

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:

Daniel Celarec

Poenostavljena verzija programa EAVEK

Diplomska naloga št.: 2970

Mentor:

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 4. 9. 2007

ZAHVALA

Hvala doc. dr. Matjažu Dolšku za pomoč in mentorstvo in prof. Petru Fajfarju za pregled in korekture.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.42:624.042.7(043.2)

Avtor: Daniel Celarec

Mentor: doc. dr. Matjaž Dolšek

Naslov: Poenostavljena verzija programa EAVEK

Obseg in oprema: 99 str., 27 pregl., 79sl., 45 en.

Ključne besede: EAVEK, modalna analiza s spektri odziva, psevdotridimenzionalni model, EC8

Izvleček:

Izdelana je poenostavljena verzija programa EAVEK v programu MATLAB. Teoretične osnove so povzete po prejšnji verziji programa, dodanih pa je nekaj novosti, ki jih zahteva standard Evrokod 8. Te novosti se nanašajo na kontrolo tlorisne nepravilnosti stavbe, upoštevanje slučajne ekscentričnosti mase in vpliv teorije drugega reda. Program je razvit tako, da je mogoče dodajati nove makroelemente. Opisani so algoritem programa, tvorjenje togostnih matrik makroelementov in oblika vhodnih ter izhodnih podatkov. Predstavljeni so ukazi za analizo in prikaz rezultatov. Uporaba programa je prikazana na dveh primerih. Rezultati analize so primerjani z rezultati programov SAP 2000, ETABS in EAVEK.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 004.42:624.042.7(043.2)
Author: Daniel Celarec
Supervisor: Assis. Prof. Matjaž Dolšek
Title: The simplified version of the program EAVEK
Notes: 99 p., 27 tab., 79 fig., 45 eq.
Key words: EAVEK, modal response spectrum analysis, pseudo three-dimensional model, EC8

Abstract:

The simplified version of the program EAVEK has been developed in the MATLAB programming language. Theoretical backgrounds of the new program are based on the program EAVEK. However, some new capabilities are added in the program. Therefore, the new program automatically checks the irregularity in plan and considers accidental torsion and second-order effects according to Eurocode 8. In addition, it is also possible to add new macro-elements in the program. The algorithm, the construction of the stiffness matrices of the macro-elements, and the input and output data are described. In the project a list of the commands used for the analysis or post-processing of the results is also presented. The use of the program is demonstrated by the two examples and the results of the analyses are compared with results obtained by the programs SAP 2000, ETABS, and EAVEK.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNE OSNOVE	2
2.1	Računski model	2
2.2	Linijski element	5
2.3	Togostna matrika ravninskega linijskega elementa s togimi odseki	8
2.4	Račun togostnih matrik makroelementov in konstrukcije.....	9
2.4.1	Ravninski okvir	9
2.4.2	Stena brez odprtin	11
2.4.3	Stena na stebrih	12
2.4.4	Stena z odprtinami	12
2.4.5	Jedro	13
2.4.6	Tvorjenje togostne matrike makroelementov.....	14
2.4.7	Zmanjšanje števila prostostnih stopenj – kondenziranje togostne matrike statičnega modela makroelementa K_{nn}	15
2.4.8	Upoštevanje predpostavke o enakosti etažnih pomikov	17
2.4.9	Kondenzirana togostna matrika v lokalnem koordinatnem sistemu.....	19
2.4.10	Kondenzirana togostna matrika konstrukcije v globalnem koordinatnem sistemu konstrukcije	20
2.5	Masna matrika in račun lastnega nihanja	24
2.5.1	Masna matrika.....	24
2.5.2	Lastno nihanje	25
2.6	Potresna obtežba in račun pomikov in potresnih sil na konstrukcijo.....	26
2.6.1	Pomiki in potresne sile na konstrukcijo	27
2.7	Pomiki in potresne sile na makroelemente	28
2.7.1	Notranje sile v makroelementih	28
2.8	Kombinacija premikov in potresnih sil.....	33
2.8.1	Kombinacija zaradi nihajnih oblik.....	33
2.8.2	Kombinacija zaradi smeri delovanja obtežbe	34
2.9	Kontrola tlorisne pravilnosti	34

2.10	Vpliv slučajne ekscentričnosti.....	37
2.11	Upoštevanje teorije drugega reda.....	37
3	ALGORITEM PROGRAMA.....	39
3.1	Tvorjenje togostnih matrik makroelementov.....	41
3.1.1	Togostna matrika okvirja.....	41
3.1.2	Togostna matrika stene na stebrih.....	44
3.1.3	Togostna matrika jedra.....	48
3.2	Podatkovni sezname.....	49
3.2.1	Matrike makroelementov in konstrukcije.....	49
3.2.2	Vektorji nihajnih oblik in nihajni časi konstrukcije.....	50
3.2.3	Faktorji participacije in efektivne mase.....	51
3.2.4	Vektorji pomikov in potresnih sil na konstrukcijo.....	52
3.2.5	Vektorji pomikov in potresnih sil na makroelemente.....	53
3.2.6	Vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil.....	54
4	PREGLED UKAZOV PROGRAMA.....	55
4.1	Pregled ukazov za vršitev analize.....	55
4.1.1	Definiranje globalnih podatkov.....	56
4.1.2	Definiranje makroelementov.....	57
4.1.3	Tvorjenje togostne matrike konstrukcije.....	62
4.1.4	Definiranje etažnih mas konstrukcije.....	63
4.1.5	Račun lastnega nihanja.....	63
4.1.6	Definiranje spektra pospeškov.....	64
4.1.7	Pomiki konstrukcije.....	65
4.1.8	Pomiki makroelementov.....	66
4.1.9	Potresne sile na konstrukcijo.....	66
4.1.10	Potresne sile na makroelemente.....	67
4.1.11	Notranje sile.....	67
4.2	Pregled ukazov za prikazovanje rezultatov.....	68
4.2.1	Risanje nihajnih oblik konstrukcije.....	69
4.2.2	Vrednosti v spektru pospeškov.....	69
4.2.3	Risanje pomikov konstrukcije.....	69

4.2.4	Risanje pomikov makroelementov	69
4.2.5	Risanje notranjih sil	70
5	PRIMERJAVA S PROGRAMOM SAP 2000	71
5.1	Štirinadstropna dvojnosiometrična konstrukcija	71
5.1.1	Opis konstrukcije	71
5.1.2	Obtežba konstrukcije	71
5.1.3	Vnos podatkov o konstrukciji in makroelementih	72
5.1.4	Izpis podatkov o konstrukciji in makroelementih	73
5.1.5	Vnos podatkov o masah konstrukcije.....	74
5.1.6	Lastno nihanje konstrukcije.....	75
5.1.7	Spekter pospeškov	77
5.1.8	Pomiki konstrukcije	80
5.1.9	Pomiki Makroelementov.....	82
5.1.10	Potresne sile na konstrukcijo in makroelemente.....	84
5.1.11	Notranje sile	84
5.1.12	Izris notranjih sil	86
5.2	Štirietažna nesimetrična konstrukcija	92
5.2.1	Opis konstrukcije	92
5.2.2	Obtežba konstrukcije	93
5.2.3	Razultati analize	93
5.2.4	Izris notranjih sil	95
6	ZAKLJUČEK.....	98
	VIRI	99

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Ukazi za vršitev analize	56
Preglednica 2: Vhodni podatki funkcije <i>GlobalniPodatki</i>	57
Preglednica 3: Vhodni podatki funkcije <i>Okvir</i>	58
Preglednica 4: Vhodni podatki funkcije <i>Stena</i>	59
Preglednica 5: Vhodni podatki funkcije <i>StenaNaStebrih</i>	59
Preglednica 6: Vhodni podatki funkcije <i>StenaZOdprtinami</i>	60
Preglednica 7: Vhodni podatki funkcije <i>Jedro</i>	60
Preglednica 8: Izhodni podatki funkcij makroelementov	61
Preglednica 9: Izhodni podatki funkcije <i>Konstrukcija</i>	62
Preglednica 10: Vhodni podatki funkcije <i>Mase</i>	63
Preglednica 11: Izhodni podatki funkcije <i>LastnoNihanje</i>	64
Preglednica 12: Vhodni podatki funkcije <i>SpekterPospekov</i>	64
Preglednica 13: Izhodni podatki funkcije <i>PomikiKonstrukcije</i>	65
Preglednica 14: Izhodni podatki funkcije <i>PomikiMakroelementov</i>	66
Preglednica 15: Izhodni podatki funkcije <i>PotresneSileNaKonstrukcijo</i>	66
Preglednica 16: Izhodni podatki funkcije <i>PotresneSileNaMakroelemente</i>	67
Preglednica 17: Ukazi za prikazovanje rezultatov	68
Preglednica 18: Nihajni časi za stavbo z štirimi etažami, (s).....	77
Preglednica 19: Nihajni časi za stavbo z dvajsetimi etažami, (s)	78
Preglednica 20: Dejanski pomiki konstrukcije, (cm, rad)	82
Preglednica 21: Upogibni momenti M_z v jedru 2	85
Preglednica 22: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 2.....	85
Preglednica 23: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 3.....	85
Preglednica 24: Nihajni časi konstrukcije (s)	93
Preglednica 25: Pomiki konstrukcije iz elastične analize (cm, rad).....	94
Preglednica 26: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 5	94
Preglednica 27: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 6	95

KAZALO SLIK

Slika 1: Koordinatni sistem konstrukcije in koordinatni sistemi makroelementov.....	3
Slika 2: Dinamični modeli makroelementov	4
Slika 3: Prostorski linijski končni element (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str.33)	5
Slika 4: Ravninski linijski končni element	6
Slika 5: Prečka stene s togima odsekoma (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str. 87)	8
Slika 6: Podatki za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji.....	10
Slika 7: Dvoetažni okvir z odstranjenima elementoma 5 in 12	10
Slika 8: Podatki za primer dvoetažne stene	11
Slika 9: Podatki za primer dvoetažne stene na stebrih	12
Slika 10: Podatki za steni z odprtiniami preko treh etaž.....	13
Slika 11: Podatki za jedro preko dveh etaž.....	14
Slika 12: Razdelitev togostne matrike v skladu z znanimi in neznanimi pomiki za primer okvirja s tremi polji in dvema etažama	15
Slika 13: Statični in dinamični model dvoetažnega okvirja.....	16
Slika 14: Horizontalni pomiki vozlišč kot edine upoštevane prostostne stopnje v kondenzirani matriki okvirja	17
Slika 15: Vozliščne sile v prvi etaži zaradi enotskih pomikov	18
Slika 16: Tvorjenja togostne matrike okvirja s tremi polji in dvema etažama ob upoštevanju enakosti etažnih pomikov.....	19
Slika 17: Prehod iz ravninskega v prostorski model dvoetažnega okvirja	19
Slika 18: Koordinate strižnih središč in orientiranost makroelementov 1, 4 in 7 konstrukcije na sliki 2	22
Slika 19: Podatki o masah za primer dvoetažne stavbe	24
Slika 20: Primer neujemanja težišča mas z izhodiščem globalnega koordinatnega sistema	25
Slika 21: Oblika projektnega speška pospeškov S_a	27
Slika 22: Enoetažni okvir z enim poljem	29
Slika 23: Obremenitev statičnega modela makroelementov	29

Slika 24: Elastično vpeta prečka v sistemu stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč.....	30
Slika 25: Shema togostnih matrik elementov v levem vozlišču (zgoraj) in desnem vozlišču (spodaj).....	30
Slika 26: Neodvisni sistem stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč	30
Slika 27: Shema matrike neodvisnega sistema stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč.....	31
Slika 28: Pomiki levega in desnega vozlišča v primeru osno toge prečke	32
Slika 29: Shematičen prikaz izmika mas.....	37
Slika 30: Shema zaporedja izvrševanja funkcij.....	39
Slika 31: Shema odvisnosti glavnih globalnih spremenljivk	40
Slika 32: Sistem stebrov za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji	41
Slika 33: Shema togostne matrike stebrov C za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji	42
Slika 34: Sistem prečk za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji.....	43
Slika 35: Shema togostne matrike prečk B za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji	43
Slika 36: Tvorjenje togostne matrike K_m za primer polnega dvoetažnega okvirja s tremi polji.....	44
Slika 37: Steber 1 in 2 stene na stebrih.....	45
Slika 38: Shema togostne matrike stebrov C stene na stebrih.....	45
Slika 39: Stena preko prve in druge etaže za primer stene na stebrih s tremi etažami..	46
Slika 40: Shema togostne matrike sten W za primer stene na stebrih s tremi etažami...	46
Slika 41: Togi prečki modela stene na stebrih	47
Slika 42: Shema togostne matrike prečk B za steno na stebrih s tremi etažami	47
Slika 43: Tvorjenje togostne matrike K_m za primer stene na stebrih s tremi etažami....	48
Slika 44: Jedro prek dveh etaž	48
Slika 45: Shema matrike dvoetažnega jedra.....	49
Slika 46: Shema trirazsežnega seznama matrik makroelementov.....	50
Slika 47: Shema togostne in masne matrike konstrukcije	50
Slika 48: Shema trirazsežnega seznama vektorjev nihajnih oblik za primer dvoetažne konstrukcije.....	51

Slika 49: Shema vektorja nihajnih časov za primer dvoetažne konstrukcije.....	51
Slika 50: Shema seznama faktorjev participacije in efektivnih mas za primer dvoetažne konstrukcije.....	52
Slika 51: Shema seznama vektorjev pomikov in potresnih sil za primer dvoetažne konstrukcije.....	52
Slika 52: Shema seznama vektorjev pomikov makroelementov za primer dvoetažne konstrukcije.....	53
Slika 53: Shema seznama vektorjev potresnih sil na makroelemente za primer dvoetažne konstrukcije.....	54
Slika 54: Tloris konstrukcije in dimenzije stebrov in prečk.....	72
Slika 55: Tloris obravnavane konstrukcije in podatki o makroelementih.....	74
Slika 56: Osnovni podatki o tlorisu konstrukcije	75
Slika 57: Grafični prikaz prve nihajne oblike konstrukcije.....	76
Slika 58: Grafični prikaz tretje nihajne oblike konstrukcije	76
Slika 59: Vrednosti v spektru pospeškov za prvih devet nihajnih oblik	79
Slika 60: Vpliv nihajnih oblik na pomike konstrukcije	79
Slika 61: Dejanski pomiki konstrukcije – kombinacija SRSS.....	80
Slika 62: Dejanski pomiki konstrukcije – kombinacija po Evrokodu 8.....	81
Slika 63: Dejanski pomiki jedra 2 in okvirja 2 – kombinacija SRSS	83
Slika 64: Osne sile v vogalnem stebru okvirjev 2 in 3 zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri X globalnega koordinatnega sistema	86
Slika 65: Upogibni momenti M_z in M_y v jedru 2, EAVEK 2007, model 3.....	87
Slika 66: Upogibni momenti M_z in M_y v jedru 2, SAP 2000, model 3	87
Slika 67: Upogibni momeneti M_z okvirju 2, EAVEK 2007, model 3.....	88
Slika 68: Upogibni momeneti M_z okvirju 2, SAP 2000, model 3	88
Slika 69: Osne sile N_x okvirju 2, EAVEK 2007, model 3, smer X	89
Slika 70: Osne sile N_x okvirju 2, SAP 2000, model 3, smer X.....	89
Slika 71: Upogibni momeneti M_z v okvirju 3, EAVEK 2007, model 3.....	90
Slika 72: Upogibni momeneti M_z v okvirju 3, SAP 2000, model 3	90
Slika 73: Osne sile N_x v okvirju 3, EAVEK 2007, model 3, smer X	91
Slika 74: Osne sile N_x v okvirju 3, SAP 2000, model 3, smer X.....	91
Slika 75: Tloris konstrukcije in elementov.....	92

Slika 76: Upogibni momenti M_z v okvirju 5, EAVEK 2007.....	96
Slika 77: Upogibni momenti M_z v okvirju 5, SAP 2000	96
Slika 78: Upogibni momenti M_z v okvirju 6, EAVEK 2007.....	97
Slika 79: Upogibni momenti M_z v okvirju 6, SAP 2000	97

1 UVOD

Program EAVEK je razvil profesor Fajfar in je namenjen elastični analizi večnadstropnih konstrukcij pri potresni obtežbi. Prednost programa EAVEK pred ostalimi programi je minimalno število potrebnih podatkov in enostavnost računskega modela konstrukcije in zato kratek računski čas, slabost pa je predvsem zastarel prikaz rezultatov, ter nekatere poenostavitve, ki so v novih programih že odpravljene. Nova verzija programa EAVEK sloni na enaki teoriji kot originalni program EAVEK, vendar z nekaj novostmi, ki jih zahteva Evrokod 8.

Nov verzijo programa smo imenovali EAVEK 2007. Čeprav bi bil program z nekaterimi dopolnitvami lahko tržno zanimiv, je trenutno izdelan predvsem kot didaktično orodje in je namenjen študentom pri predmetu Dinamika gradbenih konstrukcij. Zasnovan je tako, da se vnos podatkov o konstrukciji in računski analiza izvajata po korakih. Zato mora uporabnik programa EAVEK 2007 poznati vse stopnje potresne analize konstrukcij. V prvih treh korakih potresne analize se izvede dinamična analiza, v zadnjem pa račun notranjih sil v konstrukciji:

- korak 1: Določitev makroelementov in konstrukcije. Rezultat so togostne matrike makroelementov in konstrukcije.
- korak 2: Določitev etažnih mas in masnih vztrajnostnih momentov. Izračuna se masna matrika in lastno nihanje konstrukcije.
- korak 3: Določitev potresne obtežbe (spekter pospeškov). Izvede se modalna analiza.
- korak 4: Prehod na statični model. Rezultat so notranje sile v makroelementih.

Rezultati analize se lahko preverjajo po vsakem koraku analize, omogočen pa je tudi grafični prikaz rezultatov. Možno je izrisati tloris konstrukcije in naris vseh makroelementov v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Grafično lahko predstavimo nihajne oblike, vrednosti v spektru pospeškov, vpliv posameznih nihajnih oblik na pomike, premike konstrukcije in premike ter notranje statične količine makroelementov.

2 TEORETIČNE OSNOVE

V tem poglavju so predstavljene teoretične osnove, ki so bile upoštevane pri razvoju programa. Večina teorije je povzeta po Fajfarju (1984) in je uporabljena v programu EAVEK (1989), del teorije pa je povzet po standardu Evrokod 8. V novi verziji programa EAVEK je zaenkrat na voljo le modalna analiza, dodane pa so nekatere novosti. Tako je možno notranje statične količine računati na vseh konstrukcijskih elementih, ki so povezani v makroelement, saj so togostne matrike makroelementov sestavljene iz togostnih matrik linijskega elementa (Lutar, B., Duhovnik, J., 2004). Avtomatično se preverja ali se upoštevajo tlorisna pravilnost stavbe, vpliv teorije drugega reda in slučajna ekscentričnost mase, kot to zahteva standard Evrokod 8 (CEN, 200.).

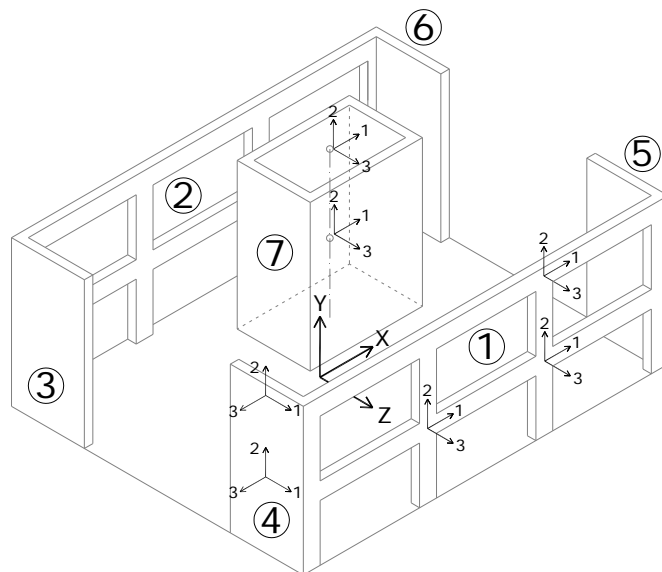
Osnovne predpostavke programa EAVEK, ki temelji na psevdotridimenzionalnem računskem modelu, so naslednje:

- konstrukcija je elastična
- pomiki so majhni
- medetažne plošče so popolnoma toge v svoji ravnini in nimajo togosti pravokotno na svojo ravnino
- konstrukcija je sestavljena iz makroelementov, ki so med seboj povezani samo s ploščami
- pri horizontalni obtežbi imajo bistven vpliv samo pomiki in zasuki v horizontalnih ravninah v višinah etaž, zato so v dinamični analizi samo ti premiki upoštevani kot prostostne stopnje
- mase in horizontalna obtežba so koncentrirani na nivojih medetažnih plošč

2.1 Računski model

Psevdotridimenzionalni model konstrukcije je sestavljen iz vrste tako imenovanih makroelementov (podkonstrukcij, npr. ravninskih okvirov, sten z odprtinami, jeder), ki so

lahko poljubno razvrščeni in zasukani v prostoru, ki je definiran z globalnim koordinatnim sistemom X , Y in Z (Slika 1).



Slika 1: Koordinatni sistem konstrukcije in koordinatni sistemi makroelementov

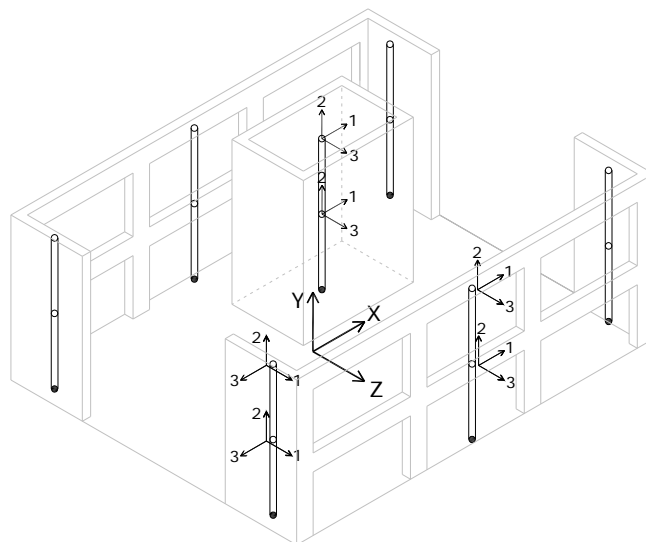
Model se imenuje psevdotridimenzionalen, ker vertikalni pomiki niso eksplicitno upoštevani. Iz tega razloga pri prostorskih konstrukcijah ni zadoščeno osni povezanosti v stebrih, ki istočasno pripadajo več okvirom, ali v stikajočih se stenah. V višini etaž so makroelementi medsebojno povezani z medetažnimi ploščami. Za te je predpostavljeno, da so neskončno toge v svoji ravnini in, da nimajo togosti pravokotno na to ravnino, kar pomeni da upogibni zasuki enega elementa ne vplivajo na zasuke drugega elementa. Prav tako je predpostavljeno, da je masa konstrukcije koncentrirana na nivojih etaž, ker so eksplicitno upoštevane le najbolj bistvene prostostne stopnje in sicer v smereh glavnega koordinatnega sistema (po dva horizontalna pomika in torzijski zasuk v vsaki etaži). Ostale prostostne stopnje so bodisi togo povezane z bistvenimi prostostnimi stopnjami (horizontalni pomiki in torzijski zasuki poljubnih točk na ploščah) zaradi predpostavke o togosti plošč, bodisi eliminirane pri kondenzaciji matrik makroelementov (npr. zasuki vozlišč okvirov).

Računski dinamični model makroelementa je definiran z lokalnim koordinatnim sistemom, ki ga tvorijo osi 1, 2 in 3. Enako so orientirane in označene osi lokalnih koordinatnih sistemov posameznih vozlišč makroelementa. Vsak linijski element, ki tvori makroelement ima lokalni koordinatni sistem, definiran z osmi x , y in z . Os x teče vzdolž posameznega elementa in sicer

od začetnega proti končnemu vozlišču. Ostali dve osi sta orientirani pravokotno na os v smereh glavnih vztrajnostnih osi prereza. Dejanski makroelementi so lahko ravninski (npr. ravninski okvir) ali prostorski (npr. jedro). Pri prostorskih makroelementih upoštevamo konstantno smer glavnih osi in položaj strižnega središča. Če izberemo lokalni koordinatni sistem tako, da ima izhodišče v strižnem središču, osi koordinatnega sistema pa se ujemajo z glavnimi vztrajnostnimi osmi, ima togostna matrika makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu $[K_l]$ obliko (Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 468):

$$[K_l] = \begin{bmatrix} [k_{11}] & 0 & 0 \\ 0 & [k_{33}] & 0 \\ 0 & 0 & [k_{\varphi\varphi}] \end{bmatrix}$$

Matrika $[K_l]$ predstavlja kondenzirano togostno matriko makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu z upoštevanjem bistvenih prostostnih stopenj. Podmatrike $[k_{11}]$, $[k_{33}]$, $[k_{\varphi\varphi}]$ so kondenzirane matrike, ki povezujejo sile in pomike v smereh 1 in 3 ter torzijske momente in zasuke okrog osi 2 (Slika 2). Iz zgradbe matrike $[K_l]$ je razvidno, da so prostostne stopnje v vsaki od treh smeri medsebojno neodvisne, saj so vse izvendiagonalne podmatrike enake nič.



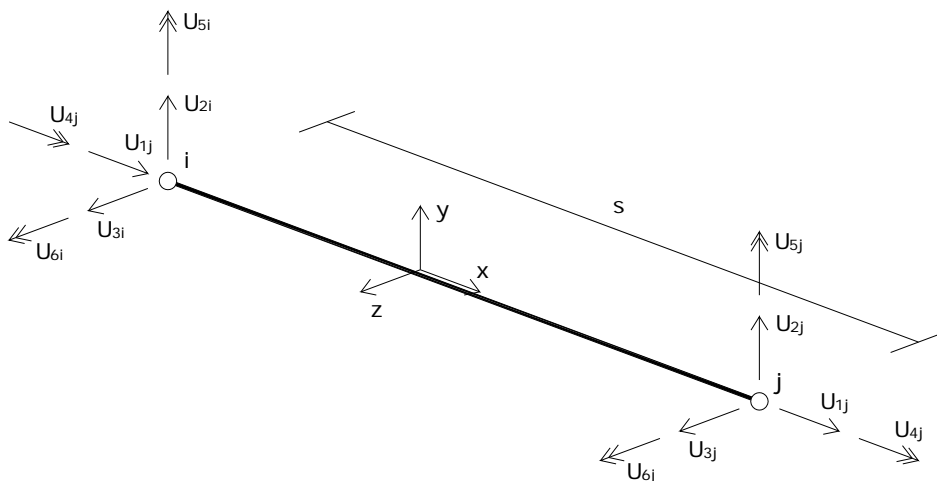
Slika 2: Dinamični modeli makroelementov

Pri makroelementih, kjer se težišče in strižno središče ne ujemata, izberemo lokalni koordinatni sistem tako, da ima izhodišče v strižnem središču, osi koordinatnega sistema so

zasukane v smeri glavnih osi, vztrajnostni momenti in ostale karakteristike, pa se nanašajo na težišče prereza makroelementa. Položaj ravninskega makroelementa v konstrukciji določa center togosti, ki se nahaja nekje v ravnini samega makroelementa. Predpostavljeno je, da ravninski makroelementi nimajo togosti v smeri pravokotno na svojo ravnino, zato je pomembna le razdalja od izhodišča globalnega koordinatnega sistema v smeri pravokotno do ravninskega makroelementa.

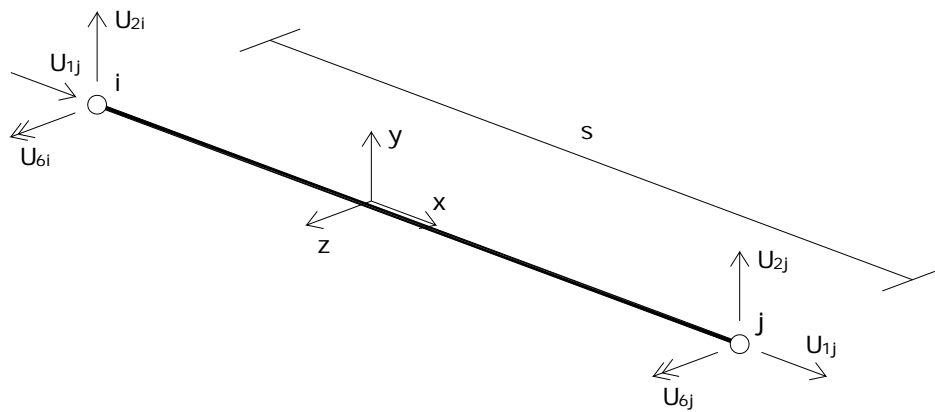
2.2 Linijski element

Makroelementi so sestavljeni iz linijskih elementov. Za prostorske makroelemente (jedro) je uporabljen prostorski linijski element, za ravninske makroelemente pa ravninski linijski element. Prostorski linijski element (Slika 3) ima v vsakem vozlišču šest prostostnih stopenj: tri pomike in tri zasuke. Tudi vozliščnih sil je v vsakem vozlišču šest: tri sile in trije momenti. Za krajevni koordinatni sistem izberemo Kartezijev desnosučni koordinatni sistem, pri čemer je os x usmerjena od začetnega proti končnemu vozlišču, osi y in z pa sta usmerjeni v smereh glavnih vztrajnostnih osi prereza elementa.



Slika 3: Prostorski linijski končni element (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str 33)

Ravninski linijskih element (Slika 4) ima tri prostostne stopnje v vsakem vozlišču, to je dva pomika in en zasuk. Ti linijski elementi so uporabljeni za modeliranje ravninskih makroelementov kot so okvir, stena, stena na stebrih in stena z odprtinami.



Slika 4: Ravninski linijski končni element

Togostna matrika uporabljenih linijskih elementov je določena po tehnični teoriji upogiba in St.Venantove torzije. Predpostavljeno je, da je celotna konstrukcija iz enakega materiala. Splošna togostna matrika ravnega prostorskega linijskega elementa je povzeta po knjigi Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str. 45):

$$[k] = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 & 0 & 0 & c_y & 0 & -b_y & 0 & 0 & 0 & c_y \\ 0 & 0 & b_z & 0 & -c_z & 0 & 0 & 0 & -b_z & 0 & -c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_z & 0 & d_z & 0 & 0 & 0 & c_z & 0 & e_z & 0 \\ 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & d_y & 0 & -c_y & 0 & 0 & 0 & e_y \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_y & 0 & 0 & 0 & -c_y & 0 & b_y & 0 & 0 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & -b_z & 0 & c_z & 0 & 0 & 0 & b_z & 0 & c_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_z & 0 & e_z & 0 & 0 & 0 & c_z & 0 & d_z & 0 \\ 0 & c_y & 0 & 0 & 0 & e_y & 0 & -c_y & 0 & 0 & 0 & d_y \end{bmatrix}$$

Koeficient k_{ij} v togostni matriki linijskega elementa predstavlja člen v i -ti vrstici in j -tem stolpcu. Pomeni silo v smeri prostostne stopnje i , zaradi enotinega pomika v smeri prostostne stopnje j .

Členi togostne matrike se izražajo na sledeč način:

$$a = \frac{E \cdot A}{s} ; t = \frac{G \cdot I_t}{s}$$

$$b_y = \frac{12 \cdot E \cdot I_z}{s^3 \cdot (1 + \Phi_y)} ; b_z = \frac{12 \cdot E \cdot I_y}{s^3 \cdot (1 + \Phi_z)}$$

$$c_y = \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{s^2 \cdot (1 + \Phi_y)} ; c_z = \frac{6 \cdot E \cdot I_y}{s^2 \cdot (1 + \Phi_z)}$$

$$d_y = \frac{(4 + \Phi_y) \cdot E \cdot I_z}{s \cdot (1 + \Phi_y)} ; d_z = \frac{(4 + \Phi_z) \cdot E \cdot I_y}{s \cdot (1 + \Phi_z)}$$

$$e_y = \frac{(2 - \Phi_y) \cdot E \cdot I_z}{s \cdot (1 + \Phi_y)} ; e_z = \frac{(2 - \Phi_z) \cdot E \cdot I_y}{s \cdot (1 + \Phi_z)}$$

S členoma Φ_y in Φ_z je upoštevano zmanjšanje togosti zaradi striga. Definirana sta z izrazi:

$$\Phi_y = \frac{12 \cdot E \cdot I_z}{G \cdot A_y^s \cdot s^2} \quad \text{in} \quad \Phi_z = \frac{12 \cdot E \cdot I_y}{G \cdot A_z^s \cdot s^2}$$

Karakteristike materiala in prerezov elementov so naslednje:

- E elastični modul materiala konstrukcije
- G strižni modul materiala konstrukcije
- A površina prereza elementa
- A_y^s strižna površina prereza elementa v smeri osi y
- A_z^s strižna površina prereza elementa v smeri osi z
- I_y vztrajnostni moment prereza elementa okoli osi y
- I_z vztrajnostni moment prereza elementa okoli osi z
- I_t vztrajnostni torzijski moment prereza elementa
- s dolžina linijskega elementa

2.3 Togostna matrika ravninskega linijskega elementa s togimi odseki

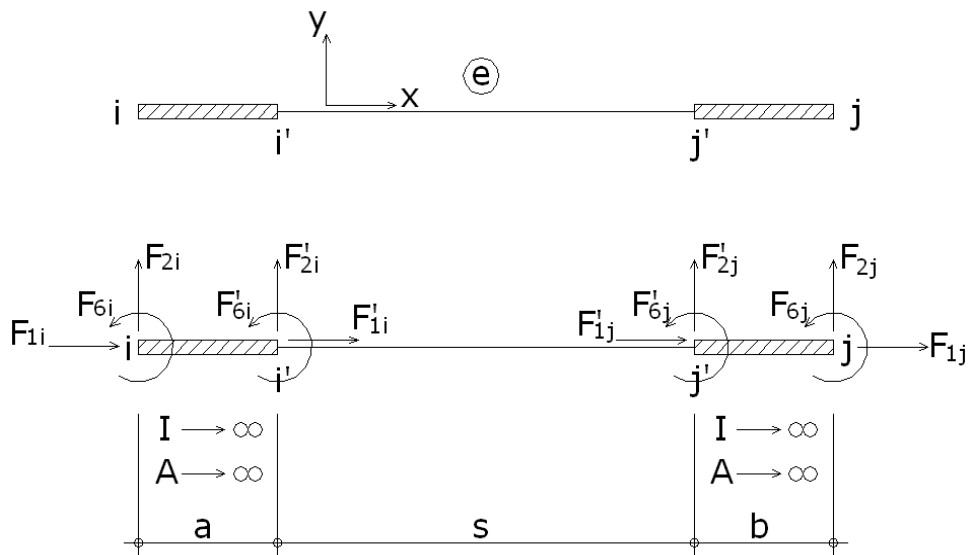
Stena z odprtinami je modelirana z nadomestnim okvirom, kjer je prečka na območju med osjo in robom stene, kjer se priključi na steno, neskončno toga ($A \rightarrow \infty$, $I \rightarrow \infty$) (Slika 6). Prečko in toga odseka vzamemo kot element za katera podamo togostno podmatriko $[K_e]$ končnega vozlišča j (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str. 88):

$$[K_e] = [H]^T \cdot [K'_e] \cdot [H]$$

$$[H] = \begin{bmatrix} [A] & \cdot \\ \cdot & [B] \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & a \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & -b \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix},$$

kjer $[H]$ pomeni relacijsko matriko, $[K_e]$ togostno matriko prečke s togima odsekoma in $[K'_e]$ matriko ravninskega linijskega elementa (prečke) brez togih odsekov. Matriki $[A]$ in $[B]$ sta podamatriki relacijske matrike, ki se nanašata na levi oziroma desni togi odsek prečke.



