

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Primož Kozlevčar

Potresna analiza visokoregalnih skladišč

Diplomska naloga št.: 2936

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Somentor:
dr. Leon Hladnik

Ljubljana, 26. 2. 2007

BIBLIOGRAFIKONSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.014.2:624.042.7(043.2)
Avtor: Primož Kozlevčar
Mentor: prof. dr. Darko Beg
Naslov: Potresna analiza tipičnih visokoregalnih paletnih skladišč
Obseg in oprema: 93 str., 60 pregl., 43 sl., 35 Grafikon., 14 en.
Ključne besede: povezje, potres, nelinearna dinamična analiza, skladišče

Izvleček:

V diplomski nalogi smo obravnavali dve različni visokoregalni skladišči, katerih investitor je podjetje Trimo d.d.. To sta visokoregalni skladišči Trimo VRS 2 in Trimo VRS 3. Visokoregalna skladišča niso običajne konstrukcije, saj pri njih večino gravitacijske obtežbe predstavlja koristna obtežba. Ta se lahko med potresom premika, kar ugodno deluje na potresno obremenitev skladišč. To smo upoštevali z različnimi faktorji, ki jih predpisuje priporočilo pr FEM 10.2.08. Za obe skladišči smo izvedli modalno analizo s spektri odziva in nelinearno dinamično analizo. Uporabili smo program SAP2000, ki pa se ni izkazal kot najboljše računsko orodje pri dinamični analizi, saj se pri večjih problemih pojavijo težave s konvergenco. Skladišče VRS 2 smo zaradi njegove simetrije modelirali kot nadomestni ravninski model. Skladišče VRS 3 smo analizirali, kot prostorski model. Pri dinamični analizi smo uporabili sedem različnih zabeleženih akcelerogramov, ki smo jih normirali na maksimalni pospešek tal in karakteristike tal na obstoječi lokaciji. Natezne diagonale smo modelirali kot nelinearne plastične vzmeti z uporabo histereznega modela Takeda z nosilnostjo v tlaku enako nič. Preizkusili smo tudi vpliv oslabitev diagonal na notranje sile v elementih in na pomike. Ker sta bili obe skladišči že dimenzionirani na mejno stanje nosilnosti in modalno analizo, se nismo lotili dimenzioniranja elementov, ampak smo izvedli samo kontrole nosilnosti, stabilnosti in kontrole horizontalnih pomikov. Dinamična analiza da bolj neugodne rezultate v primerjavi z modalno analizo. Dinamična analiza z reduciranim prerezom diagonal da manjše sile v elementih in večje pomike v primerjavi s konstantnim prerezom diagonal.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.014.2:624.042.7(043.2)
Author: Primož Kozlevčar
Supervisor: prof. dr. Darko Beg
Title: Analysis of typical pallet racks under seismic conditions
Notes: 93 p., 60 tab., 43 fig., 35 graph., 14 eq.
Key words: braced frame, earthquake, time history analysis, rack

Abstract

The present graduation thesis deals with two different steel pallet racks Trimo VRS 2 and Trimo VRS 3. Pallet racks are not typical structures, as their variable load presents the most significant part of the gravity load. During an earthquake that variable load proves to have an advantageous influence on the racks' seismic load. We considered this with various factors. These factors are defined in the recommendations of pr FEM 10.2.08. A modal response spectrum analysis and a non-linear time history analysis were performed for both racks. We used the computer programme SAP 2000 and found out that SAP2000 is not exactly good for time history analysis, because of problems with convergence. The VRS 3 rack was modelled as a spatial model and the VRS 2 rack, due to its symmetry, as a planar model. We made use of seven different earthquake records, and standardized them at the peak ground acceleration. The tension diagonals were modelled as non-linear plastic springs. We used Takeda modes as a hysteretic loop with zero compression strength. We also tested the influence of the reduced section of the tension diagonals on internal forces and displacements.

Both racks already exist, which is the reason why we only made checkings of sections, stability and displacements. Results of time history analysis are less advantageous than results of modal analysis. Time history analysis with reduced section of tension diagonals contribute smaller internal forces but bigger displacements than constant sections of tension diagonals.

ZAHVALA

Najprej bi se zahvalil mentorju prof. dr. Darku Begu, za usmerjanja in strokovne nasvete pri izdelavi diplomske naloge, ter za njegovo potrpežljivost. Zahvalil bi se tudi somentorju dr. Leonu Hladniku, ki je priskrbel pomembne podatke, brez katerih diplomskega dela ne bi bilo možno izpeljati.

Zahvala gre tudi mladim raziskovalcem na katedri, za tehnično pomoč in nasvete, ter za prijetno vzdušje.

Na koncu bi se zahvalil tudi mojima staršema, ki sta mi tekom študija nudila pomoč in moralno podporo.

IV Kozlevčar, P. 2007. Potresna analiza visokoregalnih paletnih skladišč.
Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFIKONSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	I
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION	II
ZAHVALA	III
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	XI
KAZALO GRAFIKONOV	XIII
1 UVOD	1
2 POSEBNOSTI PRI DIMENZIONIRANJU (PR FEM 10.2.08, 2005)	2
2.1 Splošno	2
2.2 Vpliv premikanja in deformiranja skladiščenega blaga	2
2.3 Projektna teža palet	3
2.4 Sistemi za prenos potresne obtežbe	4
2.5 Faktorji obnašanja q	5
2.6 Razporeditev koristne obtežbe	6
3 POTRESNA OBTEŽBA	8
3.1 Spekter odziva	8

3.2	Akcelerogrami	8
4	RAČUNSKI MODELI	11
4.1	Material	11
4.2	Modeliranje nateznih diagonal	11
4.3	Visokoregalno skladišče VRS 2	13
4.3.1	Splošno	13
4.3.2	Prerezi elementov	17
4.3.3	Obtežba	18
4.3.3.1	Gravitacijska obtežba	18
4.3.3.2	Potresna obtežba	22
4.4	Visokoregalno skladišče VRS 3	26
4.4.1	Splošno	26
4.4.2	Prerezi elementov	29
4.4.3	Obtežba	31
4.4.3.1	Gravitacijska obtežba	31
4.4.3.2	Potresna obtežba	33
5	REZULTATI ANALIZ	37
5.1	Splošno	37
5.2	Rezultati analiz visokoregalnega skladišča VRS 2	38
5.2.1	Modalna analiza	38
5.2.1.1	Model skladišča s povezjem, $q=4$	38
5.2.1.2	Model skladišča brez povezja podprt na vrhu	45
5.2.2	Nelinearna dinamična analiza, konstanten prerez diagonal	47
5.2.3	Nelinearna dinamična analiza, reduciran prerez diagonal	52
5.3	Rezultati analiz visokoregalnega skladišča VRS 3	54
5.3.1	Modalna analiza	54
5.3.2	Nelinearna dinamična analiza, konstanten prerez diagonal	67
5.3.3	Nelinearna dinamična analiza, reduciran prerez diagonal	77

6	PRIMERJAVA REZULTATOV	83
6.1	Skladišče VRS 2	83
6.1.1	Primerjava reakcij	83
6.1.2	Primerjava pomikov	84
6.1.3	Primerjava notranjih sil	85
6.1.4	Primerjava raztezkov diagonal	86
6.2	Skladišče VRS 3	87
6.2.1	Primerjava reakcij	87
6.2.2	Primerjava pomikov	87
6.2.3	Primerjava notranjih sil	90
6.2.4	Primerjava raztezkov diagonal	91
7	SKLEP	92
8	VIRI	94

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1:	Vrednosti koeficienta trenja (pr FEM 10.2.08, 2005, preglednica 2.8)	3
Preglednica 2.2:	Vrednosti faktorja E_{D2} (pr FEM 10.2.08, 2005, preglednica 2.7)	4
Preglednica 2.3:	Faktorji obnašanja q (pr FEM 10.2.08, 2005, tč. 3.4.1)	6
Preglednica 3.1:	Vrednosti parametrov, ki opisujejo priporočen elastični spekter odziva tipa 1 (EN 1998-1, 2004, člen 3.2.2.2(2)P)	8
Preglednica 3.2:	Potresi, katerih zabeležene akceleroگرامe smo uporabili pri nelinearni dinamični analizi	9
Preglednica 4.1:	Prečni prerezi računskega modela VRS 2.	17
Preglednica 4.2:	Vrednosti faktorjev	23
Preglednica 4.3:	Faktorji za normiranje akceleroگرامov	24
Preglednica 4.4:	Prerezi posameznih elementov skladišča	29
Preglednica 4.5:	Oslabitve prerezov posameznih prerezov diagonal	30
Preglednica 4.6:	Vrednosti faktorjev zaradi vpliva potresne obtežbe	34
Preglednica 4.7:	Vrednosti faktorjev f , s katerimi normiramo akceleroگرامe	35
Preglednica 5.1:	Časi trajanja potresov v analizah. Natančnejši podatki o potresih so v preglednici 3.2.	38
Preglednica 5.2:	Značilnosti posameznih nihajnih oblik	39
Preglednica 5.3:	Horizontalni pomiki	41
Preglednica 5.4:	Pogoji omejitve etažnih pomikov in ocena vpliva TDR	42
Preglednica 5.5:	Relativna vitkost	42
Preglednica 5.6:	Nosilnost bruto prereza in obremenitev diagonal	43
Preglednica 5.7:	Vrednosti faktorja dodatne nosilnosti	43
Preglednica 5.8:	Izkoriščenost najbolj obremenjenih elementov	44
Preglednica 5.9:	Rezultati analize prostorskega modela s programom ESA, maksimalne količine za posamezen prerez.	45
Preglednica 5.10:	Izkoriščenost elementov regalnih stranic	45
Preglednica 5.11:	Nihajni časi in pripadajoče efektivne modalne mase	46
Preglednica 5.12:	Izkoriščenost elementov regalnih stranic	47

Preglednica 5.13:	Pomiki vozlišč pri dinamični analizi, glej sliko 5.3.	49
Preglednica 5.14:	Etažni pomiki, pogoj (6) je povsod izpolnjen	49
Preglednica 5.15:	Maksimalen raztezek diagonale v posamezni etaži	50
Preglednica 5.16:	Izkoriščenost elementov povezja	51
Preglednica 5.17:	Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov stranic pri dinamični analizi	52
Preglednica 5.18:	Vertikalne reakcije	52
Preglednica 5.19:	Etažni pomiki, reduciran prerez diagonal	53
Preglednica 5.20:	Maksimalni pomiki vozlišč, reduciran prerez diagonal	53
Preglednica 5.21:	Raztezki in deformacije diagonal	53
Preglednica 5.22:	Izkoriščenost elementov povezja	54
Preglednica 5.23:	Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov stranic	54
Preglednica 5.24:	Maksimalni pomik na vrhu in pomiki regalov	59
Preglednica 5.25:	Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri	60
Preglednica 5.26:	Maksimalne vrednosti etažnih pomikov v posameznih povezjih	60
Preglednica 5.27:	Vitkost diagonal	61
Preglednica 5.28:	Obremenitve prečnih diagonal	61
Preglednica 5.29:	Faktorji, ki jih uporabimo pri kontroli prečk in stebrov stranic	62
Preglednica 5.30:	Brezdimenzionalna uklonska vitkost diagonal povezja	63
Preglednica 5.31:	Nosilnost najbolj obremenjenih prereзов	63
Preglednica 5.32:	Faktorji, ki jih uporabimo pri kontroli prečk in stebrov vzdolžnega povezja, ter pri kontroli horizontalnega povezja in paletnih nosilcev	63
Preglednica 5.33:	Izkoriščenost najbolj obremenjenih elementov posameznih prereзов	64
Preglednica 5.34:	Izkoriščenost elementov vzdolžnega povezja in nosilcev. Uporabili smo faktorje iz preglednice 5.31.	66
Preglednica 5.35:	Maksimalni izvleki in pritiski, prečna smer	67
Preglednica 5.36:	Absolutni horizontalni pomiki, maksimalni pomik v točkah 114 in 150	68
Preglednica 5.37:	Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri	70
Preglednica 5.38:	Maksimalni etažni pomik v prečni smeri v posameznem regalu	71
Preglednica 5.39:	Maksimalni raztezki diagonal, konstanten prerez diagonal	72

Preglednica 5.40:	Raztezki diagonal v vzdolžnem povezju	73
Preglednica 5.41:	Maksimalno obremenjeni prerezi	74
Preglednica 5.42:	Maksimalni raztezki horizontalnih diagonal	77
Preglednica 5.43:	Maksimalni izvleki in pritiski, prečna smer	77
Preglednica 5.44:	Maksimalni povprečni pomiki izbranih točk, maksimalni pomik v obeh glavnih smereh v točki 150	78
Preglednica 5.45:	Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri	79
Preglednica 5.46:	Maksimalni etažni pomik v vzdolžni smeri v posameznem regalu	80
Preglednica 5.47:	Maksimalni raztezki diagonal v prečni smeri, reduciran prerez	81
Preglednica 5.48:	Raztezki diagonal v vzdolžnem povezju	81
Preglednica 5.49:	Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov glede na posamezen prerez	82
Preglednica 5.50:	Maksimalni raztezki horizontalnih diagonal	82

KAZALO SLIK

Slika 2.1:	Od leve proti desni. brez zavetrovanja v vzdolžni smeri, ekscentrično zavetrovanje v vzdolžni smeri in simetrično zavetrovanje.	5
Slika 2.2:	Različni konstrukcijski sistemi regalnih stranic (pr FEM 10.2.08, 2005, člen 3.4.1)	6
Slika 4.1:	Definicija ovojnice histereze natezne diagonale z reduciranim prerezom v programu sap200.	11
Slika 4.2:	Histereza natezne diagonale, rezultati testa (J.W. Berman et al., Engineering Structures 27, 2005, stran 480)	12
Slika 4.3:	Prostorski model iz programa Esa. Stabilizacijska bloka sta levo in desno, regalne stranice so v sredini med njima	14
Slika 4.4:	Ravninski računski model stranic in globalnega povezja v prečni smeri v programu SAP2000	15
Slika 4.5:	Računski model stranic brez povezja	16
Slika 4.6:	Stabilizacijski blok	16
Slika 4.7:	Del nadomestnega prereza sestavljenega iz več omega prerezov.	17
Slika 4.8:	Oslabitev diagonale	18
Slika 4.9:	Razpored stalne obtežbe po vrsti od zgornjega levega kota do spodnjega desnega: $S, S_1, S_2, S_{z1}, S_{z2}, S_{z3}$	20
Slika 4.10:	Razpored linijske stalne obtežbe po vrsti od zgornjega levega kota: $f, m_f, f_{z1}, f_{z2}, f_{z3}, mf_{z3}$	21
Slika 4.11:	Primer razporeditve točkovne koristne obtežbe na četrtem nivoju paletnih nosilcev	22
Slika 4.12:	Tlorisne dimenzije skladišča, pogled na skladišče z vrha.	26
Slika 4.13:	Dimenzije skladišča, pogled od spredaj	27
Slika 4.14:	Primer regala 4 in desnega vzdolžnega vertikalnega povezja.	28
Slika 4.15:	Prostorski model, pogled od spredaj.	28
Slika 4.16:	Primer izvedbe oslabitve diagonale	31
Slika 4.17:	Primer razporeda koristne obtežbe, regal 3, obtežba P_1 in P_4	32
Slika 4.18:	Razpored stalne obtežbe, od leve proti desni S_1, S_2, S_3 in S_4	32

Slika 4.19: Podpore, kamor smo dodali manjkajočo maso	33
Slika 4.20: Primer razporeditve koristne obtežbe v četrti etaži, v regalu 4, pri delni razbremenitvi.	34
Slika 5.1: Prva in druga nihajna oblika	39
Slika 5.2: Maksimalen pritisk v povezju in stranicah: 779 in 85, maksimalen izvlek v povezju in stranicah: 779, 455	40
Slika 5.3: Točke v katerih smo izpisali horizontalen pomik	41
Slika 5.4: Prva in druga nihajna oblika	46
Slika 5.5: Podpore v katerih smo zabeležili maksimalne reakcije	47
Slika 5.6: Podpore v katerih so reakcije maksimalne	48
Slika 5.7: Prva nihajna oblika.	55
Slika 5.8: Druga in tretja nihajna oblika.	56
Slika 5.9: Podpore, v katerih smo opazovali reakcije	56
Slika 5.10: Izpolnjenost pogoja $\Omega_i/\Omega_{\min} \leq 1,25$	62
Slika 5.11: Nedisipativni elementi regalnih stranic	64
Slika 5.12: Škatlasti stebri v prvi in drugi etaži regalov 3 in 4 so označeni rdeče.	65
Slika 5.13: Diagonale horizontalnih povezij in paletni nosilci, pogled od spredaj.	66
Slika 5.14: Stebri in prečke vzdolžnega povezja	67
Slika 5.15: Lokacije ekstremnih vrednosti reakcij, vzdolžna smer	68
Slika 5.16: Deformacija desnega povezja, akceleroگرام 197y, t = 3,86 s.	71
Slika 5.17: Z rdečo barvo so označene etaže, v katerih pride do plastifikacije vsaj ene diagonale.	73
Slika 5.18: Plastificirane diagonale	74
Slika 5.19: Prečke RQ 60/4 v strehi med stranicami 4 regala, na katere se ekscentrično priključujejo prečke horizontalnega strešnega zavetrovanja, so označene rdeče.	75
Slika 5.20: Skupine horizontalnih povezij, pogled na skladišče z vrha	76
Slika 5.21: Maksimalna deformacija desnega povezja, 197y, t = 9,66 s	80

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 4.1:	Ovojnica histereze Takeda v programu SAP2000	12
Grafikon 4.2:	Histereza diagonale modelirane s programom SAP2000, z uporabo modela Takeda	13
Grafikon 4.3:	Projektni spekter pospeškov po EC3	23
Grafikon 4.4:	Povprečni spekter pospeškov	25
Grafikon 4.5:	Primer normiranega akceleroograma za potres: Montenegro, Bar-Skupstina Opstine, vidi se da se vsa maksimalna obremenitev izvrši v 3 sunkih	25
Grafikon 5.1:	Primer skrajšanja trajanja potresa	37
Grafikon 5.2:	Primerjava časovnega odziva dveh točk za akceleroogram 199x (tabela 3.2), vrednosti so višje od povprečnih.	49
Grafikon 5.3:	Iz histerezne zanke se lepo vidi, da je do plastifikacije prišlo pri dveh sunkih	50
Grafikon 5.4:	Osna sila v diagonali 7, vidi se kdaj je prišlo do plastifikacije. Vidna je samo natezna osna sila, saj je tlačna enaka 0 (slika 4.1).	51
Grafikon 5.5:	Reakcije polno obremenjenega skladišča, potresna obremenitev v smeri X. Reakcije zaradi gravitacije so tlačne, reakcije zaradi potresa natezne, vendar so narisane na isti strani zaradi boljše predstave.	57
Grafikon 5.6:	Reakcije delno razbremenjenega skladišča nad regali 2 in 3, potresna obremenitev v smeri X	57
Grafikon 5.7:	Reakcije polno obremenjenega skladišča, potresna obremenitev v smeri X	57
Grafikon 5.8:	Reakcije delno razbremenjenega skladišča v regalu 4, potresna obremenitev v smeri X	58
Grafikon 5.9:	Maksimalni etažni pomiki v posameznih regalih v prečni smeri	59
Grafikon 5.10:	Primerjava maksimalnih etažnih pomikov med povezji	60
Grafikon 5.11:	Časovni odziv pomika točke 114, pri vzburjanju v prečni smeri.	69
Grafikon 5.12:	Časovni odziv pomika točke 150, pri vzburjanju v vzdolžni smeri.	69
Grafikon 5.13:	Normiran akceleroogram 197y	69

Grafikon 5.14:	Primerjava etažnih pomikov v prečni smeri med regali, konstanten prerez diagonal. Maksimalna vrednost je 19 mm.	70
Grafikon 5.15:	Primerjava etažnih pomikov v vzdolžni smeri med povezji, konstanten prerez diagonal. Maksimalna vrednost je 64 mm.	71
Grafikon 5.16:	Časovni odziv pomika točke 150 pri vzbujanju v prečni smeri	78
Grafikon 5.17:	Časovni odziv pomika točke 150 pri vzbujanju v vzdolžni smeri	78
Grafikon 5.18:	Primerjava etažnih pomikov v prečni smeri po etažah, glede na posamezen regal. Maksimalna vrednost je 24,5 mm.	79
Grafikon 5.19:	Primerjava etažnih pomikov v vzdolžni smeri po povezjih. Maksimalna vrednost je 58 mm v tretji etaži desnega povezja (slika 5.21).	80
Grafikon 6.1:	Primerjava reakcij med analizami	83
Grafikon 6.2:	Primerjava pomikov posameznih točk	84
Grafikon 6.3:	Primerjava etažnih pomikov treh analiz	84
Grafikon 6.4:	Maksimalna tlačna osna sila v elementih povezja, primerjava	85
Grafikon 6.5:	Maksimalna tlačna osna sila v elementih stranic, povezave med stranicami so izpuščene, ker je osna sila manjša od 2 kN	86
Grafikon 6.6:	Primerjava reakcij med analizami	87
Grafikon 6.7:	Primerjava pomikov v prečni smeri	88
Grafikon 6.8:	Primerjava pomikov v vzdolžni smeri	88
Grafikon 6.9:	Primerjava maksimalnih etažnih pomikov v prečni smeri	89
Grafikon 6.10:	Primerjava maksimalnih etažnih pomikov v vzdolžni smeri	90
Grafikon 6.11:	Primerjava notranjih sil	90

1 UVOD

Visokoregalna paletna skladišča so objekti namenjeni skladiščenju surovin in izdelkov na paletah. S pojmom visokoregalna skladišča so zajeta samo statična skladišča, mobilni regali v smislu montažnih polic tu niso zajeti. Z njimi lahko večjo količino blaga shranimo na sorazmerno majhni tlorisni površini. Poleg dobrega izkoristka prostora pa omogočajo tudi visoko stopnjo avtomatizacije z dvigali, ki vlagajo palete na nosilce. Visokoregalna skladišča se od običajnih stavb razlikujejo predvsem po vrsti in intenziteti obtežbe, prečnih prerezih elementov in dimenzijah. Velikokrat so elementi hladno oblikovani profili.

Danes se v praksi zaradi enostavnosti za večino konstrukcij izvaja modalna analiza s spektri odziva. Nelinearna dinamična analiza se zaradi kompleksnosti, potrebe po naprednejši programski opremi, zmogljivejši strojni opremi in daljšega računskega časa do sedaj ni uporabljala pogosto, pričakovati pa je, da bo tudi ta analiza konstrukcij v prihodnjih letih vse pogosteje uporabljena.

V diplomskem delu smo obravnavali dve različni skladišči, Trimo VRS 2 in Trimo VRS 3. Investitor obeh objektov je Trimo Trebnje d.d. Za oba objekta je že narejen statični izračun in modalna analiza. Skladišče VRS 2 je tudi zgrajeno in je že nekaj časa v obratovanju. Podatke o geometriji, prečnih prerezih elementov, statični obtežbi in lokaciji smo dobili iz projektne dokumentacije objektov, ter iz računskega modela v programu ESA.

2 POSEBNOSTI PRI DIMENZIONIRANJU (PR FEM 10.2.08, 2005)

2.1 Splošno

Visokoregalna skladišča (v nadaljevanju skladišča) se od običajnih stavb ločijo predvsem v dimenzijah, intenziteti obtežb in profilih, ki so običajno hladno oblikovani. V nasprotju z običajnimi stavbami, kjer večino vertikalne obtežbe predstavljata lastna teža in stalna obtežba, pri skladiščih večino obtežbe predstavlja koristna obtežba. Prisotnost velike koristne obtežbe pomembno vpliva na potresno obnašanje regalnih skladišč. Vpliv se kaže v disipiranju energije, ki se pojavi pri drsenju palet po paletnih nosilcih in pri deformacijah skladiščenega blaga. Iz istega razloga pa je potrebno tudi uporabiti ukrepe za preprečitev padanja blaga s paletnih nosilcev. To storimo z namestitvijo raznih ograj, mrež ali celo vmesnega nosilca. Potresni odziv skladišča je lahko različen v vzdolžni in prečni smeri.

2.2 Vpliv premikanja in deformiranja skladiščenega blaga

Do premikanja skladiščenega blaga pride, ko je horizontalna potresna sila večja od sile trenja med paleto in paletnim nosilcem izračunamo po enačbi (pr FEM 10.2.08, 2005, člen 2.3.4(1)):

$$F_i > \gamma_{\mu S} \mu_S Q_P \quad (1)$$

kjer posamezne oznake pomenijo sledeče:

- F_i potresna sila na i -ti paletni nosilec
 μ_S koeficient trenja med nosilcem in paleto, vrednosti so v preglednici 1
 $\gamma_{\mu S}$ delni varnostni faktor za koeficient trenja μ_S , če ni drugače definirano je $\gamma_S = 1$
 Q_P projektna teža palet.

Gornji pogoj lahko zapišemo tudi drugače (pr FEM 10.2.08, 2005, člen 2.3.4(1)):

$$\frac{a_{g,i}}{g} > \gamma_{\mu S} \mu_S \quad (2)$$

kjer je:

- $a_{g,i}$ horizontalni projektni pospešek

g težnostni pospešek

Preglednica 2.1: Vrednosti koeficienta trenja (pr FEM 10.2.08, 2005, preglednica 2.8)

Materiali v stiku	Okolje	Koeficient trenja μ_s
Barvani jekleni nosilec Lesena paleta	Pogoji skladišča Suho okolje	0,15 – 0,25
Barvani jekleni nosilec Lesena paleta	Pogoji skladišča Vlažno okolje	0,05 – 0,15
Jekleni nosilci Poljubna paleta	Hladilnica	0
Jekleni nosilci Plastična paleta	Pogoji skladišča	0,05 – 0,15
Jekleni zaboji na jeklenih nosilcih	Pogoji skladišča	0,15 – 0,25

Redukcijo potresnih sil zaradi disipacije energije, ki se pojavi pri premikanju palet zajamemo s faktorjem E_{D1} . S tem faktorjem pomnožimo vrednosti pospeškov v projektnem spektru $S_d(T)$. Vrednost faktorja E_{D1} je 0,8. Če so palete na nosilce pritrjene ali je njihovo premikanje kakorkoli drugače omejeno je vrednost faktorja 1,0.

2.3 Projektna teža palet

Težo oziroma maso palet, ki jo upoštevamo v potresni obtežbi pomnožimo s faktorjem modifikacije teže palet E_{D2} in s faktorjem polnjena skladišča R_f . S faktorjem E_{D2} upoštevamo globalen vpliv značilnosti skladiščenega blaga na potresno obnašanje skladišča. E_{D2} vpliva na nihajni čas konstrukcije in na horizontalno potresno silo. Značilnosti skladiščenega blaga so:

- premikanje palet na paletnih nosilcih
- premikanje skladiščenega blaga
- dušenje skladiščenega blaga
- podajnost palet.

Če ni drugače določeno je vrednost faktorja E_{D2} podana v naslednji preglednici, v odvisnosti od vrste koristne obtežbe. Faktor R_f predstavlja odstotek zapolnjenosti skladišča med potresom. Ta podatek običajno poda uporabnik skladišča, ki ve za

frekvenco polnjenja in praznjenja in s tem za povprečno zasedenost skladišča.

Seizmično težo palet izračunamo po enačbi (pr FEM 10.2.08, 2005, člen 2.3.2) :

$$W_E = R_F * E_{D2} * Q_P \quad (3)$$

Q_p dejanska teža palet

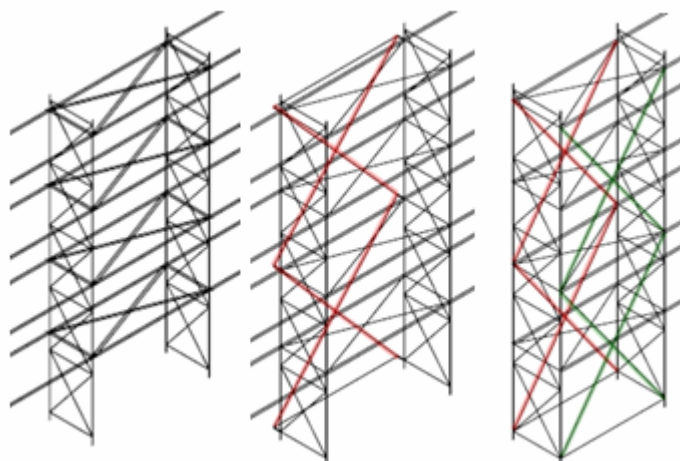
Preglednica 2.2: Vrednosti faktorja E_{D2} (pr FEM 10.2.08, 2005, preglednica 2.7)

E_{D2}	Razred skladiščenega blaga	Primer
0,8	Trdno stisnjeno	Zmrznjeno blago Jeklena pločevina Koluti papirja
0,65	Krhko	Veliko število kosov skladiščenih na paletah, katerih velikost je majhna v primerjavi s paletjo
0,5	Prosto in nezgoščeno	
1,0	Tekočine	Delno zapolnjeni sodi

2.4 Sistemi za prenos potresne obtežbe

Tipični sistemi za prenos horizontalne potresne obtežbe pri regalnih skladiščih so:

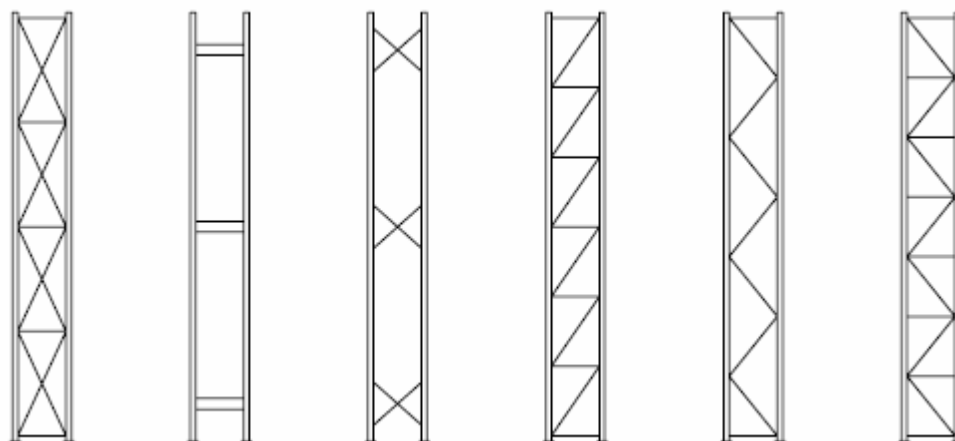
- a) V prečni smeri: regalne stranice
- b) V vzdolžni smeri:
 - Pomični okvir
 - Vertikalno povezje izven ravnine paletnih nosilcev, na katerega se regali priključujejo preko horizontalnih povezij
 - Simetrično vertikalno povezje, kjer je vsaka vrsta regalov zavetrovana, zavetrovanje je v ravnini paletnih nosilcev



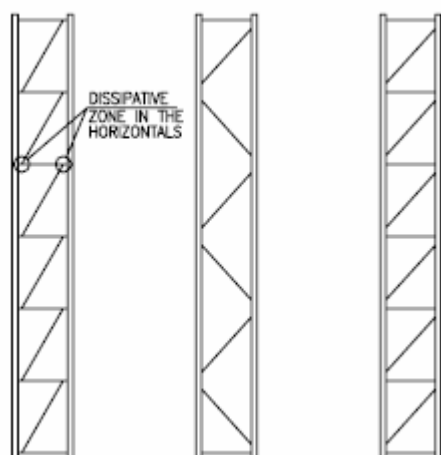
Slika 2.1: Od leve proti desni. brez zavetrovanja v vzdolžni smeri, ekscentrično zavetrovanje v vzdolžni smeri in simetrično zavetrovanje.

