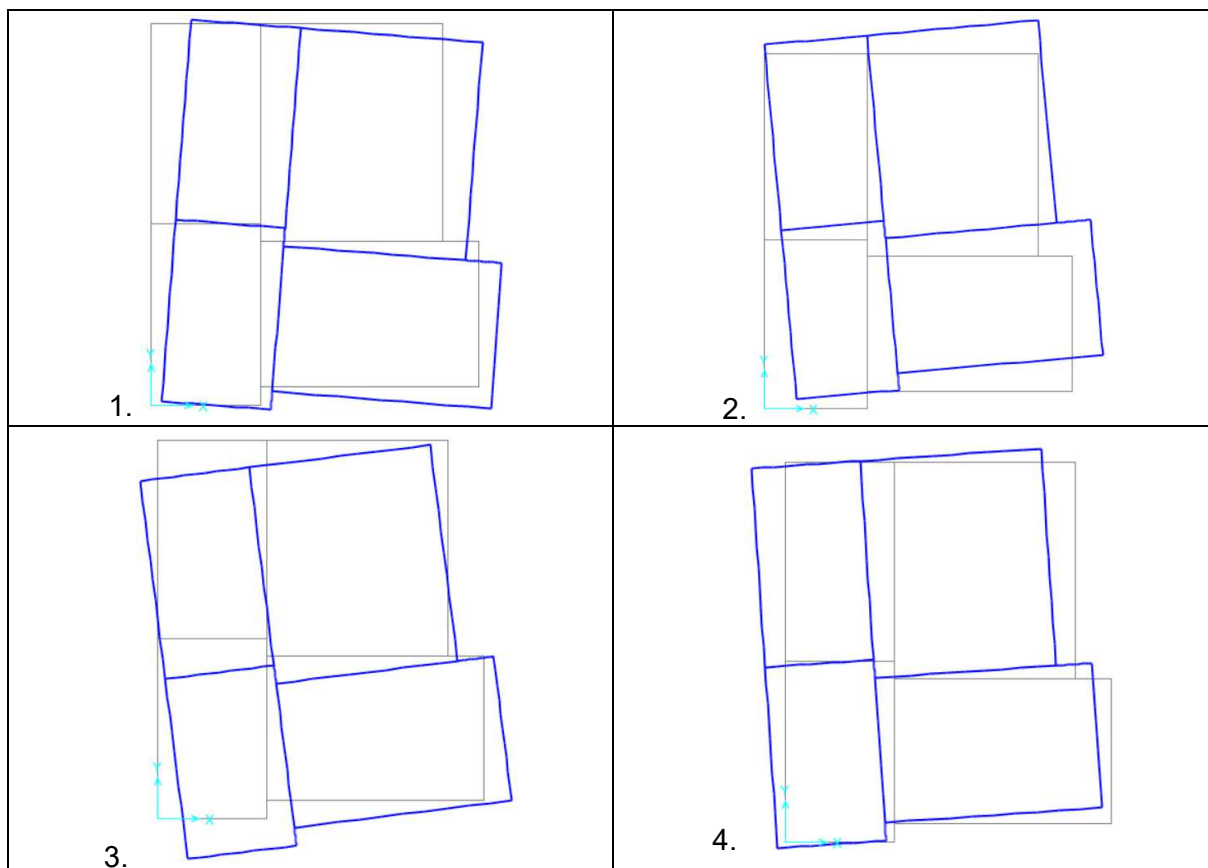
Z razliko od modela A, kjer je bila konstrukcija poenostavljena do te mere, da se je v obeh programih obnašala praktično enako, imamo pri modelu B večje razlike. V obeh programih je prva nihajna oblika translacijska v smeri X, druga nihajna oblika pa je translacijska v smeri Y. Pri modelu A je bilo ravno nasprotno. Razlog je predvsem v togosti konstrukcije v smeri Y, ki je v modelu B večja zaradi upoštevanja pravih dimenzij prečnega prereza stebra C2 (25/75 cm).

Podobno kot v modelu A se pojavijo manjše razlike v nihajnih časih med programoma. Za prve tri nihajne oblike dobimo višje nihajne čase v programu 3Muri (razlika znaša približno 3 %). Iz primerjave sodelujočih mas v posameznih nihajnih oblikah pa lahko vidimo, da je programu SAP2000 konstrukcija torzijsko bolj toga, kot v programu 3Muri. Program 3Muri, kot opisano v razdelku 3.2.1 generira ekvivalentne okvirje prostorskega modela konstrukcije, kar vpliva na drugačno translacijsko in torzijsko togost konstrukcije v primerjavi s programom SAP2000. Vpliv ekvivalentnih okvirjev je v tem primeru večji na torzijsko kot translacijsko togost.

Masa celotne konstrukcije v programu SAP2000 je enaka 197,49 t medtem, ko je v programu 3Muri ta enaka 194,16 t (razlika 1,7 %).

- **Model C**

Na sliki 49 so prikazane prve štiri nihajne oblike v programu SAP2000 za model C.



Slika 49: Prve štiri nihajne oblike modela C v programu SAP2000.

Figure 49: First four modal shapes of model C in SAP2000.

V preglednici 4 so prikazani rezultati modalne analize modela C iz programa SAP2000.

Preglednica 4: Rezultati modalne analize modela C.

Table 4: Model C modal analysis results.

Program	Mode	T [s]	Mx [%]	My [%]	SumMx [%]	SumMy [%]
SAP2000	1	0,84	61,8	6,5	61,8	6,5
	2	0,73	22,0	42,9	83,8	49,4
	3	0,63	4,3	33,6	88,1	82,9
	4	0,30	7,3	0,6	95,5	83,5
	5	0,25	2,7	3,3	98,2	86,8

Podobno kot pri modelu B je prva nihajna oblika pretežno translacijska v smeri X, druga nihajna oblika pa pretežno v smeri Y. Hkrati je v obeh nihajnih oblikah prisotne tudi nekaj torzijskih rotacij. Zanimivo je, da so nihajni časi podobni kot pri modelu B, čeprav je masa modela C zaradi modeliranja balkonov večja. Razlog je v tem, da ima model C v primerjavi z modelom B tudi večjo togost v obeh smereh, saj smo pri modeliranju nosilcev upoštevali tudi sodelujoči del plošče.

Masa modela C je enaka 209,39 t, kar je 6 % več kot je masa modela B (197,49 t). Podobno maso so dobili tudi v analizi Dolška in Fajfarja $m_{konst} = 203,87$ t (2,7 % razlike) [23].

Rezultate, dobljene z modelom C, je smiselno primerjati tudi z rezultati drugih, predhodno opravljenih analiz stavbe SPEAR, kjer so bile modelne predpostavke primerljive. V preglednici 5 je prikazana primerjava nihajnih časov modela C iz programa SAP2000 iz trenutne analize z rezultati modalne analize Negra in sod. [25]. Razvidno je, da so nihajni časi obeh analiz precej podobni. Prvi nihajni čas je enak v obeh analizah, pri višjih nihajnih časih pa opazimo nekoliko višje nihajne čase v primeru analize Negra in sod. [25].

Preglednica 5: Primerjava nihajnih časov modela C v programu SAP2000 (ta analiza) in nihajnih časov iz analize Negra in sod. [25].

Table 5: Comparison of vibration periods for model C in SAP2000 (this analysis) and vibration periods from the analysis of Negro et al. [25].

Mode	T [s]	
	SAP2000	Negro idr. [25]
1	0,84	0,84
2	0,73	0,78
3	0,63	0,67
4	0,30	0,34
5	0,25	0,32

5 PREDSTAVITEV NELINEARNIH MODELOV IN OCENA MEJNIH POSPEŠKOV

Nelinearne modele smo razvili na podlagi linearnih modelov, predstavljenih v poglavju 4, ob tem pa upoštevali dodatne vhodne podatke. Eden izmed dodatnih vhodnih podatkov je bila armatura stebrov in gred elementov. Armatura stebrov je enaka za vse stebre in je prikazana na sliki 20. Armatura nosilcev pa je točno podana v analizi Dolška in Fajfarja [23]. Podana je ločeno za oba konca nosilcev (i in j). V našem primeru smo upoštevali zadostno sidrno dolžino vseh armaturnih palic. V preglednici 6 je prikazan povzetek armature na začetku in koncu nosilcev, pri čemer se oznake nosilcev navezujejo na model C (slika 30).

Preglednica 6: Vzdolžna armatura nosilcev [1].

Table 6: Longitudinal reinforcement of the beams [1].

Nosilec (i)	armatura spodaj	armatura zgoraj	Nosilec (j)	armatura spodaj	armatura zgoraj
B1	2 Φ 12	4 Φ 12	B1	2 Φ 12	6 Φ 12
B2	2 Φ 12	6 Φ 12	B2	2 Φ 12	4 Φ 12
B3	2 Φ 12	4 Φ 12	B3	2 Φ 12	4 Φ 12
B4	3 Φ 20	2 Φ 12, 4 Φ 20	B4	5 Φ 20	2 Φ 12
B5	2 Φ 12	4 Φ 12	B5	2 Φ 12	4 Φ 12
B6	2 Φ 12	4 Φ 12	B6	2 Φ 12	4 Φ 12
B7	2 Φ 12	2 Φ 12, 3 Φ 20	B7	2 Φ 12	2 Φ 12, 3 Φ 20
B8	2 Φ 12	4 Φ 12	B8	2 Φ 12	4 Φ 12
B9	2 Φ 12	4 Φ 12, 1 Φ 20	B9	2 Φ 20	2 Φ 12, 2 Φ 20
B10	2 Φ 12	4 Φ 12	B10	2 Φ 12	4 Φ 12, 2 Φ 20
B11	2 Φ 12	6 Φ 12	B11	2 Φ 12	4 Φ 12
B12	2 Φ 12	4 Φ 12	B12	2 Φ 12	6 Φ 12
B13	3 Φ 20	2 Φ 12, 1 Φ 20	B13	3 Φ 20	2 Φ 12, 3 Φ 20
B14	2 Φ 12	4 Φ 12, 2 Φ 20	B14	2 Φ 12	4 Φ 12, 2 Φ 20

Pri razširitvi na nelinearni model je potrebno upoštevati srednje vrednosti materialnih karakteristik. V primeru stavbe SPEAR imamo že podane srednje vrednosti tlačnih trdnosti in mej tečenja armature. Srednja tlačna trdnost betona je znašala 25 MPa, srednja meja tečenja palic premera 12 mm $f_{ym} = 459$ MPa in $f_{ym} = 377$ MPa za palice premera 20 mm [5]. Za palice premera 8 mm bomo po zgledu priročnika [12] upoštevali, da je srednja vrednost meje tečenja večja za faktor 1,14 od karakteristične vrednosti meje tečenja jekla in tako dobimo $f_{ym} = 352$ MPa. Ker program 3Muri ne omogoča upoštevanja različnih vrst jekla armature, smo se odločili, da vse armaturne palice pretvorimo v armaturne palice premera 12 mm upoštevamo za vse palice enako srednjo mejo tečenja ($f_{ym} = 459$ MPa). Pri temu smo spremenili površino armaturnih palic, da je bila sila na meji tečenja enaka, kot če bi uporabili dejanski prerez posameznih palic in pripadajočo srednjo mejo tečenja.

Točna upoštevana armatura v posameznih modelih je opisana v nadaljevanju.

Tako kot pri izdelavi linearnih modelov (poglavje 4) smo tudi pri njihovi razširitvi na nelinearne modele naleteli na nekaj omejitev, predvsem v programu 3Muri, zaradi katerih smo uvedli dodatne predpostavke. Te predpostavke so opisane v razdelkih 5.1 in 5.2.

5.1 Nelinearni modeli v programu SAP2000

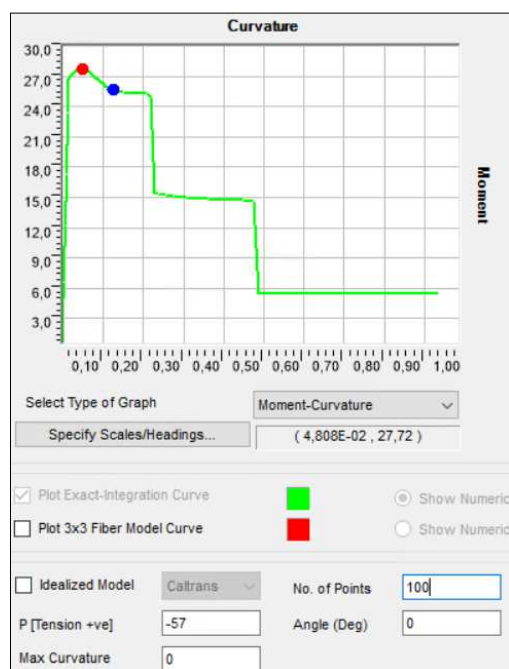
Teorija in postopek pri razširitvi linearnega na nelinearni model v programu SAP2000 sta opisana v razdelku 3.1.2. Razširitev je opravljena je s pomočjo definiranja materialne nelinearnosti s pomočjo plastičnih členkov na obeh koncih stebrov in nosilcev.

Maksimalni moment prereza je bil določen s pomočjo analize prereza v programu SAP2000, kjer smo upoštevali srednje materialne karakteristike betona in armaturnega jekla, skladno z razdelkom 3.1.2.1. Na sliki 50 so prikazani definirani materiali v programu SAP2000.

Slika 50: Uporabljeni materiali pri analizi prereza v programu SAP2000.

Figure 50: Materials used for the cross-section analysis in SAP2000.

Analiza prereza je bila opravljena s pomočjo pripomočka *Section Designer* v programu SAP2000 (slika 51). V prvotni fazi je bila podana osnovna geometrija prereza, nato tudi premer in položaj armaturnih palic. Iz razmerja moment – ukrivljenost je potem bil odčitani maksimalni moment, ki ga armiranobetonski prerez prenese. Pri stebrih smo upoštevali osno silo iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$. Očna sila pri nosilcih je bila enaka 0 kN. Vrednosti osnih sil so podane v opisu posameznih modelov v nadaljnjih točkah.



Slika 51: Primer določitve maksimalnega momenta tlačno obremenjenega stebra.

Figure 51: Example of determining the maximum moment for a column in compression.

S pomočjo določenega maksimalnega momenta in enačb iz razdelka 3.1.2.1 ter ob upoštevanju popravkov v območju mehčanja iz razdelka 3.1.2.1.1 smo definirali plastične členke za vse stebre in nosilce. Plastične členke smo potem s pomočjo ukaza *Assign* → *Frame* → *Hinges* definirali na obeh koncih stebrov in nosilcev.

5.1.1 Model A

Pri modelu A, ki smo najbolj poenostavili, nismo upoštevali delov plošče ob nosilcih, ki sodelujejo pri prevzemu obtežbe. Upoštevana je bila le armatura nosilcev iz preglednice 6. Ker program 3Muri omogoča samo podajanje armature za celoten linijski element in ne ločeno za oba konca, smo enako storili tudi v programu SAP2000. Upoštevali smo povprečno armaturo obeh koncev in jo pretvorili v ekvivalentno armaturo premera 12 mm. Pri podajanju armature smo lahko podali površino palic v cm². Tako nismo morali zaokroževati dobljeno vrednost na okroglo število armaturnih palic. Upoštevana armatura v nosilcih za model A je prikazana v preglednici 7.

Preglednica 7: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela A.

Table 7: Compressive and tensile reinforcement in model A beams.

Nosilec	armatura spodaj [cm ²]	armatura zgoraj [cm ²]
B1	2,26	5,65
B2	2,26	5,65
B3	2,26	4,52
B4	10,32	12,58
B5	2,26	4,52
B6	2,26	4,52
B7	2,26	10,00
B8	2,26	4,52
B9	5,16	8,55
B10	2,26	9,68
B11	2,26	5,65
B12	2,26	5,65

Osne sile pri določitvi maksimalnega momenta, ki smo jih dobili iz linearne analize modela A pri obtežni kombinaciji $1,0 G + 0,3 Q$, so prikazane v preglednici 8.

Preglednica 8: Osne sile v stebrih modela A iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$.

Table 8: Axial forces in the model A columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$.

Steber	Osna sila N [kN]		
	1. etaža	2. etaža	3. etaža
C1	57,43	38,52	16,79
C2	224,16	149,98	75,96
C3	126,3	84,52	40,55
C4	182,69	123,09	61,37
C5	523,99	348,25	178,74
C6	328,36	219,23	110,49
C7	88,34	59,34	27,5
C8	297,79	198,51	100,57
C9	177,64	118,64	57,98

5.1.2 Model B

Z razliko od modela A smo v modelu B upoštevali doprinos armature, ki je izhajala iz armiranobetonske plošče. Na podlagi izračunanih vrednosti efektivne širine pasnic iz preglednice 1 in podatka iz razdelka 4.1, da v ploščah poteka armatura premera 8 mm na razdalji 200 mm, smo določili število armaturnih palic, ki pripadajo posameznim prerezom nosilcev. Na sliki 20 je razvidno, da armaturne palice v plošči nastopijo samo izven osnovne širine nosilcev, torej samo v območju, ki ga dodamo nosilcem zaradi vpliva armiranobetonske

plošče. V preglednici 9 so prikazane izračunane vrednosti efektivnih širin pasnic nosilcev in število palic premera 8 mm, ki pripadajo posameznim prerezom.

Preglednica 9: Efektivne širine pasnice nosilcev in pripadajoča armatura iz plošče.

Table 9: Effective beam flange width and the corresponding slab reinforcement.

Nosilec (<i>i</i>)	ef. širina [cm]	št. palic $\Phi 8$ v eni vrsti	Nosilec (<i>i</i>)	ef. širina [cm]	št. palic $\Phi 8$ v eni vrsti
B1	55	2	B1	85	3
B2	85	3	B2	55	2
B3	85	3	B3	145	6
B4	145	6	B4	85	3
B5	55	2	B5	85	3
B6	85	3	B6	55	2
B7	145	6	B7	55	2
B8	55	2	B8	85	3
B9	85	3	B9	85	3
B10	55	2	B10	85	3
B11	85	3	B11	55	2
B12	55	2	B12	85	3
B13	85	3	B13	55	2
B14	85	3	B14	85	3

Dobljene efektivne širine pasnic nosilcev, kot tudi število armaturnih palic premera $\Phi 8$, so manjše od tistih iz analizi Dolška in Fajfarja [23]. Razlike v efektivnih širinah pasnic nosilcev izhajajo iz uporabljenih priporočil za določitev le teh. V našem primeru smo izhajali iz Evrokoda 8 [6], v omenjeni analizi pa je bila uporabljena metoda Paulay in Priestly [24]. Razlike v armaturnih palicah iz plošče pa so posledica tega, da so v analizi uporabljeni izvorni armaturni načrti stavbe SPEAR, v našem primeru pa so palice izračunane iz podatka, da je v plošči prisotna armatura $\Phi 8 / 200$ mm (slika 20).

S pomočjo preglednic 6 in 9 smo določili povprečne vrednosti armature za posamezne nosilce (preglednica 10). Te vrednosti smo upoštevali v obeh programih.

Preglednica 10: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela B.

Table 10: Compressive and tensile reinforcement in model B beams.

Nosilec	armatura spodaj [cm^2]	armatura zgoraj [cm^2]
B1	2,26	7,39
B2	2,26	8,55
B3	2,26	8,38
B4	10,32	11,28
B5	2,26	6,26
B6	2,26	7,03
B7	2,26	15,21
B8	2,26	6,84
B9	5,16	12,22
B10	2,26	9,42
B11	2,26	7,77
B12	2,26	7,20
B13	7,74	11,28
B14	2,26	14,50

Osne sile, uporabljene pri določitvi maksimalnega momenta, so bile določene z linearno analizo modela B pri obtežni kombinaciji $1,0 G + 0,3 Q$ in so prikazane v preglednici 11.

Preglednica 11: Osne sile v stebrih modela B iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$.

Table 11: Axial forces in the model B columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$.

Steber	Osna sila N [kN]		
	1. etaža	2. etaža	3. etaža
C1	64,59	42,75	18,62
C2	268,23	181,27	91,98
C3	132,29	88,20	42,71
C4	195,99	131,61	65,75
C5	486,28	322,72	166,09
C6	270,73	180,91	91,01
C7	87,53	53,86	27,81
C8	265,59	177,09	89,27
C9	166,13	111,02	53,98

5.1.3 Model C

Model C je bil modeliran z najmanj poenostavitvami v zasnovi. Upoštevana armatura je enaka izračunani armaturi iz modela B, le da v primeru modela C nismo upoštevali povprečnih vrednosti armature za celoten nosilec, temveč smo za vsak konec elementa upoštevali drugačno armaturo (preglednica 12). Tako smo za vsak konec nosilca (i in j) definirali drugačen plastični členek.

Preglednica 12: Upoštevana tlačna in natezna armatura v nosilcih modela C.

Table 12: Compressive and tensile reinforcement in model C beams.