Slika 5: Prečka stene s togima odsekoma (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str. 87)

2.4 Račun togostnih matrik makroelementov in konstrukcije

Togostne matrike linijskih elementov uporabimo, da sestavimo celotno togostno matriko makroelementa, ki jo je potrebno kondenzirati. To pomeni, da zmanjšamo število prostostnih stopenj na samo bistvene prostostne stopnje, ki so pomiki etaž v nosilni smeri ravninskega makroelementa ali horizontalni komponenti pomikov etaž in zasuki etaž prostorskega makroelementa. Kondenzirane togostne matrike makroelementov uporabimo za določitev globalne togostne matrike konstrukcije. Pri kreiranju globalne togostne matrike konstrukcije so uporabljene nekatere omejitve. Predpostavljeno je, da je celotna konstrukcija zgrajena iz makroelementov, ki so enakega materiala in da etažne višine vseh makroelementov sovpadajo.

Globalni podatki za konstrukcijo so sledeči:

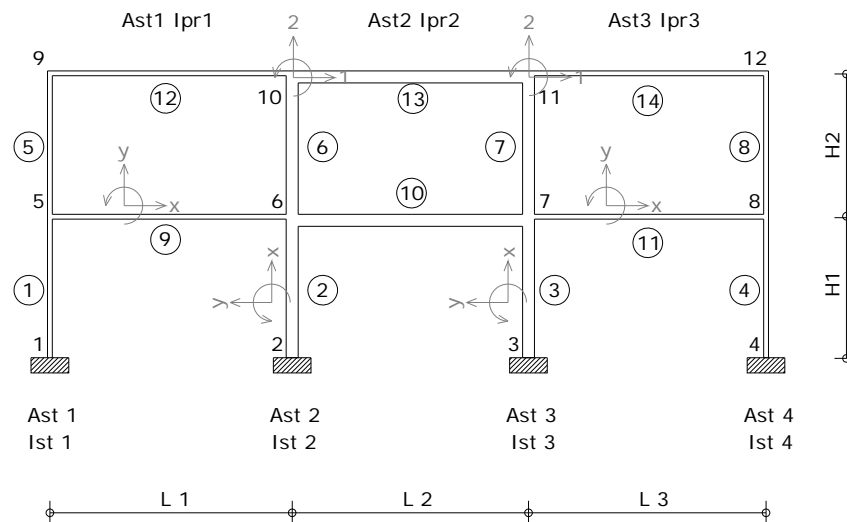
- višine etaž konstrukcije oziroma makroelementov (H_i)
- elastični modul materiala konstrukcije (E)
- Poissonov količnik materiala konstrukcije (ν)

V nadaljevanju so opisane nekatere omejitve in predpostavke, ki so upoštevane pri tvorjenju togostnih matrik različnih makroelementov. Za lažje razumevanje so makroelementi prikazani na primeru dvoetažne konstrukcije (slika 2), ki je sestavljena iz dveh okvirov (makroelementa 1 in 2), štirih sten (makroelementi 3, 4, 5 in 6) in enega jedra (makroelement 7).

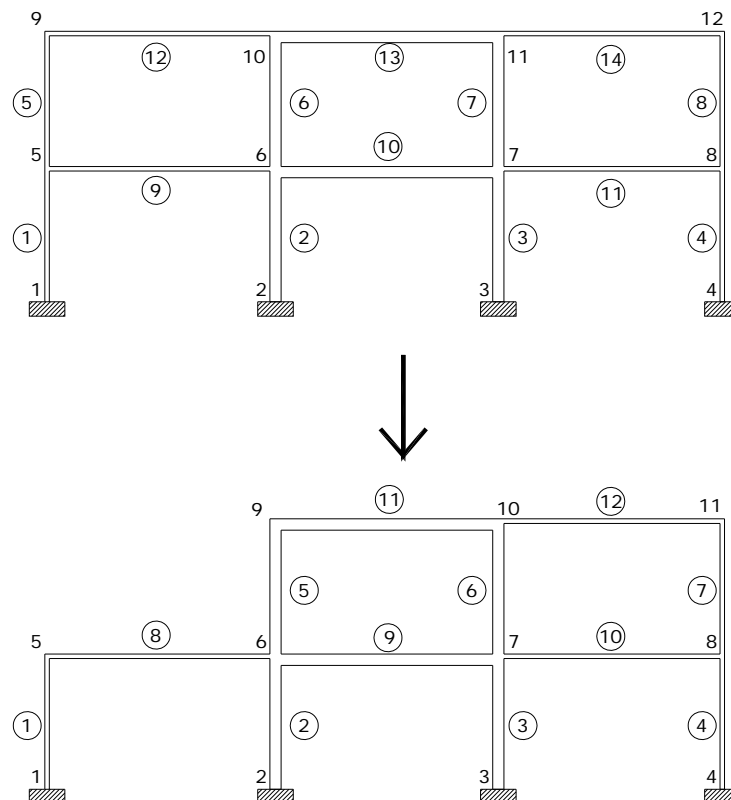
2.4.1 Ravninski okvir

Upoštevane so deformacije zaradi upogibnih momentov in prečnih ter osnih sil. Upošteva se, da so prerezi stebrov in prečk enaki po višini in se lahko razlikujejo v okviru posamezne etaže. Oštevilčenje vozlišč in elementov poteka po vrsti od temeljev do zgornje etaže in sicer od leve proti desni, kot je simbolično prikazano na sliki 6. Stebri so oštevilčeni skladno z vozlišči. Vsak steber je označen z zaporedno številko začetnega vozlišča. Najprej so po vrsti oštevilčeni stebri nato prečke. Za modeliranje stebrov in prečk se uporabi model ravnega ravninskega linijskega elementa s po tremi prostostnimi stopnjami v vsakem vozlišču.

Osnovno določen okvir ima m polj in n etaž. To pomeni $(m + 1) \cdot n$ stebrov in $m \cdot n$ prečk. Posamezne elemente okvirja lahko odstranimo posebej. Na sliki 7 je prikazan dvoetažni okvir s tremi polji. Odstranjena sta prvi stebec in prva prečka v drugi etaži.



Slika 6: Podatki za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji



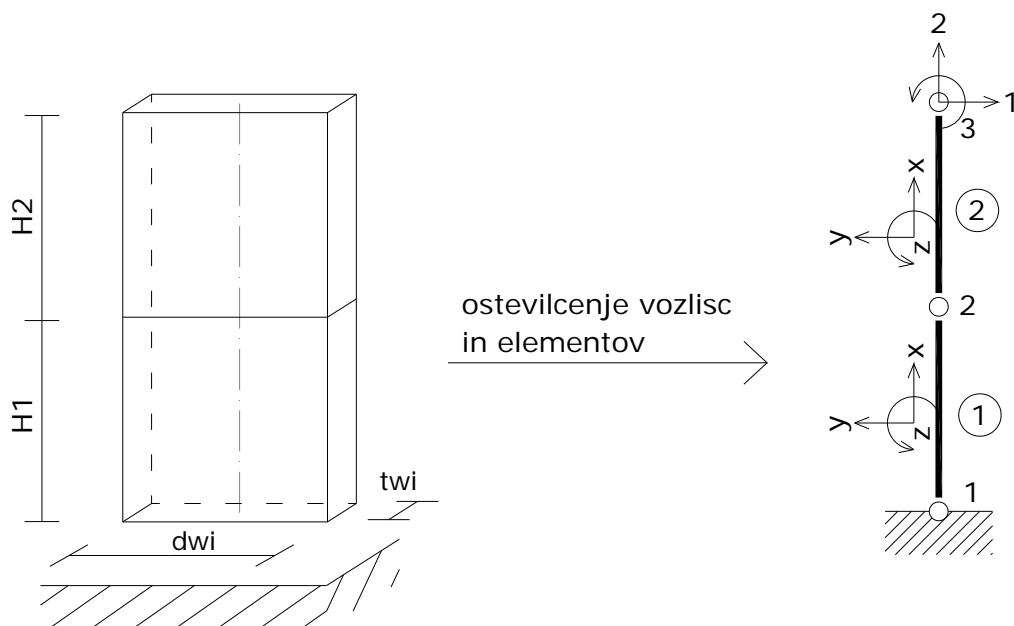
Slika 7: Dvoetažni okvir z odstranjenima elementoma 5 in 12

Vhodni podatki za okvir:

- Položaj okvirja v glavnem koordinatnem sistemu. Upošteva se center togosti na polovici celotne razdalje okvirja.
- Število polj okvirja
- Etaža objekta, do katerega sega okvir
- Dolžine polj okvirja
- Geometrijske karakteristike prerezov stebrov in prečk
- Zaporedne številke elementov, ki so odstranjeni iz osnovno definiranega okvirja

2.4.2 Stena brez odprtin

Upoštewane so upogibne in strižne deformacije. Prerez stene se lahko po etažah spreminja. Oštevilčenje vozlišč in elementov poteka po vrsti od temeljev do zgornje etaže (Slika 8). Posamezne stene v etažah so oštevilčene skladno z vozlišči.



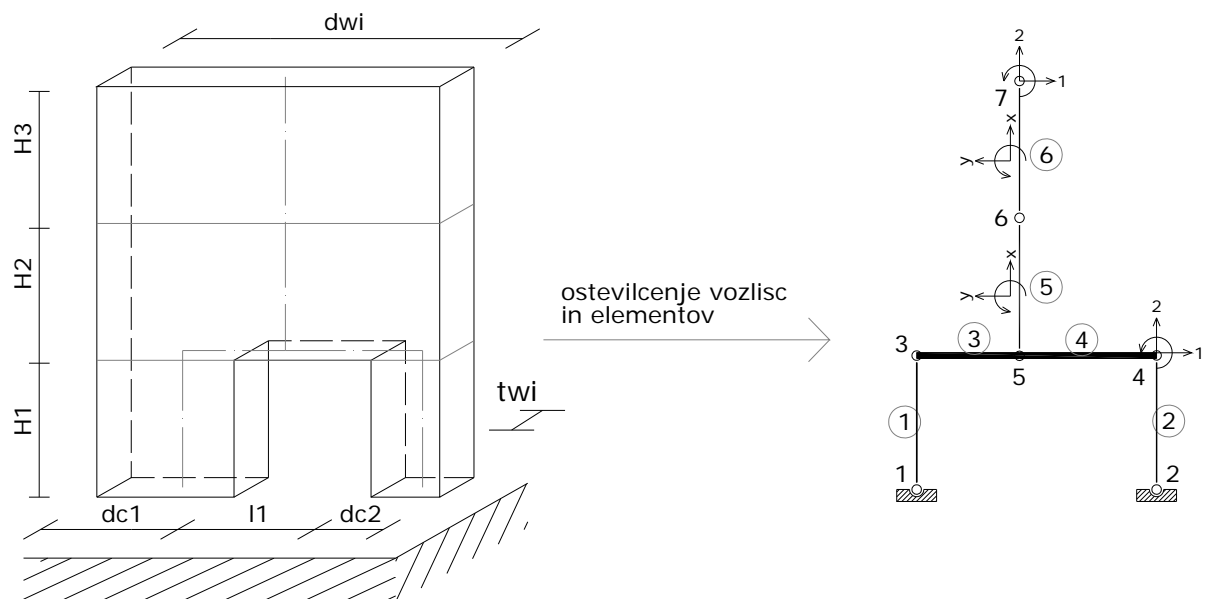
Slika 8: Podatki za primer dvoetažne stene

Vhodni podatki za steno:

- Položaj stene v glavnem koordinatnem sistemu
- Etaža objekta, do katerega sega stena
- Geometrijske karakteristike prerezov stene v posameznih etažah

2.4.3 Stena na stebrih

Stebri lahko potekajo samo preko prve etaže (Slika 9). Prečka je neskončno toga. Upoštevane so deformacije zaradi upogibnih momentov, prečnih in osnih sil. Prerez stene se lahko po etažah spreminja.



Slika 9: Podatki za primer dvoetažne stene na stebrih

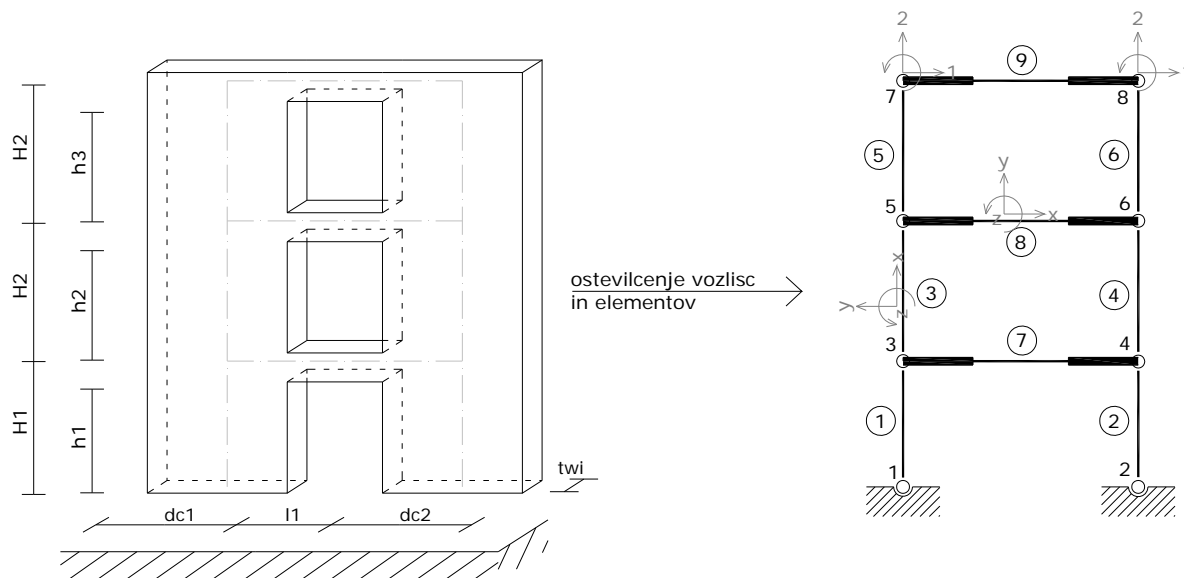
Vhodni podatki za steno na stebrih:

- Položaj stene v glavnem koordinatnem sistemu. Upošteva se center togosti na polovici celotne razdalje stene
- Etaža objekta, do katerega sega stena na stebrih
- Geometrijske karakteristike prerezov stebrov in odprtine v prvi in prerezov stene v višjih etažah

2.4.4 Stena z odprtinami

Prečke so modelirane kot linijski končni elementi s togimi odseki (Slika 10). Višine etaž se lahko spreminjajo. Osi posameznih sten ne smejo biti lomljene. Upoštevane so upogibne in strižne deformacije elementov. Oštevilčenje poteka po vrsti od temeljev do zgornje etaže in

sicer od leve proti desni. Stene so oštevilčene skladno z vozlišči. Vsaka stena je označena z zaporedno številko začetnega vozlišča. Najprej so po vrsti oštevilčene stene nato še prečke.



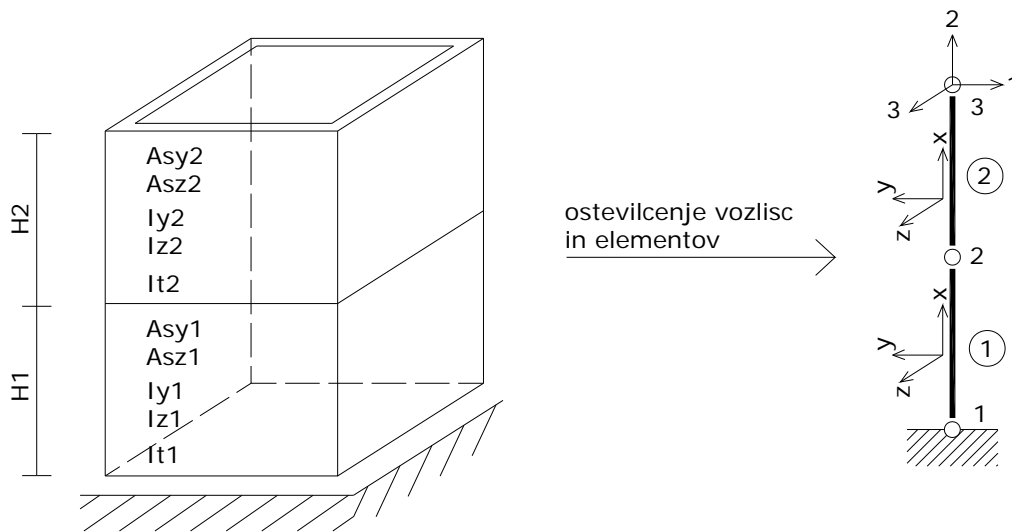
Slika 10: Podatki za steni z odprtinami preko treh etaž

Vhodni podatki za steno z odprtinami:

- Položaj stene v glavnem koordinatnem sistemu. Upošteva se center togosti na polovici celotne razdalje stene
- Število odprtin v steni
- Etaža objekta, do katerega sega stena
- Geometrijske karakteristike prerezov stene in odprtin v posameznih etažah
- Zaporedne številke elementov, ki so odstranjeni iz osnovno definirane stene

2.4.5 Jedro

Jedro je definirano kot prostorski makroelement, ki ga modeliramo z ravnim linijskim elementom s petimi prostostnimi stopnjami v vsakem vozlišču, to je pomika v smereh osi 1 in 3 ter zasuki okrog vseh treh osi (Slika 11). Oblika prereza ostane po deformaciji ohranjena. Predpostavljeno je, da so statične karakteristike po višini konstantne.



Slika 11: Podatki za jedro preko dveh etaž

Vhodni podatki za jedro:

- Položaj jedra v glavnem koordinatnem sistemu
- Etažo objekta, do katerega sega jedro
- Geometrijske karakteristike prereza jedra v posameznih etažah

2.4.6 Tvorjenje togostne matrike makroelementov

Togostno matriko makroelementa sestavimo z enostavnim seštevanjem matrik posameznih elementov, ki sestavljajo makroelement. Za račun pomikov prostih vozlišč moramo togostno matriko ustrezno reducirati. Pomike makroelementa razdelimo na znane in neznanе. Pomiki na mestu podpor U_z so znani in so nič, pomiki prostih vozlišč U_n pa so neznani. Z F_z so označene zunanje sile v vozliščih z znanimi pomiki, F_n pa označuje zunanje sile v vozliščih z neznanimi pomiki. Skladno s tem lahko razdelimo togostno matriko na štiri dele (Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije, str. 28):

$$\begin{bmatrix} K_{zz} & K_{zn} \\ K_{nz} & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_z \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_z \\ F_n \end{Bmatrix}$$

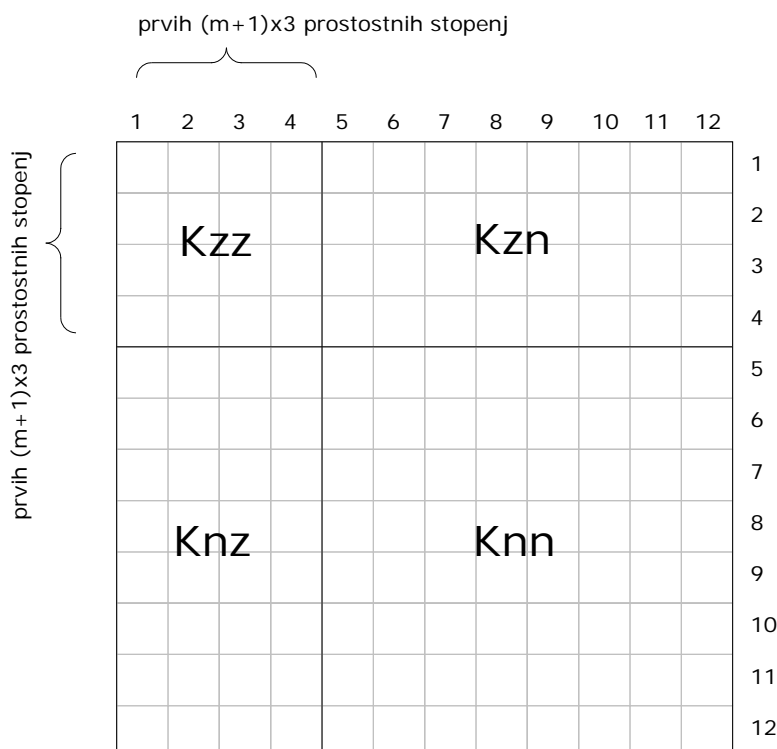
$$[K_{zz}] \cdot \{U_z\} + [K_{zn}] \cdot \{U_n\} = \{F_z\}$$

$$[K_{nz}] \cdot \{U_z\} + [K_{nn}] \cdot \{U_n\} = \{F_n\}$$

Ker obtežbe F_z ne poznamo in so pomiki podprtih vozlišč enaki nič, lahko zapišemo:

$$\{U_z\} = 0 \rightarrow \{U_n\} = [K_{nn}]^{-1} \cdot \{F_n\}$$

Zanimajo nas neznane sile in pomiki vozlišč. Zato je dovolj, da poznamo samo matriko $[K_{nn}]$. Na sliki 12 je shematičen prikaz tvorjenja matrike $[K_{nn}]$ za primer okvirja s tremi polji in dvema etažama.

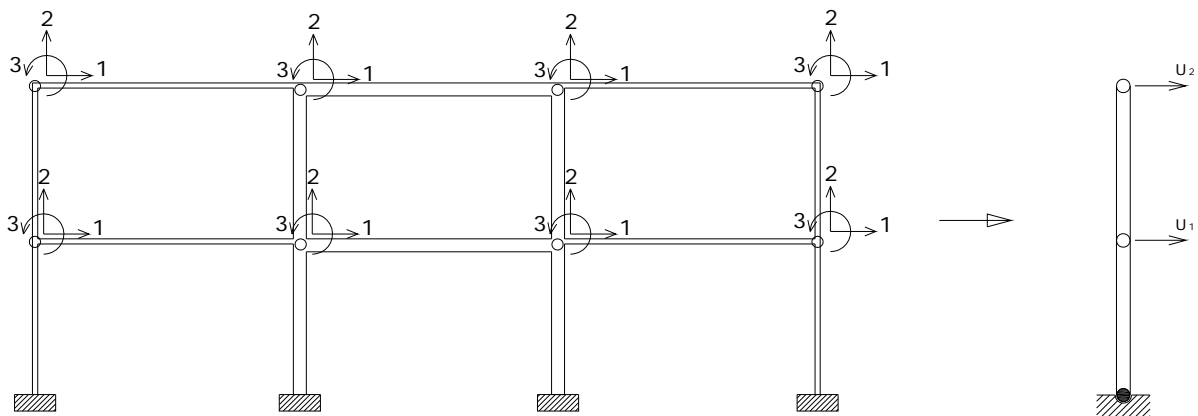


Slika 12: Razdelitev togostne matrike v skladu z znanimi in neznanimi pomiki za primer okvirja s tremi polji in dvema etažama

2.4.7 Zmanjšanje števila prostostnih stopenj – kondenziranje togostne matrike statičnega modela makroelementa K_{nn}

Modeli kompliciranih konstrukcij imajo zelo veliko število prostostnih stopenj. Pri konstrukciji pa nas največkrat zanima le vpliv nekaj najnižjih nihajnih oblik na katere vpliva le majhno število prostostnih stopenj. Nadalje velja, da lahko opišemo vztrajnostne karakteristike konstrukcije z mnogo enostavnejšim modelom kot pa elastične karakteristike. Prav tako zahteva določanje notranjih sil in napetosti natančnejši računski model, kot pa

določanje pomikov, saj so notranje sile funkcije odvodov pomikov. Zaradi navedenih razlogov sta uporabljena dva računski modela, statični in dinamični. S pomočjo izračunanih pomikov na dinamičnem modelu so izračunane notranje sile in napetosti na natančnejšem statičnem modelu. Prehod iz statičnega na enostavnejši dinamični model izvršimo tako, da eliminiramo vse nebitvene prostostne stopnje, to so tiste, ki so povezane z majhnimi vztrajnostnimi silami in kjer ne deluje zunanja obtežba. Na osnovne nihajne oblike vplivajo skoraj izključno le vztrajnostne sile v horizontalni smeri. Zato je dosežena zadostna natančnost, če upoštevamo samo horizontalne pomike etaž. Na sliki 13 je prikazano število prostostnih stopenj posebej za statični in dinamični model za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji.



Slika 13: Statični in dinamični model dvoetažnega okvirja

Enačba za kondenzirano togostno matriko se glasi (Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str.183):

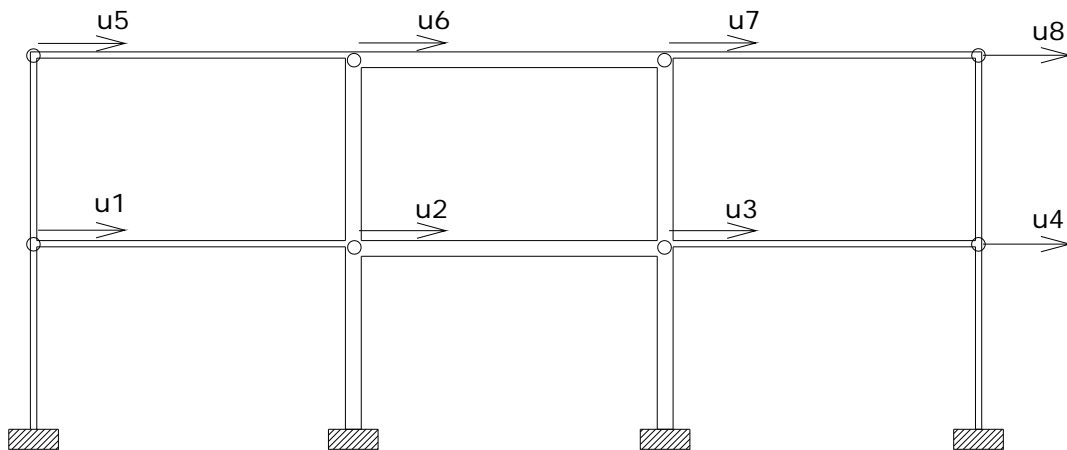
$$[K_c] = \left([K_{bb}] - [K_{bn}] \cdot [K_{nn}]^{-1} \cdot [K_{nb}] \right),$$

kjer je $[K_{bb}]$ togostna matrika, ki predstavlja zvezo med silami in pomiki v smereh bistvenih prostostnih stopenj, $[K_{bn}]$ matrika, ki predstavlja zvezo med silami v smereh bistvenih prostostnih stopenj in pomiki v smereh nebitvenih prostostnih stopenj, $[K_{nb}]$ matrika, ki predstavlja zvezo med silami v smereh nebitvenih prostostnih stopenj in pomiki v smereh bistvenih prostostnih stopenj in $[K_{nn}]$ togostna matrika, ki predstavlja zvezo med silami in pomiki v smereh nebitvenih prostostnih stopenj. Postopek kondenzacije togostne matrike se

imenuje statična kondenzacija. Postopek je točen, če za nadaljnji račun uporabljamo statično analizo po teoriji 1. reda in če ni obtežbe v smereh nebistvenih prostostnih stopenj. Napake ne naredimo tudi v primeru dinamične analize, če upoštevamo samo koncentrirane mase v bistvenih prostostnih stopnjah in če zanemarimo dušenje.

2.4.8 Upoštevanje predpostavke o enakosti etažnih pomikov

V kondenzirani togostni matriki makroelementa $[K_c]$ so eksplicitno upoštevane le bistvene prostostne stopnje, to so horizontalni pomiki vozlišč makroelementov. V primeru okvirja, stene z odprtini in stene na stebrih moramo matriko $[K_c]$ zaradi predpostavke o enakosti etažnih pomikov ustrezno reducirati. Na sliki 14 je prikazan dvoetažni okvir s tremi polji. V vsakem vozlišču je upoštevana ena prostostna stopnja, to je horizontalni pomik.



Slika 14: Horizontalni pomiki vozlišč kot edine upoštevane prostostne stopnje v kondenzirani matriki okvirja

Postopek redukcije je opisan za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji. Upoštevani so horizontalni pomiki v vsakem vozlišču. Kondenzirana togostna matrika $[K_c]$ obravnavanega okvirja je velikosti 8×8 . Označimo z F_{ij} silo s prijemališčem v i -ti etaži, ki je posledica, enotinih pomikov v j -ti etaži. Predpostavimo enotin pomik v prvi etaži, vsi ostali pomiki pa so enaki nič. Če označimo z f_{ij} silo v vozlišču i zaradi enotinega pomika v etaži j (glej sliko 15), lahko zapišemo:

$$f_{11} = k_{c11} \cdot u_1 + k_{c12} \cdot u_2 + k_{c13} \cdot u_3 + k_{c14} \cdot u_4 = k_{c11} + k_{c12} + k_{c13} + k_{c14} \quad (1)$$

$$f_{21} = k_{c21} \cdot u_1 + k_{c22} \cdot u_2 + k_{c23} \cdot u_3 + k_{c24} \cdot u_4 = k_{c21} + k_{c22} + k_{c23} + k_{c24} \quad (2)$$

$$f_{31} = k_{c31} \cdot u_1 + k_{c32} \cdot u_2 + k_{c33} \cdot u_3 + k_{c34} \cdot u_4 = k_{c31} + k_{c32} + k_{c33} + k_{c34} \quad (3)$$

$$f_{41} = k_{c41} \cdot u_1 + k_{c42} \cdot u_2 + k_{c43} \cdot u_3 + k_{c44} \cdot u_4 = k_{c41} + k_{c42} + k_{c43} + k_{c44} \quad (4)$$

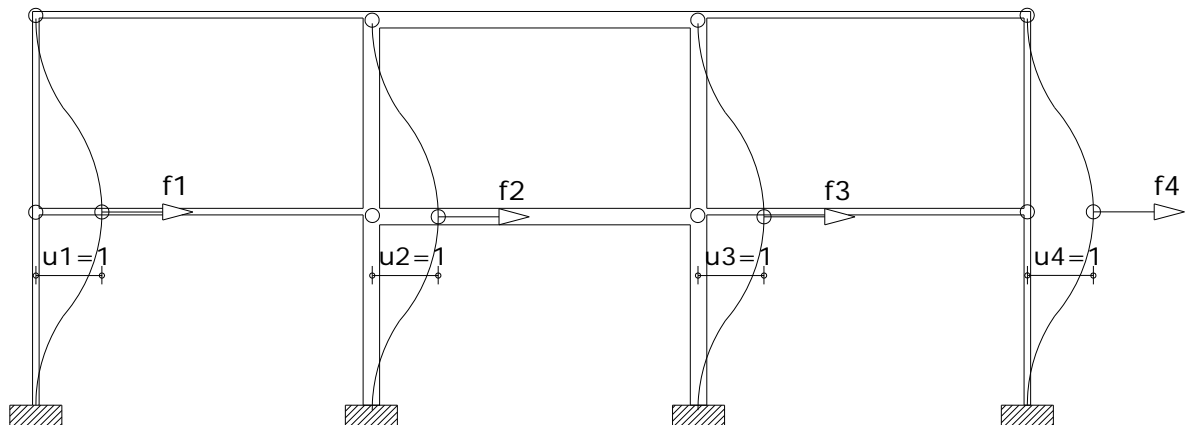
Celotna prečna sila v prvi etaži zaradi enotnega pomika v prvi etaži je določena z obrazcem:

$$F_{11} = f_{11} + f_{21} + f_{31} + f_{41} \quad (5)$$

Podobno se izračunajo tudi sile F_{12} , F_{21} in F_{22} . Kondenzirano togostno matriko ob upoštevanju predpostavke o enakosti etažnih pomikov označimo z $K_{c,e}$. Za primer okvirja s tremi polji in dvema etažama je tvorjenje matrike $K_{c,e}$ grafično prikazano na sliki 16 in ima obliko

$$K_{c,e} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

kjer F_{11} , F_{12} , F_{21} in F_{22} predstavljajo vsote koeficientov $k_{c,ij}$ v pripadajočem polju matrike K_c .



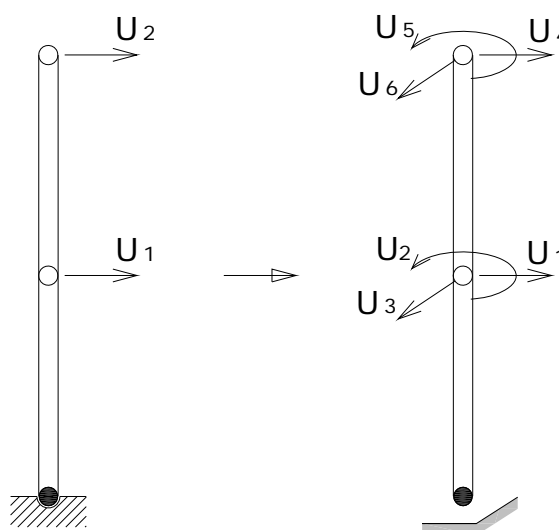
Slika 15: Vozliščne sile v prvi etaži zaradi enotskih pomikov

u1	u2	u3	u4	u5	u6	u7	u8	
Kc11	Kc12	Kc13	Kc14	Kc15	Kc16	Kc17	Kc18	u1
Kc21	Kc22	Kc23	Kc24	Kc25	Kc26	Kc27	Kc28	u2
Kc31	Kc32	Kc33	Kc34	Kc35	Kc36	Kc37	Kc38	u3
Kc41	Kc42	Kc43	Kc44	Kc45	Kc46	Kc47	Kc48	u4
Kc51	Kc52	Kc53	Kc54	Kc55	Kc56	Kc57	Kc58	u5
Kc61	Kc62	Kc63	Kc64	Kc65	Kc66	Kc67	Kc68	u6
Kc71	Kc72	Kc73	Kc74	Kc75	Kc76	Kc77	Kc78	u7
Kc81	Kc82	Kc83	Kc84	Kc85	Kc86	Kc87	Kc88	u8

Slika 16: Tvorjenja togostne matrike okvirja s tremi polji in dvema etažama ob upoštevanju enakosti etažnih pomikov

2.4.9 Kondenzirana togostna matrika v lokalnem koordinatnem sistemu

V dinamični analizi konstrukcije upoštevamo po tri prostostne stopnje v vsaki etaži, to sta pomika v horizontalnih smereh in zasuk okoli osi pravokotno na horizontalno ravnino. Temu tako je treba ustrezno razširiti kondenzirane togostne matrike ravninskih makroelementov (Slika 17).



Slika 17: Prehod iz ravninskega v prostorski model dvoetažnega okvirja

Če z N označimo število etaž konstrukcije, je razširjena kondenzirana togostna matrika makroelementa reda velikosti $3N \times 3N$. Razširjeno kondenzirano togostno matriko makroelementa poimenujemo togostna matrika makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu in jo označimo z K_l . Matrika K_l ima za primer okvirja, stene z odprtinami in stene na stebrih obliko:

$$[K_l] = \begin{bmatrix} K_{c,e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

kjer $K_{c,e}$ pomeni kondenzirano togostno matriko okvirja, stene z odprtinami ali stene na stebrih ob upoštevanjem enakosti etažnih pomikov.