2.5 Faktorji obnašanja q

Faktor obnašanja je odvisen od konstrukcijskega sistema stranic. V priporočilih za potresno dimenzioniranje paletnih regalnih skladišč pr FEM 10.2.08 (2005) so predstavljeni sledeči konstrukcijski sistemi in pripadajoči faktorji obnašanja:



(a) Natezne diagonale	(b) Vierendeel okvir	(c) Delno povezje	(d) Z povezje	(e) D povezje	(f) K povezje
-----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------	---------------------	---------------------



(d ₁) Z disipativno povezje	(e ₁) D povezje	(d ₂) Z povezje
--	-----------------------------------	-----------------------------------

Slika 2.2: Različni konstrukcijski sistemi regalnih stranic (pr FEM 10.2.08, 2005, člen 3.4.1)

Preglednica 2.3: Faktorji obnašanja q (pr FEM 10.2.08, 2005, tč. 3.4.1)

Tip okvirja	Konstrukcijski tip	Maksimalen q faktor	
		Pravilna konstrukcija	Nepravilna konstrukcija
a	diagonalno povezje z nateznimi diagonalami	4	3,2
	diagonalno povezje z nateznimi in tlačnimi diagonalami	2,5 (DCH) 2,0 (DCM)	2,0 1,6
b	disipativni okviri te vrste so dovoljeni če izpolnjujejo pogoje za pomične okvire, drugače pa je q = 1,5		
c		1,0	1,0
d-e-f	nizka disipacija energije	1,5	1,5
d ₁	ekscentrično povezje (disipacija v horizontalnih elementih)	4	3,2
e ₁ -d ₂		1,5	1,5

2.6 Razporeditev koristne obtežbe

Ker je nemogoče predvideti razpored koristne obtežbe po skladišču v trenutku potresa, je potrebno v analizi upoštevati najneugodnejšo razporeditev. Priporočila pr FEM 10.2.08 (2005) priporočajo naslednji razpored koristne obtežbe:

- Analiza v prečni smeri: Postopno razbremenjevanje regalov od spodaj navzgor

- skladišče polno obremenjeno
- spodnji nosilci neobteženi
- spodnja dva nosilca neobtežena
- ...
- samo zgornji nosilci obteženi

b) Analiza v vzdolžni smeri: Celotno skladišče obteženo

Preizkusili smo vpliv delno razbremenjenega skladišča pri skladišču VRS 3.

3 POTRESNA OBTEŽBA

V diplomskem delu smo uporabili dve analizi. Modalno analizo in nelinearno dinamično analizo. Pri tem smo upoštevali določila standarda SIST EN 1998-1, 2005 in priporočil pr FEM 10.2.08.

3.1 Spekter odziva

Tip tal, na katerih stojita obe skladišči, je po standardu SIST EN 1998-1, 2005 enak tipu D, za katerega veljajo karakteristike navedene v preglednici 3.1. Projektni maksimalni pospešek tal, za lokacijo na kateri se nahajata obe skladišči je $a_g = 0,175 \text{ m s}^{-2}$. Izbira faktorja obnašanja q pri projektnem spektru je odvisna od konstrukcijskega sistema, s katerim disipiramo potresno energijo. Vrednosti pospeškov $S_d(T)$ v spektru je potrebno pomnožiti še s faktorjem E_{D1} (glej 2.2).

Preglednica 3.1: Vrednosti parametrov, ki opisujejo priporočen elastični spekter odziva tipa 1 (EN 1998-1, 2004, člen 3.2.2.2(2)P)

Tip tal	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
D	1,35	0,2	0,8	2,0

3.2 Akcelerogrami

Za potresno analizo časovnega odziva smo uporabili zabeležene akceleroگرامe. Na voljo smo imeli deset akceleroگرامov, preglednica 3.2. Vrednosti zabeleženih akceleroagramov, ki smo jih uporabili predstavljajo absolutne pospeške tal v m s^{-2} . Standard EN 1998-1 (2004) zahteva, da se vrednosti akceleroagramov normira na vrednosti $a_g \cdot S$ za obravnavano območje. Akceleroagrame smo normirali tako da smo pomnožili vrednosti pospeškov tal s faktorjem f po enačbi 4:

$$f = k \frac{S_d(T=0)}{a(T=0)}, \quad (4)$$

kjer posamezne količine pomenijo sledeče:

$S_d(T=0)$ vrednost v elastičnem spektru pospeškov po standardu SIST EN 1998-1, 2005 za obravnavana tla ($a_g \cdot S$), pri nihajnem času $T = 0$

$a(T=0)$ vrednost v spektru pospeškov, dobljenem iz obravnavanega akceleroograma pri nihajnem času $T = 0$

k dodatni faktor s katerim izpolnimo pogoj c) v standardu SIST EN 1998-1, 2005 (glej spodaj)

Standard SIST EN 1998-1, 2005 navaja pravila katerim mora zadoščati skupina izbranih zabeleženih akceleroogramov, to so:

- a) Uporabimo najmanj 3 akceleroграme.
- b) Povprečje spektralnih pospeškov pri nihajnem času 0 (izračunano iz posameznih časovnih potekov) ne sme biti manjše od vrednosti $a_g \cdot S$ za obravnavano lokacijo.
- c) V območju nihajnih časov med $0, T_1$ in $2T_1$, kjer je T_1 osnovni nihajni čas. konstrukcije v smeri, v kateri bo akceleroogram uporabljen, ne sme biti nobena vrednost v povprečnem elastičnem spektru za 5% dušenja, izračunana iz vseh časovnih potekov, manjša od 90% ustrezne vrednosti elastičnega spektra odziva za 5% dušenja.

Preglednica 3.2: Potresi, katerih zabeležene akceleroграme smo uporabili pri nelinearni dinamični analizi

Ime	Lokacija	Datum	Oznaka, Smer	Magnituda	$a_{h,max}$ [m/s ²]
Montenegro	Bar-Skupstina Opstine	15.4.1979	199xa, N-S	6,9 Mw	2,485
Montenegro	Bar-Skupstina Opstine	15.4.1979	199ya, E-W	6,9 Mw	2,485
Montenegro	Ulcinj-Hotel Albatros	15.4.1979	198xa, N-S	6,9 Mw	2,076
Montenegro	Ulcinj-Hotel Albatros	15.4.1979	198ya, E-W	6,9 Mw	2,076
Montenegro	Ulcinj-Hotel Olympic	15.4.1979	197xa, N-S	6,9 Mw	4,49
Montenegro	Ulcinj-Hotel Olympic	15.4.1979	197ya, E-W	6,9 Mw	4,49
Montenegro	Hercegnovi Novi-O.S.D. Pavcic School	15.4.1979	200xa, N-S	6,9 Mw	2,045
Montenegro	Hercegnovi Novi-O.S.D. Pavcic School	15.4.1979	200ya, E-W	6,9 Mw	2,045
Friuli	Tolmezzo-Diga Ambiesta	6.5.1976	55xa, N-S	6,5 Mw	2,623
Friuli	Tolmezzo-Diga Ambiesta	6.5.1976	55ya, E-W	6,5 Mw	2,623

Če je odziv dobljen z vsaj 7 nelinearnimi analizami časovnega poteka, standard SIST EN 1998-1, 2005 zahteva, da je potrebno pri kontrolah, za projektno vrednost učinka vpliva E_d upoštevati povprečne vrednosti odzivnih količin, dobljenih z analizami. V

- 10 Kozlevčar, P. 2007. Potresna analiza visokoregalnih paletnih skladišč.
Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.
-

ostalih primerih pa je potrebno upoštevati za E_d najbolj neugodne vrednosti odzivnih količin, dobljenih z analizami.

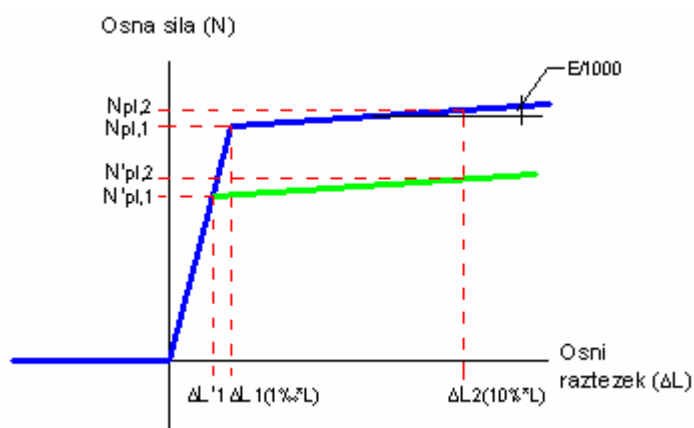
4 RAČUNSKI MODELI

4.1 Material

Vsi elementi skladišč VRS 2 in VRS 3 so iz jekla kvalitete S235 z mejo elastičnosti $f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$ in natezno trdnostjo $f_u = 36 \text{ kN/cm}^2$. Izjema so oslabitve diagonal skladišča VRS 3, ki imajo mejo elastičnosti določeno z meritvami (poglavje 4.4.2).

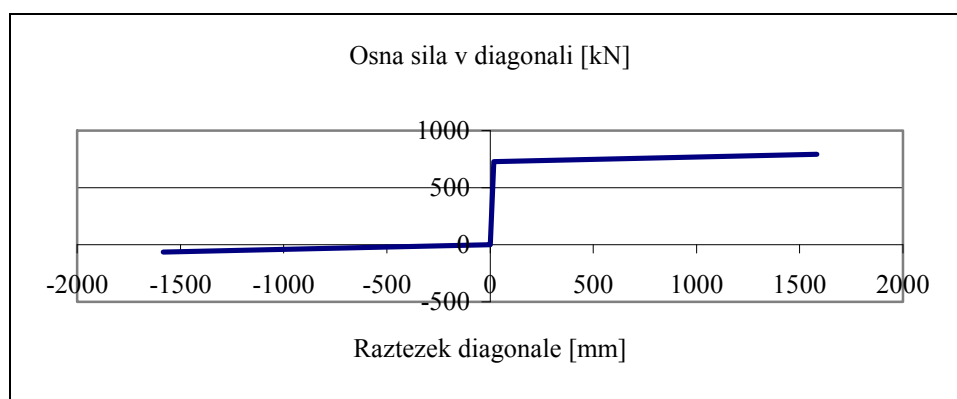
4.2 Modeliranje nateznih diagonal

Potresna energija se disipira v centričnih »X« povezjih, kjer je nosilna samo natezna diagonala, tlačna pa se ukloni. Preizkusili smo diagonale s konstantnim prečnim prerezom po vsej dolžini in diagonale z reduciranim prerezom na določeni dolžini. Pri prvem primeru pride do plastifikacije celotne diagonale v drugem primeru pa plastifikacija nastopi lokalno na delu, kjer je prerez reduciran. Dolžina dela diagonale na katerem je prerez oslabljen je navzgor omejena zaradi preprečitve lokalnega uklona v tlaku. Ker je oslabljen del kratek ne vpliva bistveno na elastičen raztezek celotne diagonale, zato lahko diagonalo z reduciranim delom prereza modeliramo tako, da prestavimo plato plastifikacije za ustrezen nivo osne sile nižje (slika 4.1).

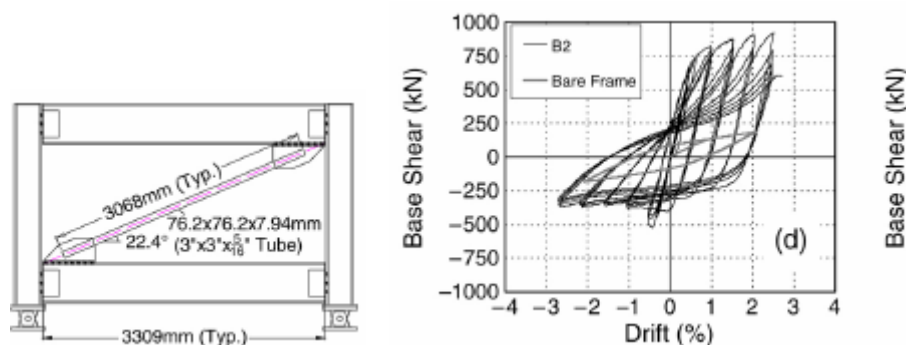


Slika 4.1: Definicija ovojnice histereze natezne diagonale z reduciranim prerezom v programu sap200.

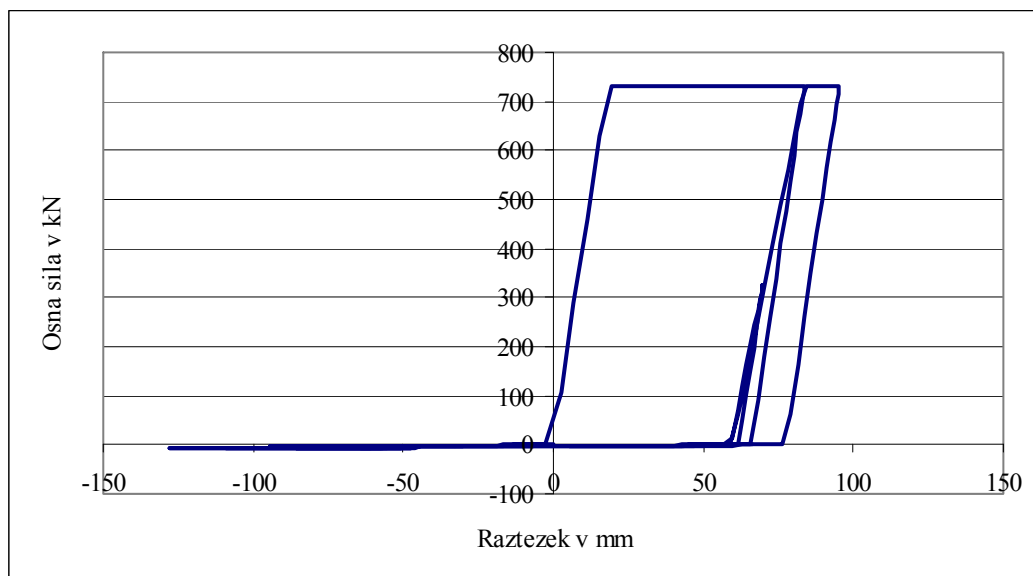
Modalno analizo s spektri odziva in nelinearno dinamično analizo smo naredili s programom SAP2000. V programu smo diagonale modelirali kot plastične vzmeti z nosilnostjo v tlaku enako nič in utrditvijo v nateznem plastičnem območju, grafikon 4.1. Ker ima program SAP2000 na voljo le tri histerezne modele in sicer kinematični model, Takeda model in pivot model, smo uporabili histerezni model Takeda, ki je najboljši približek dejanskemu obnašanju natezne jeklene diagonale pri izmeničnem obremenjevanju v tlaku in nategu. S primerjavo rezultatov preizkusov (slika 4.2) s histerezo modelirane diagonale (grafikon 4.2) smo ugotovili, da histerezo obnašanje diagonale, modelirane z uporabo modela Takeda, deluje pravilno le v primeru, da predpostavimo nosilnost v tlaku nič, z majhno utrditvijo ($E/1000$), s katero pri prostorskem modelu dosežemo hitrejšo konvergenco pri numeričnem reševanju sistema enačb.



Grafikon 4.1: Ovojnica histereze Takeda v programu SAP2000



Slika 4.2: Histereza natezne diagonale, rezultati testa (J.W. Berman et al., Engineering Structures 27, 2005, stran 480)

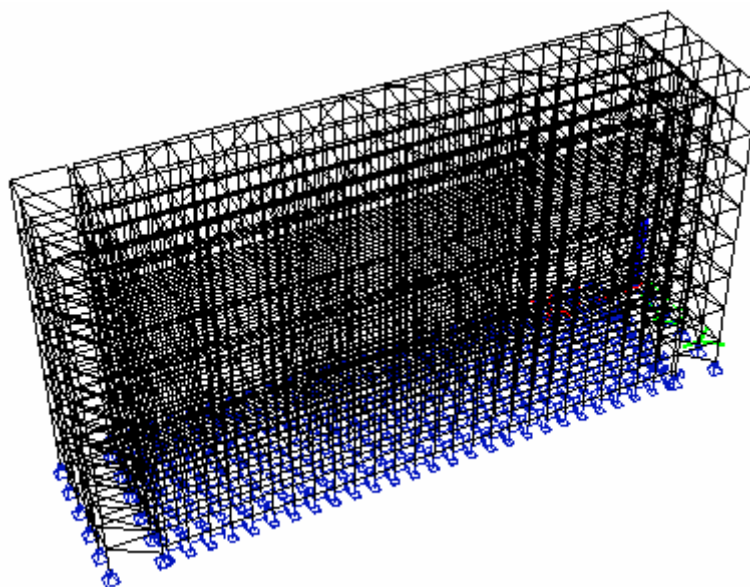


Grafikon 4.2: Histereza diagonale modelirane s programom SAP2000, z uporabo modela Takeda

4.3 Visokoregalno skladišče VRS 2

4.3.1 Splošno

Visokoregalno skladišče VRS 2 je namenjeno skladiščenju sendvič panelov na jeklenih paletah dolžine 14,5 metrov. Višina konstrukcije znaša 26,1 m, širina 45,6 m in dolžina 53,32 m. Objekt je razdeljen na dva regalna bloka med katerima je hodnik širine 15,5 m, v katerem se giba dvigalo. Vsak posamezni regalni blok je na obeh koncih stabiliziran s stabilizacijskim blokom. Stabilizacijski bloki prenašajo horizontalno obtežbo v prečni in v vzdolžni smeri (slika 4.3). Obtežba v prečni smeri se prenaša s centričnim diagonalnim povezjem. Diagonale so na sredini med seboj povezane. Posamezen stabilizacijski blok smo modelirali, kot je prikazano na sliki 4.4, čeprav je dejanska geometrija stabilizacijskega bloka takšna, kot je razvidna s slike 4.6. Stebri med krajnima stebroma stabilizacijskega bloka z diagonalami niso povezani, povezani so le s prečkami. V modelu povezja smo jih izpustili, vendar pa smo jih kljub temu upoštevali pri potresni masi. Palete ležijo na paletnih nosilcih. Prva etaža paletnih nosilcev je na višini 62 cm, sledi 13 etaž višine 167 cm, zadnja etaža pa je visoka 210 cm.



Slika 4.3: Prostorski model iz programa Esa. Stabilizacijska bloka sta levo in desno, regalne stranice so v sredini med njima

Glavno nosilno konstrukcijo regalov predstavljajo regalne stranice širine 120 cm. To so palični stebri sestavljeni iz pasov in diagonal. Diagonale so po višini razporejene v rastru 75 cm (slika 4.5).

Ker je skladišče v tlorisu simetrično glede na prečno in vzdolžno smer, smo obravnavali le polovico enega regalnega bloka, kar predstavlja četrtno celotnega skladišča. Ker so vse stranice v posamezni vrsti enake in ker nas je zanimalo le obnašanje konstrukcije v prečni smeri, smo lahko izbrali ravninski računski model (slika 4.4). Priključki diagonal in prečk na stebre so členkasti, stebri so vpeti. Povezavo med regali in povezjem smo v računskem modelu predpostavili kot togo. Stranice so med sabo povezane s prečnimi povezavami na štirih nivojih, na vrhu pa so povezane s horizontalnim zavetrovanjem. V modelu smo to zavetrovanje modelirali kot togo povezavo.

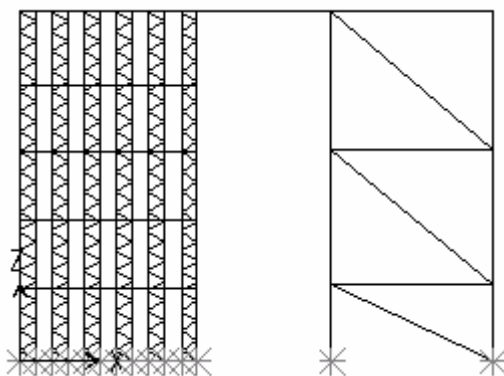
Disipativni del konstrukcije je globalno povezje. Modalno analizo smo naredili na dveh primerih:

- Stranice skupaj s povezjem

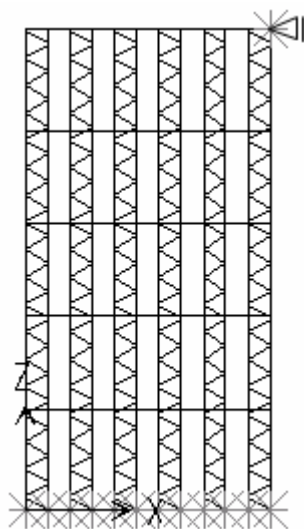
- Samo stranice brez povezja podprte na vrhu

V prvem primeru smo se približali obnašanju regalnih stranic na sredini pri neki oddaljenosti od povezja, v drugem primeru pa obnašanju regalnih stranic tik ob povezju. V modelu regalnih stranic brez povezja, smo stranice zgoraj (slika 4.4) podprli tako, da je preprečen horizontalni pomik, zasuk in vertikalni pomik pa sta prosta.

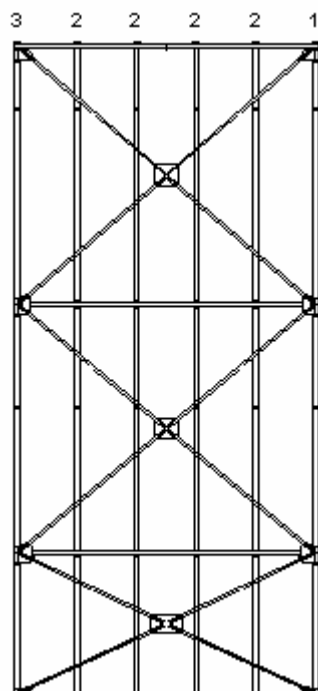
Ker gre v prvem primeru za centrična diagonalna povezja, kjer nosi samo natezna diagonalna, standard (SIST EN 1998-1, 2005, člen 6.3.2, preglednica 6.2) priporoča izbiro faktorja $q = 4$. V drugem primeru pa je sistem nedisipativen (preglednica 2.3), zato $q = 1,5$. Pri modalni analizi, kjer se notranje sile računajo elastično smo povezje modelirali samo z eno diagonalno (slika 4.4), saj tlačne diagonale pri linearni analizi ni možno izločiti. Če bi upoštevali obe diagonali bi bila togost večja od dejanske in zato rezultati napačni.



Slika 4.4: Ravninski računski model stranic in globalnega povezja v prečni smeri v programu SAP2000



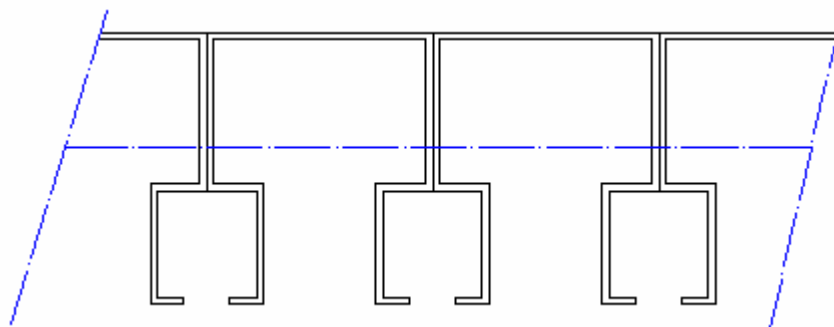
Slika 4.5: Računski model stranic brez povezja



Slika 4.6: Stabilizacijski blok

4.3.2 Prerezi elementov

Prereze v ravninskem računskem modelu stranic smo modelirali z nadomestnimi prerezi, ki predstavljajo vsoto karakteristik posameznih prečnih prerezov. Površina nadomestnega prereza je enaka površini dejanskega prereza pomnoženi s številom prerezov. Vztrajnostni moment nadomestnega prereza predstavlja vztrajnostni moment skupine dejanskih prerezov postavljenih vzporedno drug ob drugem (slika 4.7). V vzdolžni smeri je v posameznem regalnem bloku 27 stranic. Ker smo preverjali vpliv le polovice regalnega bloka, smo sešteli 13,5 prerezov. Dejanski prerezi posameznih elementov so zbrani v preglednici 4.1.



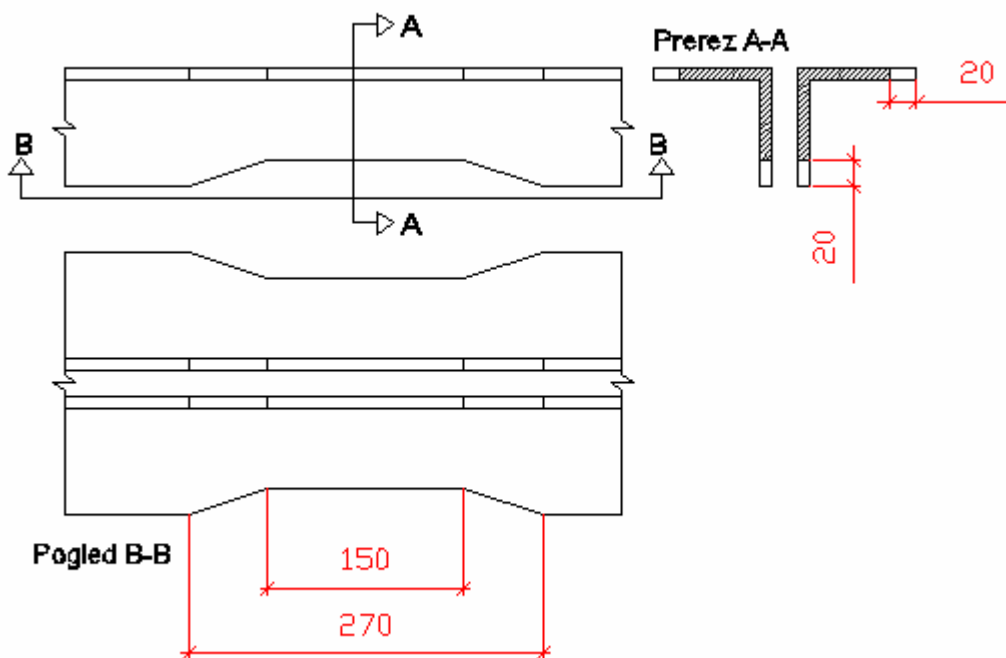
Slika 4.7: Del nadomestnega prereza sestavljenega iz več omega prerezov.

Preglednica 4.1: Prečni prerezi računskega modela VRS 2.

Element	Prerez
Pasovi stranic	Omega 100/120
Diagonale krajnjih stranic	U 50/40/3
Diagonale srednjih stranic	U 50/40/2
Povezave stranic	2L 50/50/3
Diagonale povezja	2L 90/90/9
Stebri povezja	HEA 200
Prečke povezja	RQ 140/140/6,3
Zgornja prečka povezja	HEA 200

Kot je omenjeno že v uvodu tega poglavja, smo izvedli tudi dinamično analizo pri kateri smo upoštevali reducirani prerez diagonal na določeni dolžini. Pri modelu skladišča VRS 2, je oslabitev izvedena z zmanjšanjem prereza diagonal na dolžini 150mm (slika

4.8). Oslabljena sta prereza obeh krakov posameznih kotnikov, ki sestavljajo diagonalo. Površina oslabljenega prereza je v vseh etažah enaka.



Slika 4.8: Oslabitev diagonale

4.3.3 Obtežba

4.3.3.1 Gravitacijska obtežba

Ker smo izvajali le potresne analize nas obtežbi vetra in snega nista zanimali.

Prevladujoča obtežba pri skladiščih je koristna obtežba skladiščenega blaga, medtem ko lastna teža in stalna obtežba predstavljata majhen delež obtežbe. Obtežbo nad regalnimi stranicami smo pomnožili s številom sešteti prerezov, to je 13,5.