Nosilec (<i>i</i>)	armatura spodaj [cm ²]	armatura zgoraj [cm ²]	Nosilec (<i>j</i>)	armatura spodaj [cm ²]	armatura zgoraj [cm ²]
B1	2,26	5,68	B1	2,26	9,10
B2	2,26	11,80	B2	2,26	5,29
B3	2,26	7,61	B3	2,26	9,15
B4	7,74	17,98	B4	12,90	4,57
B5	2,26	5,68	B5	2,26	6,84
B6	2,26	8,76	B6	2,26	5,29
B7	2,26	19,64	B7	2,26	10,77
B8	2,26	6,84	B8	2,26	6,84
B9	5,16	12,12	B9	5,16	12,32
B10	2,26	6,84	B10	2,26	12,00
B11	2,26	10,26	B11	2,26	5,29
B12	2,26	5,29	B12	2,26	9,10
B13	7,74	11,78	B13	7,74	10,77
B14	2,26	17,01	B14	2,26	12,00

Enako kot v modelih A in B smo pri analizi prereza uporabili osne sile v stebrih, dobljene iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$, v tem primeru izvedene na modelu C (preglednica 13). Podobne osne sile v stebrih so bile dobljene v analizi Dolška in Fajfarja [23].

Preglednica 13: Osne sile v stebrih modela C iz obtežne kombinacije $1,0 G + 0,3 Q$.

Table 13: Axial forces in the model C columns for the load combination $1,0 G + 0,3 Q$.

Steber	Oсна silа N [kN]		
	1. etaža	2. etaža	3. etaža
C1	59,50	39,38	17,43
C2	265,06	180,70	52,94
C3	132,81	89,23	44,09
C4	195,12	132,17	67,26
C5	487,18	324,85	171,11
C6	342,89	230,86	119,08
C7	81,98	55,59	26,78
C8	261,03	175,40	90,05
C9	228,55	90,05	77,09

5.2 Nelinearni modeli v programu 3Muri

Razširitev na nelinearni model v programu 3Muri poteka avtomatsko. Postopek razširitve je natančneje opisan v razdelku 3.2.2. Tudi v tem primeru pa moramo dodatno definirati armaturo, saj ta vpliva na nelinearni odziv konstrukcije. Prerezom definiramo armaturo tako, da v oknu, kjer podajamo dimenzije prereza, obkljukamo opcijo *Rebars input*. S tem lahko

podamo vzdolžno armaturo vzdolž stranic b in h (slika 54). S klikom na ikono prereza s palicami se nam odpre dodatno okno, kjer lahko vnesemo število in premer palic. Na podlagi tega nam program samodejno izračuna površino armature, vendar to vrednost lahko tudi poljubno spremenimo. Potrebno je podati tudi zaščitno plast armaturnih. Prav tako moramo vpisati prerez prečne armature, razdaljo med posameznimi stremeni v polju in ob podporah ter število krakov (način zaključka) stremena. Pri izbiri materialov je potrebno še izbrati tip armaturnega jekla, kjer smo omejeni na uporabo enega tipa za celotno armaturo prereza. Primer podane armature za stebere v modelu A je prikazan na sliki 52.

Slika 52: Primer podajanja prereza in armature za stebre modela A v programu 3Muri.

Figure 52: Example of defining the cross section and reinforcement for model A columns in 3Muri.

Na podoben način se podaja tudi armatura v nosilcih (slika 53). Posebno se podaja tlačna in natezna armatura, razlaga iz priročnika programa je prikazana na sliki 54.

R.C. beam

Elevation: 375 [cm]

b: 25,0 [cm]

h: 50,0 [cm]

Area: 1.250,00 [cm²]

J: 260.416,6 [cm⁴]

☐ Discon.I ☐ Discon.J

☒ Rebars input

Longitudinal on supports

Extrados total As: 7,20 [cm²] Extrados no.: 6

Intrados total As: 2,26 [cm²] Intrados no.: 2

Concrete cover: 2,3 [cm] ☒ Deformed ☐ Plain

☐ Uninsufficient anchorage

Stirrups

Diameter: 8 [mm] Mid-section spacing: 20 [cm]

Legs no.: 2 End spacing: 20 [cm]

☐ Seismic details

Material

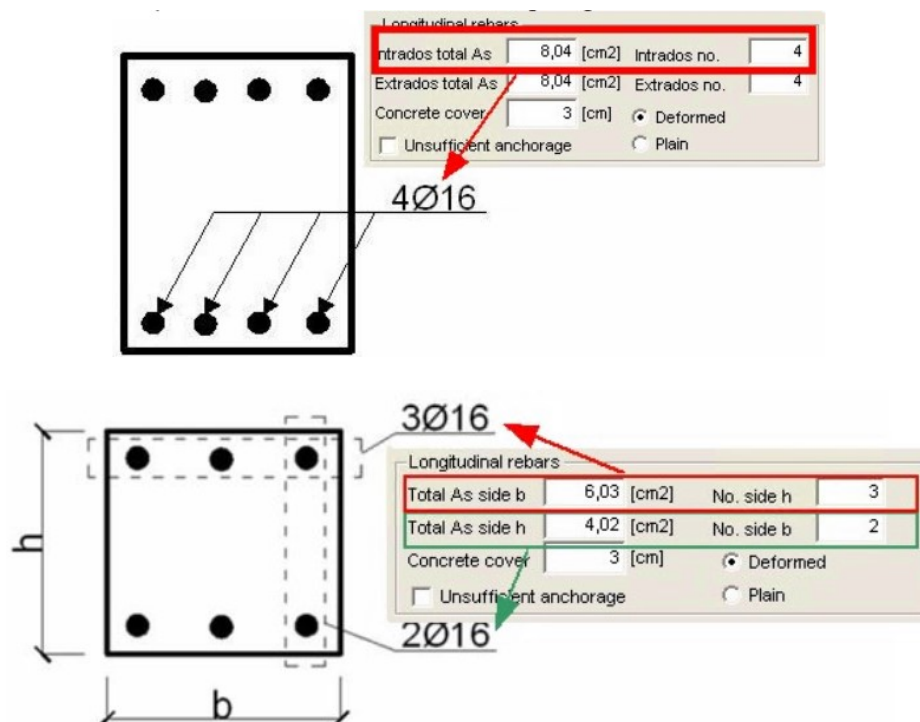
Concrete: Spear concrete

Steel: fi12

Slika 53: Primer podajanja prereza in armature za nosilec modela A v programu 3Muri.

Figure 53: Example of defining the cross section and reinforcement for a model A beam in 3Muri.

Program 3Muri v priročniku [4] podaja razlago glede definiranja vzdolžne armature v stebrih in nosilcih. Prikazano je, kaj pomeni *Intrados total As* ter *Extrados total As*, kot tudi razlaga glede definiranja armature pod opcijo *Total As side b* in *Total As side h* (slika 54).



Slika 54: Navodila za podajanje vzdolžne armature v nosilcih in stebrih v programu 3Muri [4].

Figure 54: Instructions for defining longitudinal reinforcement for beams and columns in 3Muri [4].

5.2.1 Model A

Modeliranje linearno elastičnega modela A je opisano v razdelkih 4.3 in 4.3.1. Pri modelu A so bili upoštevane enake predpostavke kot v razdelku 5.1.1.

Stebri so bili kvadratnega prereza dimenzij 25/25 cm, upoštevana armatura v njih je podana na sliki 20. Nosilci so bili modelirani s pravokotnim prerezom dimenzij 25/50 cm. Upoštevana armatura v nosilcih je enaka kot v programu SAP2000. Prikazana je v preglednici 7.

5.2.2 Model B

Linearno elastični model B v programu 3Muri je opisan v razdelkih 4.3 in 4.3.2. Predpostavke pri nelinearno modelu so enake predpostavkam za model SAP2000, ki so opisane v razdelku 5.1.2. Upoštevana armatura je prikazana v preglednici 10. Armatura je bila podana na način, ki je opisan v razdelku 5.2.

5.3 Rezultati potisne analize in ekvivalentni sistemi SDOF

Rezultati potisne analize so odvisni od razporeditve vodoravnih sil po višini konstrukcije. Skladno s trenutno veljavnim Evrokodom, ki zahteva vsaj dva različna primera razporeditve vodoravnih sil po višini konstrukcije (enakomerna in modalna razporeditev), ter z novo delovno verzijo Evrokoda 8, ki zahteva uporabo vsaj modalne razporeditve vodoravnih sil po višini konstrukcije, smo se odločili, da izvedemo obe razporeditvi vodoravnih sil po višini konstrukcije – enakomerno in modalno. V programu SAP2000 smo v vsaki etaži vodoravne sile podali v njenem masnem središču po zgledu študije Žižmonda in Dolška [12]. Program 3Muri vodoravne sile poda samodejno brez možnosti vpogleda v razporeditev.

V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil obe verziji Evrokoda predpisujeta vektor normiranih pomikov $\Phi = 1$. Posledično bi moral biti v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil transformacijski faktor Γ enak 1. V programu 3Muri temu ni tako, saj tako pri enakomerni kot tudi modalni razporeditvi vodoravnih sil program vektor pomikov določi na podlagi pomikov potisne analize konstrukcije v elastičnem stanju. Posledično je vrednost transformacijskega faktorja Γ večja od 1. Čeprav tak pristop rezultate programa postavlja na varno stran, ta metoda ni skladna z Evrokodom.

Na podlagi teh ugotovitev smo se odločili, da v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil v programu SAP2000 določimo vektor pomikov tako, da preberemo pomike v masnem središču vsake etaže iz statičnega obtežnega primera vodoravnih sil, razporejenih glede na maso etaže. Na tak način smo se približali programu 3Muri in rezultati so bolj ustrezni za primerjavo. V nadaljevanju so tudi prikazani ekvivalentni sistemi SDOF za ta primer. Poleg prilagojene metode pa smo opravili tudi primer skladno z Evrokodom, kjer je bil upoštevan vektor pomikov $\Phi = 1$ in transformacijski faktor $\Gamma = 1$.

V primeru modalne razporeditve vodoravnih sil teh težav nimamo, saj izberemo, katere nihajne oblike naj 3Muri upošteva pri določitvi razporeditve vodoravnih sil, na podlagi tega pa program tudi določi transformacijski vektor Γ na način, ki je skladen z Evrokodom 8 in našim postopkom v programu SAP2000.

V nadaljevanju so prikazane potisne krivulje iz obeh programov. Idealizacija potisnih krivulj iz programa SAP2000 je izvedena skladno z razdelkom 2.1, potisne krivulje iz programa 3Muri

pa so idealizirane samodejno v programu, in sicer po postopku, predstavljenem v razdelku 3.2.3.

Za vsak model je bilo skupaj izvedenih 8 potisnih analiz, v katerih smo obravnavali štiri smeri vodoravnih sil ($X+$, $X-$, $Y+$ in $Y-$) in dve različni porazdelitvi vodoravnih sil. V programu SAP2000 smo analize izvedli za vse tri modele (A, B in C), v programu 3Muri pa za modela A in B. Skupno je torej bilo izvedenih 40 potisnih analiz. Rezultati potisnih analiz so predstavljeni v nadaljnjih točkah.

5.3.1 Model A

S pomočjo poenostavitev in predpostavk iz razdelkov 4.2 in 4.3 ter 5.1 in 5.2 smo v obeh programih ustvarili zelo podoben in enakovreden nelinearen model. S pomočjo modalne analize iz razdelka 4.4 smo ugotovili, da imata oba modela podobne nihajne čase in oblike, kot tudi togost v obeh smereh. Prav tako sta masi konstrukcij praktično enaki.

5.3.1.1 Enakomerna razporeditev vodoravnih sil

V primeru enakomerne porazdelitve vodoravnih sil smo upoštevali ugotovitve, omenjene v razdelku 5.3. Vodoravne sile smo razporedili v razmerju mas, hkrati pa smo upoštevali vektor pomikov določen iz statične obtežbe teh sil. Tako smo v programu SAP2000 dobili enak postopek, kot ga uporablja program 3Muri. Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru posamezne etaže, so prikazane v preglednici 14. Poleg tega je podan tudi transformacijski faktor Γ . Transformacijski faktor v programu 3Muri je bil enak 1,25 tako za X , kot tudi Y smer potisne analize.

Preglednica 14: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model A v programu SAP2000.

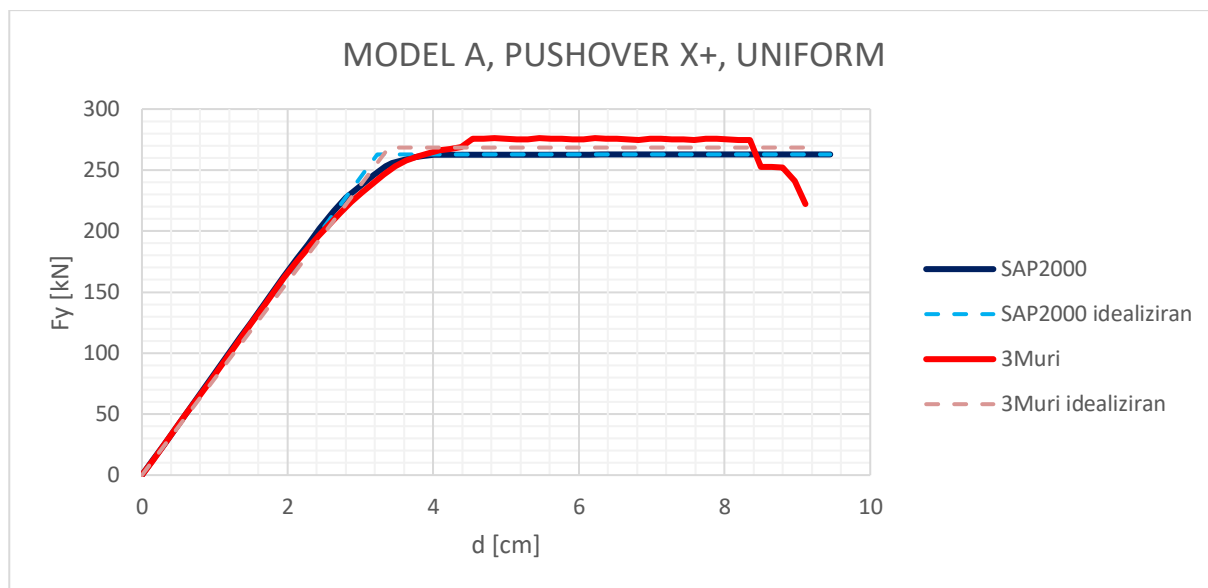
Table 14: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model A in SAP2000.

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,9974	0,9974
2. etaža	1	1
3. etaža	0,9685	0,9685
Γ	1,2265	1,2265

V nadaljevanju (grafikoni 1–4) so prikazane potisne krivulje za model A v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil iz obeh programov. Prav tako so prikazane idealizirane potisne krivulje.

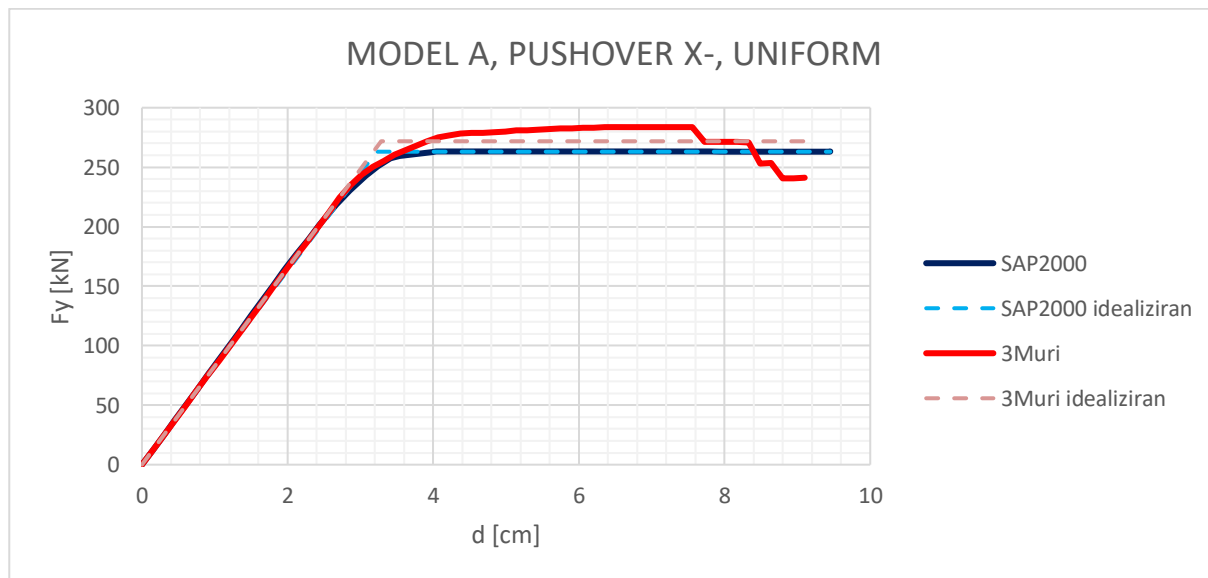
Grafikon 1: Potisne krivulje za model A, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 1: Model A pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



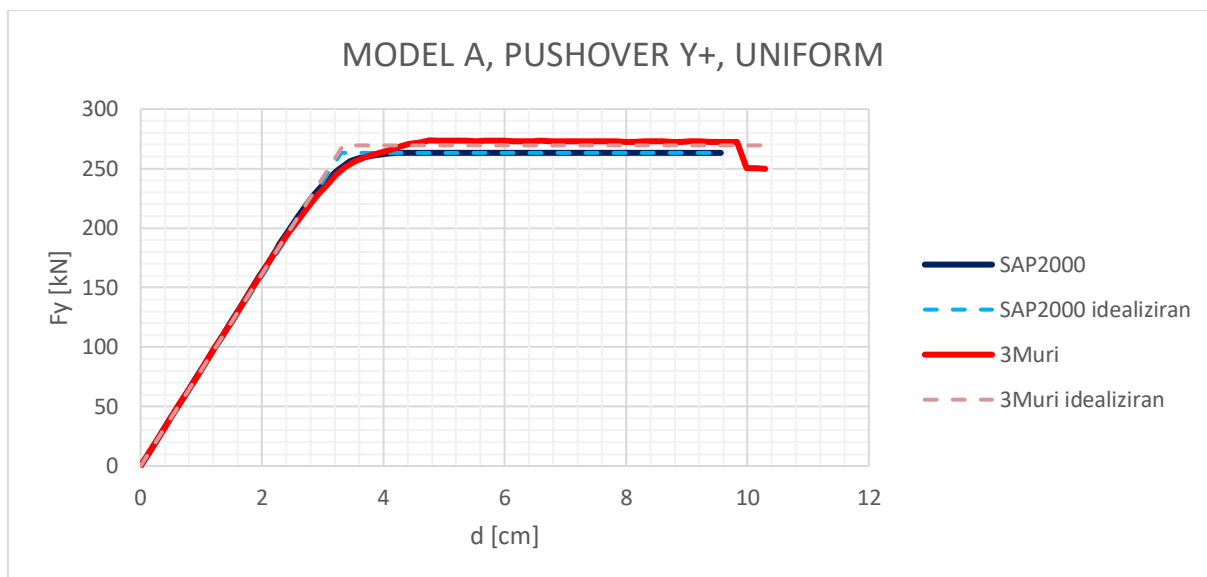
Grafikon 2: Potisne krivulje za model A, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 2: Model A pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.



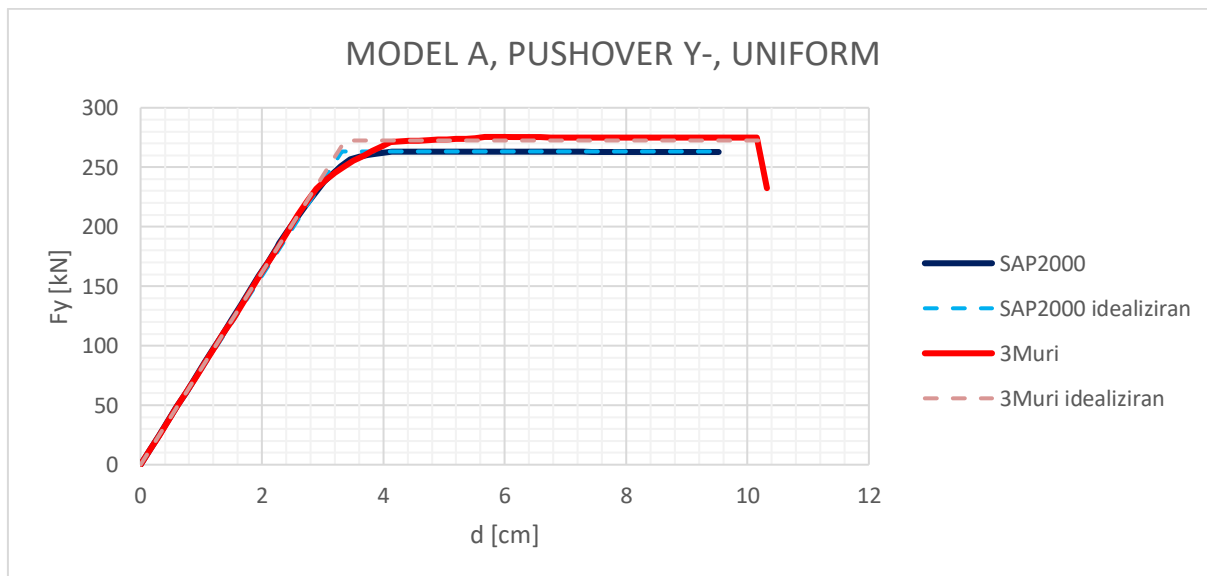
Grafikon 3: Potisne krivulje za model A, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 3: Model A pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.