2.4.10 Kondenzirana togostna matrika konstrukcije v globalnem koordinatnem sistemu konstrukcije

Matrike makroelementov K_l moramo za račun togostne matrike celotne konstrukcije izraziti v globalnem koordinatnem sistemu. V ta namen jih dvakrat transformiramo. Najprej zasukamo lokalni koordinatni sistem tako, da bodo njegove osi vzporedne z osmi globalnega sistema. V drugi fazi pa je treba premike v lokalnih koordinatnih sistemih izraziti s premiki v globalnem koordinatnem sistemu. Lokalni koordinatni sistem je lociran v togostnem središču makroelementa.

a) Zasuk koordinatnega sistema

Pri zasuku koordinatnega sistema za kot α okoli vertikalne osi velja naslednja enačba:

$$\{U_L\} = [T_R] \cdot \{U_L^*\} \quad (8)$$

$$[T_R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

kjer $\{U_L^*\}$ pomeni vektor pomikov makroelementa v globalnem koordinatnem sistemu, $[T_R]$ pomeni transformacijsko matriko zaradi zasuka makroelementa za kot α , $\{U_L\}$ pa vektor pomikov makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu. Pri večetažnih konstrukcijah moramo upoštevati premike vseh etaž. Vektorja pomikov in transformacijska matrika so ustrezno razširjeni:

$$\{U_L\} = \begin{bmatrix} U_{xL} \\ U_{zL} \\ U_{\varphi L} \end{bmatrix}, \quad \{U_L^*\} = \begin{bmatrix} U_x^* \\ U_z^* \\ U_\varphi^* \end{bmatrix}, \quad [T_R] = \begin{bmatrix} [\cos \alpha] & -[\sin \alpha] & [0] \\ [\sin \alpha] & [\cos \alpha] & [0] \\ [0] & [0] & [1] \end{bmatrix} \quad (10)$$

Vsak podvektor je sestavljen iz premikov v ustrezni smeri v posameznih etažah. Vse podmatrice v transformacijski matriki so diagonalne.

b) zveza med premiki makroelementov in premiki konstrukcije

»Z zasukom koordinatnega sistema lahko premike in sile v poljubno orientiranem lokalnem koordinatnem sistemu transformiramo v globalni sistem konstrukcije. Zaradi predpostavke o togosti plošč v svoji ravnini je možna transformacija, s katero bistveno zmanjšamo število prostostnih stopenj konstrukcije. Kot prostostne stopnje so izbrani premiki točk na vertikalni osi globalnega sistema $\{U\}$, vse premike makroelementa $\{U_L^*\}$ pa izrazimo s tako izbranimi premiki konstrukcije« (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 482):

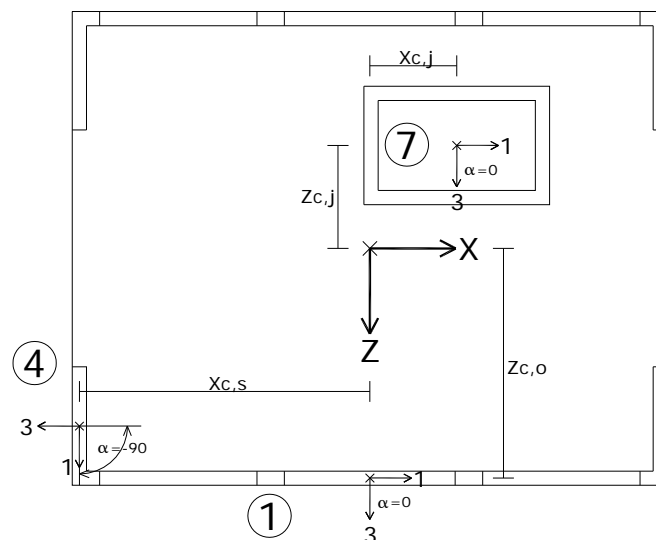
$$\{U_L^*\} = [T_0] \cdot \{U\} \quad (11)$$

$$[T_0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & z_c \\ 0 & 1 & -x_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

kjer $\{U\}$ pomeni vektor pomikov konstrukcije v glavnem koordinatnem sistemu, $[T_0]$ transformacijska matrika makroelementa, kot zveza med premiki makroelementov in premiki konstrukcije, x_c in z_c pa koordinati strižnega središča oziroma centra togosti prereza makroelementa (Slika 18). Pri večetažnih konstrukcijah moramo upoštevati premike vseh etaž. Vektorja pomikov in transformacijska matrika so ustrezno razširjeni:

$$\{U\} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_z \\ U_\varphi \end{bmatrix} \quad \{U_L^*\} = \begin{bmatrix} U_x^* \\ U_z^* \\ U_\varphi^* \end{bmatrix} \quad [T_0] = \begin{bmatrix} [1] & [0] & [z] \\ [0] & [1] & [-x] \\ [0] & [0] & [1] \end{bmatrix} \quad (13)$$

Vsak podvektor je sestavljen iz premikov v ustrezni smeri v posameznih etažah. Vse podmatrice v transformacijski matriki so diagonalne.



Slika 18: Koordinate strižnih središč in orientiranost makroelementov 1, 4 in 7 konstrukcije na sliki 2

c) transformacija matrik makroelementov

»Izhajamo iz enačbe statičnega ravnotežja za makroelement v lokalnem koordinatnem sistemu in uporabimo zvezo med pomiki zaradi zasuka makroelementa za kot α (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 484):

$$[K_L] \cdot \{U_L\} = \{F_L\} \quad (14)$$

$$[K_L] \cdot [T_R] \cdot \{U_L^*\} = \{F_L\} \quad (15)$$

$$[T_R]^T \cdot [K_L] \cdot [T_R] \cdot \{U_L^*\} = [T_R]^T \cdot \{F_L\} \quad (16)$$

Enačba 16 predstavlja ravnotežje notranjih sil makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu, ki je enako zasukan kot globalni koordinatni sistem. Izraza za togostno matriko in vektor obtežbe se glasita:

$$[K_L^*] = [T_R]^T \cdot [K_L] \cdot [T_R] \quad (17)$$

$$[F_L^*] = [T_R]^T \cdot [F_L] \quad (18)$$

V naslednji fazi so sile in premiki izraženi s silami in premiki konstrukcije. Izhajamo iz enačbe statičnega ravnotežja za makroelement v lokalnem koordinatnem sistemu, ki je enako zasukan kot globalni koordinatni sistem. Uporabimo zvezo med premiki makroelementov in premiki konstrukcije

$$[K_L^*] \cdot \{U_L^*\} = \{F_L^*\} \quad (19)$$

$$[K_L^*] \cdot [T_0] \cdot \{U\} = \{F_L^*\} \quad (20)$$

$$[T_0]^T \cdot [K_L^*] \cdot [T_0] \cdot \{U\} = [T_0]^T \cdot \{F_L^*\} \quad (21)$$

Zgornja enačba predstavlja ravnotežje notranjih sil makroelementa v globalnem koordinatnem sistemu, to je v koordinatnem sistemu konstrukcije. S primerjavo zgornje enačbe in izraza

$$[K_o] \cdot \{U\} = \{F_o\} \quad (22)$$

lahko zapišemo enačbo za togostno matriko makroelementa v globalnem koordinatnem sistemu

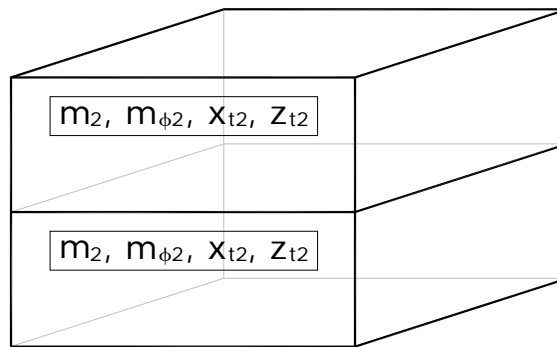
$$[K_o] = [T_0]^T \cdot [K_L^*] \cdot [T_0] = [T_0]^T \cdot ([T_R]^T \cdot [K_L] \cdot [T_R]) \cdot [T_0], \quad (23)$$

kjer $[K_o]$ pomeni kondenzirano togostno matriko makroelementa v globalnem koordinatnem sistemu. Togostno matriko konstrukcije $[K]$ v globalnem koordinatnem sistemu enostavno dobimo s seštevanjem togostnih matrik makroelementov $[K_o]$. Togostna matrika stabilne konstrukcije je pozitivno definitna. Pozitivno definitna matrika ne more biti singularna in jo lahko invertiramo. Z inverzijo togostne matrike dobimo podajnostno matriko in obratno. Za togostno matriko konstrukcije velja, da je simetrična.

2.5 Masna matrika in račun lastnega nihanja

2.5.1 Masna matrika

Masnih matrik makroelementov ne tvorimo. Mase makroelementov upoštevamo tako, da jih prištejemo k masam medetažnih plošč in določimo težišče mas za vsako etažo posebej (Slika 19).



Slika 19: Podatki o masah za primer dvoetažne stavbe

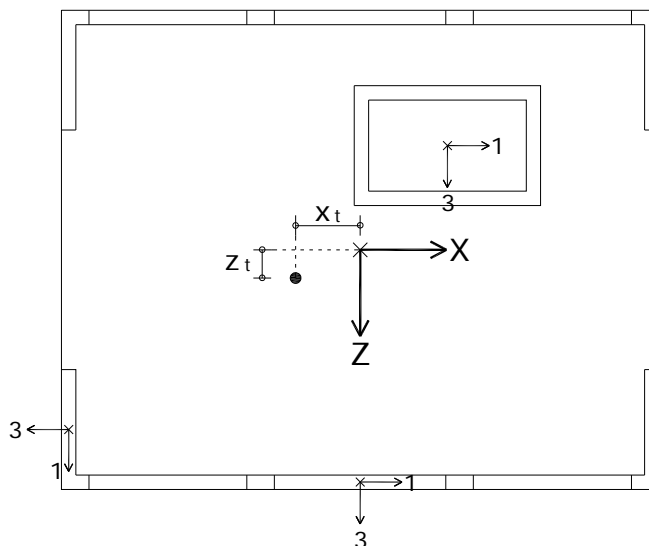
Podatki o masah konstrukcije:

- mase in masni vztrajnostni momenti posameznih etaž
- koordinate težišča mase v posameznih etaž
- ekscentričnost mas v obeh horizontalnih smereh

Masno matriko M sestavljajo koeficienti m_{ij} , ki predstavljajo vztrajnostno silo v smeri prostostne stopnje i zaradi enotnega pospeška v smeri j . Vztrajnostna sila v poljubni smeri i zaradi enotnega pospeška v smeri i je kar enaka masi m_i . Vztrajnostna sila v smeri prostostne stopnje i zaradi enotnega pospeška v smeri j pa je enaka nič. To pomeni, da je masna matrika konstrukcije s koncentriranimi masami diagonalna matrika, diagonalni členi pa so enaki koncentriranim masam oziroma masnim vztrajnostnim momentom v posameznih etažah. Težišče mas se lahko po etažah spreminja. Če se izhodišče globalnega koordinatnega sistema ne ujema s težiščem mas (slika 20), je potrebno masno matriko transformirati, po naslednji enačbi:

$$[M] = [T_0]^T \cdot [M_l] \cdot [T_0], \quad (24)$$

kjer $[T_0]$ pomeni transformacijsko matriko, kot zvezo med lokalnim in globalnim sistemom, $[M_i]$ pa je masna matrika konstrukcije v lokalnem koordinatnem sistemu. Lokalni sistem je postavljen v masno težišče posamezne etaže.



Slika 20: Primer neujemanja težišča mas z izhodiščem globalnega koordinatnega sistema

2.5.2 Lastno nihanje

Spodnja enačba predstavlja sistem homogenih algebraičnih enačb lastnega nedušenega gibanja (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 227-228):

$$([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \{\phi\} = \{0\}$$

Enačba se v matematiki imenuje posplošen problem lastnih vrednosti. Rešitev so lastne vrednosti, ki predstavljajo kvadrate lastnih frekvenc ω^2 in lastni vektorji, ki predstavljajo vektorje lastnih nihajnih oblik $\{\phi\}$. Posplošen problem lastnih vrednosti lahko preoblikujemo v problem lastnih vrednosti:

$$[(A - I \cdot D)] \cdot \{V\} = 0 ,$$

kjer D pomeni lastne vrednosti in V pripadajoče lastne vektorje matrike A . Enačbo lastnega nedušenega gibanja preoblikujemo in dobimo

$$\left[\left([K]^{-1} \cdot [M] - I \cdot \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \cdot \{\phi\} = 0$$

Iščemo torej lastne vrednosti in pripadajoče lastne vektorje matrike

$$[K]^{-1} \cdot [M]$$

Togostna matrika stabilne konstrukcije je pozitivno definitna, realna in simetrična. Kadar je masna matrika realna in simetrična, so vse lastne vrednosti realne. Realnih in pozitivnih je toliko lastnih vrednosti, kolikor je od nič različnih mas.

2.6 Potresna obtežba in račun pomikov in potresnih sil na konstrukcijo

Pri potresni obtežbi uporabljamo metodo s spektri odziva s katero dokaj enostavno določimo približne maksimalne vrednosti odziva. V spektru pospeškov S_a so po definiciji zbrane maksimalne vrednosti pospeška v odvisnosti od lastne frekvence ω za sisteme z eno prostostno stopnjo. Za vodoravno komponento potresnega vpliva je projektni spekter pospeškov po SIST EN 1998-1, 3.2.2.5 definiran z naslednjimi enačbami (glej sliko 21) :

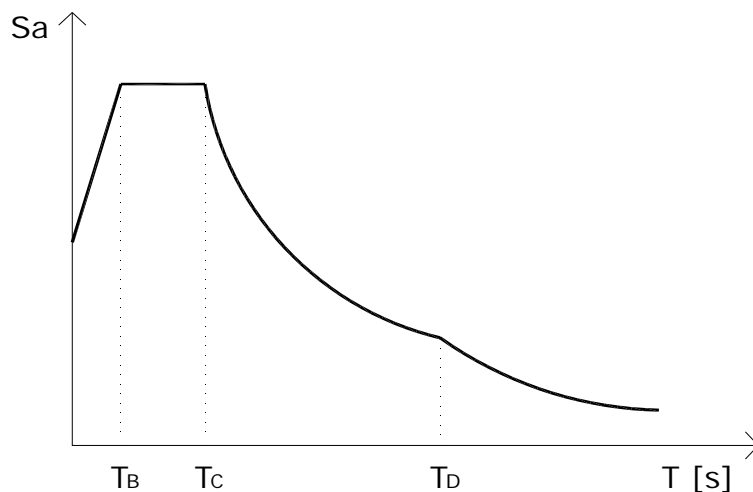
$$0 \leq T \leq T_B : S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right],$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_a(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q},$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_a(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T : S_a(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

kjer je S faktor zemljine, ki upošteva kvaliteto tal, q faktor obnašanja s katerim reduciramo potresne sile in na ta način posredno zajamemo sposobnost duktilnega obnašanja konstrukcije, T_B predstavlja spodnjo mejo konstantnega dela spektra pospeškov, T_C zgornjo mejo konstantnega dela spektra pospeškov in T_D vrednost, ki definira začetek konstantnega dela spektra pomikov.



Slika 21: Oblika projektnega spektra pospeškov S_a

2.6.1 Pomiki in potresne sile na konstrukcijo

Vektor maksimalnih vrednosti premikov zaradi i -te nihajne oblike se določi po naslednji enačbi (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 316):

$$\{U_i\}_{\max} = \{\phi_i\} \cdot Y_{i,\max} = \{\phi_i\} \cdot \Gamma_i \cdot S_d(\omega_i, \zeta_i),$$

kjer $Y_{i,\max}$ pomeni maksimalni pomik v generaliziranih koordinatah, Γ_i pomeni faktor participacije za i -to nihajno obliko in S_d spekter pomikov. Potresno obtežbo običajno izrazimo s spektrom psevdopospeškov S_a , za katerega velja $S_a = \omega^2 \cdot S_d$. Z upoštevanjem tega lahko vektorja pomikov in potresnih sil zapišemo:

$$\{U_i\}_{\max} = \{\phi_i\} \cdot \Gamma_i \cdot S_a(\omega_i, \zeta_i) / \omega_i^2,$$

$$\{F_{Ei}\}_{\max} = [M] \cdot \{\phi_i\} \cdot \Gamma_i \cdot S_a(\omega_i, \zeta_i),$$

kjer $[M]$ predstavlja masno matriko konstrukcije v globalnem koordinatnem sistemu. Če računske pomike pomnožimo s faktorjem obnašanja q , dobimo dejanske pomike konstrukcije:

$$\{U_i\}_{\max,dej} = \{U_i\}_{\max} \cdot q$$

2.7 Pomiki in potresne sile na makroelemente

Za račun potresnih sil na makroelemente je potrebno poznati premike makroelementov v lokalnih koordinatnih sistemih, ki jih dobimo s transformacijo premikov konstrukcije (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 488):

$$\{U_l\} = [T_R] \cdot [T_O] \cdot \{U\},$$

kjer $[T_R]$ in $[T_O]$ pomenita transformacijski matriki, $\{U\}$ vektor pomikov konstrukcije in $\{U_l\}$ vektor pomikov makroelementov v lokalnem koordinatnem sistemu. Potresne sile, ki odpadejo na posamezne makroelemente določimo po naslednji enačbi:

$$\{F_l\} = [K_l] \cdot \{U_l\},$$

kjer $\{F_l\}$ pomeni vektor potresnih sil na makroelemente in $[K_l]$ kondenzirano togostno matriko makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu.

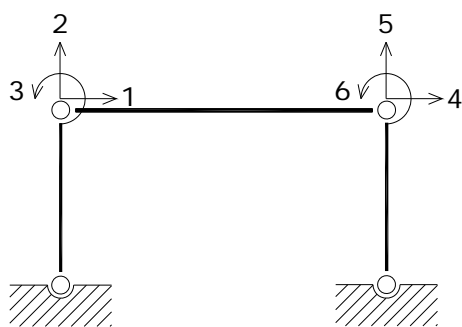
2.7.1 Notranje sile v makroelementih

Tvorjenje vektorja obtežbe za statično analizo

Notranje sile v makroelementih dobimo po običajni metodi statike, če obtežbo F_l uporabimo kot zunanjo obtežbo statičnega modela. Število komponent vektorja potresne obtežbe $\{F_l\}$ je enako številu etaž makroelementa. Kadar računamo notranje sile v steni ali jedru, lahko kot obtežbo statičnega modela uporabimo vektor potresne obtežbe. Kadar pa računamo notranje sile v okvirju, steni na stebrih ali steni z odprtini, pa je potrebno vektor potresne obtežbe ustrezno razširiti. Za primer si pogledjmo razširitev vektorja potresne obtežbe za enoetažni okvir z enim poljem (slika 22). Vektor potresne obtežbe dinamičnega modela ima obliko:

$$\{F_l\} = \{F_1\}, \quad (25)$$

kjer je $\{F_1\}$ vektor obtežbe okvirja v prvi etaži.

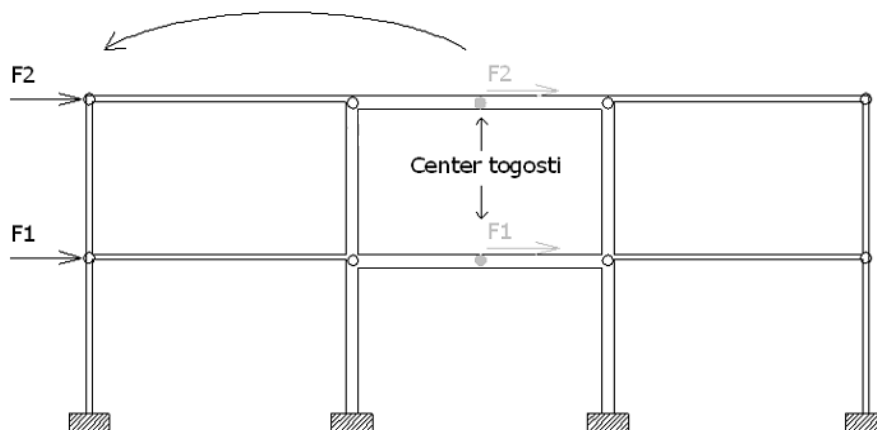


Slika 22: Enoetažni okvir z enim poljem

Dinamični model okvirja na sliki 23 ima eno prostostno stopnjo, to je horizontalni pomik v prvi etaži in sicer v nosilni smeri, statični pa šest in sicer dva pomika in en zasuk v vsakem vozlišču prve etaže. Vektor obtežbe za statično analizo ima šest komponent in sicer:

$$\{F_m\} = [F_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (26)$$

Zaradi predpostavke o neskončni togosti plošč v svoji ravnini so notranje sile v okvirju neodvisne od prijemališča potresnih sil. V primeru okvirja so kot prijemališča izbrana v vozliščih prve vrste stebrov (glej sliko 23).



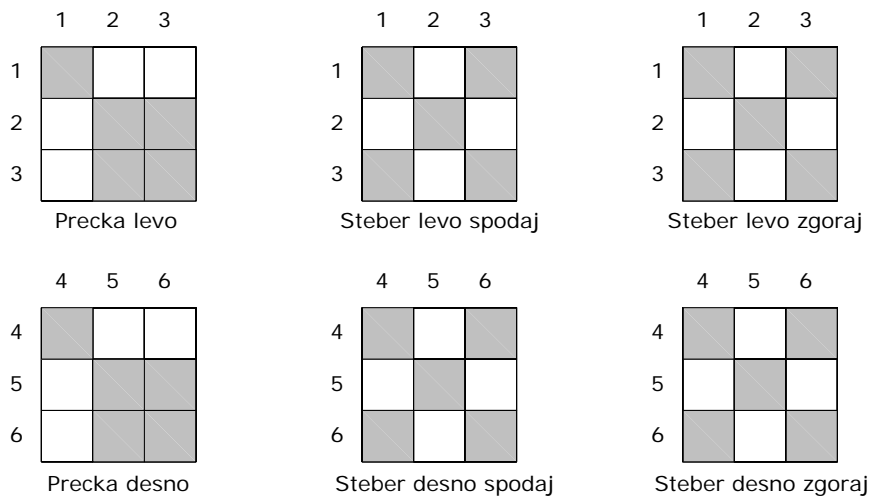
Slika 23: Obremenitev statičnega modela makroelementov

To lahko dokažemo z računom togosti odseka sistema prečk in stebrov (Slika 24). Prečka je neskončno toga v smeri svoje osi. S tem upoštevamo neskončno togost plošče v svoji ravnini. Na sliki 25 so prikazane sheme togostnih matrik stebrov in prečk okvirja, ki predstavljajo elastično vpetje osno toge prečke. Matrike predstavljajo zvezo med silami in pomiki v smereh

prostostnih stopenj 1, 2, 3 in 4, 5, 6 v začetnem oziroma končnem vozlišču. Temno so označena mesta z neničelnimi koeficienti.



Slika 24: Elastično vpeta prečka v sistemu stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč



Slika 25: Shema togostnih matrik elementov v levem vozlišču (zgoraj) in desnem vozlišču (spodaj)

Matrike seštejemo in jih združimo v togostno matriko neodvisnega sistema stebrov in prečk, ki je grafično prikazan na sliki 26. Dobljeno togostno matriko označimo z $[K^*]$.



Slika 26: Neodvisni sistem stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč

Potemnjena polja v shemi togostne matrike neodvisnega sistema stebrov in prečk na sliki 27 pomenijo mesta neničelnih koeficientov k_{ij}^* . Togostna matrika elastično vpete osno toge prečke $[K]$ se ustvari tako, da se prišteje dejanska togostna matrika prečke. Izračunana je inverzna matrika $[K]$, ki predstavlja podajnostno matriko $[D]$.

	1	2	3	4	5	6
1	■		■			
2		■	■			
3	■	■	■			
4				■		■
5					■	■
6				■	■	■

Slika 27: Shema matrike neodvisnega sistema stebrov in prečk dveh sosednjih vozlišč

Togostna matrika elastično vpete osno toge prečke $[K]$ ima naslednjo obliko:

$$[K] = \begin{bmatrix}
 s_{11} + \frac{EA_p}{L} & s_{12} & s_{13} & -\frac{EA_p}{L} & 0 & 0 \\
 s_{12} & s_{22} + \frac{12EI}{L^3} & s_{23} + \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\
 s_{13} & s_{23} + \frac{6EI}{L^2} & s_{33} + \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\
 -\frac{EA_p}{L} & 0 & 0 & s_{44} + \frac{EA_p}{L} & s_{45} & s_{46} \\
 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & s_{45} & s_{55} + \frac{12EI}{L^3} & s_{56} - \frac{6EI}{L^2} \\
 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & s_{46} & s_{56} - \frac{6EI}{L^2} & s_{66} - \frac{4EI}{L}
 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Podajnostno matriko elastično vpete prečke $[D]$ sestavljajo koeficienti d_{ij} , ki pomenijo pomike na mestu in v smeri prostostne stopnje i , zaradi sil na mestu in v smeri prostostne stopnje j . V primeru osno neskončno toge prečke imajo naslednji koeficienti enake vrednosti, kar je dokazano s programom Mathematica:

$$d_{11} = d_{14} = d_{41} = d_{44}, \quad d_{21} = d_{24}, \quad d_{31} = d_{34}, \quad d_{51} = d_{54}, \quad d_{61} = d_{64} \quad (28)$$

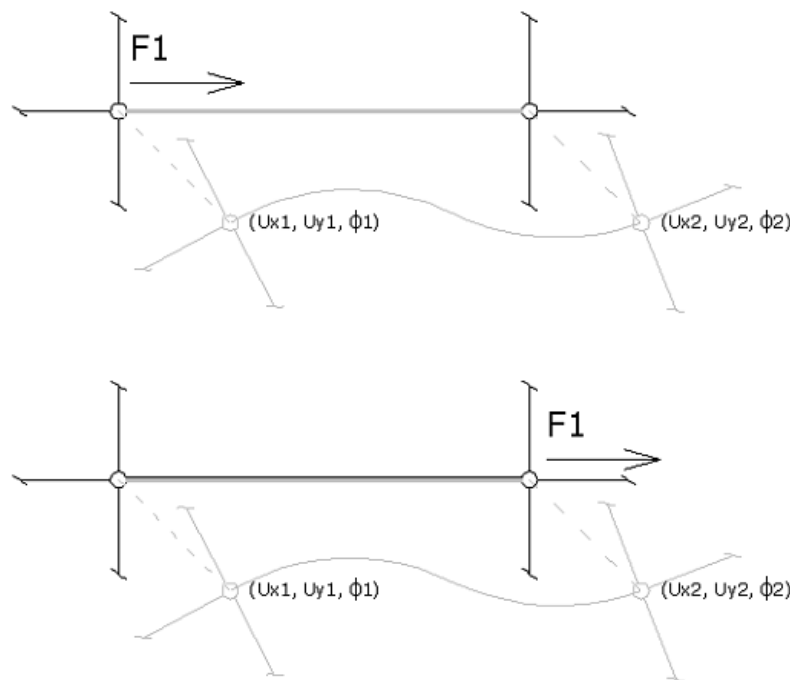
To pomeni, da so v primeru osno toge prečke pomiki desnega in levega vozlišča neodvisni od prijemališča sile F (glej sliko 28). Lahko zapišemo:

$$U_{X,1}(F_{1,L}) = U_{X,1}(F_{1,D}), \quad U_{X,2}(F_{1,L}) = U_{X,2}(F_{1,D}), \quad (29)$$

$$U_{Y,1}(F_{1,L}) = U_{Y,1}(F_{1,D}), \quad U_{Y,2}(F_{1,L}) = U_{Y,2}(F_{1,D}), \quad (30)$$

$$\phi_{Z,1}(F_{1,L}) = \phi_{Z,1}(F_{1,D}), \quad \phi_{Z,2}(F_{1,L}) = \phi_{Z,2}(F_{1,D}), \quad (31)$$

kjer $U_{X,1}(F_{1,L})$ in $U_{X,1}(F_{1,D})$ pomenita pomik levega vozlišča v smeri osi x lokalnega koordinatnega sistema elementa, $U_{Y,1}(F_{1,L})$ in $U_{Y,2}(F_{1,D})$ pomenita pomik levega vozlišča v smeri osi y lokalnega koordinatnega sistema elementa, $\phi_{Z,1}(F_{1,L})$ in $\phi_{Z,1}(F_{1,D})$ pa pomenita zasuk levega vozlišča okoli osi z lokalnega koordinatnega sistema elementa zaradi sile s prijemališčem v levem oziroma desnem vozlišču. Podobno so označeni premiki v desnem vozlišču.



Slika 28: Pomiki levega in desnega vozlišča v primeru osno toge prečke

Račun notranjih sil v makroelementih

Obtežba vozlišč posameznih elementov se določi po enačbah:

$$\{U_m\} = [K_m]^{-1} \cdot \{F_m\}, \quad (32)$$

$$\{F_{e,i}\} = [k_{e,i}] \cdot \{U_{e,i}\}, \quad (33)$$

kjer $\{U_m\}$ pomeni vektor pomikov vozlišč makroelementa, $[K_m]^{-1}$ podajnostno matriko statičnega modela makroelementa (reducirana matrika – upoštevana so prosta vozlišča), $\{F_m\}$ vektor obtežbe statičnega modela makroelementa, $\{F_e\}$ vektor obtežbe vozlišč i -tega elementa, $[k_e]$ togostna matrika i -tega elementa in $\{U_e\}$ vektor pomikov začetnega in končnega vozlišča i -tega elementa.

2.8 Kombinacija premikov in potresnih sil

2.8.1 Kombinacija zaradi nihajnih oblik

Kombinacija zaradi nihajnih oblik poteka po metodi popolne kvadratne kombinacije. Pomembno je, da ohranimo predznake, ki sledijo iz predhodnega računa. Za posamezne komponente vektorjev premikov in potresnih sil veljata enačbi (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 286):

$$u_{k,\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \rho_{ij} \cdot u_{ik} \cdot u_{jk}},$$

$$f_{Ek,\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \rho_{ij} \cdot f_{Eik} \cdot f_{Ejk}},$$

kjer je $u_{k,\max}$ komponenta vektorja $\{U_{\max}\}$, u_{ik} pa komponenta vektorja $\{U_i\}$. Podobno velja za komponente vektorja notranjih sil. Z ρ_{ij} so označeni faktorji, ki definirajo sklopljenost posameznih nihajnih oblik. Njihove vrednosti so odvisne od razmerja lastnih frekvenc in od

dušenja konstrukcije. Za tipično potresno obtežbo in primer, ko je dušenje enako za vse nihajne oblike, je podana enačba (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 287):

$$\rho_{ij} = \frac{8 \cdot \xi^2 \cdot (1+r) \cdot r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot r \cdot (1+r)^2}$$

V primeru, ko sta dve frekvenci enaki, velja

$$\xi \neq 0, r = 1, \rho_{ij} = 1$$

2.8.2 Kombinacija zaradi smeri delovanja obtežbe

Kombinacija zaradi različnih smeri obremenjevanja poteka po metodi geometrijske vsote. Za posamezne komponente vektorjev premikov in potresnih sil veljata enačbi (Fajfar, P., 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij, str. 186-187):

$$\{U\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \{U_i\}_{\max}^2}, \quad \{f_E\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \{f_{Ei}\}_{\max}^2}$$

Geometrijska vsota je uporabna kadar želimo določiti maksimum odziva le za eno količino. Po SIST EN 1998-1 4.3.3.5.1 se za kombiniranje odziva zaradi različnih smeri delovanja obtežbe kot alternativa lahko uporabita enačbi:

$$\begin{aligned} \{U_E\}_{dx} + 0,30 \cdot \{U_E\}_{dz}, & \quad 0,3 \cdot \{U_E\}_{dx} + \{U_E\}_{dz}, \\ \{f_E\}_{dx} + 0,30 \cdot \{f_E\}_{dz}, & \quad 0,3 \cdot \{f_E\}_{dx} + \{f_E\}_{dz}, \end{aligned}$$

kjer vektorja $\{U_E\}_{dx}$ in $\{f_E\}_{dx}$ pomenita premike oz. sile zaradi obtežbe v smeri X, $\{U_E\}_{dz}$ in $\{f_E\}_{dz}$ pa premike oz. sile zaradi obtežbe v smeri Z.

2.9 Kontrola tlorisne pravilnosti

Tlorisna pravilnost konstrukcije vpliva na vrednost faktorja obnašanja q (CEN, 200.). Kriteriji za tlorisno pravilnost so opisani v SIST EN 1998-1, 4.2.3.2. Za doseg kriterija tlorisne

pravilnosti je potrebno za vsako etažo i izpolniti pogoj, da je razdalja med središčem togosti in masnim središčem (e_0), merjena za vsako smer tlorisa manjša od 30% torzijskega polmera r , ter pogoj, da je torzijski polmer večji od vztrajnostnega polmera l_s :

$$\begin{aligned} e_{0X,i} &\leq 0,30 \cdot r_{X,i} & e_{0Z,i} &\leq 0,30 \cdot r_{Z,i} \\ r_{X,i} &\geq l_{s,i} & r_{Z,i} &\geq l_{s,i} \end{aligned}$$

kjer sta $e_{0X,i}$ in $e_{0Z,i}$ razdalji med togostnim in masnim središčem etaže i v X in Z smeri, $r_{X,i}$ in $r_{Z,i}$ torzijska polmera etaže i v smeri X in Z ter $l_{s,i}$ vztrajnostni polmer etaže i .

Določitev središča togosti konstrukcije

Ekscentričnost predstavlja razdaljo med masnim in togostnim središčem. Središče togosti je izračunano s pomočjo obtežnih primerov z enotino silo in enotnim torzijskim momentom. Prijemališče sil je izbrano v izhodišču glavnega koordinatnega sistema. Razmerje med zasukom etaže zaradi sile v smeri Z in zasukom zaradi torzijskega momenta predstavlja X koordinato središča togosti, razmerje med zasukom etaže zaradi sile v smeri X in zasukom etaže zaradi torzijskega momenta pa predstavlja Z koordinato središča togosti konstrukcije:

$$X_{CR,i} = \frac{R_{Y,i}(F_{Z,i} = 1)}{R_{Y,i}(M_i = 1)}, \quad Z_{CR,i} = -\frac{R_{Y,i}(F_{X,i} = 1)}{R_{Y,i}(M_i = 1)}$$

kjer so $R_{Y,i}(F_{Z,i}=1)$ zasuk etaže i zaradi sile $F_{Z,i}=1$, $R_{Y,i}(F_{X,i}=1)$ zasuk etaže i zaradi sile $F_{X,i}=1$, $R_{Y,i}(M_i=1)$ pa zasuk etaže i zaradi momenta $M_i=1$. Ekscentričnosti v smereh X in Z se določita po enačbah:

$$e_{0X,i} = X_{CM,i} - X_{CR,i}, \quad e_{0Z,i} = Z_{CM,i} - Z_{CR,i}$$

kjer so $e_{0X,i}$ in $e_{0Z,i}$ ekscentričnosti etaže i v smereh X in Z , $X_{CM,i}$ in $Z_{CM,i}$ koordinati masnega središča etaže i , $X_{CR,i}$ in $Z_{CR,i}$ pa koordinati središča togosti etaže i .

Določitev torzijskega polmera posamezne etaže

Torzijski polmer določimo tako, da v vsaki etaži upoštevamo tri obtežne primere in sicer obtežbo v centru togosti s silama v smereh X in Z ter s torzijskim momentom okoli vertikalne osi. Torzijski polmer v X smeri je kvadratni koren razmerja med torzijsko in translacijsko togostjo v Z smeri, torzijski polmer v Z smeri pa je kvadratni koren razmerja med torzijsko in translacijsko togostjo v X smeri:

$$\begin{aligned} K_{M,i} &= \frac{1}{R_{Y,i}(M_{T,i} = 1)} \\ K_{FX,i} &= \frac{1}{U_{X,i}(F_{X,i} = 1)} \\ K_{FZ,i} &= \frac{1}{U_{Z,i}(F_{Z,i} = 1)} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} r_{X,i} &= \sqrt{\frac{K_{M,i}}{K_{FZ,i}}} \\ r_{Z,i} &= \sqrt{\frac{K_{M,i}}{K_{FX,i}}} \end{aligned}$$

kjer je $R_{Z,i}(M_{T,i} = 1)$ zasuk etaže i zaradi torzijskega momenta $M_{T,i} = 1$, $U_{X,i}(F_{X,i} = 1)$ pomik etaže i v smeri X zaradi sile $F_{X,i} = 1$, $U_{Z,i}(F_{Z,i} = 1)$ pomik etaže i v smeri Z zaradi sile $F_{Z,i} = 1$, $K_{M,i}$ torzijska togost etaže i , $K_{FX,i}$ translacijska togost etaže i v smeri X , $K_{FZ,i}$ translacijska togost etaže i v smeri Z ter $r_{X,i}$ in $r_{Z,i}$ torzijska polmera etaže i za smeri X in Z .

Določitev vztrajnostnega polmera posamezne etaže

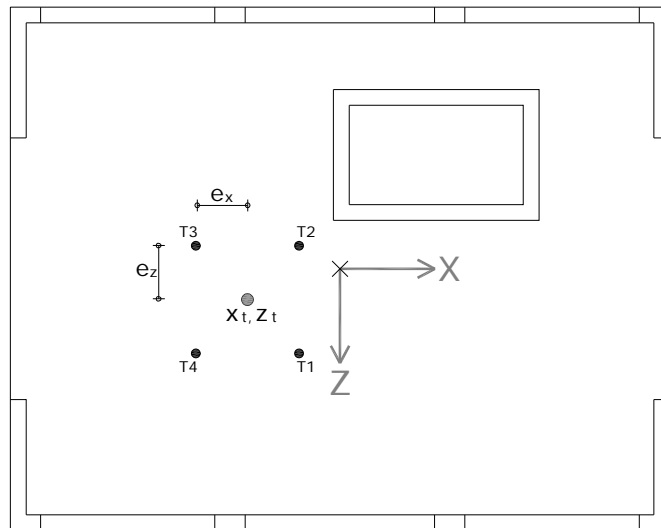
Vztrajnostni polmer etaže določimo kot kvadratni koren količnika masnega vztrajnostnega momenta in mase etaže

$$l_{S,i} = \sqrt{\frac{m_{\varphi,i}}{m_i}},$$

kjer je $l_{S,i}$ vztrajnostni polmer etaže i , m_i je masa etaže i in $m_{\varphi,i}$ masni vztrajnostni moment etaže.