Obremenitev skladišča je sledeča:

1. Breme na tipski jekleni paleti dolžine 14,5 m:

Teža palete	do 4 kN
Koristna teža na paleto	max 46 kN
2. Obremenitev z oblogami brez podkonstrukcije:

Paneli Trimoterm, fasada FTV, streha SNV	0,4 kN/m ²
--	-----------------------

Obremenitev pomnožena s faktorjem 13,5 na posamezne elemente konstrukcije:

a) Regalna stranica

- Stalna obtežba
 - Kritina in strešna podkonstrukcija: $S = 14,85 \text{ kN}$
- Koristna obtežba: Karakteristična teža palet z bremenom je 50 kN. Na posamezen pas palične stranice odpade $P = 56,7 \text{ kN}$.

b) Regalna stranica ob fasadi

- Stalna obtežba
 - Streha: $S_1 = 20,25 \text{ kN}$
 $S = 14,85 \text{ kN}$
 - Fasada: $f = 9,45 \text{ kN/m}$
 $m_f = 15,12 \text{ kN/m}$
- Koristna obtežba: $P = 56,7 \text{ kN}$

c) Regalna stranica ob hodniku

- Stalna obtežba
 - Streha: $S = 14,85 \text{ kN}$
 $S_2 = 151,2 \text{ kN}$
- Koristna obtežba: $P = 56,7 \text{ kN}$

d) Stabilizacijski blok – os 1

- Stalna obtežba
 - Streha: $S_{z1} = 18 \text{ kN}$
 - Fasada: $f_{z1} = 5,2 \text{ kN/m}$

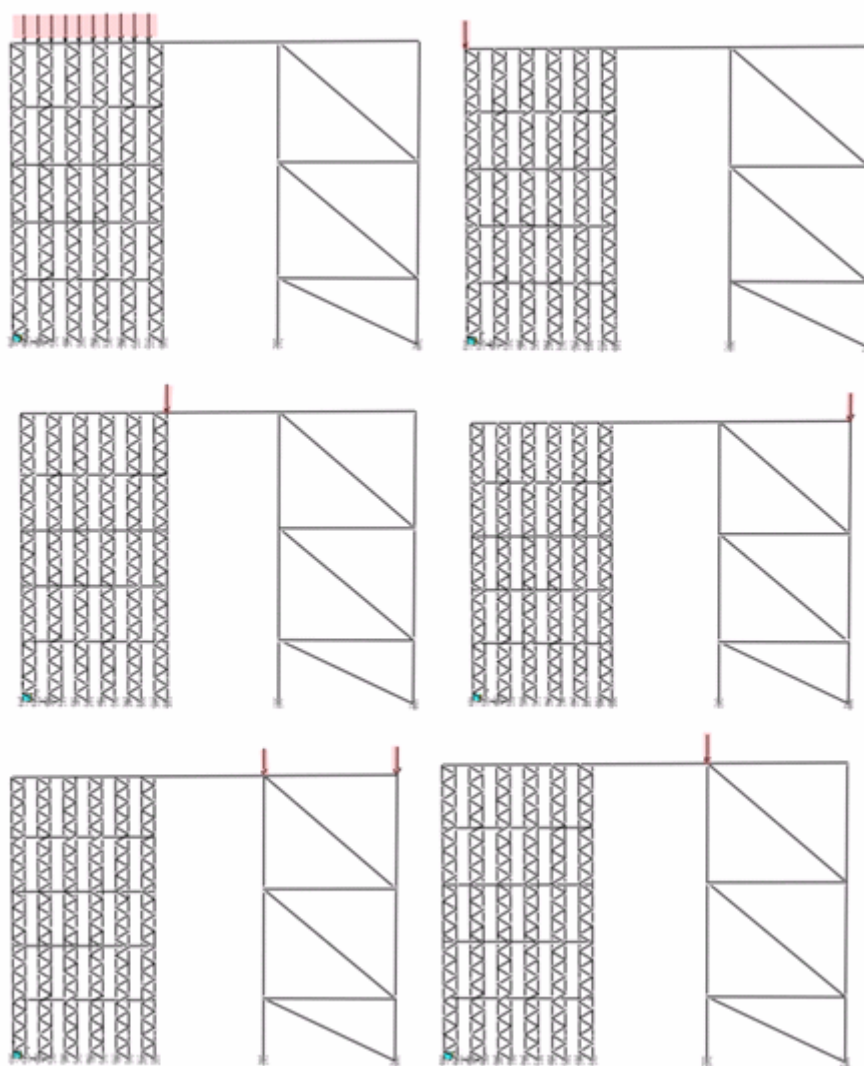
e) Stabilizacijski blok – os 2

- Stalna obtežba
 - Streha: $S_{z2} = 3,7 \text{ kN}$
 - Fasada: $f_{z2} = 1,0 \text{ kN/m}$

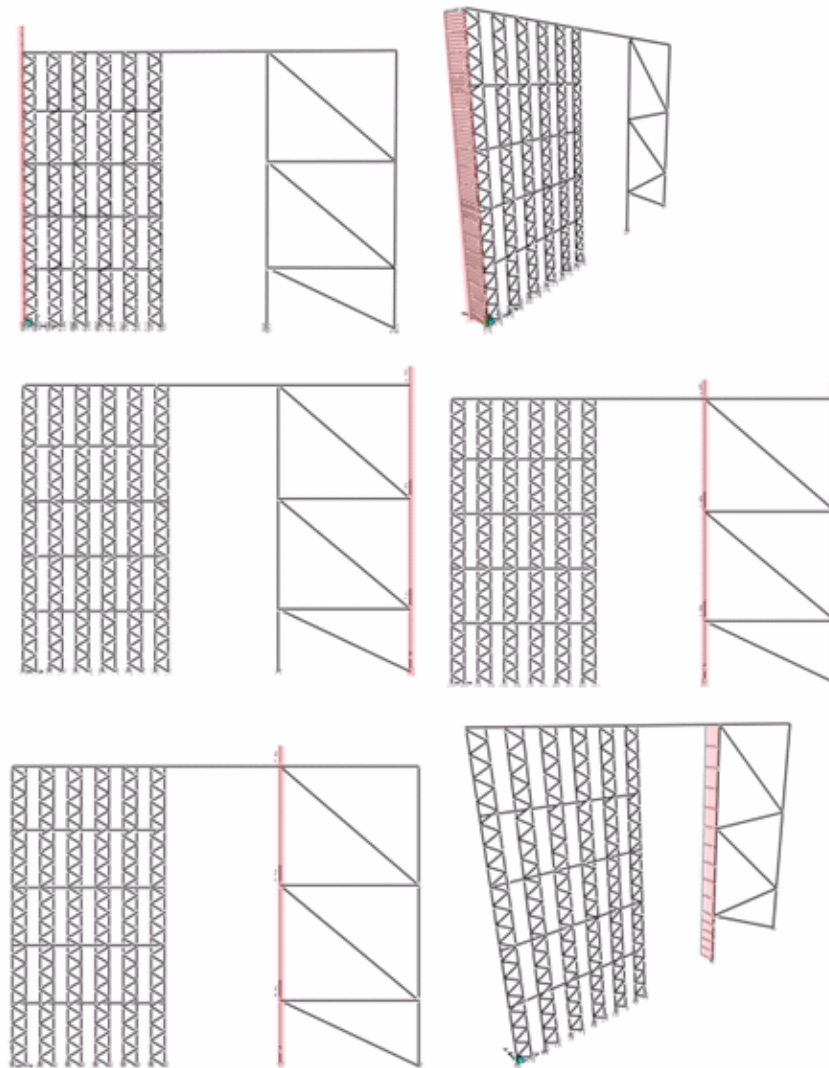
f) Stabilizacijski blok – os 3

- Stalna obtežba
 - Streha: $S_{z3} = 4,4 \text{ kN}$
 - Fasada: $f_{z3} = 2,7 \text{ kN/m}$
 $m_{f_{z3}} = 3,24 \text{ kNm/m}$

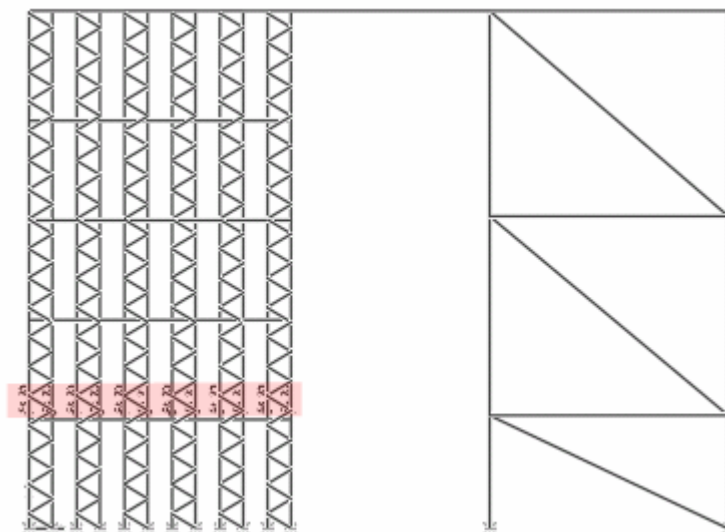
Razpored stalne obtežbe v računskem modelu je viden na slikah 4.9 in 4.10. Koristna obtežba je podana kot točkovna obtežba na stebrih stranic na nivojih nosilcev, primer na sliki 4.11.



Slika 4.9: Razpored stalne obtežbe po vrsti od zgornjega levega kota do spodnjega desnega: S, S₁, S₂, S_{z1}, S_{z2}, S_{z3}



Slika 4.10: Razpored linijske stalne obtežbe po vrsti od zgornjega levega kota: f , m_f , f_{z1} , f_{z2} , f_{z3} , mf_{z3}



Slika 4.11: Primer razporeditve točkovne koristne obtežbe na četrtem nivoju paletnih nosilcev

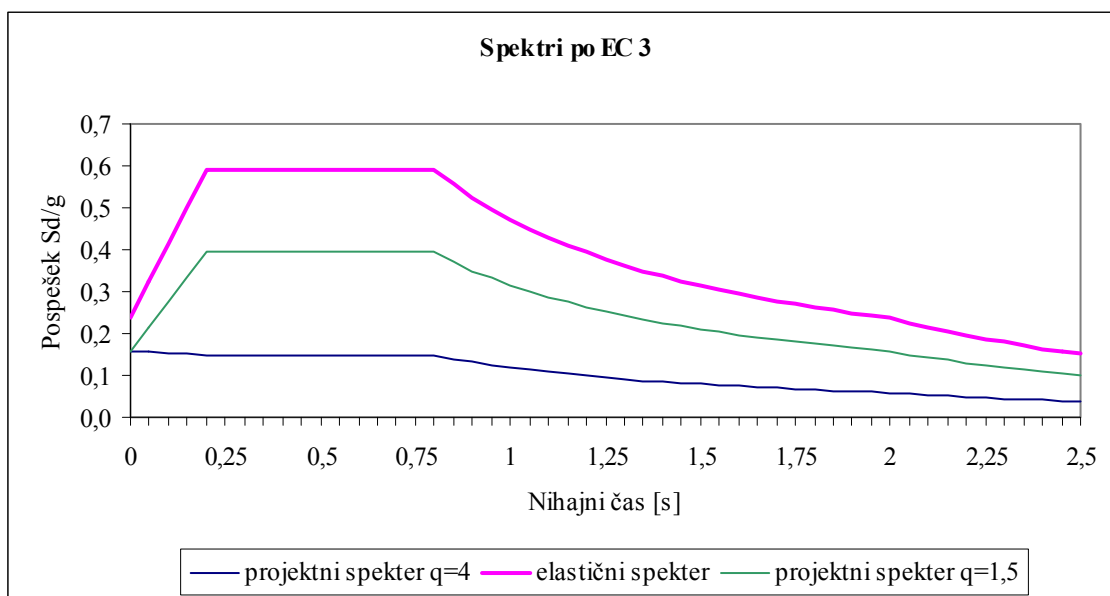
4.3.3.2 Potresna obtežba

a) Modalna analiza

Izvedli smo dva primera modalne analize. Pri prvem primeru smo obremenjevali ravninski model regalnih stranic skupaj z globalnim povezjem. Energija se disipira v globalnem povezju, zato smo pri modalni analizi uporabili faktor obnašanja $q = 4$ (Grafikon 4.1). V drugem primeru smo opazovali obnašanje ravninskega modela regalnih stranic brez povezja. Ker same regalne stranice ne disipirajo energije oziroma imajo zelo nizko disipacijo energije smo v skladu s priporočili pr FEM 10.2.08, 2005 (preglednica 2.3) izbrali faktor obnašanja $q = 1,5$. Tako pri modalni analizi, kot tudi pri dinamični smo upoštevali 5 % kritično dušenje konstrukcije. S strani investitorja je bilo določeno, da je za potresno obtežbo potrebno upoštevati 70% polnjenje skladišča. Seizmična obtežna kombinacija, ki je uporabljena v analizi:

$$\sum G_{ki} + \psi_2 \sum Q_{ki} + \gamma_i A_{Ed}(M) \quad (5)$$

$$A_{Ed}(M) : G_{ki} + R_f E_{D2} \phi \psi_2 Q_{ki}$$



Grafikon 4.3: Projektni spekter pospeškov po EC3

S faktorjema E_{D2} n R_f smo v modelu programa Sap2000 množili maso zaradi koristne obtežbe. Vrednosti faktorjev uporabljenih v seizmični potresni kombinaciji in vrednost faktorja E_{D2} (definicija v poglavju 2.2) so v preglednici 4.2.

Preglednica 4.2: Vrednosti faktorjev

Faktor	Vrednost
Ψ_2	0,7
ϕ	1,0
γ_i	1,0
R_f	1,0
E_{D2}	1,0
E_{D1}	1,0

b) Nelinearna dinamična analiza

Pri nelinearni dinamični analizi smo uporabili sedem različnih zabeleženih akceleroگرامov izmed desetih, ki so naštetih v poglavju 3.2. Akceleroграme smo izbrali tako, da smo zadostili pogoju standarda, ki so navedeni v poglavju 3.2. Izbrane akceleroграme smo normirali na maksimalen pospešek tal $a_g S$, tako da smo jih pomnožili s faktorjem f. Ker je nihajni čas prevladujoče nihajne oblike enak 1,19s, je bilo potrebno pogojem zadostiti na intervalu od 0,24 s do 2,38 s. Spektri večine akceleroagramov, ki smo jih imeli na voljo so imeli konice pri manjših nihajnih časih, pri

večjih pa so bili precej pod elastičnim spektrom, zato smo izbirali predvsem take akceleroگرامe, katerih odziv v spektru pospeškov je bil pri velikih nihajnih časih, več od 2 s, čim večji. Vrednost faktorja k (enačba 4) je odvisna predvsem od dolžine intervala na katerem je potrebno izpolniti pogoje standarda in od vrednosti v spektru pospeškov posameznega akceleroگرامa. Težave s premajhnimi vrednostmi pospeškov v povprečnem spektru pospeškov, so bile predvsem v območju nihajnih časov med 0,7 s in 0,9 s, ter v območju nihajnih časov višjih od 1,8 s, zaradi česar je bilo potrebno močno povečati faktor k za posamezen akceleroگرام. Izbrani akceleroگرامi in pripadajoči faktorji so zbrani v preglednici 4.3, povprečni spekter pospeškov dobljen iz spektrov pospeškov normiranih akceleroگرامov je prikazan na grafikonu 4.4.

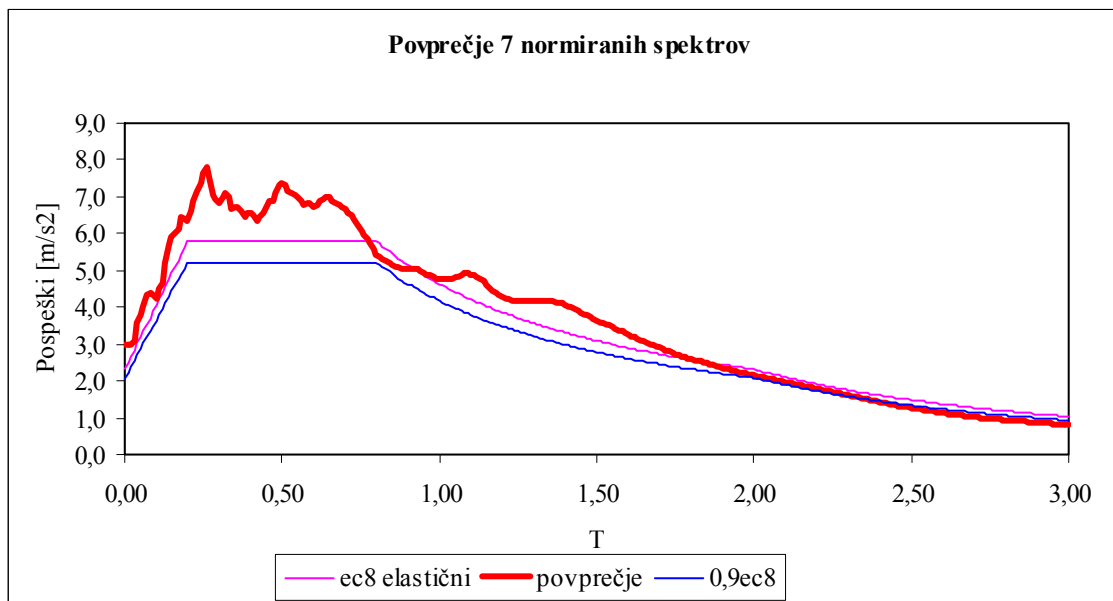
Preglednica 4.3: Faktorji za normiranje akceleroگرامov

Akceleroگرام	Faktor f
55y	0,97
197x	1,03
197y	1,28
198y	1,34
199x	0,82
199y	0,85
200x	1,37

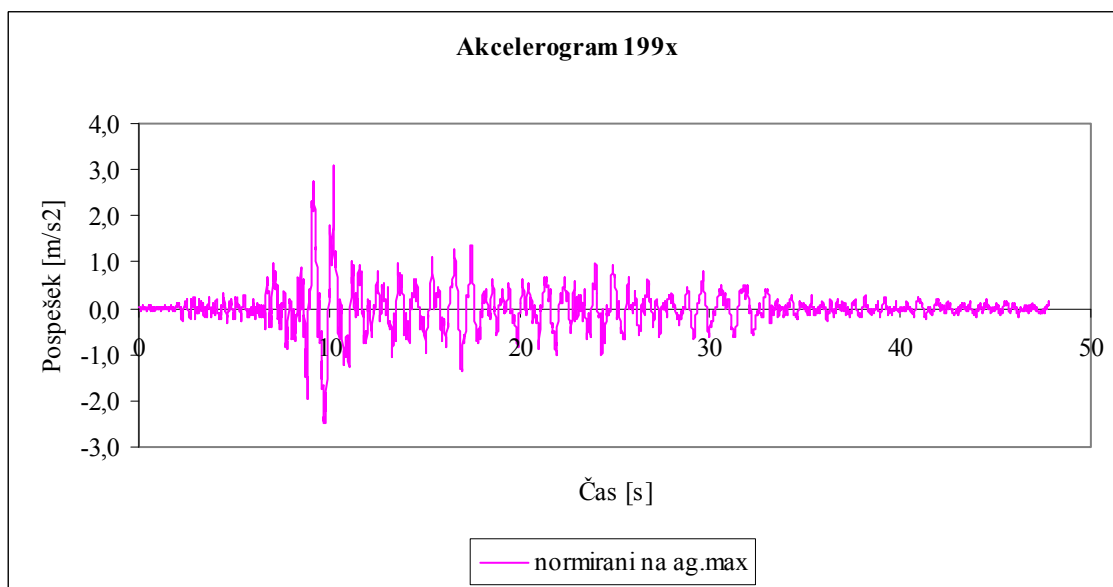
Tudi pri dinamični analizi je potrebno upoštevati faktorje R_f , E_{D1} in E_{D2} . Faktorja R_f in E_{D2} smo v modelu skladišča VRS 2 upoštevali na enak način kot pri modalni analizi, faktor E_{D1} pa smo upoštevali tako, da smo z njim pomnožili akceleroگرام.

Ker je dinamična analiza, ki smo jo izvedli materialno nelinearna analiza, ni možna superpozicija posameznih obtežnih primerov. Zato obtežne kombinacije, ki smo jih uporabili pri modalni analizi, tu ne veljajo oziroma dajejo napačne rezultate. Pravilen pristop je, da konstrukcijo postopno obremenjujemo z obtežnimi primeri. Začetno stanje vsakega naslednjega obtežnega primera, je končno stanje prejšnjega obtežnega primera. Najprej konstrukcijo obremenimo z gravitacijsko obtežbo, nato pa iz končnega stanja gravitacijske obtežbe še s potresno obtežbo.

Tako pri modalni analizi, kot tudi pri dinamični smo upoštevali 5 % kritično dušenje konstrukcije.



Grafikon 4.4: Povprečni spekter pospeškov

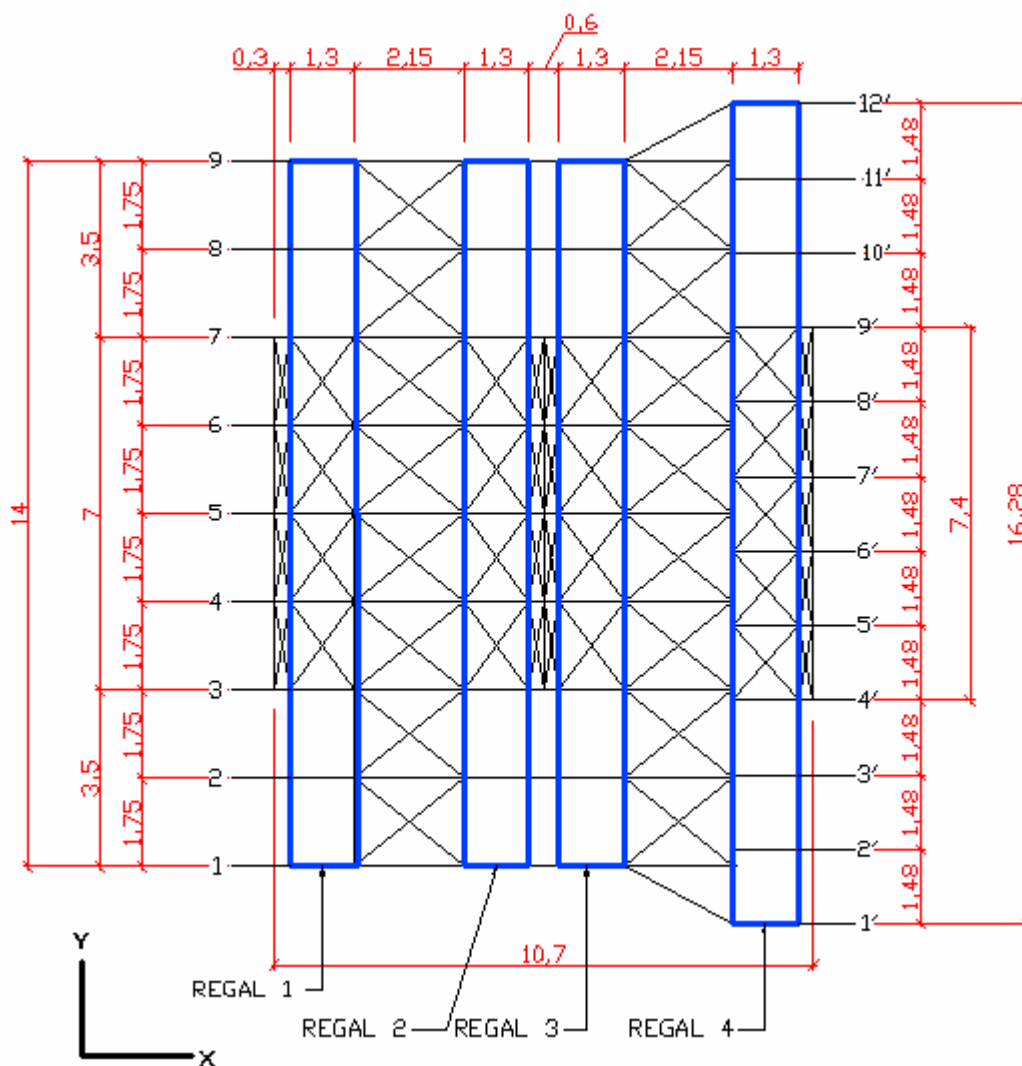


Grafikon 4.5: Primer normiranega akceleroograma za potres: Montenegro, Bar-Skupstina Opstine, vidi se da se vsa maksimalna obremenitev izvrši v 3 sunkih

4.4 Visokoregalno skladišče VRS 3

4.4.1 Splošno

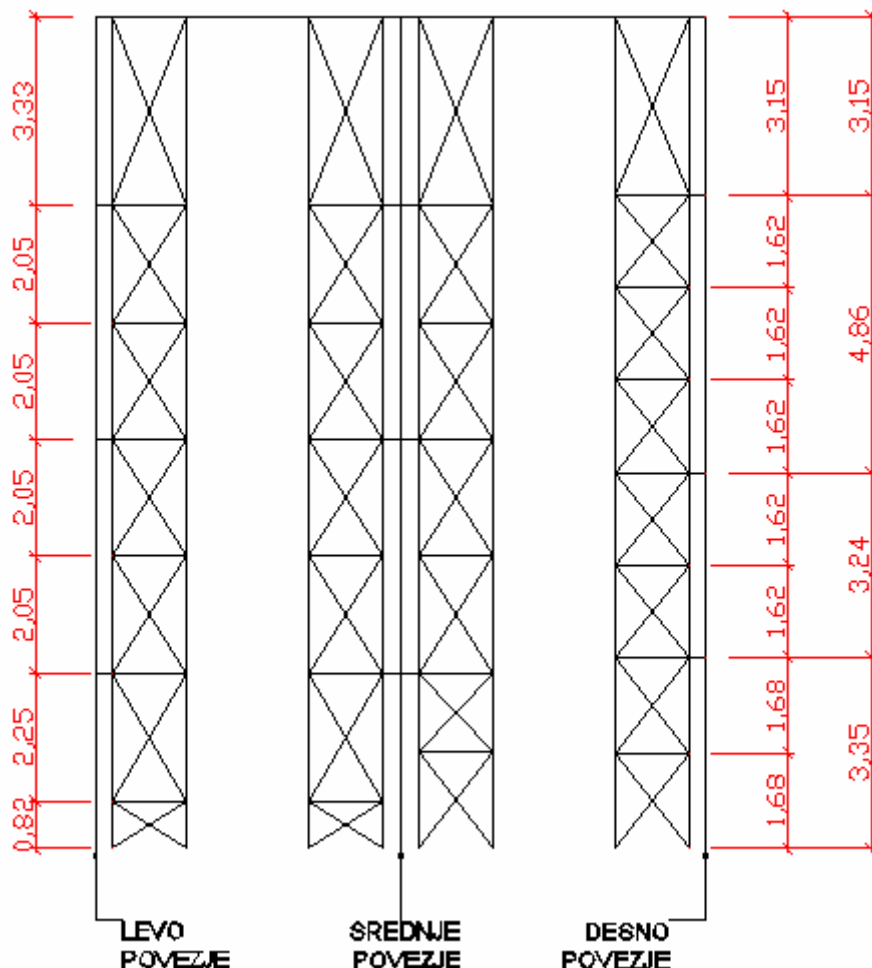
Visokoregalno skladišče VRS 3 je namenjeno skladiščenju kolutov pločevine. Sestavljeno je iz dela A in dela B, ki sta simetrična. Obravnavali smo le del A. Dimenzije obravnavanega dela skladišča so razvidne iz slik 4.12 in 4.13.



Slika 4.12: Tlorisne dimenzije skladišča, pogled na skladišče z vrha.

Skladišče ima 4 vrste paletnih nosilcev povezanih z regalnimi stranicami. Posamezne vrste smo poimenovali regali in jih oštevilčili zaradi lažjega dela (slika 4.12). Regala 1 in 2 sta geometrijsko enaka, regal 3 se od regalov 1 in 2 razlikuje v 1 in 2 etaži, regal 4

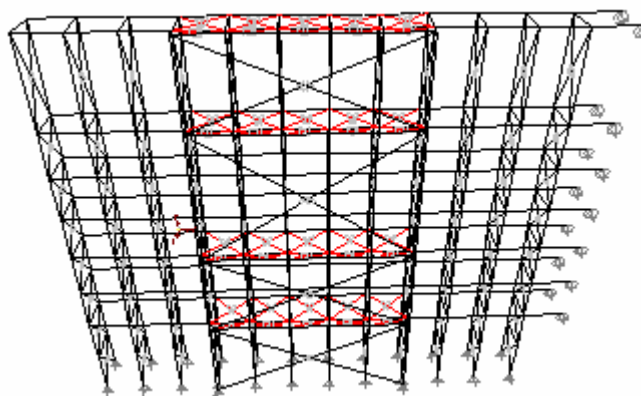
se od ostalih treh povsem razlikuje v številu etaž, višini etaž, dolžini in številu polj.
Regali 1, 2 in 3 imajo po 7 etaž, regal 4 pa 8 etaž.



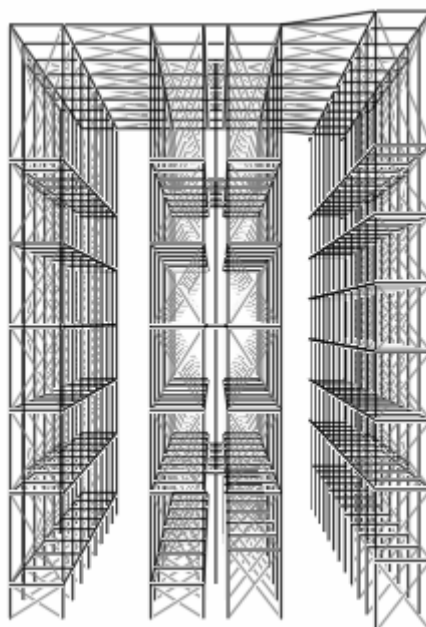
Slika 4.13: Dimenzije skladišča, pogled od spredaj

Konstrukcija ima dva ločena sistema za prenos horizontalne obtežbe v dveh glavnih smereh. V vzdolžni smeri Y, horizontalno obtežbo prenašajo 3 centrična vertikalna povezja, ki so pomaknjena izven ravnine regalov za 30 centimetrov (sliki 4.12 in 4.13). Diagonale v vzdolžnem povezju so na sredini med seboj povezane. Povezja v smeri Y potekajo po vsej višini skladišča. Dolžina levega in srednjega povezja je 7 metrov in poteka preko 4 polj, dolžina desnega je 7,4 metra in poteka preko 5 polj (slika 4.8). Na regale se priključujejo preko horizontalnih povezij na 4 mestih, skupno imajo torej 4 etaže (slika 4.13). V poljih kjer se povezje priključuje na regale je horizontalno

zavetrovanje tudi v regalih (slika 4.14). V prečni smeri X se potresna obtežba prenaša preko centričnih vertikalnih povezij, ki so v ravnini posameznih stranic in potekajo po vsej višini (slika 4.13). Diagonale povezij v smeri X med seboj niso povezane, saj bi bile pretoge in ne bi zadoščale pogojem vitkosti $1,3 < \lambda < 2,0$. Priključki vseh diagonal, prečk in paletnih nosilcev so členkasti. Stebri so členkasto podprti.



Slika 4.14: Primer regala 4 in desnega vzdolžnega vertikalnega povezja.



Slika 4.15: Prostorski model, pogled od spredaj.

4.4.2 Prerezi elementov

Prvi in drugi regal imata enake prereze stebrov, prečk, paletnih nosilcev in diagonal po višini, kar je vidno v preglednici 4.4. Tretji in četrti regal imata v prvih dveh etažah škatlaste stebre, ki so v bistvu HEA 160 profili ojačani s pločevino. V prvi etaži tretjega in četrtega regala ni paletnih nosilcev. Prerezi elementov četrtega regala in prerezi elementov vzdolžnega povezja ter strešnega povezja so podani v preglednici 4.4.