Grafikon 4: Potisne krivulje za model A, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

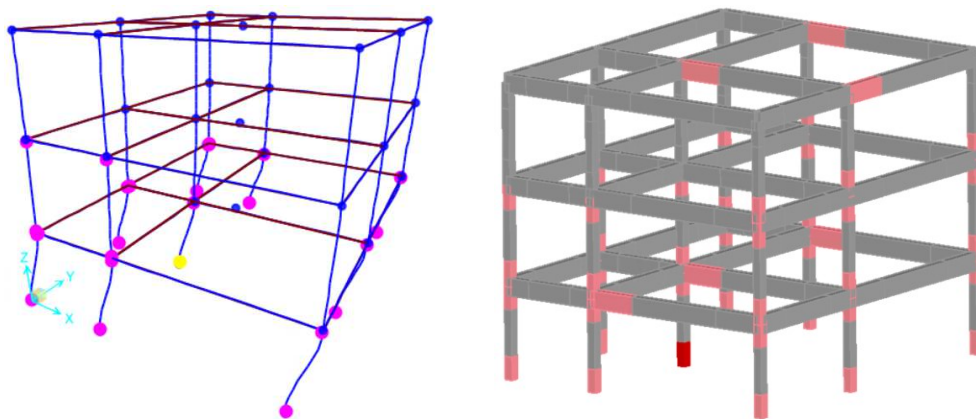
Graph 4: Model A pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.



Poleg potisnih krivulj nas zanima tudi razvoj poškodb konstrukcije v odvisnosti od pomika kontrolne točke. Poškodbe v plastičnih členkih v programu SAP2000 določimo na podlagi doseženih karakterističnih točk, s katerimi smo definirali plastične členke.

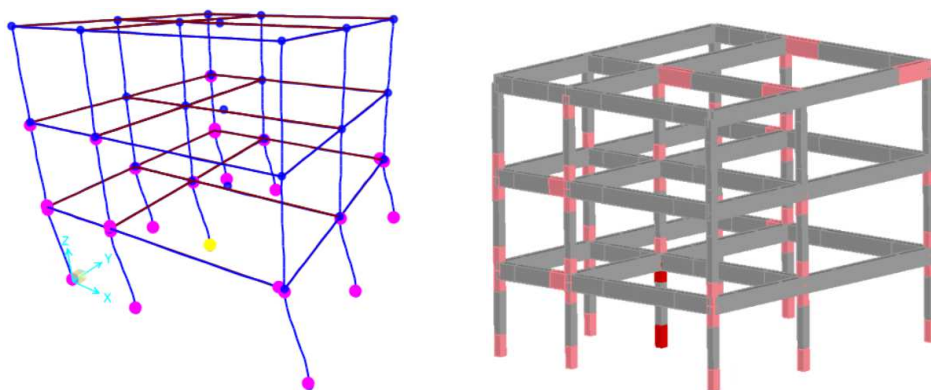
V nadaljevanju (slike 55–58) prikazujemo primerjavo razvoja poškodb za posamezne smeri potisne analize. V programu SAP2000 je z vijolično barvo prikazana dosežena meja tečenja plastičnega členka. Z rumeno barvo pa je pri upoštevanem popravku členka v območju mehčanja iz razdelka 3.1.3.1.1 dosežena mejna rotacija plastičnega členka, kar v našem primeru pomeni konec potisne analize. V programu 3Muri je z roza barvo prikazana upogibna poškodba elementa, z rdečo pa upogibna porušitev elementa [4].

V vseh štirih smereh potisne analize je dosežena mejna rotacija oz. porušitev elementa pri dnu stebra C5 v pritličju konstrukcije. Z izjemo smeri X+ v programu 3Muri istočasno nastopi tudi porušitev na vrhu stebra C5 v pritličju. Vidimo, da je v tem koraku obremenjevanja v vseh stebrih v pritličju in nekaj stebrih v prvem nadstropju dosežena meja tečenja plastičnega členka.



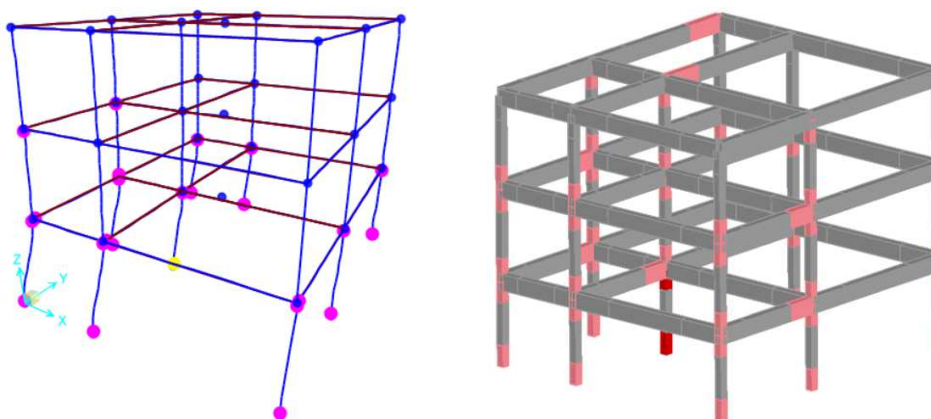
Slika 55: Stanje blizu porušitve, model A, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 55: Near collapse limit state, model A, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



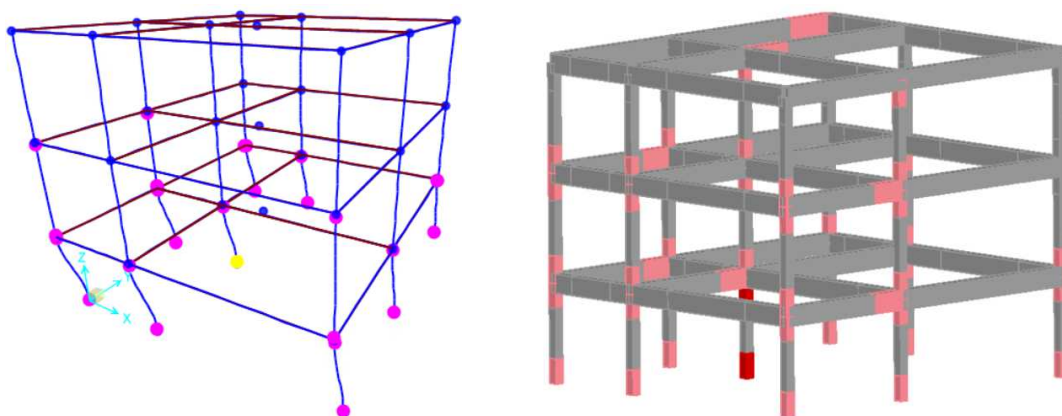
Slika 56: Stanje blizu porušitve, model A, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 56: Near collapse limit state, model A, X- direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 57: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 57: Near collapse limit state, model A, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 58: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 58: Near collapse limit state, model A, Y- direction, uniform horizontal force distribution.

Potisne krivulje in pripadajoče ekvivalentne modele SDOF v nadaljevanju prikazujemo tudi tabelarično (preglednica 15). Iz primerjave potisnih krivulj iz obeh programov in pripadajočih idealizacij je razvidno, da je obnašanje konstrukcije zelo podobno. V splošnem v programu 3Muri dosežemo nekoliko višje prečne sile sistema MDOF F_y . Mejni pomiki kontrole točke d_m so v primeru X smeri nekoliko višji v programu SAP2000, za Y smeri pa dobimo za približno 8 % večji pomik v programu 3Muri. Podobne ugotovitve sledijo iz primerjave mejnega pomika idealiziranega ekvivalentnega sistema SDOF d_m^* . Nihajni časi ekvivalentnega SDOF sistema T^* so višji v programu SAP2000, ko primerjamo maksimalne prečne sile ter pomike na meji tečenja idealiziranega ekvivalentnega sistema SDOF (F_y^* in d_y^*), pa dobimo v obeh programih skoraj enake vrednosti.

Preglednica 15: Primerjava rezultatov potisne analize modela A, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Table 15: Comparison of pushover analysis results of model A, uniform horizontal force distribution.

Količina	SAP2000				3Muri			
	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
F_y [kN]	262,83	263,03	263,19	263,25	276,22	283,7	273,69	275,38
d_m [cm]	9,45	9,45	9,56	9,53	9,11	9,41	10,29	10,32
T^* [s]	0,848	0,847	0,856	0,858	0,824	0,817	0,827	0,826
F_y^* [kN]	214,29	214,46	214,55	214,60	214,77	217,44	215,58	217,98
d_y^* [cm]	2,63	2,63	2,69	2,71	2,71	2,63	2,67	2,70
d_m^* [cm]	7,70	7,71	7,79	7,76	7,29	7,53	8,25	8,27

5.3.1.2 Modalna razporeditev vodoravnih sil

Pri izvedbi potisne analize, kjer smo upoštevali modalno razporeditev vodoravnih sil, smo upoštevali ugotovitve iz razdelka 5.3. V primeru analize v programu SAP2000 smo za določitev transformacijskega faktorja uporabili rezultate iz elastične analize nihajnih oblik. Za vsako od glavnih smeri potisne analize smo določili nihajno obliko, pri katerih sodeluje največ efektivne mase. Pomike masnih centrov etaž v merodajni smeri smo potem upoštevali pri določanju

transformacijskega faktorja Γ . Pozitivna in negativna smer obtežbe pri določanju transformacijskega faktorja ne igra vloge [16].

Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru posamezne etaže v programu SAP2000, so prikazane v preglednici 16, kot tudi pripadajoči transformacijski faktor. Ta je v programu 3Muri enak 1,25 za X in Y smer potisne analize.

Preglednica 16: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model A v programu SAP2000.

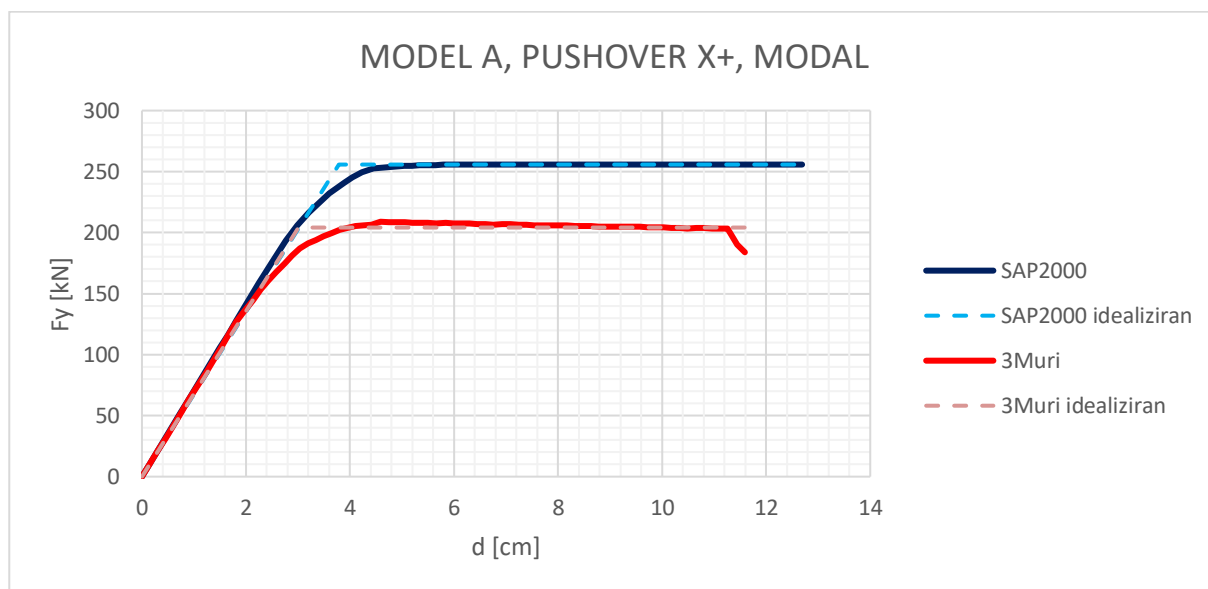
Table 16: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model A in SAP2000.

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,3530	0,3509
2. etaža	0,7821	0,7819
3. etaža	1	1
Γ	1,2461	1,2460

V nadaljevanju (grafikoni 5-8) so prikazane potisne krivulje za model A v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil iz obeh programov.

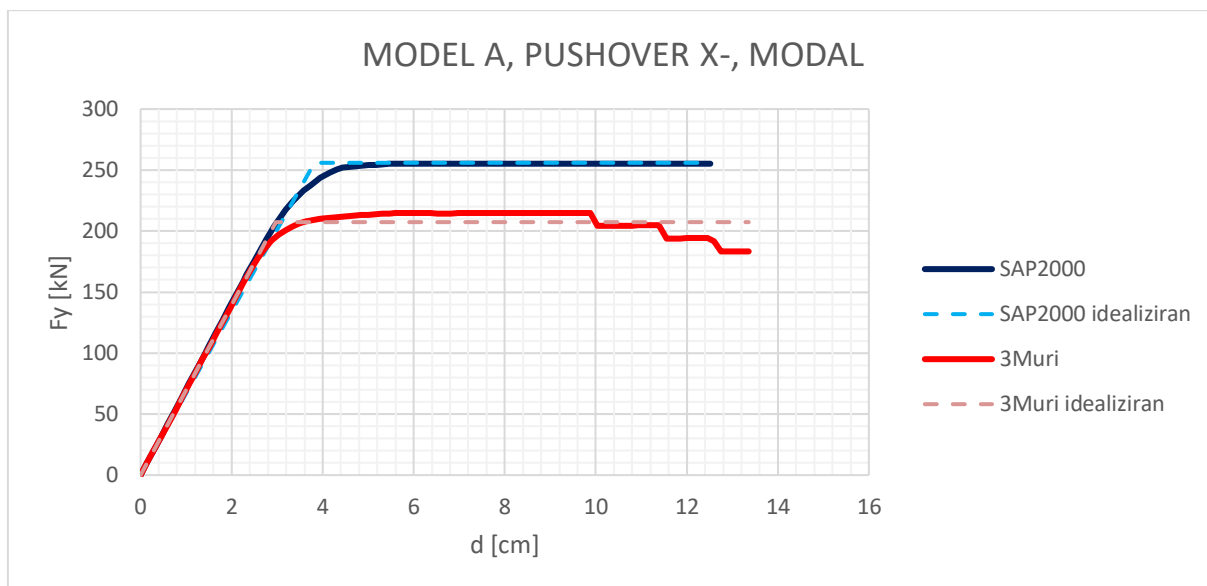
Grafikon 5: Potisne krivulje za model A, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 5: Model A pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.



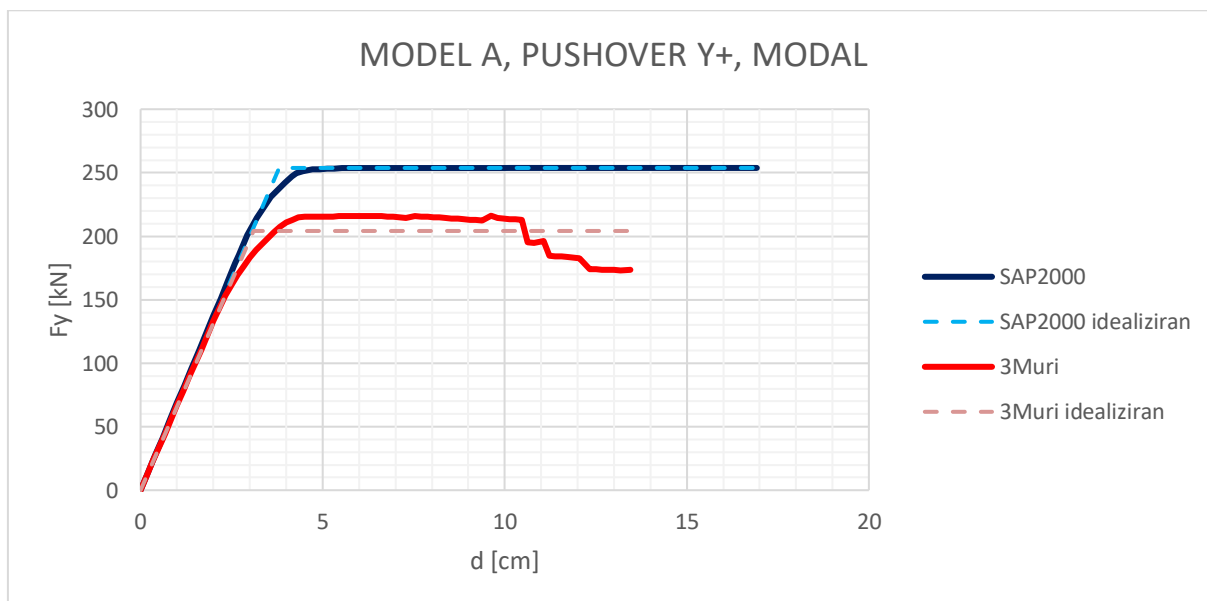
Grafikon 6: Potisne krivulje za model A, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 6: Model A pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.



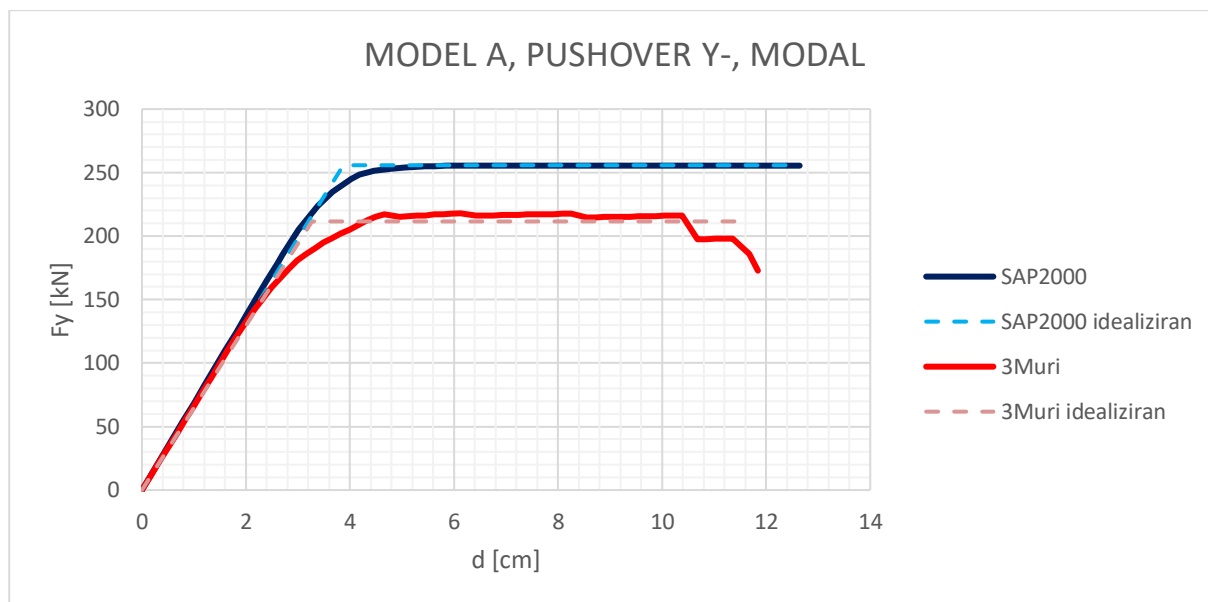
Grafikon 7: Potisne krivulje za model A, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil

Graph 7: Model A pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.

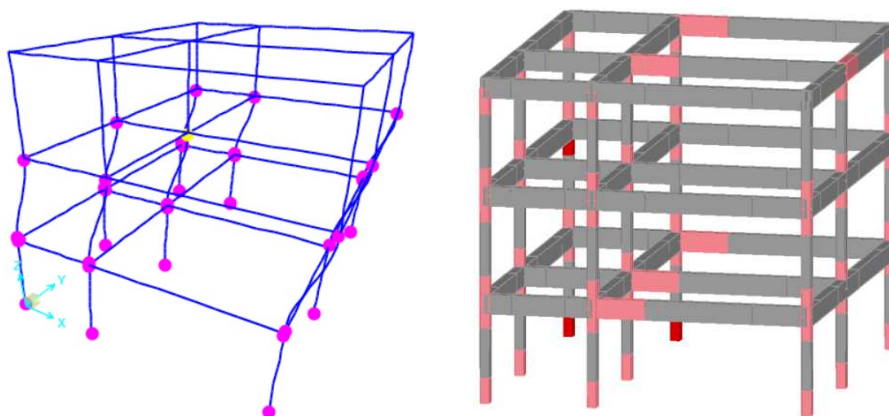


Grafikon 8: Potisne krivulje za model A, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil

Graph 8: Model A pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.