2.10 Vpliv slučajne ekscentričnosti

Vpliv slučajne ekscentričnosti se upošteva z izmikom težišča etažnih mas v smereh X in Z v štiri kvadrante (Slika 29).



Slika 29: Shematičen prikaz izmika mas

Standard SIST EN 1998-1, 4.3.2 predpisuje izmik 5% glede na tlorisno dimenzijo pravokotno na potresno obtežbo in sicer v pozitivni in negativni smeri:

$$e_{a,i} = \pm 0,05 * L_i,$$

kjer $e_{a,i}$ pomeni izmik mase glede na težišče v i -ti etaži in sicer v obeh horizontalnih smereh in L_i tlorisna dimenzija etaže pravokotno na smer delovanja obtežbe.

2.11 Upoštevanje teorije drugega reda

Predpis SIST EN 1998-1 4.4.2.2(2) podaja kriterije za upoštevanje teorije drugega reda. Vpliv teorije drugega reda lahko zanemarimo, če konstrukcija v vsaki etaži izpolnjuje pogoj:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10,$$

kjer je θ koeficient podajnosti v horizontalni smeri, P_{tot} celotna vertikalna obtežba, d_r pomik, V_{tot} celotna potresna obtežba in h višina posamezne etaže. Vrednost d_r predstavlja povprečje dejanskih pomikov posamezne etaže konstrukcije. SIST EN 1998-1, 4.3.4 podaja enačbo za izračun pomika etaže v posamezni točki:

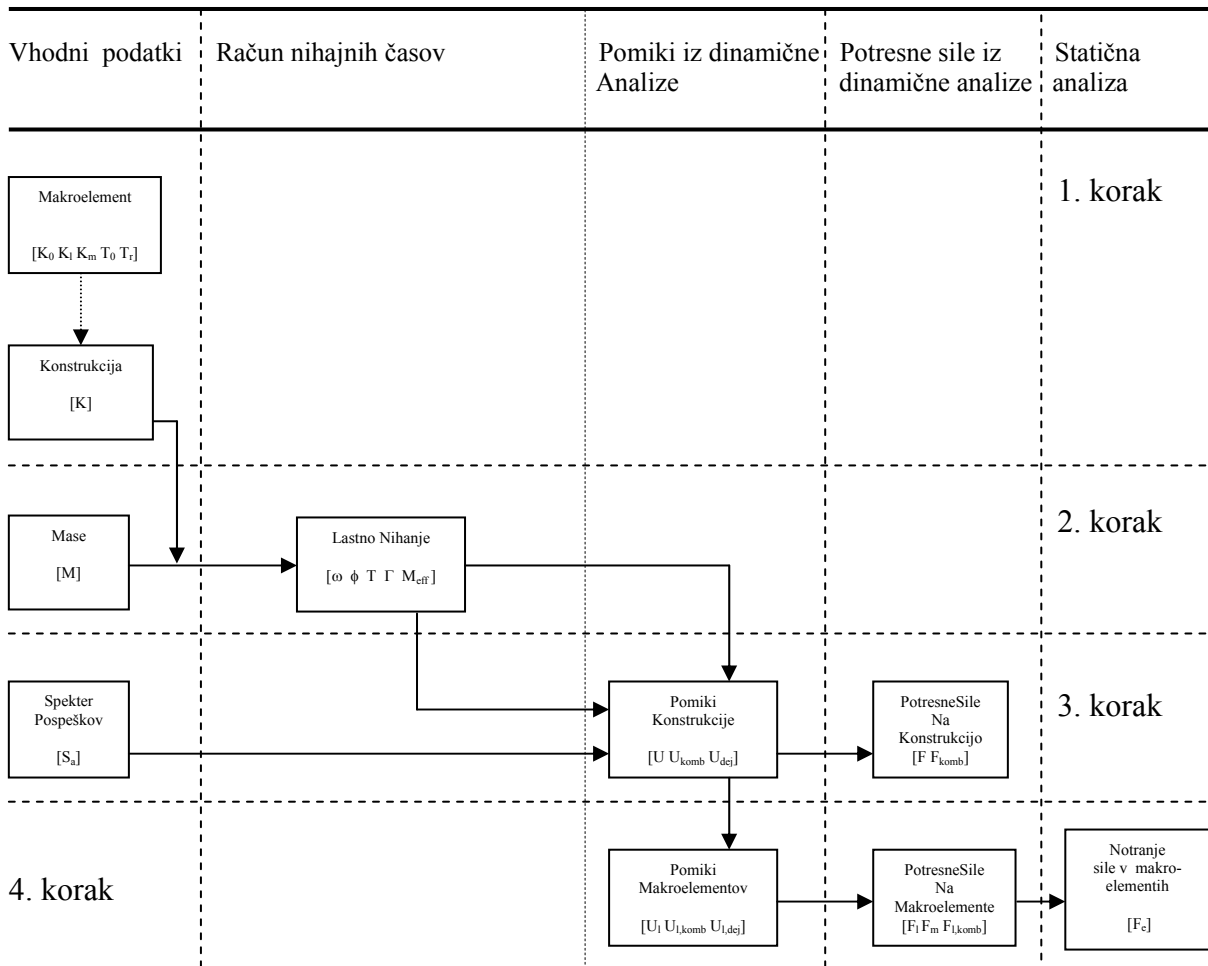
$$d_s = q_d \cdot d_e,$$

kjer d_s pomeni dejanski pomik etaže v posamezni točki, d_e pa pomik etaže v posamezni točki določen z elastično analizo. Simbol q_d predstavlja faktor obnašanja za račun dejanskih pomikov. Če ni predpisano drugače se uporabi faktor obnašanja q .

Če velja $0,1 < \theta < 0,2$, lahko približno upoštevamo vpliv teorije 2. reda tako, da ustrezne učinke potresnega vpliva povečamo s faktorjem, ki je enak $1/(1 - \theta)$. Vrednost koeficienta θ ne sme biti večja od 0,3.

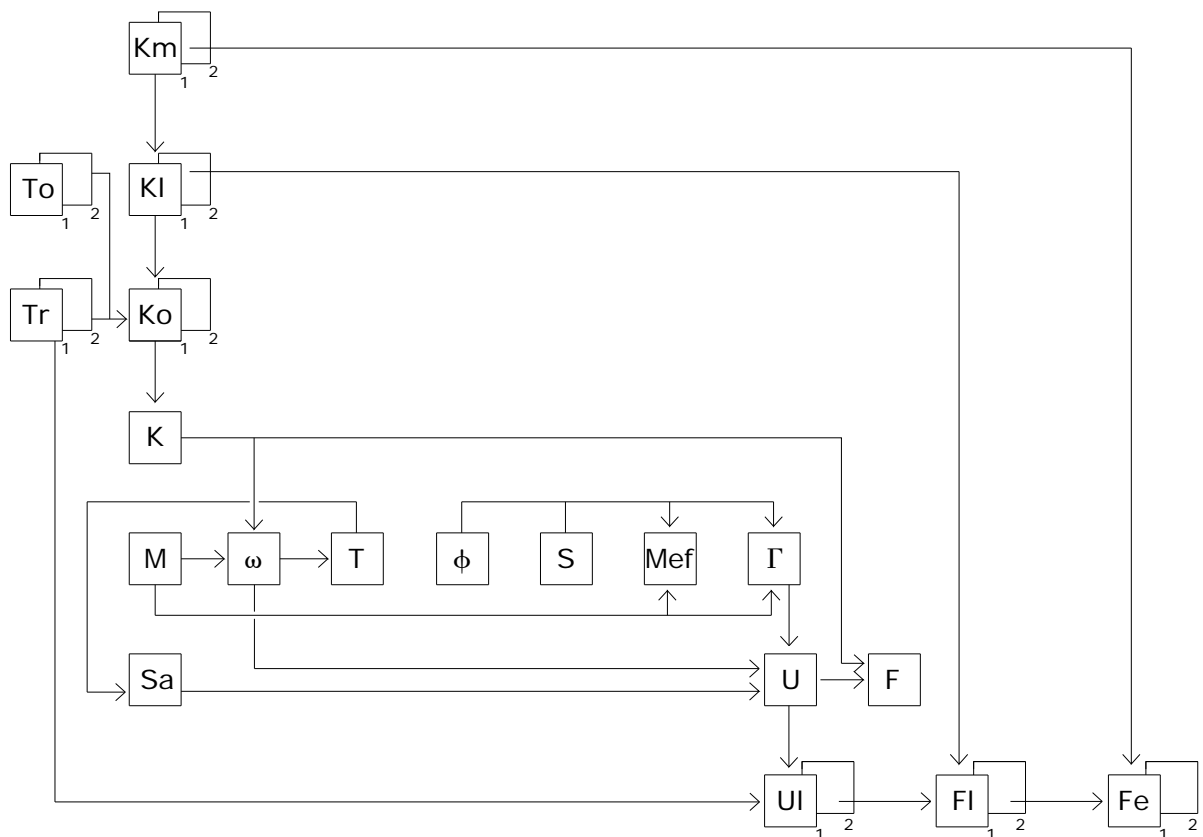
3 ALGORITEM PROGRAMA

Z algoritmom programa je prikazano zaporedje izvrševanja posameznih funkcij programa, s katerimi izvedemo posamezne računske korake v celotni analizi konstrukcije. Diagram poteka je prikazan na sliki 30. Označeni so pripadajoči izhodni podatki, ki služijo za nadaljnjo analizo. Diagram poteka je razdeljen v dve dimenziji. V horizontalni smeri zaporedje funkcij sledi korakom modalne analize, kjer po dinamični analizi sledi prehod na statični model in račun notranjih sil v makroelementih. V vertikalni smeri pa je graf razdeljen v sosledje štirih korakov izvajanja analize v programu EAVEK 2007.



Slika 30: Shema zaporedja izvrševanja funkcij

Funkcije prejmejo vhodne podatke in vrnejo rezultat - izhodne podatke. Vhodni podatki so splošni podatki o konstrukciji, podatki o njenih elementih, o masah konstrukcije in podatki o spektru pospeškov. Izhodni podatki pa so na primer togostne matrike posameznih makroelementov, ki pa spet predstavljajo vhodne podatke za nadaljnje funkcije. Vhodni in izhodni podatki funkcij so lahko definirani kot lokalne ali globalne spremenljivke. Lokalne spremenljivke se pojavijo le v okviru posameznih funkcij, globalne spremenljivke pa so lahko dostopne katerikoli funkciji. Tako je na primer togostna matrika makroelementa konstrukcije definirana kot globalna spremenljivka, zaporedne številke makroelementov pa se v funkciji pojavijo kot lokalne spremenljivke, ki služijo le za razvrščanje globalnih spremenljivk v sezname podatkov. Na sliki 31 je prikazana shema odvisnosti glavnih globalnih spremenljivk za primer konstrukcije z dvema makroelementoma.



Slika 31: Shema odvisnosti glavnih globalnih spremenljivk

3.1 Tvorjenje togostnih matrik makroelementov

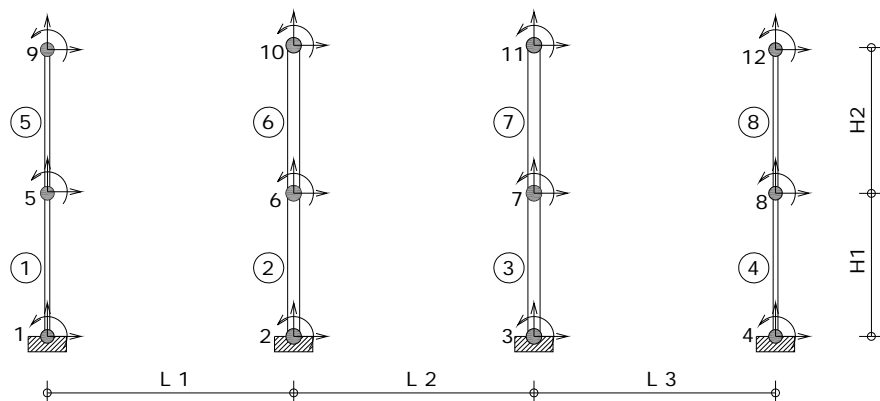
V novi verziji programa EAVEK so togostne matrike makroelementov sestavljene iz togostnih matrik linijskega elementa. Tvorjenje togostnih matrik in kondenzacija je podrobneje prikazana za primer okvirja, jedra in stene na stebrih. V primeru stene z odprtinami je postopek povsem analogen postopku v primeru okvirja, v primeru stene brez odprtin pa postopku v primeru jedra.

3.1.1 Togostna matrika okvirja

Togostna matrika okvirja je sestavljena iz t.i. matrike stebrov C in matrike prečk B . Matrika stebrov predstavlja togostno matriko neodvisnega sistema stebrov preko vseh etaž, matrika prečk pa predstavlja matriko neodvisnega sistema prečk preko vseh polj. Najprej se določijo togostne matrike za vsak element posebej. Prečke in stebri so modelirani z ravninskimi linijskimi končnimi elementi. Tvorjenje togostne matrike okvirja je prikazano na primeru polnega dvoetažnega okvirja s tremi polji.

Togostna matrika stebrov okvirja

Togostna matrika stebrov polnega okvirja C je velikosti $3 \cdot (m + 1) \cdot (n + 1)$, kjer m pomeni število polj in n število etaž okvirja. Steber z zaporedno številko i poteka od vozlišča i do vozlišča $i+(m+1)$ (glej sliko 32). Oštevilčenje elementov in vozlišč okvirja je podrobneje opisano v poglavju 2.4.1.

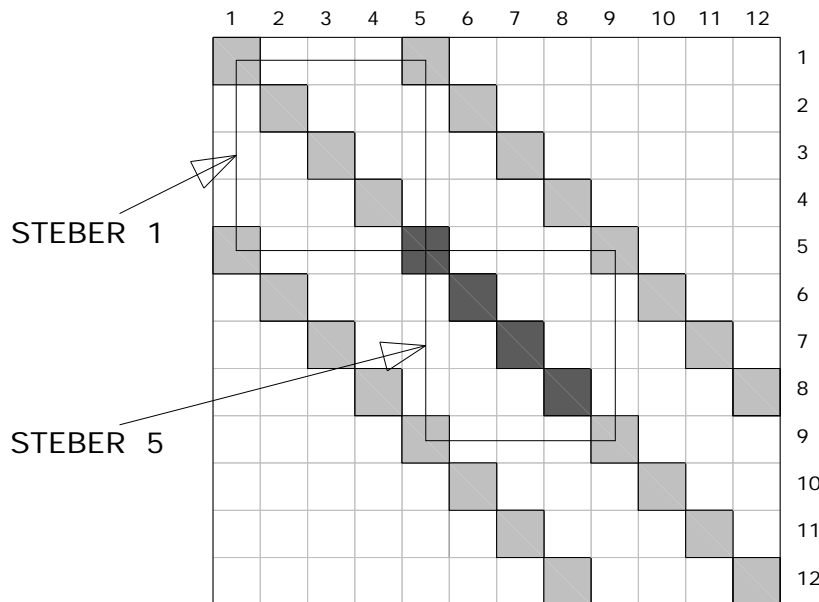


Slika 32: Sistem stebrov za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji

Koeficienti togostne matrike i -tega stebra zasedejo naslednje stolpce in vrstice matrike C :

- $((i-1) \cdot 3) + 1$ do $((i-1) \cdot 3) + 3$ in
- $(i-1) \cdot 3 + (m+1) \cdot 3 + 1$ do $(i-1) \cdot 3 + (m+1) \cdot 3 + 3$

Na sliki 33 je za primer obravnavanega okvirja prikazana shema togostne matrike neodvisnega sistema stebrov C . Dobimo jo, če ustvarimo togostne matrike za vse štiri sisteme konzolnih stebrov in jih seštejemo. V polju (i,j) se nahajajo koeficienti c_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j . Temnejši kvadrati pomenijo vozlišča v katerih se stikajo stebri.



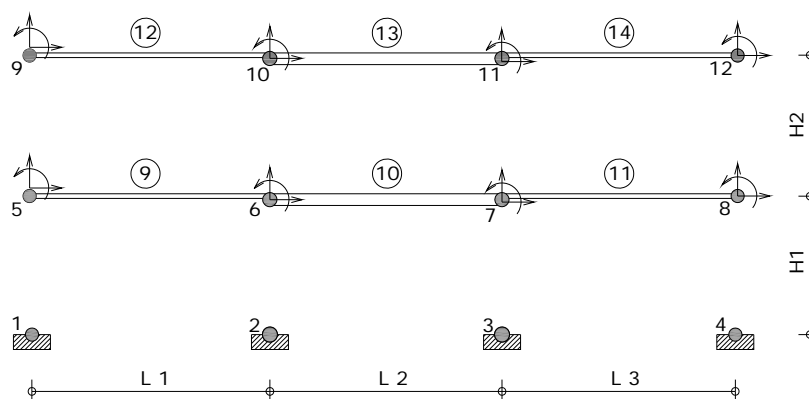
Slika 33: Shema togostne matrike stebrov C za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji

Togostna matrika prečk okvirja

Togostna matrika prečke polnega okvirja B je velikosti $3 \cdot (n+1) \cdot (m+1)$. Na sliki 34 je prikazan sistem prečk obravnavanega okvirja. Koeficienti togostne matrike prečke z zaporedno številko j zasedejo naslednje stolpce in vrstice matrike B :

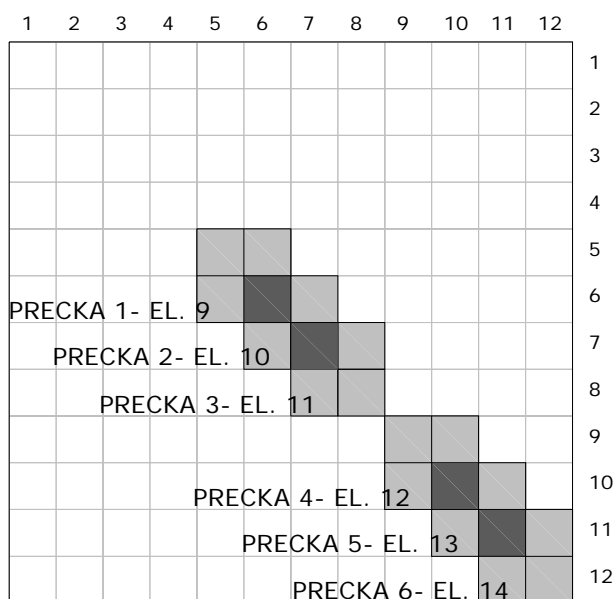
- $(j - n \cdot (m+1) + (m+i-1)) \cdot 3 + 1$ do $(j - n \cdot (m+1) + (m+i-1)) \cdot 3 + 6$

Pri čemer i pomeni etažo v kateri se nahaja prečka z zaporedno številko elementa j .



Slika 34: Sistem prečk za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji

Na sliki 35 je prikazana shema togostne matrike prečk B za primer obravnavnega okvirja. Dobimo jo, če ustvarimo togostni matriki za sistema prečk v prvi in drugi etaži in ju seštejemo. V polju (i,j) se nahajajo koeficient b_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j . Temnejši kvadrati pomenijo vozlišča, v katerih se stikajo prečke.

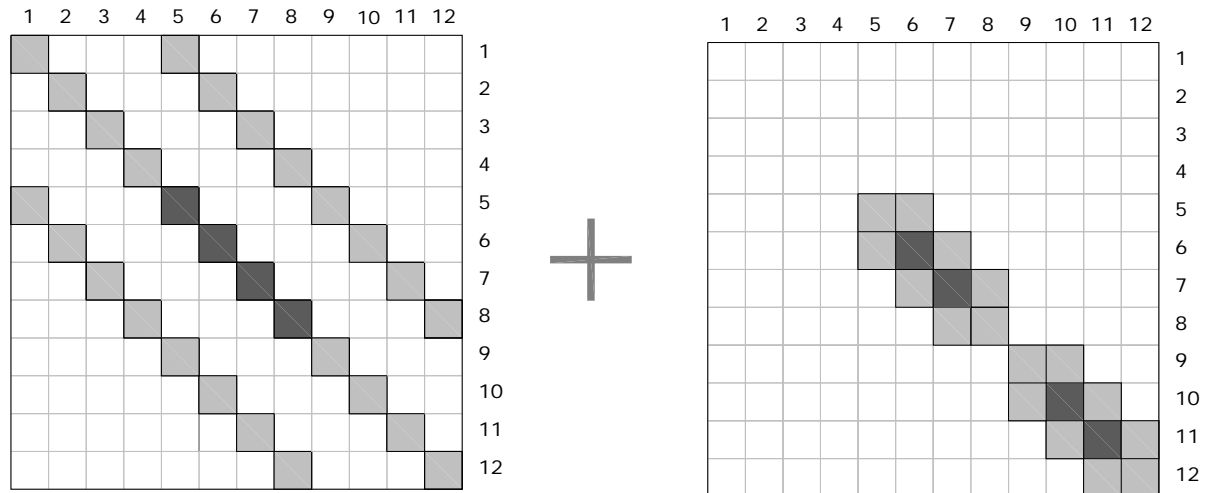


Slika 35: Shema togostne matrike prečk B za primer dvoetažnega okvirja s tremi polji

Togostna matrika okvirja

Togostne matrike makroelementov označimo z K_m . V primeru okvirja jo določimo tako, da seštejemo togostni matriki stebrov in prečk, pri čemer upoštevamo prostostne stopnje v

nepodprtih vozliščih (glej sliko 36). Polni dvoetažni okvir s tremi polji ima podprta prva štiri vozlišča. Togostna matrika K_m obravnavega okvirja je velikosti 24×24 .



Slika 36: Tvorjenje togostne matrike K_m za primer polnega dvoetažnega okvirja s tremi polji

3.1.2 Togostna matrika stene na stebrih

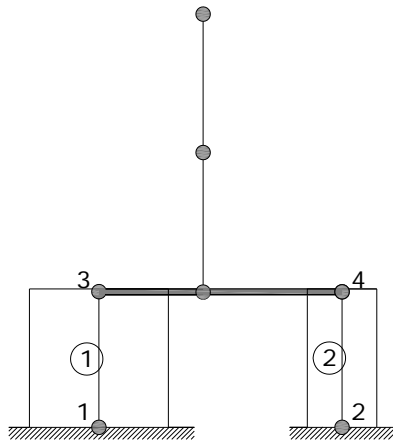
Togostna matrika stene na stebrih je sestavljena podobno kot togostna matrika okvirja. Sestavljajo jo togostna matrika stebrov C , togostna matrika sten W in togostna matrika dveh togih prečk B , vse velikosti $15 + (n - 1) \cdot 3$, kjer n pomeni število etaž stene na stebrih. Stebri, prečke in stene so modelirani z ravninskimi linijskimi končnimi elementi. Tvorjenje togostne matrike je prikazano na primeru stene na stebrih preko treh etaž.

Togostna matrika stebrov C

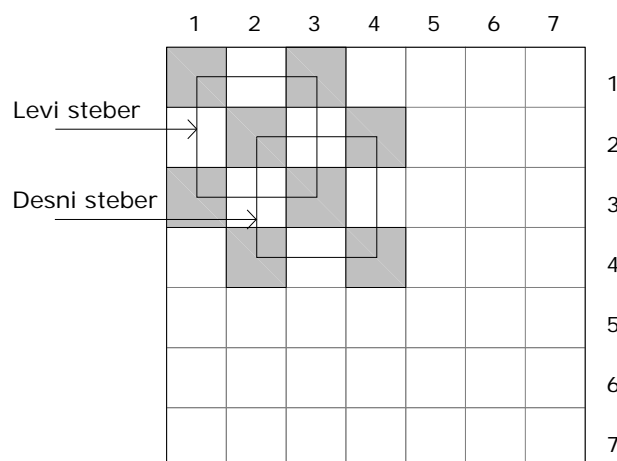
Prvi steber poteka od vozlišča 1 do vozlišča 3, drugi pa od vozlišča 2 do vozlišča 4 (Slika 37). Oštevilčenje elementov in vozlišč stene na stebrih je podrobneje opisano v poglavju 2.4.3. Koeficienti i -tega stebra zasedejo naslednje stolpce in vrstice matrike C :

- $(i - 1) \cdot 3 + 1$ do $(i - 1) \cdot 3 + 3$ in
- $(i - 1) \cdot 3 + 7$ do $(i - 1) \cdot 3 + 9$

Na sliki 38 je za primer obravnavane stene na stebrih prikazana shema togostne matrike stebrov C . V polju (i,j) se nahajajo koeficienti c_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j .



Slika 37: Steber 1 in 2 stene na stebrih



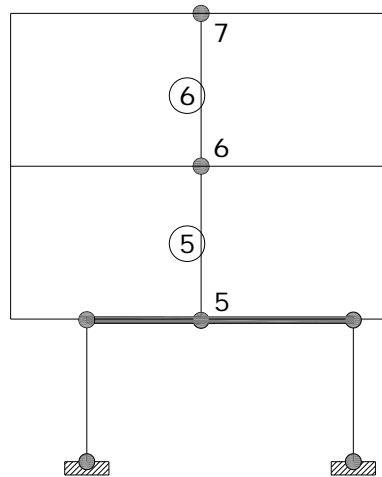
Slika 38: Shema togostne matrike stebrov C
stene na stebrih

Togostna matrika sten W

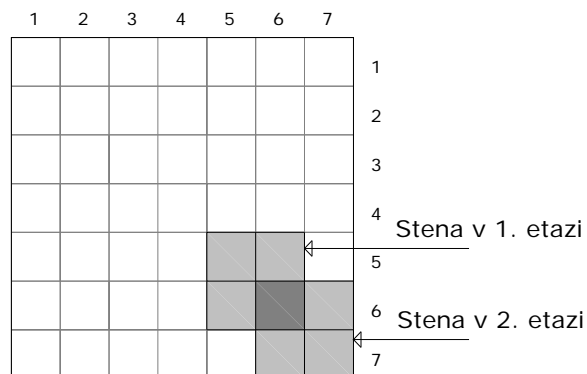
Na sliki 39 je prikazan sistem dveh elementov, s katerima je modelirana stena preko druge in tretje etaže. Element z zaporedno številko i poteka od vozlišča i do vozlišča $(i+1)$. Koeficienti togostne matrike elementa i zasedejo naslednje stolpce in vrstice matrike W :

- $13 + (i - 2) \cdot 3$ do $18 + (i - 2) \cdot 3$

Na sliki 40 je za primer obravnavane stene prikazana shema togostne matrike sten W . V polju (i,j) se nahajajo koeficienti w_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j . Potemnjena polja označujejo vozlišča v katerih so povezani posamezni elementi.



Slika 39: Stena preko prve in druge etaže za primer stene na stebrih s tremi etažami

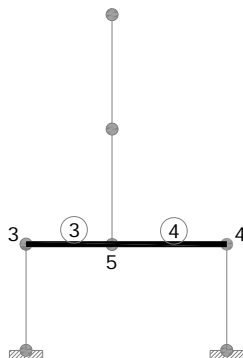


Slika 40: Shema togostne matrike sten W za steno na stebrih s tremi etažami

Tvorjenje togostne matrike togih prečk B

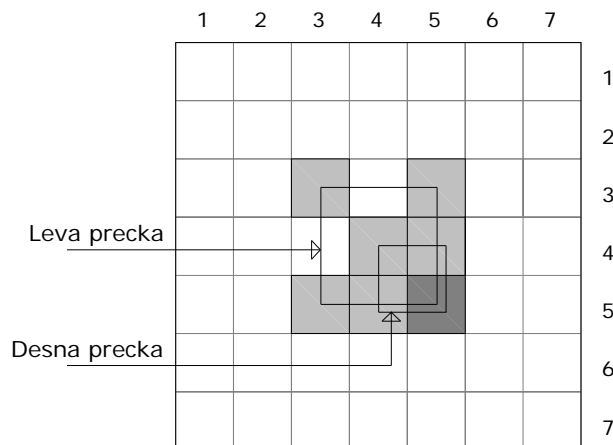
Za togi prečki se upoštevata površini prereza $A_b=100A_w$ in vztrajnostna momenta $I_{bz}=100I_{wz}$, kjer A_w in I_{wz} pomenita površino in vztrajnostni moment prereza stene v drugi etaži. Prva (leva) prečka poteka od vozlišča 3 do vozlišč 5, druga (desna) pa od vozlišča 5 do 4 (slika 41). Koeficienti togostne matrike prve (leve) prečke zasedejo naslednje stolpce in vrstice matrike

C: 7, 8, 9 in 13, 14, 15. Koeficienti togostne matrike druge (desne) prečke pa stolpce in vrstice: 13, 14, 15 in 10, 11, 12. Vsi ostali koeficienti matrike B pa so enaki nič.



Slika 41: Togi prečki modela stene na stebrih

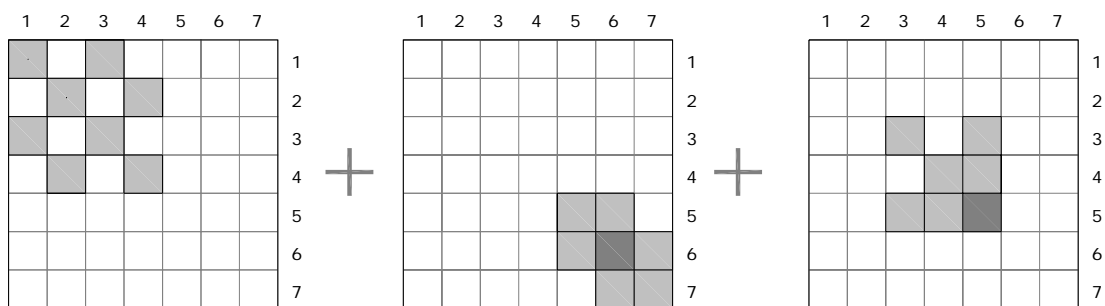
Na sliki 42 je za primer obravnavane stene prikazana shema togostne matrike prečk B . Dobimo jo, če seštejemo togostni matriki leve in desne prečke. V polju (i,j) se nahajajo koeficienti b_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j . Potemnjeno polje pomeni vozlišče v katerem sta prečki povezani.



Slika 42: Shema togostne matrike prečk B za steno na stebrih s tremi etažami

Togostna matrika stene na stebrih

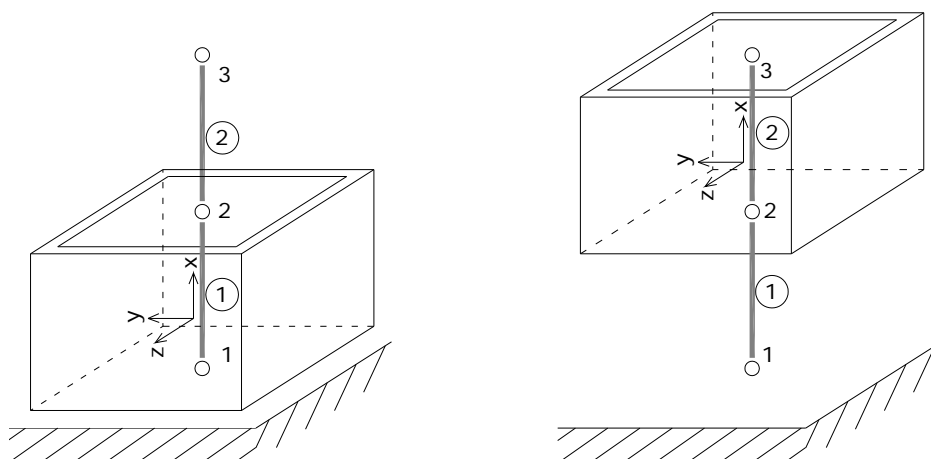
Togostno matriko stene na stebrih K_m , določimo z vsoto matrik C , W in B , pri čemer upoštevamo prostostne stopnje nepodprtih vozlišč (slika 43). Stena na stebrih ima podprti prvi dve vozlišči. Matrika K_m je v primeru obravnavane stene na stebrih velikosti 15×15 .



Slika 43: Tvorjenje togostne matrike K_m za primer stene na stebrih s tremi etažami

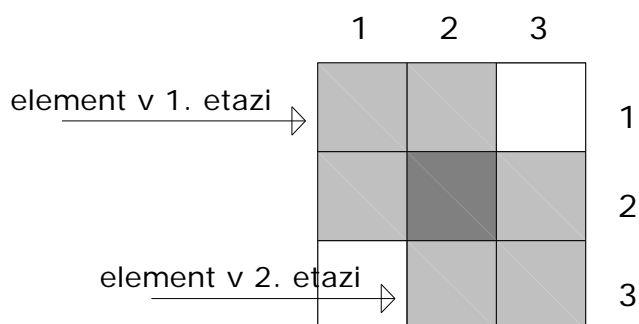
3.1.3 Togostna matrika jedra

Jedro je modelirano s prostorskimi linijskimi končnimi elementi. Najprej se določijo togostne matrike za vsak element posebej, ki se nato seštejejo v togostno matriko jedra preko n etaž. Tvorjenje togostne matrike jedra je prikazano na primeru dvoetažnega jedra. Element z zaporedno številko i poteka od vozlišča i do vozlišča $(i+1)$ (slika 44). Oštevilčenje elementov in vozlišč jedra je podrobneje opisano v poglavju 2.4.5. Koefficienti togostne matrike elementa v i -ti etaži zasedejo naslednje stolpce in vrstice: $(i-1) \cdot 5 + 1$ do $(i-1) \cdot 5 + 10$.



Slika 44: Jedro prek dveh etaž

Pri tvorjenju togostne matrike jedra K_m upoštevamo prostostne stopnje v nepodprtih vozliščih (slika 45). V polju (i,j) se nahajajo koeficienti w_{ij} , ki pomenijo sile v vozlišču i zaradi enotskih pomikov v vozlišču j . Potemnjeno polje označuje vozlišče v katerem se stikata elementa prve in druge etaže. Togostna matrika obravnevanega jedra je velikosti 12×12 .



Slika 45: Shema matrike dvoetažnega jedra

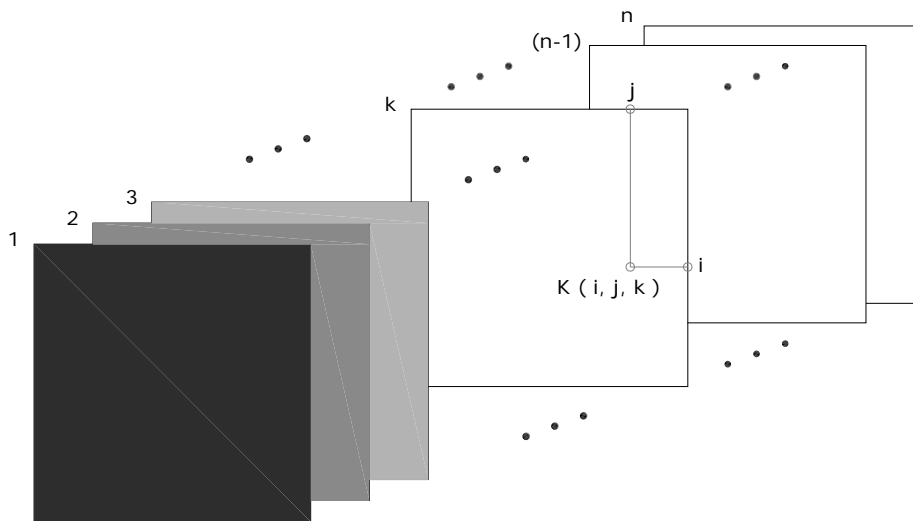
3.2 Podatkovni sezname

Posamezne funkcije, ki so z diagramom poteka predstavljene na sliki 30, vrnejo rezultat, to so izhodni podatki. Ti so glede na zaporedne številke makroelementov, nihajnih oblik, smeri gibanja tal in dinamični model konstrukcije razvrščeni v večrazsežne sezname. Predstavljena je oblika izhodnih podatkov in postopek njihovega razvrščanja v večrazsežne strukture.

