

PRIMER 4

U prethodnom izdanju ovaj primer nije bio uključen u sadržaj, papiri pisani rukom deljeni su studentima na času. Naime, industrijske hale trebalo je da su obrađene na prethodnom kursu betona, da su studentima poznati svi pojmovi, tako da se u okviru ovoga kursa samo preciziraju neki pojmovi u vezi zemljotresa. Na žalost, te godine je zbog bombardovanja nastava bila prekinuta, tako da su studenti ostali uskraćeni za osnovne pojmove u vezi hala. U takvoj situaciji, studentima je pripremljeno desetak strana osnovnih pojmova o halama, sa uputstvima za izradu zadatka na ispitu.

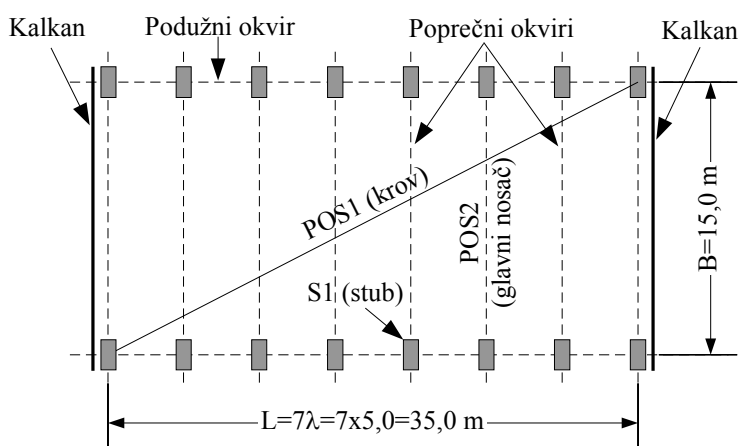
Pripremajući kompletno 'elektronsko izdanje' skripti, prva ideja je bila da se i jedna hala uradi kao kompletan brojni primer. Međutim, u želji da se studentima pruži što više raznovrsnih informacija, zadržan je originalni koncept, pa su različiti problemi i primeri hala izloženi kroz 'priču'. Primer započinje postavkom jednog jednostavnog ispitnog zadatka, ali se potom priča odvija svojim tokom. Iako nemaju brojni primer, studenti imaju sve potrebne informacije potrebne za razumevanje materije i uspešnu izradu godišnjeg zadatka kao i polaganje pismenog dela ispita, to potvrđuje i iskustvo iz proteklih pet godina.

Naravno da je prvobitni tekst ovom prilikom proširen, a delom i izmenjen. Konstrukcije hala su detaljnije objašnjene, neki pojmovi su preciznije formulisani, i dosledno je krutost stubova i okvira opisana krutošću na pomeranje, umesto sa krutošću preseka na savijanje EI , na šta se problem svodi u posebnim slučajevima. Detalji i pravila armiranja ovom prilikom nisu posebno prikazani, studenti se upućuju na Primere 1 i 2 gde mogu da nađu odgovarajuća uputstva i primere armiranja stubova i greda.

PRIMER 4

Za AB okvirnu konstrukciju industrijske hale potrebno je uraditi idejno rešenje konstrukcije objekta, prema sledećim podacima:

- čista visina hale, od poda do donje ivice konstrukcije krova - $H_0 = 12,0$ m;
- da bi se omogućilo naknadno produžavanje hale, kalkani su nezavisne čelične konstrukcije postavljene uz krajnje poprečne okvire, u vrhu bočno pridržane AB konstrukcijom krova;
- u ravni podužnih okvira, hala je zatvorena horizontalnim fasadnim panelima koji se kače za stubove



Slika 4.1 - Dispozicija hale - osnova

Za proračun usvojiti sledeće podatke:

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| - težina izolacije krova | $q_i = 1,50 \text{ kN/m}^2$ |
| - težina fasadnih panela | $q_f = 1,20 \text{ kN/m}^2$ |
| - sneg | $s = 1,00 \text{ kN/m}^2$ |
| - vetar, "osnovno dejstvo" | $w_0 = 0,70 \text{ kN/m}^2$ |
| - zemljotres: | VIII zona |
| | tlo I kategorije |

Plitko fundiranje: dopušteni napon $\sigma_0 = 0,3$ MPa za osnovna opterećenja odnosno, $\sigma_z = 0,4$ MPa u slučaju zemljotresa.

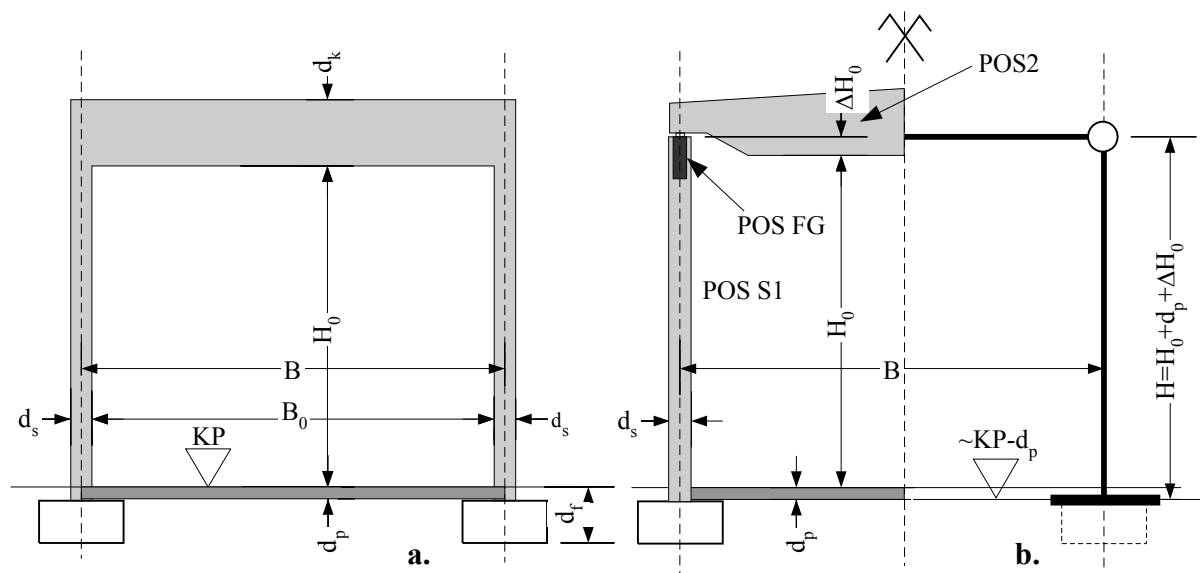
- 1.- Usvojiti rešenje konstrukcije i skicirati dispoziciju sa pretpostavljenim dimenzijama elemenata.
- 2.- Izvršiti potrebne proračune i dimenzionisati stub POS S1.
- 3.- Odrediti potrebne dimenzije temelja stuba POS S1.
- 4.- Skicirati plan armature stuba POS S1.

4.1 KONCEPT KONSTRUKCIJE I ANALIZE

"Idejnim rešenjem" treba definisati dispoziciju konstrukcije objekta: konstrukcijski materijal (u ovom slučaju beton); prostorni koncept konstrukcije koji treba da obezbedi pouzdan i jasan prijem vertikalnih i horizontalnih opterećenja-prostornu stabilnost; veze pojedinih elemenata kao i način građenja (montaža, izrada livenjem na licu mesta), iz čega proističe statički sistem elemenata, kao i konstrukcije u celini.

U zadatku je definisan položaj stubova, njihov osovinski razmak u poprečnom (B) i podužnom pravcu (λ), kao i čista visina unutar hale - rastojanje od poda do najniže donje kote

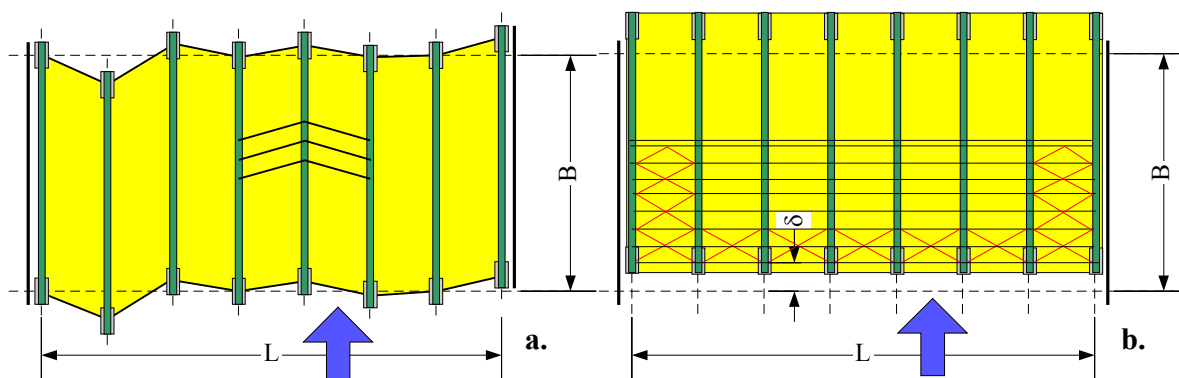
konstrukcije - H_0 , slika 4.2. Korisnik objekta ili projektant tehnologije hale propisuje potrebne gabarite, $B_0 \times H_0$ ili $B \times H_0$. Od svih mogućih konstrukcijskih rešenja, na ispitu se treba odlučiti za ono koje je korektno, i koje se može rešiti u datom vremenu. U konkretnom slučaju, kao globalni concept konstrukcije usvojen je sistem horizontalne konstrukcije krova (krov može da ima nagib gornje konture zbog odvodnjavanja, pri čemu se nagib usvaja prema karakteristikama odvodnjavanja izabranog krovnog pokrivača) oslonjene na vertikalne stubove - za prenos vertikalnih opterećenja, kao i grupe *poprečnih i podužnih okvira* - za prijem horizontalnih opterećenja, slike 4.1 i 4.2.b.



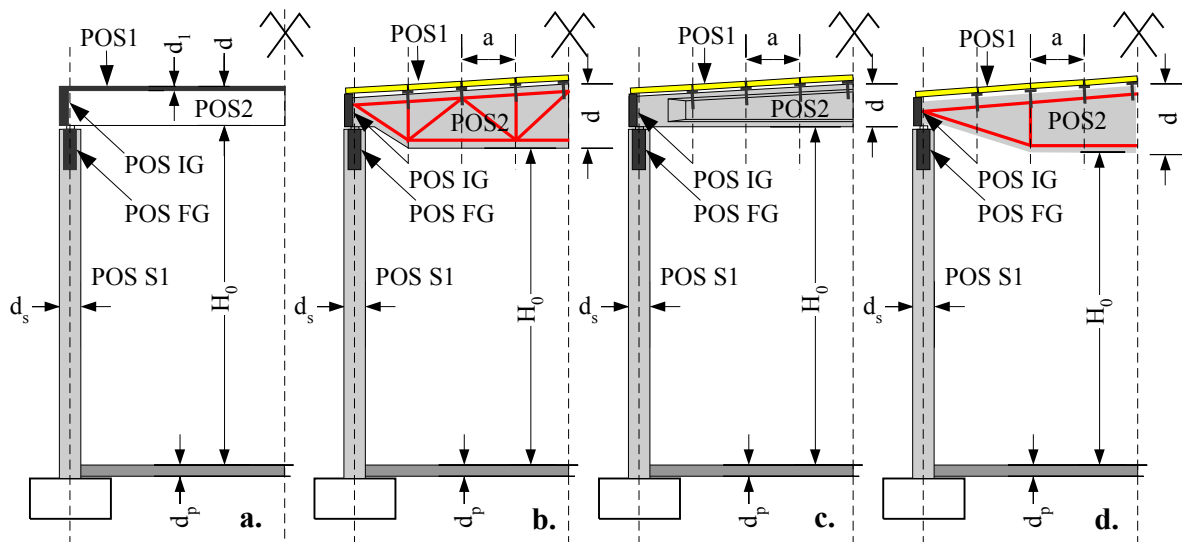
Slika 4.2 - Gabarit hale (a), i poprečni okvir hale (b)

4.1.1 Konstrukcija krova i poprečnih okvira

Poželjno je da je konstrukcija krova *kruta u svojoj ravni*, da bi se uticaji vetra i zemljotresa raspodelili na sve stubove, kao i da bi se izbeglo 'gužvanje' konstrukcije krova u svojoj ravni i lom oslonačkih veza elemenata, slika 4.3.a. U ovom primeru, kao i kursu u celini, podrazumeva se da je na odgovarajući način *obezbeđena krutost konstrukcije krova u svojoj ravni*. U obzir dolaze sva poznata rešenja - montažna, livena na licu mesta ili mešovita. Da bi se obezbedila krutost krova, rešenja sa rožnjačama obično zahtevaju postavljanje *spregova u ravni krova* (zavisi od krovnog pokrivača), slika 4.3.b.



Slika 4.3 - Fleksibilan (a), i ukrućen krov u svojoj ravni (b)



Slika 4.4 - Varijante glavnih nosača POS2 - 'rigli' poprečnog ovira: a.) monolitna konstrukcija ploče sa gredama; b.) rešetka, rožnjače i krovni pokrivač; c.) prethodno napregnuti nosač, rožnjače i krovni pokrivač; d.) dvopojasni nosač, rožnjače i krovni pokrivač

Pri izboru konstrukcije krova i poprečnog okvira, na ispitu je najracionalnije pretpostaviti da je glavni nosač krova POS2 greda - 'rigla' zglobno vezana sa stubovima, slika 4.4. Poprečni okvir formiraju dva konzolna stuba i glavni nosač POS2. Poprečni okviri u praksi mogu da budu i *ramovske konstrukcije*, sa krutim vezama stubova i greda, ali ovi sistemi zahtevaju više vremena za analizu, i zbog toga se ne preporučuju za usvajanje na ispitu. U ravni upravnoj na poprečni okvir, vrhovi stubova obično se povezani *fasadnom gredom* - POS FG na slici 4.4. Da bi se zatvorila hala, obezbedila bočna stabilnost glavnih nosača POS2 i oformio oluk za odvodnjavanje, u ovom primeru postavljena je i ivična greda - POS IG na slici 4.4, koja je deo konstrukcije krova, i nije vezana za stubove hale.