Preglednica 4.4: Prerezi posameznih elementov skladišča

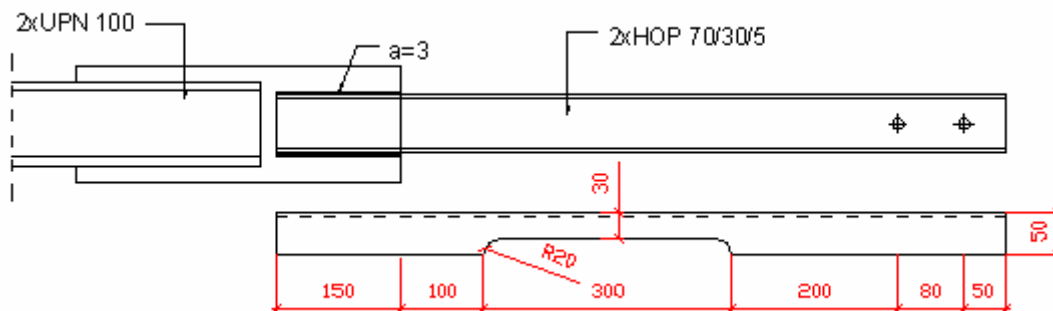
ELEMENT	PROFIL
Prvi in drugi regal	
Stebri	HEA 160
Prečke v smeri X	RQ 60/4
Paletni nosilci 1 etaža	HEB 120
Paletni nosilci 2-6 etaža	HEA 120
Vertikalne diagonale, 1-4 etaža	L 60/6
Vertikalne diagonale, 5-7 etaža	L50/5
Horizontalne diagonale	Palica R 24
Tretji regal	
Stebri, 1 in 2 etaža	Škatlasti (HEA 160 ojačani s pločevino)
Stebri, ostale etaže	HEA 160
Prečke v smeri X	RQ 60/4
Paletni nosilci	HEA 160
Vertikalne diagonale, 1-4 etaža	L 60/6
Vertikalne diagonale, 5-7 etaža	L 50/5
Horizontalne diagonale	Palica R 24
Četrti regal	
Stebri, 1 in 2 etaža	Škatlasti (HEA 160 ojačani s pločevino)
Stebri, ostale etaže	HEA 160
Prečke v smeri X	RQ 60/4
Paletni nosilci	HEA 100
Vertikalne diagonale, 1-4 etaža	L 60/6
Vertikalne diagonale, 5-7 etaža	L 50/5
Horizontalne diagonale	Palica R 24
Vzdolžno vertikalno povezje desno	
Stebri	HEB 160
Prečke	RQ 140/8
Diagonale, levo povezje, 1 in 2 etaža	2 x UNP 120
Diagonale, levo povezje, 3 in etaža	2 x UNP 100
Diagonale, srednje in desno	2 x UNP 140

povezje, 1 in 2 etaža	
Diagonale, srednje in desno povezje, 3 in 4 etaža	2 x UNP 120
Horizontalno povezje med vzdolžnim povezjem in regali	
Prečke	RQ 60/4
Diagonale	Palica R 24
Horizontalno povezje v strehi	
Prečke med regali	RQ 60/4
Diagonale	Palica R 24

Oslabitev prereza posamezne diagonale je izvedena tako, da je diagonala pred priključkom na vozlišče prekinjena, vmes med diagonalo in vozlišče pa je vstavljen profil manjšega prereza (slika 4.16). Oslabitev diagonal v prečni smeri X je samo v enem vozlišču. Oslabitev diagonal v vzdolžni smeri je v obeh vozliščih. Posamezni prerezi oslabitev se med seboj razlikujejo. Pri prečnem povezju se spreminjajo po višini, pri vzdolžnem povezju pa se spreminjajo po etažah in glede na lokacijo povezja v tlorisu. Natančnejša razporeditev in dimenzije oslabitev so podane v preglednici 4.6. Znan je tudi material oslabitev, katerega meja plastičnosti f_y , je ugotovljena s testiranjem. Elementi vgrajeni v diagonale prečnega povezja imajo $f_y = 24,5 \text{ kN/cm}^2$, elementi vgrajeni v diagonale vzdolžnega povezja pa $f_y = 27 \text{ kN/cm}^2$. Diagonale v prečni smeri v zadnji etaži niso oslabljene.

Preglednica 4.5: Oslabitve prerezov posameznih prerezov diagonal

Diagonala	Oslabitev	Dolžina [mm]
L 60/60/6 - 1,2,3,4 etaža	L 45/45/5	250
L 50/50/5 - 5,6,7,8 etaža	L 35/35/5	200
2 x UNP 100 – levo povezje	2 x HOP 70/30/5	300
2 x UNP 120 – levo povezje	2 x HOP 70/30/5	300
2 x UNP 120 – srednje in desno povezje	2 x HOP 70/35/5	300
2 x UNP 140 – srednje povezje	2 x HOP 100/60/5	350
2 x UNP 140 – desno povezje	2 x HOP 120/55/6	460



Slika 4.16: Primer izvedbe oslabitve diagonale

4.4.3 Obtežba

4.4.3.1 Gravitacijska obtežba

Gravitacijska obtežba, ki nastopa v analizah je lastna teža, stalna obtežba strešne konstrukcije in koristna obtežba kolotov pločevine, ki predstavlja večino vertikalne obtežbe.

- Stalna obtežba

Velikost obtežbe:

- Regal 1: $S_1 = 7$ kN, deluje v oseh 2, 5 in 8
- Regal 2: $S_2 = 21$ kN, deluje v oseh 2, 5 in 8
- Regal 4: $S_3 = 28,20$ kN, deluje v oseh 3', 7' in 11'
 $S_4 = 7$ kN, deluje v oseh 3', 7' in 11'

Razpored stalne obtežbe po regalih je viden na sliki 4.18, osi v katerih deluje obtežba so razvidne s slike 4.12.

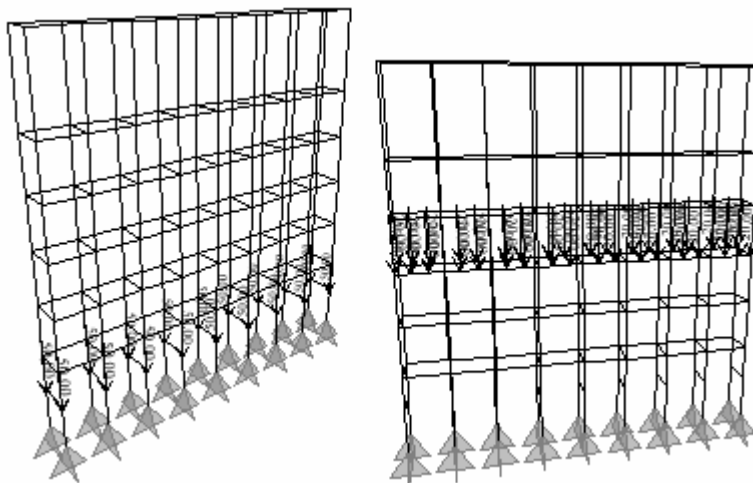
- Koristna obtežba

Koristno obtežbo predstavljajo koluti jeklene pločevine. Koristno obtežbo v modelu smo modelirali s točkovnimi silami, ki delujejo na paletne nosilce. V regalu 3 v drugi etaži, kjer ni paletnih nosilcev, so dejansko konzole na katerih so koluti. V modelu so konzole izpuščene, obtežba pa deluje točkovno na steber. Vrednosti obtežbe:

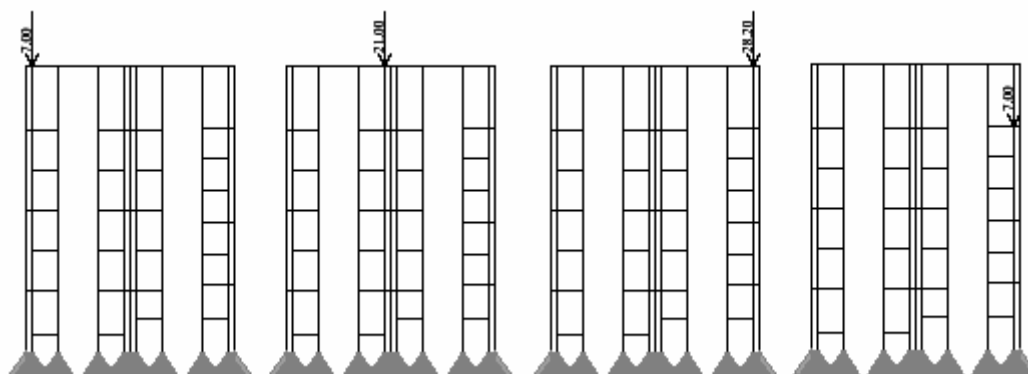
- Regal 1: $P_1 = 25$ kN
 $P_{2-6} = 20$ kN
- Regal 2: $P_1 = 25$ kN
 $P_{2-6} = 20$ kN

- Regal 3: $P_1 = 50 \text{ kN}$
 $P_{2-6} = 20 \text{ kN}$
- Regal 4: $P_1 = 32,5 \text{ kN}$
 $P_{2-6} = 16,3 \text{ kN}$

Razpored obtežbe je prikazan na sliki 4.17.

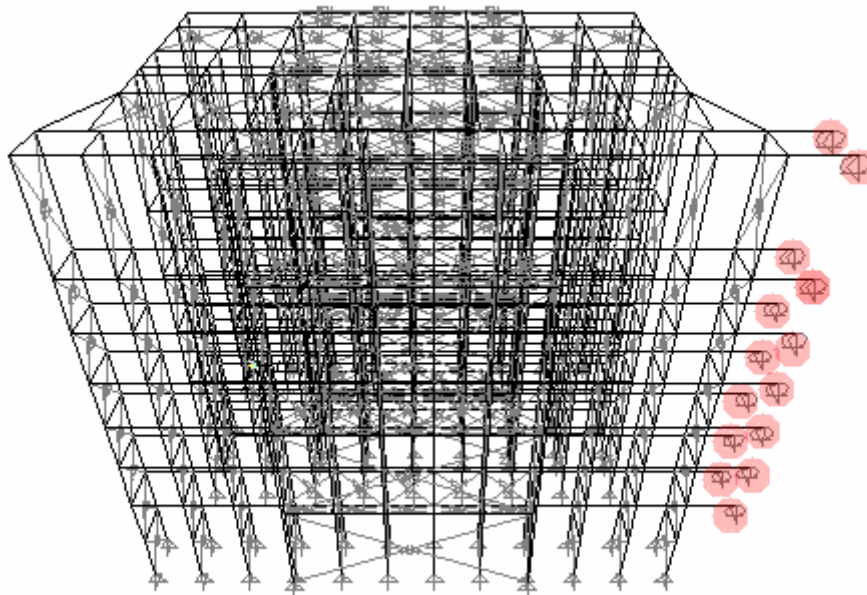


Slika 4.17: Primer razporeda koristne obtežbe, regal 3, obtežba P_1 in P_4



Slika 4.18: Razpored stalne obtežbe, od leve proti desni S_1 , S_2 , S_3 in S_4

Ker smo obravnavali samo polovico konstrukcije, del A, smo vpliv drugega dela konstrukcije nadomestili z dodatno maso. Kjer se konstrukcija stika z drugim delom, smo v modelu namestili drsne členkaste podpore, ki omogočajo zasuke okrog treh osi in premikanje v vzdolžni smeri, premikanje v vertikalni in prečni smeri pa je preprečeno. Na te podpore smo naložili maso manjkajočega dela konstrukcije, slika 4.19.



Slika 4.19: Podpore, kamor smo dodali manjkajočo maso

4.4.3.2 Potresna obtežba

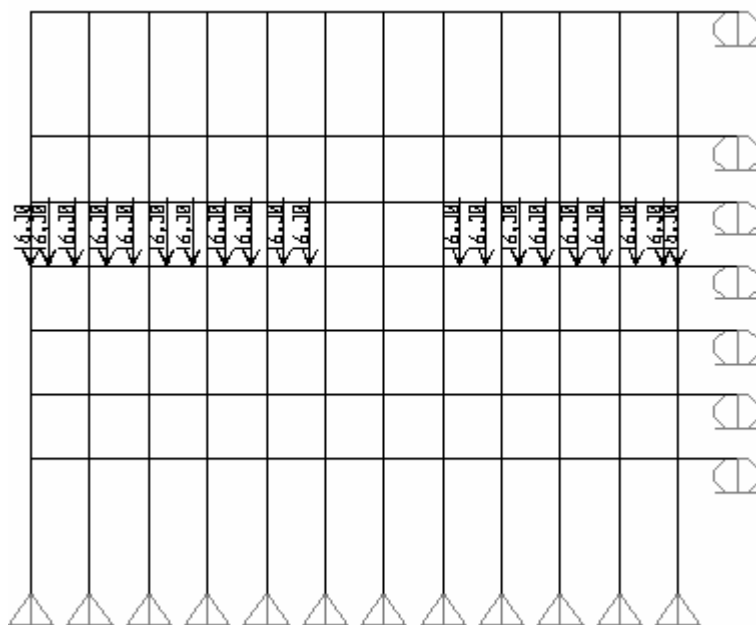
a) Modalna analiza

Pri modalni analizi smo poleg polno obremenjenega skladišča, preizkusili tudi delno razbremenjeno skladišče. Zanimalo nas je ali se v podporah pojavijo izvleki. Skladišče smo razbremenili med osema 4 in 6 v regalih 2 in 3 in med osema 6' in 8' v regalu 4, po vsej višini skladišča, slika 4.20.

Pri določevanju potresne obtežbe smo upoštevali določila priporočil pr FEM 10.2.08, 2005 (glej poglavje 2). V vzdolžni smeri Y in prečni smeri X je obnašanje skladiščenega blaga med potresom različno, zato sta različna tudi faktorja $E_{D1,X}$ in $E_{D1,Y}$. Predvideno je da se v prečni smeri X palete lahko premikajo v vzdolžni smeri pa se ne morejo, saj jim to preprečujejo stebri. Investitor je tudi predpisal 75% zasedenost skladišča, vendar pa priporočila pr FEM 10.2.08, 2005, dovoljujejo minimalne vrednosti faktorja polnjenja skladišča $R_f = 0,8$ v vzdolžni smeri in $R_f = 1,0$ v prečni smeri. S faktorjem R_f se množi masa zaradi koristne obtežbe, ki je vključena v seizmično projektno stanje. Vrednosti ostalih faktorjev uporabljenih v potresni obtežni kombinaciji opisani v poglavju 4.2.3.2 so navedeni v preglednici 4.6.

Preglednica 4.6: Vrednosti faktorjev zaradi vpliva potresne obtežbe

Faktor	Vrednost
ψ_2	1,0
ϕ	1,0
γ_i	0,8
$R_{f,X}$	1,0
$R_{f,Y}$	0,8
$E_{D2,X}$	0,8
$E_{D2,Y}$	0,8
$E_{D1,X}$	0,8
$E_{D1,Y}$	1,0



Slika 4.20: Primer razporeditve koristne obtežbe v četrti etaži, v regalu 4, pri delni razbremenitvi.

Sistema za prenos obtežbe v obeh glavnih smereh sta centrični povezji, zato smo uporabili faktor obnašanja $q = 4$. Projektni spekter pospeškov prečno smer X smo pomnožili s faktorjem $E_{D1,X}$, projektni spekter za vzdolžno smer Y pa s faktorjem $E_{D1,Y}$.

Slučajne ekscentričnosti nismo upoštevali, saj je razporeditev mas in togosti v tlorisu nesimetrična, zaradi česar je konstrukcija ekscentrična že sama po sebi. Standard SIST

EN 1998-1, 2005 predvideva uporabo slučajne ekscentričnosti v primeru, da je vodoravna razporeditev mas in togosti simetrična.

b) Nelinearna dinamična analiza

Nelinearno dinamično analizo smo ločeno izvajali za dve glavni smeri, saj ima konstrukcija ločena sistema za prevzem obtežbe v teh dveh smereh. Za obe smeri smo uporabili enake akcelerograme, kot smo jih uporabili pri dinamični analizi skladišča VRS 2. Zaradi krajšega nihajnega časa konstrukcije $T = 1,01$ s v smeri Y in $T = 0,76$ s v smeri X, je bil tudi interval, na katerem je potrebno izpolnjevati pogoje standarda navedene v poglavju 3.2, krajši od intervala pri analizi skladišča VRS 2. Dolžina intervala za smer X in Y sta različni, vendar pa to ni vplivalo na velikost faktorja k (enačba 4), saj je bilo kritično območje nihajnih časov med 0,7 s in 0,9 s (grafikon 4.4), zato smo uporabljene akcelerograme za smer X in Y normirali z enakimi vrednostmi faktorjev f . Faktorji f za posamezne akcelerograme, ki so navedeni v preglednici 4.7, so se le malenkost spremenili, glede na analizo skladišča VRS 2.

Preglednica 4.7: Vrednosti faktorjev f , s katerimi normiramo akcelerograme

Akcelerogram	Faktor f
55y	0,93
197x	1,01
197y	1,22
198y	1,32
199x	0,79
199y	0,81
200x	1,32

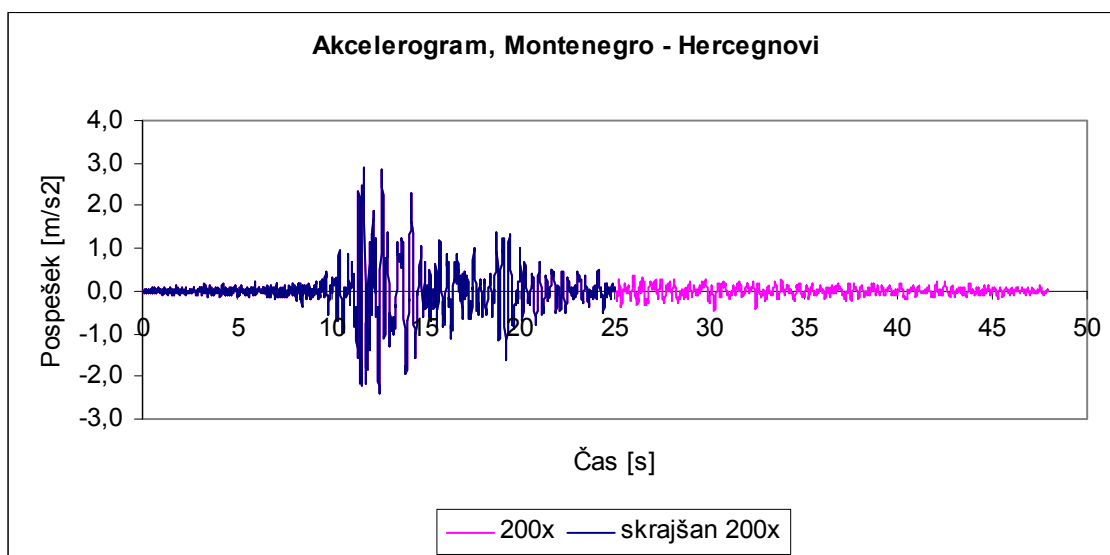
Tudi pri dinamični analizi je bilo potrebno upoštevati faktorje zaradi vpliva premikanja skladiščenega blaga in faktor polnjenja skladišča. Vrednosti faktorjev so v preglednici 4.6. Faktorja $E_{D2,X}$ in $E_{D2,Y}$, ki sta enaka, smo upoštevali tako, da smo z njima pomnožili maso. S faktorjema $E_{D2,X}$ in $E_{D2,Y}$ smo množili maso zaradi koristne obtežbe. Tudi s faktorjema $R_{f,X}$ in $R_{f,Y}$ smo pomnožili maso zaradi koristne obtežbe. To smo lahko storili, ker smo računali analize v smeri X in Y ločeno. Vpliv teh dveh faktorjev ni možno upoštevati na način kot smo ga upoštevali pri modalni analizi, ker pri nelinearni

analizi ni možna superpozicija. S faktorji $E_{D1,X}$, $E_{D1,Y}$ in γ_i smo pomnožili akceleroگرامe v smeri X in smeri Y.

5 REZULTATI ANALIZ

5.1 Splošno

Računski čas za posamezno analizo časovnega odziva je v primerjavi z modalno analizo zelo dolg. V primeru prostorskega modela in trajanja potresa 30s naraste na 20 ur in več. Imeli smo sedem različnih akceleroگرامov in za vsakega smo opravili po dve analizi, eno v smeri X in eno v smeri Y. Poleg tega smo to ponovili še za model z oslabljenim prerezom diagonal, kar je samo za skladišče VRS 3 skupaj zneslo 28 analiz. Če upoštevamo povprečni računski čas za posamezno analizo 13 ur, to znese dva tedna računskega časa, brez da bi upoštevali ravninski model skladišča VRS 2, ki vzame tudi nekaj dni. Iz tega razloga smo zmanjšali čas trajanja posameznega potresa oziroma akceleroگرامa. Čas trajanja smo zmanjšali glede na intenziteto potresa. Glede na to da nas je zanimal le maksimalen odziv konstrukcije, smo akceleroگرام »odrezali« na mestu, kjer so se pospeški tal umirili (grafikon 5.1). Časi trajanja posameznih akceleroگرامov pa so zbrani v preglednici 5.1.



Grafikon 5.1: Primer skrajšanja trajanja potresa

Preglednica 5.1: Časi trajanja potresov v analizah. Natančnejši podatki o potresih so v preglednici 3.2.

Akcelerogram	Trajanje
55y	12 s
197x	24 s
197y	24 s
198y	18 s
199x	35 s
199y	35 s
200x	25 s

Ker je že za obe skladišči narejena projektna gradbena dokumentacija, se nismo lotili dimenzioniranja prerezov, temveč smo naredili samo kontrole obstoječih prerezov.

5.2 Rezultati analiz visokoregalnega skladišča VRS 2

5.2.1 Modalna analiza

Pri modalni analizi smo za vertikalno povezje izvedli kontrole po standardu SIST EN 1998-1, 2005. V regalnih stranicah pa smo preverili, ali pride v katerem izmed prerezov do plastifikacije in uklona.

5.2.1.1 Model skladišča s povezjem, $q=4$

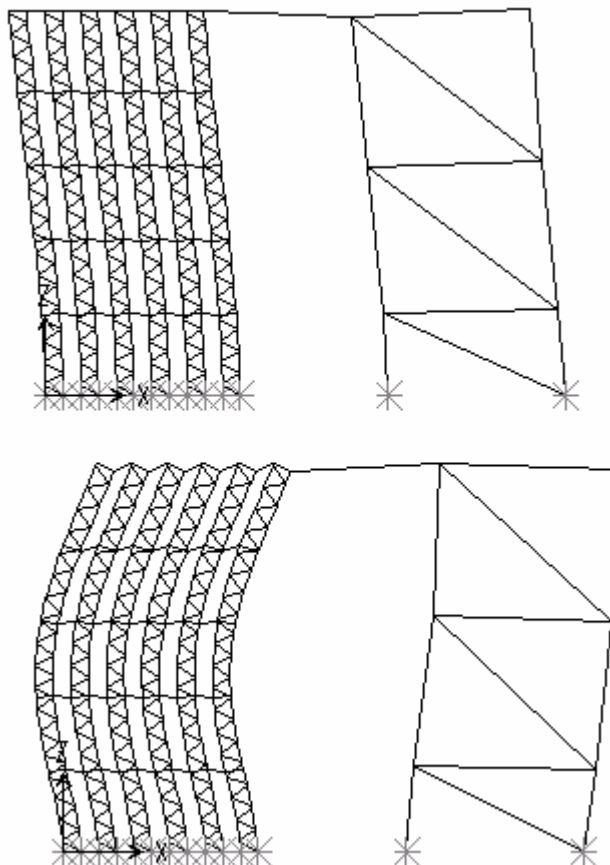
1. Nihajne oblike in nihajni časi

Efektivna modalna masa prve nihajne oblike predstavlja 66 % celotne mase. Da bi dosegli zahtevo standarda SIST EN 1998-1, 2005, ki zahteva izpolnitev enega izmed naslednjih določil:

- Potrebno upoštevati toliko nihajnih oblik, da vsota efektivnih modalnih mas upoštevanih nihajnih oblik znaša vsaj 90 % celotne mase konstrukcije.
- Potrebno je upoštevati vse nihajne oblike, z efektivnimi modalnimi masami večjimi od 5 % celotne mase.

Za izpolnitev prvega izmed naštetih pogojev smo upoštevali prvih sedem nihajnih oblik. Prva in druga nihajna oblika sta na sliki 5.1, nihajni časi in pripadajoče modalne mase pa v preglednici 5.2. Konstrukcija v prvi nihajni obliki niha kot konstrukcija tipa obrnjeno nihalo. Povezje na katerega se priključuje prek toge povezave deluje kot

linearna vzmet, ki omejuje nihanje s svojo togostjo. Ravno zaradi vpliva povezja prva nihajna oblika prispeva k skupni masi le 66 % in druga nihajna oblika 13 %. Če konstrukcija na vrhu ne bi bila priključena na povezje bi bil prispevek prve nihajne oblike k skupni masi večji.



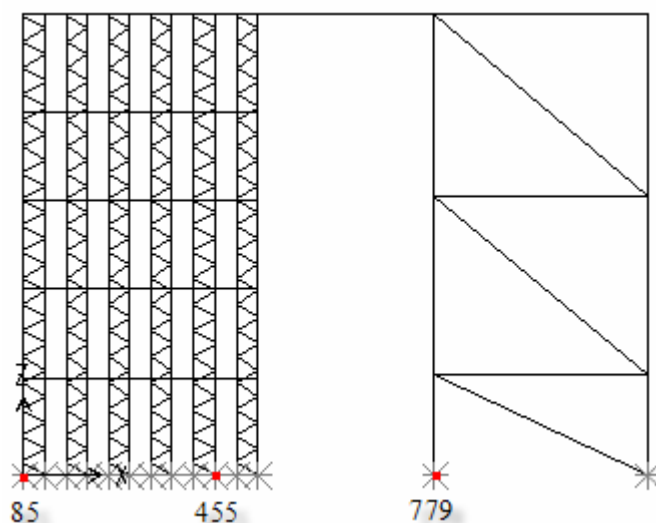
Slika 5.1: Prva in druga nihajna oblika

Preglednica 5.2: Značilnosti posameznih nihajnih oblik

Nihajna oblika	Nihajni čas [s]	Efektivna modalna masa-odstotek skupne mase	Vsota efektivnih modalnih mas-odstotek skupne mase
1	1,19	0,66	0,66
2	0,37	0,13	0,79
3	0,22	0,04	0,83
4	0,15	0,05	0,88
5	0,13	0,00	0,88
6	0,12	0,01	0,89
7	0,10	0,00	0,90

2. Reakcije

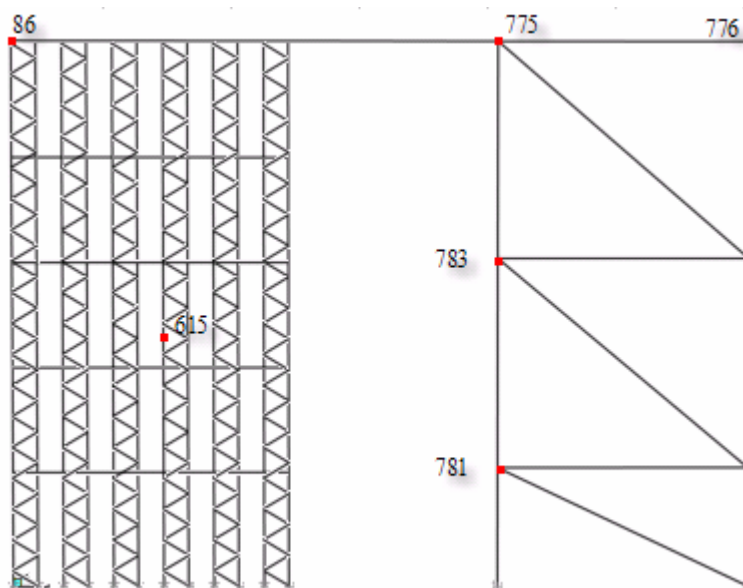
Pregledali smo maksimalne pritiske na tla in maksimalne izvlečne sile. Del vertikalnih reakcij od potresnega vpliva v podporah povezja je pomnožen s faktorji dodatne nosilnosti ($1,1, \Omega_i=1,7, \gamma_{ov}=1,25$), ki skupaj znašajo 2,3. Maksimalen pritisk v podpori povezja je 1523 kN, maksimalen izvlek v podpori povezja je -969 kN. Maksimalen pritisk v podporah stranic je 113 kN, maksimalen izvlek pa -1,4 kN.



Slika 5.2: Maksimalen pritisk v povezju in stranicah: 779 in 85, maksimalen izvlek v povezju in stranicah: 779, 455

3. Horizontalni pomiki in vpliv TDR

Preverili smo etažne pomike, maksimalni pomik na vrhu in maksimalni pomik v sredini. Maksimalne vrednosti pomikov bomo primerjali tudi z dinamično analizo. Vrednosti pomikov v opazovanih točkah so zbrane v preglednici 5.3, točke v katerih smo izpisali pomike so predstavljene na sliki 5.3. Pomike, ki jih dobimo iz modalne analize, je potrebno pomnožiti s faktorjem obnašanja q , saj so dejanski pomiki večji zaradi plastifikacije diagonal.



Slika 5.3: Točke v katerih smo izpisali horizontalen pomik

Preglednica 5.3: Horizontalni pomiki

Vozlišče	Pomik u_1 [mm]	$u_1 \cdot q$ [mm]
86	53	213
615	21	82
775	53	213
776	54	214
781	8	31
783	29	118

Etažne pomike smo preverili v vertikalnem povezju. Preverili smo ali izpolnjujejo določila standarda SIST EN 1998-1, 2005, točka 4.4.3.2. Za omejitvev upoštevamo točko c) standarda, ki predpisuje sledečo omejitev:

$$d_r \cdot v \leq 0,01h \quad (6)$$

Za vrednost redukcijskega faktorja je v nacionalnem dodatku standarda priporočena vrednost 0,5 za kategoriji stavb I in II.

Poleg etažnih pomikov smo preverili tudi, ali je potrebno upoštevati teorijo drugega reda približno, z metodo Horne. Vrednosti projektnih etažnih pomikov in koeficienti Θ , so zbrani v preglednici 5.4. Koeficient Θ izračunamo po enačbi:

$$\Theta = \frac{P_{tot} d_r}{V_{tot} h} \quad (7)$$

Preglednica 5.4: Pogoji omejitve etažnih pomikov in ocena vpliva TDR

Etaža	$d_r = \Delta u_1 * q$ [mm]	h [mm]	% višine	$d_r * v$ [mm]	$0,01 * h$ [mm]	P_{tot} [kN]	V_{tot} [kN]	Θ
1	48	5690	0,8	24	57	510	257	0,02
2	87	10020	0,9	43	100	413	249	0,01
3	95	10323	0,9	48	103	247	228	0,01

Pogoj omejitve etažnih pomikov je izpolnjen v vseh etažah. Vpliv teorije drugega reda je zelo majhen in ga pri dimenzioniranju ni potrebno upoštevati.

4. Kontrola diagonal

Preverili smo zahteve standarda SIST EN 1998-1, 2005. V nadaljevanju navajamo zahteve standarda in ugotovitve glede izpolnjenosti navedenih zahtev.

- Naslednje pravilo mora biti izpolnjeno v vsakem nadstropju:

$$\frac{|A^+ - A^-|}{A^+ + A^-} \leq 0,05, \quad (8)$$

kjer sta A^+ in A^- površini horizontalnih projekcij prečnih prerezov natezних diagonal. Pogoj je izpolnjen saj sta prereza in naklon obeh diagonal v posamezni etaži enaka.

- V okvirjih z X povezji mora biti relativna vitkost $\bar{\lambda}$ omejena z izrazom:

$$1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0 \quad (9)$$

Pogoj ni izpolnjen v nobeni etaži saj so relativne vitkosti enake (preglednica 5.5):

Preglednica 5.5: Relativna vitkost

Etaža	$\bar{\lambda}$
1	2,59
2	3,05
3	3,09

Potrebno bi bilo povečati prerez diagonal. Problem pri preveliki vitkosti je v tem, da se diagonale pri uklonu lahko plastificirajo.

- Za plastično nosilnost bruto prereza diagonal mora veljati: $N_{pl,Rd} \geq N_{Ed}$.

Preglednica 5.6: Nosilnost bruto prereza in obremenitev diagonal

Etaža	$N_{pl,Rd,i}$ [kN]	$N_{Ed,i}$ [kN]
1	560	289
2	560	330
3	560	300

Kot vidimo v preglednici 5.6, je pogoj v vsaki etaži izpolnjen. Pri tem smo upoštevali natezno nosilnost oslabiljenega dela prereza (glej poglavje 4.2.2).

- Da je zagotovljeno enakomerno disipativno obnašanje diagonal, se sme največja vrednost faktorja dodatne nosilnosti Ω_i , razlikovati od najmanjše vrednosti Ω za največ 25 %. Faktor dodatne nosilnosti je določen z izrazom:

$$\Omega_i = \frac{N_{pl,Rd,i}}{N_{Ed,i}} \quad (10)$$

Preglednica 5.7: Vrednosti faktorja dodatne nosilnosti

Etaža	Ω_i	Ω_i/Ω_{min}
1	1,94	1,14
2	1,70	1,00
3	1,87	1,10

Pogoj je izpolnjen.