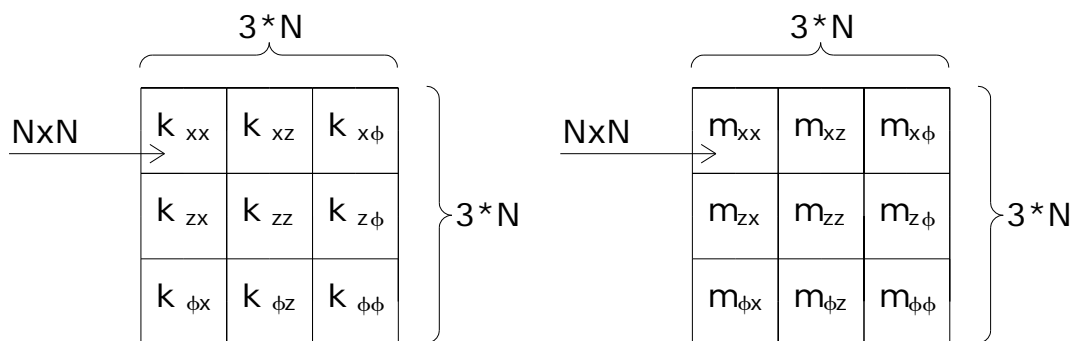
3.2.1 Matrike makroelementov in konstrukcije

Matrike makroelementov so razvrščene v trirazsežne sezname (slika 46). Togostne matrike makroelementov $[K_m]$ so razvrščene v seznam velikosti $a \times a \times stm$, kjer a pomeni velikost togostne matrike makroelementa z največ vozlišči, stm pa število makroelementov. Lokalne kondenzirane togostne matrike makroelementov $[K_l]$, globalne kondenzirane togostne matrike $[K_o]$ in transformacijske matrike $[T_o]$ in $[T_r]$ pa so razvrščene v sezname velikosti $3 \cdot N \times 3 \cdot N \times stm$, kjer N pomeni število etaž konstrukcije. Element (i, j, k) trirazsežnega seznama predstavlja koeficient v i -ti vrstici in j -tem stolpcu matrike k -tega makroelementa.

Slika 47 prikazuje shemi kondenzirane togostne matrike konstrukcije $[K]$ in masne matrike konstrukcije $[M]$ reda velikosti $3 \cdot N \times 3 \cdot N$ v globalnem koordinatnem sistemu. Koeficienti k_{ij} v togostni matriki predstavljajo sile v posameznih etažah v i -ti smeri zaradi enotskih pomikov v j -ti smeri globalnega koordinatnega sistema konstrukcije. Koeficienti m_{ii} na diagonali masne matrike predstavljajo mase oziroma masne vztrajnostne momente v posameznih etažah.



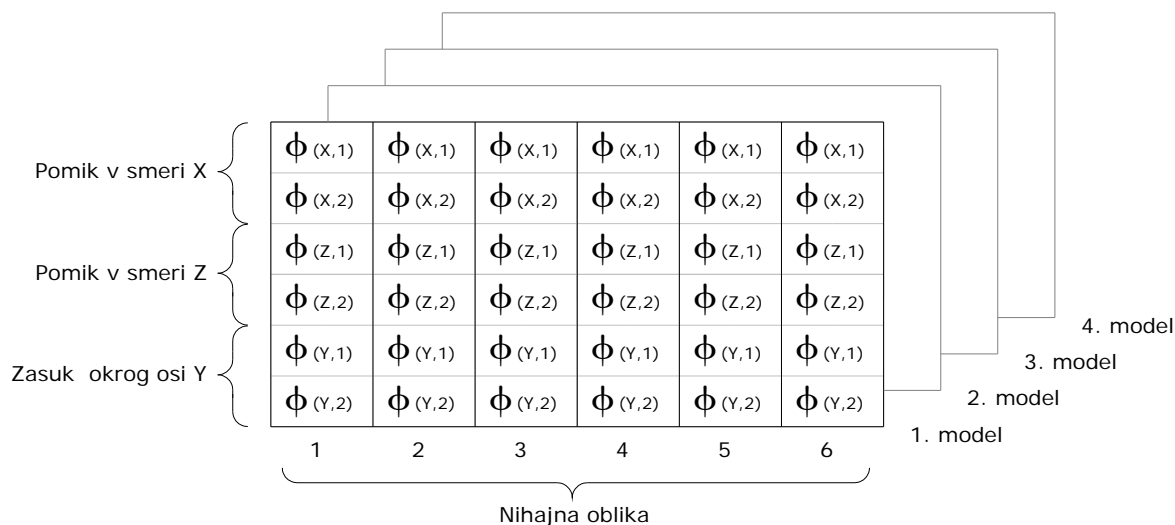
Slika 46: Shema trirazsežnega seznama matrik makroelementov



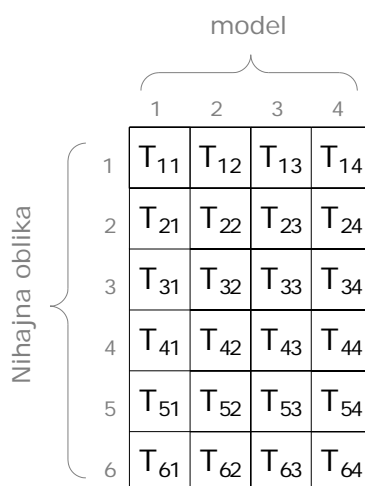
Slika 47: Shema togostne in masne matrike konstrukcije

3.2.2 Vektorji nihajnih oblik in nihajni časi konstrukcije

Na sliki 48 je prikazana shema trirazsežnega seznama, v katerem so razvrščeni vektorji nihajnih oblik $\{F_i\}$. Element $F_i(i, j, k)$ predstavlja i -to komponento vektorja j -te nihajne oblike, k -tega modela konstrukcije. Nihajni časi konstrukcije so razvrščeni v matriko z m vrsticami in n stolpci, kjer m predstavlja število nihajnih oblik konstrukcije, n pa število modelov konstrukcije. Element $T(i, j)$ predstavlja nihajni čas i -te nihajne oblike in j -tega modela konstrukcije (Slika 49).



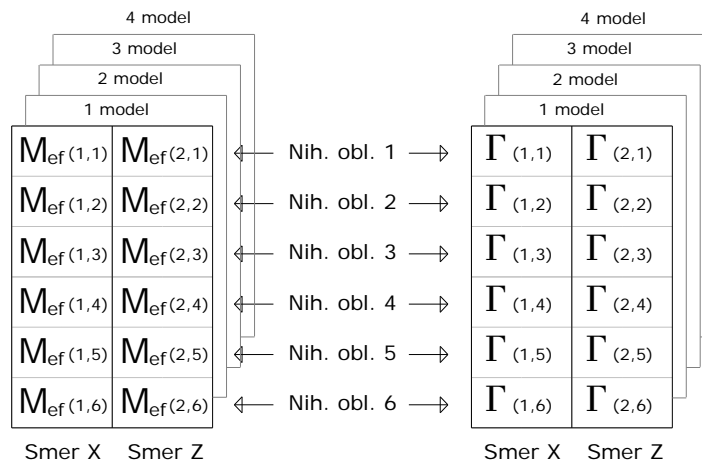
Slika 48: Shema trirazsežnega seznama vektorjev nihajnih oblik za primer dvoetažne konstrukcije



Slika 49: Shema vektorja nihajnih časov za primer dvoetažne konstrukcije

3.2.3 Faktorji participacije in efektivne mase

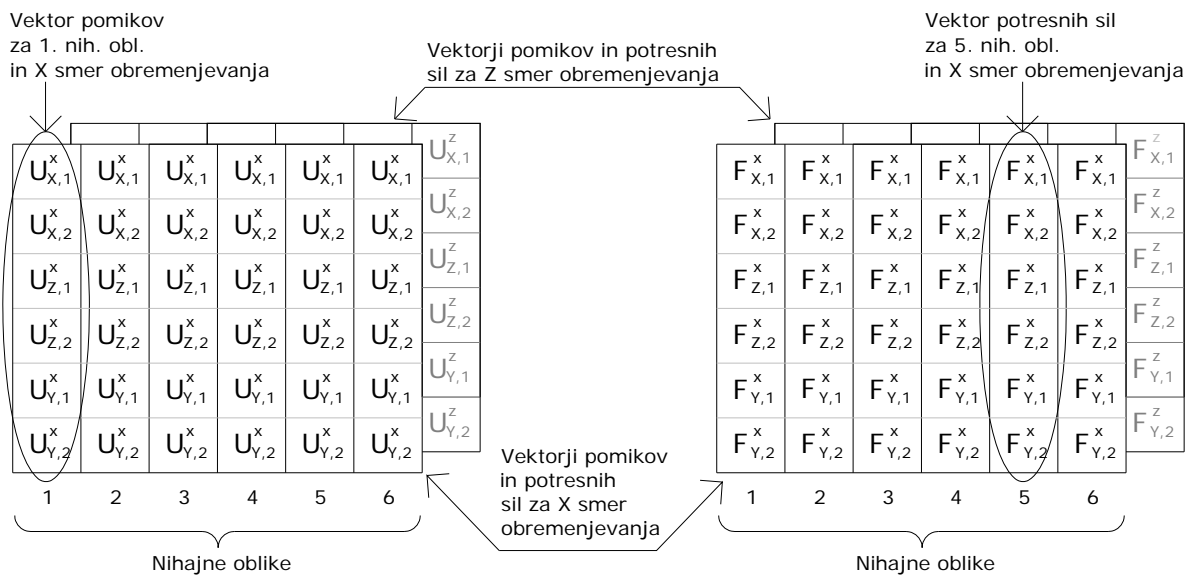
Faktorji participacije F_{part} in efektivne mase M_{ef} so razvrščeni v trirazsežna seznama (slika 50). Elementa $M_{ef}(i, j, k)$ in $F_{part}(i, j, k)$ predstavljata efektivno maso izraženo v procentih oziroma faktor participacije i -te nihajne oblike, za j -to smer obremenjevanja in k -ti dinamični model konstrukcije.



Slika 50: Shema seznama faktorjev participacije in efektivnih mas za primer dvoetažne konstrukcije

3.2.4 Vektorji pomikov in potresnih sil na konstrukcijo

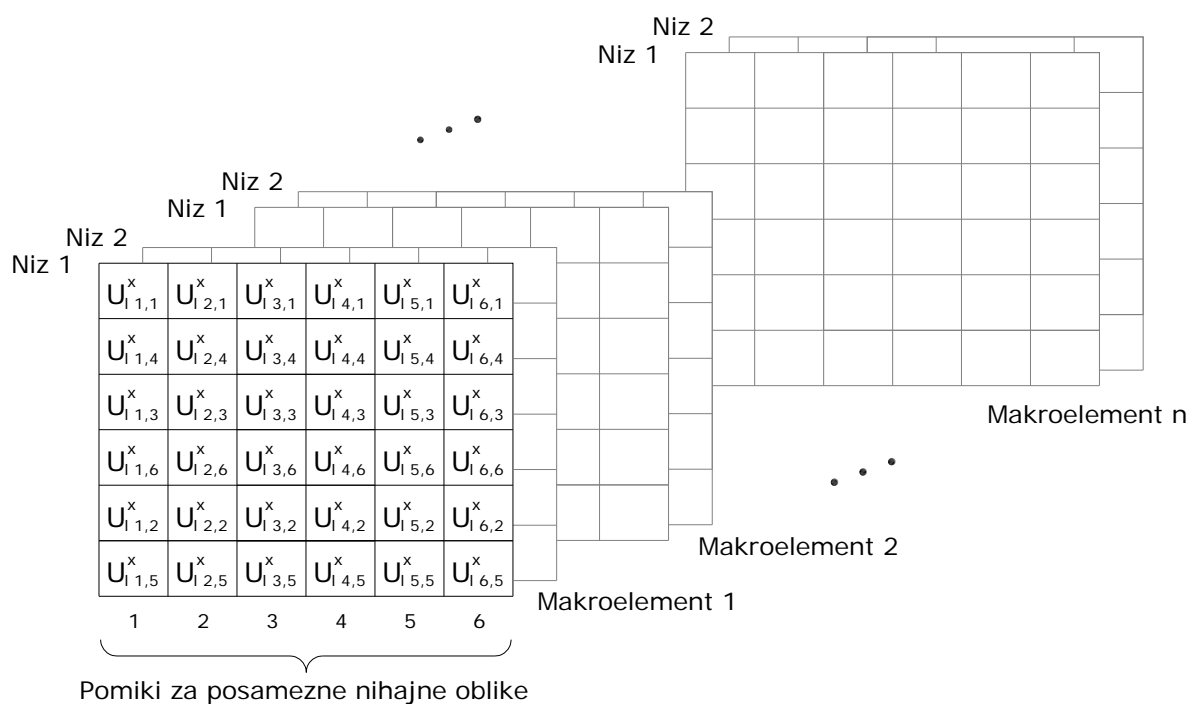
Vektorji pomikov $\{U\}$ in potresnih sil na konstrukcijo $\{F\}$ so razvrščeni v štirirazsežne sezname. Elementa $U(i, j, k, l)$ in $F(i, j, k, l)$ predstavljata pomik oziroma potresno silo na konstrukcijo v smeri prostostne stopnje i , za j -to nihajno obliko, za primer obremenjevanja konstrukcije v smeri k in l -ti dinamični model. Na sliki 51 je prikazana shema seznama vektorjev pomikov in potresnih sil za posamezni dinamični model dvoetažne konstrukcije.



Slika 51: Shema seznama vektorjev pomikov in potresnih sil za primer dvoetažne konstrukcije

3.2.5 Vektorji pomikov in potresnih sil na makroelemente

Vektorji pomikov makroelementov $\{U_l\}$ so razvrščeni v petrazsežni seznam. Element $U_l(i, j, k, l, m)$ predstavlja pomik makroelementa v smeri prostostne stopnje i , za j -to nihajno obliko, k -to smer gibanja tal, l -ti makroelement in m -ti dinamični model konstrukcije. Na sliki 52 je prikazana shema seznama vektorjev pomikov makroelementov za posamezni dinamični model dvoetažne konstrukcije.



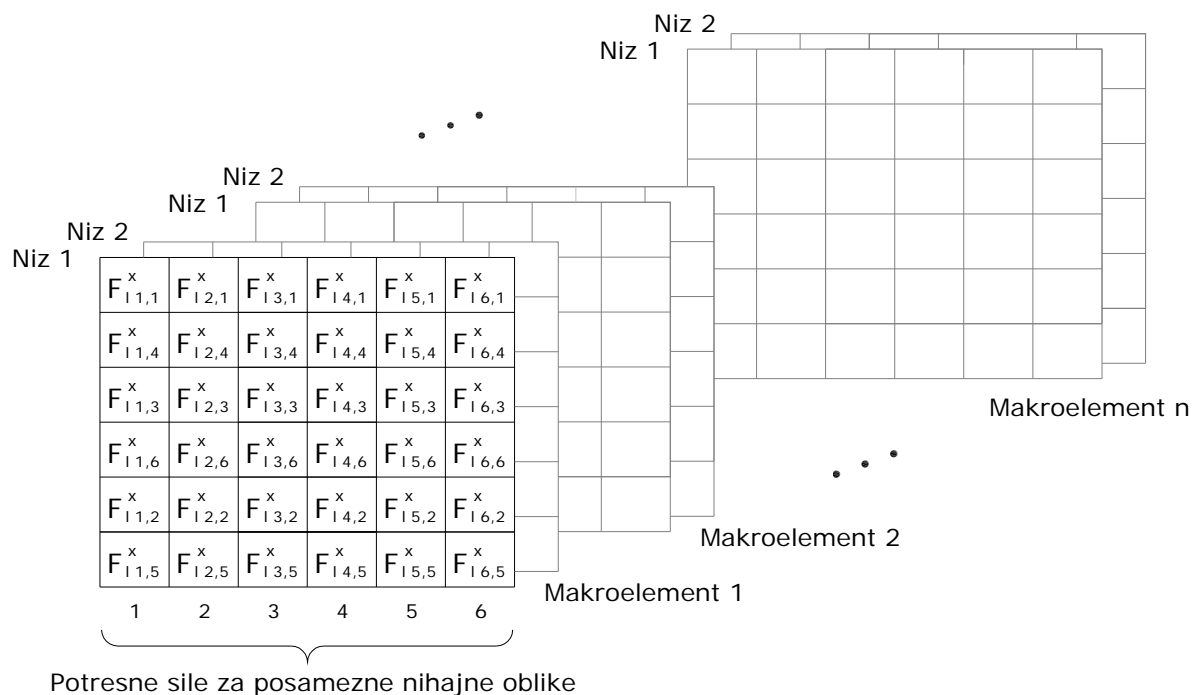
Slika 52: Shema seznama vektorjev pomikov makroelementov za primer dvoetažne konstrukcije

Podobno so razvrščeni vektorji potresnih sil na makroelemente. Element $F_l(i, j, k, l, m)$ predstavlja potresno silo v smeri prostostne stopnje i , za j -to nihajno obliko, k -to smer gibanja tal, l -ti makroelement in m -ti dinamični model konstrukcije. Na sliki 53 je prikazana shema seznama vektorjev potresnih sil na makroelemente za posamezni dinamični model dvoetažne konstrukcije.

3.2.6 Vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil

Vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil na konstrukcijo zaradi vplivov nihajnih oblik $\{U_{no}\}$ oziroma $\{F_{no}\}$ so razvrščeni v trirazsežne sezname. Elementa $U_{no}(i, j, k)$ in $F_{no}(i, j, k)$ predstavljata pomik oziroma potresno silo v smeri prostostne stopnje i , za j -to smer obremenjevanja, in k -ti model konstrukcije. Vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil na konstrukcijo zaradi različnih smeri obremenjevanja $\{U_{komb}\}$ oziroma $\{F_{komb}\}$ pa v dvodimenzionalni seznam. Elementa $U_{komb}(i, j)$ in $F_{komb}(i, j)$ označujeta pomik oziroma potresno silo v smeri prostostne stopnje i za k -ti model konstrukcije.

Podobno so razvrščeni vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil na makroelemente zaradi vplivov nihajnih oblik Ul_{no} in Fl_{no} ter vektorji kombiniranih pomikov in potresnih sil na makroelemente zaradi različnih smeri obremenjevanja Ul_{komb} in Fl_{komb} le, da so v tem primeru sezname večji za dimenzijo, ki označuje zaporedno številko makroelementa.



Slika 53: Shema seznama vektorjev potresnih sil na makroelemente za primer dvoetažne konstrukcije

4 PREGLED UKAZOV PROGRAMA

Program je zasnovan tako, da se ukazi po vrsti vpišejo v datoteko *.m ali pa se po vrsti vnašajo v ukazno vrstico programa MATLAB. Z vsakim ukazom pokličemo funkcijo z enakim imenom, ki prejme podatke in vrne rezultat. Klic *help_ime funkcije* nam vrne opis zahtevane funkcije, ki obsega pregled vseh spremenljivk in vhodnih podatkov.

V novi verziji programa EAVEK so ukazi razdeljeni v dve večji skupini. V prvo skupino spadajo ukazi, s katerimi definiramo konstrukcijo in vršimo korake potresne analize, v drugo pa ukazi, ki nam omogočajo pregled vmesnih in končnih rezultatov.

4.1 Pregled ukazov za vršitev analize

Po vrsti so opisani ukazi, s katerimi definiramo konstrukcijo in vršimo korake potresne analize. Z vsakim ukazom pokličemo istoimensko funkcijo, ki vrne rezultat, to je izhodne podatke, ki so definirani kot globalne spremenljivke. Pri ukazih, ki vsebujejo vhodne podatke, so le ti podrobno opisani.

Ukaz se vedno začne z imenom funkcije, ki jo kličemo. V oklepaju za imenom sledijo vhodni podatki, ločeni z vejico:

$$\textit{ImeUkaza}(\textit{VhodniPodatek1}, \textit{Vhodni podatek2}, \dots, \textit{VhodniPodatekN})$$

Vhodne podatke po vrsti vnašamo v pripadajoča polja. Poglejmo si primer ukaza z imenom *Ukaz*, s tremi vhodnimi podatki vrednosti $\textit{VhodniPodatek1}=1$, $\textit{VhodniPodatek2}=2$ in $\textit{VhodniPodatek3}=3$. Oblika ukaza je sledeča:

$$\textit{Ukaz}(1,2,3)$$

Vhodni podatki so lahko skalarji, vektorji, matrike ali globalni podatki shranjeni v večrazsežnih seznamih. Ko na primer definiramo mase konstrukcije, zapišemo vektor z N komponentami, kjer N pomeni število etaž. Vsaka komponenta predstavlja maso pripadajoče

etaže. Kadar pa na primer definiramo tlorisne dimenzije etaž, zapišemo matriko z N vrsticami in dvema stolpcema. Komponenti vsake vrstice predstavljata tlorisni dimenziji v obeh pravokotnih smereh. Kadar so vrednosti podatkov za vse etaže enake, lahko le te zapišemo z eno vrednostjo v obliki skalarja oziroma vektorja. Če ukaz ne vsebuje vhodnih podatkov, ukaz sestavlja samo ime funkcije, brez oklepaja.

Ukazi iz prve skupine se delijo v štiri sklope (Preglednica 1). V prvi sklop spadajo ukazi s katerimi definiramo konstrukcijo, v drugi sklop spadajo ukazi s katerimi definiramo mase in izračunamo lastno nihanje konstrukcije, v tretjem sklopu so zbrani ukazi s katerimi določimo dinamični odziv potresnega vpliva na konstrukcijo, v četrti sklop pa sodi ukaz s katerim določimo notranje sile v zahtevanih makroelementih.

Preglednica 1: Ukazi za vršitev analize

1. SKLOP	2. SKLOP	3. SKLOP	4. SKLOP
<i>GlobalniPodatki</i>	<i>Mase</i>	<i>SpekterPospeskov</i>	<i>NotranjeSile</i>
<i>Makroelement:</i>	<i>LastnoNihanje</i>	<i>PomikiKonstrukcije</i>	
<i>Okvir</i>		<i>PomikiMakroelementov</i>	
<i>Stena</i>		<i>PotresneSileNaKonstrukcijo</i>	
<i>StenaNaStebrih</i>		<i>PotresneSileNaMakroelemente</i>	
<i>StenaZOdprtinami</i>			
<i>Jedro</i>			
<i>Konstrukcija</i>			

4.1.1 Definiranje globalnih podatkov

Ukaz *GlobalniPodatki* pokliče enakoimensko funkcijo, ki definira osnovne podatke o konstrukciji in veljajo za vse makroelemente. Vhodni podatki so opisani v preglednici 2.

Oblika klica funkcije je sledeča:

>>*GlobalniPodatki(DimenzijeObjekta,SteviloEtaz, VisineEtaz, SteviloMakroelementov, ...
ElasticniModul, PoissonovoStevilo);*

Preglednica 2: Vhodni podatki funkcije *GlobalniPodatki*

IME	VRSTA	OPIS
<i>DimenzijeObjekta</i>	Matrika	$[D_{X1} D_{Z1}; D_{X2} D_{Z2}; \dots ; D_{XN} D_{ZN}]$, kjer D_{Xi} in D_{Zi} pomenijo tlorsno dimenzijo posamezne etaže v X oziroma Z smeri glavnega koordinatnega sistema
<i>SteviloEtaz</i>	Skalar	Pomeni število etaž konstrukcije
<i>VisineEtaz</i>	Vektor	$[H_1, H_2, \dots, H_N]$, kjer H_i pomeni višino i -te etaže
<i>SteviloMakroElementov</i>	Skalar	Pomeni število makroelementov, ki jih upoštevamo v analizi konstrukcije
<i>ElasticniModul</i>	Skalar	Pomeni elastični modul materiala konstrukcije
<i>PoissonovoStevilo</i>	Skalar	Pomeni Poissonov količnik materiala

4.1.2 Definiranje makroelementov

Z ukazi *Okvir*, *Stena*, *StenaNaStebrih*, *StenaZOdprtinami* in *Jedro* kličemo enakoimenske funkcije, ki prejmejo podatke o makroelementih in vrnejo togostne in transformacijske matrike. V preglednicah 3 do 8 so opisani vhodni in izhodni podatki funkcij makroelementov. Oblika klicov funkcij makroelementov je sledeča:

>>*Okvir(MakroElement, koordinataX, koordinataZ, Orientiranost, SteviloPolj, SteviloEtaz,...*
DolzinaPolj, Ast, Asst, Ist, Apr, Aspr, Ipr, OdstranjeniElementi);

>>*Stena(MakroElement, koordinataX, koordinataZ, Orientiranost, SteviloEtaz,...*
DebelinaStene, SirinaStene);

>>*StenaNaStebrih(MakroElement, koordinataX, koordinataZ, Orientiranost, SirinaStebrov,...*
SirinaOdprtine, DebelinaStene, SteviloEtaz, SirinaStene);

>>*StenaZOdprtinami(MakroElement, koordinataX, koordinataZ, Orientiranost,...*
SteviloOdprtin, SteviloEtaz, DebelinaStene, SirinaStebrov, SirinaOdprtin,...
VisinaOdprtin, OdstranjeniElementi);

>> *Jedro(MakroElement, koordinataX, koordinataZ, Orientiranost,...*
SteviloEtaz,Asy,Asz,Iy,Iz,It);

Preglednica 3: Vhodni podatki funkcije *Okvir*

IME	Vrsta	opis
<i>MakroElement</i>	Skalar	Pomeni zaporedno številko makroelementa
<i>KoordinataX</i>	Skalar	X koordinata centra togosti okvirja v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>KoordinataZ</i>	Skalar	Z koordinata centra togosti okvirja v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>Orientiranost</i>	Skalar	Pomeni kot, za katerega je okvir zasukan glede na glavni koordinatni sistem konstrukcije
<i>SteviloPolj</i>	Skalar	Pomeni število polj okvirja
<i>SteviloEtaz</i>	Skalar	Pomeni etažo konstrukcije, do katere sega okvir
<i>DolzinaPolj</i>	Vektor	$[L_1, L_2, \dots, L_m]$, kjer L_i pomeni dolžino i -tega polja
<i>Ast</i>	Vektor	$[Ac_1, Ac_2, \dots, Ac_{(m+1)}]$, kjer Ac_i pomeni površino prereza stebra v i -ti vrsti
<i>Asst</i>	Vektor	$[Acs_1, Acs_2, \dots, Acs_{(m+1)}]$, kjer Acs_i pomeni strižno površino prereza stebra v i -ti vrsti
<i>Ist</i>	Vektor	$[Ic_1, Ic_2, \dots, Ic_{(m+1)}]$, kjer Ic_i pomeni vztrajnostni moment prereza stebra v i -ti vrsti
<i>Apr</i>	Vektor	$[Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_m]$, kjer Ab_i pomeni površino prereza prečke v i -tem polju
<i>Aspr</i>	Vektor	$[Abs_1, Abs_2, \dots, Abs_m]$, kjer Abs_i pomeni strižno površino prereza prečke v i -tem polju
<i>Ipr</i>	Vektor	$[Ib_1, Ib_2, \dots, Ib_m]$, kjer Ib_i pomeni vztrajnostni moment prečke stebra v i -tem polju
<i>OdstranjeniElementi</i>	Vektor	$[ode_1, ode_2, \dots, ode_n]$, kjer ode_i pomeni zaporedno številko i -tega odstranjenega elementa

Preglednica 4: Vhodni podatki funkcije *Stena*

IME	VRSTA	OPIS
<i>MakroElement</i>	Skalar	Pomeni zaporedno številko makroelementa
<i>KoordinataX</i>	Skalar	X koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>KoordinataZ</i>	Skalar	Z koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>Orientiranost</i>	Skalar	Pomeni kot, za katerega je stena zasukana glede na glavni koordinatni sistem konstrukcije
<i>SteviloEtaz</i>	Skalar	Pomeni etažo konstrukcije, do katere sega stena
<i>DebelinaStene</i>	Vektor	$[tw_1, tw_2, \dots, tw_n]$, kjer tw_i pomeni debelino stene v i -ti etaži
<i>SirinaStene</i>	Vektor	$[dw_1, dw_2, \dots, dw_n]$, kjer dw_i pomeni širino stene v i -ti etaži

Preglednica 5: Vhodni podatki funkcije *StenaNaStebrih*

IME	Vrsta	opis
<i>MakroElement</i>	Skalar	Pomeni zaporedno številko makroelementa
<i>KoordinataX</i>	Skalar	X koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>KoordinataZ</i>	Skalar	Z koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>Orientiranost</i>	Skalar	Pomeni kot, za katerega je stena zasukana glede na glavni koordinatni sistem konstrukcije
<i>SirinaStebrov</i>	Vektor	$[dc_1, dc_2]$, kjer dc_i pomeni širino i -tega stebra
<i>SirinaOdprtine</i>	Skalar	Pomeni širino odprtine med stebri v prvi etaži
<i>DebelinaStene</i>	Vektor	$[tw_1, tw_2, \dots, tw_n]$, kjer tw_i pomeni debelino stene v i -ti etaži
<i>SteviloEtaz</i>	Skalar	Pomeni etažo konstrukcije, do katere sega stena na stebrih
<i>SirinaStene</i>	Vektor	$[dw_1, dw_2, \dots, dw_n]$, kjer dw_i pomeni širino stene v i -ti etaži

Preglednica 6: Vhodni podatki funkcije *StenaZOdprtinami*

IME	Vrsta	opis
<i>MakroElement</i>	Skalar	Pomeni zaporedno številko makroelementa
<i>KoordinataX</i>	Skalar	X koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>KoordinataZ</i>	Skalar	Z koordinata centra togosti stene v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>Orientiranost</i>	Skalar	Pomeni kot, za katerega je stena zasukana glede na glavni koordinatni sistem konstrukcije
<i>SteviloOdprtin</i>	Skalar	Pomeni število etažnih odprtin
<i>SteviloEtaz</i>	Skalar	Pomeni etažo konstrukcije, do katere sega stena
<i>DebelinaStene</i>	Vektor	$[tw_1, tw_2, \dots, tw_n]$, kjer tw_i pomeni debelino stene v i -ti etaži
<i>SirinaStebrov</i>	Vektor	$[dc_1, dc_2, \dots, dc_{(m+1)}]$, kjer dc_i pomeni širino stebra v i -ti vrsti
<i>SirinaOdprtin</i>	Vektor	$[do_1, do_2, \dots, do_m]$, je do_i širina odprtine v i -tem polju
<i>VisinaOdprtin</i>	Vektor	$[h_1, h_2, \dots, h_n]$, kjer h_i pomeni višino odprtine v i -ti etaži
<i>OdstranjeniElementi</i>	Skalar	$[ode_1, ode_2, \dots, ode_n]$, kjer ode_i pomeni zaporedno številko i -tega odstranjenega elementa

Preglednica 7: Vhodni podatki funkcije *Jedro*

IME	Vrsta	opis
<i>MakroElement</i>	Skalar	Pomeni zaporedno številko makroelementa
<i>KoordinataX</i>	Skalar	X koordinata centra togosti jedra v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>KoordinataZ</i>	Skalar	Z koordinata centra togosti jedra v glavnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>Orientiranost</i>	Skalar	Pomeni kot, za katerega je jedra zasukana glede na glavni koordinatni sistem konstrukcije

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

<i>STEVIL</i> ETAZ	SKALAR	POMENI ETAŽO KONSTRUKCIJE, DO KATERE SEGA JEDRO
<i>Asy</i>	Vektor	$[A_{wsy_1}, A_{wsy_1}, \dots, A_{wsy_n}]$, kjer A_{wsy_i} pomeni strižno površino prereza jedra v i -ti etaži v smeri osi y lokalnega koordinatnega sistema elementa
<i>Asz</i>	Vektor	$[A_{wsz_1}, A_{wsz_1}, \dots, A_{wsz_n}]$, kjer A_{wsz_i} pomeni strižno površino prereza jedra v i -ti etaži v smeri osi z lokalnega koordinatnega sistema elementa
<i>Iy</i>	Vektor	$[I_{wy_1}, I_{wy_2}, \dots, I_{wy_n}]$, kjer I_{wy_i} pomeni vztrajnostni moment prereza jedra v i -ti etaži okoli osi y lokalnega koordinatnega sistema elementa
<i>Iz</i>	Vektor	$[I_{wz_1}, I_{wz_2}, \dots, I_{wz_n}]$, kjer I_{wz_i} pomeni vztrajnostni moment prereza jedra v i -ti etaži okoli osi z lokalnega koordinatnega sistema elementa
<i>It</i>	Vektor	$[I_{wt_1}, I_{wt_2}, \dots, I_{wt_n}]$, kjer I_{wt_i} pomeni torzijski vztrajnostni moment prereza jedra v i -ti etaži

Preglednica 8: Izhodni podatki funkcij makroelementov

IME	Vrsta	opis
<i>Km</i>	Matrika	Togostna matrika makroelementa
<i>Kl</i>	Matrika	Kondenzirana togostna matrika makroelementa v lokalnem koordinatnem sistemu makroelementa
<i>Ko</i>	Matrika	Kondenzirana togostna matrika makroelementa v globalnem koordinatnem sistemu konstrukcije
<i>To</i>	Matrika	Transformacijska matrika makroelementa kot zveza med premiki konstrukcije in premiki makroelementov
<i>Tr</i>	Matrika	Transformacijska matrika makroelementa zaradi zasuka lokalnega koordinatnega sistema

4.1.3 Tvorjenje togostne matrike konstrukcije

Z ukazom *Konstrukcija* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne togostno matriko konstrukcije v glavnem koordinatnem sistemu, preveri stabilnost konstrukcije in določi center togosti posameznih etaž. Ukaz ne vsebuje vhodnih podatkov. Sestavlja ga samo ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 9.

Preglednica 9: Izhodni podatki funkcije *Konstrukcija*

IME	Vrsta	opis
K	Matrika	Kondenzirana togostna matrika konstrukcije v globalnem koordinatnem sistemu
STx	Matrika	[1 STx_1 ; 2 STx_2 ; ... ; n STx_n], kjer je STx_i indeks stabilnosti. Vrednost 1 pomeni, da je konstrukcija v i -ti etaži v smeri X globalnega koordinatnega sistema stabilna. Vrednost 0 pomeni, da je konstrukcija v tej smeri in etaži nestabilna.
STz	Matrika	[1 STz_1 ; 2 STz_2 ; ... ; n STz_n], kjer je STz_i indeks stabilnosti. Vrednost 1 pomeni, da je konstrukcija v i -ti etaži v smeri Z globalnega koordinatnega sistema stabilna. Vrednost 0 pomeni, da je konstrukcija v tej smeri in etaži nestabilna.
STy	Matrika	[1 STy_1 ; 2 STy_2 ; ... ; n STy_n], kjer je STy_i indeks stabilnosti. Vrednost 1 pomeni, da je konstrukcija v i -ti etaži torzijsko stabilna. Vrednost 0 pomeni, da je konstrukcija v tej smeri in etaži nestabilna.
Xr	Matrika	[1 Xr_1 ; 2 Xr_2 ; ... ; n Xr_n], kjer Xr_i pomeni X koordinato centra togosti i -te etaže.
Zr	Matrika	[1 Zr_1 ; 2 Zr_2 ; ... ; n Zr_n], kjer Zr_i pomeni Z koordinato centra togosti i -te etaže.

4.1.4 Definiranje etažnih mas konstrukcije

Z ukazom *Mase* kličemo enakoimensko funkcijo, ki prejme podatke o etažnih masah konstrukcije in vrne masno matriko M v globalnem koordinatnem sistemu. Vhodni podatki so opisani v preglednici 10.