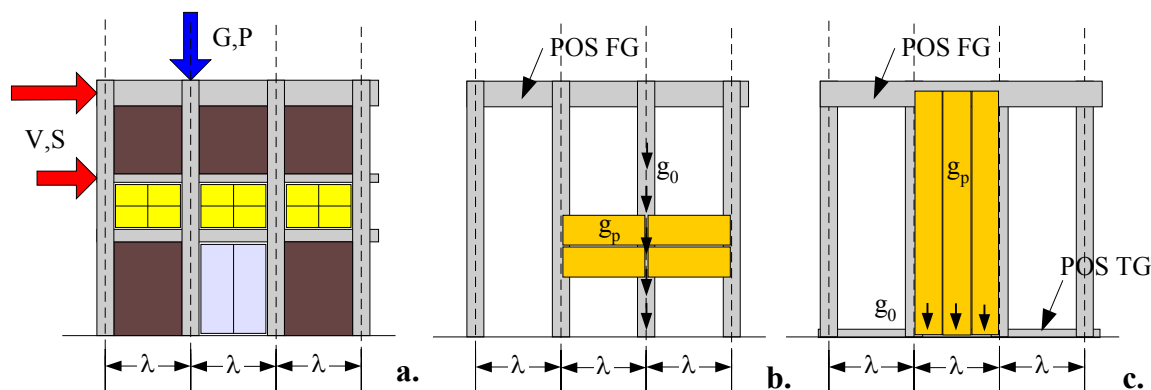
U *idejnom rešenju* na ispitu je dovoljno da se usvoji konstrukcijsko rešenje i računom odredi potrebna visina rožnjače ili debljina ploče (d_1 na sl. 4.4.a), odnosno visina glavnog nosača d i dimenzije gornjeg i donjeg pojasa, u slučaju rešetkastih nosača. Proračun u preseku $maxM$ je dovoljan. Cilj analiza je procena dimenzija nosača, kako bi se definisala njihova težina potrebna za analizu uticaja zemljotresa.

Rešenjem konstrukcije krova definisano je *gravitaciono opterećenje stubova*, kao i glavni deo mase konstrukcije. Pored toga, utvrđena je i visina stubova - H , odnosno statičke dimenzije poprečnog okvira $B \times H$ na slici 4.2.b, koji prihvataju sva horizontalna opterećenja koja deluju u ravni poprečnih okvira.

4.1.2 Podužni okviri

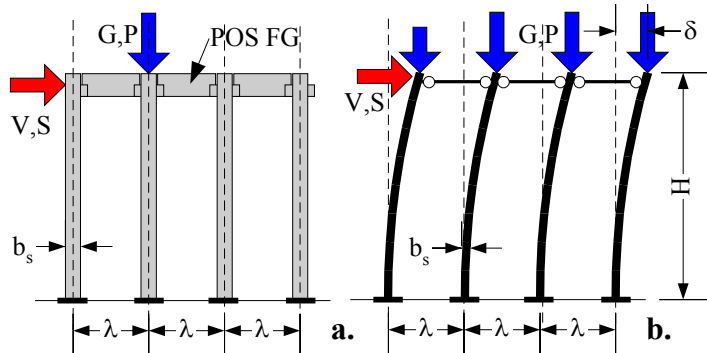
Horizontalna dejstva upravna na poprečne okvire prihvataju se konstrukcijom *podužnih okvira*, slika 4.1 i 4.5. U praksi, podužni okviri koji su ujedno i fasada - '*fasadni podužni okviri*' mogu da se izvedu na različite načine, slika 4.5.a. Stubovi poprečnih okvira ujedno su i stubovi podužnih okvira. Da bi se problem pojednostavio, u ovom kursu se pretpostavlja da su stubovi podužnih okvira povezani gredama samo u vrhu - POS FG na slici 4.4 i 4.4, a da je zatvaranje fasada izvršeno montažnim '*fasadnim panelima*' postavljenim horizontalno, slika 4.5.b, ili vertikalno, slika 4.5.c. Ukoliko se paneli postavljaju horizontalno, bočnim vezivanjem za stubove, tada se sopstvena težina panela g_p (kN/m^2) prenosi kontinualno na stubove, slika 4.5.b. Linijsko opterećenje stuba po visini od težine panela iznosi $g_0 = g_p \times \lambda$. Ukoliko

se paneli postavljaju vertikalno, u jednom komadu, tada se težina panela prenosi na temeljnu gredu POS TG, slika 4.5.c

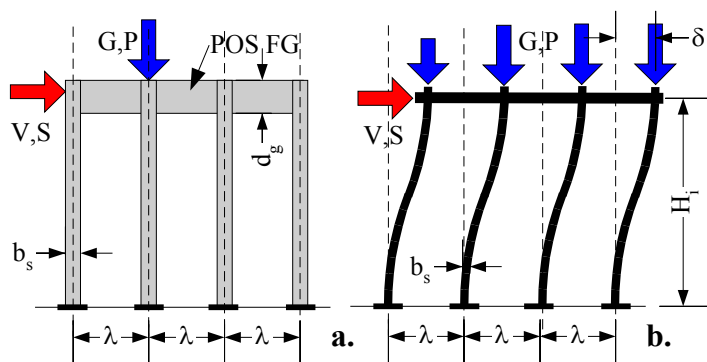


Slika 4.5 - Elementi konstrukcije podužnih okvira

Iako se paneli obično postavljaju ispred stubova, kao na slici 4.5.b, na ispitu se može pretpostaviti da su paneli centrisani u osama stubova - ne unose momente u stubove. Moguća su rešenja i sa oslanjanjem horizontalnih panela na temeljnu gredu - paneli leže jedan na drugom i bočno su pridržani stubovima da se spreči preturanje.



Slika 4.6 - Podužni okvir sa montažnim fasadnim gredama u vrhu



Slika 4.7 - Podužni okvir sa monolitnim krutim fasadnim gredama u vrhu

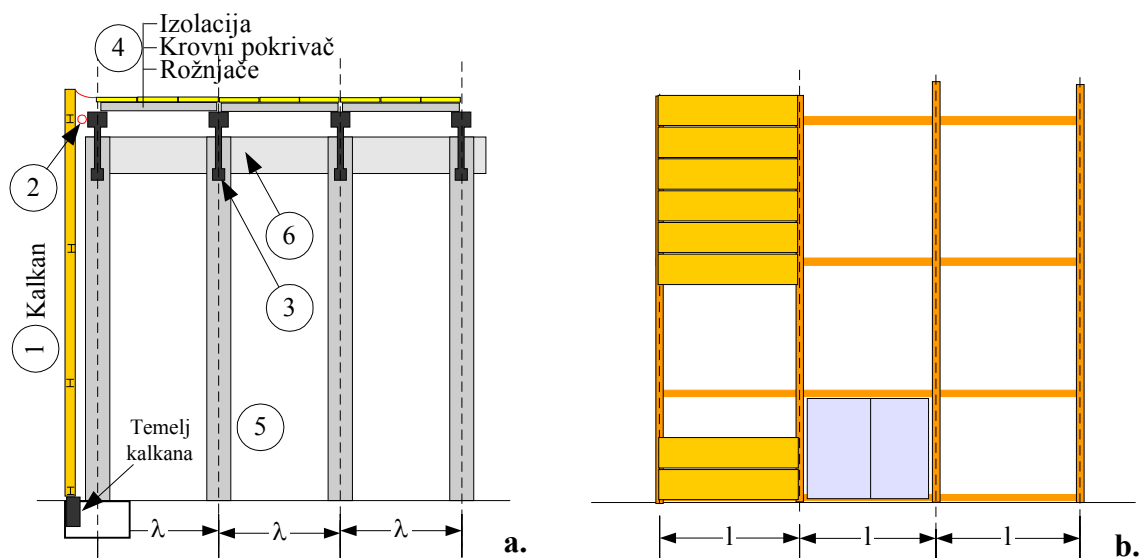
Ukoliko je veza fasadnih greda i stubova kruta, slika 4.7, statički sistem podužnog okvira je *pomerljiv ramovski sistem*. U slučaju da je krutost fasadne grede znatno veća od krutosti stubova (krutost je funkcija momenta inercije preseka ali i raspona elementa), tada su vrhovi stubova praktično uklješteni u 'beskonačno krutu' pomerljivu fasadnu gredu, slika 4.7.b. Dužina izvijanja stubova u ravni podužnog okvira isnosi H_1 . Dva navedena primera su ekstremi, zgodni za analizu u idejnim rešenjima i na ispitu. U raelnosti, moguća su sva rešenja između ova dva - sa 'fleksibilnim vezama'.

Proizvođač panela definiše potrebne veze, koje projektant konstrukcije treba da obezbedi i statički interpretira.

Statički sistem podužnih okvira definisan je usvojenim vezama stubova i temelja, odnosno stubova i fasadnih greda. Pretpostavlja se da su paneli fleksibilno vezani za konstrukciju i da ne u ukrćuju podužne okvire. U ovome primeru i kursu usvojeno je da su stubovi kruto vezani - uklješteni u temelje. Ukoliko je veza fasadnih greda i stubova zglobova (slučaj montažnih fasadnih greda, slika 4.6), statički sistem podužnog okvira je niz konzolnih stubova u vrhu aksijalno povezanih gredama koje obezbeđuju jednaka pomeranja δ vrhova svih stubova, slika 4.6.b. Dužina izvijanja stubova u ravni podužnog okvira iznosi $2 \times H$.

4.1.3 Kalkani

Kalkanima se obično nazivaju konstrukcije koje zatvaraju čela hale. Izbor materijala i konstrukcije kalkana zavisi i od uslova eksploatacije objekta. Ako se hala gradi u svom definitivnom obimu, tada se kalkani obično formiraju kao složene ramovske konstrukcije sa međustubovima i završnom fasadnom riglom, koja zamenjuje glavni poprečni nosač POS2.



Slika 4.8 - Konstrukcija demontažnog, privremenog kalkana: 1 - kalkan; 2 - bočna veza kalkana i krova; 3 - glavni nosač poprečnog okvira; 4 - krovni pokrivač sa rožnjačama; 5 - stub; 6 - fasadna greda

Ukoliko se predviđa naknadno produženje hale, obično se hala završava uobičajenim poprečnim okvirom, koji treba jednoga dana da primi dodatak opterećenja usled produžavanja konstrukcije. U tom slučaju kalkani se izvode kao privremene, demontažne konstrukcije, i mogu da se postave ispred završnog poprečnog okvira, slika 4.8. Konstrukcija kalkana sama nosi svoju težinu, oslonjena na nezavisne temelje kalkana, slika 4.8.a. Da bi se sprečilo preturanje, konstrukcija kalkana se u vrhu bočno vezuje za krutu konstrukciju krova hale, detalj 2 na slici 4.8.a, pri čemu se obično formira vertikalna dilatacija, da bi se sprečilo naslanjanje konstrukcije krova na kalkana pri dejstvu snega, na primer. Ako se kalkan bočno oslanja na nedovoljno krutu konstrukciju krova, tada treba postaviti spreg u prvom polju hale, ili obezbediti poseban spreg kalkanskoj konstrukciji oslonjen bočno na podužne okvire, itd.

U stvarnosti, konstrukcije kalkana se posebno analiziraju, od slučaja do slučaja. Kruta konstrukcija kalkana u svojoj ravni može da proizvede efekat zida - 'šajbne' na krajevima hale, sa tendencijom da sva horizontalna opterećenja u pravcu poprečnog okvira gravitiraju ka kalkanima kao najkrućim elementima u tom pravcu. Jednostavnosti radi, u ovom primeru (preporuka i za ispit) usvojeno je da je konstrukcija kalkana nezavisna - 'samostojeća', i da ne utiče na ponašanje glavne konstrukcije hale pri gravitacionim i horizontalnim opterećenjima. Uloga kalkana je samo da prihvati dejstvo vetra i da ga prenese na glavnu konstrukciju hale.

4.1.4 Procena dimenzija stubova b_s/d_s

Na dimenzije preseka stubova utiču: normalna sila od gravitacionih opterećenja (poznata, prethodno određena); vitkost stuba (poznata je dužina izvijanja $l_0 = 2H$ u ravni poprečnog okvira, tj. $l_0 = 2H$, odnosno $l_0 = H$ u ravni podužnih okvira, slika 4.6 odnosno 4.7); momenti savijanja usled dejstva vetra (poznati, jer zavise od gabarita objekta), ili momenti savijanja usled dejstva zemljotresa (nepoznati, jer zavise od krutosti stubova čije dimenzije za sada ne

znamo). Pored toga, ne zna se unapred da li je za određivanje dimenzija stubova merodavan slučaj opterećenja usled vetra ili zemljotresa. U principu problem se rešava u iteracijama.

Iako je dozvoljena vitkost stubova $\lambda \leq 125$, na ispitu se dozvoljava, i preporučuje, da se pretpostave dimenzije preseka stuba tako da vitkost iznosi $\lambda \leq 75$, da bi mogli da se primene jednostavni dokazi efekata drugoga reda - *metoda dopunske ekscentričnosti* prema BAB-u. Da bi stub poznate dužine izvijanja l_0 imao traženu vitkost λ , potrebna dimenzija stuba b u ravni izvijanja iznosi $b = l_0 \sqrt{12} / \lambda$. Na žalost, te dimenzije ne moraju da budu dovoljne i za obezbeđenje nosivosti pri vetru odnosno zemljotresu, ali su obično dobra pretpostavka za polaz. Voditi računa da se efekti drugoga reda proveravaju samo za dejstva gravitacionih opterećenja i vetra, ali ne i u slučaju zemljotresa. Ovi efekti postoje i pri pomeranjima usled zemljotresa, ali algoritam propisa Yu81 ne daje potrebna rešenja za određivanje pomeranja i efekata drugoga reda u slučaju zemljotresa.

Budući da po Yu81 stubovi moraju da zadovolje *uslov duktilnosti*

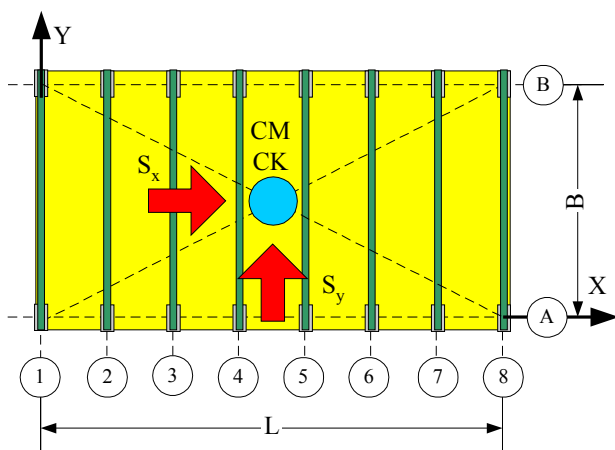
$$P / (0,7\beta_k F) \leq 0,35 \rightarrow F_{min} = b_s d_s \geq P / (0,7\beta_k 0,35)$$

gde je: P - aksijalna sila usled gravitacionog opterećenja pri zemljotresu; β_k - marka betona, to su i minimalne dimenzije preseka stuba limitirane, i treba ih unapred proveriti, pre prelaska na analizu uticaja vetra i zemljotresa.