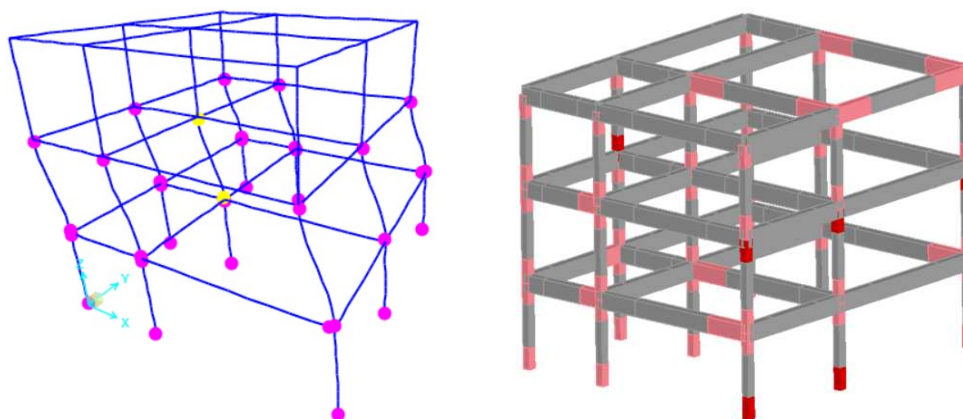


Poleg potisnih krivulj smo v obeh programih preverili tudi obnašanje konstrukcije in odziv plastičnih členkov med potisno analizo. Primerjave za posamezne smeri potisne analize so prikazane na slikah 59–62. Medtem ko v programu SAP2000 še vedno pride večinoma do dosežene mejne rotacije ob vpetju stebra C5 na sredini konstrukcije (z izjemo smeri X+, kjer je mejna rotacija dosežena v stebru C7 na dnu drugega nadstropja), dobimo v programu 3Muri večinoma porušitve stebrov na drugi strani konstrukcije (stebri C3, C6 in C9). Podobno kot v programu SAP2000 se pri smeri obremenjevanja X+ najprej poruši steber C7.



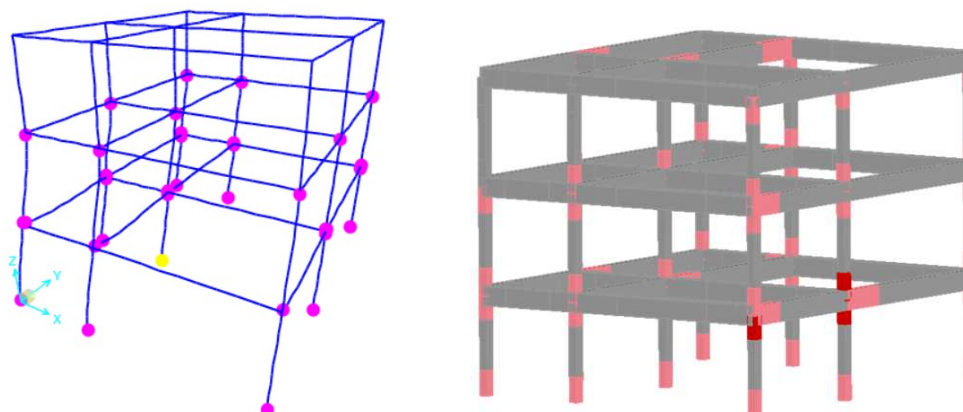
Slika 59: Stanje blizu porušitve, model A, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 59: Near collapse limit state, model A, X+ direction, modal horizontal force distribution.



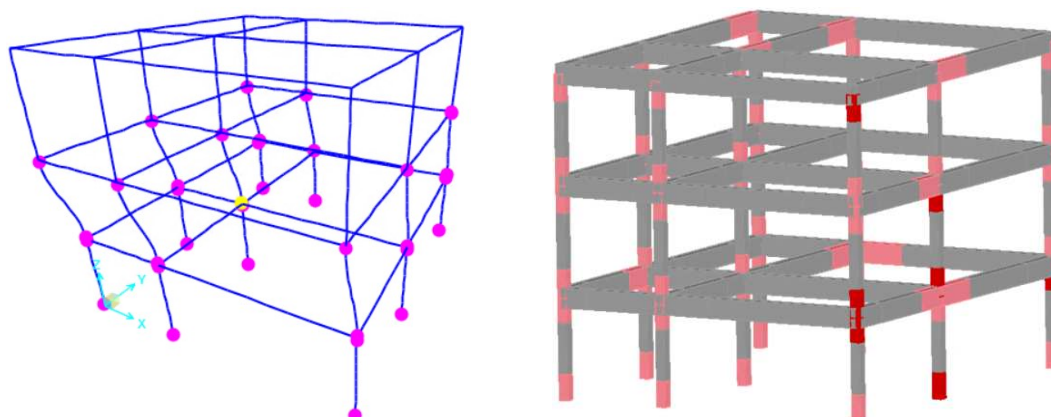
Slika 60: Stanje blizu porušitve, model A, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 60: Near collapse limit state, model A, X- direction, modal horizontal force distribution.



Slika 61: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 61: Near collapse limit state, model A, Y+ direction, modal horizontal force distribution.



Slika 62: Stanje blizu porušitve, model A, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 62: Near collapse limit state, model A, Y- direction, modal horizontal force distribution.

V primerjavi z analizo, kjer smo uporabili enakomerno razporeditev vodoravnih sil, je pri modalni razporeditvi sil nosilnost manjša (grafikoni 5–8, preglednica 17). Razlog je v tem, da se težišče sil nahaja višje, posledično pa je za doseg enakih poškodb potrebna manjša sila zaradi večje ročice. Nasprotno pa velja za mejne pomike, ki so v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil višji. Pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil največkrat pride do plastičnega mehanizma v eni etaži (mehka etaža), medtem ko se pri modalni razporeditvi vodoravnih sil obremenitve in poškodbe razporedijo na večje število elementov, kar je skladno z ugotovitvami iz literature [16].

Omeniti velja, da z uporabo modalne razporeditve sil dobimo tudi bistveno večja odstopanja med rezultati iz obeh programov. Mejni pomiki kontrolne točke d_m so nekoliko večji v programu SAP2000, a nastopijo tudi pri večjih maksimalnih prečnih silah sistema MDOF F_y , saj v programu 3Muri dosežemo 17–22 % manjše vrednosti. Nihajni časi ekvivalentnega sistema SDOF T^* so nekoliko večji v programu SAP2000. Maksimalne prečne sile ekvivalentnega sistema SDOF F_y^* so v programu 3Muri manjše za približno 25 %, podobno so tudi pomiki na meji tečenja d_y^* v povprečju za 27 % manjši.

Preglednica 17: Primerjava rezultatov potisne analize modela A, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Table 17: Comparison of pushover analysis results of model A, modal horizontal force distribution.

Količina	SAP2000				3Muri			
	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
F_y [kN]	255,77	255,97	253,77	255,78	208,91	214,87	216,15	217,91
d_m [cm]	12,69	12,52	16,92	12,64	11,59	13,36	13,45	11,67
T^* [s]	0,909	0,934	0,936	0,941	0,902	0,89	0,915	0,923
F_y^* [kN]	205,26	208,70	206,87	208,51	163,32	165,88	163,33	169,22
d_y^* [cm]	3,04	3,12	3,11	3,16	2,41	2,38	2,48	2,61
d_m^* [cm]	10,18	10,21	13,79	10,31	9,28	10,69	10,79	9,36

5.3.2 Model B

Poenostavitve in predpostavke modela B so opisane v razdelkih 4.2 in 4.3 ter 5.1 in 5.2. Iz primerjave nihajnih časov bi lahko sklepali, da sta modela B v obeh programih podobna, a naletimo na večje razlike pri primerjavi nihajnih oblik in efektivnih mas. Čeprav sta prvi dve nihajni obliki v obeh programih translacijski, so efektivne mase v programu 3Muri manjše od efektivnih mas iz programa SAP2000. Razlike so posledice različnih metod v obeh programih, saj je v programu 3Muri matematični model zaradi generiranih efektivnih okvirjev različen od matematičnega modela v programu SAP2000.

Na podlagi teh ugotovitev pričakujemo slabše ujemanje potisnih krivulj in rezultatov potisne analize, predvsem pri modalni razporeditvi vodoravnih sil.

5.3.2.1 Enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru, posamezne etaže so prikazane v preglednici 18. Poleg tega je podan tudi transformacijski faktor Γ . Transformacijski faktor v programu 3Muri je bil enak 1,24 v smeri X ter 1,26 v smeri Y potisne analize.

Preglednica 18: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model B v programu SAP2000.

Table 18: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model B in SAP2000

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,9967	0,9974
2. etaža	1	1
3. etaža	0,9602	0,9685
Γ	1,2296	1,2267

Na grafikonih 9–12 so prikazane potisne krivulje za model B iz obeh programov za primer enakomerne razporeditve vodoravnih sil.

Grafikon 9: Potisne krivulje za model B, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 9: Model B pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



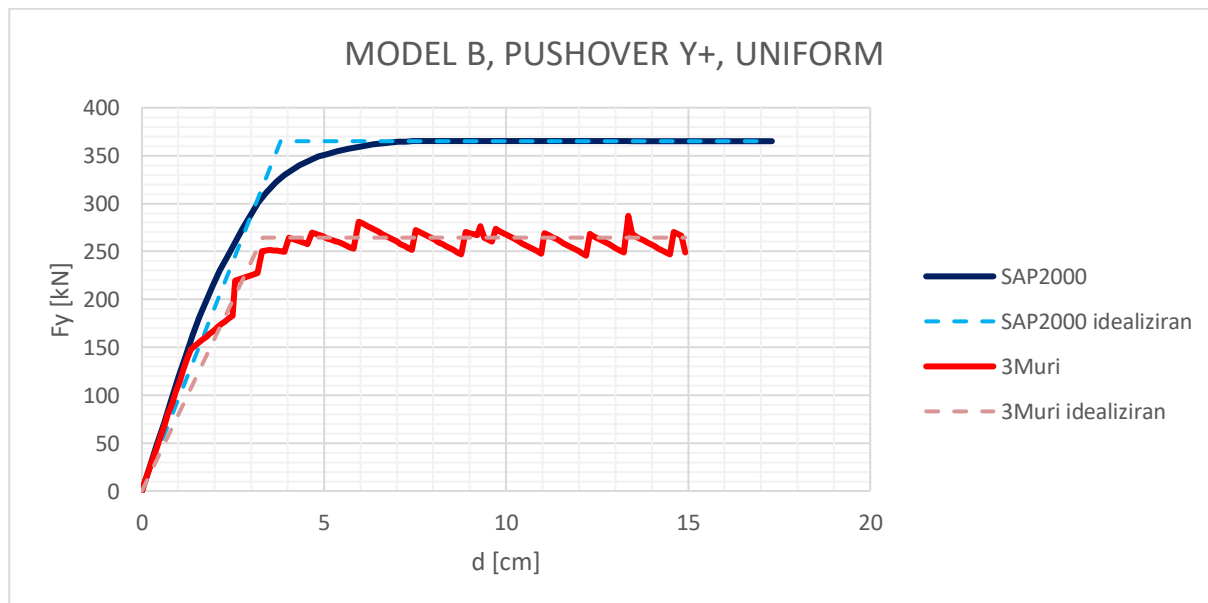
Grafikon 10: Potisne krivulje za model B, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 10: Model B pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.



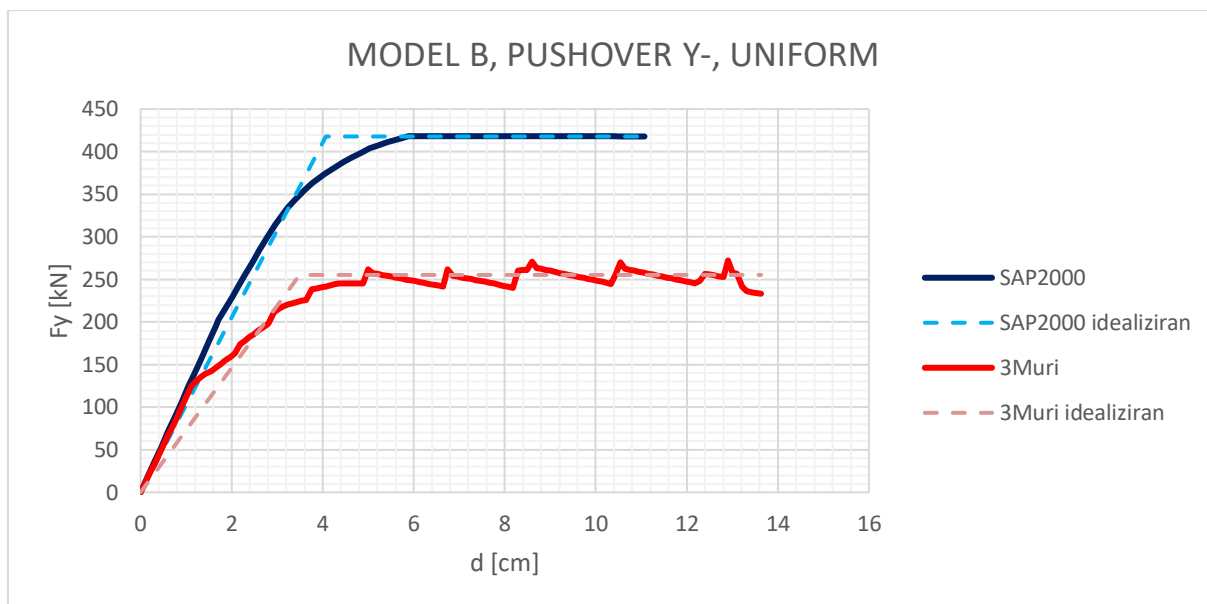
Grafikon 11: Potisne krivulje za model B, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Graph 11: Model B pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.

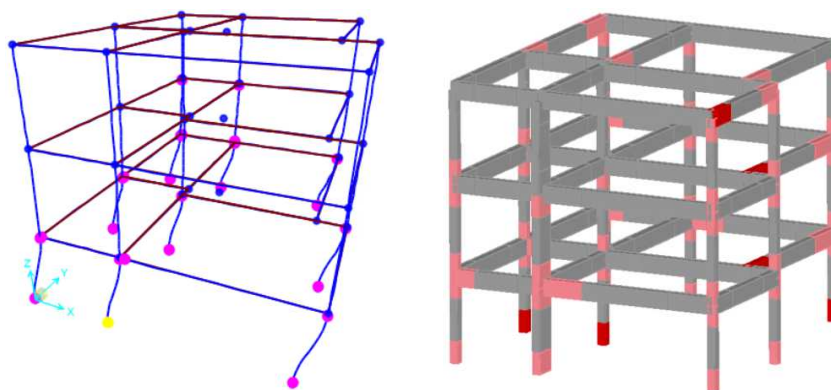


Grafikon 12: Potisne krivulje za model B, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Graph 12: Model B pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.

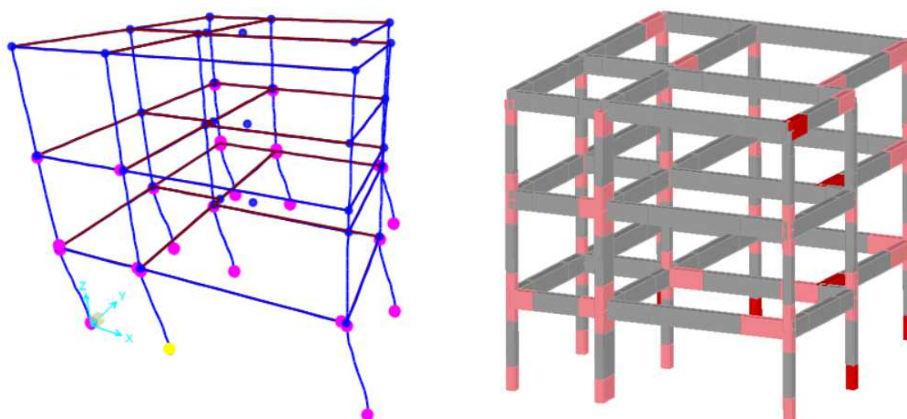


Poleg potisnih krivulj pa prikažemo tudi razvoj poškodb konstrukcije pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve. Primerjave za posamezne smeri potisne analize so prikazane v nadaljevanju (slike 63–66). Primerjava poškodb je precej drugačna kot pri modelu A. V programu SAP2000 za smeri X+, X- in Y+ dosežemo mejno rotacijo pri vpetju členka C2, medtem, ko v smeri Y+ pa dosežemo mejno rotacijo pri vpetju stebra C5. V programu 3Muri se poškodbe bistveno razlikujejo. V smeri X+ dosežemo porušitev stebrov C4, C5 in C9 ob vpetju v pritličju, ter porušitev nosilcev B7 v prvem in drugem nadstropju in nosilca B8 v tretjem nadstropju. V smeri X- dosežemo porušitev stebrov C6, C7, C8 in C9 ob vpetju v pritličju. Porušitve v nosilcih so enake, kot v X+ smeri. V smeri Y+ je dosežena porušitev ob vpetju stebra C6 v pritličju. V nosilcih se pojavijo enake porušitve, kot v X smeri, z dodatno porušitvijo v nosilcu B7 v drugem nadstropju. V smeri Y- dosežemo porušitev v treh različnih stebrih: v stebri C5 ob vpetju v pritličje, v stebri C6 na vrhu pritličja in v stebri C3 na dnu drugega nadstropja. V nosilcih pa se pojavijo porušitve v enakim nosilcih, kot v pozitivni smeri Y.



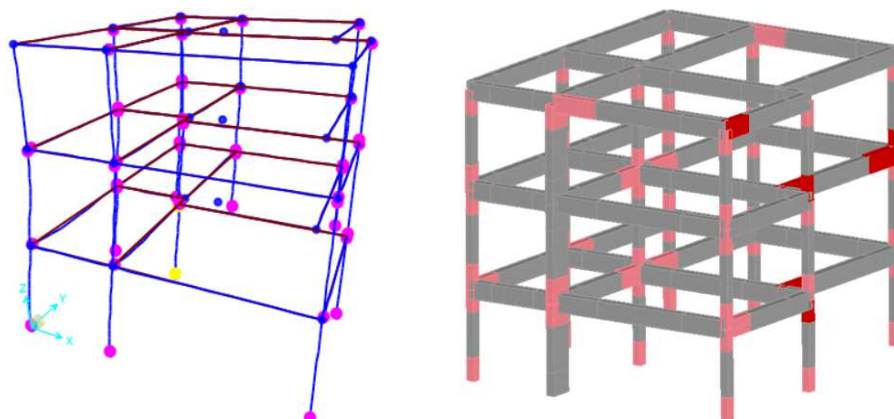
Slika 63: Stanje blizu porušitve, model B, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 63: Near collapse limit state, model B, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



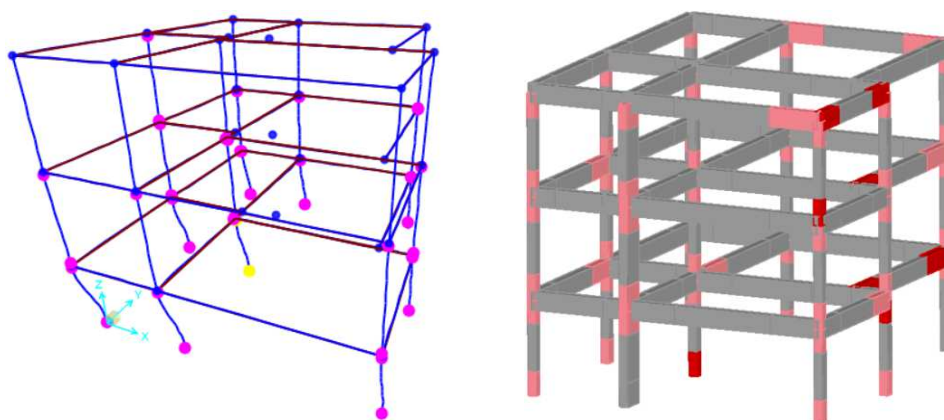
Slika 64: Stanje blizu porušitve, model B, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 64: Near collapse limit state, model B, X- direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 65: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 65: Near collapse limit state, model B, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 66: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 66: Near collapse limit state, model B, Y- direction, uniform horizontal force distribution.

Potisne krivulje in pripadajoče ekvivalentne modele SDOF v nadaljevanju prikazujemo tudi tabelarično (preglednica 19).

Zaradi razlik v zasnovi so rezultati pri modelu B drugačni od rezultatov pri modelu A, ki je bil zaradi poenostavitve skoraj dvojno simetričen, posledično pa je bil njegov odziv v smereh X in Y podoben. Zaradi večjih dimenzij prečnega prereza stebra C2 v modelu B sta se povečala togost in nosilnost v smeri Y, kar se odraža v manjšem nihajnem času in večji nosilnosti. Nihajni časi modela B so se skrajšali za 8–25 % v programu SAP2000 in za 8–23 % v programu 3Muri v primerjavi z modelom A. Nosilnost sistema MDOF F_y se je v programu SAP2000 povečala za 10 % v smeri X in za 39 % oz. 59 % v smeri Y. V programu 3Muri pa se je nosilnost sistema MDOF zmanjšala za približno 9 % v smeri X, v smeri Y pa je ostala približno enaka. Manjši prirastek oz. padec nosilnosti sistema MDOF v programu 3Muri je posledica večjega vpliva metode generiranja ekvivalentnih okvirjev pri modelu B v primerjavi z modelom A.