Oblika klica funkcije je sledeča:

\gg *Mase*(*Mase*, *MasVztrMom*, *TezisceX*, *TezisceZ*, *Ekscentricnost*);

Preglednica 10: Vhodni podatki funkcije *Mase*

IME	Vrsta	opis
<i>Mase</i>	Vektor	$[m_1, m_2, \dots, m_n]$, kjer je m_i masa v etaži i
<i>MasVztrMom</i>	Vektor	$[m_{\phi 1}, m_{\phi 2}, \dots, m_{\phi n}]$, kjer je $m_{\phi, i}$ masni vztrajnostni moment v etaži i
<i>TezisceX</i>	Vektor	$[X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tn}]$, kjer X_{t_i} pomeni X koordinato težišča mas i -te etaže v glavnem koordinatnem sistemu
<i>TezisceZ</i>	Vektor	$[Z_{t1}, Z_{t2}, \dots, Z_{tn}]$, kjer Z_{t_i} pomeni Z koordinato težišča mas i -te etaže v glavnem koordinatnem sistemu
<i>Ekscentricnost</i>	Skalar	Pomeni ekscentričnost mas v vseh etažah

4.1.5 Račun lastnega nihanja

Z ukazom *LastnoNihanje* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne nihajne oblike konstrukcije, pripadajoče nihajne čase in faktorje participacije ter efektivne mase. Ukaz sestavlja ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 11.

Preglednica 11: Izhodni podatki funkcije *LastnoNihanje*

IME	Vrsta	opis
R_x	Skalar	Vrednost 1, kadar je konstrukcija tlorisno pravilna v smeri X globalnega koordinatnega sistema in vrednost 0 v nasprotnem primeru
R_z	Skalar	Vrednost 1, kadar je konstrukcija tlorisno pravilna v smeri Z globalnega koordinatnega sistema in vrednost 0 v nasprotnem primeru
w	Skalar	Lastne frekvence, razvrščene v dvorazsežni seznam
F_i	Vektor	Vektorji nihajnih oblik, razvrščeni v trirazsežni seznam
T	Skalar	Nihajni časi, razvrščeni v dvorazsežni seznam
F_{part}	Skalar	Faktorji participacije nihajnih oblik, razvrščeni v trirazsežni seznam
M_{ef}	Skalar	Efektivne mase nihajnih oblik, razvrščene v trirazsežni seznam

4.1.6 Definiranje spektra pospeškov

Z ukazom *SpekterPospeskov* kličemo enakoimensko funkcijo, ki prejme podatke in vrne vrednosti v spektru pospeškov. Vhodni podatki, ki definirajo o spekter pospeškov so opisani v preglednici 12.

Oblika klica funkcije je sledeča:

\gg *SpekterPospeskov*(*MaksimalniPospesek*, *FaktorZemljine*, *FaktorObnasanjaX*,...
FaktorObnasanjaZ, *Tb*, *Tc*, *Td*);

Preglednica 12: Vhodni podatki funkcije *SpekterPospeskov*

IME	Vrsta	opis
<i>MaksimalniPospesek</i>	Skalar	Maksimalni pospešek tal, normiran z gravitacijskim pospeškom g

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

<i>FAKTORZEMLJINE</i>	SKALAR	FAKTOR ZEMLJINE, KI UPOŠTEVA KVALITETO TAL
<i>FaktorObnasanjaX</i>	Skalar	Faktor obnašanja za <i>X</i> smer obremenjevanja konstrukcije v glavnem koordinatnem sistemu
<i>FaktorObnasanjaZ</i>	Skalar	Faktor obnašanja za <i>Z</i> smer obremenjevanja konstrukcije v glavnem koordinatnem sistemu
<i>Tb</i>	Skalar	Spodnja meja konstantnega dela spektra pospeškov
<i>Tc</i>	Skalar	Zgornja meja konstantnega dela spektra pospeškov
<i>Td</i>	Skalar	Vrednost, ki definira začetek konstantnega dela spektra pomikov

4.1.7 Pomiki konstrukcije

Z ukazom *PomikiKonstrukcije* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne vektorje pomikov konstrukcije. Ukaz sestavlja ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 13.

Preglednica 13: Izhodni podatki funkcije *PomikiKonstrukcije*

IME	Vrsta	opis
<i>U</i>	Vektor	Vektorji pomikov konstrukcije. Razvrščeni so v štirirazsežni seznam.
<i>Uno</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih pomikov konstrukcije in sicer zaradi vpliva nihajnih oblik. Razvrščeni so v trirazsežni seznam.
<i>Ukomb</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih pomikov konstrukcije, dobljeni z elastično analizo. Razvrščeni so v dvorazsežni seznam.
<i>Udej</i>	Vektor	Vektorji dejanskih pomikov konstrukcije. Razvrščeni v dvorazsežni seznam.

4.1.8 Pomiki makroelementov

Z ukazom *PomikiMakroelementov* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne vektorje pomikov makroelementov. Ukaz sestavlja ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 14.

Preglednica 14: Izhodni podatki funkcije *PomikiMakroelementov*

IME	Vrsta	opis
<i>Ul</i>	Vektor	Vektorji pomikov makroelementov. Razvrščeni so v petrazsežni seznam.
<i>Ulno</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih pomikov makroelementov in sicer zaradi vpliva nihajnih oblik. Razvrščeni so v štirirazsežni seznam.
<i>Ulkomb</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih pomikov makroelementov, dobljeni z elastično analizo. Razvrščeni so v trirazsežni seznam.
<i>Uldej</i>	Vektor	Vektorji dejanskih pomikov konstrukcije. Razvrščeni so v trirazsežni seznam.

4.1.9 Potresne sile na konstrukcijo

Z ukazom *PotresneSileNaKonstrukcijo* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne vektorje potresnih sil na konstrukcijo. Ukaz sestavlja ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 15.

Preglednica 15: Izhodni podatki funkcije *PotresneSileNaKonstrukcijo*

IME	Vrsta	opis
<i>F</i>	Vektor	Vektorji potresnih sil na konstrukcijo. Razvrščeni so v štirirazsežni seznam.

»se nadaljuje ...«

»... nadaljevanje«

<i>FNO</i>	VEKTOR	VEKTORJI KOMBINIRANIH POTRESNIH SIL NA KONSTRUKCIJO IN SICER ZARADI VPLIVA POSAMEZNIH NIHAJNIH OBLIK. RAZVRŠČENI SO V TRIRAZSEŽNI SEZNAM.
<i>Fkomb</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih potresnih sil na konstrukcijo, dobljeni z elastično analizo. Razvrščeni so v dvorazsežni seznam.

4.1.10 Potresne sile na makroelemente

Z ukazom *PotresneSileNaMakroelemente* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne vektorje potresnih sil na makroelemente. Ukaz sestavlja ime funkcije, brez oklepajev. Izhodni podatki funkcije so opisani v preglednici 16.

Preglednica 16: Izhodni podatki funkcije *PotresneSileNaMakroelemente*

IME	Vrsta	opis
<i>Fl</i>	Vektor	Vektorji potresnih sil na makroelemente. Razvrščeni so v petrazsežni seznam.
<i>Flno</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih potresnih sil na makroelemente in sicer zaradi vpliva nihajnih oblik. Razvrščeni so v štirirazsežni seznam.
<i>Flkomb</i>	Vektor	Vektorji kombiniranih potresnih sil na makroelemente, dobljeni z elastično analizo. Razvrščeni so v trirazsežni seznam.

4.1.11 Notranje sile

Z ukazom *NotranjeSile* kličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne vrednosti notranjih sil v elementih. Vhodni podatek *MakroElement* je vektor oblike $[mel_1, mel_1, \dots, mel_n]$, kjer mel_i

pomeni zaporedno številko makroelementa i , v katerem želimo izračun. Oblika klica funkcije je *NotranjeSile(MakroElement)*.

4.2 Pregled ukazov za prikazovanje rezultatov

V drugo skupino sodijo ukazi, ki omogočajo pregled vmesnih in končnih rezultatov. Sestavljeni so iz imena funkcije, ki jo kličemo, in vhodnih podatkov v oklepaju. Podrobneje so opisani ukazi, pri katerih je potrebno podati vhodne podatke, to so ukazi *RisiNo*, *RisiSa*, *RisiU*, *RisiUl*, in *RisiFe*. Ukaze, ki ne vsebujejo vhodnih podatkov, sestavljajo samo imena funkcij, ki jo kličemo. V preglednici 17 so opisani vsi ukazi iz druge skupine.

Preglednica 17: Ukazi za prikazovanje rezultatov

Ukaz	Rezultat
<i>RisiKonstrukcija</i>	Grafično prikaže tloris konstrukcije in naris vseh makroelementov z osnovnimi podatki in geometrijskimi karakteristikami.
<i>RisiTloris</i>	Preveri tlorisno pravilnost konstrukcije in grafično prikaže tloris konstrukcije ter izpiše koordinate centra togosti in težišča mas v posameznih etažah.
<i>RisiNo</i>	Grafično prikaže nihajne oblike v dvorazsežnem koordinatnem Sistemu.
<i>RisiSa</i>	Grafično in številčno prikaže vrednosti v spektru pospeškov.
<i>RisiVplivNo</i>	Grafično prikaže vrednosti efektivnih mas in vpliv nihajnih oblik na pomike.
<i>RisiU</i>	Grafično prikaže pomike konstrukcije v dvorazsežnem koordinatnem sistemu.
<i>RisiUl</i>	Grafično prikaže pomike makroelementov v dvorazsežnem koordinatnem sistemu.
<i>RisiFe</i>	Grafično prikaže notranje sile v elementih.

4.2.1 Risanje nihajnih oblik konstrukcije

Ukaz *RisiNo* kliče enakoimensko funkcijo, ki grafično prikaže nihajne oblike v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Vhodni podatek je vektor z imenom *NihajnaOblika* oblike $[no_1, no_2, \dots, no_n]$, kjer je no_i zaporedna številka i -te nihajne oblike, ki jo želimo izrisati. Oblika klica funkcije je *RisiNo* (*NihajnaOblika*).

4.2.2 Vrednosti v spektru pospeškov

Ukaz *RisiSa* kliče enakoimensko funkcijo, ki grafično in številčno prikaže vrednosti v spektru pospeškov. Vhodni podatek je vektor z imenom *NihajnaOblika* oblike $[no_1, no_2, \dots, no_n]$, kjer je no_i zaporedna številka i -te nihajne oblike, za katero želimo izpisati vrednosti v spektru pospeškov. Oblika klica funkcije je *RisiSa* (*NihajnaOblika*).

4.2.3 Risanje pomikov konstrukcije

Ukaz *RisiU* kliče enakoimensko funkcijo, ki grafično prikaže pomike konstrukcije v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Vhodna podatka sta vrsta pomikov, ki jih želimo izrisati in vrsta kombinacije pomikov. Lahko izbiramo med nekombiniranimi pomiki *U*, kombiniranimi pomiki zaradi nihajnih oblik *Uno*, kombiniranimi pomiki zaradi različnih smeri obremenjevanja *Ukomb*, dobljenimi z elastično analizo in dejanskimi pomiki konstrukcije *Udej*. V primeru kombiniranih pomikov zaradi različnih smeri obremenjevanja lahko izbiramo med SRSS kombinacijo in kombinacijo, ki je kot alternativa predlagana v Evrokodu 8. Oblika klica funkcije je *RisiU* (*U/Uno/Ukomb/Udej, SRSS/EC*). V primeru risanja pomikov *Uno* namesto vrste kombinacije podamo smer obremenjevanja konstrukcije za katero želimo izris pomikov.

4.2.4 Risanje pomikov makroelementov

Ukaz *RisiUl* kliče enakoimensko funkcijo, ki grafično prikaže pomike makroelementov v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Prvi vhodni podatek pomeni zaporedne številke makroelementov, za katere želimo izris pomikov. Drugi je vrsta pomikov, ki jih želimo

izrisati. Lahko izbiramo med nekombiniranimi pomiki *Ul*, kombiniranimi pomiki zaradi nihajnih oblik *Ulno*, kombiniranimi pomiki zaradi različnih smeri obremenjevanja *Ulkomb*, dobljenimi z elastično analizo in dejanskimi pomiki konstrukcije *Uldej*. Tretji podatek pomeni vrsto uporabljene kombinacije. V primeru kombiniranih pomikov zaradi različnih smeri obremenjevanja lahko izbiramo med SRSS kombinacijo in kombinacijo, ki je kot alternativa predlagana v Evrokodu 8. Oblika klica funkcije je *RisiUl (Makroelement, Ul/Ulno/Ulkomb/Uldej, SRSS/EC)*. V primeru risanja pomikov *Ulno* namesto vrste kombinacije podamo smer obremenjevanja konstrukcije za katero želimo izris pomikov.

4.2.5 Risanje notranjih sil

Ukaz *RisiFe* kliče enakoimensko funkcijo, ki grafično prikaže notranje sile v makroelementih. Prvi vhodni podatek z imenom *Model* je številka dinamičnega modela. Drugi vhodni podatek je vektor z imenom *Makroelement*, katerega posamezne komponente pomenijo zaporedne številke makroelementov, za katere želimo izračun. Tretji podatek je vrsta notranjih sil, ki jih želimo izrisati, četrti vrsta statičnih količin in peti vrsta kombinacije. Lahko izbiramo med nekombiniranimi notranjimi silami *Fe*, kombiniranimi notranjimi silami zaradi nihajnih oblik *Feno* in kombiniranimi notranjimi silami zaradi različnih smeri obremenjevanja *Fekomb*. V primeru kombiniranja zaradi različnih smeri obremenjevanja lahko izbiramo med SRSS kombinacijo in kombinacijo, ki je kot alternativa predlagana v Evrokodu 8. Oblika klica funkcije je *RisiFe (Model, Makroelement, Fe/Feno/Fkomb, M/N/V, SRSS/EC)*. V primeru risanja notranjih sil *Feno* namesto vrste kombinacije podamo smer obremenjevanja konstrukcije za katero želimo izris notranjih sil.

5 PRIMERJAVA S PROGRAMOM SAP 2000

Prikazana je uporaba nove verzije programa EAVEK in primerjava dobljenih rezultatov z rezultati dobljenimi s programom SAP 2000. V programu SAP 2000 je uporabljen tridimenzionalen model konstrukcije, v programu EAVEK 2007 pa psevdotridimenzionalen računski model z ravninskimi makroelementi. V obeh primerih je privzeta predpostavka o togih ploščah v svoji ravnini, mase so podane točkovno.

5.1 Štirinadstropna dvojnosiometrična konstrukcija

Izpisani so ukazi programa EAVEK 2007 s katerimi, v okolju MATLAB, izvedemo potresno analizo obravnavane konstrukcije. Opisani so vsi vhodni podatki. Izvedena je primerjava rezultatov analize z rezultati, dobljenimi s programom SAP 2000. Primerja se pomike konstrukcije, nihajne čase in notranje sile v desnem jedru in okvirjih 2 in 3 (slika 54).

5.1.1 Opis konstrukcije

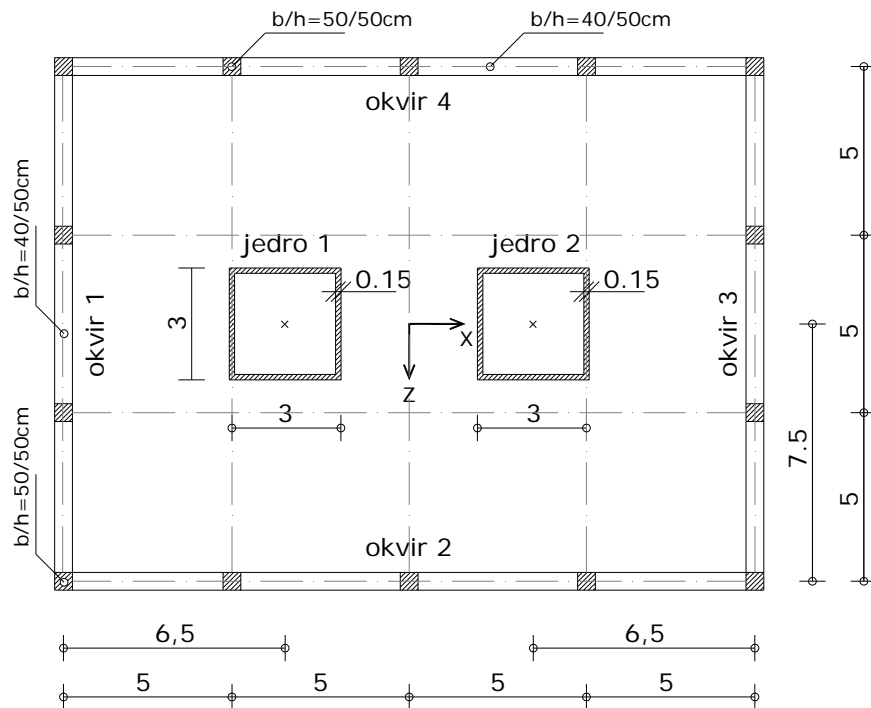
Štirinadstropno armiranobetonsko konstrukcijo sestavljajo dva vzdolžna in dva prečna okvirja ter dve jedri v sredini. Medetažna konstrukcija je plošča, za katero lahko predpostavimo, da je toga v svoji ravnini. Objekt ni podkleten. Temeljenje je plitvo. Streha je ravna. Podatki o dimenzijah makroelementov konstrukcije in tlorisu so razvidni iz slike 54. Razpokanost prereзов ni upoštevana. Za material je izbran beton kvalitete $C 25/30$ ($E = 3100 \text{ kN/cm}^2$, $\nu=0,2$). Upoštevan je faktor obnašanja $q = 2$ in sicer v obeh pravokotnih smereh. Višina vseh etaž znaša 4 m.

5.1.2 Obtežba konstrukcije

Upoštevan je spekter pospeškov po SIST EN 1998-1: 3.2.2.5, tip tal B, $a_{g,\max} = 0,225 \cdot g$.

Obtežba je enakomerno porazdeljena po vseh etažah in znaša 10 kN/m^2 . Vpliv slučajne

torzije se upošteva z izmikom mas iz točke težišča in sicer v pozitivni in negativni X in Z smeri glavnega koordinatnega sistema: $e_{ai} = \pm 0,05 \cdot L_i$ po SIST EN 1998-1: 4.3.2.



Slika 54: Tloris konstrukcije in dimenzije stebrov in prečk

5.1.3 Vnos podatkov o konstrukciji in makroelementih

Najprej definiramo konstrukcijo. To so podatki o materialu in geometriji konstrukcije in makroelementov. Globalni podatki veljajo za vse makroelemente. Definira se jih na začetku, s klicom funkcije *GlobalniPodatki*:

```
>>GlobalniPodatki([20 15],4,4,6,31000000,0.2);
```

Vhodni podatki po vrsti pomenijo: tlorisno dimenzijo objekta v X oziroma Z smeri (tlorisna dimenzija je za vse etaže enaka), število etaž konstrukcije, višino etaž v metrih, število makroelementov, elastični modul in Poissonov količnik materiala.

Makroelemente definiramo po vrsti glede na izbrane zaporedne številke. Prikazan je postopek vnosa podatkov za jedro 2 (makroelement 2) in okvir 2 (makroelement 4). Podajanje

podatkov ostalih makroelementov poteka po enakem postopku. Jedro 2 se definira s klicom funkcije *Jedro*:

```
>>Jedro(2,3.5,0,0,4,0.9,0.9,2.3213,2.3213,3.4724);
```

Vhodni podatki po vrsti pomenijo: zaporedno številko makroelementa, X in Z koordinato strižnega središča prereza jedra, kot rotacije makroelementa, etaža do katere sega makroelement, strižni prerez v y oziroma z smeri lokalnega koordinatnega sistema, upogibni vztrajnostni moment v y oziroma z smeri lokalnega koordinatnega sistema in torzijski vztrajnostni moment prereza.

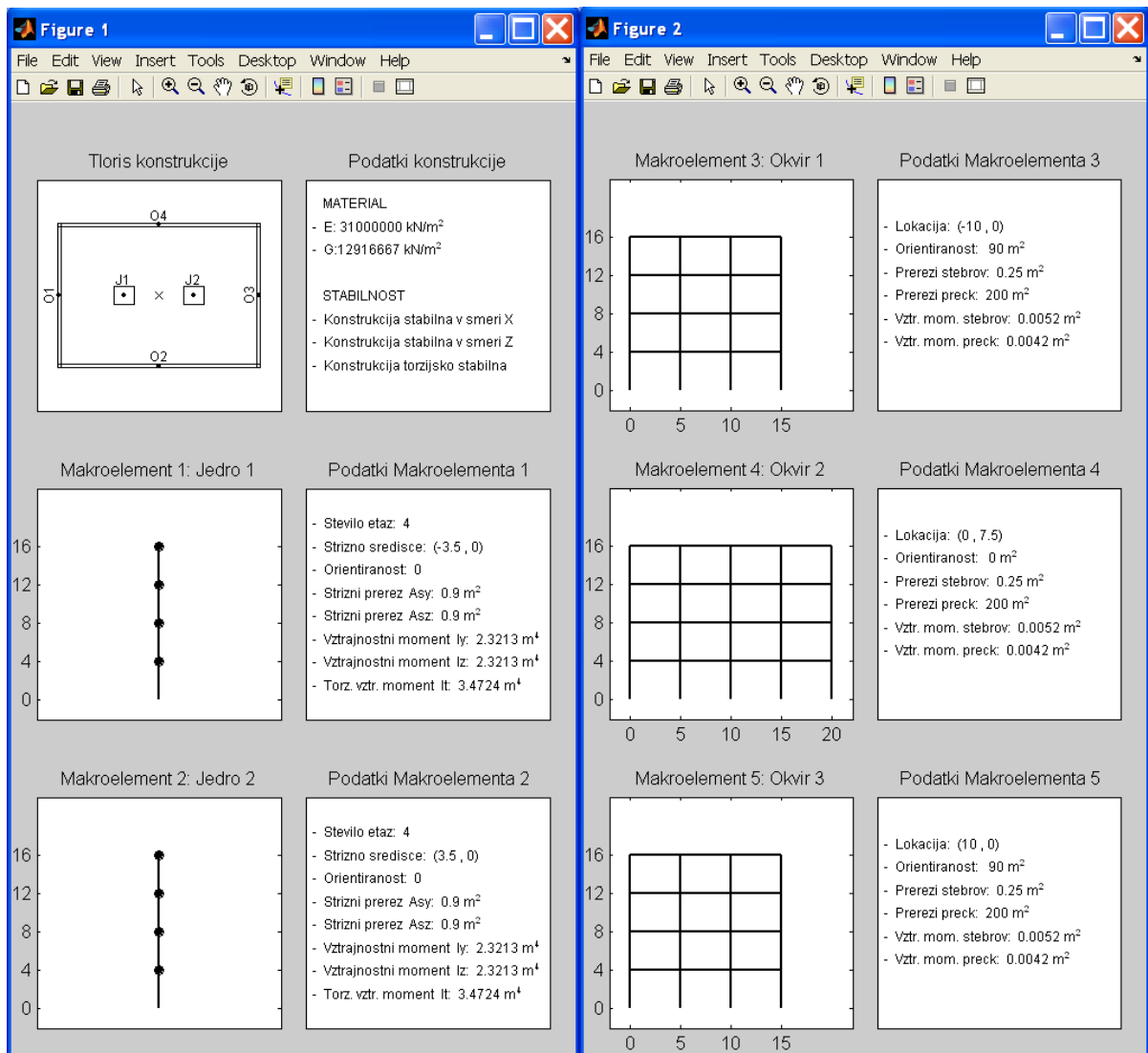
Okvir 1 se definira s klicom funkcije *Okvir*:

```
Okvir(4,0,7.5,0,4,4,[5 5 5 5],[0.25 0.25 0.25 0.25 0.25],...  
    [0.2083 0.2083 0.2083 0.2083 0.2083],...  
    [0.0052 0.0052 0.0052 0.0052 0.0052],...  
    [0.2 0.2 0.2 0.2],[0.1667 0.1667 0.1667 0.1667],...  
    [0.0042,0.0042,0.0042,0.0042],[ ]);
```

Vhodni podatki po vrsti pomenijo: zaporedno številko makroelementa, X in Z koordinato centra togosti okvirja, kot rotacije okvirja, število polj okvirja, etažo konstrukcije do katere sega okvir, razdalje posameznih polj, površine prerezov stebrov, strižne površine prerezov stebrov, vztrajnostni momenti prerezov stebrov, površine prerezov prečk, strižne površine prerezov prečk in vztrajnostni momenti prerezov prečk. Zadnji podatek je vektor z nič komponentami, kar pomeni, da ni odstranjenih elementov.

5.1.4 Izpis podatkov o konstrukciji in makroelementih

Z ukazom *Konstrukcija* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki določi togostno matriko konstrukcije, preveri stabilnost v posameznih smereh in izračuna center togosti konstrukcije. Na sliki 55 sta prikazani pogovorni okni, ki se pojavita s klicom funkcije *RisiKonstrukcijo*. Prikazujeta obravnavano konstrukcijo v tlorisu in makroelemente v narisu.



Slika 55: Tloris obravnavane konstrukcije in podatki o makroelementih

5.1.5 Vnos podatkov o masah konstrukcije

Mase konstrukcije definiramo s klicom funkcije *Mase*:

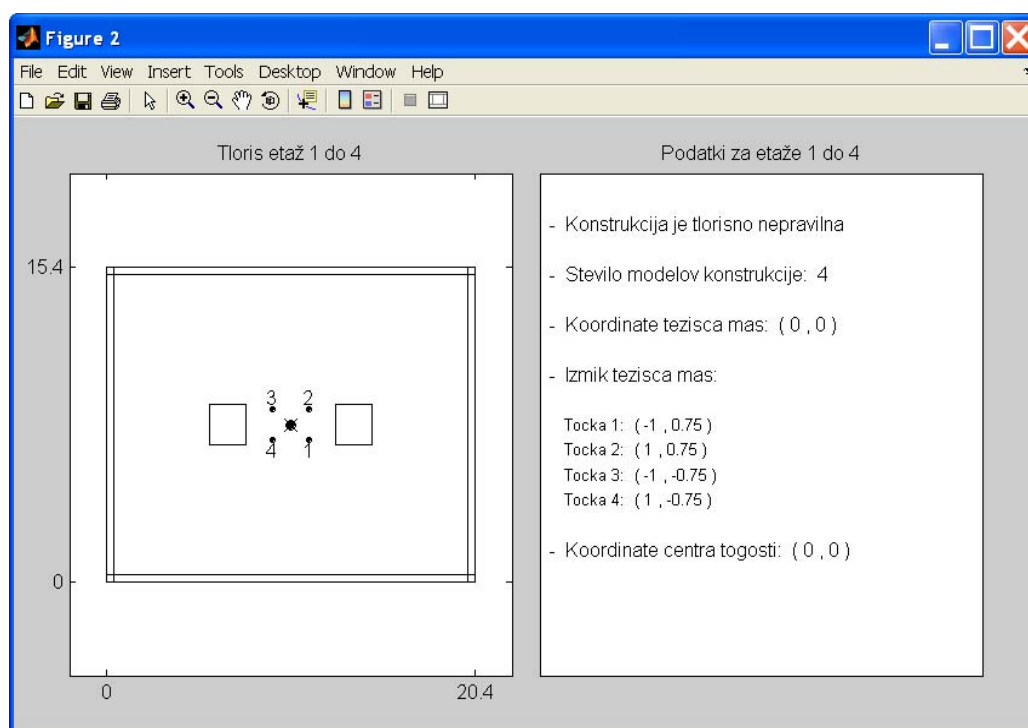
```
>>Mase(305,15478,0,0,0.05);
```

Podatki o masah so enaki za vse etaže. Vektorje lahko nadomestimo s skalarji, katerih vrednosti veljajo za vse etaže konstrukcije. Vhodni podatki po vrsti pomenijo: maso in masni vztrajnostni moment v vseh etažah, X in Z koordinati težišča mas v vseh etažah in ekscentričnost mas v X in Z smeri zaradi vpliva slučajne torzije.

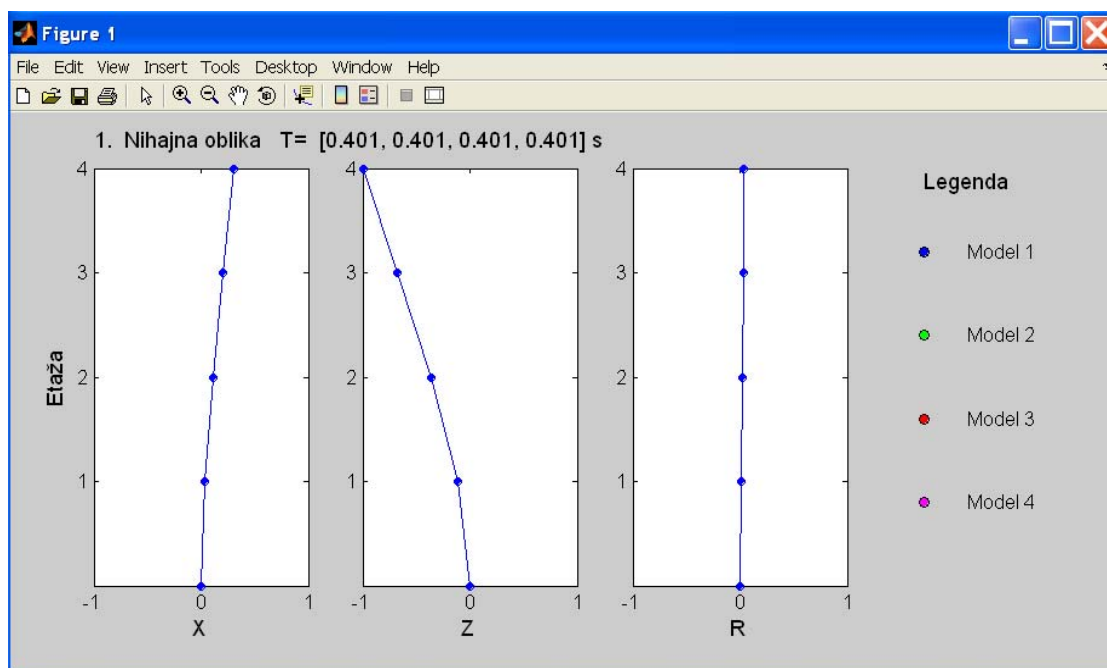
5.1.6 Lastno nihanje konstrukcije

Z ukazom *LastnoNihanje* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne nihajne oblike konstrukcije, pripadajoče nihajne čase, faktorje participacije in efektivne mase. Na sliki 56 je prikazano pogovorno okno, ki se prikaže s klicom funkcije *RisiTloris*. Prikazan je tloris konstrukcije s koordinatami težišča mas in centra togosti. Izpisani so podatki o tlorisni pravilnosti konstrukcije in številu modelov konstrukcije.

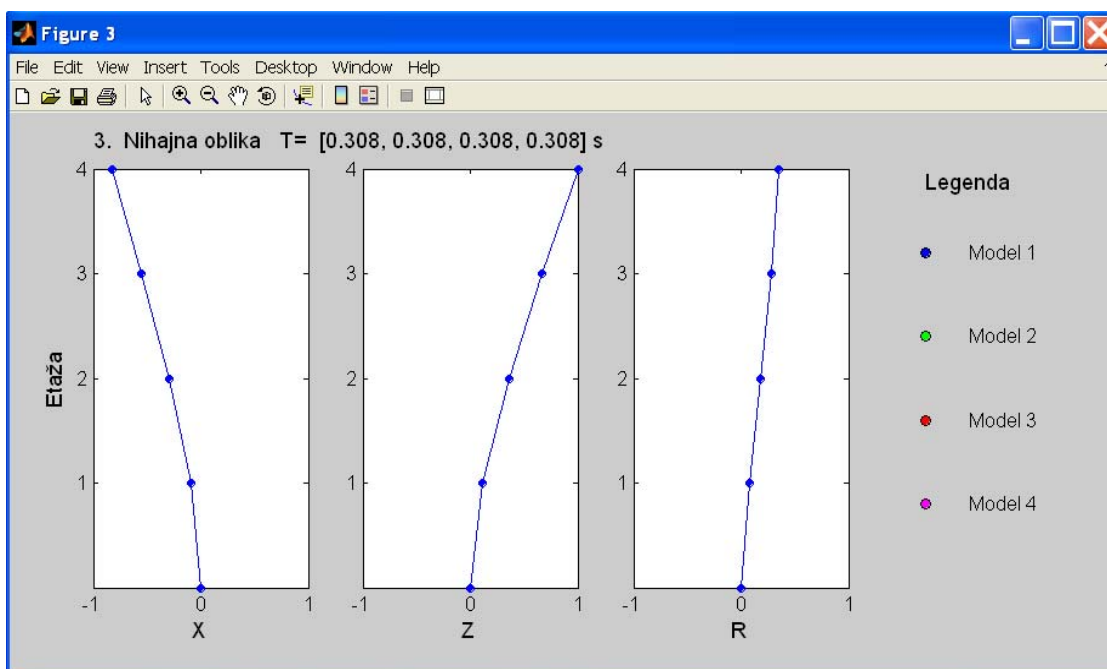
Konstrukcija je tlorisno nepravilna. Močna jedra so locirana blizu centra togosti, okvirji pa so razporejeni po obodu tlorisa konstrukcije. Posledica je torzijska podajnost konstrukcije. Upoštevamo vrednost faktorja obnašanja $q = 2$. Z ukazom *RisiNO([1 3])* pokličemo istoimensko funkcijo, ki vrne pogovorni okni prikazani na slikah 57 in 58. Okni grafično prikazujeta prvo in tretjo nihajno obliko v dvorazsežnem koordinatnem sistemu.



Slika 56: Osnovni podatki o tlorisu konstrukcije



Slika 57: Grafični prikaz prve nihajne oblike konstrukcije



Slika 58: Grafični prikaz tretje nihajne oblike konstrukcije

Težišče mas se ujema s centrom togosti konstrukcije, ki je simetrična, smeri glavnih vztrajnostnih osi dinamičnega modela pa se ujemajo s smermi osi glavnega koordinatnega sistema. Posledica je, da so nihajne oblike vseh štirih modelov konstrukcije enake. V

preglednici 18 so izpisani nihajni časi za prvih devet nihajnih oblik. Za primerjavo med psevdotridimenzionalnim in tridimenzionalnim modelom konstrukcije, ki je uporabljen v programu SAP 2000, so v preglednici 19 izpisani še nihajni časi dvajsetnadstropne stavbe s tlorisom, enakim tlorisu obravnavane štirinadstropne stavbe.

Preglednica 18: Nihajni časi za stavbo z štirimi etažami, (s)

ŠTEVILO ETAŽ: 4			
Nihajna oblika	Nihajni časi $T(s)$		
	SAP 2000	EAVEK 2007	EAVEK 1989
1	0,399	0,401	0,399
2	0,383	0,384	0,382
3	0,305	0,308	0,308
4	0,101	0,102	0,103
5	0,081	0,081	0,082
6	0,078	0,078	0,079
7	0,055	0,055	0,056
8	0,040	0,040	0,041
9	0,038	0,038	0,039

Podobnost nihajnih časov konstrukcije modelirane s tridimenzionalnim oziroma psevdotridimenzionalnim modelom je zadovoljiva v okviru inženirske natančnosti. Napaka narašča z večanjem števila etaž, kar je posledica osne nepovezanosti vogalnih stebrov, vendar je napaka zanemarljiva v primerjavi z ostalimi poenostavitvami obeh modelov.