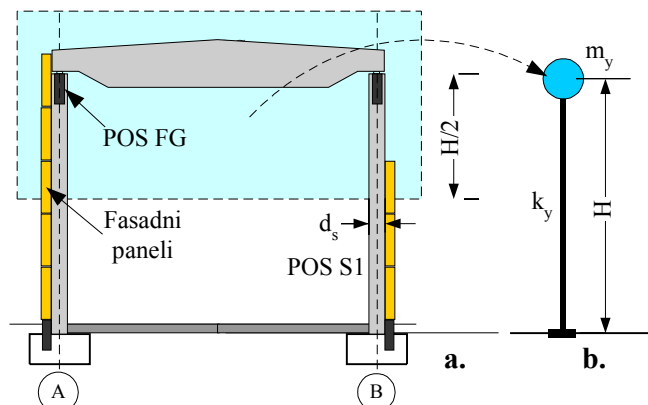
Ako se usvoji da su stubovi konzolni i u ravni podužnog okvira, slika 4.6, tada bi praktično ista vitkost sugerisala izbor kvadratnog preseka stuba, pa bi pri istim krutostima stubova seizmičko opterećenje u oba pravca bilo isto. To se obično ne radi, jer se u ravni podužnih okvira stubovi uvek mogu ukrutiti fasadnom gredom, a i uticaji vetra su izraženiji u poprečnom pravcu, jer je veća izložena površina. Prema tome, pravougaoni presek je bolje rešenje, u kom slučaju se, na ispitu, preporučuje dispozicija podužnog okvira prema sl. 4.7, sa krutom fasadnom riglom *POS FG*. Lako se rešava, i koliko-toliko simulira povećanu krutost podužnih okvira. Uslov vitkosti $\lambda \leq 75$ primenjen na obe ravni izvijanja u tom slučaju daje $d_s = 2b_s$.

4.2 PRORAČUN UTICAJA USLED ZEMLJOTRESA

S obzirom da su krutost konstrukcije i raspored masa dvoosno simetrični u osnovi, centar mase CM i centar krutosti CK se poklapaju - prema Yu81 nema torzionih uticaja usled dejstva zemljotresa, slika 4.9.



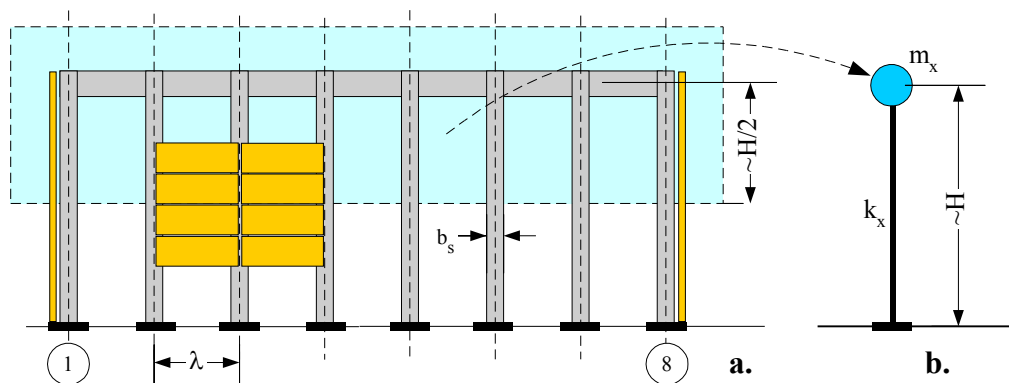
Slika 4.9 - Poklapanje centra mase CM i centra krutosti CK u slučaju simetrične konstrukcije hale



Slika 4.10 - Računska masa m_y konstrukcije i dinamički model u ravni poprečnog okvira

U opštem slučaju, pomeranja bilo koje tačke krute konstrukcije krova u svojoj ravni mogu da se opišu sa tri parametra, dve translacije i rotacija - sistem ima *tri stepena slobode*

kretanja. S obzirom da nema efekata rotacije, uticaji zemljotresa mogu da se analiziraju kao dva vremenski nezavisna slučaja: translacija u podužnom X -pravcu, odnosno translacija u poprečnom Y -pravcu. Za određivanje pomeranja i naprezanja stubova u slučaju zemljotresa u poprečnom Y -pravcu, približan dinamički model je konzola sa ukupnom masom m_y koncentrisanom u vrhu konstrukcije, sa ukupnom, zbirnom krutošću na pomeranje k_y u Y -pravcu, slika 4.10. Svaka 'čestica' mase osciluje pri zemljotresu, pa tako i masa fasadnih panela osciluje zajedno sa kontinualnom masom stubova. Za ocenu pomeranja i naprezanja stubova, dovoljno je tačno da se masa fasada i stubova sa gornje polovine visine objekta $H/2$ pripiše dominantnoj masi krova na visini H , slika 4.10.



Slika 4.11 - Računska masa m_x konstrukcije i dinamički model u ravni podužnog okvira

Analogno, za određivanje pomeranja i naprezanja stubova u slučaju zemljotresa u podužnom X -pravcu, približan dinamički model je konzola sa ukupnom masom m_x koncentrisanom u vrhu konstrukcije, sa ukupnom, zbirnom krutošću na pomeranje k_x u X -pravcu, slika 4.11.

Krutost sistema u X/Y pravcu obično nije ista $k_x \neq k_y$, pa će se i ukupno seizmičko opterećenje u ova dva pravca razlikovati. Za oba događaja masa je ista, $m_x = m_y = m$, ali se relativnim pomeranjima ukupne mase pri zemljotresu u poprečnom Y -pravcu suprotstavlja $n = 8$ poprečnih okvira, a pri zemljotresu u podužnom X -pravcu pomeranjima se suprotstavljaju $n = 2$ podužna okvira u osama A i B .

Odgovarajući period oscilovanja može da se sračuna preko poznatih izraza:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}; \quad T_1 = 2\pi \sqrt{m\delta}; \quad T_1 \approx 2\sqrt{d}$$

gde su: m -masa; k -krutost na pomeranje; δ -pomeranje usled jedinične sile ('fleksibilnost konstrukcije'); d -pomeranje (u metrima) usled težine $g \times m$ usmerene horizontalno. Poslednja dva izraza su opštija i pogodnija za proračun. Uočiti da treći izraz u slučaju konzolne konstrukcije daje:

$$T_1 = 2\sqrt{d} = 2\sqrt{\frac{QH^3}{3EI}} = 2\sqrt{\frac{mgH^3}{3EI}} = 2\sqrt{g} \sqrt{m \frac{1 \times H^3}{3EI}} \approx 2\pi \sqrt{m\delta}$$

gde je $g = 9,81 \text{ m/s}^2 \rightarrow \sqrt{g} = 3,132 \approx \pi$

4.2.1 Poprečni, S_y - zemljotres:

Ukupno seizmičko opterećenje S_y u Y - pravcu iznosi

$$S_y = k_0 k_s k_p k_d Q \quad \text{gde su:}$$

Q	ukupna računaska težina ($=m \times g$)
$k_0 = 1,0$	koefficient kategorije objekta, objekat II kategorije
$k_p = 1,0$	$T_1 < 2,0 \text{ s}$ (koefficient duktilnosti, član 27 Yu81)
$= 1,6$	$T_1 \geq 2,0 \text{ s}$

$$k_s = 0,025$$

koeficijent seuzmičnosti, VII zona

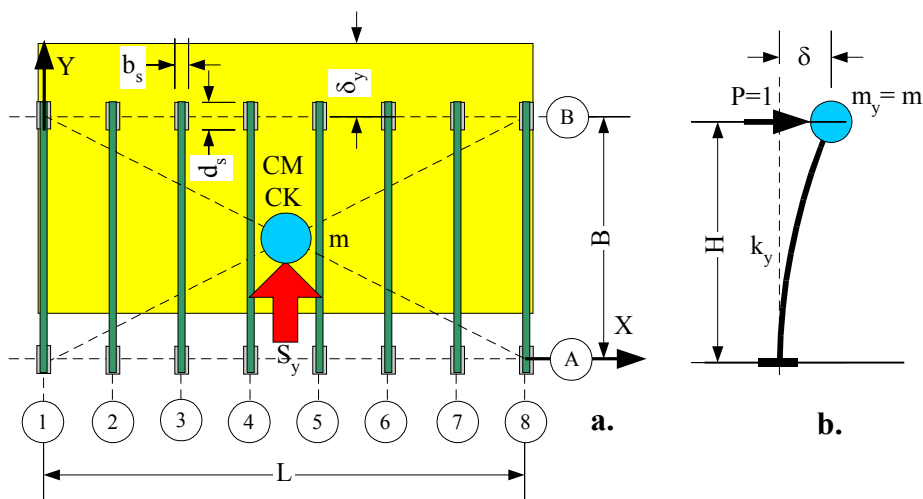
Napomena: Ukoliko je zadatkom zadato ubrzanje tla a_g na osnovnoj steni sa povratnim periodom 500 godina, tada je:

$$k_s \sim 0,25a_g/g$$

$$k_d = 0,5/T_1 \leq 1,00$$

$$\geq 0,33$$

koeficijent dinamičnosti, tlo I kategorije



Slika 4.12 - Proračun efekata zemljotresa u poprečnom Y-pravcu

Od parametara koji definišu ukupno seizmičko opterećenje S_y , svi su jedonožno definisani propisima za date uslove zadatka, osim vrednosti koeficijenta dinamičnosti k_d , koji je funkcija nepoznate vrednosti perioda oscilovanja u prvom tonu T_1 .

Vrednost perioda oscilovanja T_1 može da se odredi na osnovu poznate ukupne mase $m_y = m$ i ukupne, zbirne krutosti k_y konstrukcije na pomeranje u Y-pravcu. S obzirom da su svi stubovi (ukupno $n=16$ stubova) istog, konzolnog sistema, to je pomeranje bilo kog stuba i , sa momentom inercije preseka $I_i = b_s d_s^3/12$ i visine H_i , usled delovanja jedinične sile u vrhu $P=1$, jednako

$$\delta_i = 1 \times H_i^3 / 3EI_i$$

Prethodni izraz definiše 'matricu fleksibilnosti', dok je krutost konzolnog stuba i na pomeranje jednaka

$$k_{iy} = 1 / \delta_i = 3EI_i / H_i^3$$

Krutost ukupne konstrukcije na pomeranje jednaka je sumi krutosti svih pojedinačnih stubova

$$k_y = \sum_{i=1}^{16} k_{iy}$$

pa je period oscilovanja u prvom tonu $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}}$, gde je m ukupna masa.

U opštem slučaju, pomeranje δ vrha konstrukcije konzolnih stubova sa ukupnom krutošću k_y usled dejstva jedinične sile $P=1$ u vrhu iznosi

$$\delta = 1/k_y = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} k_{iy}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} \frac{3EI_i}{H_i^3}}$$

U konkretnom slučaju, svi stubovi su istih visina H , i istih momenata inercije preseka I , pa je

$$\delta = 1/k_y = \frac{1}{\sum_1^{16} k_{iy}} = \frac{1}{\sum_1^{16} \frac{3EI_i}{H_i^3}} = \frac{H^3}{16 \times 3EI}$$

odnosno, $T_1 = 2\pi\sqrt{m\delta}$, gde je m ukupna masa.

Sa sračunatom vrednošću perioda oscilovanja T_1 određuje se vrednost koeficijenta dinamičnosti k_d , odnosno vrednost ukupnog seizmičkog opterećenja S_y .

Generalno, pri istim pomeranjima δ_y vrhova stubova, raspodela poznate horizontalne sile S_y na pojedine stubove vrši se srazmerno njihovim krutostima na pomeranje k_{iy} . Svaki stub i prima deo sile S_{iy}

$$S_{iy} = S_y k_{iy} / k_y$$

U slučaju stubova istog sistema-konzola, istih visina i istih poprečnih preseka, odnos krutosti na pomeranje se svodi na odnos momenata inercije poprečnih preseka, pa je

$$S_{iy} = S_y I_i / \sum_{i=1}^{16} I_i$$

U konkretnom slučaju, $S_{iy} = S_y / 16$, ukupna sila se ravnomerno deli na ukupno 16 stubova.

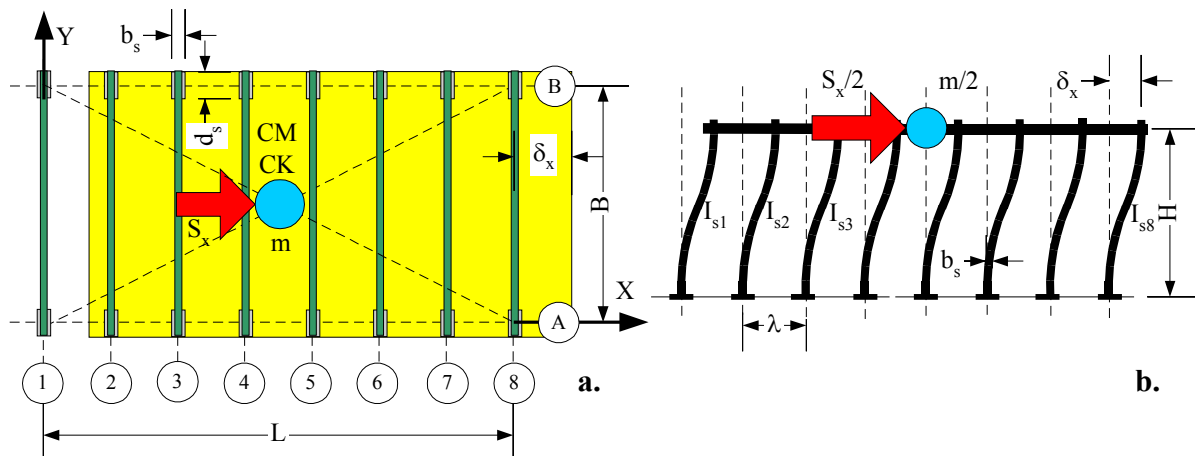
Prema Pravilniku Yu81, potrebno je proveriti i 'pomeranja' vrha konstrukcije pri zemljotresu, usled dejstva računске sile S_y :

$$\delta_y = S_y \delta = S_y H^3 / (3EI \sum_{i=1}^{16} I_i) \leq H/600?$$

Potrebno je da su računска pomeranja vrha manja od $H/600$. Ukoliko je $\delta_y > H/600$, na ispitivanju ne treba korigovati proračun povećanjem krutosti elemenata, dovoljno je to konstatovati. U slučaju industrijskih hala, obično se dozvoljavaju veća pomeranja, zavisno od opreme i konstrukcije fasada.