5. Kontrola stebrov in prečk povezja

Stebre in prečke povezja kontroliramo z metodo varovalke. Prečke in stebri obremenjeni z osno silo morajo izpolnjevati naslednjo zahtevo:

$$N_{pl,Rd}(M_{Ed}) \geq N_{Ed,G} + 1,1\gamma_{ov}\Omega N_{Ed,E}, \quad (11)$$

kjer je:

$N_{pl,Rd}(M_{Ed})$ projektna uklonska nosilnost prečke ali stebra, ob upoštevanju interakcije z upogibnim momentom M_{Ed} , določenem v seizmičnem projektnejem stanju

$N_{Ed,G}$ osna sila v prečki ali stebri od neseizmičnih vplivov, vključenih v kombinacijo vplivov pri seizmičnem projektnejem stanju

$N_{Ed,E}$ osna sila v prečki ali stebri od projektnejh seizmičnih vplivov

γ_{ov} faktor dodatne nosilnosti

Ω najmanjša vrednost Ω_i od vseh diagonal v zavetrovanem sistemu

(preglednica 5.7)

Kontrolo napetosti prereza smo izvedli po poenostavljeni linearni enačbi:

$$\sigma_{\max,el} = \frac{N}{A} \pm \frac{M_y}{W_{el,y}} \pm \frac{M_z}{W_{el,z}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (12)$$

kontrolo stabilnosti elementa pa po enačbi, kje smo upoštevali le uklon elementa:

$$\frac{N_{Ed}}{N_u} \pm \frac{M_{Ed,y}}{M_{pl(el),y}} \pm \frac{M_{Ed,z}}{M_{pl(el),z}} \leq 1,0. \quad (13)$$

Faktor dodatne nosilnosti γ_{ov} izberemo 1,25.

Izkoriščenost najbolj obremenjenega stebra in prečke predstavljamo v preglednici 5.8.

Preglednica 5.8: Izkoriščenost najbolj obremenjenih elementov

Element	Prerez	N_{\min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Elastična kontrola napetosti $\sigma_{\max,el} / (f_y / \gamma_{M0})$	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 200	-1517	-4,6	1,35	1,46
Prečka	HEA 200	-58	7,5	0,13	0,13
Prečka	RQ 140/6,3	-604	4,6	0,91	0,95

Ker so bili stebri obstoječega skladišča dimenzionirani na notranje sile dobljene iz prostorskega računkega modela, kjer je bila porazdelitev notranjih sil drugačna, je prerez v našem primeru premajhen. Potresne sile se v ravninskem računskem modelu razporedijo samo na dva stebra zato so notranje sile precej večje od tistih iz prostorskega modela. Maksimalne tlačne sile v elementih povezja dobljene iz prostorskega računkega modela, izračunane s kombinacijo (11) in z upoštevanjem 30% potresne obtežbe v smeri pravokotno na ravnino povezja, so podane v preglednici 5.9

Preglednica 5.9: Rezultati analize prostorskega modela s programom ESA, maksimalne količine za posamezen prerez.

Element	Prerez	N_{min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Elastična kontrola napetosti $\sigma_{max,el} / (f_y / \gamma_{M0})$	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 200	-663	6,5	0,73	0,73
Prečka	HEA 200	-268	9	0,31	0,33
Prečka	RQ 140/6,3	-384	4,6	0,63	0,65

6. Kontrola elementov stranic

Kontrolirali smo napetosti in stabilnost stebrov, diagonal in povezav med stranicami za seizmično projektni stanje (enačba 5). Notranje sile in izkoriščenost posameznih prerezov so zbrane v preglednici 5.10.

Preglednica 5.10: Izkoriščenost elementov regalnih stranic

Element	Prerez	N_{min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	Omega 100/120	-113	-0,6	0,51	0,51
Diagonala	U 50/40/3	-7	0	0,08	0,18
Diagonala	U 50/40/2	-6,3	0	0,11	0,23
Povezava stranic	2L 50/50/3,1	-0,8	-0,4	0,45	0,59

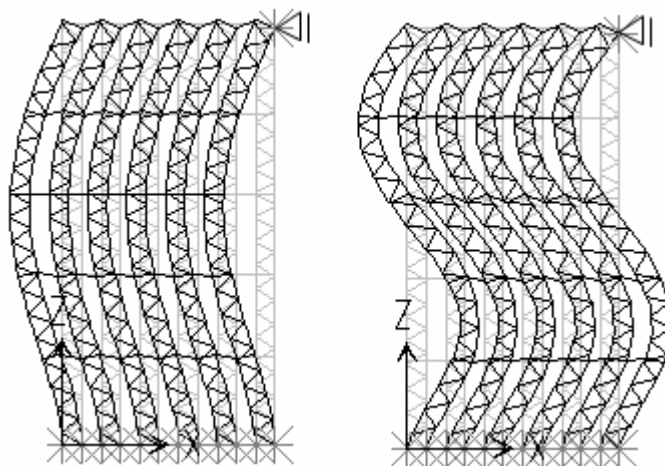
5.2.1.2 Model skladišča brez povezja podprt na vrhu

Ker v tem primeru ni sistema za disipacijo energije, same stranice pa imajo zelo nizko disipacijo (poglavje 2.5, slika 2.2), smo izbrali faktor obnašanja $q = 1,5$. Potresna obremenitev je zato večja, posledično pa so večje notranje sile in pomiki.

1. Nihajne oblike in nihajni časi

Prva nihajna oblika modela regalnih stranic brez povezja je podobna drugi nihajni obliki modela regalnih stranic s povezjem. Povezava regalnih stranic na vrhu je še vedno toga, namesto na povezje pa se na vrhu stranice opirajo na podporo, ki je nepomična v horizontalni smeri. Enako obnašanje bi dobili v prvem primeru, če bi bilo povezje neskončno toga. Tudi nihajni čas prve nihajne oblike drugega primera je daljši kot

nihajni čas druge nihajne oblike prvega primera. za izpolnitev zahtev standarda SIST EN 1998-1, 2005 (glej prejšnje poglavje), so zadostovale prve tri nihajne oblike.



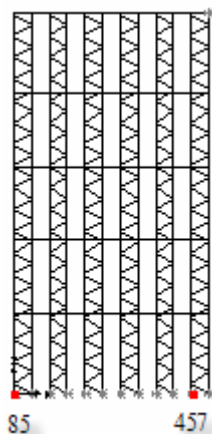
Slika 5.4: Prva in druga nihajna oblika

Preglednica 5.11: Nihajni časi in pripadajoče efektivne modalne mase

Nihajna oblika	Nihajni čas [s]	Efektivna modalna masa-odstotek skupne mase	Vsota efektivnih modalnih mas-odstotek skupne mase
1	0,49	0,78	0,78
2	0,18	0,01	0,79
3	0,10	0,11	0,90

2. Reakcije

Maksimalen pritisk je v podpori 85 in znaša 160,75 kN, maksimalen izvlek je v podpori 457 in znaša -49,08 kN. Obe vrednosti sta večji ko v prvem primeru.



Slika 5.5: Podpore v katerih smo zabeležili maksimalne reakcije

3. Horizontalni pomiki

Zabeležili smo maksimalni pomik na vrhu in v sredini v istih točkah kot v prvem primeru. Horizontalni pomik v točki 86 je enak 0, saj je točka preko toge povezave povezana s podporo, projektni horizontalni pomik v točki 615 je enak 112 mm in je večji kot v primeru, ko se stranice opirajo na povezje.

4. Kontrola elementov stranic

Za vse kontrole velja enako kot v točki 5.2.1.1, rezultati so zbrani v preglednici 5.12.

Preglednica 5.12: Izkoriščenost elementov regalnih stranic

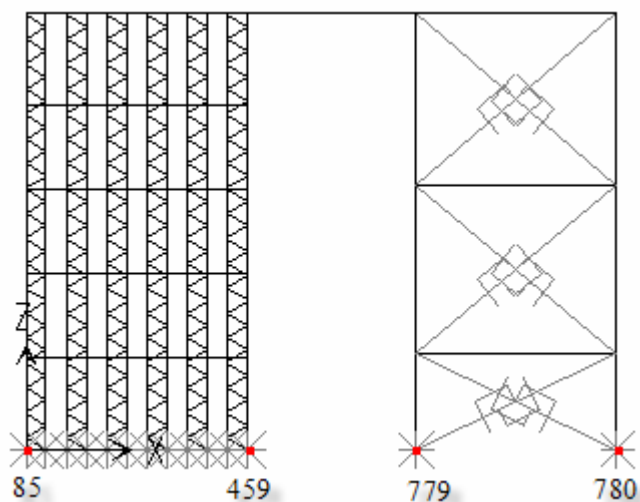
Element	Prerez	Nmin [kN]	Mprip [kNm]	Kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	Omega 100/120	-161	-1,4	0,81	0,81
Diagonala	U 50/40/3	-25	0	0,29	0,63
Diagonala	U 50/40/2	-21,2	0	0,37	0,78
Povezava stranic	2L 50/50/3,1	-1,5	-0,5	0,57	0,74

5.2.2 Nelinearna dinamična analiza, konstanten prerez diagonal

Preverili smo horizontalne pomike, reakcije in notranje sile v elementih povezja in stranic. Preverili smo tudi raztezke diagonal. Vse količine so povprečne vrednosti sedmih različnih akceleroگرامov.

1. Reakcije

Zabeležili smo maksimalen pritisk in izvlek. Maksimalen pritisk v podporah povezja se pojavi v podpori 780 in znaša 1494 kN, maksimalen izvlek se pojavi v podpori 779 in znaša -951 kN. V delu stranic je maksimalen pritisk v podpori 85 268 kN, maksimalen izvlek v pa podpori 459 in znaša -154 kN.



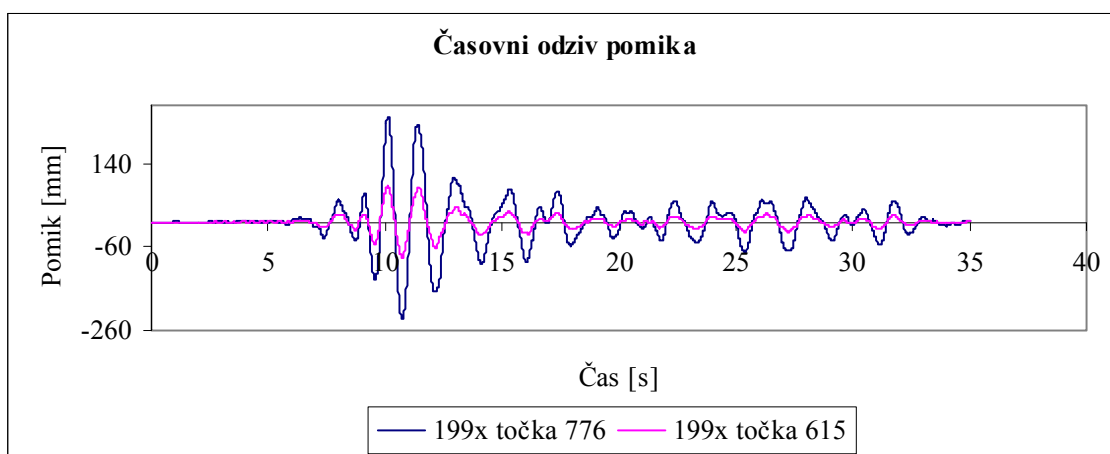
Slika 5.6: Podpore v katerih so reakcije maksimalne

2. Horizontalni pomiki

Izpisali smo maksimalne pomike v istih točkah, kot pri modalni analizi, ter etažne pomike v povezju. Ker je v programu SAP2000, v primeru upoštevanja TDR prišlo do težav s konvergenco pri direktni integraciji diferencialnih enačb, smo to opustili in vpliv teorije drugega reda določili približno z metodo Horne. Ugotovili smo, da je vpliv teorije drugega reda majhen in ga ni potrebno upoštevati, saj je vertikalna obtežba nad povezjem majhna. Velikosti pomikov v posameznih točkah predstavljamo v preglednici 5.13.

Preglednica 5.13: Pomiki vozlišč pri dinamični analizi, glej sliko 5.3.

Vozlišče	Pomik u_1 [mm]
86	205
615	76
775	205
776	201
781	42
783	150



Grafikon 5.2: Primerjava časovnega odziva dveh točk za akcelorogram 199x (tabela 3.2), vrednosti so višje od povprečnih.

Iz Grafikona 5.2 se vidi, da so za obremenitev konstrukcije pomembni 3 maksimalni sunki. Izkaže se tudi, da s tem ko smo umetno skrajšali čas potresa nismo vplivali na maksimalne količine.

Preglednica 5.14: Etažni pomiki, pogoj (6) je povsod izpolnjen

Etaža	$d_r = \Delta u_1$ [mm]	h [mm]	% višine	$d_r \cdot v$ [mm]	$0,01 \cdot h$ [mm]
1	44	5690	0,8	22	57
2	130	10020	1,3	65	100
3	72	10323	0,7	36	103

Etažni pomiki so maksimalni v drugi etaži, kar se ne ujema z modalno analizo, kjer so maksimalni v tretji etaži. Večje etažne pomike v drugi etaži v primerjavi s tretjo, si lahko razlagamo s tem, da je vertikalna obremenitev druge etaže večja od vertikalne obremenitve tretje etaže in z vplivom druge nihajne oblike (slika 5.1). V prvi etaži so

najmanjši, ker je etaža najnižja. Pri kontroli etažnih pomikov (pogoj 6) v mejnem stanju uporabnosti smo naredili poenostavitev. Pomike dobljene iz analize mejnega stanja nosilnosti, smo pomnožili s koeficientom $v = 0,5$ (preglednica 5.14). Če bi hoteli določiti servisne pomike bolj natančno, bi morali s tem faktorjem zmanjšati akceleroگرامe in ponovno pognati analize, čemur smo se s tem izognili.

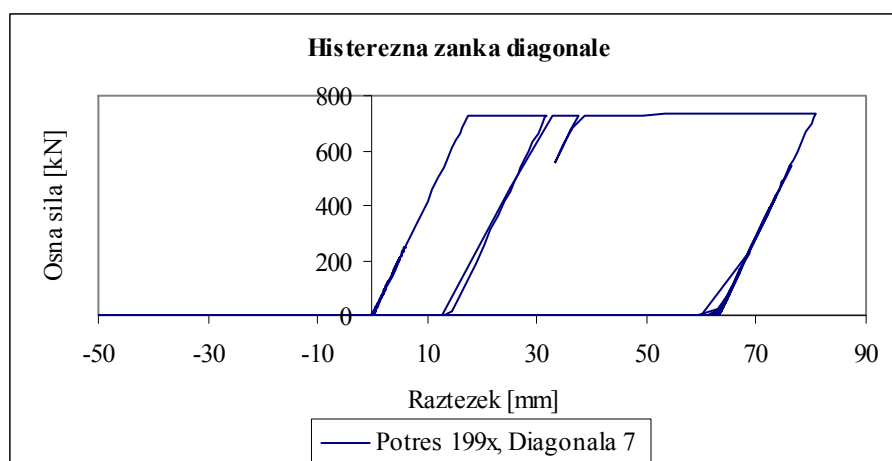
3. Raztezki diagonal povezja

Poleg dejanskih pomikov konstrukcije lahko pri dinamični analizi opazujemo tudi dejanske raztezke diagonal, ki smo jih modelirali na način opisan v poglavju 4.1. Vse diagonale v vseh treh etažah se plastificirajo. Elastična osna deformacija palice iz jekla S235 znaša 1,119 ‰, kar za diagonalo 7 pomeni 17,5 mm.

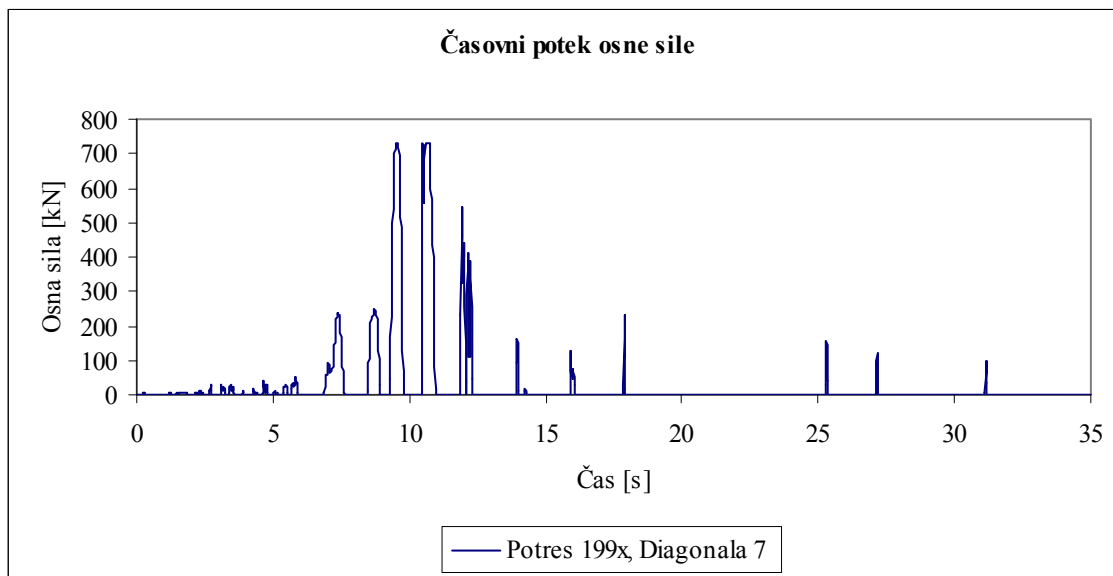
Preglednica 5.15: Maksimalen raztezek diagonale v posamezni etaži

Element	Etaža	Dolžina [mm]	Raztezek [mm]	Deformacija ‰
9	1	13281	29	2,2
7	2	15633	83	5,3
5	3	15829	33	2,1

Maksimalen raztezek diagonale je v drugi etaži, kjer je tudi maksimalen etažni pomik. Histerezno zanko maksimalno deformirane diagonale prikazuje Grafikon 5.3.



Grafikon 5.3: Iz histerezne zanke se lepo vidi, da je do plastifikacije prišlo pri dveh sunkih



Grafikon 5.4: Osna sila v diagonali 7, vidi se kdaj je prišlo do plastifikacije. Vidna je samo natezna osna sila, saj je tlačna enaka 0 (slika 4.1).

4. Kontrola stebrov in prečk povezja

Preverili smo izkoriščenost maksimalno obremenjenega stebra in maksimalno izkoriščenih prečk povezja, po izrazih (12) in (13). V stebrih in prečkah ne bi smelo priti do plastifikacije. Izkoriščenost posameznih elementov povezja je podana v preglednici 5.16.

Preglednica 5.16: Izkoriščenost elementov povezja

Element	Prerez	N_{min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 200	-1494	-12	1,55	1,58
Prečka	HEA 200	-488	7,5	0,47	0,51
Prečka	RQ 140/6,3	-591	4,7	0,9	0,93

Ugotovitev je enaka, kot v primeru modalne analize. Prevelike osne sile v stebrih so posledica ravninskega modeliranja povezja s samo dvema stebroma.

5. Kontrola elementov stranic

Kritični so stebri v spodnji etaži, krajne stranice so bolj obremenjene kot srednje, predvsem stranica ob fasadi.

Preglednica 5.17: Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov stranic pri dinamični analizi

Element	Prerez	N_{min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	Omega 100/120	-266	-1,7	1,24	1,24
Diagonala	U 50/40/3	-30	0	0,35	0,77
Diagonala	U 50/40/2	-26	0	0,45	0,95
Povezava stranic	2L 50/50/3,1	-1,9	-0,8	0,9	1,18

5.2.3 Nelinearna dinamična analiza, reduciran prerez diagonal

Prerez diagonal je oslabljen na način, ki je opisan v poglavju 4.3.2. Izpisane so enake količine, kot pri konstantnem prerezu diagonal.

1. Reakcije

Maksimalne reakcije se pojavijo v istih podporah, kot pri modelu s konstantnim prerezom diagonal (slika 5.6) in so manjše, kot pri dinamični analizi z neoslabljenimi prerezi.

Preglednica 5.18: Vertikalne reakcije

Podpora	Fz
85	271
459	-158
779	-736
780	1283

2. Horizontalni pomiki

Preverili smo pomike v istih točkah, kot pri prejšnjem primeru in modalni analizi (slika 5.3).

Preglednica 5.19: Etažni pomiki, reduciran prerez diagonal

Etaža	$d_r = \Delta u_1$ [mm]	h [mm]	% višine	$d_r * v$ [mm]	$0,01 * h$ [mm]
1	50	5690	0,9	25	57
2	152	10020	1,5	76	100
3	61	10323	0,6	30,5	103

Preglednica 5.20: Maksimalni pomiki vozlišč, reduciran prerez diagonal

Vozlišče	Pomik u_1 [mm]
86	211
615	73
775	211
776	208
781	49
783	162

3. Raztezki diagonal

Deformacije diagonal smo izračunali glede na dolžino oslabiljenega dela diagonale. Ker je dolžina oslabiljenega dela majhna, so specifične deformacije zelo velike, nekaj deset procentov. To seveda še ne pomeni, da pride do porušitve, saj smo zanemarili vpliv utrditve materiala, zaradi česar se plastifikacija diagonale pri velikih raztezkih ne izvrši samo na oslabiljenem delu prereza, ampak tudi na celotni dolžini, vendar šele potem, ko pride do utrditve materiala. Velike specifične deformacije oslabiljenega dela, kažejo tudi na slabo izbiro dolžine. Pri dolžini diagonale 14 m, bi moral biti oslabiljen del dolg približno 1 m.

Preglednica 5.21: Raztezki in deformacije diagonal

Element	Etaža	Dolžina oslabitve [mm]	Raztezek [mm]	Deformacija %
9	1	150	34	23
7	2	150	104	69
5	3	150	28	19

4. Kontrola stebrov in prečk povezja

Preglednica 5.22: Izkoriščenost elementov povezja

Element	Prerez	N_{\min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 200	-1336	-14	1,51	1,5
Prečka	HEA 200	-415	7,5	0,41	0,45
Prečka	RQ 140/6,3	-487	4,7	0,76	0,79

5. Kontrola elementov stranic

Preglednica 5.23: Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov stranic

Element	Prerez	N_{\min} [kN]	M_{prip} [kNm]	Kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	Omega 100/120	-266	-1,8	1,26	1,26
Diagonala	U 50/40/3	-28	0	0,34	0,73
Diagonala	U 50/40/2	-25	0	0,42	0,9
Povezava stranic	2L 50/50/3,1	-1,8	-0,8	0,9	1,17

5.3 Rezultati analiz visokoregalnega skladišča VRS 3

Ker ima konstrukcija dva ločena sistema za prenos horizontalne obtežbe, smo rezultate izpisovali ločeno za smer prečno X in vzdolžno smer Y. Vzbujanje v vzdolžni smeri najbolj vpliva na elemente vzdolžnega povezja, na horizontalne diagonale, na prečke v strehi in na paletne nosilce. Vzbujanje v prečni smeri pa ima največji vpliv na stebre stranic. Količine ki smo jih izpisovali smo preverili za vsak regal in vsako etažo posebej in jih nato med seboj primerjali, da smo dobili ekstremne vrednosti.

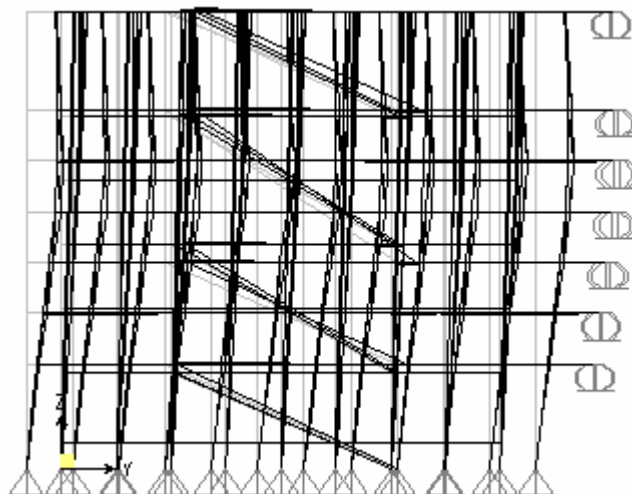
5.3.1 Modalna analiza

Obravnavali smo dva primera. V prvem primeru je bilo skladišče popolnoma obremenjeno s koristno obtežbo, v drugem primeru smo skladišče delno razbremenili v osrednjem delu (poglavje 4.4.3.1). Primerjali smo reakcije v srednjem delu regalov. Pri polno obremenjenem skladišču so nas zanimale enake količine, kot pri skladišču VRS 2,

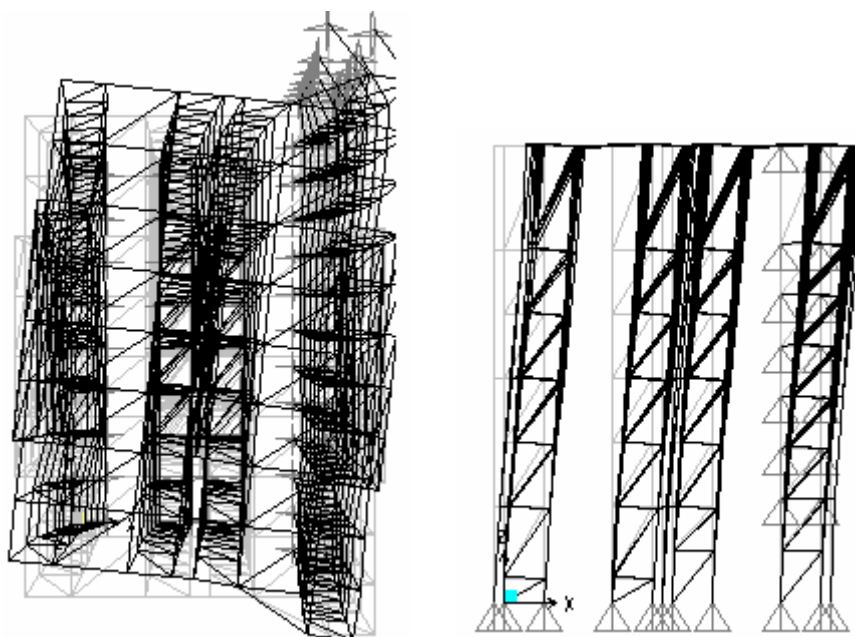
to so: nihajne oblike, vertikalne reakcije, pomiki, obremenitve disipativnih elementov in obremenitve nedisipativnih elementov. Rezultati potresne obremenitve v vzdolžni smeri so pomnoženi s faktorjem $R_f = 0,8$.

1. Nihajne oblike in nihajni časi

Prva nihajna oblika konstrukcije je v vzdolžni smeri. To je posledica mase, ki je razporejena na podporah, kjer se konstrukcija priključuje na drugo polovico. Ta masa niha le v vzdolžni smeri. Druga nihajna oblika je torzijska in tretja je v prečni smeri. Upoštevali smo prvih 40 nihajnih oblik. S tem smo dosegli 87 % efektivne modalne mase v prečni smeri, 91 % efektivne modalne mase v vzdolžni smeri in 91 % efektivne modalne mase pri torzijskem sukanju. Nihajni čas prve nihajne oblike je 1,01 s, druge nihajne oblike 0,77 s in tretje 0,76 s. Pri konstrukciji ni izrazito prevladujoče nihajne oblike. Tudi višje nihajne oblike pomembno prispevajo k obremenitvi konstrukcije. Tako na primer 34 nihajna oblika prispeva 11 % k efektivni modalni masi v prečni smeri, 29 nihajna oblika pa več kot 5 % k skupni efektivni modalni masi v vzdolžni smeri. Če bi hoteli za smer X doseči 90 % efektivne modalne mase, bi morali upoštevati 99 nihajnih oblik, vendar pa od 34 nihajne oblike naprej nobena ne prispeva več kot 5 %, zato smo se omejili na 40.



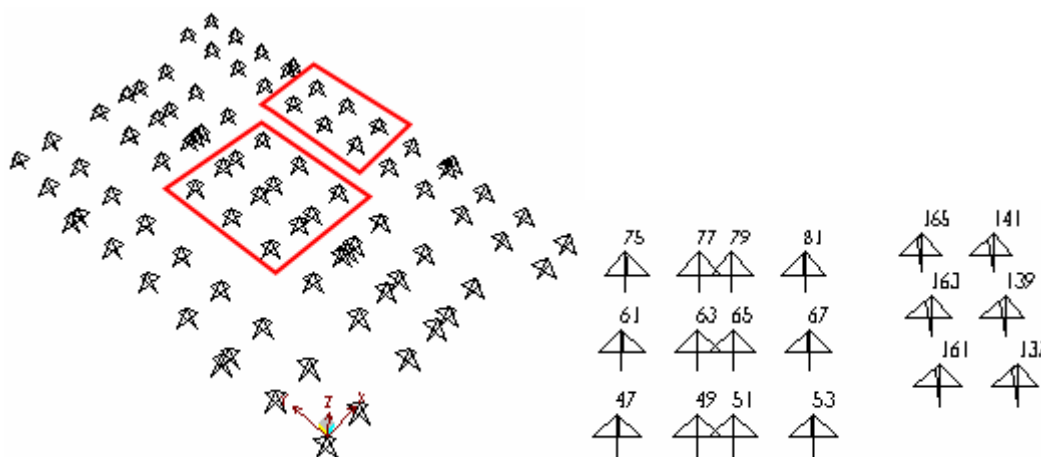
Slika 5.7: Prva nihajna oblika.



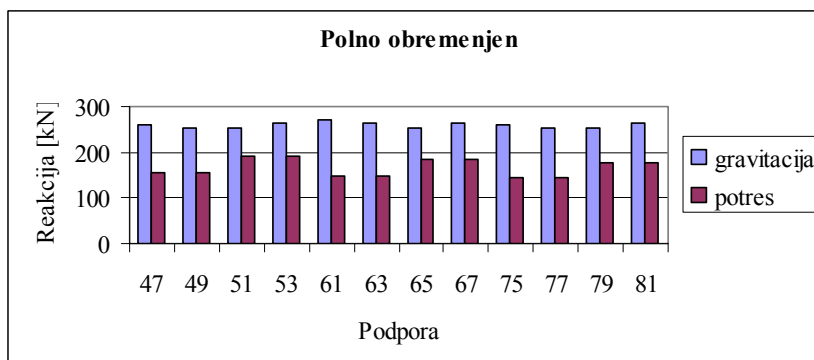
Slika 5.8: Druga in tretja nihajna oblika.