Maksimalne prečne sile sistema MDOF F_y so večje v programu SAP2000, in sicer za 13 oz. 14 % v smeri X in 27 oz. 54 % v smeri Y. Vrednost mejnega pomika kontrolne točke d_m je v smeri X+ enaka v obeh programih, v X- smeri pa 17 % večja v programu 3Muri. V smeri Y+ je vrednost mejnega pomika v programu SAP2000 večja za 16 % medtem, ko je ta v smeri Y- manjša za 19 %. Nihajni časi ekvivalentnega sistema SDOF T^* so po drugi strani podobni, razlike so v smereh X+, X- in Y+ manjše od 2 %, v smeri Y- pa je nihajni čas večji v programu 3Muri za 8 %. Razlike v maksimalnih prečnih sil SDOF sistema F_y^* se le še povečujejo, v X smeri dobimo v programu SAP2000 okoli 19 % oz. 20 %, v Y smeri pa kar 42 % oz. 68 % večje vrednosti. Pomiki na meji tečenja d_y^* so v povprečju v programu SAP2000 večji za 18 %. Če na kratko povzamemo, so razlike v silah in mejnih pomikih v smeri X manjše v primerjavi s smerjo Y. Razlog leži v zasnovi konstrukcije, saj je vpliv različnih metod obeh programov v smeri X manjši od smeri Y.

Preglednica 19: Primerjava rezultatov potisne analize modela B, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Table 19: Comparison of pushover analysis results of model B, uniform horizontal force distribution.

Količina	SAP2000				3Muri			
	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
F_y [kN]	289,05	289,23	365,07	417,85	255,82	253,07	287,16	272,21
d_m [cm]	9,20	9,25	17,30	11,07	9,19	11,11	14,92	13,63
T^* [s]	0,773	0,774	0,780	0,754	0,761	0,763	0,789	0,823
F_y^* [kN]	235,08	235,23	297,61	340,63	198,36	196,58	209,85	202,59
d_y^* [cm]	2,51	2,51	3,10	3,32	2,17	2,17	2,63	2,77
d_m^* [cm]	7,48	7,52	14,10	9,02	7,43	8,98	11,85	10,83

5.3.2.2 Modalna razporeditev vodoravnih sil

Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru posamezne etaže v programu SAP2000, so prikazane v preglednici 20, kot tudi pripadajoči transformacijski faktor. V programu 3Muri je bil transformacijski faktor v smeri X enak 1,24, v smeri Y pa 1,26.

Preglednica 20: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model B v programu SAP2000.

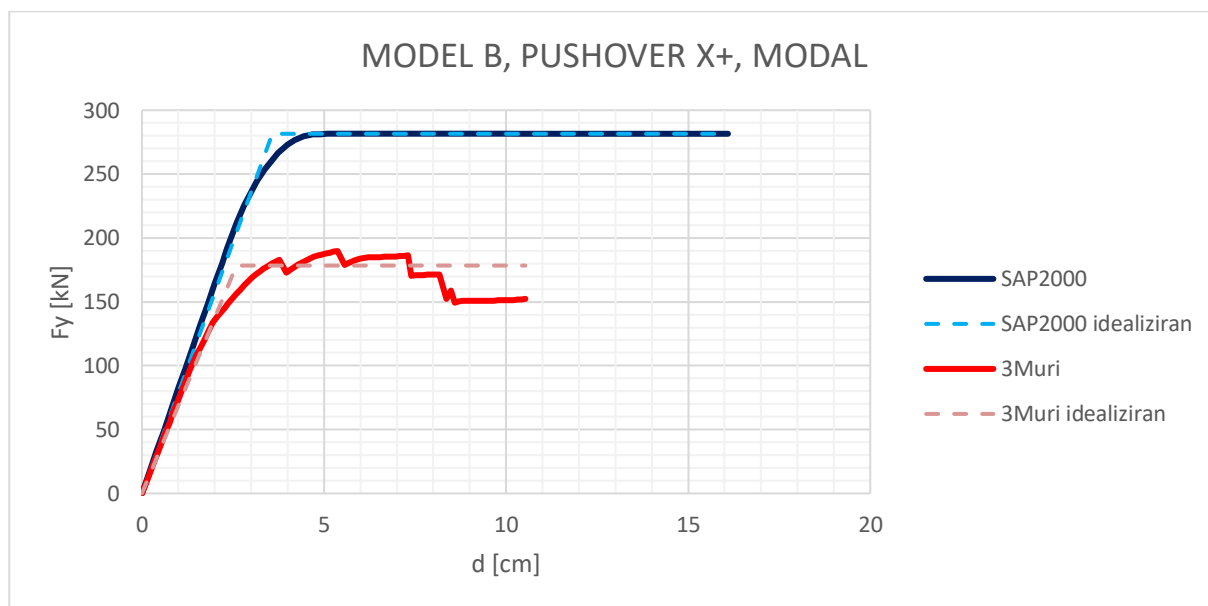
Table 20: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model B in SAP2000

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,3570	0,2769
2. etaža	0,7927	0,7184
3. etaža	1	1
Γ	1,2454	1,2674

V nadaljevanju (grafikoni 13–16) so prikazane potisne krivulje za model B v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil iz obeh programov.

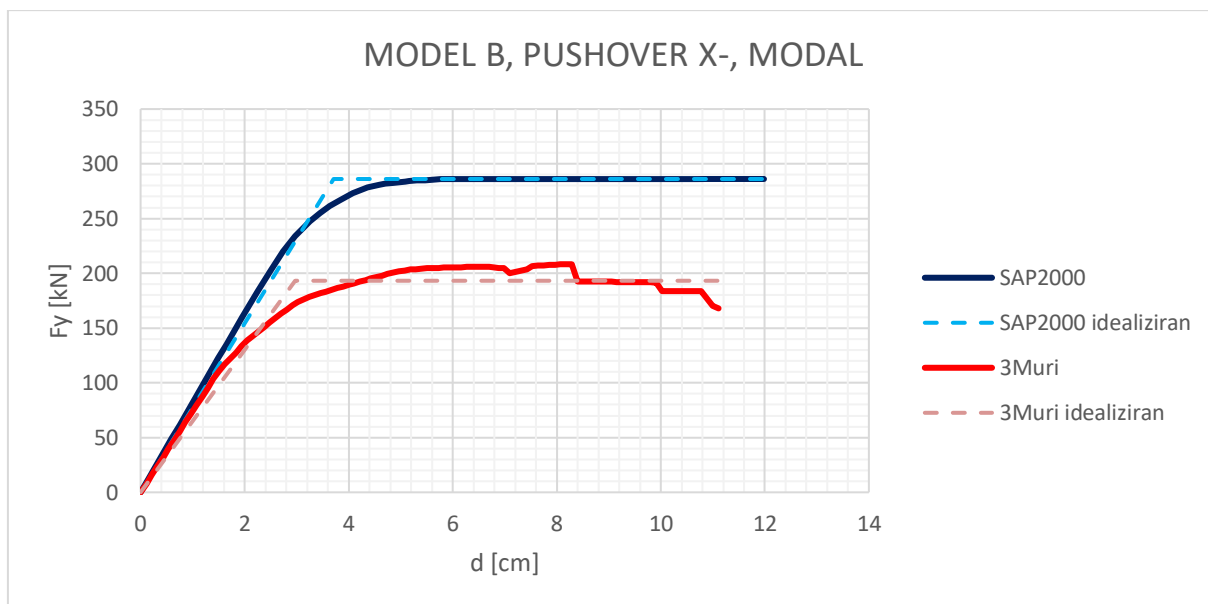
Grafikon 13: Potisne krivulje za model B, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 13: Model B pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.



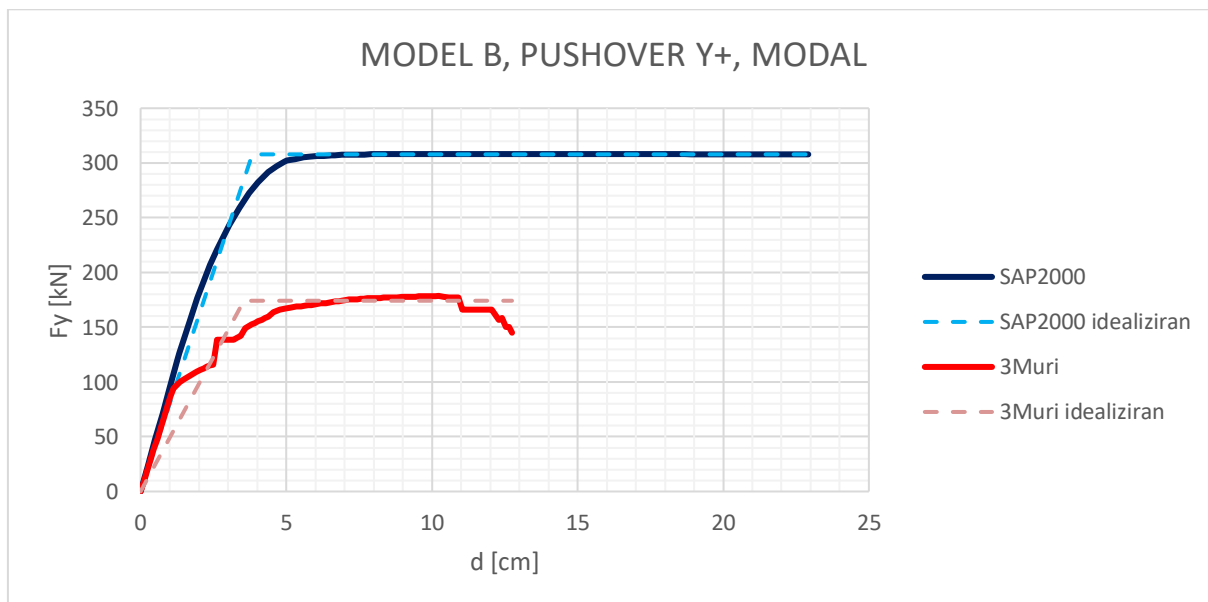
Grafikon 14: Potisne krivulje za model B, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 14: Model B pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.



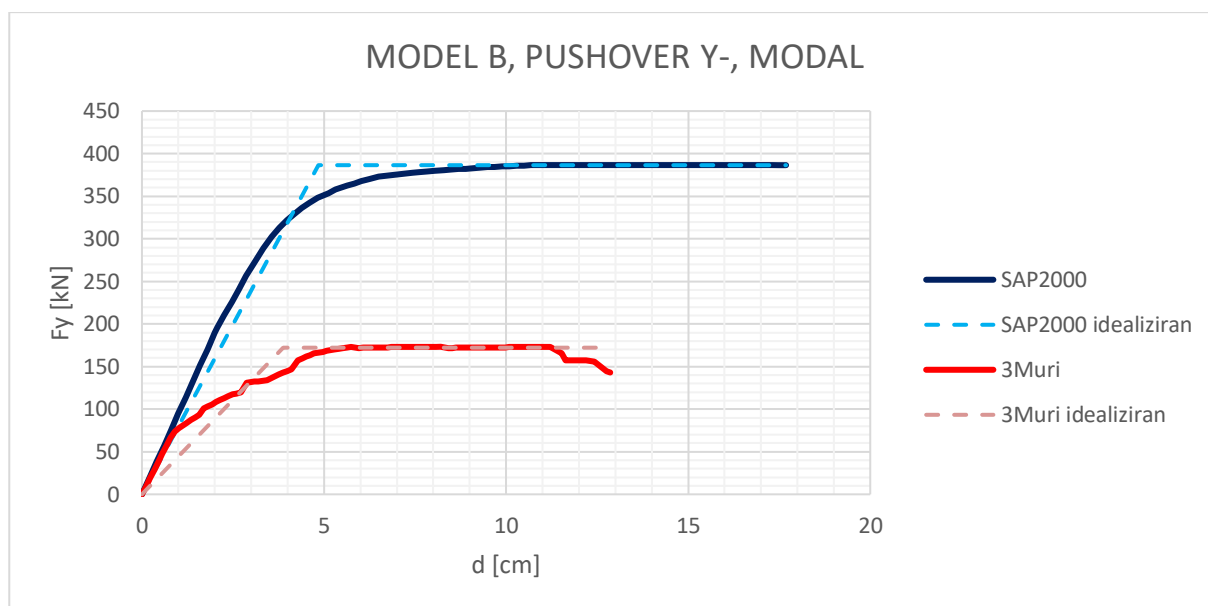
Grafikon 15: Potisne krivulje za model B, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 15: Model B pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.



Grafikon 16: Potisne krivulje za model B, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

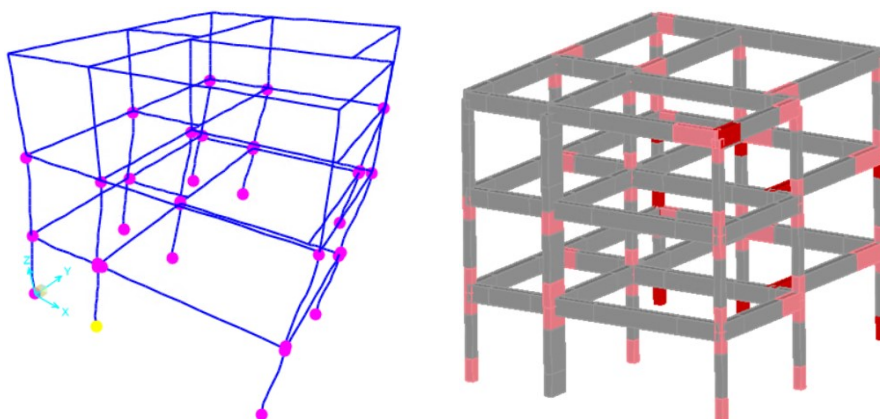
Graph 16: Model B pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.



Poleg potisnih krivulj pa prikažemo tudi razvoj poškodb konstrukcije pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve. Primerjave za posamezne smeri potisne analize so prikazane v nadaljevanju na slikah 67–70.

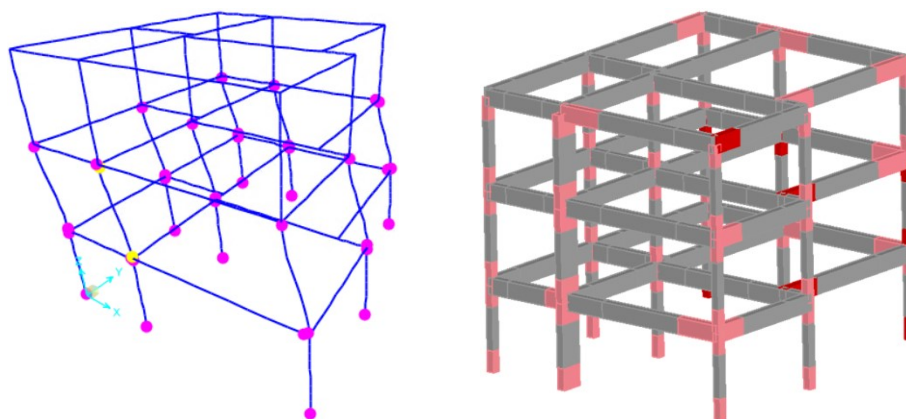
Če si najprej pogledamo rezultate iz programa SAP2000, vidimo, da v pozitivni in negativni smeri X nastopi mejna rotacija v največjem stebri C2. V smeri X+ dosežemo mejno rotacijo pri vpetju omenjenega stebra, pri smeri X- pa na vrhu in pri dnu istega stebra v prvem nadstropju. V smeri Y, ne glede na predznak obremenjevanja, je mejna rotacija najprej dosežena pri vpetju stebra C5, tj. na sredini konstrukcije.

V programu 3Muri nastopijo bistveno drugačni porušni mehanizmi. V smeri X, ne glede na predznak obremenjevanja, pride do porušitve stebrov C7, C8 in C9 ob vpetju kot tudi na vrhu in dnu stebrov v prvem nadstropju. Gre za stebre na podajnem robu stavbe, ki so še posebej občutljivi na torzijski odziv konstrukcije, ki se pojavi pri prvi nihajni obliki. Poleg tega pa dobimo tudi porušitve v nosilcih B7 v prvem in drugem nadstropju, kot tudi v nosilcu B8 v tretjem nadstropju. Podobno se zgodi tudi v smeri Y, in sicer pri obeh predznakih obremenjevanja. V tem primeru se dosežejo porušitve v stebrih C1, C2, C3 in C6 v pritličju in prvem nadstropju. V pozitivni smeri Y dobimo tudi porušitev v stebri C9 pri vpetju, kot tudi v prvih dveh nadstropjih. Porušitve v nosilcih se pojavijo na enakem mestu, kot pri smeri X. Razlog za ponavljajoče poškodbe na mestu nosilcev B7 in B8 je nepravilnost okvirja, kjer program 3Muri zaradi ne naleganja nosilcev B7 na stebre generira ekvivalenten okvir, ki na tem mestu nima nobene podpore.



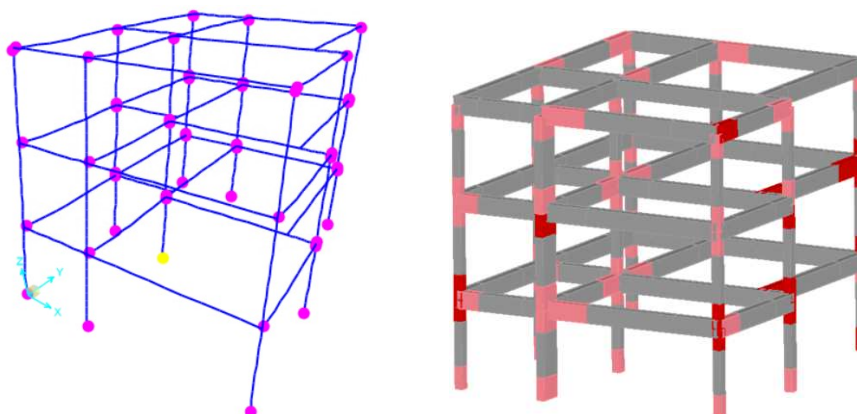
Slika 67: Stanje blizu porušitve, model B, smer $X+$, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 67: Near collapse limit state, model B, $X+$ direction, modal horizontal force distribution.



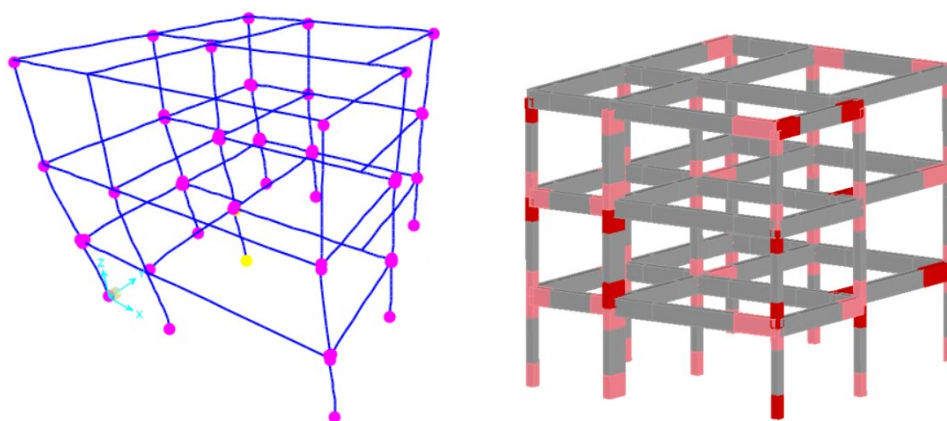
Slika 68: Stanje blizu porušitve, model B, smer $X-$, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 68: Near collapse limit state, model B, $X-$ direction, modal horizontal force distribution.



Slika 69: Stanje blizu porušitve, model B, smer $Y+$, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 69: Near collapse limit state, model B, $Y+$ direction, modal horizontal force distribution.



Slika 70: Stanje blizu porušitve, model B, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 70: Near collapse limit state, model B, Y- direction, modal horizontal force distribution.

Če primerjamo rezultate (grafikoni 13–16, preglednica 21) z rezultati v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil, dobimo podobne razlike kot pri modelu A. Pri modalni razporeditvi vodoravnih sil je nosilnost konstrukcije manjša zaradi višjega težišča rezultante sil in posledično večje ročice. Po drugi strani so mejni pomiki kontrolnih točk bistveno večji (z izjemo smeri Y v programu 3Muri), hkrati pa so tudi poškodbe elementov drugače razporejene.

V programu SAP2000 podobno kot pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil dobimo v programu SAP2000 manjše maksimalne prečne sile F_y v smeri X (okoli 284 kN), medtem ko maksimalna prečna sila v smeri Y+ znaša 308 kN, v smeri Y- pa 386 kN. V programu 3Muri dobimo ravno obratno, saj so vrednosti maksimalnih prečnih sil v smeri X 190–208 kN, v obeh smereh Y pa okoli 175 kN. V primerjavi smo pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil dobili večjo nosilnost v smeri Y, ne glede na uporabljen program.