4.2.2 Podužni, S_x - zemljotres:

Ako je krutost fasadnih panela i njihovih veza sa stubovima zanemarljiva, pomeranjima u X -pravcu opire se opet svih 16 stubova, ali organizivanih u dva podužna okvira, slika 4.13. Masa sistema je ista kao za Y -pravac, ali krutost sistema nije ista: razlikuje se moment inercije preseka stuba oko druge ose, i razlikuju se konturni uslovi krajeva stuba - usvojeno je da su vrhovi stubova kruto vezani za 'beskonačno krutu' fasadnu gredu. Zbog različite krutosti, razlikovaće se i računско seizmičko opterećenje S_x u X -pravcu.



Slika 4.13 - Proračun efekata zemljotresa u podužnom X -pravcu

S obzirom da su svi stubovi (ukupno $n=16$ stubova) istog sistema (pomerljiva, obostrano uklještena greda), to je pomeranje bilo kog stuba i , sa momentom inercije preseka $I_i = d_s b_s^3 / 12$ i visine H_i , usled delovanja jedinične sile u vrhu $P=1$, jednako

$$\delta_i = 1 \times H_i^3 / 12EI_i$$

Prethodni izraz definiše 'matricu fleksibilnosti', dok je krutost stuba i na pomeranje jednaka

$$k_{ix} = 1 / \delta_i = 12EI_i / H_i^3$$

Obostrano uklješten stub je četiri puta krući od konzolnog stuba. Krutost ukupne konstrukcije na pomeranje jednaka je sumi krutosti svih pojedinačnih stubova

$$k_x = \sum_{i=1}^{16} k_{ix}$$

pa je period oscilovanja u prvom tonu $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}}$, gde je m ukupna masa.

U opštem slučaju, pomeranje δ vrha konstrukcije obostrano uklještenih stubova sa ukupnom krutošću k usled dejstva jedinične sile $P=1$ u vrhu iznosi

$$\delta = 1/k_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} k_{ix}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} \frac{12EI_i}{H_i^3}}$$

U konkretnom slučaju, svi stubovi su istih visina H , i istih momenata inercije preseka I , pa je

$$\delta = 1/k_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} k_{ix}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{16} \frac{12EI_i}{H_i^3}} = \frac{H^3}{16 \times 12EI}$$

odnosno, $T_1 = 2\pi \sqrt{m\delta}$, gde je m ukupna masa. Sa poznatom vrednošću perioda oscilovanja T_1 , potrebno je odrediti odgovarajuću vrednost koeficijenta dinamičnosti k_d , i računskog seizmičkog opterećenja S_x za X -pravac dejstva zemljotresa.

Pri istim pomeranjima δ_x vrhova stubova, raspodela poznate horizontalne sile S_x na pojedine stubove vrši se srazmerno njihovim krutostima na pomeranje k_{ix} . Svaki stub i prima deo sile S_{ix}

$$S_{ix} = S_x k_{ix} / k_x$$

U slučaju stubova istih konturnih uslova, istih visina i istih poprečnih preseka, odnos krutosti na pomeranje se svodi na odnos momenata inercije poprečnih preseka, pa je

$$S_{ix} = S_x I_i / \sum_{i=1}^{16} I_i$$

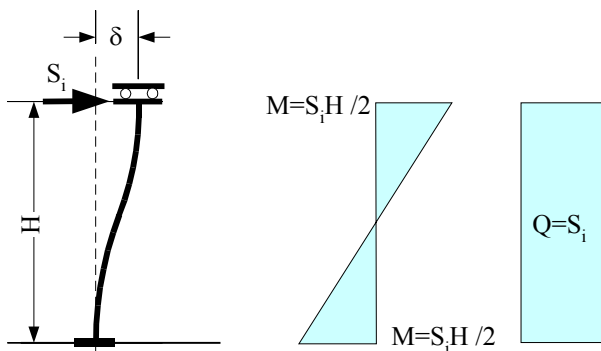
U konkretnom slučaju, $S_{ix} = S_x / 16$, ukupna sila se ravnomerno deli na ukupno 16 stubova.

Prema Pravilniku Yu81, potrebno je proveriti i 'pomeranja' vrha konstrukcije pri zemljotresu, usled dejstva računске sile S_x :

$$\delta_x = S_x \delta = S_x H^3 / (12EI \sum_{i=1}^{16} I_i) \leq H/600?$$

U prethodnoj analizi, krutost sistema određena je kao za Y -pravac, na bazi pojedinačnih krutosti stubova. Ako se konstrukcija posmatra kao dva podužna okvira istih krutosti, tada svakom podužnom okviru pripada pola mase $m/2$, odnosno polovina ukupne seizmičke sile - $S_x/2$.

Period oscilovanja jednog podužnog okvira iznosi $T_1 = 2\pi \sqrt{m_x \delta}$ (isti je i za drugi okvir, naravno), gde je $m_x = m/2$ ($m = Q/g$ - ukupna masa objekta). Na osnovu prethodno prikazanih



Slika 4.14 - Statika podužnog okvira

opštijih izraza, pomeranje jednog okvira koga čini osam identičnih stubova usled jedinične sile u vrhu iznosi

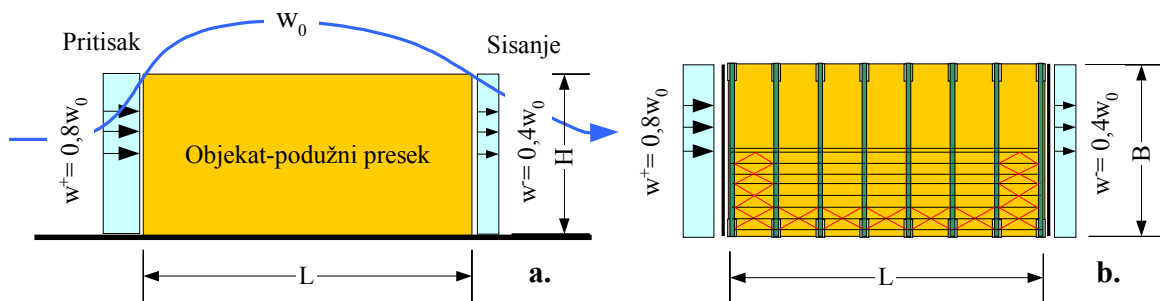
$$\delta = 1 \times H^3 / (12E \sum_{i=1}^8 I_i)$$

gde je $\sum_{i=1}^8 I_i = 8I_s$, u ovom slučaju.

Usled sile S_i na jednom stubu, uticaji u stubovima prikazani su na slici 4.14. U principu, u stubovima podužnog okvira pojavljuju se i aksijalne sile usled zemljotresa, koje su u srednjem delu podužnog okvira u ovom primeru zanemarene.

4.3 PRORAČUN UTICAJA VETRA

Kao i u Primeru 3, deo 3.11, u ovom kursu se za potrebe izrade idejnog rešenja konstrukcije hale koriste jednostavni stavovi starih propisa za vetar. Opterećenje vetrom definisano je tzv. 'osnovnim dejstvom - w_0 ', slika 4.15, koje je definisano za teritoriju države, slično seizmičkoj rejonizaciji. U zadatku je data vrednost „osnovnog dejstva vetra“ - $w_0 = 0,7 \text{ kN/m}^2$.



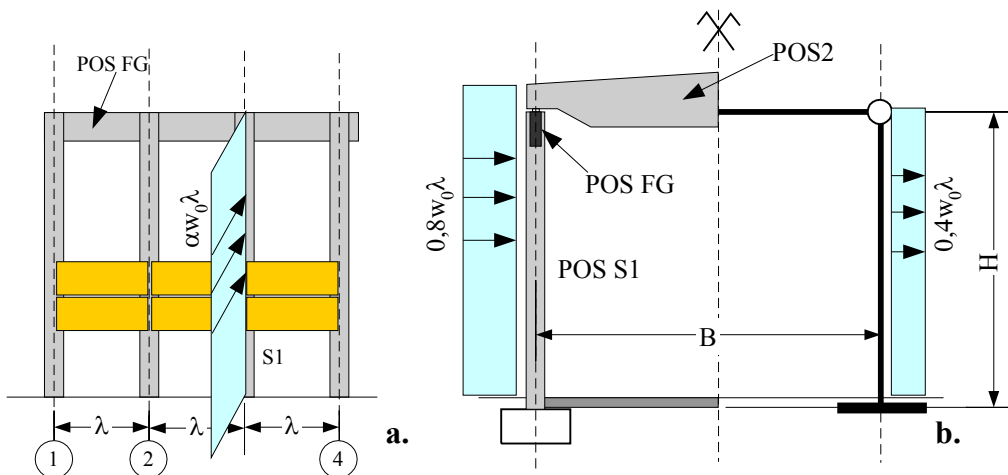
Slika 4.15 - Dejstvo vetra na objekat, prema starim propisima

Pritisak na direktno izloženu površinu iznosi

$$w^+ = 0,8w_0 = 0,8 \times 0,7 = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

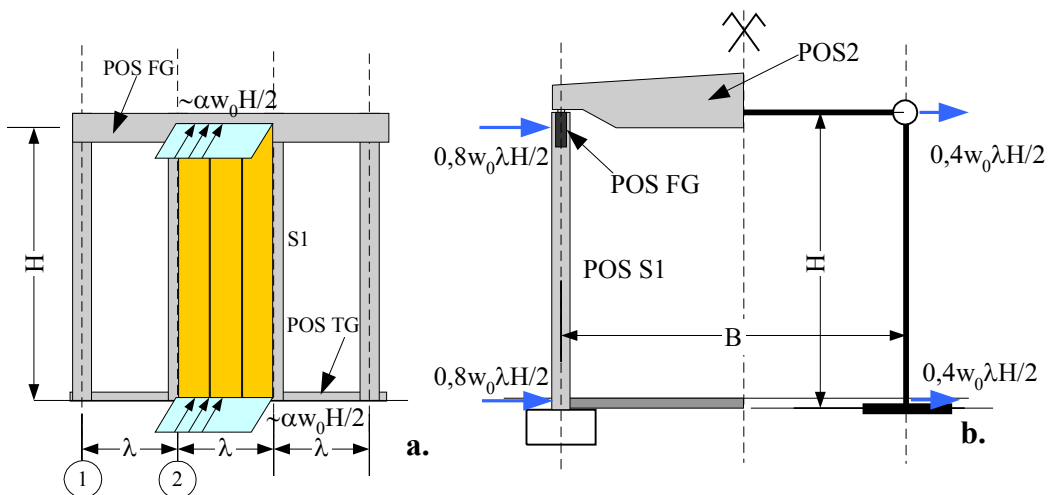
Podpritisak, ili „sišuće dejstvo“ na naspramnu površinu iznosi, slika 4.15.

$$w^- = 0,4w_0 = 0,4 \times 0,7 = 0,28 \text{ kN/m}^2$$

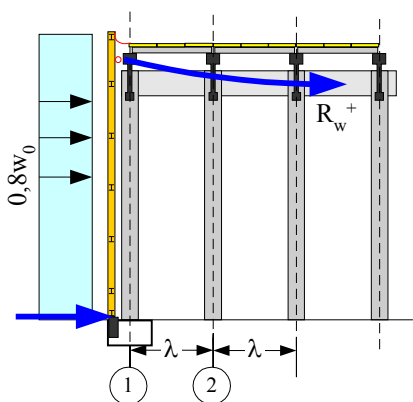


Slika 4.16 - Dejstvo vetra na horizontalne fasadne panele podužnog okvira

Osim intenziteta vetra, opterećenje elemenata konstrukcije zavisi i od načina prenosa sila vetra sa fasade na konstrukciju. U slučaju horizontalnih fasadnih panela podužnog okvira, sile vetra se sa panela prenose direktno na stubove, kao podeljeno opterećenje po visini stuba, slika 4.16.



Slika 4.17 - Dejstvo vetra na vertikalne fasadne panele podužnog okvira



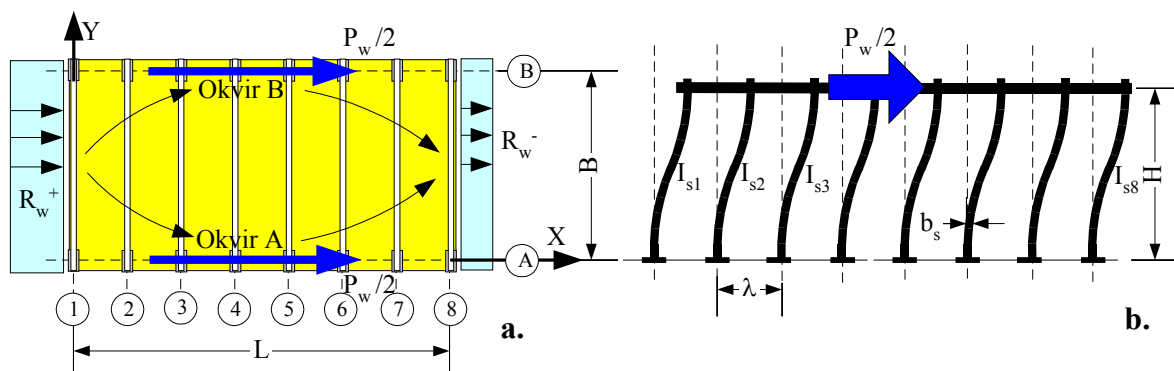
Slika 4.18 - Dejstvo vetra na kalkan

U slučaju vertikalnih fasadnih panela podužnog okvira, stubovi nisu direktno izloženi vetru, čije se reakcije prenose delom u ravan krova, a delom u nivo temelja, slika 4.17. Svaki poprečni okvir prihvata deo vetra iz ravni krova na dužini λ , slika 4.17.b.

U ovome primeru usvojeno je da je konstrukcija kalkana takva da se dejstvo vetra na konstrukciju hale prenosi kao i u slučaju vertikalnih panela, delom na temelje kalkana a delom u ravan krova, slika 4.18 i 4.19. Konstrukcija kalkana opterećenje vetra predaje krutoj krovnoj ravni na rasponu B , da bi se potom sile vetra iz ravni krova unele u podužne okvire, i preko njih u temelje. Isti mehanizam prenosa važi kako za pritiskujuće dejstvo vetra, tako i za 'sišuće'.

4.3.1 Uticaji vetara u podužnom, X- pravcu

S obzirom na simetriju, po pola reakcije vetra sa kalkana prihata svaki od podužnih okvira A odnosno B , slika 4.19.