5.1.7 Spekter pospeškov

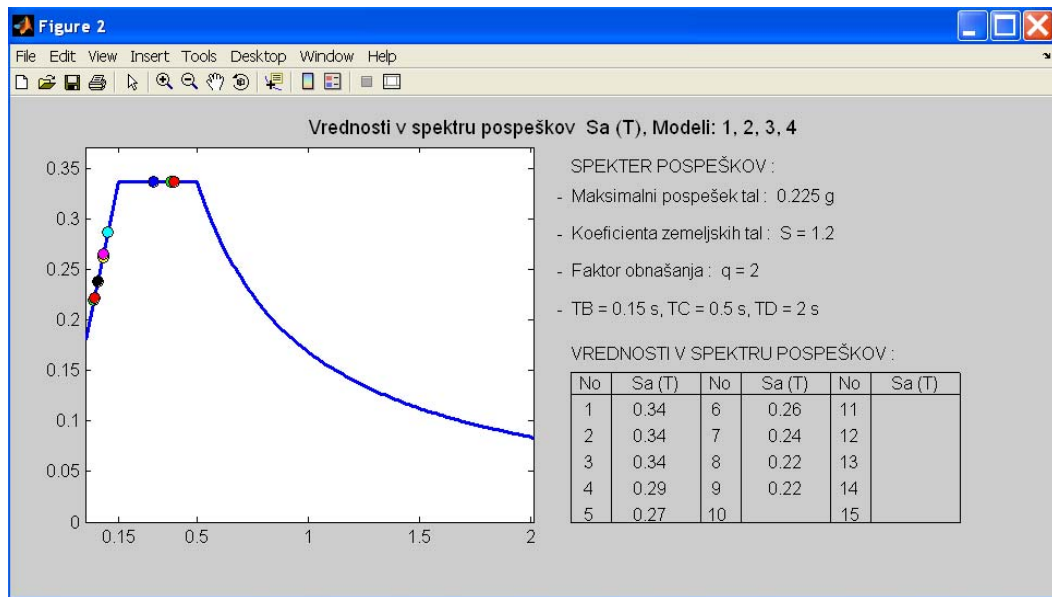
S ukazom *SpekterPospeskov* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki definira in vrne vrednosti v spektru pospeškov. Funkcija prejme podatke o spektru pospeškov in vrednosti nihajnih časov nihajnih oblik konstrukcije. Oblika ukaza je sledeča:

```
>> SpekterPospeskov(0.225,1.2,2,2,0.15,0.5,2);
```

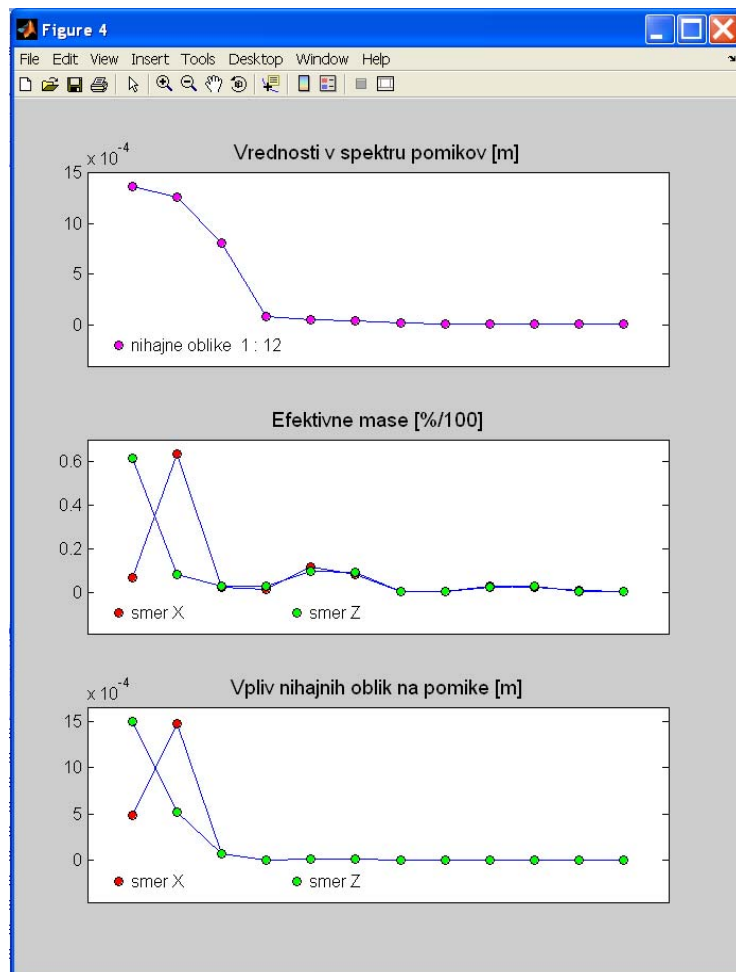
Vhodni podatki pomenijo: normiran maksimalni pospešek tal a_g , koeficient tal S , faktorja obnašanja q_x in q_z za smeri X oziroma Z , spodnjo mejo konstantnega dela spektra pospeškov T_B , zgornjo mejo konstantnega dela spektra pospeškov T_C in vrednost, ki definira začetek konstantnega dela spektra pomikov T_D . Z ukazom *RisiSa([1:1:9])* pokličemo istoimensko funkcijo, ki vrne pogovorno okno, prikazano na sliki 59. Okno grafično prikaže vrednosti v spektru pospeškov za prvih devet nihajnih oblik. Z ukazom *RisiVplivNO* pa pokličemo istoimensko funkcijo, ki vrne pogovorno okno, prikazano na sliki 60. Grafično so prikazane vrednosti nihajnih oblik v spektru pomikov, efektivne mase glede na X in Z smer gibanja tal in vpliv nihajnih oblik na premike konstrukcije, kar predstavlja zmnožek $|\Gamma| \cdot Sd(T)$. Z zeleno barvo so označene vrednosti efektivnih mas in vpliv nihajnih oblik na premike zaradi gibanja tal v smeri X , z rdečo pa vrednosti efektivnih mas in vpliv nihajnih oblik na premike zaradi gibanja tal v smeri Z glavnega koordinatnega sistema.

Preglednica 19: Nihajni časi za stavbo z dvajsetimi etažami, (s)

ŠTEVILO ETAŽ: 20		
Nihajna oblika	Nihajni časi T (s)	
	SAP 2000	EAVEK 2007
1	4,189	4,317
2	3,730	3,807
3	1,634	1,692
4	1,063	1,074
5	0,993	1,001
6	0,538	0,553
7	0,456	0,458
8	0,441	0,442
9	0,312	0,316



Slika 59: Vrednosti v spektru pospeškov za prvih devet nihajnih oblik



Slika 60: Vpliv nihajnih oblik na pomike konstrukcije

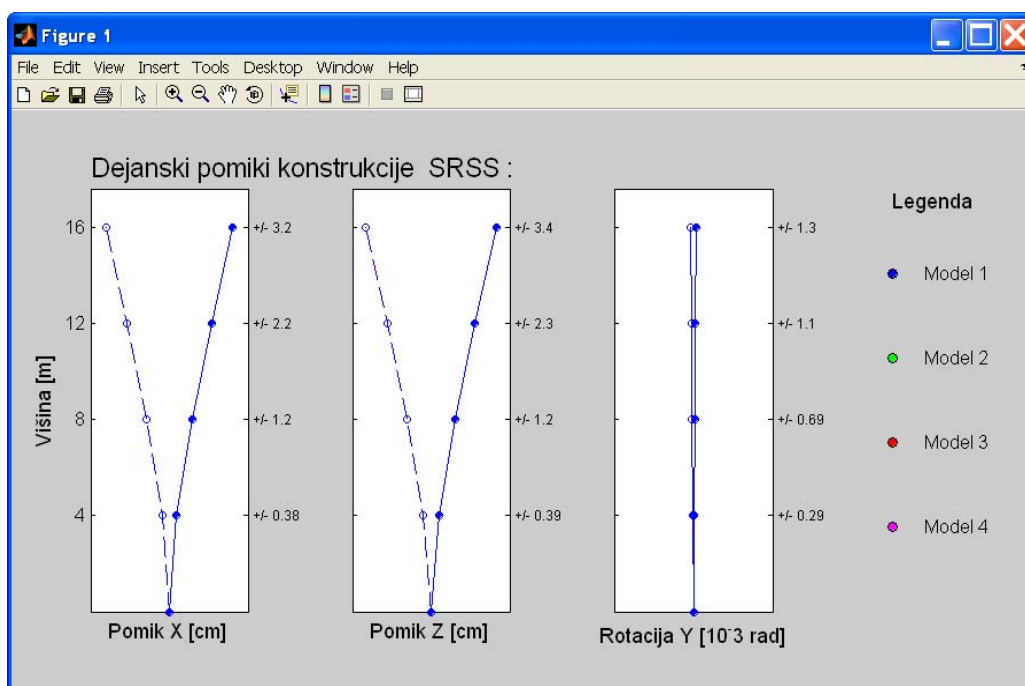
5.1.8 Pomiki konstrukcije

Z ukazom *PomikiKonstrukcije* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki vrne premike konstrukcije. Na slikah 61 in 62 so prikazana pogovorna okna, ki jih vrne funkcija *RisiU*. Grafično so prikazani premiki konstrukcije v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Oblika ukazov za izris dejanskih pomikov je sledeča:

```
>>RisiU(Udej,SRSS);
```

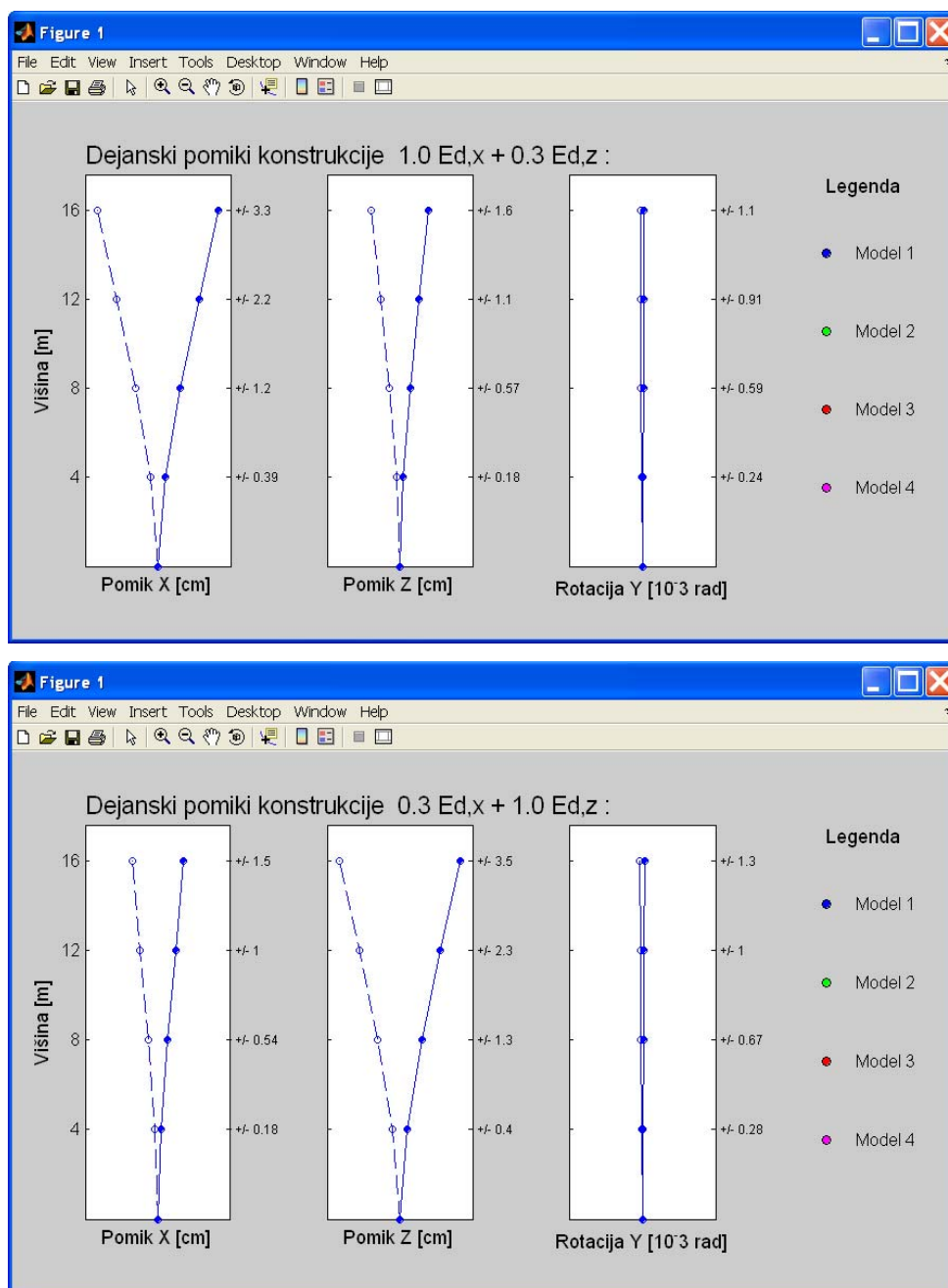
```
>>RisiU(Udej,EC);
```

pri čemer podatek *Udej* pomeni naj se izrišejo dejanski pomiki konstrukcije, drugi podatek pa pomeni vrsto kombinacije zaradi različnih smeri obremenjevanja, pri čemer *EC* pomeni kombinacijo pomikov po metodi, ki jo predlaga Evrokod 8 (poglavje 2.8.2).



Slika 61: Dejanski pomiki konstrukcije – kombinacija SRSS

Na sliki 63 so izrisani premiki za obe vrsti kombinacije $1,0 \cdot Ed,x + 0,3 \cdot Ed,z$ in $0,3 \cdot Ed,x + 1,0 \cdot Ed,z$, kjer Ed,x pomeni odziv zaradi potresnega vpliva v smeri X in Ed,y odziv konstrukcije zaradi potresnega vpliva v smeri Z glavnega koordinatnega sistema.



Slika 62: Dejanski pomiki konstrukcije – kombinacija po Evrokodu 8

V preglednici 20 so izpisane vrednosti dejanskih premikov konstrukcije. Uporabljena je SRSS kombinacija premikov zaradi različnih smeri obremenjevanja. Pomiki so izraženi na 0,1 cm natančnosti. V tretji in četrti etaži so pomiki v smeri Z za primer analize s programom EAVEK 2007 malenkost večji od vrednosti pomikov, ki so izračunani s prejšnjo verzijo programa EAVEK, kar je posledica upoštevanja strižnih deformacij v novem EAVEK-u.

Preglednica 20: Dejanski pomiki konstrukcije, (cm, rad)

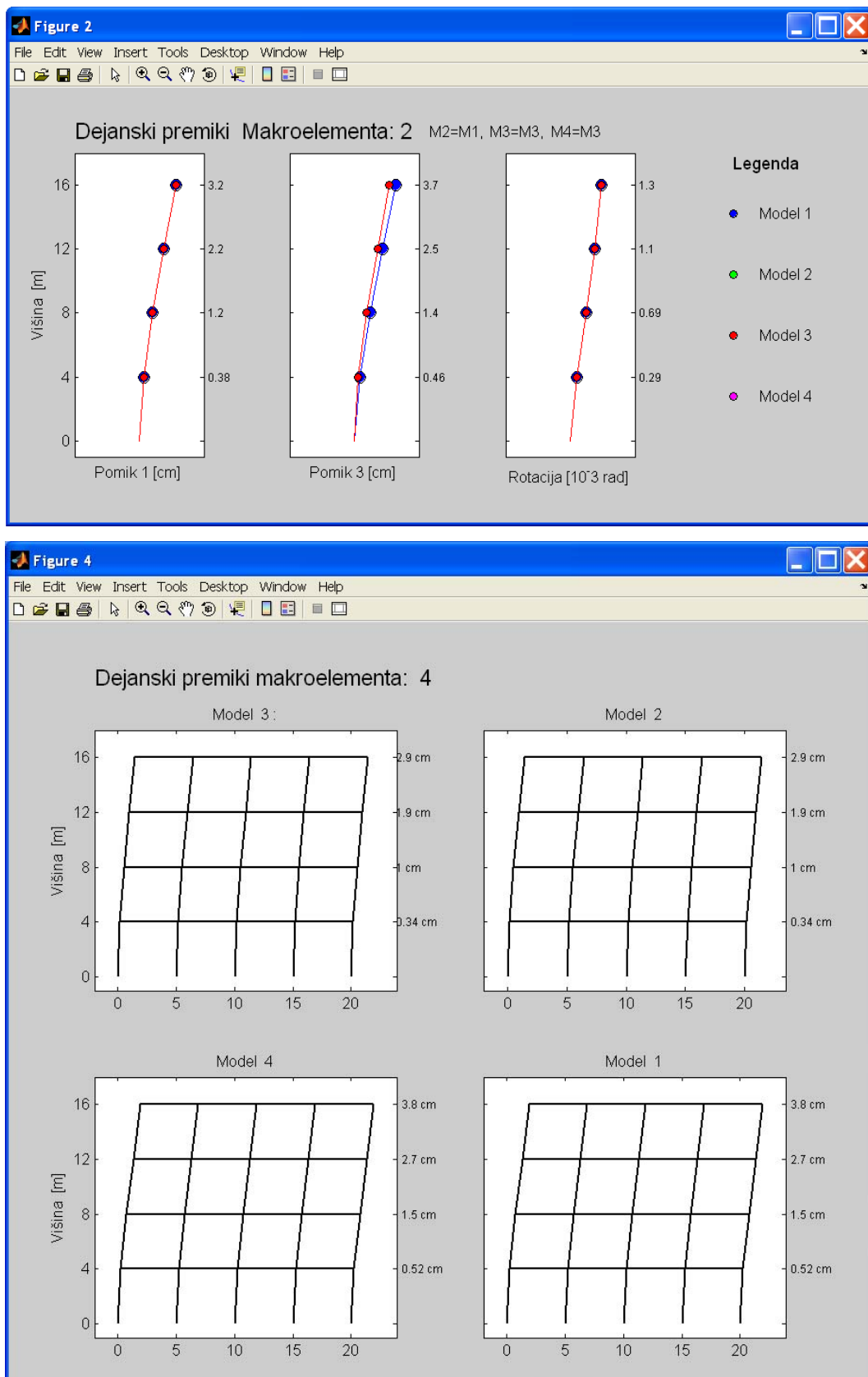
dejanski pomiki (srss)			
Pr. stop.	Sap 2000	Eavek 2007	Eavek 1989
$U_{1,X}$	0,4 cm	0,4 cm	0,4 cm
$U_{2,X}$	1,2 cm	1,2 cm	1,2 cm
$U_{3,X}$	2,2 cm	2,2 cm	2,2 cm
$U_{4,X}$	3,2 cm	3,2 cm	3,2 cm
$U_{1,Z}$	0,4 cm	0,4 cm	0,4 cm
$U_{2,Z}$	1,2 cm	1,2 cm	1,2 cm
$U_{3,Z}$	2,2 cm	2,3 cm	2,2 cm
$U_{4,Z}$	3,3 cm	3,4 cm	3,3 cm
$\Phi_{1,Y}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,3 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,3 \cdot 10^{-3}$ rad
$\Phi_{2,Y}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,7 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,7 \cdot 10^{-3}$ rad
$\Phi_{3,Y}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,1 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,1 \cdot 10^{-3}$ rad
$\Phi_{4,Y}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,3 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,3 \cdot 10^{-3}$ rad

5.1.9 Pomiki Makroelementov

Z ukazom *PomikiMakroelementov* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki izračuna premike makroelementov. Na sliki 63 sta prikazani pogovorni okni, ki ju vrne funkcija *RisiUl*. Grafično so prikazani premiki makroelementov v dvorazsežnem koordinatnem sistemu. Oblika ukaza je sledeča:

```
>>RisiUl([2 4],Uldej,SRSS);
```

Prvi podatek pomeni zaporedni številki makroelementov, za katero želimo izris pomikov. Drugi podatek pomeni naj se izrišejo dejanski pomiki, *SRSS* pa pomeni vrsto kombinacije pomikov zaradi različnih smeri obremenjevanja.



Slika 63: Dejanski pomiki jadra 2 in okvirja 2 – kombinacija SRSS

5.1.10 Potresne sile na konstrukcijo in makroelemente

Z ukazoma *PotresneSileNaKonstrukcijo* in *PotresneSileNaMakroelemente* pokličemo enakoimenski funkciji, ki vrneta potresne sile na konstrukcijo oziroma makroelemente. Avtomatično se preveri vpliv teorije drugega reda na pomike in potresne sile. Če velja $0,1 < \theta < 0,2$ je približno upoštevan vpliv teorije 2. reda tako, da ustrezne učinke potresnega vpliva povečamo s faktorjem $1/(1 - \theta)$.

Vrednost θ izpišemo z ukazom *Theta* in je enaka 0,0065. Vpliva teorije drugega reda ni potrebno upoštevati.

5.1.11 Notranje sile

Z ukazom *NotranjeSile* pokličemo enakoimensko funkcijo, ki izračuna notranje sile v izbranih makroelementih. Vhodni podatek predstavlja vektor zaporednih števil izbranih makroelementov. Ukaz za izračun notranjih sil v makroelementih 2, 4 in 5 to je, v jedru 2 in okvirjih 2 in 3, je sledeč:

```
>>NotranjeSile([2 4 5]);
```

Upogibni momenti so izrisani za primer obremenjevanja konstrukcije v obeh pravokotnih smereh. Osne sile v okvirjih 2 in 3 pa za primer v obremenjevanja v smeri *X*. Uporabljena je SRSS kombinacija notranjih sil zaradi različnih smeri obremenjevanja.

Ukaz za izris kombiniranih upogibnih momentov po metodi SRSS v desnem jedru in okvirjih 2 in 3 za primer dinamičnega modela konstrukcije št. 3 je oblike:

```
>>RisiFe(3,[2 4 5],Fekomb,M,SRSS);
```

Osne sile v okvirjih 2 in 3 za primer obremenjevanja konstrukcije v smeri *X* pa izrišemo z ukazom:

```
>>RisiFe(3,[4 5],Feno,N,X);
```


Upogibni momenti v jedru in v prerezih stebrov ob vpetju v prvi etaži okvirjev 2 in 3, dobljeni z analizo s programom EAVEK 2007, so do 6% večji od upogibnih momentov, ki so dobljeni z analizo s programom SAP 2000 (Preglednice 21-23). Odstopanje momentov je majhno in je v meji inženirske natančnosti.

Preglednica 21: Upogibni momenti M_z v jedru 2

Višina (m)	sap 2000		eavek 2007	
	M_y (kNm)	M_z (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
0	13298	14697	(+0,4 %) 13356	(+0,3 %) 14738
4	9226	9476	(+0,0 %) 9226	(-0,1 %) 9472
8	5319	4943	(+0,1 %) 5328	(+0,0 %) 4944
12	2065	1536	(+0,2 %) 2070	(-0,1 %) 1534
16	0	0	0	0

Preglednica 22: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 2

Vrsta stebrov	sap 2000	eavek 2007
	M_z (kNm)	M_z (kNm)
1	56,4	(+4,2 %) 58,8
2	66,5	(+4,2 %) 69,3
3	65,7	(+4,6 %) 68,7
4	66,2	(+4,7 %) 69,3
5	56,1	(+4,8 %) 58,8

Preglednica 23: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 3

Vrsta stebrov	sap 2000	eavek 2007
	M_z (kNm)	M_z (kNm)
1	52,8	(+6,0 %) 56,0
2	62,0	(+6,0 %) 65,7
3	62,3	(+5,5 %) 65,7
4	53,2	(+5,3 %) 56,0

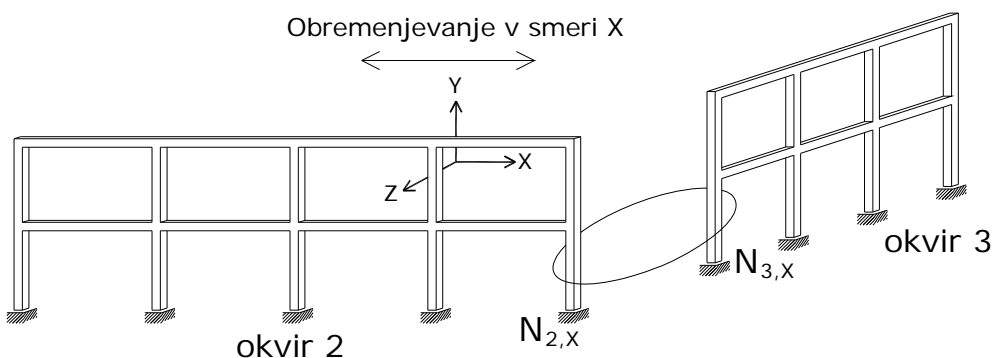
»Pravo« vrednost upogibnih momentov ob v vogalnih stebrih okvirjev, ki se stikajo, določimo s kombinacijo zaradi različnih smeri obremenjevanja, ki jo predlaga SIST EN 1998-1 4.3.3.5.1. Potrebno je tvoriti štiri kombinacije po naslednjih enačbah:

$$Mz_{dx}'' + 0,30 \cdot Mz_{dz} \quad (34)$$

$$0,3 \cdot Mz_{dx}'' + Mz_{dz} \quad (35)$$

kjer Mz_{dx} in pomeni upogibne momente zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri X , Mz_{dz} pa upogibne momente zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri Z .

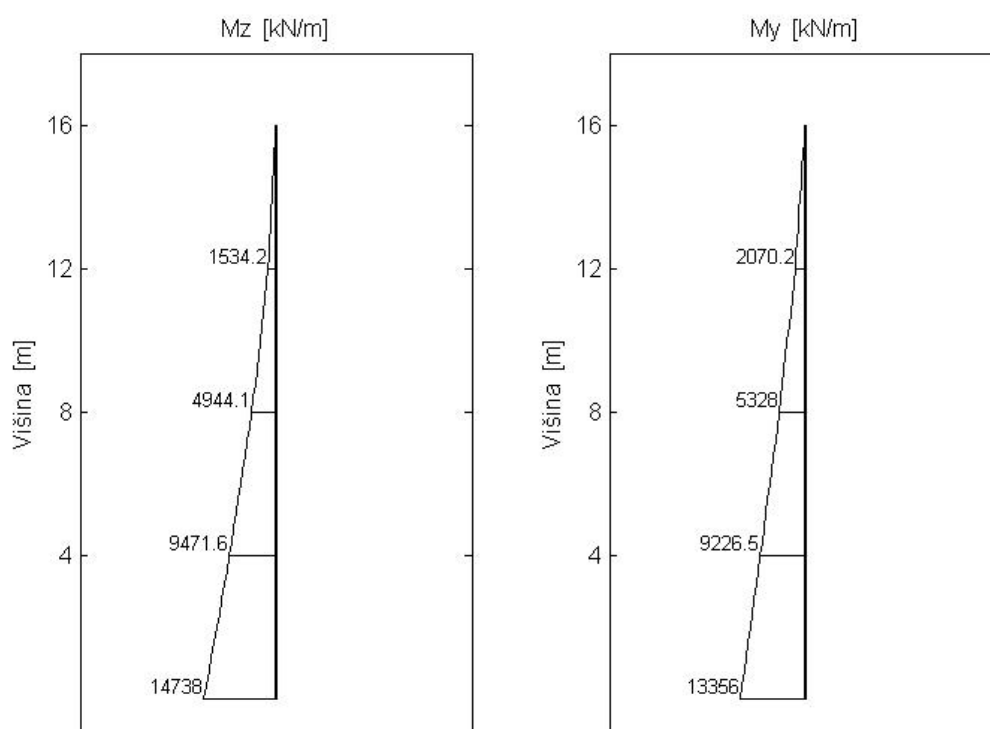
Osne sile v vogalnih stebrih okvirjev, ki se stikajo, ni mogoče točno izračunati. Vrednost osne sile v skrajno desnem stebru okvirja 2, ki se pojavi zaradi premika konstrukcije v smeri X , ni točna, saj ta ne vključuje osne sile, ki se v vogalnem stebru pojavi pri premiku konstrukcije v smeri Z . Ta vrednost je zajeta v računu osne sile skrajno levega stebra okvirja 3 (Slika 64).



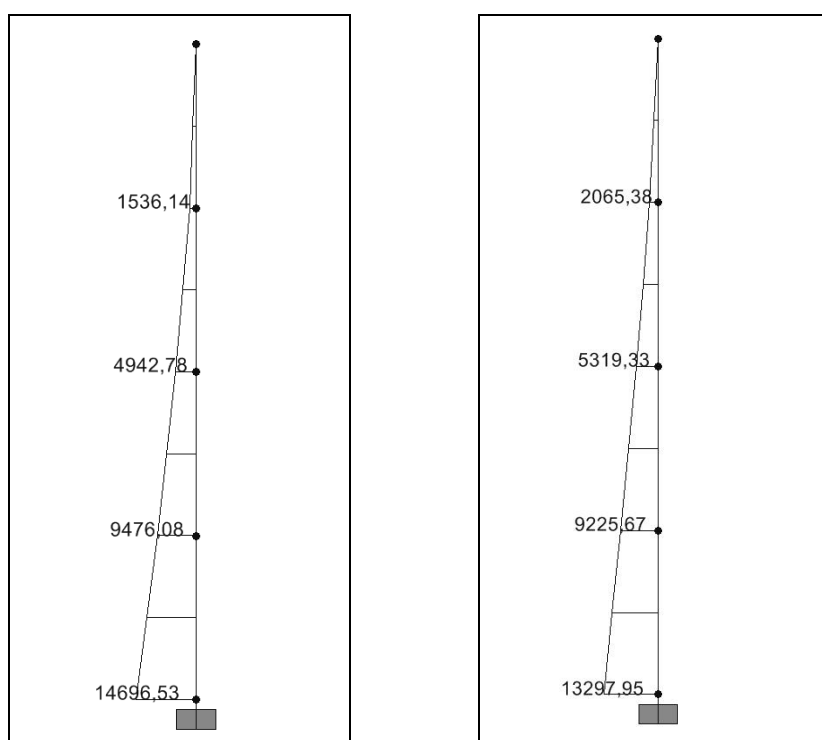
Slika 64: Osne sile v vogalnem stebru okvirjev 2 in 3 zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri X globalnega koordinatnega sistema

5.1.12 Izris notranjih sil

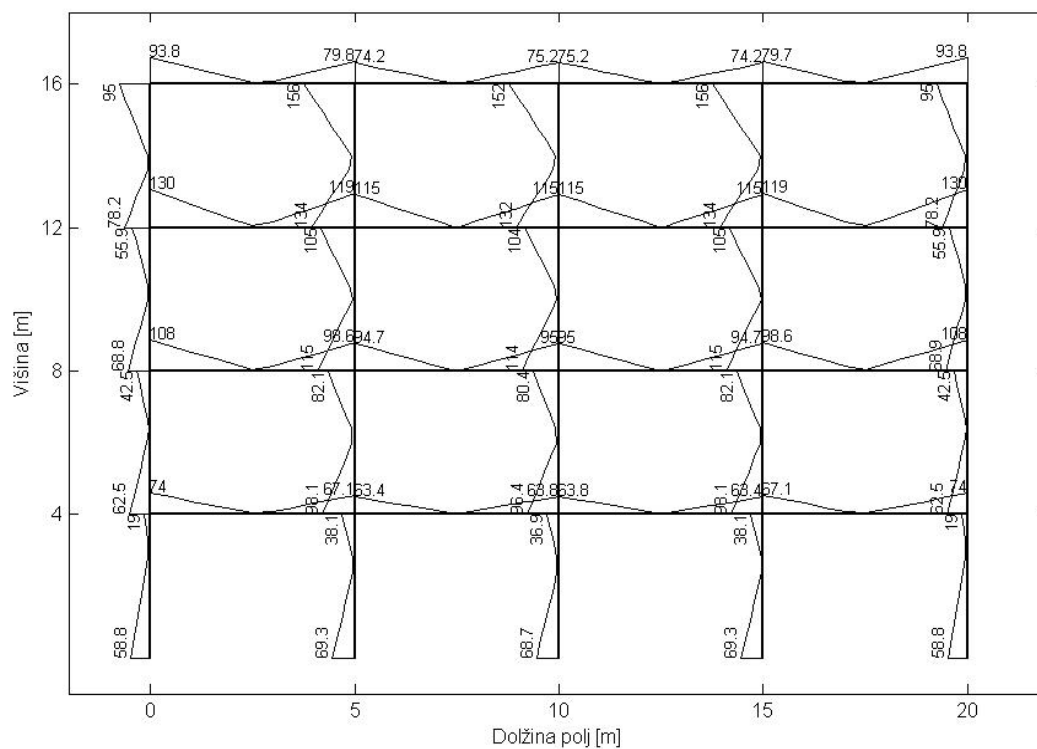
Na slikah 65 do 74 so izrisani upogibni momenti v jedru 2 in okvirjih 2 in 3 ter osne sile v okvirjih 2 in 3 za primer obremenjevanja konstrukcije v smeri X .