2. Reakcije

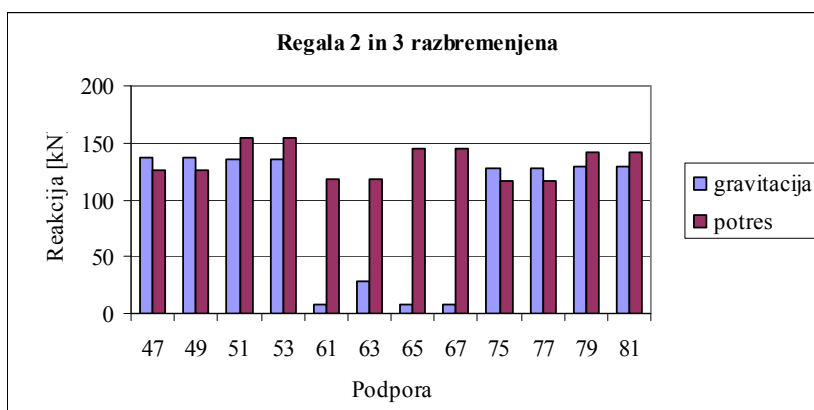
Ločeno smo izpisali reakcije zaradi gravitacijske obtežbe in zaradi potresne obtežbe v prečni smeri ter jih primerjali med seboj. Pri polno obremenjenem skladišču ne pride do izvlekov v podporah, saj so tlačne sile zaradi gravitacijske obtežbe večje kot natezne zaradi potresa. Izvleki pa se pojavijo pri razbremenjenem skladišču, saj so tlačne sile zaradi gravitacijskih obtežb majhne, natezne potresne sile pa velike.



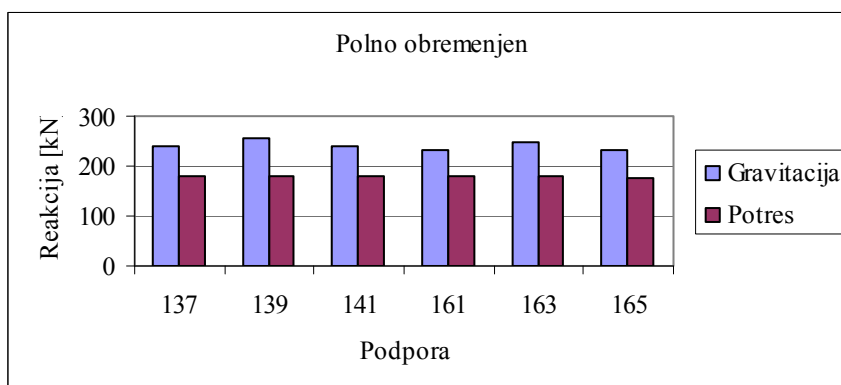
Slika 5.9: Podpore, v katerih smo opazovali reakcije



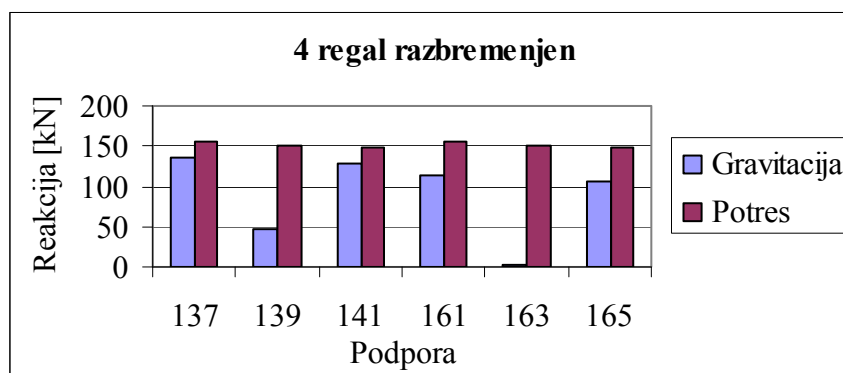
Grafikon 5.5: Reakcije polno obremenjenega skladišča, potresna obremenitev v smeri X. Reakcije zaradi gravitacije so tlačne, reakcije zaradi potresa natezne, vendar so narisane na isti strani zaradi boljše predstave.



Grafikon 5.6: Reakcije delno razbremenjenega skladišča nad regali 2 in 3, potresna obremenitev v smeri X



Grafikon 5.7: Reakcije polno obremenjenega skladišča, potresna obremenitev v smeri X



Grafikon 5.8: Reakcije delno razbremenjenega skladišča v regalu 4, potresna obremenitev v smeri X

Poleg zgornje primerjave smo si ogledali tudi maksimalni izvlek in pritisk tako v vzdolžni kot v prečni smeri. Maksimalni pritisk in izvlek v vzdolžni smeri se pojavita v podpori 175. Pritisk znaša 683 kN, maksimalni izvlek pa -651 kN. V prečni smeri znaša maksimalen vertikalni pritisk na podporo 573 kN, maksimalen nateg pa -111 kN. Izpisane vrednosti veljajo za obtežno kombinacijo (5).

3. Horizontalni pomiki

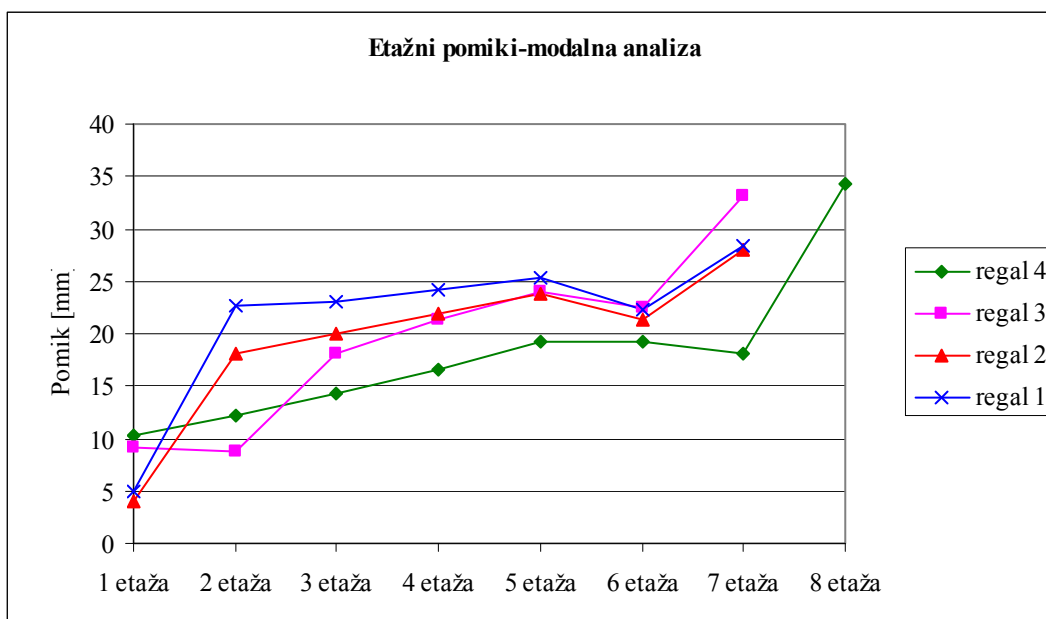
Preverili smo maksimalen pomik na vrhu in na sredini v regalih. Ugotovili smo, da je v prečni smeri potrebno upoštevati teorijo drugega reda. Maksimalna vrednost koeficienta $\Theta = 0,13$, kar je več od 0,1. Notranje sile, pomike in deformacije zaradi potresnega vpliva v smeri X zato pomnožimo s koeficientom $k_{\delta, \max}$, ki znaša 1,15. Koeficient k_{δ} izračunamo po enačbi 14.

$$k_{\delta} = \frac{1}{1 - \Theta} \quad (14)$$

Preglednica 5.24: Maksimalni pomik na vrhu in pomiki regalov

Pozicija	Smer	Vozlišče	$u_1 * q * k_{\delta}$ [mm]	$0,8 * u_2 * q$ [mm]
Streha	X	128	138	
	Y	128		100
Regal 1	X	381	52	
	Y	381		38
Regal 2	X	413	48	
	Y	413		52
Regal 3	X	423	49	
	Y	423		49
Regal 4	X	595	41	
	Y	595		90

Etažne pomike v prečni smeri smo preverjali v regalnih stranicah, etažne pomike v vzdolžni smeri pa v povezju.



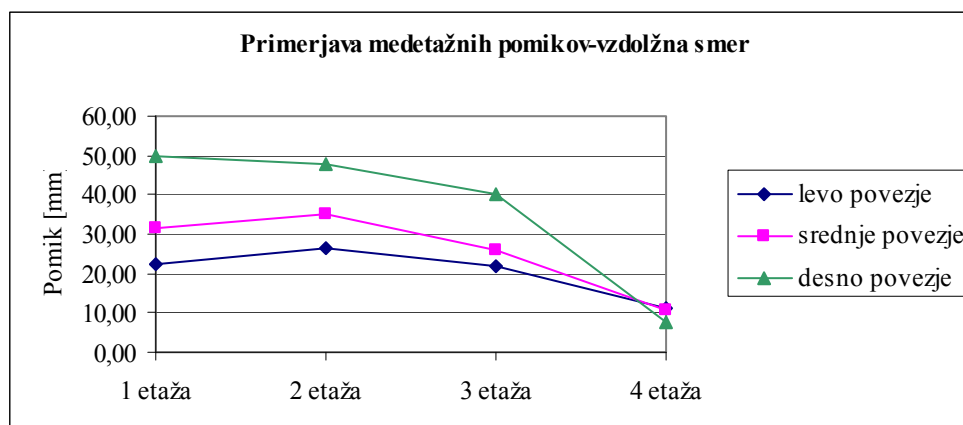
Grafikon 5.9: Maksimalni etažni pomiki v posameznih regalih v prečni smeri

Ker so višine etaž v regalih različne, so različni tudi etažni pomiki. Po absolutni vrednosti so največji v zadnjih etažah (preglednica 5.25), ki so najvišje, najnižji pa v spodnjih etažah v 1 in 2 regalu, kjer sta etaži najnižji in enako visoki. Relativno glede

na višino etaže pa so v vseh regalih maksimalni v 5 etaži. To je zato, ker se v peti etaži spremeni prerez diagonal iz L60/6 na L50/5. Pogoj (5) je izpolnjen v vseh etažah.

Preglednica 5.25: Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri

Regal	$d_r = \Delta u_{1,max} * q * k_{\delta,max}$ [mm]	h [mm]	% višine	dr*v	0,01*h [mm]
1	28,5	3330	0,85	14,3	33,3
2	28	3330	0,84	14	33,3
3	33	3330	1,00	16,6	33,3
4	34	3150	1,1	17,2	31,5



Grafikon 5.10: Primerjava maksimalnih etažnih pomikov med povezji

Preglednica 5.26: Maksimalne vrednosti etažnih pomikov v posameznih povezjih

Povezje	$d_r = \Delta u_{2,max} * q$	h [mm]	% višine	dr*v	0,01*h [mm]
levo	27	4100	0,7	13,5	41
srednje	35	4100	0,9	17,5	41
desno	50	3350	1,5	25	33,5

Maksimalni relativni pomik glede na višino etaže se pojavi v prvi etaži, maksimalne absolutne vrednosti pa v levem in srednjem povezju v drugi etaži, v desnem pa v prvi etaži. Pogoj (5) omejitve etažnih pomikov po standardu SIST EN 1998-1, 2005, je izpolnjen v vseh etažah.

4. Kontrole diagonal

Izvedemo enake kontrole kot v poglavju 5.2.1 za VRS 2. Kontrole izvedemo ločeno v prečni in vzdolžni smeri.

a) Prečna smer:

- Zahteva enakosti prečnih prerezov (pogoj (8)):

Zahteva je izpolnjena, saj imata obe diagonali v posamezni etaži enak prerez in enak naklon.

- Omejitev vitkosti (pogoj (9)):

Preverili smo vitkost diagonal L 60/6 in L 50/5. Pogoj ni povsod izpolnjen, ker diagonale niso povezane med seboj, vendar če bi jih povezali, bi bile pretoge. Povezane so samo v zgornji etaži.

Preglednica 5.27: Vitkost diagonal

Prerez	Etaža	regal	l_u [m]	$\bar{\lambda}$
L60/6	1	1, 2	1,54	1,4
	2	1, 2	2,6	2,37
	2	3	1,9	1,73
	3, 4	1, 2, 3	2,42	2,2
L50/5	5, 6	1, 2, 3	2,42	2,63
	5,6,7	4	2,08	2,26
	7	1, 2, 3	1,79	1,95
	8	4	1,7	1,85

- Nosilnost bruto prereza diagonale mora biti večja od obremenitve: $N_{pl,Rd} \geq N_{Ed}$

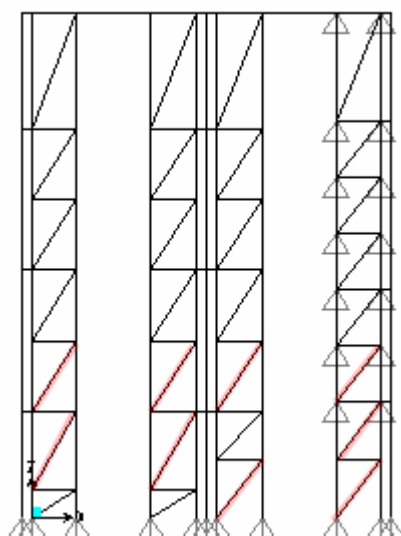
Upoštevamo natezno nosilnost oslabitve. Preverimo samo najbolj obremenjene diagonale za vsak posamezen prerez.

Preglednica 5.28: Obremenitve prečnih diagonal

Prerez	$N_{pl,Rd}$ [kN]	$N_{Ed} * k_{\delta}$ [kN]
L 60/6	94	80
L 50/5	71	46

- Faktor dodatne nosilnosti, Ω_i

Preverili smo le maksimalno obremenjene diagonale v posamezni etaži v vseh 4 regalih. Maksimalna vrednost faktorja dodatne nosilnosti se pojavi v vrhnji etaži, kjer diagonale niso oslabiljene. Minimalen Ω_i v celotnem skladišču, ki ga uporabimo pri metodi varovalke, je 1,18. Pogoj $\Omega_i/\Omega_{\min} \leq 1,25$ je izpolnjen samo v naslednjih etažah, slika 5.10. V teh etažah je obremenitev diagonal največja, zato lahko tu pričakujemo, da bi pri nelinearni dinamični analizi prišlo do plastifikacije diagonal.



Slika 5.10: Izpolnjenost pogoja $\Omega_i/\Omega_{\min} \leq 1,25$

Preglednica 5.29: Faktorji, ki jih uporabimo pri kontroli prečk in stebrov stranic

Faktor	Vrednost
γ_{ov}	1,04
Ω	1,18
k_{δ}	1,15

b) Vzdolžna smer

- Prečni prerezi obeh diagonal v vseh etažah so enaki, zato je pogoj (8) izpolnjen.
- Omejitev vitkosti

Kontrolirali smo samo najdaljšo in najkrajšo diagonalo za posamezen prerez. Vse vitkosti so v mejah.

Preglednica 5.30: Brezdimenzionalna uklonska vitkost diagonal povezja

Prerez	lu [m]	$\bar{\lambda}$
2xUNP 120	3,82	1,55
	4,43	1,79
2xUNP 100	4,06	1,71
	3,88	1,64
2xUNP 140	3,82	1,43
	4,06	1,52

- Nosilnost diagonal

Upoštevali smo nosilnost reduciranega dela

Preglednica 5.31: Nosilnost najbolj obremenjenih prerezov

Prerez	Povezje	Npl,Rd	NEd
2xUNP 100	levo	259	122
2xUNP 120	levo	259	238
2xUNP 120	srednje	282	163
2xUNP 140	srednje	470	386
2xUNP 140	desno	582	552

- Faktor dodatne nosilnosti Ω_i

Minimalen faktor dodatne nosilnosti ima diagonala v desnem povezju v spodnji etaži. Maksimalni so faktorji v zgornjih etažah, ker so tam diagonale najmanj obremenjene. Pogoj $\Omega_i/\Omega_{\min} \leq 1,25$, je izpolnjen v levem in desnem povezju v prvih dveh etažah, v srednjem samo v prvi etaži.

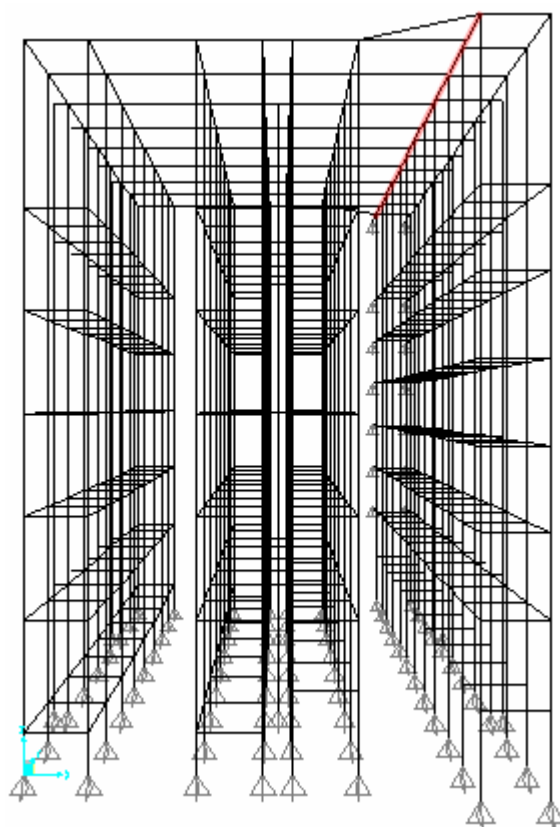
Preglednica 5.32: Faktorji, ki jih uporabimo pri kontroli prečk in stebrov vzdolžnega povezja, ter pri kontroli horizontalnega povezja in paletnih nosilcev

Faktor	Vrednost
γ_{ov}	1,15
Ω	1,05
k_{δ}	1,0

5. Kontrola stebrov stranic in prečk RQ60/4

Preglednica 5.33: Izkoriščenost najbolj obremenjenih elementov posameznih prerezov

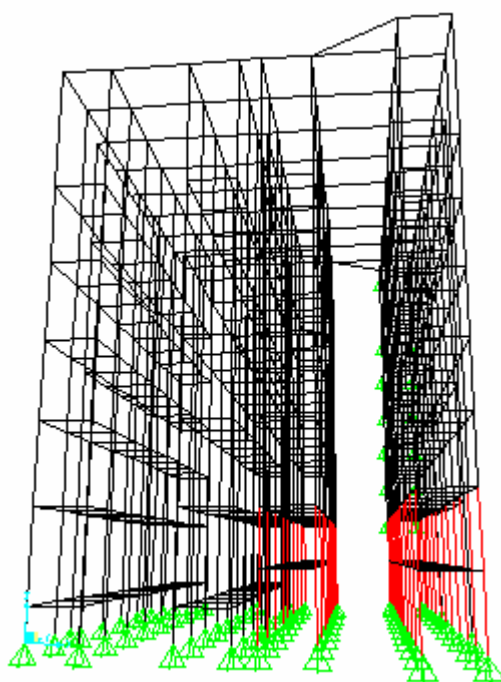
Element	Prerez	N_{min} [kN]	$M_{y,prp}$ [kNm]	$M_{z,prp}$ [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 160	-498	-0,13	-0,65	0,58	0,64
Steber	I+2P	-586	-0,52	-2,3	0,44	0,5
Prečka-stranice	RQ 60/4	-73	0	0	0,35	0,44



Slika 5.11: Nedisipativni elementi regalnih stranic

Za stebre stranic je merodajen potresni učinek v smeri X pomnožen s faktorji iz preglednice 5.29. Za prečke RQ 60/4 pa je merodajen potresni učinek v smeri Y pomnožen z 0,8 in faktorji iz preglednice 5.29.

V prečkah na sliki 5.11 označenih rdeče se pojavijo prečne sile in momenti, zaradi ekscentričnega priključevanja prečk strešnega povezja in prečk četrtega regala. $V_{pl,Rd}$ znaša 60 kN, maksimalna prečna sila 23 kN, kar je manj kot polovica $V_{pl,Rd}$. Maksimalna prečna sila in moment v teh prečkah se pojavita pri delovanju potresa v smeri Y. Uporabimo faktorje iz preglednice 5.32 in dobimo: $N_{Ed} = -38$ kN, $M_{y,Ed} = -4,5$ kNm, kar pomeni $\sigma_{max} = 33$ kN/cm² in $N_{Ed}/N_u + M_y/M_{pl,Rd} = 1,22$. Torej je prerez prešibek in ga bi bilo potrebno povečati. Škatlasti stebri I+2P so bolj obremenjeni od stebrov HEA. Nahajajo se v prvi in drugi etaži regalov 3 in 4 (slika 5.12).

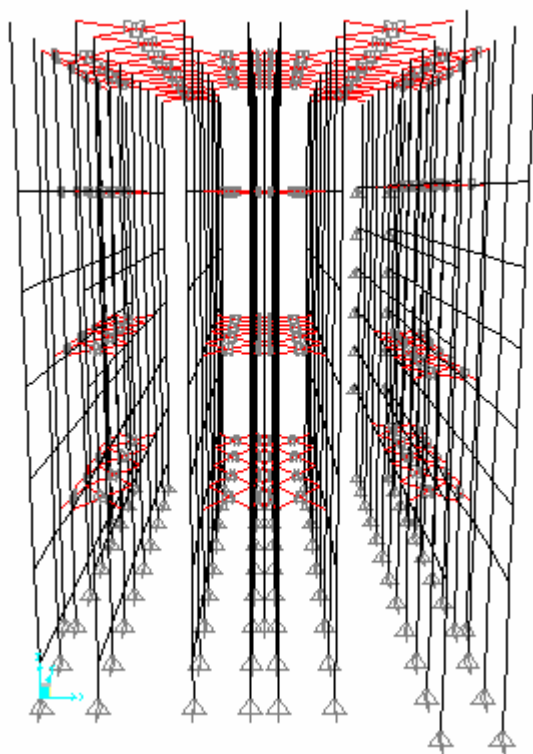


Slika 5.12: Škatlasti stebri v prvi in drugi etaži regalov 3 in 4 so označeni rdeče.

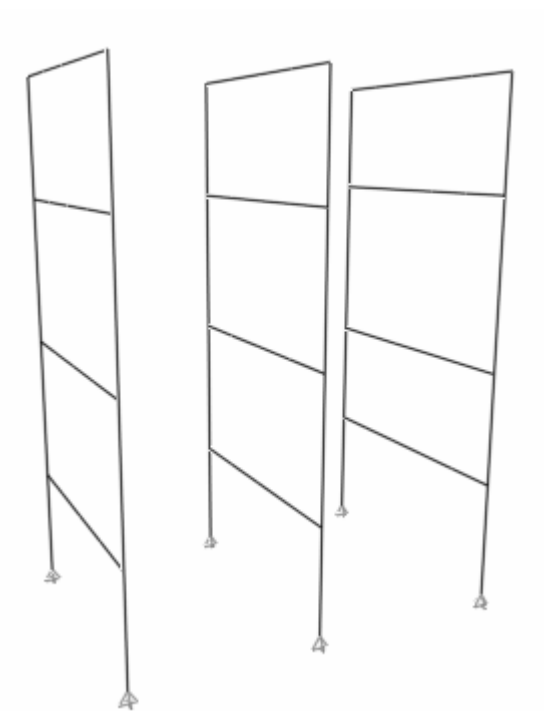
6. Kontrola nedisipativnih elementov povezja, horizontalnega zavetrovanja, paletnih nosilcev.

Preglednica 5.34: Izkoriščenost elementov vzdolžnega povezja in nosilcev. Uporabili smo faktorje iz preglednice 5.31.

Element	Prerez	N_{min} [kN]	$M_{y,prp}$ [kNm]	$M_{z,prp}$ [kNm]	Elastična kontrola napetost	Kontrola stabilnosti
Steber	HEB 160	-682	-4,1	-0,6	0,61	0,67
Prečka	RQ 140/8	-665	1,02	-1,5	0,73	0,74
Paletni nosilec	HEA 100	-110	6,92	0	0,62	0,62
Paletni nosilec	HEA 120	-50	11,2	0	0,53	0,51
Paletni nosilec	HEB 120	-4	14	0	0,42	0,37
Diagonala	R24	100	0	0	0,94	0



Slika 5.13: Diagonale horizontalnih povezij in paletni nosilci, pogled od spredaj.



Slika 5.14: Stebri in prečke vzdolžnega povezja

5.3.2 Nelinearna dinamična analiza, konstanten prerez diagonal

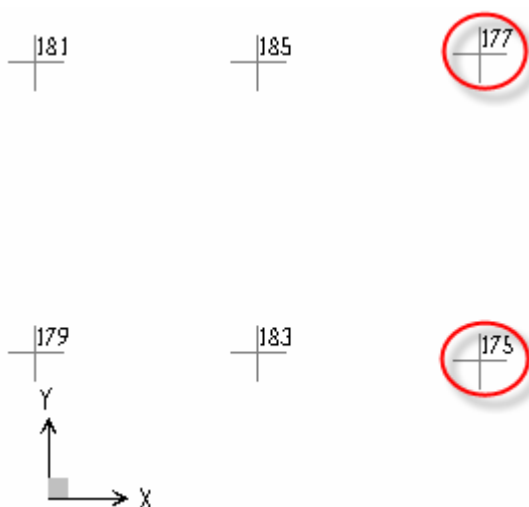
1. Reakcije

Izpisali smo maksimalen pritisk in izvlek. Ločeno smo preverili reakcije pod stebri stranic, kjer je merodajna prečna smer vzbujanja in pod stebri vzdolžnega povezja, kjer največje reakcije povzroča vzdolžna smer vzbujanja.

Preglednica 5.35: Maksimalni izvleki in pritiski, prečna smer

Regal	$F_{3,max}$ [kN]	$F_{3,min}$ [kNm]
1	802	-282
2, 3	885	-367
4	906	-398

V vzdolžni smeri smo zabeležili maksimalen pritisk 1162 kN v vozlišču 175, maksimalen izvlek pa -1121 kN v vozlišču 177. Obe ekstremni vrednosti sta v desnem povezju (slika 5.15).



Slika 5.15: Lokacije ekstremnih vrednosti reakcij, vzdolžna smer

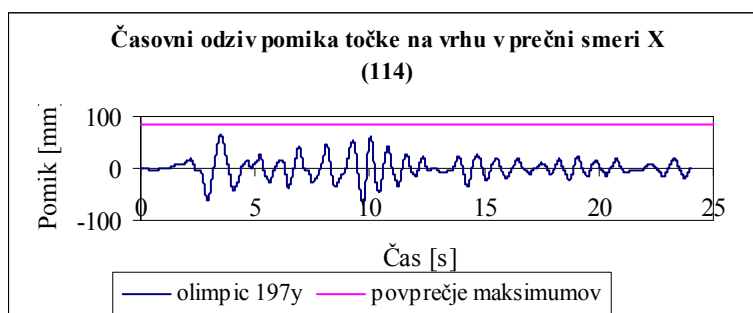
2. Horizontalni pomiki

Enako kot pri modalni analizi smo preverili maksimalne pomike na vrhu in v sredini regalov v obeh glavnih smereh. Na vrhu smo izpisali maksimalne pomike in pomike v točki 128, zaradi lažje primerjave z modalno analizo.

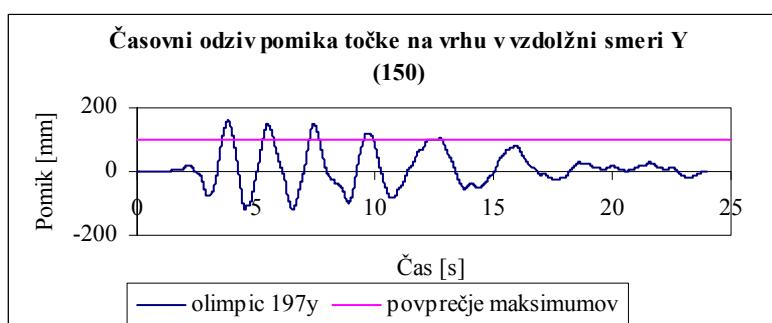
Preglednica 5.36: Absolutni horizontalni pomiki, maksimalni pomik v točkah 114 in 150

Pozicija	Smer	Vozlišče	u_1 [mm]	u_2 [mm]
Streha	X	114	85	
	Y	150		98
	X	128	81	
	Y	128		96
Regal 1	X	381	44	
	Y	381		42
Regal 2	X	413	41	
	Y	413		71
Regal 3	X	423	40	
	Y	423		69
Regal 4	X	595	34	
	Y	595		115

Za boljšo predstavbo obnašanja konstrukcije med potresom, so v nadaljevanju podani tudi grafikoni časovnega poteka pomika izbranih točk, za določen potres.

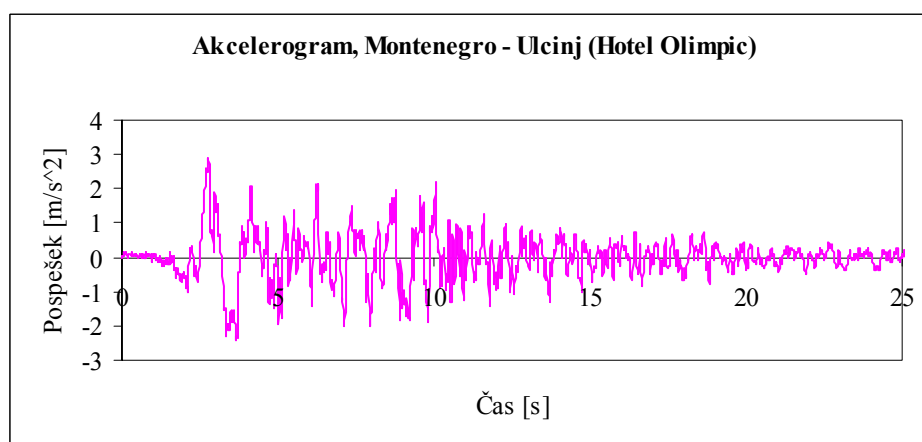


Grafikon 5.11: Časovni odziv pomika točke 114, pri vzburjanju v prečni smeri.



Grafikon 5.12: Časovni odziv pomika točke 150, pri vzburjanju v vzdolžni smeri.

Iz grafikonov 5.11 in 5.12 se opazi razlika med nihanjem v smeri X in Y zaradi različnega nihajnega časa konstrukcije v prečni in vzdolžni smeri. Če pogledamo akceleroگرام na grafikonu 5.13, vidimo da konstrukcija v prečni smeri precej bolj sledi vzburjanju, kot v vzdolžni smeri.