Razlike med rezultati iz obeh programov so pri tej kombinaciji modela in razporeditve sil največje. V programu SAP2000 dobimo v smeri X v povprečju za 43 % večjo nosilnost konstrukcije, v Y smeri pa je nosilnost večja za 72 oz. 123 %. Velike razlike nastopijo tudi pri primerjavi mejnih pomikov kontrolne točke d_m . V smeri X so pomiki v programu SAP2000 večji za 8–53 %, v Y smeri pa za 38–80 %. Nihajni časi ekvivalentnega SDOF sistema T^* so kljub temu zelo podobno v obeh programih, pojavijo se nekoliko manjše vrednosti v programu SAP2000 (v smeri X 7 %, v smeri Y pa 24 %). Podobno kot pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil se razlike v silah in pomikih le še povečajo pri pretvorbi v ekvivalenten SDOF model. Razlike v maksimalnih prečnih silah F_y^* v smeri X znašajo 52 %, v smeri Y pa so vrednosti iz programa SAP2000 večje za 76–123 %. Pomiki na meji tečenja d_y^* so v smeri X v programu SAP2000 večji za 24–38 %, v smeri Y pa za 7–24 %.

Preglednica 21: Primerjava rezultatov potisne analize modela B, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Table 21: Comparison of pushover analysis results of model B, modal horizontal force distribution.

Količina	SAP2000				3Muri			
	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
Fy [kN]	281,56	286,14	307,87	386,49	189,73	208,29	178,63	173,29
dm [cm]	16,09	11,98	22,92	17,69	10,53	11,11	12,75	12,86
T* [s]	0,827	0,835	0,789	0,793	0,878	0,903	1,006	1,056
Fy* [kN]	226,08	229,75	242,65	304,61	143,87	155,83	138,26	136,67
dy* [cm]	2,88	2,98	3,02	3,82	2,09	2,40	2,82	3,08
dm* [cm]	12,92	9,62	18,06	13,94	8,51	10,20	10,13	10,22

Na podlagi vseh ugotovitev lahko sklepamo, kako program 3Muri razporedi vodoravne sile po konstrukciji. Informacija o tem elementu potisne analize v priročniku programa ni podana, je pa ključna za razumevanje porušnih mehanizmov. V primerjavi s programom SAP2000, kjer smo vodoravne sile skladno s študijo Žižmonda in Dolška [12] podali v masnem središču vsake etaže, program 3Muri silo v dani etaži porazdeli med vsa vozlišča konstrukcije v tej. Pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil ta pristop ne povzroča toliko težav, saj so vodoravne sile v posameznih vozliščih sile odvisne le od mase v vozlišču in s tem med seboj približno enake, zato povzročijo translacijo konstrukcije kot celote v obremenjeni smeri. V primeru modalne razporeditve vodoravnih sil pa vrednost sile, ki jo program poda v posamezno vozlišče, ni odvisna le od pripadajoče mase, temveč tudi od pomika vozlišča za izbrano nihajno obliko. Posledično je izračunana vodoravna sila pri vozliščih na podajnem robu stavbe bistveno večja od sile pri vozlišču na togem robu stavbe. Posledice takega pristopa vidimo pri potisni analizi modela B v smeri X, kjer so vodoravne sile v vozliščih stebrov C7, C8 in C9 veliko večje od vodoravnih sil v vozliščih stebrov C1, C2 in C3. S tem v primeru torzijskih nihajnih oblik dobimo nesimetrično obremenjeno konstrukcijo, zaradi česar pride do bistveno zgodnejše porušitve elementov na podajnem robu.

5.3.3 Model C

Model C je bil izdelan skladno z razdelkoma 4.2.3 in 5.1.3 v programu SAP2000. Model je služil kot izhodišče za primerjavo ostalih modelov, saj je bil izdelan brez poenostavitev v zasnovi stavbe.

5.3.3.1 Enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru posamezne etaže, so prikazane v preglednici 22. Poleg tega je podan tudi transformacijski faktor Γ .

Preglednica 22: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil za model C v programu SAP2000.

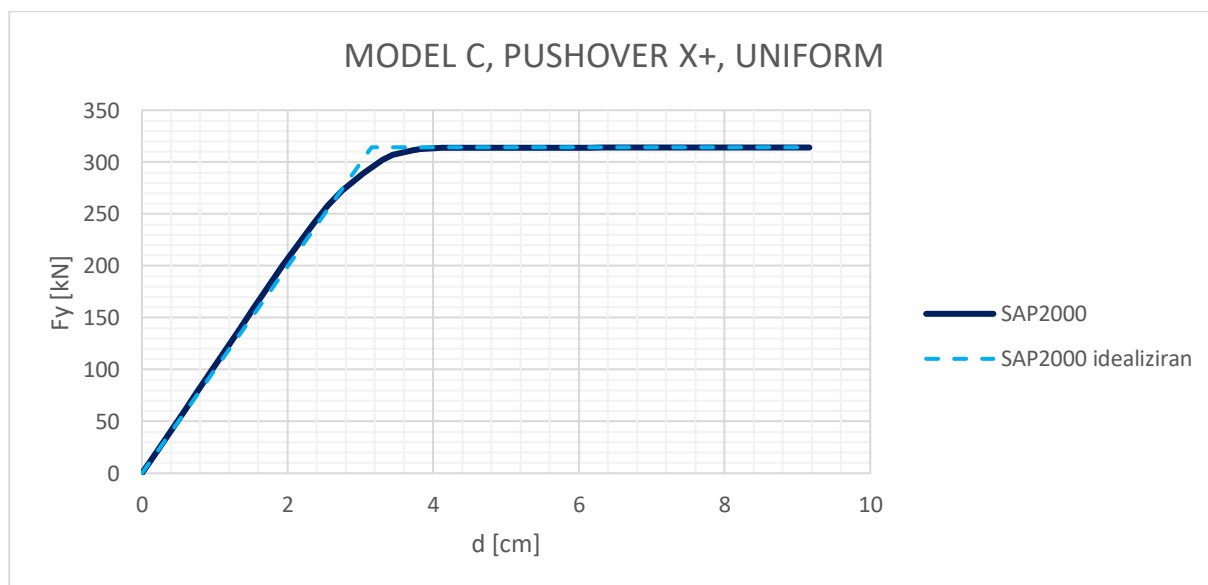
Table 22: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of uniform horizontal force distribution for the model C in SAP2000

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,9970	0,9970
2. etaža	1	1
3. etaža	0,9635	0,9635
Γ	1,2253	1,2499

Na grafikonih 17–20 so prikazane potisne krivulje za model C v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil.

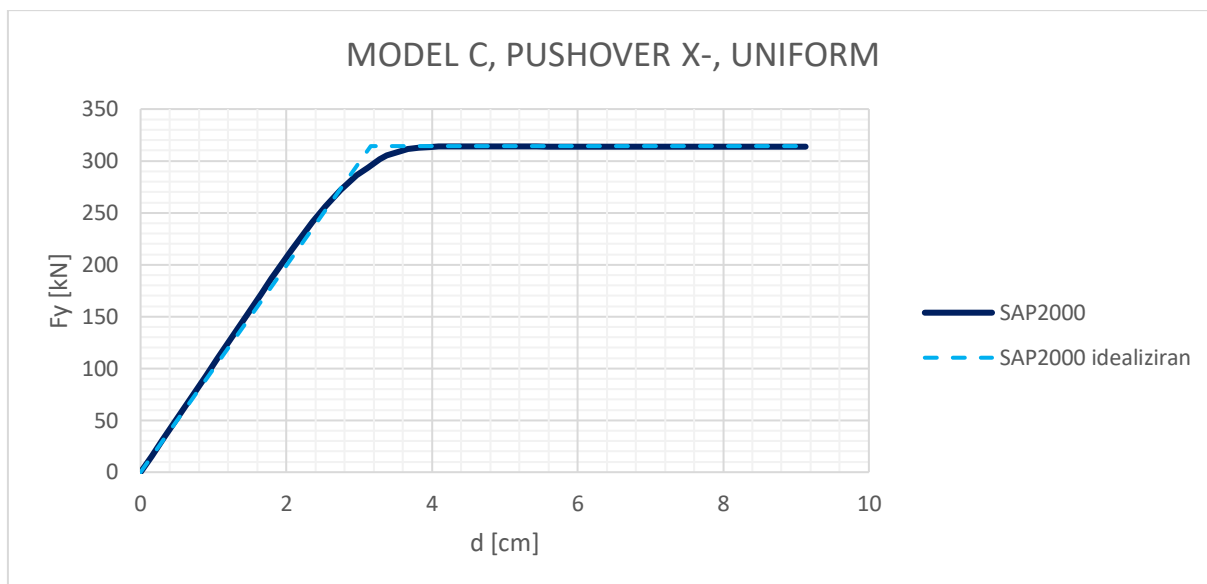
Grafikon 17: Potisne krivulje za model C, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 17: Model C pushover curves, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



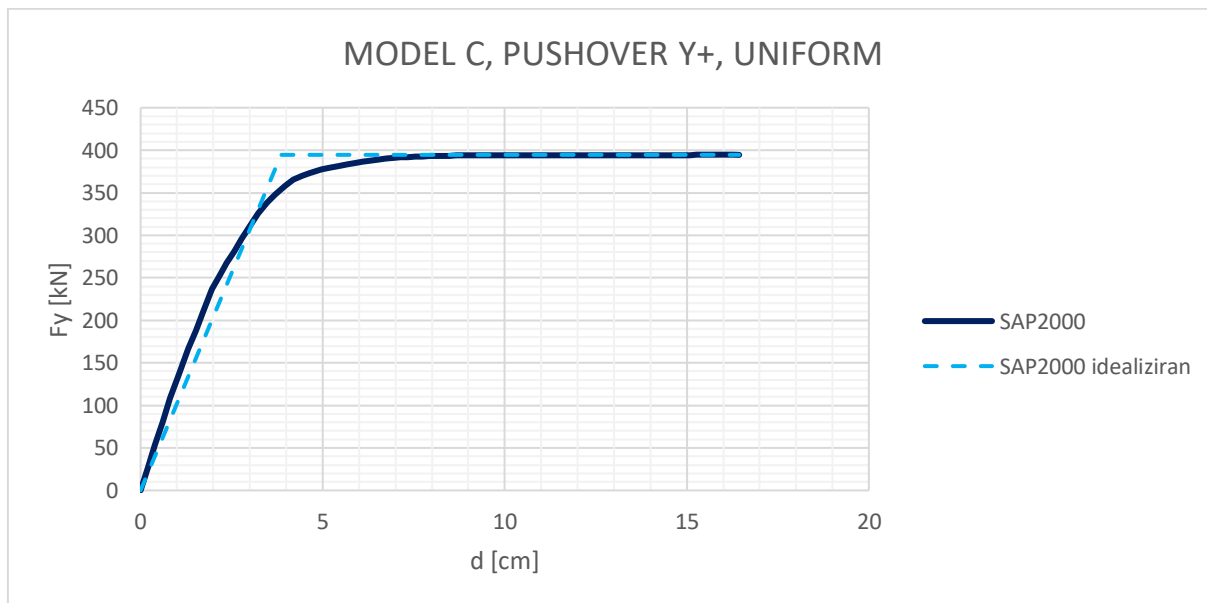
Grafikon 18: Potisne krivulje za model C, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 18: Model C pushover curves, X- direction, uniform horizontal force distribution.



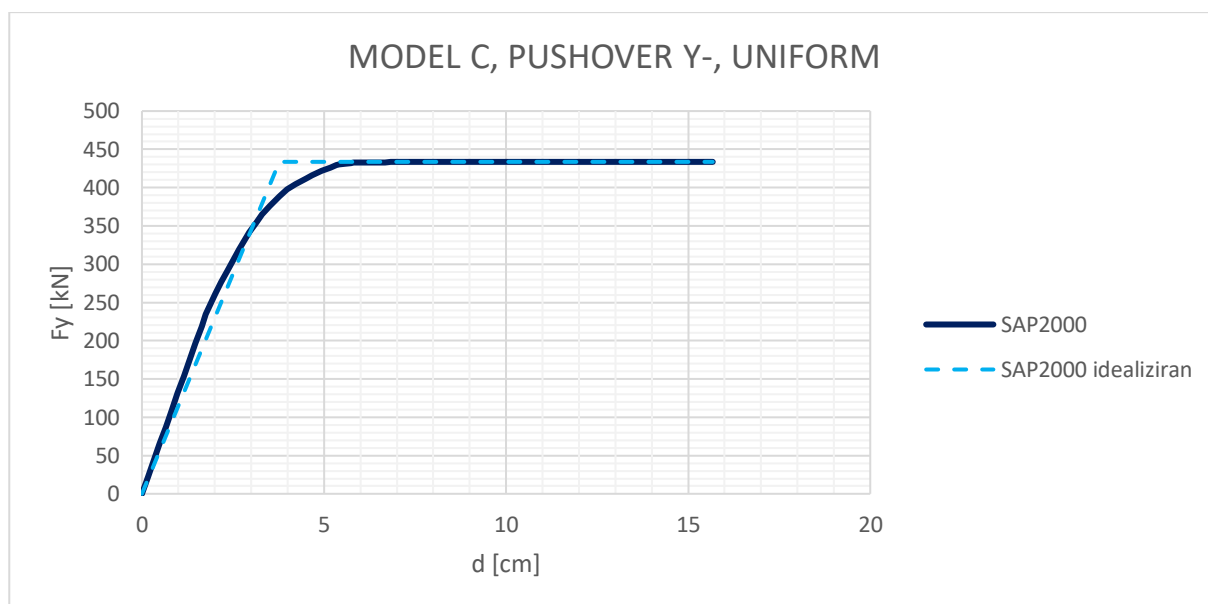
Grafikon 19: Potisne krivulje za model C, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 19: Model C pushover curves, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.

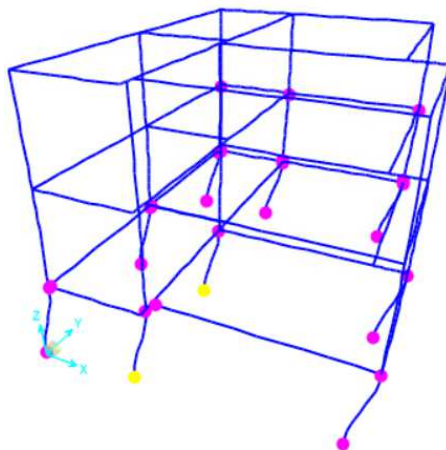


Grafikon 20: Potisne krivulje za model C, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 20: Model C pushover curves, Y- direction, uniform horizontal force distribution.

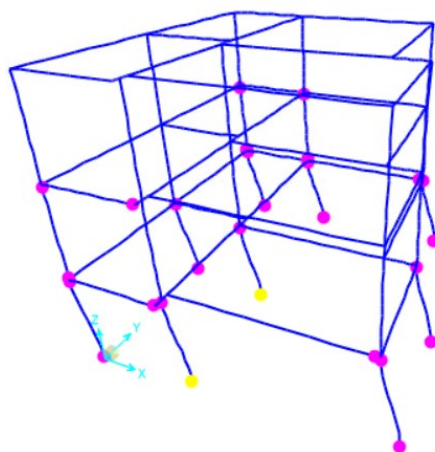


Poleg potisnih krivulj pa prikažemo tudi razvoj poškodb konstrukcije pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve na slikah 71–74. V pozitivni in negativni smeri X nastopi mejno stanje blizu porušitve hkrati v stebrih C2 in C5 ob vpetju. V obeh smereh Y pa nastopi mejno stanje blizu porušitve ob vpetju stebra C5. V primerjavi, smo v modelu B pri enaki razporeditvi vodoravnih sil dosegli mejno rotacijo pri vpetju stebra C2 za smeri X+, X- in Y+, za smer Y- pa pri vpetju stebra C5.



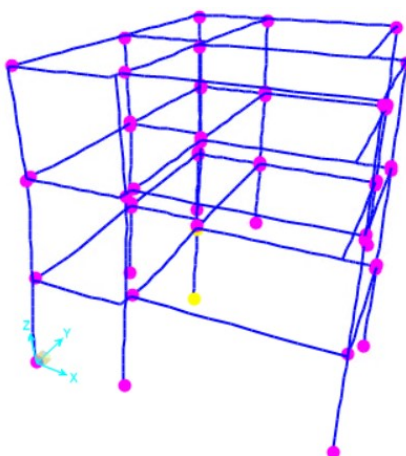
Slika 71: Stanje blizu porušitve, model C, smer X+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 71: Near collapse limit state, model B, X+ direction, uniform horizontal force distribution.



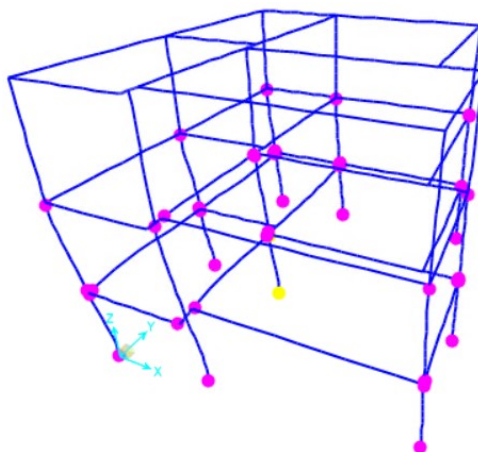
Slika 72: Stanje blizu porušitve, model C, smer X-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Figure 72: Near collapse limit state, model B, X- direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 73: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y+, enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Figure 73: Near collapse limit state, model B, Y+ direction, uniform horizontal force distribution.



Slika 74: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y-, enakomerna razporeditev vodoravnih sil

Figure 74: Near collapse limit state, model B, Y- direction, uniform horizontal force distribution.

Potisne krivulje in pripadajoče ekvivalentne modele SDOF v primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil v nadaljevanju prikazujemo tudi tabelarično v preglednici 24 v razdelku 5.3.3.2, kjer jih primerjamo z primerom modalne razporeditve vodoravnih sil.

5.3.3.2 Modalna razporeditev vodoravnih sil

Vrednosti vodoravnih sil, ki smo jih definirali v masnem centru posamezne etaže v programu SAP2000, so prikazane v preglednici 23, kot tudi pripadajoči transformacijski faktor.

Preglednica 23: Vektor normiranih vodoravnih sil in transformacijski faktor v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil za model C v programu SAP2000.

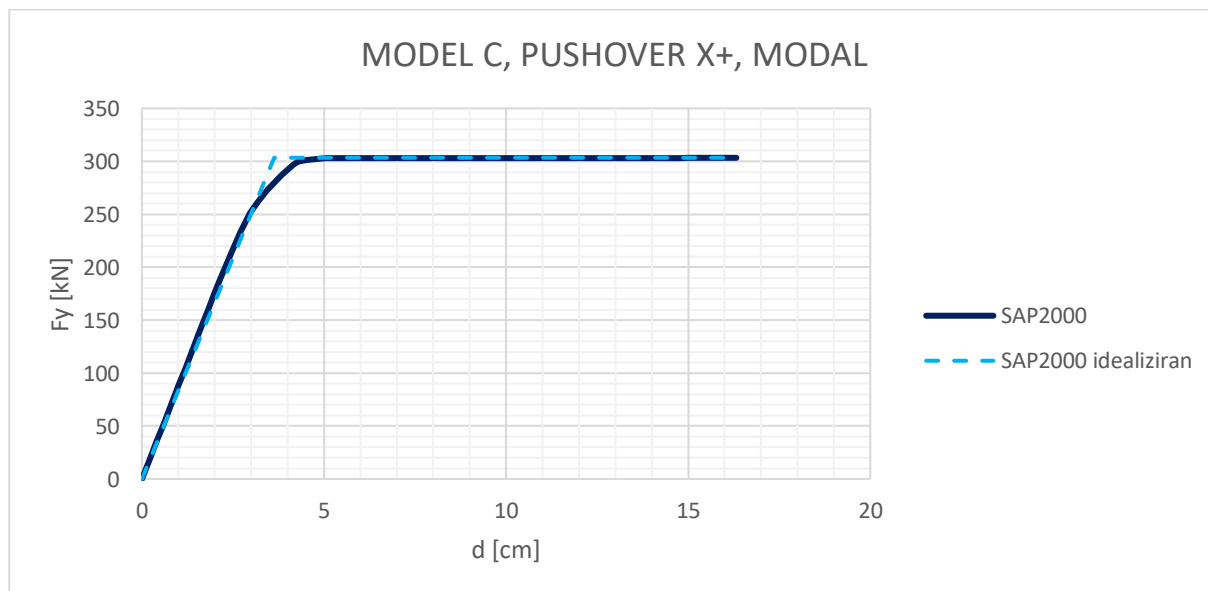
Table 23: Vector of normalized horizontal forces and transformation factor in the case of modal horizontal force distribution for the model C in SAP2000

Etaža	Vodoravne sile	
	Smer X	Smer Y
1. etaža	0,3509	0,3025
2. etaža	0,7617	0,7436
3. etaža	1	1
Γ	1,2452	1,2621

Na grafikonih 21–24 so prikazane potisne krivulje za model C v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil.