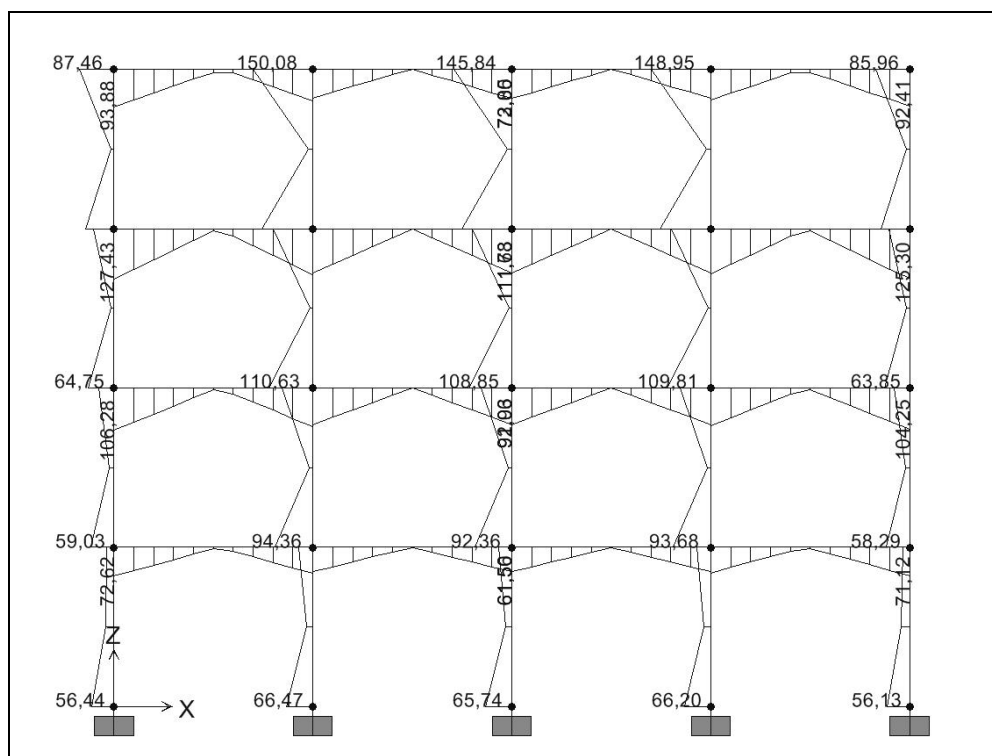
Slika 65: Upogibni momenti M_z in M_y v jedru 2, EAVEK 2007, model 3



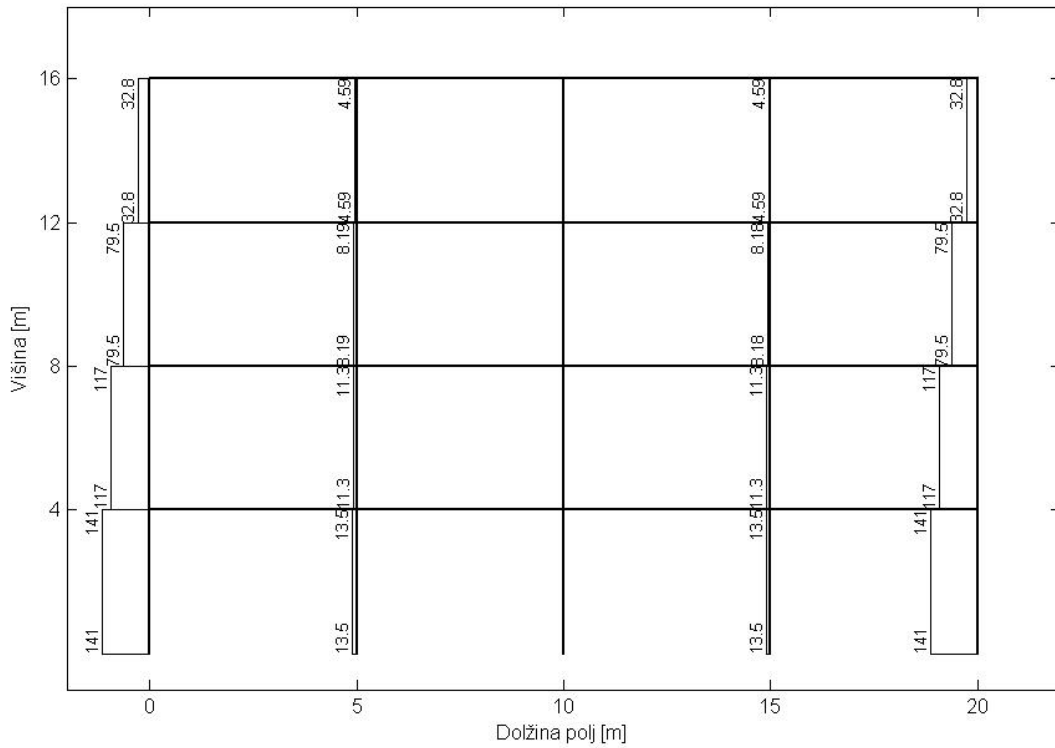
Slika 66: Upogibni momenti M_z in M_y v jedru 2, SAP 2000, model 3



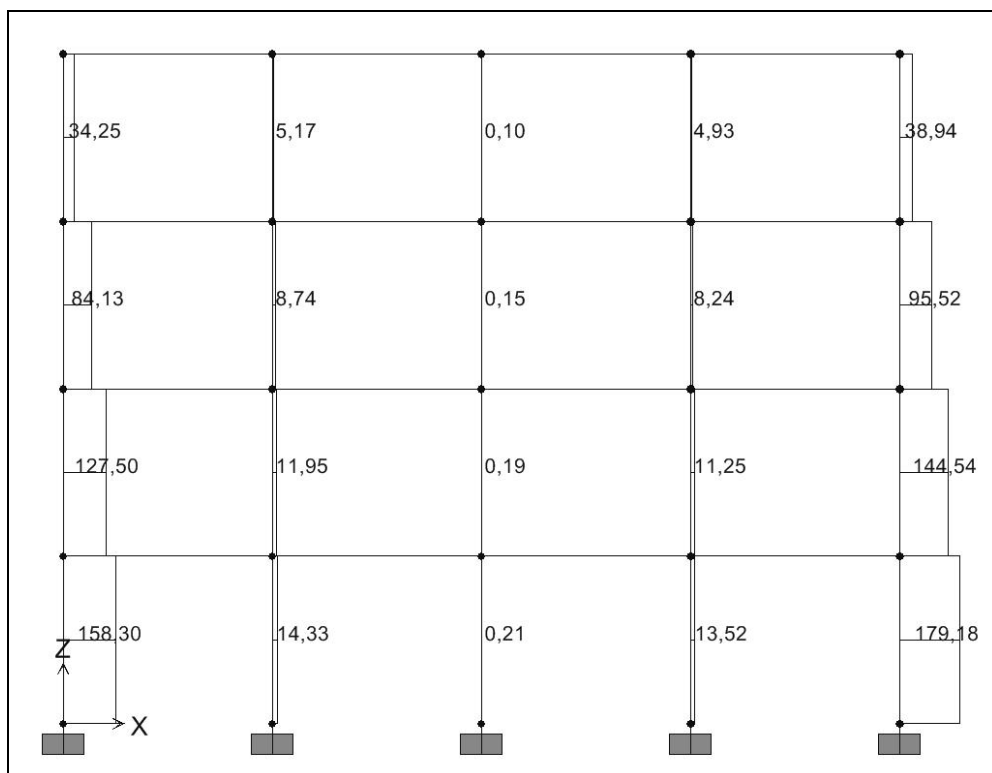
Slika 67: Upogibni momenti M_z okvirju 2, EAVEK 2007, model 3



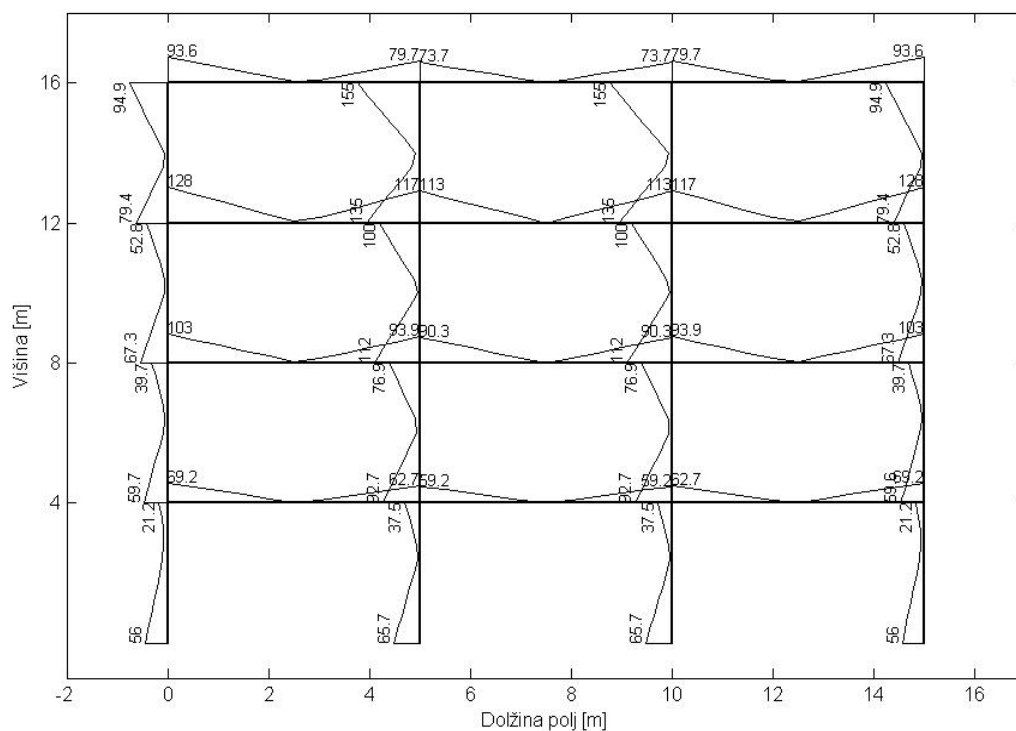
Slika 68: Upogibni momenti M_z okvirju 2, SAP 2000, model 3



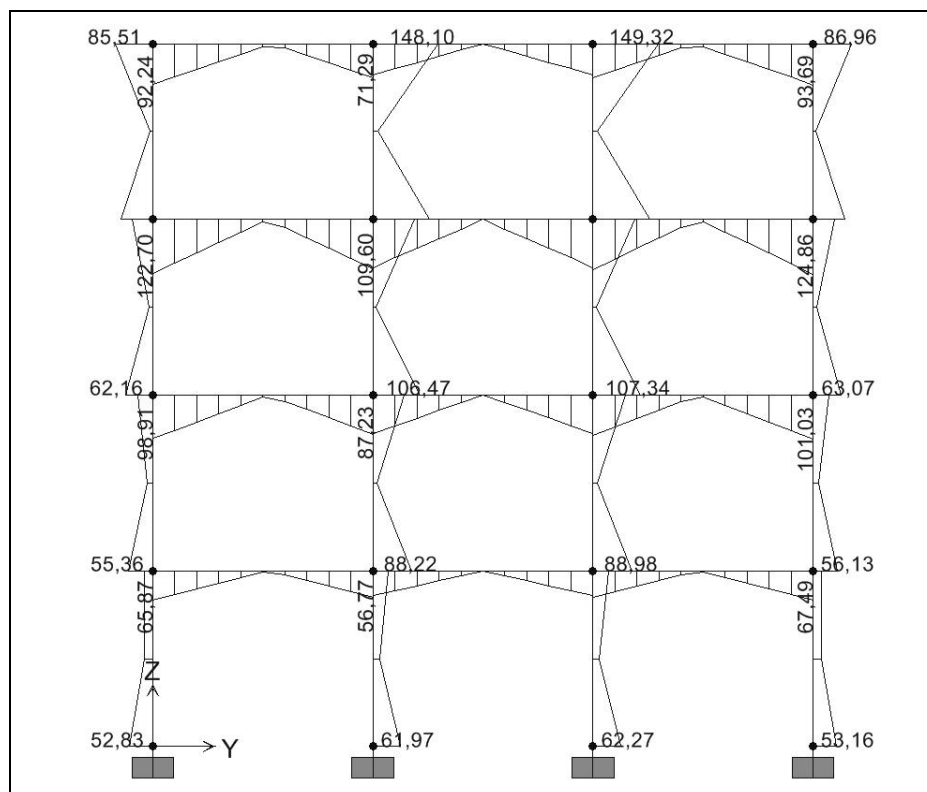
Slika 69: Osne sile N_x okvirju 2, EAVEK 2007, model 3, smer X



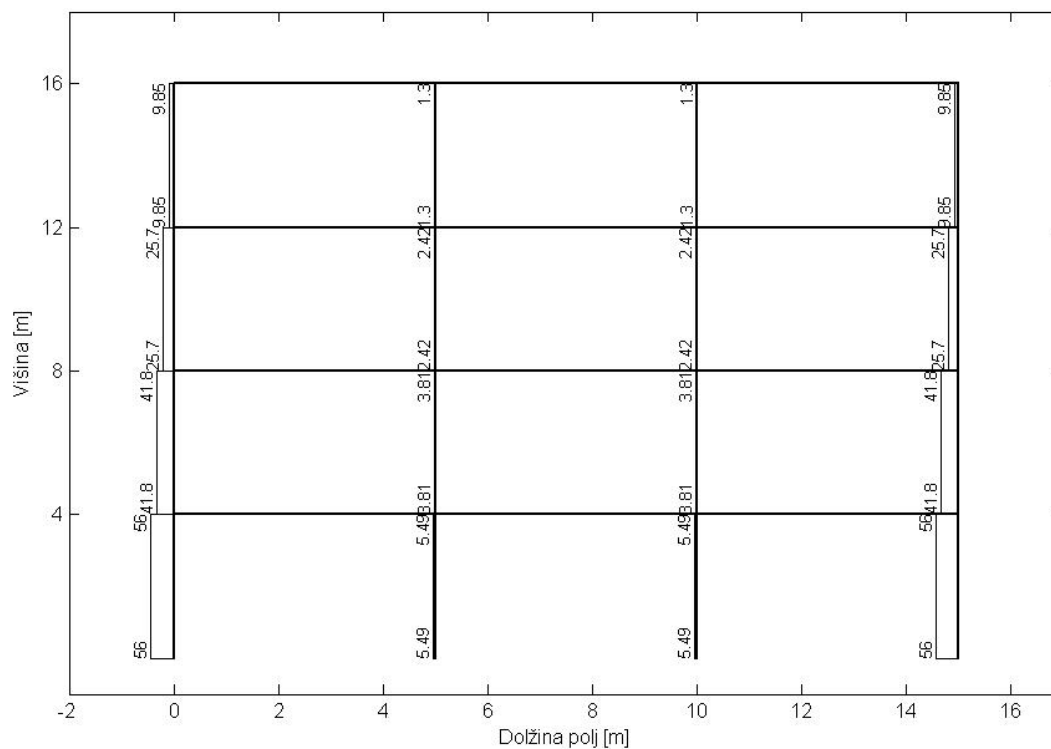
Slika 70: Osne sile N_x okvirju 2, SAP 2000, model 3, smer X



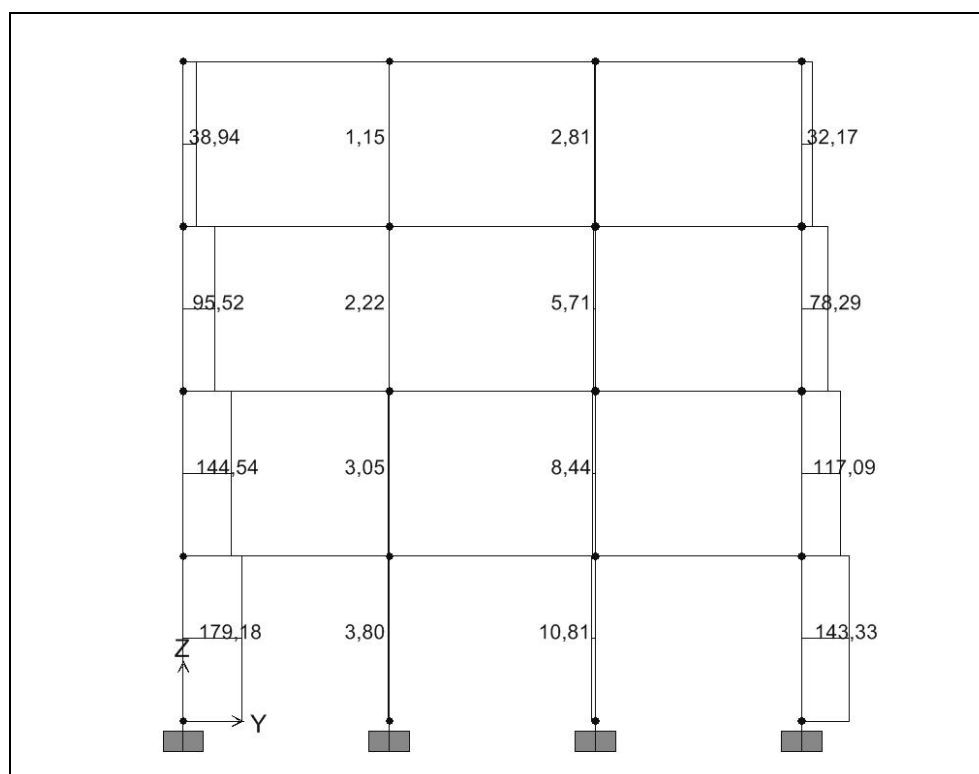
Slika 71: Upogibni momenti M_z v okvirju 3, EAVEK 2007, model 3



Slika 72: Upogibni momenti M_z v okvirju 3, SAP 2000, model 3



Slika 73: Osne sile N_x v okvirju 3, EAVEK 2007, model 3, smer X



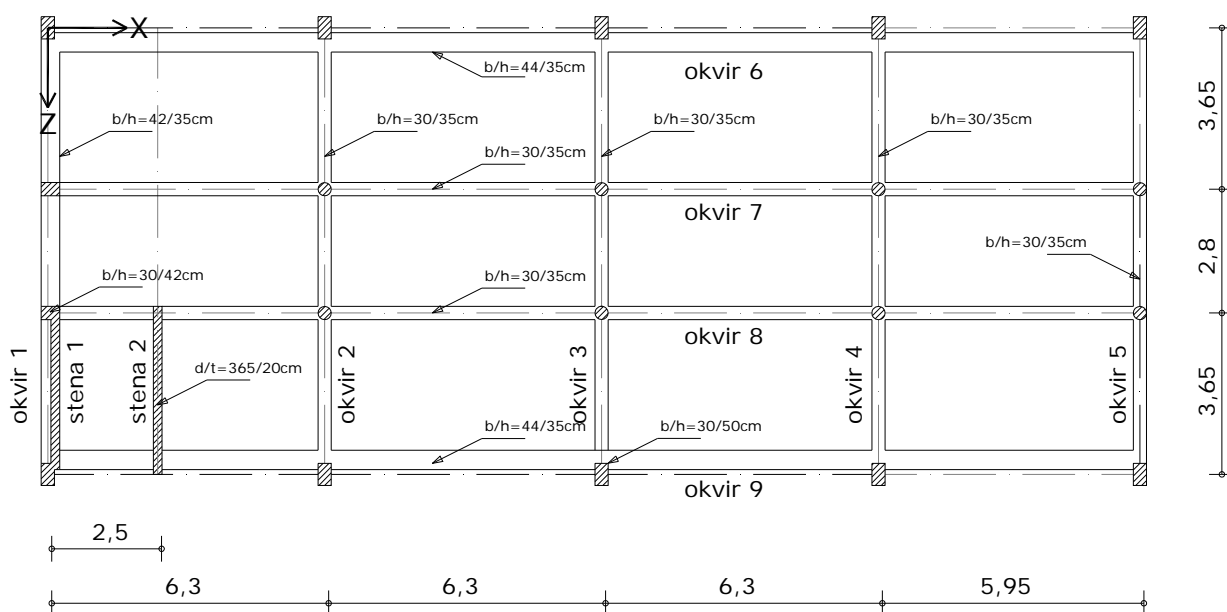
Slika 74: Osne sile N_x v okvirju 3, SAP 2000, model 3, smer X

5.2 Štirietažna nesimetrična konstrukcija

Izpisani so nihajni časi in premiki konstrukcije ter notranje sile v nekaterih makroelementih. Poleg programov SAP 2000, EAVEK 2007 in EAVEK (1989) je konstrukcija analizirana tudi s programom EATBS. Tu je konstrukcija enako kot v programu SAP 2000 modelirana s tridimenzionalnim modelom, mase konstrukcije pa se izračunajo avtomatsko.

5.2.1 Opis konstrukcije

Štirinadstropno armiranobetonsko konstrukcijo sestavljajo vzdolžni in prečni okviri ter dve steni. Medetažna konstrukcija je plošča, za katero lahko predpostavimo, da je toga v svoji ravnini. Objekt ni podkleten. Temeljenje je plitvo s pasovnimi temelji. Streha je ravna in pohodna. Za material je izbran beton kvalitete $C 25/30$ ($E = 3100 \text{ kN/cm}^2$, $\nu=0,2$). Podatki o dimenzijah makroelementov in tlorisu konstrukcije so razvidni iz slike 75. Upoštevana je razpokanost prereзов in sicer tako, da upoštevamo polovične vrednosti vztrajnostnih momentov in strižnih površin prereзов elementov.



Slika 75: Tloris konstrukcije in dimenzije elementov

5.2.2 Obtežba konstrukcije

Upoštevana sta faktorja obnašanja $q_x = 3,6$ za X smer obremenjevanja in $q_z = 3,15$ za Z smer obremenjevanja konstrukcije. Višina vseh etaž znaša 4 m . Upoštevana je lastna teža konstrukcije $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$ in dodatna lastna teža $g = 2,0\text{ kN/m}^2$. Koristna obtežba znaša $2,5\text{ kN/m}^2$. Upoštevan je spekter pospeškov po SIST EN 1998-1: 3.2.2.5, tip tal B, $a_{g,max}=0,225\text{ g}$.

5.2.3 Razultati analize

V preglednici 24 so izpisani nihajni časi konstrukcije za prvih pet nihajnih oblik. V primerih, ko sta steni modelirani z linijskimi elementi so nihajni časi nekaj višji kot v primerih, ko sta steni modelirani s ploskovnimi elementi. V preglednici 25 so izpisani kombinirani premiki konstrukcije dobljeni z elastično analizo. Uporabljena je SRSS kombinacija premikov zaradi različnih smeri obremenjevanja. V primerih, ko so stene konstrukcije modelirane z linijskimi elementi so vrednosti premikov v smeri Z nekoliko višje.

Preglednica 24: Nihajni časi konstrukcije (s)

Nihajna oblika	sap 2000		ETABS 8 STENA KOT PLOSKOVNI EL.	EAVEK 2007	eavek (1989)
	Stena kot ploskovni el.	Stena kot linijski el.			
1	1,304	1,330	1,308	1,369	1,313
2	1,088	1,088	1,074	1,142	0,914
3	0,407	0,411	0,409	0,428	0,418
4	0,328	0,357	0,319	0,342	0,349
5	0,261	0,324	0,254	0,308	0,286

Preglednica 25: Pomiki konstrukcije iz elastične analize (cm, rad)

prost. stopnja	SAP 2000		etabs 8	EAVEK 2007	eavek (1989)
	Stena kot ploskovni el.	Stena kot linijski el.			
$U_{x,1}$	1,5 cm	1,4 cm	1,4 cm	1,5 cm	1,5 cm
$U_{x,2}$	2,6 cm	2,6 cm	2,6 cm	2,7 cm	2,6 cm
$U_{x,3}$	3,5 cm	3,5 cm	3,5 cm	3,6 cm	3,5 cm
$U_{x,4}$	4,0 cm	4,1 cm	4,0 cm	4,1 cm	3,9 cm
$U_{z,1}$	0,1 cm	0,1 cm	0,1 cm	0,2 cm	0,1 cm
$U_{z,2}$	0,2 cm	0,3 cm	0,2 cm	0,3 cm	0,3 cm
$U_{z,3}$	0,4 cm	0,6 cm	0,4 cm	0,6 cm	0,6 cm
$U_{z,4}$	0,5 cm	0,8 cm	0,5 cm	0,8 cm	0,9 cm
$R_{y,1}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,7 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,6 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,6 \cdot 10^{-3}$ rad	$0,6 \cdot 10^{-3}$ rad
$R_{y,2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,3 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,2 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,2 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,2 \cdot 10^{-3}$ rad
$R_{y,3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,8 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,7 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,7 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,6 \cdot 10^{-3}$ rad
$R_{y,4}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$ rad	$2,2 \cdot 10^{-3}$ rad	$2,1 \cdot 10^{-3}$ rad	$2 \cdot 10^{-3}$ rad	$1,9 \cdot 10^{-3}$ rad

V preglednicah 26 in 27 so izpisane vrednosti upogibnih momentov M_z v prerezih stebrov ob vpetju v prvi etaži okvirja 5 (makroelement 7) in okvirja 6 (makroelement 8). Upogibni momenti so določeni z analizo konstrukcije, ki je obremenjena v obeh pravokotnih smereh, uporabljena je SRSS kombinacija.

Preglednica 26: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 5

Vrsta stebrov	sap 2000	eavek 2007
	M_z (kNm)	M_z (kNm)
1	185	(+1,6 %) 188
2	37,2	(+1,1%) 37,6
3	37,2	(+1,1%) 37,6
4	185	(+1,6 %) 188

Preglednica 27: Upogibni momenti M_z v prerezih ob vpetju stebrov okvirja 6

Vrsta stebrov	sap 2000	eavek 2007
	M_z (kNm)	M_z (kNm)
1	72,6	(+7,3 %) 77,9
2	82,7	(+5,6 %) 87,4
3	81,5	(+5,9 %) 86,3
4	82,8	(+5,9%) 87,7
5	74,2	(+5,8%) 78,5

Upogibni momenti v jedru in v prerezih stebrov ob v petju stebrov v prvi etaži okvirjev 5 in 6, dobljeni z analizo s programom EAVEK 2007, so do 7% večji od upogibnih momentov, ki so dobljeni z analizo s programom SAP 2000. Odstopanje momentov je majhno in je v meji inženirske natančnosti.

»Pravo« vrednost upogibnih momentov ob v vogalnih stebrih okvirjev, ki se stikajo, določimo s kombinacijo zaradi različnih smeri obremenjevanja, ki jo predlaga SIST EN 1998-1 4.3.3.5.1. Potrebno je tvoriti štiri kombinacije po enačbah 34 in 35:

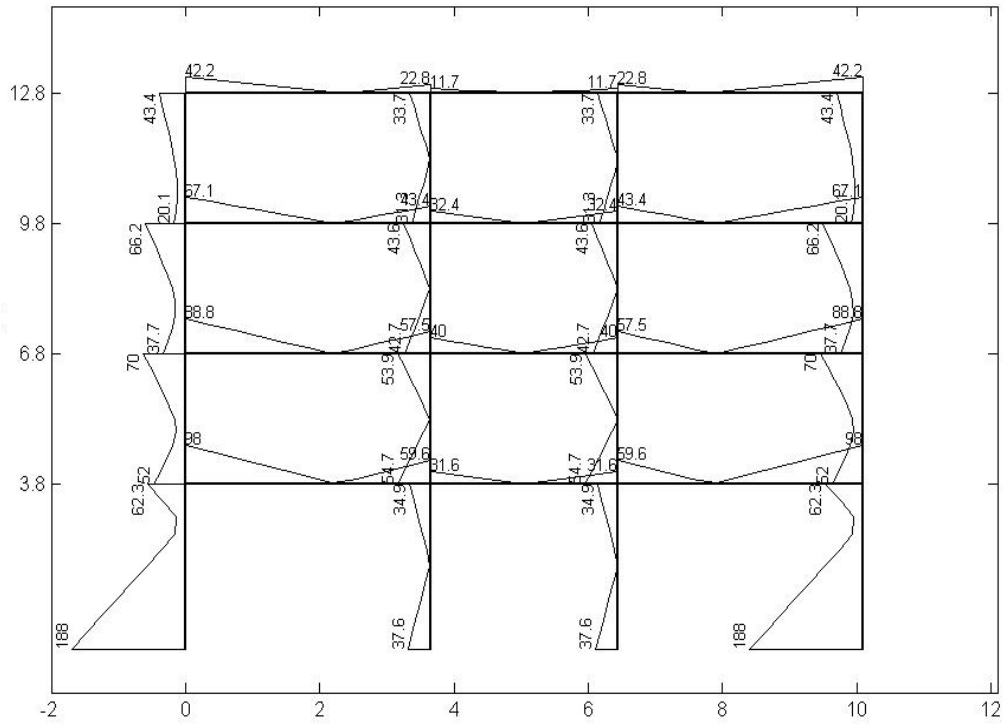
$$M_{z_{dx}} + 0,30 \cdot M_{z_{dz}}$$

$$0,3 \cdot M_{z_{dx}} + M_{z_{dz}}$$

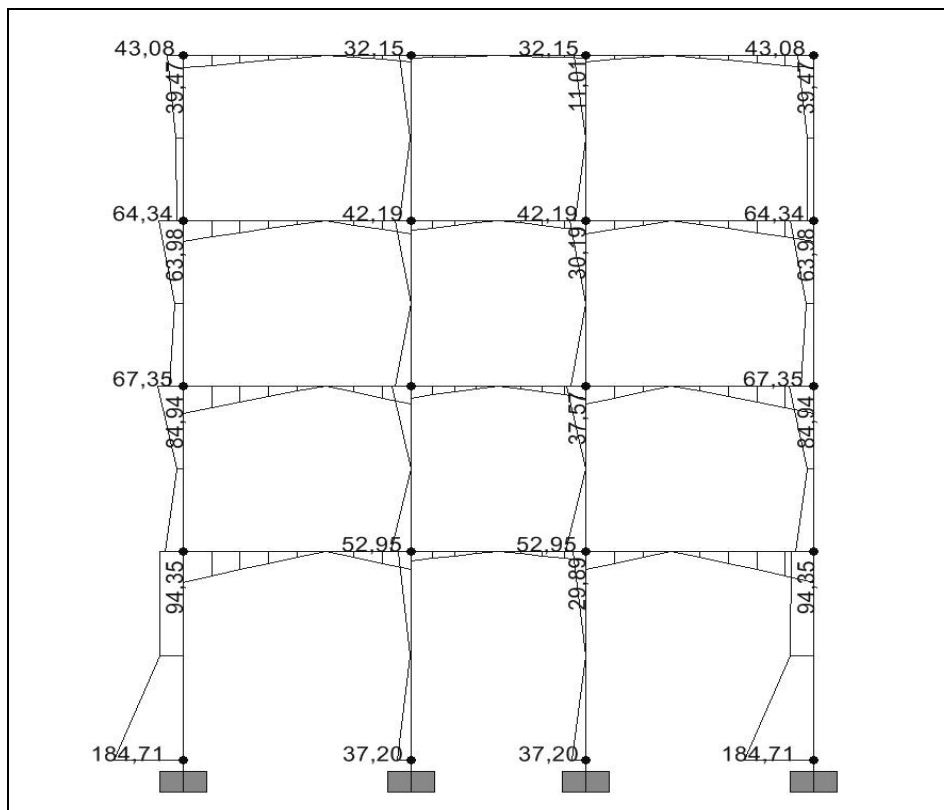
kjer $M_{z_{dx}}$ in pomeni upogibne momente zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri X, $M_{z_{dz}}$ pa upogibne momente zaradi obremenjevanja konstrukcije v smeri Z.

5.2.4 Izris notranjih sil

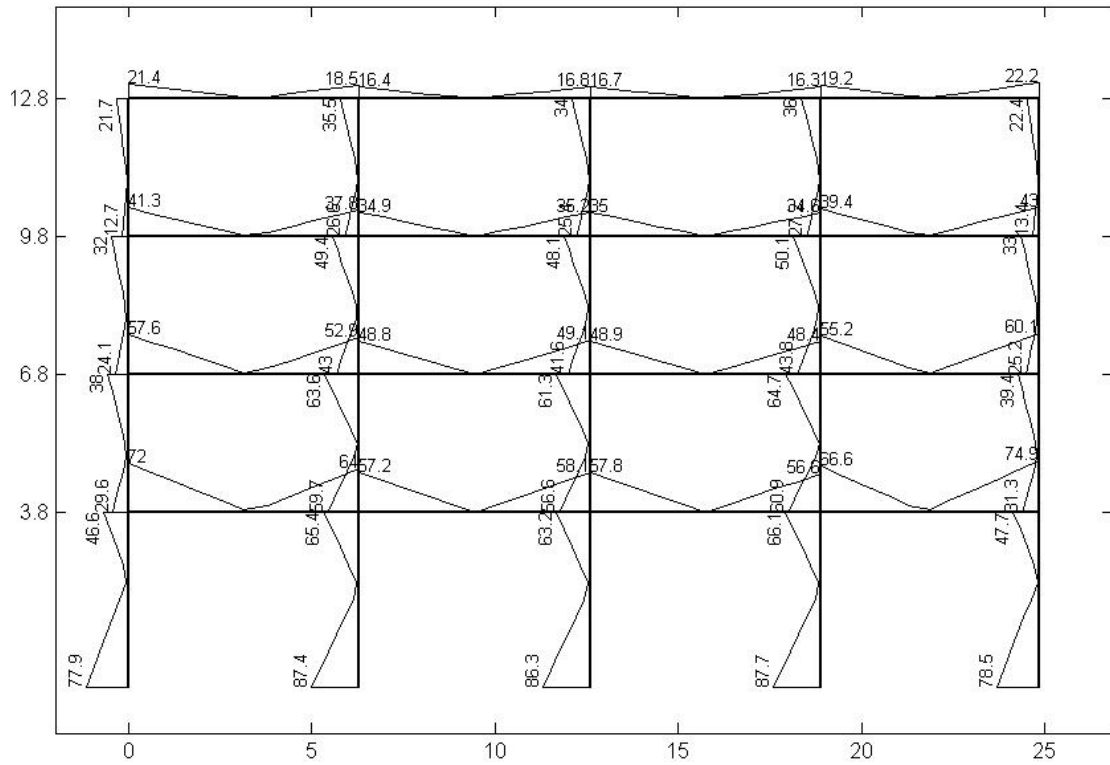
Na slikah 76 do 79 so po prikazani upogibni momenti v okvirjih 5 in 6 zaradi obremenjevanja konstrukcije v obeh smereh. Konstrukcija je analizirana s programoma EAVEK 2007 in SAP 2000.



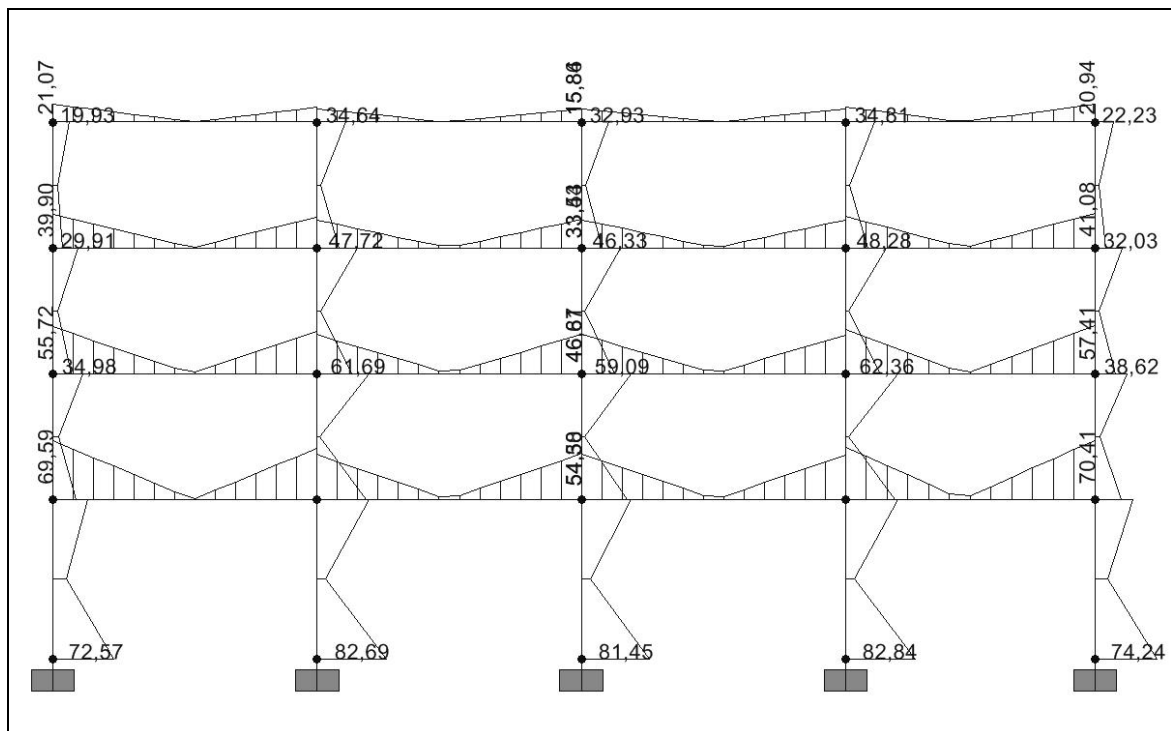
Slika 76: Upogibni momenti M_z v okvirju 5, EAVEK 2007



Slika 77: Upogibni momenti M_z v okvirju 5, SAP 2000



Slika 78: Upogibni momenti M_z v okvirju 6 – EAVEK 2007



Slika 79: Upogibni momenti M_z v okvirju 6 – SAP 2000

6 ZAKLJUČEK

Program EAVEK 2007 se uporablja za račun enostavnih večnadstropnih stavb, pri katerih lahko upoštevamo predpostavko o neskončni togosti plošč v horizontalni ravnini. Število etaž konstrukcije in število makroelementov konstrukcije ni omejeno. Pri modeliranju konstrukcij je potrebno upoštevati vse predpostavke o makroelementih, ki so opisane v poglavju 2.

Pri razvoju programa je bil največji povdarek na prikazu rezultatov. Grafično se lahko prikažejo nihajne oblike, vrednosti v spektru pospeškov, vpliv posameznih nihajnih oblik na pomike, premiki konstrukcije in makroelementov in notranje sile v elementih. Algoritem programa je odprt, zato so možne različne dopolnitve. Možno je dodajati nove funkcije npr. za račun togostnih matrik poljubnih makroelementov ali prikaz rezultatov po potrebi uporabnika. Razlike v rezultatih, ki so dobljeni s programoma EAVEK 2007 in SAP 2000, so majhne in so v okviru inženirske natančnosti. Upogibne momente in strižne sile v stebrih, ki hkrati pripadajo več okvirom, izračunamo tako, da tvorimo kombinacije statičnih količin zaradi različnih smeri obremenjevanja konstrukcije. Slabost programa je, da ne moremo izračunati »točnih« osnih sil v stebrih, ki hkrati pripadajo več okvirom, kar je posledica psevdotridimenzionalnega modela konstrukcije, ki je uporabljen v programu. Ta pomanjkljivost v praksi večinoma ni pomembna, saj se nanaša samo na osne sile zaradi vodoravne obtežbe, za večino stebrov pa največji delež osne sile prispeva navpična obtežba.

Program bo v prihodnje dočakal nekatere izboljšave. Smiselno bi bilo dodati možnost upoštevavanja podajnosti zemljine in poljubnega vpetja makroelementov, dodati funkcije za račun trirazsežnih okvirjev in vključiti možnost dinamične analize konstrukcije. Potrebno je ustvariti grafični vmesnik za vnos vhodnih podatkov. S tem bo program pridobil na preglednosti in uporabnosti.

VIRI

Uporabljeni viri

Dolšek, M., Rozman, M., Fajfar, P., 2007. Elastična analiza tri-etažne armiranobetonske stavbe (Spear) po Evrokodu 8. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo: 25 str.

Fajfar, P. 1984. Dinamika gradbenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG: 519 str.

Lutar, B., Duhovnik, J. 2004. Metoda končnih elementov za linijske konstrukcije. Maribor, Univerza v Mariboru, FG: 190 str.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in vplivi na stavbe.

Ostali viri

Fajfar, P. 1981. EAVEK Program za elastično analizo večetažnih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG: 178 str.

Pomoč programa MATLAB verzije 7.0.0.19920 (R14)

CSI 2002. *SAP Manuals, ETABS Manuals*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California.

CSI 2002. *ETABS Manuals, ETABS Manuals*, Computers & Structures Inc., Berkeley, California.