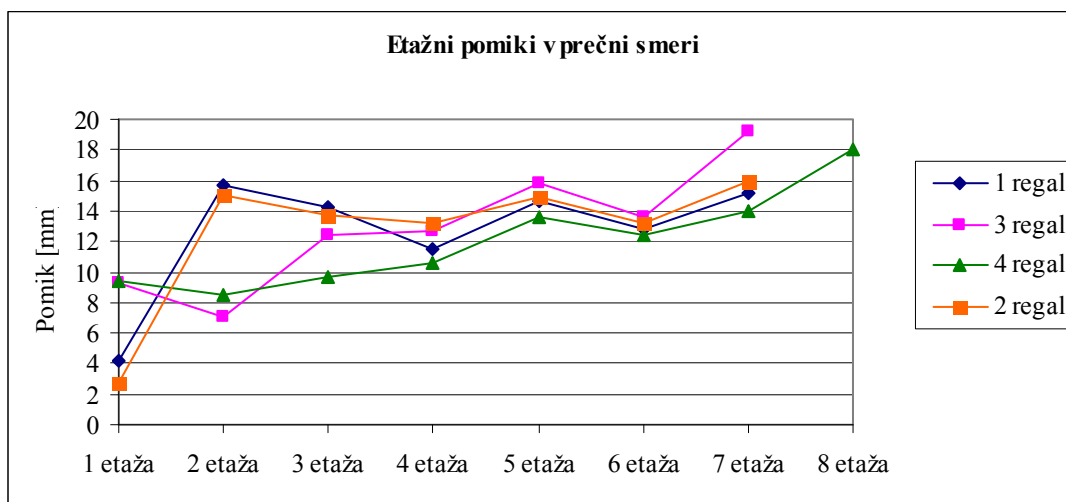


Grafikon 5.13: Normiran akceleroagram 197y

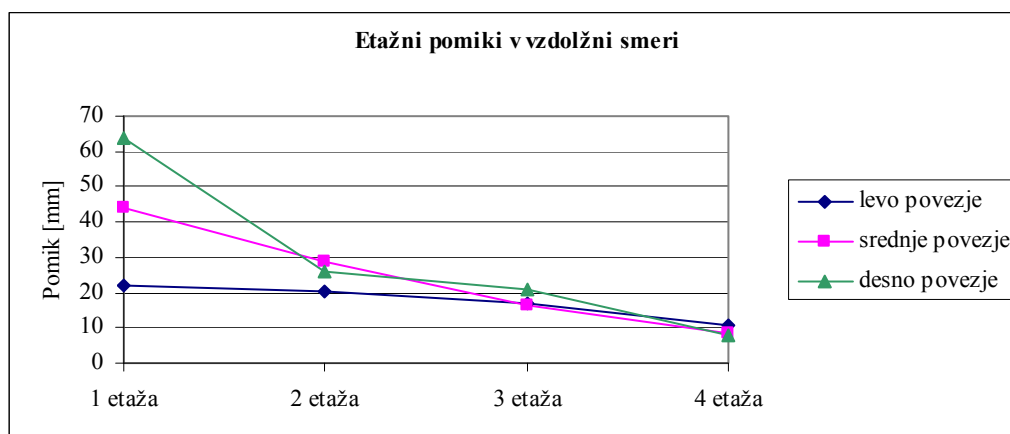
Etažne pomike izpišemo ločeno v prečni smeri (preglednica 5.37 in grafikon 5.14) in vzdolžni smeri (preglednica 5.38 in grafikon 5.15). V prečni smeri kontroliramo etažne pomike v stranicah, v vzdolžni smeri pa v vzdolžnem povezju. Absolutne vrednosti etažnih pomikov so pričakovano največje v vrhnjih etažah, medtem, ko so najmanjši v najnižjih etažah. Relativno glede na višino etaže so etažni pomiki maksimalni v peti etaži. Pogoj (6) je v prečni smeri izpolnjen v vseh etažah, v vzdolžni smeri pa povsod razen v prvi etaži desnega regala, kjer je pomik 1,9 % višine etaže (preglednica 5.38 in slika 5.16).

Preglednica 5.37: Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri

Regal	$d_r = \Delta u_{1,max}$ [mm]	h [mm]	% višine	$d_r * v$	$0,01 * h$ [mm]
1	15	3330	0,46	7,5	33,3
2	16	3330	0,48	8	33,3
3	19	3330	0,58	9,5	33,3
4	18	3150	0,57	9	31,5



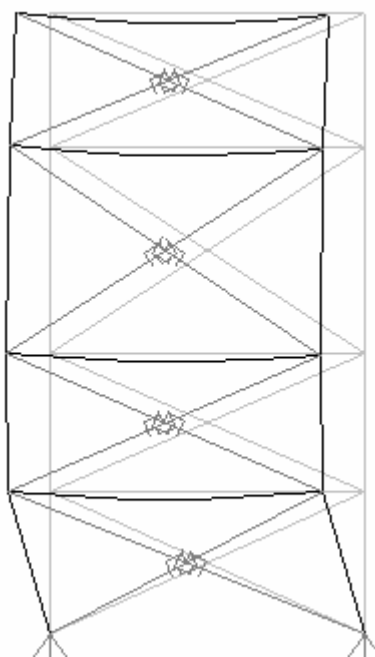
Grafikon 5.14: Primerjava etažnih pomikov v prečni smeri med regali, konstanten prerez diagonal. Maksimalna vrednost je 19 mm.



Grafikon 5.15: Primerjava etažnih pomikov v vzdolžni smeri med povezji, konstanten prerez diagonal. Maksimalna vrednost je 64 mm.

Preglednica 5.38: Maksimalni etažni pomik v prečni smeri v posameznem regalu

Povezje	$d_r = \Delta u_{2,max}$	h [mm]	% višine	$d_r \cdot v$	$0,01 \cdot h$ [mm]
levo	22	3070	0,7	11	30,7
srednje	44	3070	1,4	22	30,7
desno	64	3350	1,9	32	33,5



Slika 5.16: Deformacija desnega povezja, akceleroogram 197y, $t = 3,86$ s.

Kot vidimo iz preglednice 5.38 je pogoj omejitve etažnih pomikov (6) izpolnjen v vseh treh povezjih.

Če smo v programu sap2000 omogočili opcijo upoštevanja teorije drugega reda, je prišlo do težav s konvergenco pri direktni integraciji enačb gibanja. Posledično smo se odločili za približno določitev vpliva teorije drugega reda po metodi Horne. Ugotovili smo, da je vpliv v prečni smeri le 2 %, zato ga ni potrebno upoštevati. Vpliv TDR je majhen, ker je horizontalna potresna velika v primerjavi z vertikalno silo. V vzdolžni smeri vpliva TDR prav tako ni potrebno upoštevati.

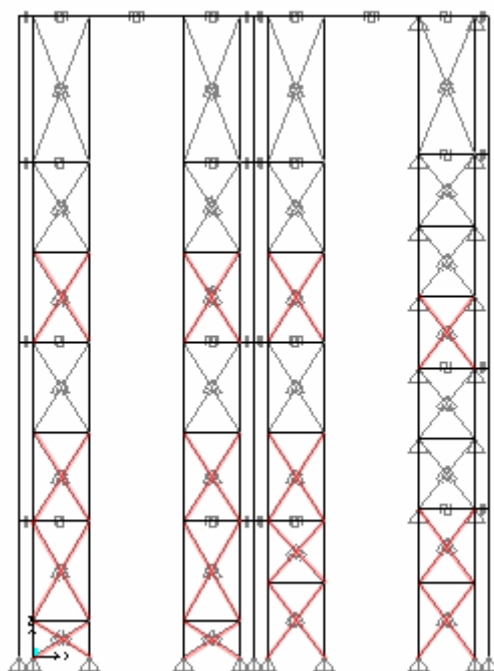
3. Raztezki diagonal

a) Prečna smer

Izpisali smo maksimalne raztezke diagonal za vse etaže in za vse različne dolžine diagonal po regalih (preglednica 5.38). Deformacije smo izračunali na celotni dolžini diagonale. V prvem in drugem regalu se v drugi etaži plastificirajo vse diagonale. V tretjem in četrtem regalu se v prvi etaži plastificirajo vse diagonale.

Preglednica 5.39: Maksimalni raztezki diagonal, konstanten prerez diagonal

Etaža	Regali	Raztezek [mm]	Dolžina [mm]	Deformacija %
1	1, 2	1,8	1537	1,171
	3	5	2124	2,330
	4	5	2120	2,325
2	1, 2	5	2599	1,905
	3	3,2	1903	1,702
	4	3,8	2120	1,787
3	1, 2, 3	3,8	2427	1,570
	4	2,2	2077	1,064
4	1, 2, 3	2,4	2427	0,972
	4	1,9	2077	0,891
5	1, 2, 3	3,2	2427	1,302
	4	3	2077	1,435
6	1, 2, 3	1,9	2427	0,766
	4	1,9	2077	0,910
7	1, 2, 3	1,3	3575	0,366
	4	1,3	2077	0,636
8	4	1,4	3408	0,420



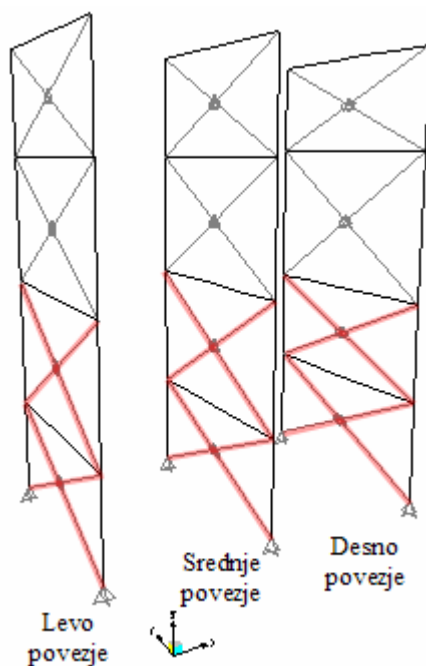
Slika 5.17: Z rdečo barvo so označene etaže, v katerih pride do plastifikacije vsaj ene diagonale.

b) Vzdolžna smer

Izpisali smo raztezke za maksimalno obremenjene diagonale v posameznih etažah. Kot lahko vidimo iz preglednice 5.39 se plastificirajo samo diagonale v prvih dveh etažah. Plastificirata se obe diagonali.

Preglednica 5.40: Raztezki diagonal v vzdolžnem povezju

Povezje	Etaža	Raztezek [mm]	Dolžina [mm]	Deformacija ‰
levo	1	14,6	7644	1,905
	2	9,5	8112	1,171
	3	6,7	8112	0,826
	4	3,6	7752	0,464
srednje	1	33,1	7644	4,330
	2	15,8	8112	1,948
	3	5,6	8112	0,690
	4	4,2	7752	0,542
desno	1	50,7	8123	6,242
	2	14,1	8078	1,745
	3	7,1	8853	0,802
	4	3,8	8043	0,472



Slika 5.18: Plastificirane diagonale

4. Kontrola stebrov, prečk in paletnih nosilcev

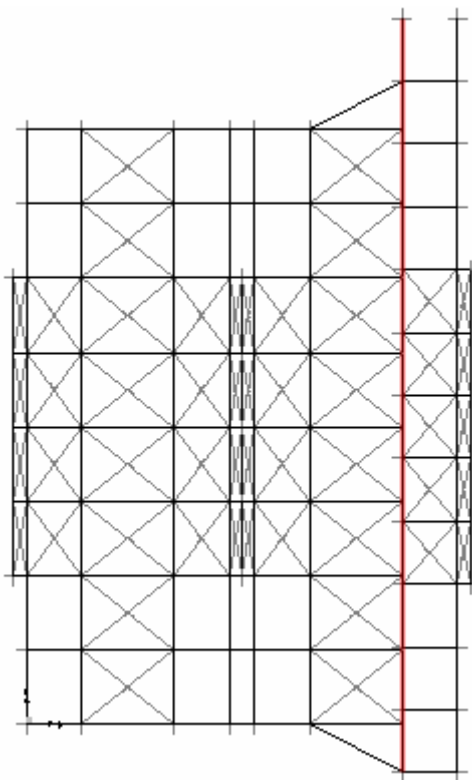
Med stebri povezja HEB 160 so najbolj obremenjeni stebri desnega povezja. Med stebri stranic HEA 160 so najbolj obremenjeni stebri v spodnji etaži 2 regala, med stebri škatlastega prereza I+2P pa stebri v spodnji etaži 4 regala. Smer vzbujanja ima maksimalni vpliv le na stebre stranic, na vse ostale elemente ima maksimalen vpliv smer vzbujanja Y.

Preglednica 5.41: Maksimalno obremenjeni prerezi

Element	Prerez	N_{min} [kN]	$M_{y,prp}$ [kNm]	$M_{z,prp}$ [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 160	-809	0	-6,25	1,23	1,23
	I+2P	-905	0	-1,76	0,66	0,78
	HEB 160	-1155	7,87	0	1,00	1,15
Prečka	RQ 140/8	-948	3,9	1,4	1,08	1,11
	RQ 60/4	-116,4	1,8	0	1,04	0,96
Paletni nosilec	HEA 100	-162	6,1	0	0,72	0,81
	HEA 120	-99	10,9	0	0,61	0,56
	HEB 120	-8,3	13,7	0	0,42	0,36

V prečkah RQ 60/4, ki so označene na sliki 5.19, so se zaradi ekscentričnega priključevanja prečk strešnega povezja poleg osnih sil (preglednica 5.40) pojavile tudi velike prečne sile in momenti. Maksimalen moment, ki je znašal 8,8 kNm medtem ko je $M_{el,Rd} = 3,7$ kNm in $M_{pl,Rd} = 4,4$ kNm. Poleg omenjenega momenta, zaradi katerega je nosilnost prereza povsem prekoračena, pa se je v istem elementu pojavila tudi maksimalna prečna sila $V_{Ed} = 52$ kN, kar je 86 % $V_{pl,Rd}$. Prerezi elementov označenih na sliki 5.19 so prešibki in bi jih bilo potrebno povečati, kar se izkaže že pri modalni analizi.

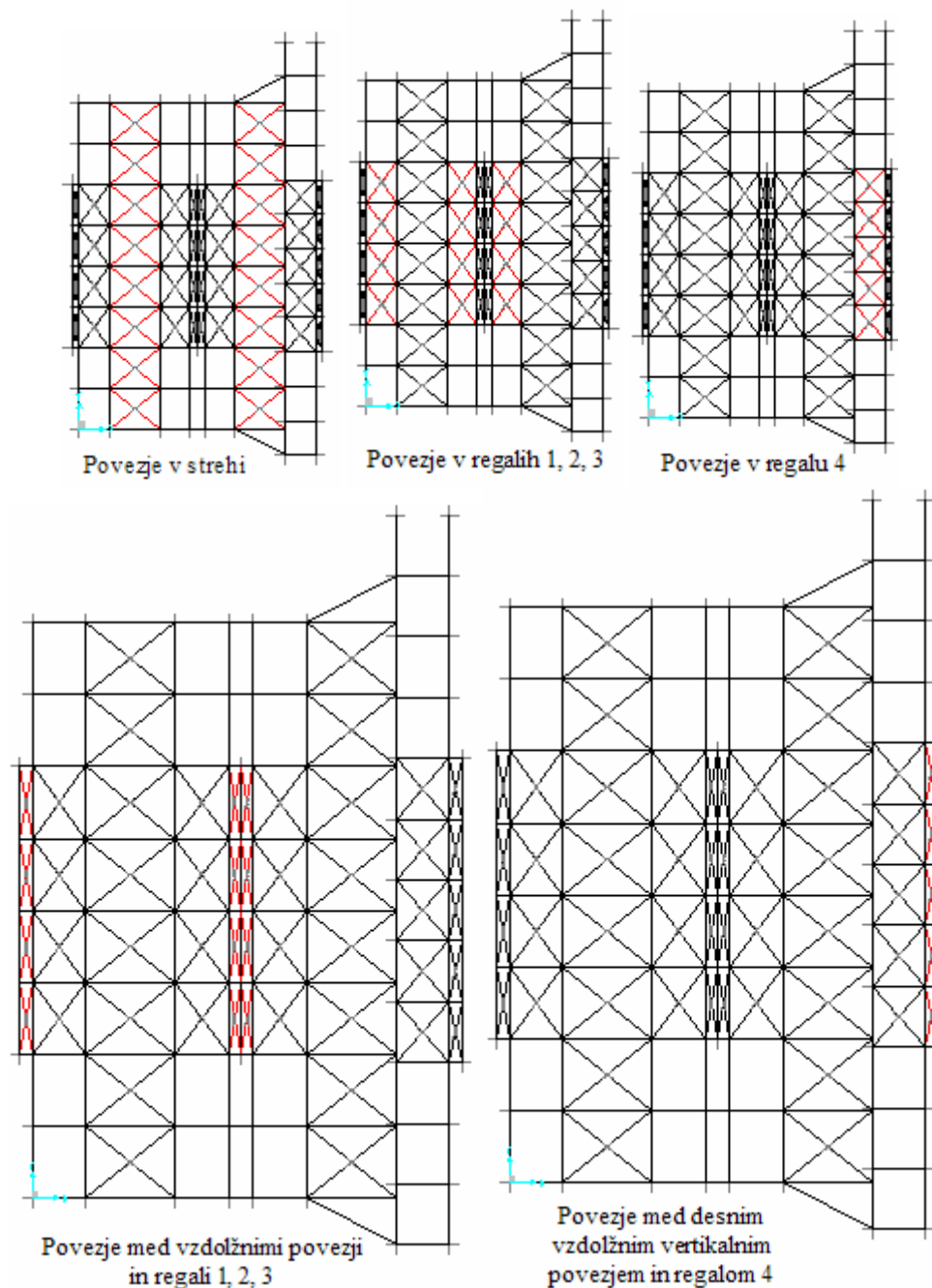
Lokalna plastifikacija v ostalih prečkah ni kritična, saj pride pri potresu kvečjemu do dveh ali treh močnejših sunkov. Večja težava je uklon stebrov, ki se pri večjih potresnih sunkih uklonijo.



Slika 5.19: Prečke RQ 60/4 v strehi med stranicami 4 regala, na katere se ekscentrično priključujejo prečke horizontalnega strešnega zavetrovanja, so označene rdeče.

5. Raztezki horizontalnih diagonal

Horizontalne diagonale niso namenjene disipaciji potresne energije. Med potresom naj bi ostale v elastičnem območju, Kljub temu smo jih modelirali kot nelinearne plastične vzmeti, na enak način, kot vertikalne diagonale. To smo storili z namenom, da v primeru plastifikacije lahko ugotovimo plastično deformacijo diagonale, ter da zajamemo vpliv plastičnih deformacij na samo podajnost konstrukcije.



Slika 5.20: Skupine horizontalnih povezij, pogled na skladišče z vrha

Ugotovili smo, da se horizontalne diagonale tudi plastificirajo. Največ se jih plastificira v horizontalnih povezjih med vzdolžnimi vertikalnimi povezji in regali. Najmanj se jih plastificira v strešnem povezju. Horizontalno povezje smo razdelili v pet skupin (slika 5.20). V preglednici 5.42 prikazujemo maksimalne raztezke diagonal, glede na posamezno skupino horizontalnih diagonal.

Preglednica 5.42: Maksimalni raztezki horizontalnih diagonal

Povezje	Raztezek [mm]	Dolžina [mm]	Deformacija %
Regal 1, 2, 3	11,9	2180	5,46
Regal 4	4,5	1970	2,28
Levo in srednje povezje	4,3	1775	2,42
Desno povezje	22,4	1510	14,83
Streha	4,4	2772	1,59

5.3.3 Nelinearna dinamična analiza, reduciran prerez diagonal

Izpis rezultatov je enak izpisu v točki 5.3.2, le vrednosti se razlikujejo.

1. Reakcije

Preglednica 5.43: Maksimalni izvleki in pritiski, prečna smer

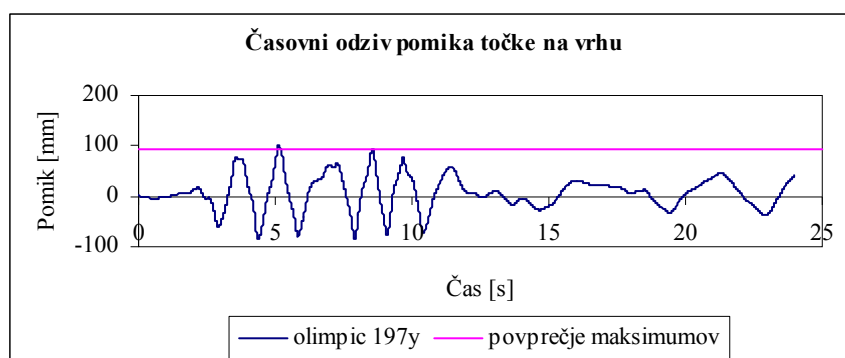
Regal	$F_{3,max}$ [kN]	$F_{3,min}$ [kNm]
1	664	-144
2, 3	708	-195
4	738	-245

V vzdolžni smeri smo zabeležili maksimalen pritisk 768 kN v vozlišču 177, maksimalen izvlek pa -727 kN v vozlišču 175. Obe ekstremni vrednosti sta v desnem povezju (slika 5.15).

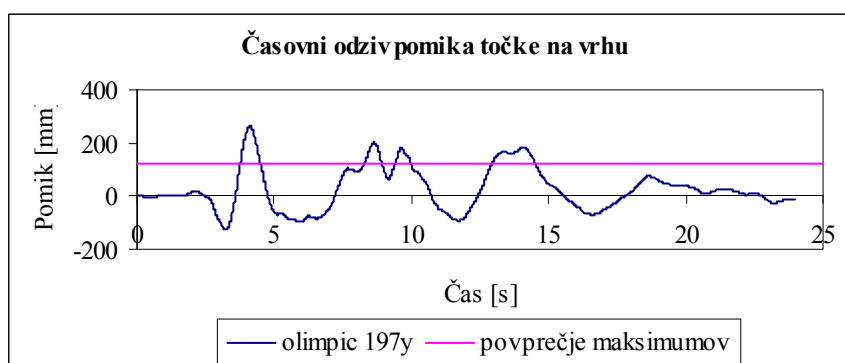
2. Horizontalni pomiki

Preglednica 5.44: Maksimalni povprečni pomiki izbranih točk, maksimalni pomik v obeh glavnih smereh v točki 150

Pozicija	Smer	Vozlišče	u_1 [mm]	u_2 [mm]
Streha	X	150	93	
	Y	150		124
	X	128	83	
	Y	128		114
Regal 1	X	381	58	
	Y	381		107
Regal 2	X	413	56	
	Y	413		97
Regal 3	X	423	55	
	Y	423		97
Regal 4	X	595	47	
	Y	595		86

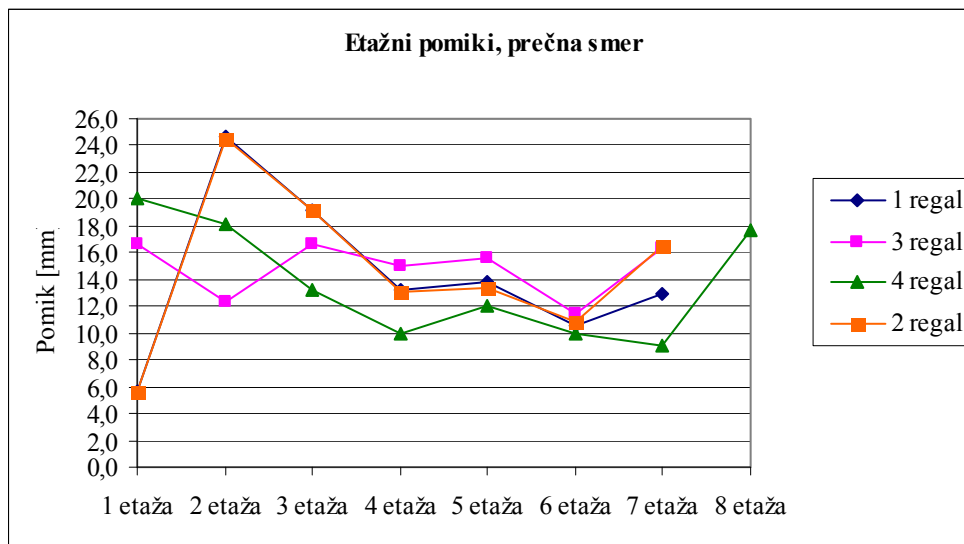


Grafikon 5.16: Časovni odziv pomika točke 150 pri vzburjanju v prečni smeri



Grafikon 5.17: Časovni odziv pomika točke 150 pri vzburjanju v vzdolžni smeri

Očitno se je zaradi manjše togosti nihajni čas konstrukcije še povečal, saj vidimo da konstrukcija niha počasneje kot v primeru konstantnega prereza diagonal (grafikon 5.17).

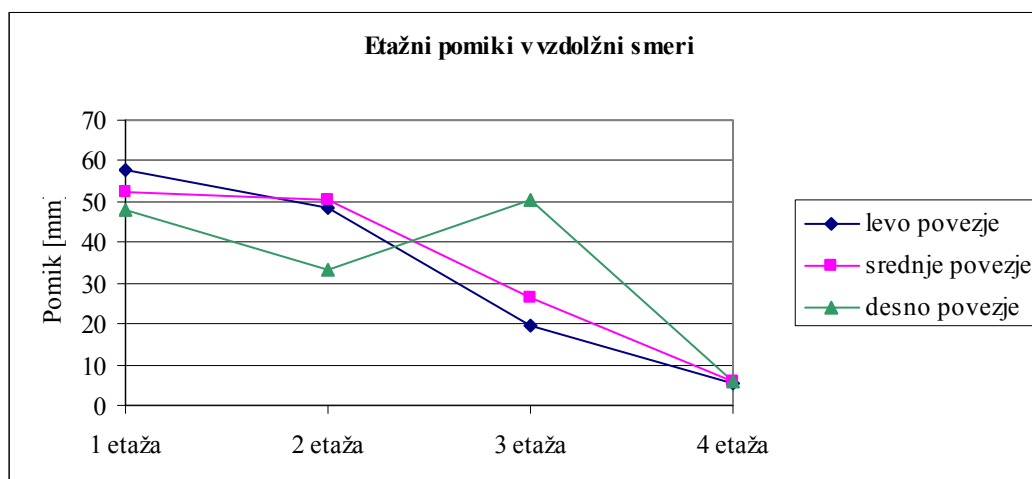


Grafikon 5.18: Primerjava etažnih pomikov v prečni smeri po etažah, glede na posamezen regal. Maksimalna vrednost je 24,5 mm.

Preglednica 5.45: Maksimalni etažni pomiki po regalih v prečni smeri

Regal	$d_r = \Delta u_{1,max}$ [mm]	h [mm]	% višine	$d_r * v$	$0,01 * h$ [mm]
1	25	2250	0,46	12,5	22,5
2	25	2250	0,48	12,5	22,5
3	17	2050	0,58	8,5	20,5
4	20	1675	0,57	10	16,8

Relativno glede na višino etaže so etažni pomiki v prečni smeri X maksimalni v drugi etaži pri regalu 1 in 2 in v prvi etaži pri regalih 3 in 4 (preglednica 5.45). Pogoji (6) je v prečni in vzdolžni smeri izpolnjen v vseh etažah. Maksimalni relativni etažni pomik v vzdolžni smeri glede na višino etaže je v prvi etaži levega povezja in znaša 1,9 % glede na višino etaže.

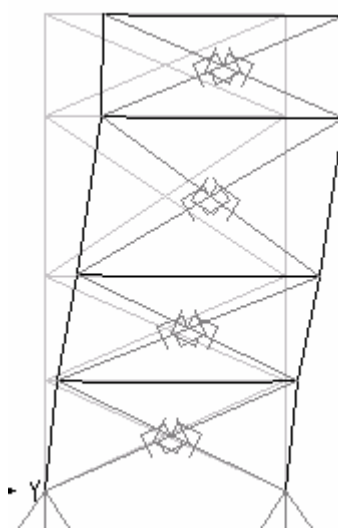


Grafikon 5.19: Primerjava etažnih pomikov v vzdolžni smeri po povezjih. Maksimalna vrednost je 58 mm v tretji etaži desnega povezja (slika 5.21).

Preglednica 5.46: Maksimalni etažni pomik v vzdolžni smeri v posameznem regalu

Povezje	$d_r = \Delta u_{2,max}$	h [mm]	% višine	$d_r * v$	$0,01 * h$ [mm]
levo	58	3070	1,9	29	30,7
srednje	52	3070	1,7	26	30,7
desno	50	4860	1,03	25	48,6

Ugotovili smo, da TDR ni potrebno upoštevati, saj je vpliv zaradi velike potresne sile zelo majhen.



Slika 5.21: Maksimalna deformacija desnega povezja, 197y, t = 9,66 s

3. Raztezki diagonal

a) Prečna smer

V vseh etažah pride do plastifikacije vsaj ene diagonale na oslabiljenem delu prereza.

Preglednica 5.47: Maksimalni raztezki diagonal v prečni smeri, reduciran prerez

Etaža	Regali	Raztezek [mm]	Dolžina [mm]	Deformacija ‰
1	1, 2	4,2	250	16,64
	3	9,3	250	37,11
	4	11,4	250	45,76
2	1, 2	10,4	250,0	41,55
	3	7,1	250,0	28,34
	4	9,6	250,0	38,45
3	1, 2, 3	7,4	250,0	29,56
	4	6,0	250,0	23,86
4	1, 2, 3	5,0	250,0	20,19
	4	3,6	250,0	14,27
5	1, 2, 3	5,0	200	21,89
	4	4,4	200	24,93
6	1, 2, 3	1,8	200	9,17
	4	2,6	200	12,84
7	1, 2, 3	1,8	200	9,12
	4	1,1	200	5,74
8	4	1,8	200	9,09

Preglednica 5.48: Raztezki diagonal v vzdolžnem povezju

Povezje	Etaža	Raztezek [mm]	Dolžina oslabitev [mm]	Deformacija ‰
levo	1	50,7	600	84,417
	2	38,6	600	64,333
	3	7,2	600	12,000
	4	2,0	600	3,333
srednje	1	44,0	700	62,857
	2	37,3	700	53,286
	3	18,2	600	30,333
	4	10,6	600	17,667
desno	1	38,4	920	41,739
	2	24,4	920	26,522
	3	36,4	600	60,667
	4	13,7	600	22,833

Vse diagonale v vzdolžnem povezju se plastificirajo (preglednica 5.48). Maksimalna plastifikacija 8,4 % je še možna brez porušitve, če vemo da konstrukcijsko jeklo prenese plastične deformacije 10 % in več.

4. Kontrola stebrov, prečk in paletnih nosilcev

Preglednica 5.49: Izkoriščenost maksimalno obremenjenih elementov glede na posamezen prerez

Element	Prerez	N_{min} [kN]	$M_{y, prip}$ [kNm]	$M_{z, prip}$ [kNm]	Elastična kontrola napetosti	Kontrola stabilnosti
Steber	HEA 160	-672	0	6,4	1,09	1,06
	I+2P	-740	0	1	0,53	0,63
	HEB 160	-765	-5,7	0	0,68	0,77
Prečka	RQ 140/8	-618	1,8	3	0,74	0,75
	RQ 60/4	-43	0	1,8	0,7	0,61
Paletni nosilec	HEA 100	-130	6,71	0	0,65	0,73
	HEA 120	-64	10,95	0	0,55	0,5
	HEB 120	-5,8	13,7	0	0,41	0,36

Tudi v tem primeru so se v prečkah RQ 60/4, ki so označene na sliki 5.19, pojavile velike prečne sile in momenti. Maksimalna povprečna vrednost momenta je znašala 8,6 kNm, kar je več kot lahko prenese prerez. Poleg momenta pa se je v istem elementu pojavila tudi maksimalna prečna sila $V_{Ed} = 47$ kN, kar je 77 % $V_{pl, Rd}$.

5. Raztezki horizontalnih diagonal

Rezultati v preglednici se navezujejo na diagonale na sliki 5.20. V primeru oslabljenega prereza vertikalnih diagonal pride do plastifikacije horizontalnih diagonal le v horizontalnem povezju med desnim vertikalnim vzdolžnim povezjem in regalom 4.