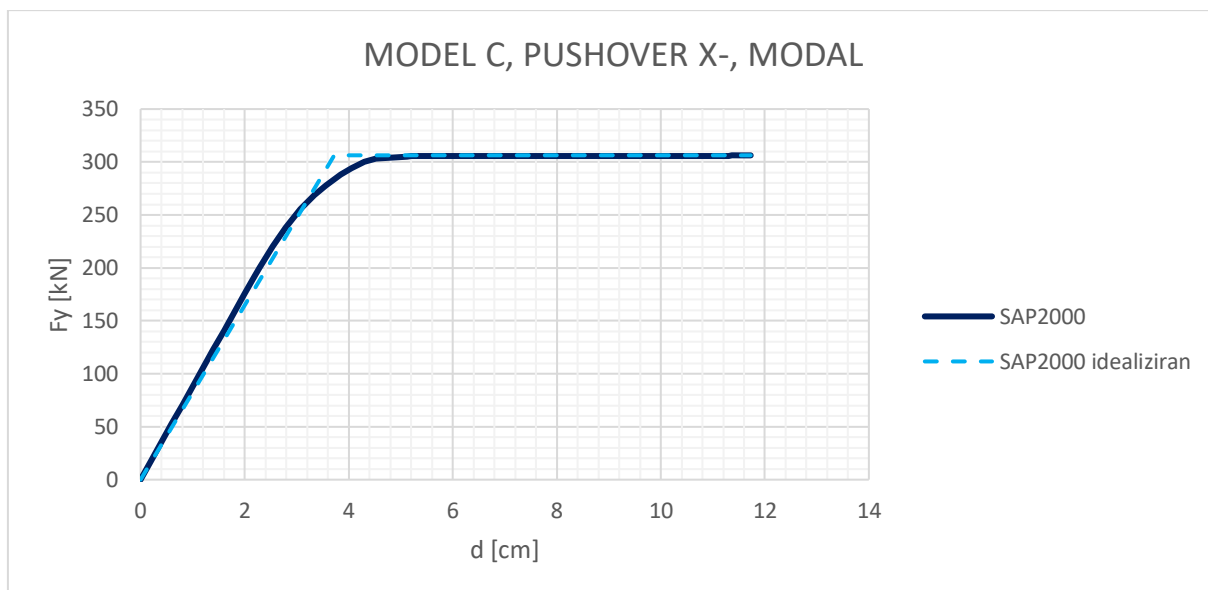
Grafikon 21: Potisne krivulje za model C, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 21: Model C pushover curves, X+ direction, modal horizontal force distribution.



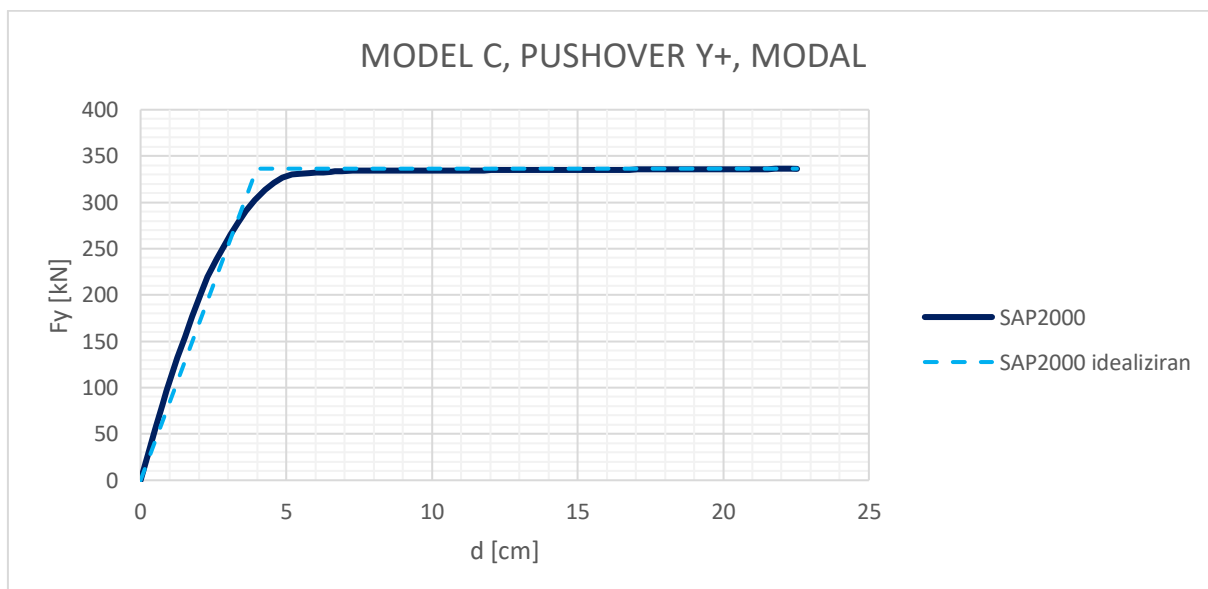
Grafikon 22: Potisne krivulje za model C, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 22: Model C pushover curves, X- direction, modal horizontal force distribution.



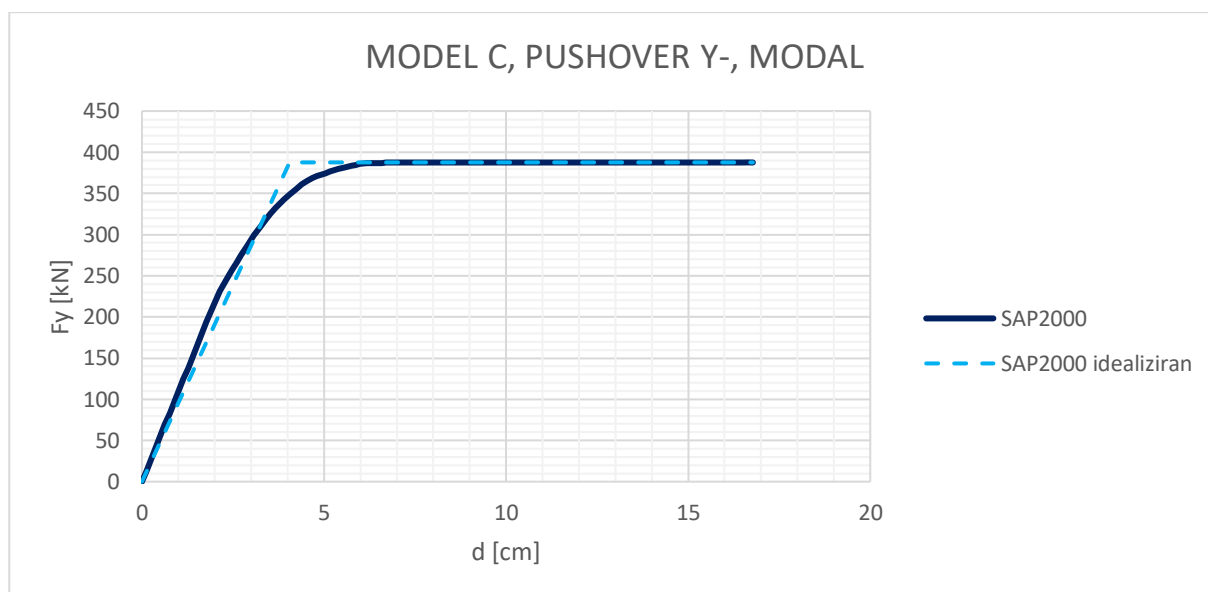
Grafikon 23: Potisne krivulje za model C, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 23: Model C pushover curves, Y+ direction, modal horizontal force distribution.

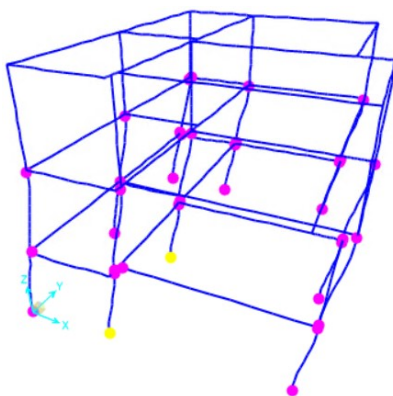


Grafikon 24: Potisne krivulje za model C, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Graph 24: Model C pushover curves, Y- direction, modal horizontal force distribution.

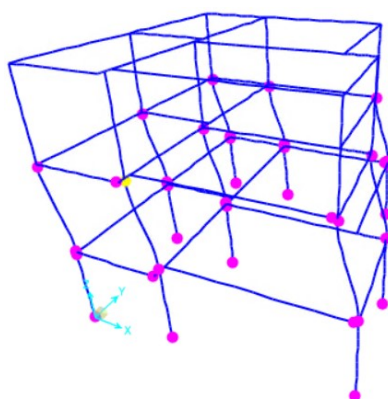


Poleg potisnih krivulj pa prikažemo tudi razvoj poškodb konstrukcije pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve na slikah 75–78. V smeri X+ dosežemo mejno stanje blizu porušitve ob vpetju stebrov C2 in C5, v smeri X- pa v stebru C2 na vrhu prvega nadstropja. V smereh Y+ in Y- nastopi mejno stanje blizu porušitve ob vpetju stebra C5 (v smeri Y+ pa tudi na vrhu enakega stebra v pritličju). V primerjavi, smo v modelu B pri enaki razporeditvi vodoravnih sil dosegli mejno rotacijo v obeh smereh X ob vpetju stebra C2, v obeh smereh Y pa ob vpetju stebra C5.



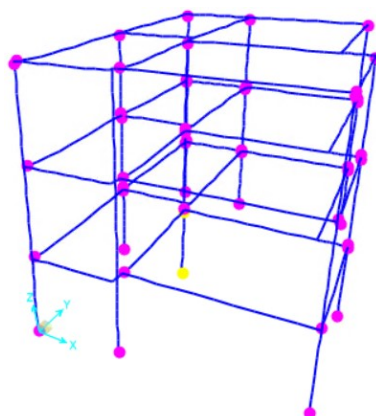
Slika 75: Stanje blizu porušitve, model C, smer X+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 75: Near collapse limit state, model C, X+ direction, modal horizontal force distribution.



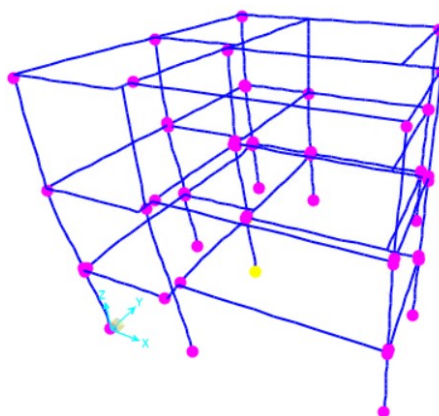
Slika 76: Stanje blizu porušitve, model C, smer X-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 76: Near collapse limit state, model C, X- direction, modal horizontal force distribution.



Slika 77: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y+, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 77: Near collapse limit state, model C, Y+ direction, modal horizontal force distribution.



Slika 78: Stanje blizu porušitve, model C, smer Y-, modalna razporeditev vodoravnih sil.

Figure 78: Near collapse limit state, model C, Y- direction, modal horizontal force distribution.

Potisne krivulje in pripadajoče ekvivalentne modele SDOF za obe vrsti razporeditve vodoravnih sil v nadaljevanju prikazujemo tudi tabelarično (preglednica 24). Podobno kot pri modelih A in B tudi v tem primeru dobimo pri modalni razporeditvi vodoravnih sil manjšo nosilnost in večje mejne pomike kontrolne točke pri nastopu mejnega stanja. To je razvidno tudi iz primerjave vseh osmih izvedenih potisnih analiz z modelom C na grafikonu 25.

Preglednica 24: Primerjava rezultatov potisne analize modela C, obe razporeditvi vodoravnih sil.

Table 24: Comparison of pushover analysis results of model C, both horizontal force distributions.

Količina	Modalna				Enakomerna			
	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
F_y [kN]	303,41	306,35	336,36	387,69	314,27	314,31	394,59	433,70
d_m [cm]	16,32	11,73	22,53	16,78	9,16	9,12	16,44	15,67
T^* [s]	0,841	0,846	0,815	0,766	0,787	0,788	0,753	0,733
F_y^* [kN]	243,67	246,02	266,51	307,18	256,48	256,51	315,71	353,95
d_y^* [cm]	2,92	2,99	3,16	3,22	2,57	2,58	3,08	3,08
d_m^* [cm]	13,11	9,42	17,85	13,29	7,48	7,45	13,15	12,79

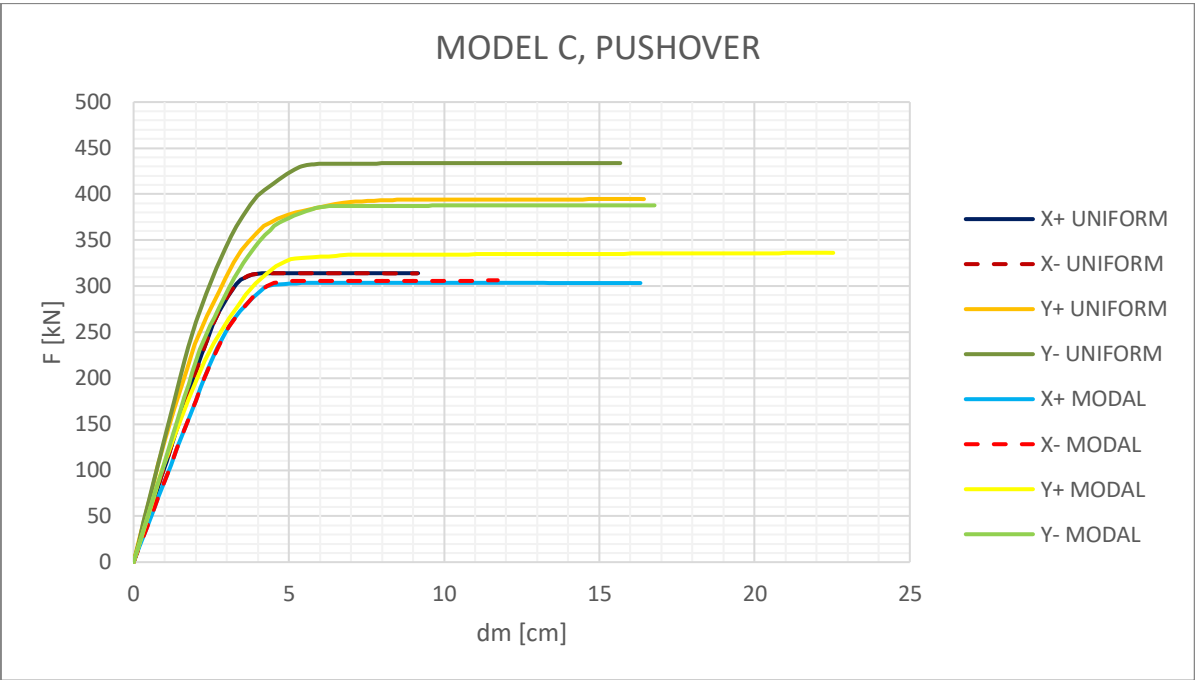
Opazimo tudi, da je nosilnost konstrukcije v smeri X neodvisna od predznaka obremenjevanja, in to pri obeh razporeditvah vodoravnih sil. Nasprotno opazimo pri primerjavi rezultatov za različna predznaka obremenjevanja v smeri Y, saj je nosilnost v negativni smeri Y višja od nosilnosti v pozitivni smeri Y. Razlika je posledica vpliva stebra C2, ki je v primeru Y+ smeri obremenjen natezno, v primeru smeri Y- pa tlačno.

Smer obremenjevanja vpliva tudi na mejni pomik kontrolne točke. V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil je pomik mejne kontrolne točke v obeh smereh X skoraj enak, manjša razlika nastopi pri smereh Y.

Podobne zaključke glede nosilnosti in mejnega pomika lahko potegnemo tudi pri ekvivalentnem sistemu SDOF, medtem ko so si pomiki pri nastopu tečenja ekvivalentnega sistema SDOF d_y^* pri različnih predznakih obremenjevanja bistveno bolj podobni.

Grafikon 25: Vse potisne krivulje za model C..

Graph 25: All model C pushover curves.



5.4 Izračun mejnih pospeškov

Rezultate potisne analize iz programa SAP2000 smo skladno z 2. poglavjem uporabili pri določitvi elastičnih pospeškov tal, ki povzročijo nastop mejnega stanja blizu porušitve v konstrukciji. Program 3Muri nam je določil elastične pospeške samodejno, kot je opisano v razdelku 3.2.4.

V razdelku 5.3 smo opisali način delovanja programa 3Muri v primeru enakomerne porazdelitve vodoravnih sil (*UNIFORM*). Temu smo prilagodili tudi vhodne podatke v programu SAP2000, da bi rezultate lahko ustrezno primerjali. Poleg tega pa smo opravili tudi potisno analizo in izračun mejnega pospeška skladno s trenutno veljavnim Evrokodom 8.

V preglednici 25 so prikazani vsi določeni elastični pospeški tal, ki povzročijo mejno stanje blizu porušitve v konstrukciji. V stolpcu z naslovom *Metoda*, so prikazane vse uporabljene metode za določitev mejnega pospeška. Kratka razlaga vsake metode je podana v nadaljevanju:

- SAP2000 EC8 2005 $\Gamma > 1$:

Potisna analiza je izvedena v programu SAP2000. V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil je transformacijski faktor Γ izračunan skladno z načinom računanja programa 3Muri, v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil je faktor izračunan skladno s predpisi in enačbami iz trenutno veljavnega Evrokoda 8.

- SAP2000 EC8 2005 $\Gamma = 1$:

Potisna analiza je izvedena v programu SAP2000. V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil je transformacijski faktor Γ izračunan skladno s predpisi in enačbami iz trenutno veljavnega Evrokoda 8, primer modalne razporeditve vodoravnih sil skladno s trenutno veljavno verzijo Evrokoda je že izveden v metodi $\Gamma > 1$.

- SAP2000 EC8 2022 $\Gamma > 1$:

Velja enako kot za metodo SAP2000 EC8 2005 $\Gamma > 1$, le da je idealizacija potisne izvedena skladno z novo delovno verzijo Evrokoda 8.

- SAP2000 EC8 2022 $\Gamma = 1$:

Velja enako kot za metodo SAP2000 EC8 2005 $\Gamma = 1$, le da je idealizacija potisne analize izvedena skladno z novo delovno verzijo Evrokoda 8.

- 3Muri:

Potisna analiza je izvedena v programu 3Muri. Izračun mejnega pospeška je opravljen samodejno v programu.

- 3Muri + EC8 2005

Potisna analiza izvedena je v programu 3Muri. Mejni pospešek je izračunan s pomočjo uporabe rezultatov potisne analize iz programa 3Muri, skladno s trenutno verzijo Evrokoda 8. Ta metoda je služila predvsem kot kontrola naše interpretacije priročnika, da program izračuna mejne pospeške skladno z metodo N2 in Evrokodom 8 (glej tudi razdelek 3.2.4).

Preglednica 25: Maksimalni pospeški tal a_g [g], ki v konstrukciji povzročijo nastop mejnega stanja blizu porušitve.

Table 25: Peak ground acceleration a_g [g], which causes the occurrence of the limit state near collapse in the structure.

Model	Obtežni primer	ENAKOMERNA				MODALNA			
	Metoda	X+	X-	Y+	Y-	X+	X-	Y+	Y-
Model A	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma > 1$	0,293	0,293	0,293	0,291	0,361	0,352	0,474	0,353
	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma = 1$	0,307	0,307	0,307	0,305	/	/	/	/
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma > 1$	0,269	0,269	0,268	0,267	0,332	0,328	0,436	0,326
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma = 1$	0,312	0,312	0,311	0,310	/	/	/	/
	3Muri	0,285	0,297	0,321	0,323	0,331	0,387	0,379	0,326
	3Muri + EC8 2005	0,284	0,297	0,322	0,322	0,331	0,387	0,380	0,327
Model B	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma > 1$	0,312	0,313	0,582	0,385	0,503	0,371	0,723	0,556
	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma = 1$	0,327	0,336	0,610	0,404	/	/	/	/
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma > 1$	0,287	0,289	0,586	0,379	0,462	0,345	0,702	0,546
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma = 1$	0,334	0,336	0,681	0,441	/	/	/	/
	3Muri	0,314	0,379	0,484	0,423	0,312	0,364	0,324	0,312
	3Muri + EC8 2005	0,314	0,378	0,484	0,423	0,312	0,363	0,325	0,311
Model C	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma > 1$	0,306	0,304	0,556	0,562	0,502	0,358	0,705	0,558
	SAP2000 EC8 2005 $\Gamma = 1$	0,321	0,320	0,584	0,590	/	/	/	/
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma > 1$	0,283	0,282	0,584	0,553	0,463	0,334	0,723	0,537
	SAP2000 EC8 2022 $\Gamma = 1$	0,329	0,328	0,679	0,643	/	/	/	/

V prvi fazi lahko primerjamo rezultate med posameznimi izbranimi vrstami razporeditve vodoravnih sil oz. uporabljenih obtežnih primerov pri potisni analizi. V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil dobimo skoraj pri vseh modelih (z izjemo modela B v programu 3Muri ter smeri Y- v modelu C) in metodah manjše vrednosti elastičnega pospeška tal, ki povzroči nastop mejnega stanja blizu porušitve v konstrukciji v primerjavi z primerom modalne razporeditve vodoravnih sil. Razlike v mejnem pospešku tal znašajo med 1 % in 64 % (povprečno 30 %). Rezultat je posledica dejstva, da pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil

običajno dobimo porušni mehanizem v obliki šibke etaže, medtem ko pri modalni razporeditvi nastopi globalni porušni mehanizem, ki poruši konstrukcijo kot celoto.