Slika 4.19 - Dejstvo vetra u podužnom X-pravcu

Uz pretpostavku da su stubovi kalkana uklješteni u svoje temelje, i zglobno oslonjeni na krov, reakcije kalkana u ravni krova iznose:

$$R_w^+ \approx 3w^+H/8 = 3 \times 0,8w_0H/8 (= 0,30w_0H \text{ kN/m}')$$

$$R_w^- \approx 3w^-H/8 = 3 \times 0,4w_0H/8 (= 0,15w_0H \text{ kN/m}')$$

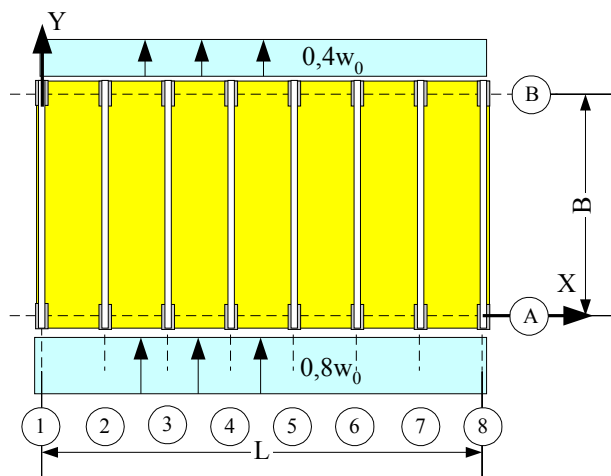
Rezultanta vetra na ceo krov iznosi

$$P_w = (R_w^+ + R_w^-)B = (3/8)(0,8 + 0,4)w_0HB \text{ (kN)}$$

Uticaji u stubovima određuju se kao i u slučaju zemljotresa ($P_w \leftrightarrow S_x$), razmatrajući konstrukciju sastavljenu od 16 pojedinačnih stubova, ili kao slučaj dva podužna okvira. U odnosu na zemljotres, razlika je samo u poreklu opterećenja, na dalje se statički proračun zasniva na istim principima.

4.3.2 Uticaji vetra u poprečnom, Y- pravcu

Za analizu je jednostavniji slučaj zatvaranja fasade vertikalnim panelima, prema slici 4.17. U ovome primeru usvojeno je da opterećenje usled vetra horizontalni paneli prenose na glavne stubove poprečnih okvira, sa pripadajuće širine $\lambda \rightarrow q_w^\pm = w^\pm \lambda$, prema slici 4.16.



Slika 4.20 - Dejstvo vetra u poprečnom Y-pravcu

Uticaji u stubovima od vetra u poprečnom pravcu, slika 4.20, posledica su dva stanja: direktnog dejstva vetra na stub sa pripadajuće širine λ , slika 4.21.b, i uticaja usled pomeranja vrhova stubova zbog pomeranja krova kao krute ploče, slika 4.21.c.

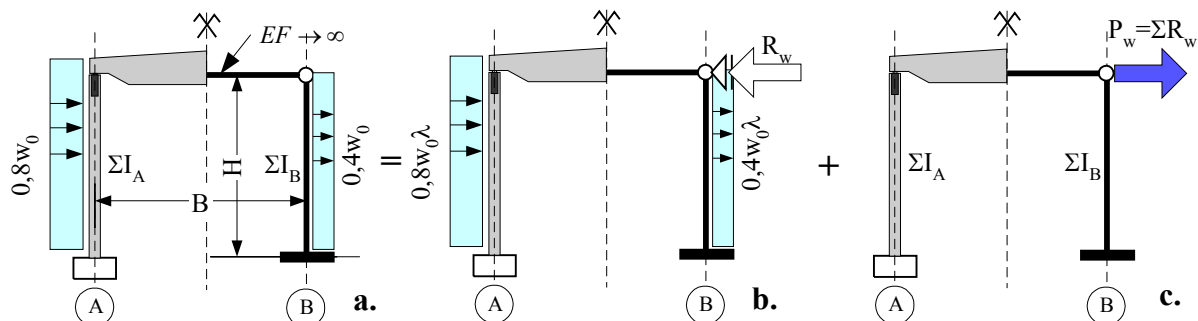
U terminima 'metode deformacija', direktni uticaji vetra na stub dobijaju se analizom 'nepomerljivog sistema', kome je privremeno dodat horizontalni oslonac u ravni krova, slika 4.21.b. U ovom koraku treba odrediti momente i transverzalne sile stuba-grede uklještenne u temelj, i zglobno oslonjene o ravan nepomerljivog krova. Moment u uklještenju stuba u osi A, izlo-

ženog pritiskujućem dejstvu vetra iznosi

$$M_{sw1} = (0,8w_0\lambda)H^2/8$$

slika 4.22.a, dok je reakcija stuba u ravni krova

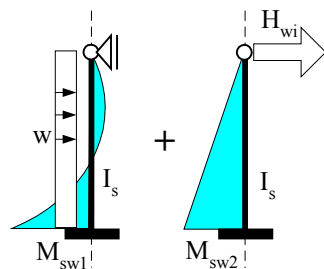
$$R_w = 3(0,8w_0\lambda)H/8$$



Slika 4.21 - Određivanje uticaja od vetra u stubovima poprečnog okvira: a.) dispozicija; b.) lokalno dejstvo vetra na jedan okvir; c.) sumarno dejstvo vetra u ravni krova na konstrukciju u celini

Momenti, odnosno reakcije naspramnog stuba u osi B , usled 'sišućeg' dejstva vetra iznose 50% uticaja u osi A . Ukupna reakcija oba stuba jednog poprečnog okvira u ravni nepomerljivog krova iznosi $R_w = 3(0,8 + 0,4)w_0\lambda H/8$.

Da je konstrukcija krova stvarno nepomerljiva, horizontalno pridržana krutim kalkanima, na primer, to bi bili i jedini efekti vetra na stubove poprečnog okvira. Pošto nagomilanu ukupnu reakciju ΣR_w svih poprečnih okvira u ravni krova nema ko da prihvati, krov će da se pomeri za iznos 'deformacijski nepoznate veličine-horizontalnog pomeranja δ ', i da se oslobodi neuravnotežene reakcije ΣR_w .



Slika 4.22 - Komponente savijanja stuba direktno izloženog vetru

Do istog rezultata se dolazi ako se zamisli da oslonac u ravni krova stvarno postoji, ali je privremen. Kada se taj oslonac ukloni, akumulirana ukupna reakcija $P_w = \Sigma R_w$ mora da se preraspodeli na sve stubove poprečnih okvira, slika 4.21.c. Zadatak se rešava kao i u slučaju preraspodele seizmičkog opterećenja - srazmerno krutostima stubova, deo 4.2.1. Na jedan stub deluje dodatna sila vetra usled pomeranja

$$H_{wi} = P_w k_{iy} / k_y$$

U slučaju stubova istog sistema-konzola, istih visina i istih poprečnih preseka, odnos krutosti na pomeranje se svodi na odnos momenata inercije poprečnih preseka, pa je

$$H_{wi} = P_w I_i / \sum_{i=1}^{16} I_i = P_w / 16$$

Moment savijanja u uklještenju stuba u osi A iznosi $M_{sw2} = H_{wi}H$, slika 4.22.b.

Ukupni uticaji u stubu direktno izloženom vetru dobijaju se superpozicijom lokalnog dejstva vetra direktno na stub, i uticaja usled pomeranja krova, $M_{sw} = M_{sw1} + M_{sw2}$.

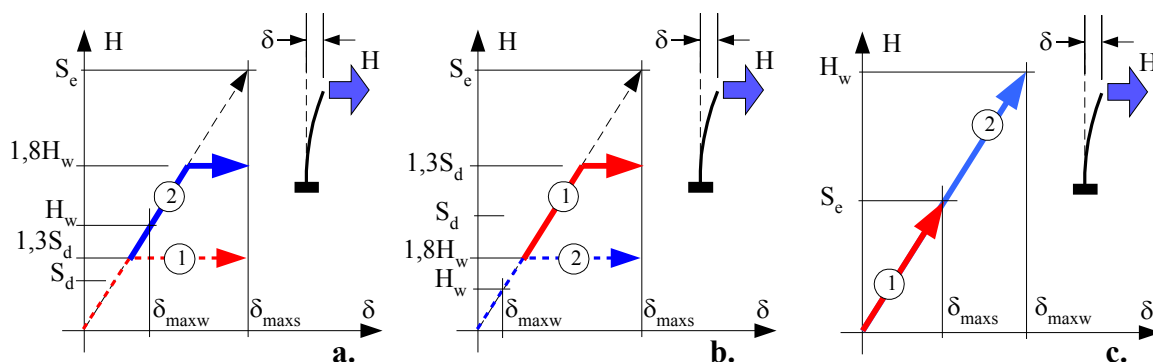
Izloženi algoritam je samo predlog kako da se problem reši 'peške'. Problem je jasan, sva poznata i priznata rešenja dolaze u obzir.

4.4 MERODAVNA KOMBINACIJA OPTEREĆENJA-DIMENZIONISANJE STUBA

Za tipičan stub S_i treba nacrtati dijagrame M, N, Q usled stalnog opterećenja, snega, zemljotresa i vetra, za oba pravca dejstva.

S obzirom da su dejstva vetra i zemljotresa alternativna, stubovi se armiraju simetrično. Usvojena armatura treba da je dovoljna da stub sa zahtevanim koeficijentom sigurnosti pouzdano izdrži sva moguća stanja opterećenja koja se mogu pojaviti u fazi građenja i eksploataciji. U slučaju stubova hala, obično nije moguće samo na osnovu veličine uticaja usled vetra odnosno zemljotresa zaključiti koja je kombinacija opterećenja merodavna za proračun potrebne armature: nisu isti koeficijenti sigurnosti, a za uticaje usled vetra u analizu treba uvesti i efekte drugoga reda. Najjednostavnije je da se potrebna armatura sračuna posebno za oba slučaja opterećenja, za oba pravca dejstva opterećenja, i da se usvoji veća od sračunatih. Na ispitu je dovoljno da se proračun izvrši samo u preseku u uklještenju stuba. Ukoliko se ispostavi da su pretpostavljene dimenzije stuba nedovoljne za smeštaj armature uz poštovanje maksimalnih dozvoljenih procenata armiranja, u principu bi trebalo promeniti dimenzije preseka i ponoviti proračun, jer je promenjena krutost sistema i nivo seizmičkog opterećenja, a i vitkost stuba se menja, pa i time i uticaji drugoga reda u kombinaciji sa vetrom. S obzirom da se radi o 'idejnom rešenje', na ispitu se dozvoljava da se usvoje koriguju dimenzije preseka, bez ponavljanja statičkih proračuna.

Komentar: „Merodavna kombinacija“ uticaja definiše kapacitet nosivosti preseka u uklještenju. Za razumevanje ponašanja konstrukcija, treba imati u vidu razliku u filozofiji dimenzionisanja potrebne nosivosti preseka u slučaju dejstva vetra odnosno zemljotresa.



Slika 4.23 - Merodavna opterećenja: a.) vetar merodavan za nosivost; b.) zemljotres merodavan za nosivost; c.) zemljotres zanemarljiv

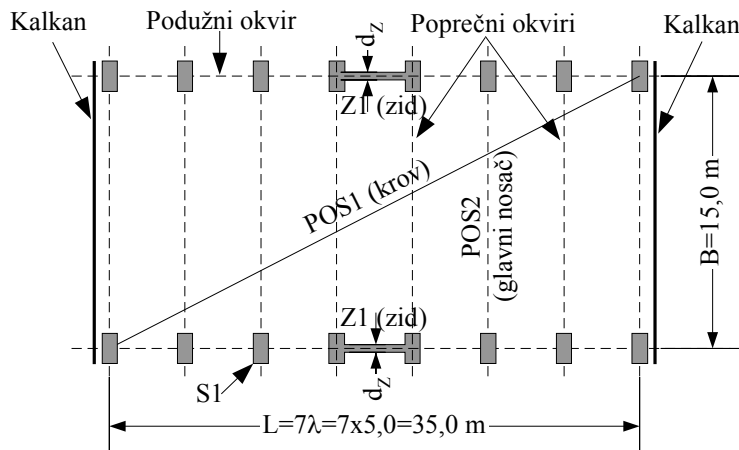
U slučaju dejstva vetra, iznos opterećenja je determinisana veličina, koja ne zavisi od ponašanja konstrukcije, bar u slučaju uobičajenih objekata (kod vitkih konstrukcija to nije baš tako). U eksploataciji se očekuje da se pri dejstvu vetra konstrukcija ponaša elastično, bez oštećenja, sa maksimalnim pomeranjem δ_{maxw} pri opterećenju H_w , slika 4.23.a. Potrebna nosivost elemenata i preseka konstrukcije određuje se tako da kapacitet nosivosti bude veći od uticaja očekivanih u eksploataciji, $1,8H_w$ na primer. Od konstrukcije se uopšte ne očekuje da u eksploataciji dostigne kapacitet nosivosti, pa obično nije ni bitno da li do loma preseka dolazi iscrpljenjem nosivosti armature ili betona - da li je lom preseka duktilan ili krt.

Za razliku od vetra, opterećenje konstrukcije usled zemljotresa bitno zavisi od odgovora konstrukcije pri pomeranjima. Ukoliko bi se konstrukcija pri zemljotresa ponašala elastično, bez oštećenja, maksimalno pomeranje bi bilo reda veličine δ_{max} pri opterećenju S_e , slika 4.23.a. Obično su to znatna opterećenja, pa se uobičajeni objekti projektuju tako da kapacitet nosivosti pri zemljotresu bude niži od elastičnog odgovora, $S_d < S_e$, slika 4.23.a-b. Pri dostizanju kapaciteta nosivosti, konstrukcija prelazi u *plastični mehanizam* otvaranjem potrebnog broja *plastičnih zglobova*. Zbog različitih nepouzdanosti analize, nosivost se određuje uvođenjem koeficijenta sigurnosti, $1,3H_w$ prema Yu81, na primer. Prema *konceptu jednakih pomeranja*, videti 3.4-deo A, maksimalna očekivana pomeranja pri zemljotresu δ_{max} su istog reda veličine, bez obzira da li se konstrukcija ponaša elastično ili nelinearno, linija 1 na slikama 4.23.a-b. Usvajanjem nižeg kapaciteta nosivosti S_d , u konstrukciju je ugrađen 'osigurač' koji treba da je zaštiti od preopterećenja, ali je neophodno obezbediti i potreban *kapacitet post-elastičnih deformacija - duktilnost*, tako da konstrukcija izdrži očekivana pomeranja δ_{max} bez ugrožavanja sigurnosti ljudi ili opreme.