Preglednica 5.50: Maksimalni raztezki horizontalnih diagonal

Povezje	Raztezek [mm]	Dolžina [mm]	Deformacija %
Regal 1, 2, 3	1	2180	0,46
Regal 4	1,7	1970	0,85
Levo in srednje povezje	1,6	1775	0,89
Desno povezje	2,9	1510	1,91
Streha	1,2	2772	0,44

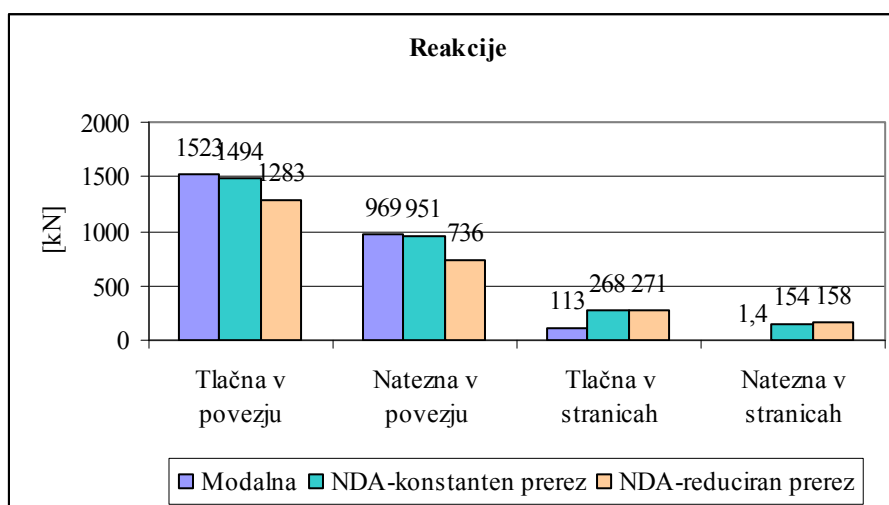
6 PRIMERJAVA REZULTATOV

Primerjava modalne analize in nelinearne dinamične analize je smiselna samo v primeru uporabe reduciranega prereza diagonal. Pri kontrolah modalne analize smo namreč upoštevali nosilnost oslabiljenega prereza diagonal.

6.1 Skladišče VRS 2

6.1.1 Primerjava reakcij

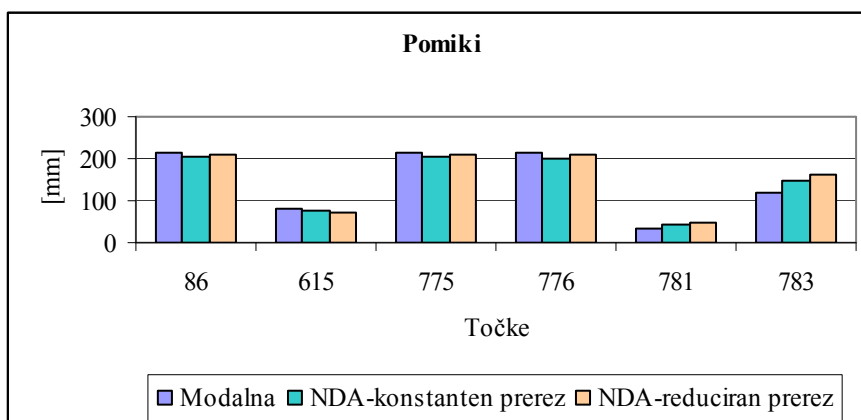
Primerjamo maksimalne vrednosti. Maksimalna tlačna reakcija dobljena pri modalni analizi v povezju je 19% večja od reakcije dobljene iz dinamične analize, natezna reakcija pa je 32 % večja. Reakcije v stranicah pa so pri modalni analizi manjše, kot v povezju. Primerjava dinamičnih analiz pokaže, da se v primeru redukcije prereza diagonal maksimalna tlačna reakcija v povezju zmanjša za 11 % natezna pa za 23 %, medtem ko se v stranicah oboje povečajo za 1 %. To je zato, ker se zaradi manjše togosti povezja nekoliko večji del potresnih sil prenese na regalne stranice, kot v primeru konstantnega prereza diagonal. Odstotek prenesenih potresnih sil je majhen, ker je redukcija prereza diagonal majhna. Če bi bila redukcija večja bi več potresa prevzele stranice, kar pa bi bilo lahko neugodno, saj že sedaj pride do plastifikacij.



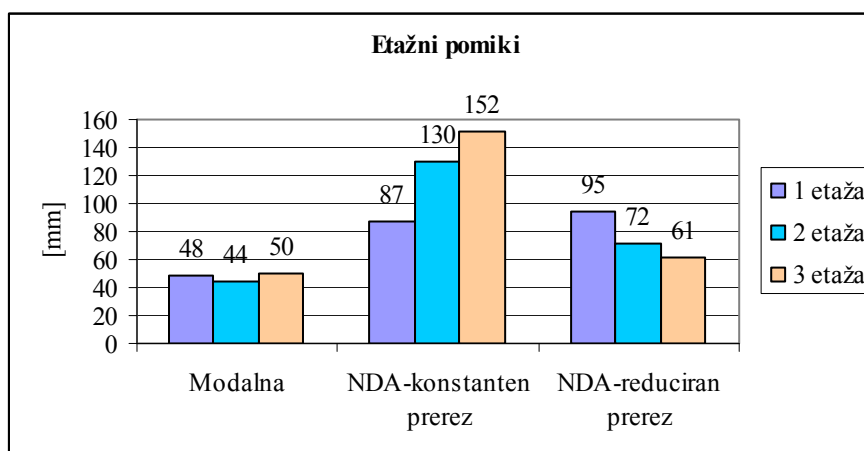
Grafikon 6.1: Primerjava reakcij med analizami

6.1.2 Primerjava pomikov

Maksimalni pomiki točk na vrhu in v sredini dobljeni pri modalni analizi so le malo večji kot pomiki dobljeni iz dinamične analize, razlika na vrhu je 1 %. Večja razlika je v vozlišču 783 (preglednici 5.3 in 5.20), kjer so pri dinamični večji za , zaradi česa pride tudi do razlike pri etažnih pomikih v drugi etaži. Etažni pomiki v povezju se največ razlikujejo v drugi in tretji etaži (grafikon 6.1). V drugi etaži je etažni pomik pri dinamični analizi 75 % večji od modalne analize, čeprav je v ostalih dveh manjši. Pomiki točk so pri dinamični analizi s konstantnim prerezom diagonal manjši od pomikov dinamične analize z reduciranim prerezom, prav tako je z etažnimi pomiki. Obnašanje konstrukcije pri dinamični analizi je torej drugačno, kot to predvideva modalna analiza.



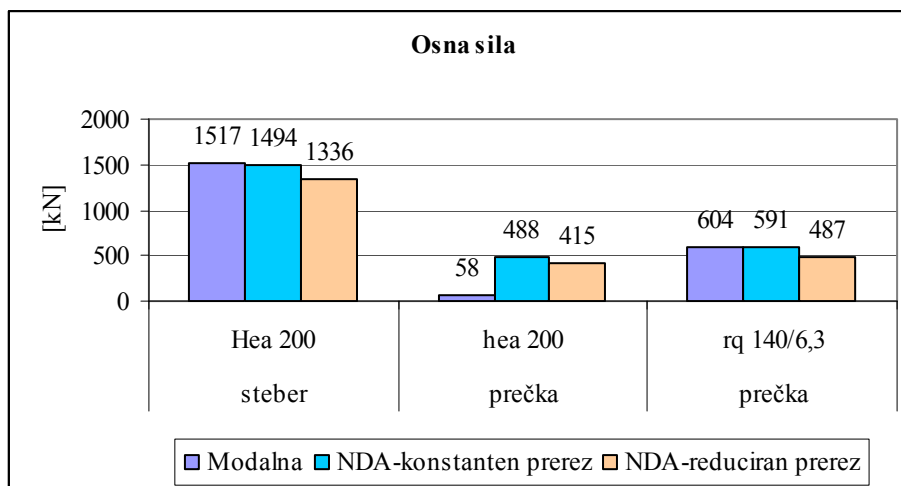
Grafikon 6.2: Primerjava pomikov posameznih točk



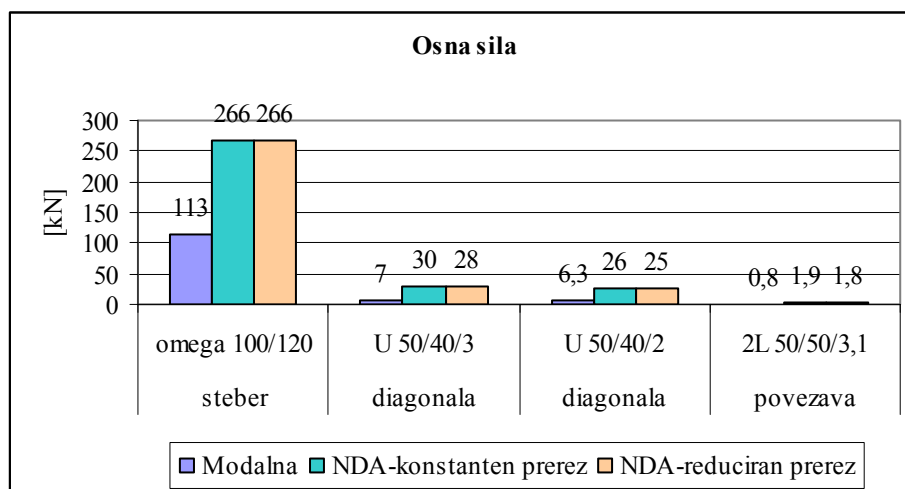
Grafikon 6.3: Primerjava etažnih pomikov treh analiz

6.1.3 Primerjava notranjih sil

Prevladujejo osne sile, zato smo primerjali le osne sile v elementih, saj so momenti majhni. Primerjava modalne analize in dinamične analize pokaže, da so osne sile v stebrih in prečkah povezja izračunane iz modalne analize z uporabo faktorjev dodatne nosilnosti za 14 % večje od sil dobljenih pri dinamični analizi, sila v zgornji prečki povezja HEA 200 pa je pri dinamični analizi 6 krat večja, kot pri modalni analizi. V delu regalnih stranic so maksimalne sile zaradi modalne analize, od 58 % v stebrih do 75 % v prečkah, manjše. Največ razlike je v maksimalni sili v stebrih stranic. Iz tega lahko sklepamo, da je razpored notranjih sil dejansko drugačen, kot ga predvideva modalna analiza. Iz primerjave obeh dinamičnih analiz ugotovimo, da so notranje sile v primeru reduciranega prereza diagonal nekoliko manjše, kot v primeru konstantnega prereza diagonal. Razlika je komajda 1 %, kar ponovno kaže na to, da je bila redukcija diagonal šibka, saj ima premajhne učinke.



Grafikon 6.4: Maksimalna tlačna osna sila v elementih povezja, primerjava



Grafikon 6.5: Maksimalna tlačna osna sila v elementih stranic, povezave med stranicami so izpuščene, ker je osna sila manjša od 2 kN

6.1.4 Primerjava raztezkov diagonal

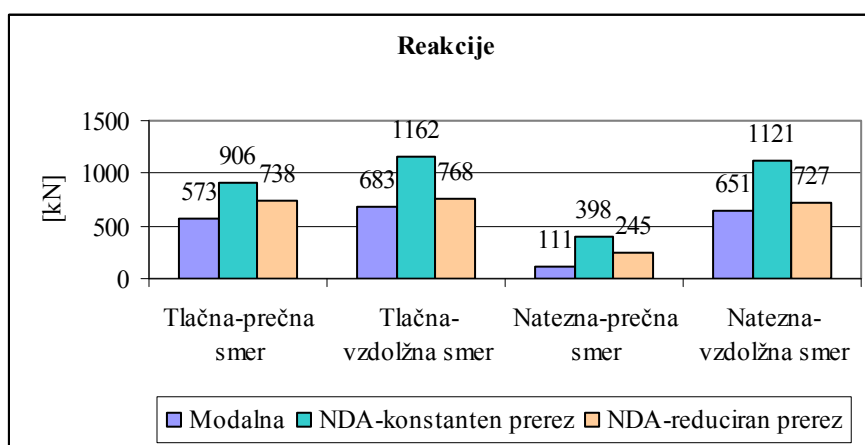
Tu lahko primerjamo le dinamični analizi med seboj. Raztezki diagonal so v primeru reduciranih prerezov pričakovano večji le v prvi in drugi etaži, medtem ko je raztezek v zadnji etaži celo manjši. Očitno se z redukcijo ne zmanjšajo samo notranje sile in reakcije ampak pride zaradi spremenjene togosti konstrukcije tudi do drugačnih pomikov konstrukcije oz. do drugačnega globalnega obnašanja.

Če povzamemo primerjavo med modalno analizo in dinamično analizo. Če reakcije v povezju, zaradi potresnega vpliva, pri modalni analizi pomnožimo s faktorji dodatne nosilnosti, so večje, kot pri dinamični analizi. Notranje sile v elementih povezja so pri modalni analizi večje, kot pri dinamični, razen v zgornji prečki. Notranje sile in reakcije v elementih stranic so pri modalni analizi manjše, kot pri dinamični. Reakcij v podporah stranic in notranjih sil v elementih stranic nismo množili, s faktorji dodatne nosilnosti, saj se potresna energija v njih ne disipira. Maksimalni pomiki na vrhu se dokaj ujemajo, medtem ko so etažni pomiki pri dinamični analizi manjši, razen v drugi etaži. Če notranjih sil v stebrih povezja in reakcij v podporah ne bi množili s faktorji dodatne nosilnosti v skupni vrednosti 2,3, bi bile oboje manjše od vrednosti pri dinamični analizi. Pri dinamični analizi so notranje sile v prečkah realnejše, saj je pri modalni analizi zaradi uporabe le ene diagonale konstrukcija dejansko nesimetrična.

6.2 Skladišče VRS 3

6.2.1 Primerjava reakcij

Primerjava modalne analize in dinamične analize pokaže da so reakcije v obeh smereh pri modalni analizi manjše, kot pri dinamični, kljub temu, da smo potresni vpliv pri modalni analizi pomnožili s faktorji dodatne nosilnosti, ki v prečni smeri za 55 % povečajo potresni vpliv, v vzdolžni smeri pa za 29 %. Dinamična analiza da 29 % večjo maksimalno tlačno silo v prečni smeri in 12 % večjo v vzdolžni smeri. Maksimalna natezna reakcija v prečni smeri je pri dinamični analizi 120 % večja, kot pri modalni analizi, v vzdolžni smeri pa je 12 % večja. Vrednost maksimalne tlačne reakcije v prečni smeri, zaradi nelinearne dinamične analize s konstantnim prerezom diagonal, je 23%, natezna pa 62 % večja od maksimalne reakcije dobljene iz nelinearne dinamične analize z reduciranim prerezom diagonal. V vzdolžni smeri je razlika tlačnih reakcij 51 %, nateznih pa 54 %.

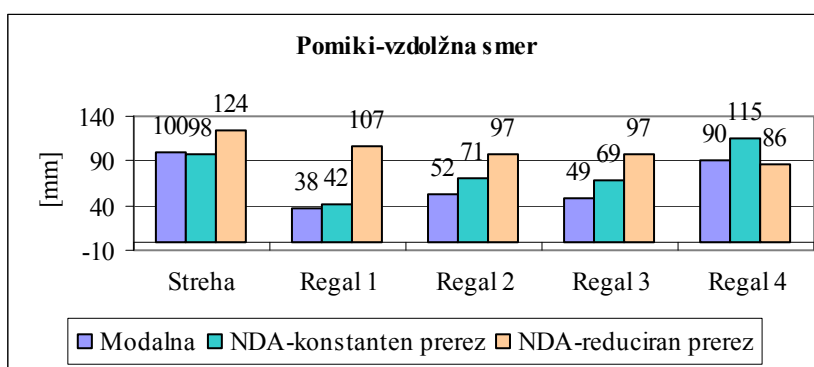


Grafikon 6.6: Primerjava reakcij med analizami

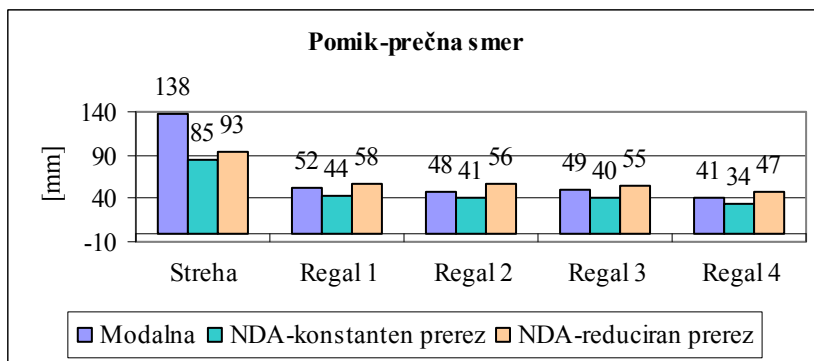
6.2.2 Primerjava pomikov

Iz primerjave maksimalnih pomikov v izbranih točkah (preglednica 5.23, grafikon 6.7 in grafikon 6.8) vidimo, da približno na polovici višine v posameznih regalih dinamična analiza dá v prečni smeri v povprečju 12 % večje pomike kot modalna analiza, medtem ko so v vzdolžni smeri v povprečju pomiki večji za 100 %, vendar pa

so ponekod tudi manjši (grafikon 6.7). Na vrhu je maksimalni pomik dinamične analize v prečni smeri 48 % manjši kot pomik iz modalne analize. Dinamična analiza s konstantnim prerezom diagonal daje manjše pomike od dinamične z reduciranim prerezom. Razlike so večje v vzdolžni smeri. Vendar pa redukcija prereza ne pomeni samo zmanjšanje pomikov v točkah, pač pa tudi prerazporeditev le teh. V regalu 4 (vozišče 595) je pomik v primeru nereduciranega prereza v vzdolžni smeri večji kot v primeru reduciranega prereza, čeprav je v ostalih regalih manjši (grafikon 6.8).



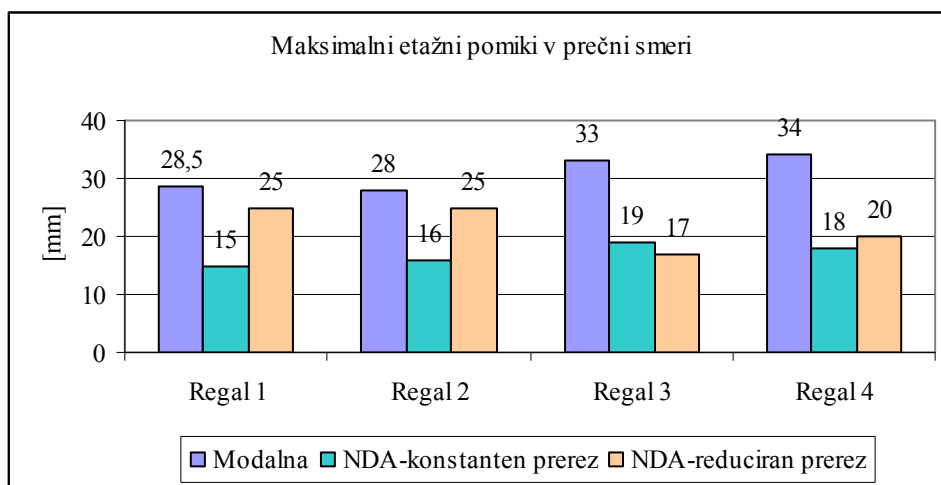
Grafikon 6.7: Primerjava pomikov v vzdolžni smeri



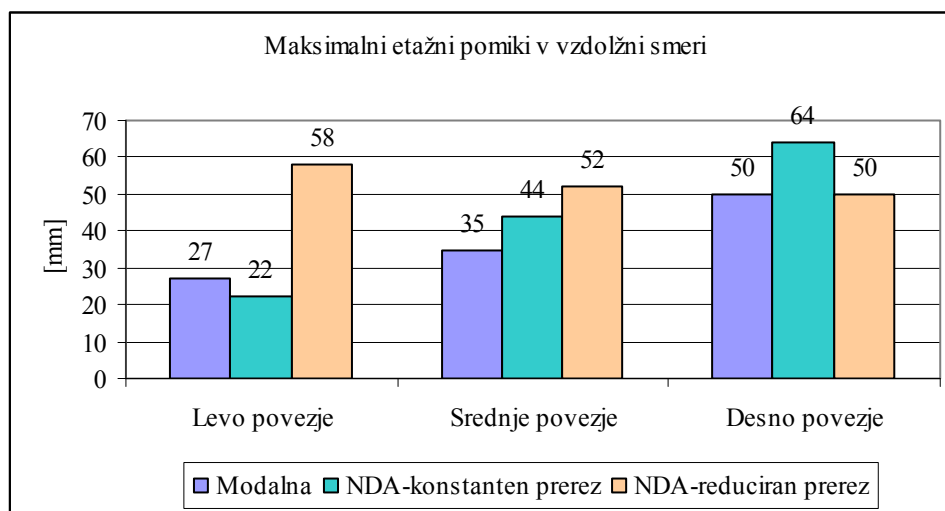
Grafikon 6.8: Primerjava pomikov v prečni smeri

Etažni pomiki v prečni smeri so pri modalni analizi večji kot pri dinamični analizi. Iz primerjave posameznih grafikonov 5.9, 5.14 in 5.18 vidimo, da se krivulje etažnih pomikov najbolj ujemajo med modalno analizo in dinamično analizo s konstantnim prerezom diagonal, medtem ko se skladišče z reduciranim prerezom diagonal obnaša malo drugače. Etažni pomiki z višino padajo, razen v zadnji etaži, kjer se zaradi večje višine etaže ponovno povečajo.

Pri primerjavi etažnih pomikov v vzdolžni smeri, s primerjavo grafikonov 5.10, 5.15 in 5.19 vidimo, da se pri posameznih analizah povezja odzivajo različno. Pri dinamični analizi s konstantnim prerezom diagonal so etažni pomiki izrazito največji v prvi etaži, medtem ko so pri dinamični analizi z reduciranim prerezom diagonal v prvi in drugi etaži podobni. Pri modalni analizi so etažni pomiki podobni v prvih treh etažah. Levi in srednji regal se pri modalni analizi in dinamični z reduciranim prerezom diagonal obnašata podobno. Največ razlik med analizami je v desnem regalu, ki se pri dinamični analizi z reduciranim prerezom diagonal obnaša povsem drugače kot pri ostalih dveh (grafikon 5.19). S primerjavo maksimalnih etažnih pomikov v posameznih regalih v prečni smeri vidimo, da so etažni pomiki iz modalne analize v povprečju manjši, vendar so odstopanja različna, od 12 % do 94 %. V vzdolžni smeri pa so etažni pomiki modalne analize v splošnem manjši. Odstopanja so do 53 %. Vse to se tudi približno ujema z maksimalnimi pomiki na vrhu in v regalih (grafikon 6.7 in grafikon 6.8).



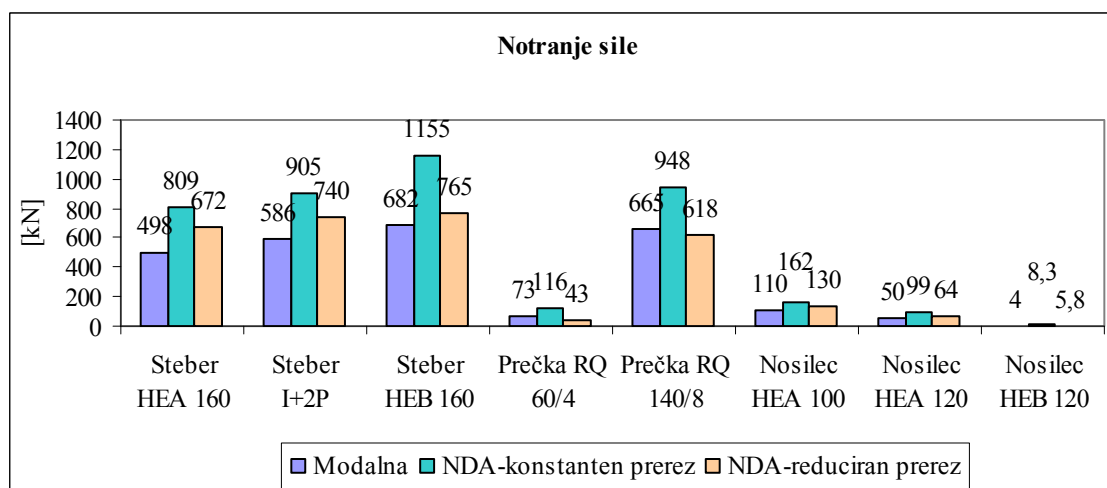
Grafikon 6.9: Primerjava maksimalnih etažnih pomikov v prečni smeri



Grafikon 6.10: Primerjava maksimalnih etažnih pomikov v vzdolžni smeri

6.2.3 Primerjava notranjih sil

Primerjamo preglednice 5.32, 5.33, 5.40 in 5.48. Notranje sile so najvišje pri dinamični analizi s konstantnim prerezom diagonal. Pri dinamični analizi z reduciranim prerezom diagonal je maksimalna notranja sila v stebrih stranic manjša za 18 %, v stebrih vzdolžnega povezja pa za 34%.



Grafikon 6.11: Primerjava notranjih sil

V prečkah prereza RQ 60/4 je maksimalna sila manjša za 63 %, v prečkah vzdolžnega povezja za 37%. V paletnih nosilcih se največ zmanjša v nosilcih HEA 100, za 35 %. Pri modalni analizi so notranje sile v stebrih in nosilcih manjše, v prečkah so večje. V stebrih stranic je maksimalna sila manjša za 26 %, v stebrih povezja za 11%, v prečkah

pa je maksimalna sila celo večja, 7 % v prečkah povezja in kar 70 % v maksimalno obremenjeni prečki RQ 60/4. Pri dinamični analizi so osne sile v prečkah manjše zato, ker so diagonale modelirane elastično, pri modalni pa plastično.

6.2.4 Primerjava raztezkov diagonal

Pri modalni analizi z reduciranim prerezom diagonal so raztezki vertikalnih diagonal večji zaradi oslabitev, tudi plastificira se več diagonal (preglednica 5.47). Horizontalne diagonale pa so bolj obremenjene pri dinamični analizi s konstantnim prerezom vertikalnih diagonal, zato se jih več plastificira kot v primeru redukcije. V primeru redukcije pride do plastifikacije samo v horizontalnem povezju med desnim vzdolžnim povezjem in regalom 4 (preglednica 5.49).

7 SKLEP

Namen diplomske naloge je bil kontrola obstoječih dveh skladišč. Kontrola z modalno analizo je ustrezna, razen pomanjkljivosti glede vitkosti diagonal pri skladišču VRS 2. Pri skladišču VRS 3 se pojavijo težave s prevelikimi momenti in prečnimi silami v prečkah prereza RQ 60/4, zaradi ekscentričnega priključevanja prečk strešnega povezja na prečke stranic regala 4. Ravninskega modeliranja skladišča VRS 2 ne moremo direktno primerjati s prostorskim modelom skladišča VRS 2 iz programa ESA, saj je porazdelitev notranjih sil v povezju prostorskega modela drugačna, kot v ravninskem modelu. V prostorskem modelu je stebrov 12, v ravninskem pa sta 2, ki prevzameta vse potresne sile.

Nelinearna dinamična analiza pokaže na pomanjkljivosti, na katere modalna analiza ne. Pri nelinearni dinamični analizi pride, pri skladišču VRS 2, v stebrih stranic do plastifikacije stebrov in do uklona. Pri modalni analizi bi bilo potrebno izbrati manjši q faktor, s tem bi dobili večje potresne obremenitve in večje notranje sile v stebrih stranic. Z dimenzioniranjem na večje notranje sile bi povečali prerez, ki bi ustrezal tudi silam dobljenim iz dinamične analize. Tudi v skladišču VRS 3 pride do plastifikacije in problema uklona nekaterih najbolj obremenjenih stebrov. Deformacije diagonal skladišča VRS 3 so v mejah, ki jih konstrukcijsko jeklo lahko prenese. Pri skladišču VRS 2 smo ugotovili, da so dolžine oslabitev diagonal slabo izbrane, morale bi biti daljše. Pri primerjavi pomikov skladišča VRS 3 med različnimi analizami lahko zaključimo, da so pomiki modalne analize v prečni smeri v splošnem večji, v vzdolžni smeri pa manjši kot pomiki dinamične analize. Še najbolj smiselna je primerjava osnih sil v stebrih in reakcij v podporah, ki so manjše pri obremenjevanju v obeh smereh, na podlagi katerih lahko tudi sklepamo o faktorju obnašanja konstrukcije. Tako smo za skladišče VRS 3 ugotovili, da bi lahko z izbiro manjšega q faktorja, s katerim bi dobili večje potresne sile in posledično večje notranje sile, povečali prereze, ki bi zadoščali tudi obremenitvam dinamične analize.

Poleg tega pa smo tekom izvajanja analiz prišli tudi do sklepa, da je računalniški program SAP2000 slab za obravnavo večjih nelinearnih problemov. Prva izmed večjih

pomanjkljivosti je ta, da program dejansko ne vsebuje histereznega modela obnašanja nateznih diagonal pri ciklični obremenitvi v tlaku in nategu, zato smo problem rešili s prirejanjem modela Takeda, kar je delovalo dokaj pravilno. Naslednja slabost programa je v težavah s konvergiranjem pri uporabi teorije drugega reda in velikih pomikov zaradi česar teorije drugega reda sploh ni bilo možno upoštevati, zato smo morali njen vpliv določiti približno po metodi Horne. K sreči se je izkazalo, da je vpliv zelo majhen. Pomanjkljivost programa je tudi v slabem izpisu rezultatov, ki jih je potrebno naknadno ročno obdelati, kar je zelo zamudno.

Tudi sama nelinearna dinamična analiza ima nekatere slabosti, predvsem sta to zelo dolg računski čas in pa ogromna količina izhodnih podatkov, ki jih je potrebno ročno obdelati, kar vzame zelo veliko časa. Potrebno pa je imeti tudi dokaj zmogljivo strojno opremo in primerno programsko opremo.

8 VIRI

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 219 str.

Berman, W. J., Celik, C. O., Bruneau, M. 2005. Comparing hysteretic behaviour of light-gauge steel plate shear walls and braced frames. *Engineering Structures*, 27, 475-485.

Computers and Structures, Inc. 2005. CSI Analysis Reference Manual.

Dispozicijski Autocad-ovi načrti skladišča VRS 2.

European Strong-Motion Database, <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk>

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 550 str.

Piluso, V., Montuori, R., Longo, A. 2005. An innovative conception for bracing members: the reduced brace section solution. *Eurosteel 2005*, vol. C: 5.2-33 – 5.2-40.

Pr FEM 10.2.08, 2005. Recommendations for the design of static steel pallet racks under seismic conditions. Final draft.

Projektna dokumentacija za pridobitev gradbenega dovoljenja za skladišči VRS 2 in VRS 3.

Računalniški model skladišča VRS 2 in VRS 3 v programu ESA.

SIST EN 1998-1, 2005. Projektiranje potresno odpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.