V naslednji fazi nas zanima primerjava med rezultati iz programa SAP2000 in 3Muri. Vidimo, da je podobnost rezultatov zelo odvisna od kompleksnosti modeli. Najprej se osredotočimo na primerjavo med modeli pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil. Mejni pospeški iz programa SAP2000, ki so izračunani skladno z metodo, ki jo uporablja 3Muri, so v primeru modela A zelo podobni. Za obe smeri X dobimo skoraj enake pospeške tal, v programu 3Muri pa so vrednosti za smeri Y nekoliko večje (okoli 10 %). Nasprotno pa v primeru modela B dobimo bistveno večje razlike. Mejni pospeški iz programa SAP2000 so v smeri X+ večji za 4 %, v smeri Y+ pa 26 %. V smeri X- dobimo v programu SAP2000 11 %, v smeri Y- pa 5 % manjše mejne pospeške. Razlog velikih razlik je v matematičnem modelu iz programa 3Muri, saj konstrukcija z ekvivalentnimi okvirji ni več enakovredna matematičnem modelu iz programa SAP2000. Še večje razlike pa dobimo v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil. Način podajanja vodoravnih sil v programu 3Muri, ki smo ga opisali v razdelku 5.3.2.2 se bistveno razlikuje od uporabljenega načina v programu SAP2000 po predlogu študije Žižmonda in Dolška [4]. V modelu A so te razlike manjše, saj je konstrukcija bistveno bolj simetrična. Z izjemo smeri X- smeri dobimo v programu SAP2000 višje mejne pospeške. V smeri X se mejni pospeški razlikujejo za prb. 10 %. V smeri Y- razlika znaša le 8 %, a se mejni pospeški v smeri Y+ razlikujejo za kar 25 %. Večje razlike pa so razvidne pri modelu B, kjer so s programom SAP2000 dobljeni mejni pospeški višji v razponu 61–123 % (z izjemo smeri X-, kjer je razlika le 2 %). Razlog za takšno odstopanje je v tem, da so pogoji za uporabo metode ekvivalentnih okvirjev iz programa 3Muri v tem modelu prekršeni, saj je konstrukcija torzijsko podajna, nesimetrična in tudi nosilci ne nalebajo povsod na stebre. Iz tega razloga je uporabnost rezultatov iz programa 3Muri neprimerna. S pomočjo modela B so prikazane največje slabosti in težave programa 3Muri pri obravnavi armiranobetonskih okvirnih konstrukcij.

Med seboj lahko tudi primerjamo rezultate posameznih modelov. Model C, ki je izdelan brez poenostavitev v zasnovi, skladno z razdelkom 2.1, nam služi kot izhodišče za primerjavo ustreznosti ostalih modelov. V primeru modela A, ki smo ga najbolj poenostavili, vidimo, da smo s poenostavitvami in neupoštevanjem efektivnih širin nosilcev in pripadajoče armature iz plošče bistveno zmanjšali togost, nosilnost in deformacijsko kapaciteto konstrukcije. V smeri X so te razlike manjše (za enakomerno razporeditev vodoravnih sil okoli 4 %, za modalno razporeditev sil v smeri X- 2 %, za modalno razporeditev sil v smeri X+ pa kar 39 %), v smeri Y pa so pospeški manjši za prb. 90 % v primeru enakomerne razporeditve ter približno 55 % za modalno razporeditev vodoravnih sil. Velik vpliv na manjšo togost in nosilnost v smeri Y ima tudi sprememba dimenzij stebra C2 iz 25/75 cm na 25/25 cm. Zanimiva je tudi primerjava rezultatov, dobljenih z modeloma B in C, kjer razlike v modelnih predpostavkah niso imele tako velikega vpliva, kot smo pričakovali. V primeru enakomerne razporeditve vodoravnih sil smo dobili v modelu B celo višje mejne pospeške tal v smereh X+, X- in Y+ (2–5 %), so pa bili zato mejni pospeški v smeri Y- za 46 % manjši. V primeru modalne razporeditve vodoravnih sil so razlike še manjše. Mejni pospeški iz modela B so v povprečju manjši za 1,5 %. Na podlagi ugotovitev lahko rečemo, da smo model A preveč poenostavili in konstrukcija ne reprezentira stavbo SPEAR dobro. Model B pa je že zelo dober približek in vrednosti mejnih pospeškov z izjemo enega primera so zelo podobne.

V razdelku 3.2.4 smo postavili trditev, da program 3Muri izračuna mejne pospeške tal skladno z metodo N2 in Evrokodom 8. S pomočjo primerjave metod poimenovanih "3Muri" in "3Muri +

EC8 2005" smo hoteli trditev preveriti. Primerjali smo pospeške tal, ki jih je določil program 3Muri samodejno, in pospeške tal, ki smo jih izračunali skladno z Evrokodom 8 s pomočjo uporabe rezultatov potisne analize iz programa 3Muri (d_y^* , d_m^* , m^* , F_y^* , T^*). V vseh primerih smo dokazali, da trditev drži, saj se vrednosti mejnih pospeškov tal po obeh metodah enake oz. se razlikujejo za manj kot en odstotek.

Prav tako lahko primerjamo izračunane mejne pospeške tal, dobljene skladno s trenutno verzijo Evrokoda 8 [6] in novo delovno verzijo istega standarda [7]. Če si najprej pogledamo enakomerno razporeditev vodoravnih sil, v metodah, kjer smo transformacijski faktorja Γ določili skladno s programom 3Muri, dobimo z uporabo trenutnega Evrokoda 8 višje mejne pospeške tal (največ 9,5 % razlike, povprečno 6,5 % razlike). Ravno nasprotno pa opazimo pri metodah, kjer je transformacijski faktor Γ določen skladno z Evrokodom 8. V tem primeru dobimo z uporabo nove delovne verzije Evrokoda 8 višje mejne pospeške tal (največ 14 % razlike, povprečno 4,5 % razlike). Ko primerjamo rezultate, kjer smo upoštevali modalno razporeditev vodoravnih sil, dobimo prav tako večje mejne pospeške tal v primeru uporabe trenutno veljavnega Evrokoda 8. Maksimalna razlika je približno 9 %, povprečna pa okoli 6,5 %. Razlika nastane zaradi novega načina idealizacije potisne krivulje.

6 ZAKLJUČEK

V sklopu magistrskega dela smo analizirali vpliv modelnih negotovosti na potisno analizo na primeru trinadstropne armiranobetonske okvirne konstrukcije, testirane v okviru evropskega raziskovalnega projekta SPEAR. V kontekstu magistrskega dela je izraz modelne negotovosti zajemal predvsem različne načine modeliranja stavbe preko uporabo različne programske opreme. V ta namen sta bila uporabljena dva programa, SAP2000 in 3Muri, ki omogočata izvedbo potisne analize. Modelne negotovosti v programskih opremljenih smo ovrednotili s pomočjo treh modelnih variant stavbe SPEAR. S pomočjo prvega modela (model A) smo izvedli primerjavo najbolj poenostavljenega modela konstrukcije v obeh programih. V tem modelu smo poravnali osi nosilnih elementov, da smo dobili okvirje, pri katerem so nosilci nalegali na stebre na obeh koncih. Pri drugem modelu (model B) smo izkoristili in preverili največje zmožnosti modeliranja stavbe SPEAR v programu 3Muri. Enake poenostavitve smo upoštevali tudi v programu SAP2000. Tretji model (model C) pa je bil izdelan samo v programu SAP2000. Modeliran je bil brez poenostavitev v zasnovi, z njim pa smo ovrednotiti vplive poenostavitev v modelih A in B na natančnost analize. Modele smo uporabili v analizi lastnega nihanja in potisni analizi, rezultate potisne analize pa aplicirali v metodi N2 s ciljem določitve pospeška tal pri nastopu mejnega stanja blizu porušitve skladno s trenutno veljavnim Evrokodom 8, kot tudi novo delovno verzijo istega standarda.

Oba programa imata svoje prednosti in slabosti. Prednost programa SAP2000 je vsestranskost, saj omogoča modeliranje široke palete konstrukcijskih sistemov, od enostavnih do zapletenih in ni omejen na določeno vrsto konstrukcije. Poleg tega uporabnik lahko dobi natančen vpogled v delovanje programa, saj so v priročnikih teoretične osnove programa dobro definirane. Možna je tudi kontrola vmesnih rezultatov. Na primer, za vsak korak potisne analize je možno preveriti parametre odziva, kot so notranje sile. Prav to pa so slabosti programa 3Muri. Skozi celoten proces, od modeliranja konstrukcije, do izvedbe potisne analize in analize rezultatov, ima uporabnik premajhno kontrolo nad določenimi procesi. Primer takšnega procesa predstavlja določitev razporeditve vodoravnih potisnih sil, ki je izvedena avtomatsko, brez možnosti uporabnikovega vnosa. Ugotovili smo, da kljub neupoštevanju Evrokoda pri določitvi vektorja pomikov in transformacijskega faktorja pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil lahko z manjšo spremembo v programu SAP2000 oz. ročnem izračunu dobimo primerljive rezultate med programoma. Način, ki ga uporablja program 3Muri rezultate postavlja na varno stran, saj dobimo manjšo nosilnost konstrukcije. Razumevanje tovrstnih procesov je oteženo tudi zaradi pomanjkljivosti priročnikov programa 3Muri, kjer so teoretične osnove programa skopo predstavljene. Z druge strani pa ima 3Muri kar nekaj prednosti v primerjavi s programom SAP2000. Podajanje elementov in obtežb je zelo hitro in enostavno. Program ima širok nabor že vnaprej definiranih elementov in stropov, kot tudi materialov. Spreminjanje materialnih karakteristik ali detajlov elementa je preprosto in se v nadaljevanju tudi avtomatsko upošteva. Poleg tega ima še možnosti dodajanja protipotresnih ukrepov tako za armiranobetonske kot tudi zidane stavbe. Rezultati potisne analize in ekvivalentni sistemi SDOF so v programu 3Muri avtomatsko določeni in izpisani, v programu SAP2000 pa jih je potrebno dodatno ročno določiti iz potisne krivulje. Glavna slabost programa SAP2000 je, da zahteva več uporabnikovega časa pri nekaterih korakih analize. Podajanje karakteristik materialov in elementov je zamudno, vsaka sprememba zahteva ponavljanje korakov (npr. podajanje lastnosti plastičnih členkov). V programu niso na voljo tipski elementi (npr. stropi), a so na voljo različni materiali in pripadajoče karakteristike, kar pa bi se verjetno

dalo avtomatizirati preko vmesnika API. Kljub temu oba programa potrebuje za celoten proces potisne analize približno enako časa.

Poleg navedenih slabosti in prednosti obeh programov pa velja navesti še težave, ki izhajajo iz uporabe programa 3Muri pri analizi armiranobetonskih okvirnih konstrukcij. Program je namreč ustvarjen za analizo zidanih oz. mešanih konstrukcij. Omejene možnosti za definiranje armiranobetonskih elementov in otežena kontrola pri definiciji njihovega nelinearnega obnašanja je velika pomanjkljivost. Težavo predstavlja tudi uporaba metode ekvivalentnih okvirjev. Metoda je sicer uporabna za idealne okvirne in zidane konstrukcije, a ustvarjeni ekvivalentni okvirji pri neregularnih armiranobetonskih okvirnih konstrukcijah, kjer nosilci niso podprti na obeh koncih s stebri, lahko povzročijo napačno porazdelitev obtežb in odziv konstrukcije, kar vodi do neustreznih rezultatov potisne analize.

S pomočjo analize lastnega nihanja modela A lahko ugotovimo, da se konstrukcija v obeh programih obnaša podobno. Nihajni časi v programu 3Muri so v povprečju višji za 2 % od nihajnih časov iz programa SAP2000. Tudi nihajne oblike konstrukcije so praktično enake. Manjše razlike se pojavijo le pri efektivni masi, ki sodeluje pri posamezni nihajni obliki. V programu SAP2000 v povprečju nastopi nekoliko več efektivne mase v posamezni translatorski nihajni obliki. Podobne razlike v nihajnih časih opazimo tudi pri modelu B, saj so tudi tu nihajni časi iz programa 3Muri v povprečju 2 % višji. Prav tako so na videz nihajne oblike iz obeh programov zelo podobne. Nekoliko večje razlike opazimo pri primerjavi efektivnih mas prvih dveh nihajnih oblik, ki kasneje vplivajo na modalno razporeditev vodoravnih sil pri potisni analizi. V prvi nihajni obliki, ki je translatorska v smeri X, efektivna masa v programu SAP2000 znaša 71 % mase konstrukcije v smeri X in 3 % mase v smeri Y. V programu 3Muri znašajo te vrednosti 63 % v smeri X in 5 % v smeri Y. Podobne razlike se pojavijo pri drugi nihajni obliki, kjer v programu SAP2000 efektivna masa v smeri X znaša 10 % mase stavbe, v smeri Y pa 60 %. V primerjavi so te vrednosti v programu 3Muri enake 17 % v smeri X in 52 % v smeri Y. Na podlagi sodelujočih efektivnih mas lahko vidimo, da je nihanje konstrukcije v programu 3Muri bolj torzijsko kot v programu SAP2000.

Na podlagi rezultatov potisnih analiz iz obeh programov lahko podamo nekaj ugotovitev. Pri najbolj poenostavljenem modelu A dobimo podobne rezultate potisne analize iz obeh programov. Manjše razlike opazimo v primerjavi mejnih pospeškov, kjer je uporabljena enakomerna razporeditev vodoravnih sil, saj razlike v povprečju znašajo le 6 %. Še enkrat večje razlike pa se pojavijo v primerjavi mejnih pospeškov v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil, kjer razlike v mejnih pospeških znašajo skoraj 13 %. Veliko večje razlike opazimo pri modelu B. Pri enakomerni razporeditvi vodoravnih sil znašajo razlike v mejnih pospeških v povprečju kar 12 %, kar je enkrat več, kot pri modelu A. Še večje razlike pa sledijo iz primerjave rezultatov v primeru modalne razporeditve vodoravnih sil, kjer lahko naletimo na največjo težavo programa 3Muri. Čeprav lahko izberemo, katere modalne oblike naj program upošteva za posamezno smer potisne analize, nimamo vpogleda ali kontrole nad načinom razporeditve vodoravnih sil. Iz končnih rezultatov za model B lahko predpostavimo, da program nanese vodoravne sile v vsako vozlišče konstrukcije v razmerju pripadajočih mas in pomikov vsakega vozlišča pri izbrani nihajni obliki. Takšna razporeditev vodoravnih sil je neustrezna v primeru torzijsko podajnih konstrukcij oz. konstrukcij z nesimetrično togostjo, kot je model B. Točnega podatka o načinu razporeditve vodoravnih sil ne zasledimo v priročniku programa 3Muri. Vprašanje na to temo je bilo tudi naslovljeno na zastopnike programa, a ustreznega odgovora v času pisanja magistrske naloge nismo prejeli. Na spletni strani podjetja S.T.A. Data

se da zaslediti priporočila v obliki odgovora na pogosto zastavljena vprašanja [22]. Odgovor podjetja pravi, da je uporaba modalne razporeditve vodoravnih sil primerna le v slučaju, ko znaša sodelujoča efektivna masa izbrane nihajne oblike vsaj 75 % mase celotne konstrukcije. Če pogledamo naše modele, kjer je v modelu A pri prvi nihajni obliki v programu 3Muri sodelovalo 69 % mase in v drugi nihajni obliki 75 % mase vidimo, da je le druga nihajna oblika (translatorna v X smeri) primerna za uporabo modalne razporeditve vodoravnih sil. Tudi razlika v primerjavi rezultatov potisne analize oz. izračunanih mejnih pospeškov je v smeri X manjša – okoli 9%. V Y smeri, kjer je merodajna prva nihajna oblika so te razlike že bistveno večje (17 %). Še večje razlike opazimo pri modelu B. V prvi nihajni obliki, ki je translatorna v smeri X v programu 3Muri sodeluje 63 % mase, v drugi nihajni obliki, ki je translatorna v smeri Y pa le 52 %. Po priporočilih proizvajalcev programa torej modalna razporeditev vodoravnih sil pri modelu B ni ustrezna, kar se tudi vidi iz rezultatov potisne analize, saj so povsem nerealni in neuporabni. Razlike v mejnih pospeških v smeri X znašajo 32 %, v smeri Y pa kar 101 %. Posledično lahko rečemo, da je v primeru idealizirane armiranobetonske okvirne konstrukcije, kjer sodeluje vsaj 75 % efektivne mase pri upoštevanih nihajnih oblikah uporaba programa 3Muri in modalne razporeditve vodoravnih sil še ustrezna. Kakor pa prekršimo pogoje metode ekvivalentnih okvirjev in ne izpolnujemo priporočil proizvajalcev programa je verodostojnost rezultatov programa 3Muri vprašljiva in uporaba programa nepriporočljiva.

Uporaba različne programske opreme (SAP2000 in 3Muri) in treh različnih modelov iste konstrukcije (A, B in C) je olajšala poglobljeno preiskavo vpliva modelnih negotovosti na rezultate potisne analize. Uporabljeni način nam je omogočil natančno analizo, ki nam je pomagala pri določitvi pogojev, pod katerimi so rezultati programa 3Muri v primeru armiranobetonskih okvirnih konstrukcij zanesljivi. Delo potrjuje prednosti uporabe primerjalne študije za namen zmanjševanja vpliva modelnih negotovosti in kaže na pomembnost kritične presoje rezultatov, zlasti v primeru nelinearnih analiz.

VIRI

- [1] Fajfar, P. 2000. A nonlinear analysis method for performance based design. *Earthquake Spectra* 16, 3: 573–592.
- [2] Fajfar, P. 2002. Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni obtežbi. *Gradbeni vestnik* 51, 11: 302–315.
- [3] CSI. 2016. CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge: 534 str.
<https://docs.csiamerica.com/manuals/sap2000/CSiRefer.pdf> (Pridobljeno 17.7.2023.)
- [4] S.T.A. Data srl. 2023. 3Muri User Manual, Release 12.2.1: 294 str.
https://www.3muri.com/documenti/brochure/en/3Muri12.2.1_ENG.pdf (Pridobljeno 17.7.2023.)
- [5] Stratan, A., Fajfar, P. 2003. Seismic assessment of the Spear test structure. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo: 150 str.
- [6] SIST EN 1998-1. 2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila na stavbe.
- [7] prEN 1998-1-1:2023. N1269. Design of structures for earthquake resistance – Part 1-1: General rules and seismic action.
- [8] SIST EN 1998-3. 2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Del 3: Ocena in prenova stavb.
- [9] Kreslin, M., Fajfar, P. 2011. Razširjena N2-metoda z upoštevanjem vplivov višjih nihajnih oblik. *Gradbeni vestnik, letnik 60, številka 4*. Ljubljana: Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije. 109–120.
- [10] Shaofan L., Liu, W. K., Park, H. S. 2022. Eighty years of the finite element method: birth, evolution, and future. *Arch Computat Methods Eng.* 29: 4431–4453.
- [11] Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 190 str.
- [12] Žižmond, J., Dolšek, M. 2015. Potisna analiza in ocena mejnega pospeška s programom SAP2000: 25 str.
- [13] Andolšek, F. 2018. Seizmični test stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba F. Andolšek): 141 str.
- [14] SIST EN 1992-1-1. 2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij. Del 1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [15] SIST EN 1996-1-1: 2006. Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1-1. Del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje.

- [16] Snoj, J. 2014. Ocena potresnega tveganja zidanih stavb. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Snoj): 241 str.
- [17] Quagliarini, E., Maracchini, G., Clementi, F. 2017. Uses and limits of the Equivalent Frame Model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: A review. *Journal of Building Engineering*. 10: 166–182.
- [18] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. 2013. TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*. 56: 1787-1799.
- [19] OPCM 3274:2005. Technical regulations for the project, assessment and seismic adaptation of buildings.
- [20] Snoj, J. 2009. Ocena potresne odpornosti zidane stavbe s programom 3Muri. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Snoj): 110 str.
- [21] S.T.A. DATA srl. 2023. 3Muri Project: FME – Global Analysis.
<https://www.stadata.com/en/3-muri-project-analisi-globale/> (Pridobljeno 2.9.2023.)
- [22] S.T.A. Data srl. Help 3Muri F.A.Q.
<https://www.stadata.com/3Muri/HTML%20Faq3Muri/calcolo.htm> (Pridobljeno 22.7.2023.)
- [23] Dolšek, M., Fajfar, P. 2005. Post-test analyses of the SPEAR test building. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo: 112 str.
- [24] Paulay, T., Priestley, M. J. N. 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York, John Wiley & Sons, Inc
- [25] Negro, P., Mola, E., Molina, J., Magonette, G. E. 2004. Full-scale PSD testing of a torsionally unbalanced three-storey non-seismic RC frame. Vancouver, 13th World Conference on Earthquake Engineering: 15 str.
- .