Prema tome, u slučaju vetra konstrukcija se obezbeđuje da se ne dostigne kapacitet nosivosti preseka, dok se u slučaju zemljotresa upravo očekuje da konstrukcija dostigne kapacitet nosivosti i pređe u plastični mehanizam. U slučaju kada je opterećenje vetrom merodavno za određivanje kapaciteta nosivosti, $1,8H_w > 1,3S_d$, rezultat može da bude da će pri zemljotresu konstrukcija preći u plastični mehanizam, ali pri kapacitetu nosivosti određenom na bazi uticaja vetra, linija 2 na slici 4.23.a. U ovom slučaju zemljotres nije merodavan za određivanje kapaciteta nosivosti, ali je potrebno da se detalji konstrukcije ipak obrade tako da se obezbedi izvestan kapacitet post-elastičnih deformacija. U slučaju kada je projektno opterećenje usled zemljotresa merodavno za određivanje kapaciteta nosivosti, stvar je jasna, slika 4.23.b. Zemljotres definitivno nije merodavan ni za određivanje nosivosti, niti za obezbeđenje kapaciteta post-elastičnih deformacija (duktilnosti) u slučaju kada je nivo elastičnog odgovora konstrukcije pri zemljotresu niži od opterećenja vetrom, $S_e < H_w$, slika 4.23.c, što je čest slučaj kod visokih i vitkih konstrukcija.

4.5 RAZLIČITI SLUČAJEVI KONSTRUKCIJA HALA

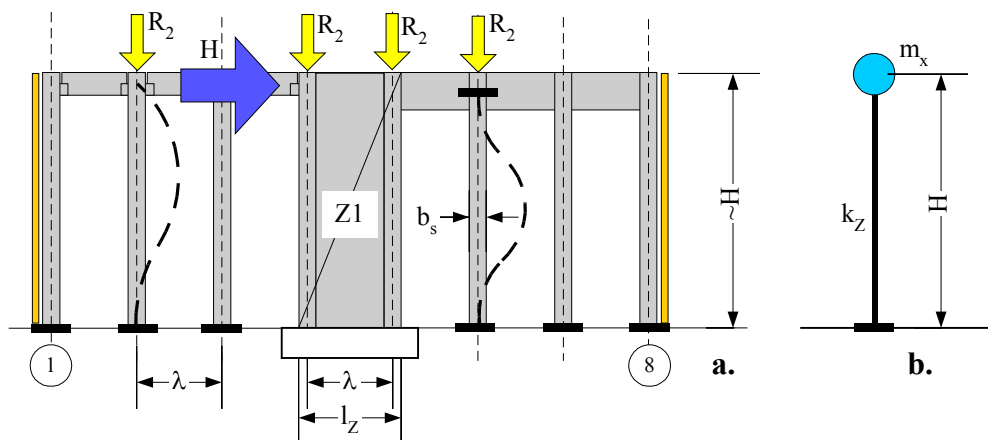
4.5.1 Jednobrajna hala sa AB zidovima za ukrućenje u podužnim okvirima



Slika 4.24 - Dispozicija-osnova hale

Često se u ravni podužnih okvira postavljaju spregovi za ukrućenje i prijem horizontalnih dejstava usled vetra, zemljotresa, sila kočenja kрана itd. Kada su u pitanju armiranobetonske konstrukcije, moguće je napraviti i rešetkasti spreg, kao u čeličnim konstrukcijama, ali je jednostavnije u nekom polju podužnog okvira postaviti konzolni AB zid, zid *Z1* na slikama 4.24-4.25. Stubovi hale se obično zadržavaju, zbog oslanjanja glavnih krovnih nosača *POS2*,

kao i potrebne krutosti poprečnih okvira u *Y*-pravcu. Ivični stubovi i zid debljine d_z izvode se monolitno, tako da u ravni podužnog okvira AB zid *Z1* radi kao simetrični *I*-presek.



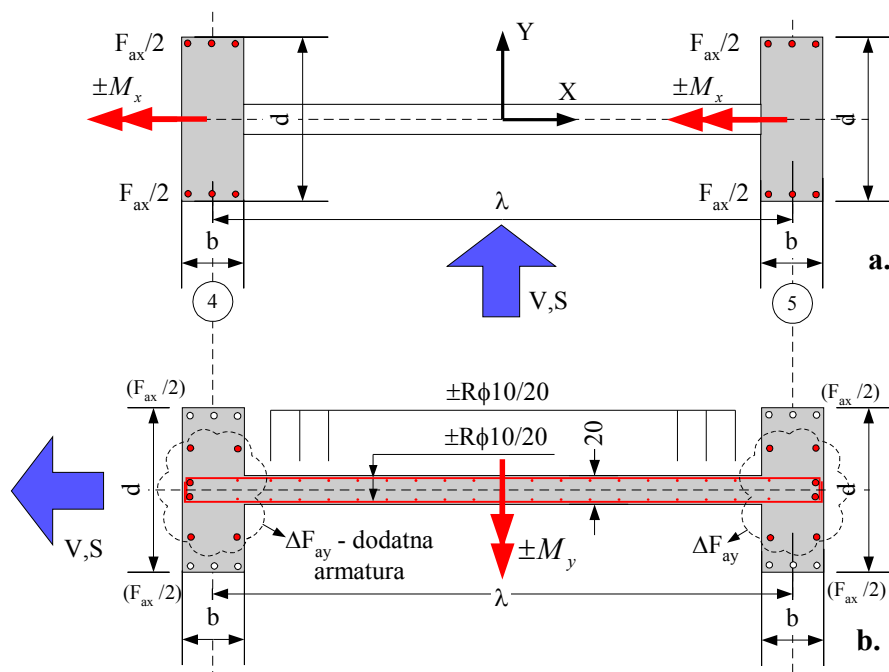
Slika 4.25 - Podužni okvir i dinamički model

Što se tiče analize uticaja vetra i zemljotresa u poprečnom *Y*-pravcu, sve je isto kao u prethodnom primeru, krutost hale obezbeđuje 16 konzolnih stubova, dok se krutost na savijanje rebra zida *Z1* debljine d_z oko slabije ose zanemaruje, kao da ga nema.

U ravni podužnih okvira, prisustvo zida-sprega bitno menja ponašanje i naprezanja stubova. Konzolni AB zid dužine l_z i visine H obično je znatno krući na pomeranja od zbirne krutosti stubova, tako da se može usvojiti da sva horizontalna opterećenja u ravni podužnog okvira prihvata konzolni AB zid *Z1*. Krutost 'beskonačno krute' grede u vrhu je dovoljna da vitak stub bude praktično uklješten u vrhu, ali ne i zid *Z1* koji se deformiše praktično kao konzola. Dinamički model je konzola sa jednom masom, sa krutošću na pomeranje k_z jednakoj krutosti samo konzolnog zida, slika 4.25.b. Za potrebe proračuna perioda oscilovanja, za računski presek mogu da se usvoje karakteristike *I*-preseka, a isto tako i karakteristike pravougaonog preseka d_z / l_z gde je 'visina' preseka $l_z = \lambda + b_s$. Zbog pojave prslina pri zemljotresu, efektivna krutost preseka pada, pa je aproksimacija samo pravougaonim delom preseka uobičajena u praksi. Prema tome, analiza efekata vetra i

zemljotresa u ravni podužnih okvira vrši se uz zanemarenje prisustva ostalih stubova u toj ravni. Pri određivanju aksijalnog opterećenja zida ZI , voditi računa da na jedan zid padaju dve reakcije R_2 glavnih nosača $POS2$, slika 4.25.a.

U ravni podužnih okvira, ostali stubovi prihvataju samo uticaje gravitacionih opterećenja. Stubovi su preko fasadnih greda vezani za vrh krutog zida, pa se može smatrati da su vrhovi stubova za uticaje gravitacionih opterećenja praktično *nepomerljivi* u ravni podužnog okvira. Vitkost stuba u ravni podužnih okvira zavisi i od ostvarene veze stuba i fasadne grede u vrhu, slika 4.25. Ako je veza zgلوبna, dužina izvijanja može da se usvoji u iznosu $0,7H$, a ako su stubovi u vrhu uklješteni u fasadnu gredu 'beskonačne krutosti', dužina izvijanja teorijski

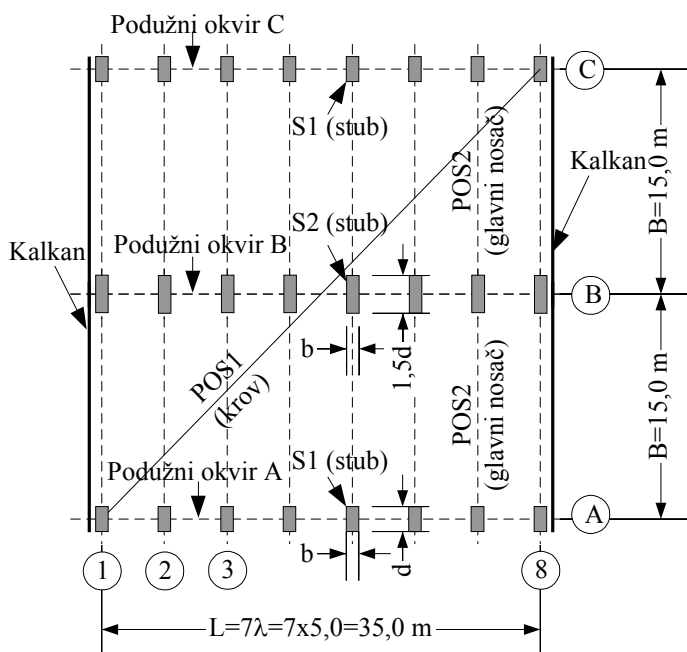


Slika 4.26 - Supepozicija potrebne armature za savijanje u dve ravni iznosi $0,5H$, ali se preporučuje da se usvoji $0,7H$, slika 4.25.

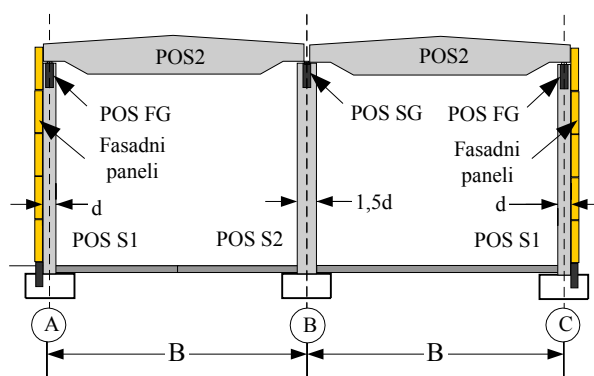
S obzirom da računski vetar ili zemljotres prema našim pravilnicima ne deluju istovremeno iz dva upravna pravca, ista armatura zida ZI prihvata uticaje iz dva pravca. Usled dejstva vetra ili zemljotresa u ravni poprečnog okvira, u Y -pravcu, potrebna armatura F_{ax} ivičnih stubova zida usvaja se i raspoređuje simetrično u okviru preseka stubova, slika 4.26.a. Za uticaje vetra i zemljotresa u ravni podužnih okvira, u X -pravcu, usvojena armatura F_{ax} je deo armature flanši I -preseka, i potrebno je samo sračunati dodatnu armaturu ΔF_{ay} , tako da ukupna armatura flanši $F_{ax} + \Delta F_{ay}$ bude jednaka sračunatoj za obezbeđenje nosivosti I -preseka, slika 4.26.b. Rebro zida debljine d_z i dužine l_z treba proveriti na dejstvo transverzalnih sila i armirati prema pravilima za armiranje AB zidova, Primer 3.

4.5.2 Dvobrodna hala sa stubovima

Dispozicija konstrukcije dvobrodne hale prikazana je na slikama 4.27 i 4.28.

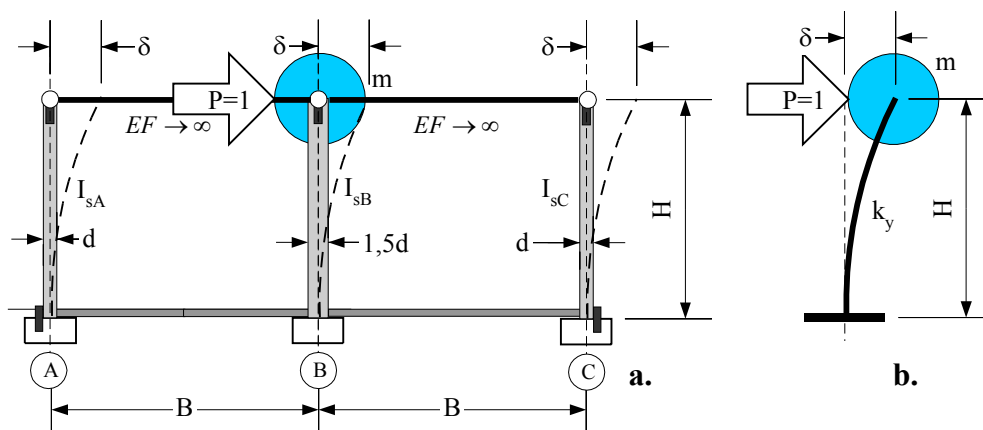


Slika 4.27 - Dispozicija dvobrodne hale, osnova



Slika 4.28 - Dispozicija dvobrodne hale, presek

Za konstrukciju glavnih nosača POS2 usvojene su dve montažne proste grede, mada su moguća rešenja i sa kontinualnim nosačem preko dva polja raspona B. Kao i u slučaju jednobrodne hale, stabilnost na horizontalne uticaje u poprečnom Y-pravcu obezbeđuje osam poprečnih okvira sa ukupno $3 \times 8 = 24$ stuba. U ovom primeru, dimenzije fasadnih stubova POS S1 u osama A i C iznose b/d , dok su za središnji red stubova POS S2 u osi B usvojene veće dimenzije $b/1,5d$, zbog većih aksijalnih opterećenja središnjih stubova, na primer. U ravni podužnih okvira postavljene su fasadne grede POS FG, odnosno središnje grede POS SG, koje, zajedno sa stubovima formiraju podužne okvire.



Slika 4.29 - Dinamički model u ravni poprečnog okvira

Kao i u slučaju jednobrodne hale, deo 4.2.1, vrednost perioda oscilovanja T_1 u poprečnom pravcu može da se odredi na osnovu poznate ukupne mase $m_y = m$ i ukupne, zbirne krutosti k_y konstrukcije na pomeranje u Y-pravcu. S obzirom da su svi stubovi (ukupno $n=24$ stuba)

istog, konzolnog sistema, to je pomeranje bilo kog stuba i , sa momentom inercije preseka $I_i = b_s d_s^3 / 12$ i visine H_i , usled delovanja jedinične sile u vrhu $P=1$, jednako

$$\delta_i = 1 \times H_i^3 / 3EI_i$$

Prethodni izraz definiše 'matricu fleksibilnosti', dok je krutost konzolnog stuba i na pomeranje jednaka

$$k_{iy} = 1 / \delta_i = 3EI_i / H_i^3$$

Krutost ukupne konstrukcije na pomeranje jednaka je sumi krutosti svih pojedinačnih stubova

$$k_y = \sum_{i=1}^{24} k_{iy}$$

pa je period oscilovanja u prvom tonu $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$, gde je m ukupna masa.

U opštem slučaju, pomeranje δ vrha konstrukcije konzolnih stubova sa ukupnom krutošću k_y usled dejstva jedinične sile $P=1$ u vrhu iznosi

$$\delta = 1 / k_y = \frac{1}{\sum_1^{24} k_{iy}} = \frac{1}{\sum_1^{24} \frac{3EI_i}{H_i^3}}$$

odnosno, $T_1 = 2\pi \sqrt{m\delta}$, gde je m ukupna masa.

Sa sračunatom vrednošću perioda oscilovanja T_1 određuje se vrednost koeficijenta dinamičnosti k_d , odnosno vrednost ukupnog seizmičkog opterećenja S_y .

Pri istim pomeranjima δ_y vrhova stubova, raspodela poznate horizontalne sile S_y na pojedine stubove vrši se srazmerno njihovim krutostima na pomeranje k_{iy} . Svaki stub i prima deo sile S_{iy}

$$S_{iy} = S_y k_{iy} / k_y$$

U slučaju stubova istog sistema-konzola, istih visina i istih poprečnih preseka, odnos krutosti na pomeranje se svodi na odnos momenata inercije poprečnih preseka, pa je

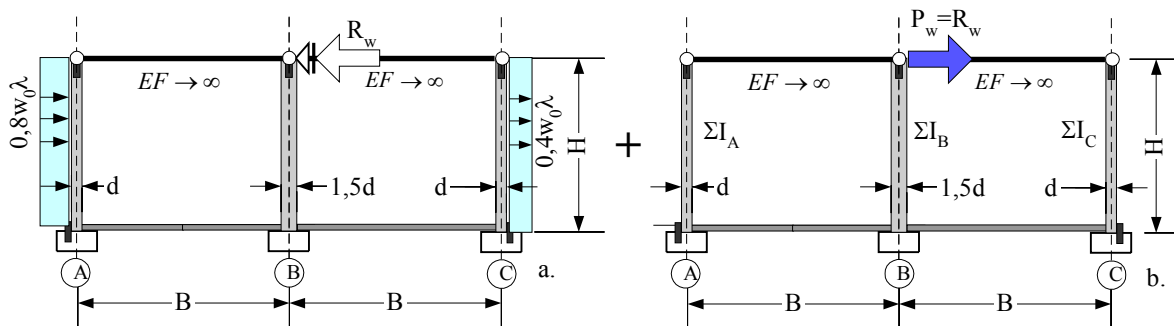
$$S_{iy} = S_y I_i / \sum_{i=1}^{24} I_i$$

Krući središnji stubovi u osi B prihvaćiće i veći deo horizontalnih opterećenja.

Prema Pravilniku Yu81, potrebno je proveriti i 'pomeranja' vrha konstrukcije pri zemljotresu, usled dejstva računске sile S_y :

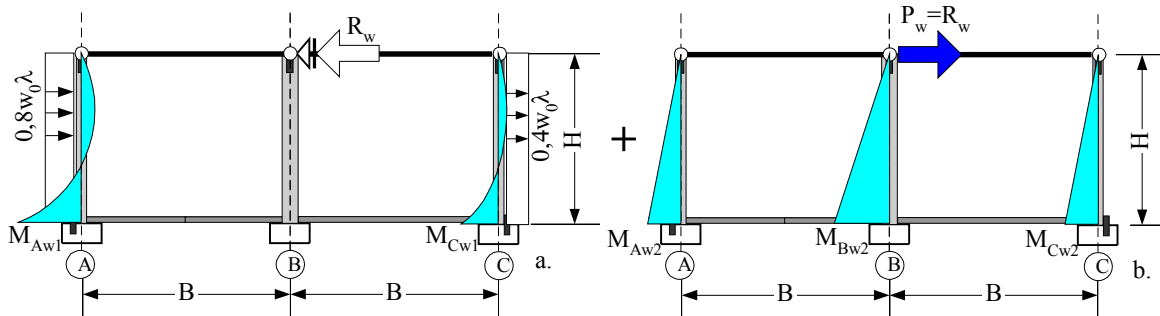
$$\delta_y = S_y \delta \leq H/600?$$

Potrebno je da su računска pomeranja vrha manja od $H/600$. Ukoliko je $\delta_y > H/600$, na ispitu ne treba korigovati proračun povećanjem krutosti elemenata, dovoljno je to konstatovati. U slučaju industrijskih hala, obično se dozvoljavaju veća pomeranja, zavisno od opreme i konstrukcije fasada.



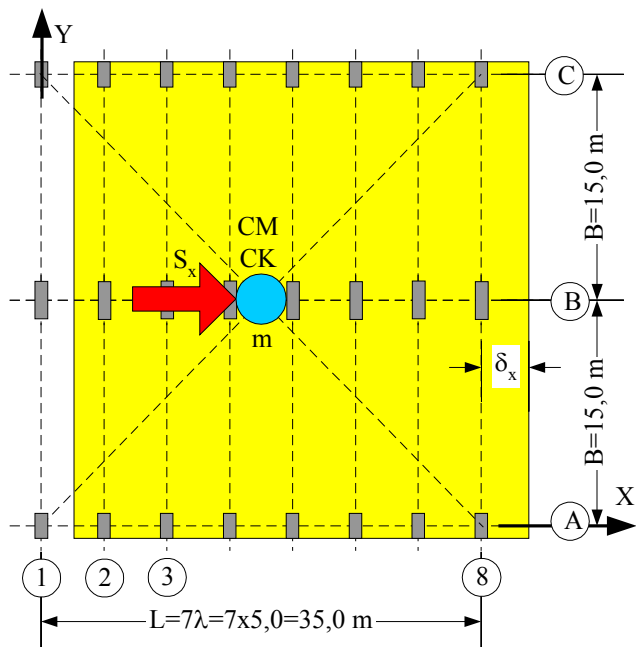
Slika 4.30 - Proračun uticaja vetra u ravni poprečnih okvira

U odnosu na slučaj jednobrodne hale, proračun uticaja vetra u ravni poprečnih okvira je principijelno isti, slika 4.30. Razlika je samo u tome što u krutost sistema treba uključiti i središnje stubove u osi B, koji nisu izloženi direktnim uticajima vetra.



Slika 4.31 - Komponente uticaja vetra na stubove poprečnog okvira

Fasadni stubovi u osama A i C primaju direktne uticaje vetra, slika 4.31.a, dok svi stubovi, pa i središnji stubovi u osi B primaju deo uticaja vetra usled pomeranja konstrukcije krova pri vetru, slika 4.31.b.



Slika 4.32 - Analiza uticaja u podužnom X-pravcu

Što se tiče analize uticaja vetra i zemljotresa u podužnom X-pravcu, postupak je isti kao i za jednobrodnu konstrukciju hale, deo 4.2.2, samo što u analizu treba uključiti još jedan podužni okvir, središnji okvir u osi B, slika 4.32. Zbog potpune simetrije, centar mase i centar krutosti se poklapaju u oba pravca, tako da prema Yu81 ne treba analizirati efekte rotacije odnosno torzije hale u osnovi.

Na ispitu je najjednostavnije pretpostaviti da su sva tri podužna okvira konstruisana na isti način, sa krutim vezama stubova POS S2 i središnjih greda POS SG, na primer, slika 4.33a-c. U tom slučaju konturni uslovi krajeva svih stubova su isti, pa je i definicija krutosti na pomeranje k_{ix} pojedinačnih stubova i ista

$$k_{ix} = 1 / \delta_i = 12EI_i / H_i^3$$

Ukupna krutost na pomeranje nekog podužnog okvira jednaka je sumi krutosti svih pojedinačnih stubova koji pripadaju razmatranom okviru

$$k_{Ax} = \sum_{i=1}^8 k_{iAx}$$

$$k_{Bx} = \sum_{i=1}^8 k_{iBx}$$

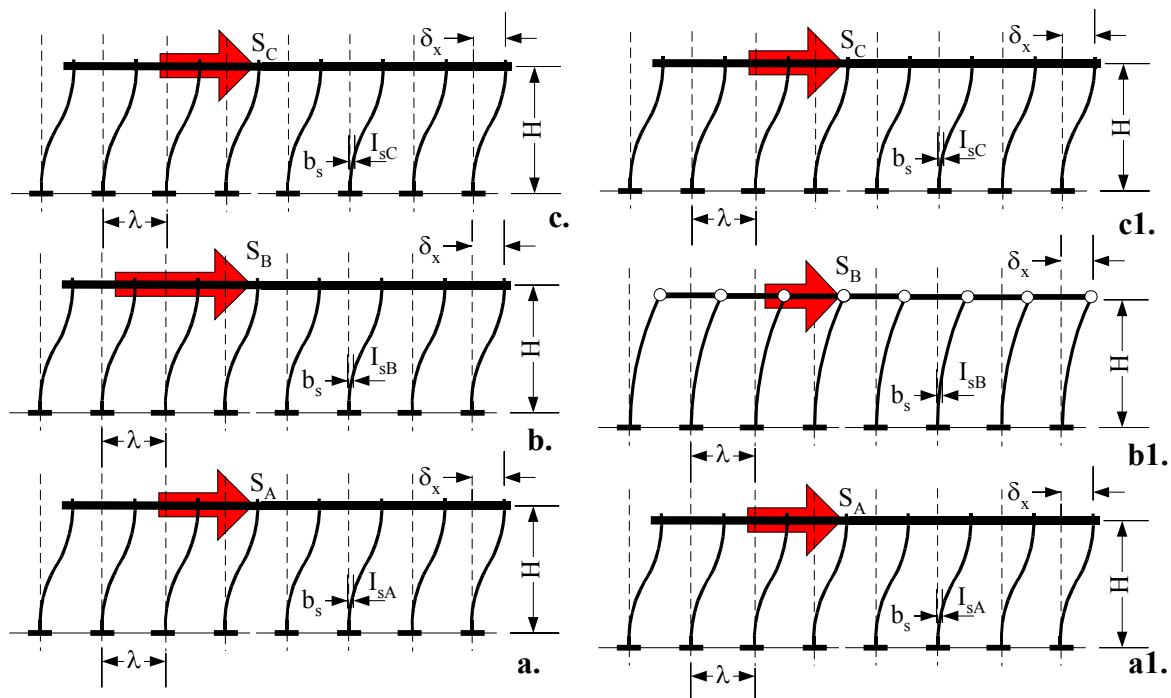
$$k_{Cx} = \sum_{i=1}^8 k_{iCx}$$

gde je k_{Ax} , k_{Bx} , k_{Cx} - zbirna krutost okvira u osama A , B i C , a k_{iAx} , k_{iBx} , k_{iCx} - krutost pojedinačnih stubova u osam A , B i C . Ukupna krutost sva tri okvira u podužnom X -pravcu jednaka je zbiru krutosti pojedinih okvira

$$k_x = k_{Ax} + k_{Bx} + k_{Cx}$$

odnosno, jednaka je zbirnoj krutosti svih pojedinačnih stubova

$$k_x = \sum_{i=1}^{24} k_{ix} = \sum_{i=1}^{24} \frac{12EI_i}{H_i^3}$$



Slika 4.33 - Različita rešenja podužnih okvira: a., a1 - okviri u osi A ; b., b1 - okviri u osi B , c., c1 - okviri u osi C

U slučaju da su fasadni stubovi u osama A i C uklješteni u fasadne grede, a da su središnji stubovi POS S2 u osi B zglobno vezani za montažne središnje grede POS SG, krutost fasadnih i središnjih stubova se razlikuje, o čemu treba voditi računa, slika 4.33.a1-c1. Zbirna krutost svih podužnih okvira tada iznosi

$$k_x = \sum_{i=1}^{24} k_{ix} = \sum_{i=1}^{16} \frac{12EI_i}{H_i^3} + \sum_{i=1}^8 \frac{3EI_i}{H_i^3}$$

gde se prva suma odnosi na 16 fasadnih, obostrano uklještenih stubova, dok se druga suma odnosi na 8 središnjih stubova, zglobno vezanih u vrhu.

Problem određivanja efekata drugoga reda pri dejstvu vetra je u ovom slučaju malo složeniji nego u primeru jednobrodne hale. U slučaju jednobrodne hale, svi su stubovi imali isti presek i iste konturne uslove u vrhu. U tom slučaju dovoljno je tačno pretpostaviti da se svaki pojedinačni stub 'izvija' sa svojom aksijalnom silom, pa se analiza vrši za razmatrani izolovani stub. Ako se krutost pojedinih stubova razlikuje, kao u ovom slučaju dvobrodne hale, i/ili konturni uslovi krajeva svih stubova nisu isti, kao na slici 4.33.a1-c1, za ocenu efekata drugoga reda pri dejstvu vetra korektnije je primeniti stavove BAB-a u vezi 'prosečne vitkosti stubova istog sprata pomerljivog okvira', knjiga 2, strana 210 /2/. Za prosečnu 'vitkost sprata', u ovom slučaju prizemne hale može da se usvoji vrednost

$$\lambda_i = \sqrt{12\delta_1 A_s / H}$$

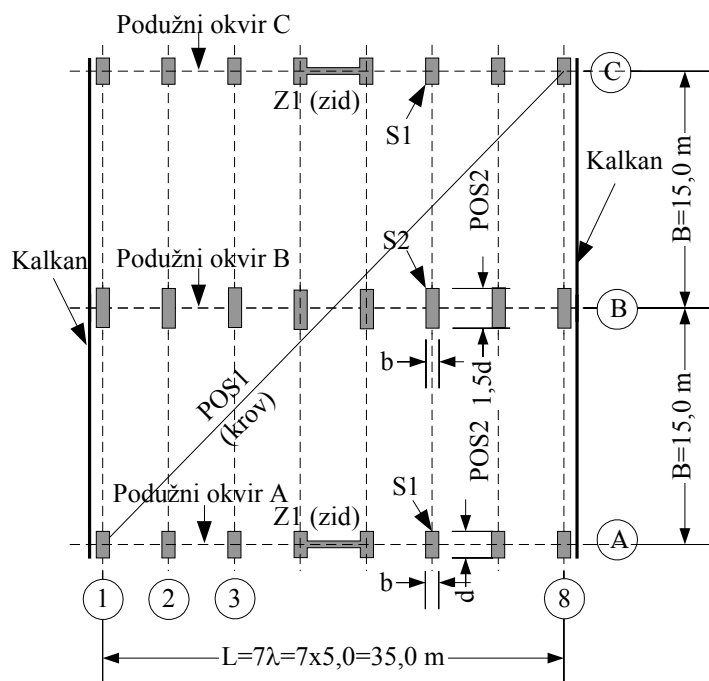
gde su: λ_i - prosečna vitkost stubova hale, jednaka za sve stubove; δ_l - pomeranje krova u razmatranom pravcu usled dejstva jedinične sile $H=1$ koja deluje u ravni krova, sračunato za

vrednost modula elastičnosti betona $E_b=1$; A_s - ukupna površina svih stubova hale, ukupno 24 stuba u ovom primeru; H - visina stubova, jednaka za sve stubove. Pomeranje δ usled jedinične sile, ali za punu vrednost modula elastičnosti betona sračunato je ranije, pa je

$$\delta_1 = 1/k_y (E_b = 1) = \frac{1}{\sum_1^{24} k_{iy} (E_b = 1)} = \frac{1}{\sum_1^{24} \frac{3I_i}{H_i^3}} = E_b \delta$$

Stubovi manje krutosti podložniji su 'izvijanju', pa ih krući stubovi donekle pridržavaju, što sve otežava ocenu vitkosti *pojedinačnog izolovanog stuba*, što se prevazilazi primenom prosečne vitkosti svih stubova. Na ispitu se, kao približno rešenje prihvata da se analizira pojedinačni stub sa svojim aksijalnim opterećenjem i imperfekcijom, ali se više ceni i nagrađuje primena postupka *prosečne vitkosti sprata*, koja je predmet ranijih kurseva betonskih konstrukcija.

4.5.3 Dvobrodna hala sa AB zidovima za ukrućenje u fasadnim podužnim okvirima



Slika 4.34 - Dispozicija dvobrodne hale sa zidovima za ukrućenje

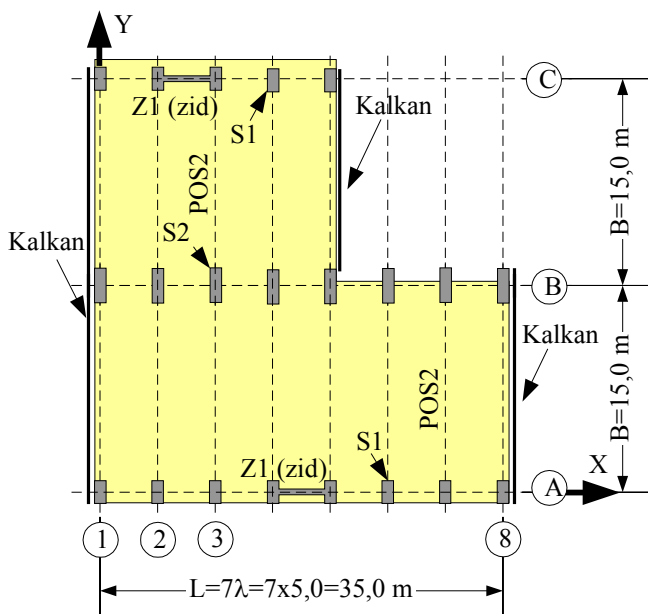
ovom primeru (preporuka i za ispit), za osnovni noseći sistem u podužnom X -pravcu usvojeni su samo zidovi $Z1$, i dimenzionisani kao da će sami morati da prime sva opterećenja. Zbog prisustva znatnog broja stubova, realna nosivost i krutost konstrukcije su veći, videti i analizu u Primeru 3, deo 3.13.3.

Ovaj slučaj trebalo bi da je jasan na osnovu svega do sada iznetog. Podsetimo, osnovna pretpostavka analize je da je konstrukcija krova kruta u svojoj ravni, pa se raspodela horizontalnih opterećenja vrši srazmerno krutostima pojedinih elemenata-stubova.

Kao i ranije, može da se pretpostavi da sve uticaje u podužnom X -pravcu primaju samo dva AB zida $POS Z1$, dok uticaje u poprečnom Y -pravcu primaju ukupno 24 stuba, slika 4.34.

Komentar: Krutost zida znatno je veća od krutosti jednoga stuba, ali sa povećanjem broja stubova njihova ukupna krutost uopšte ne mora da bude zanemarljiva, niti mala u odnosu na zidove. Za vežbu, proveriti ovaj primer. U

4.5.4 Nesimetrična dvobrodna hala sa zidovima u fasadnim podužnim okvirima



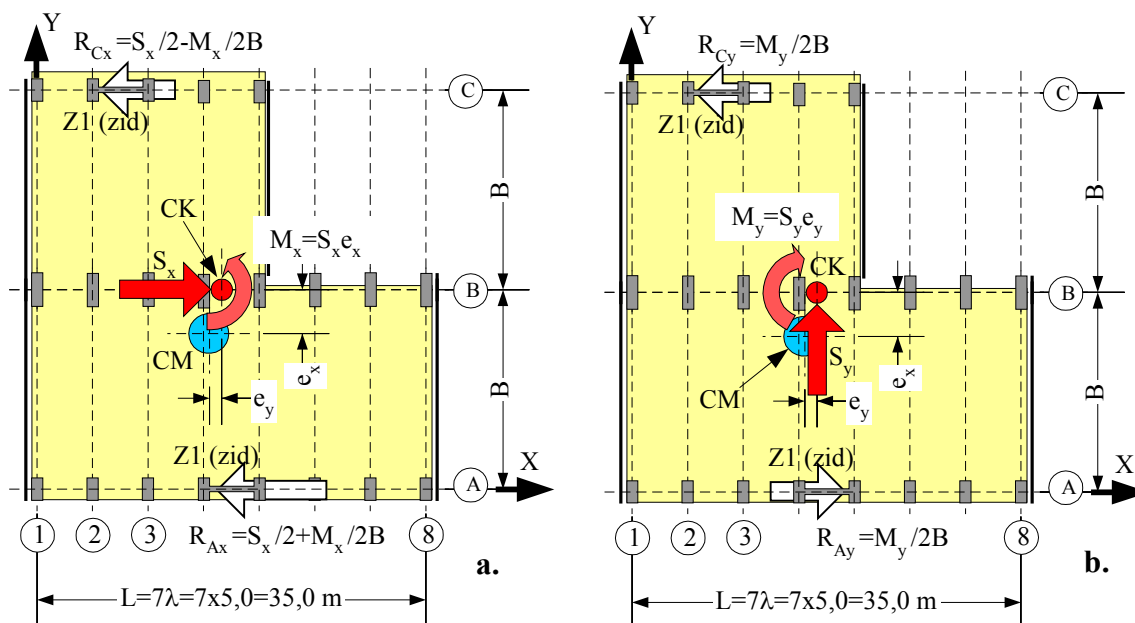
Slika 4.35 - Dispozicija nesimetrične hale u osnovi

U slučaju nesimetričnih konstrukcija hala u osnovi, po pravilu se ne poklapaju centar masa i centar krutosti, pa je potrebno na neki način uvesti u analizu i rotaciju odnosno torziju hale u osnovi, primer na slici 4.35. Ukoliko bi hala imala samo stubove, bez dodatnih vertikalnih spregova-AB zidova Z1, tada bi stubovi prihvatili sve uticaje, usled translacije kao i usled rotacije krova, što za posledicu ima *koso savijanje stubova*. Rešenje je moguće, ali ne i na ispitu, mada se uz pomoć dijagrama interakcije /3/ i dimenzionisanje na koso savijanje može savladati.

Zadržavajući pretpostavku da u slučaju zajedničkog pomeranja krutih AB zidova i stubova praktično sve uticaje prihvataju kruti zidovi kao osnovni sistem, problem se može pojednostaviti, i uraditi na ispitu, slika 4.35 i 4.36. Centar krutosti CK određuje se na osnovu krutosti dva zida u podu-

žnom X-pravcu, i krutosti dvadeset stubova u poprečnom Y-pravcu.

Pri dejstvu zemljotresa u podužnom X-pravcu, redukcijom inercijalne sile sa centra masa CM na centar krutosti CK, kao rezultujuće dejstvo dobija se seizmička sila S_x i moment torzije $M_x = S_x e_x$, gde je e_x ekscentricitet u X-pravcu centra mase u odnosu na centar krutosti, slika 4.36.a. Uz pretpostavku da se sila S_x raspodeljuje samo na dva zida Z1 u osama A i C, uticaji u zidovima usled translacije krova iznose $S_x/2$. Moment torzije u osnovi mogu da prime i okviri, kao niz spregova sila naspramnih okvira, ali je u ovom primeru dosledno usvojeno da



Slika 4.36 - Koncept prijema uticaja zemljotresa u podužnom X, i poprečnom Y-pravcu

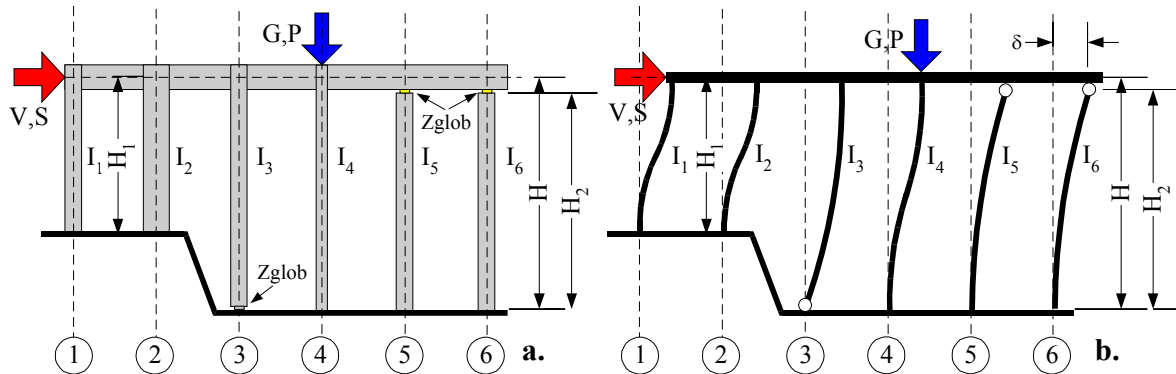
moment torzije M_x primaju samo zidovi ZI kao najkrući elementi. U tom slučaju, opterećenje zidova usled torzije iznosi $M_x / 2B$. Ukupni uticaji u zidovima su zbir uticaja translacije i torzije, slika 4.36.a.

Pri dejstvu zemljotresa u poprečnom Y -pravcu, može da se usvoji da komponentu translacije S_y prihvata 21 stub kao da je hala simetrična, a da moment torzije $M_y = S_y \times e_y$ opet prihvataju zidovi ZI , slika 4.36.b.

Analogno se rešava i problem prijema vetra, samo što rezultanta vetra ne prolazi kroz centar mase, pa su i odgovarajući ekscentriciteti rezultante vetra u krovu u odnosu na centar krutosti različiti.

4.5.5 Opšti slučaj jednog nepravilnog okvira

U opštem slučaju, stubovi okvira mogu da imaju različite poprečne preseke odnosno momente inercije, različite visine kao i različite konturne uslove na krajevima-na vezama sa temeljima odnosno fasadnim gredama, slika 4.37.



Slika 4.37 - Dispozicija jednog nepravilnog okvira

Mada je to već prikazano kroz prethodne primere, ovde se daje pregled-rezime postupka analize okvira na dejstva horizontalnih sila usled vetra (V) odnosno zemljotresa (S). Pretpostavlja se da je gornja fasadna greda 'beskonačne krutosti' na savijanje.

Krutost pojedinih stubova na pomeranje prema slici 4.37.b iznosi:

$$k_1 = \frac{12EI_1}{H_1^3} \quad k_2 = \frac{12EI_2}{H_1^3} \quad k_3 = \frac{3EI_3}{H^3} \quad k_4 = \frac{12EI_4}{H^3} \quad k_5 = \frac{3EI_5}{H_2^3} \quad k_6 = \frac{3EI_6}{H_2^3}$$

Za visinu stubova 1-4 usvojeno je rastojanje do težišne linije fasadne grede, a za stubove 5-6 je usvojena realna visina stuba do zgloba u vrhu. Sasvim je prihvatljivo da se za sve stubove usvoji rastojanje do težišne linije fasadne grede.

Ukupna krutost okvira k na pomeranje jednaka je sumi parcijalnih krutosti pojedinih stubova

$$k = \sum_{i=1}^6 k_i$$

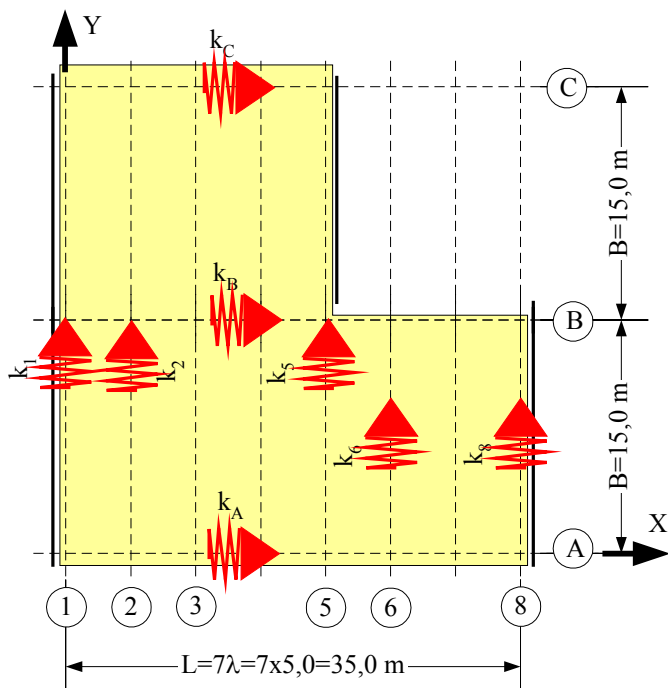
Sa poznatom krutošću i masom, moguće je odrediti period oscilovanja, vrednost koeficijenta dinamičnosti k_d kao i seizmičkog opterećenja S . Pri jednakim pomeranjima vrhova stubova za iznos δ , raspodela poznate sile vetra V odnosno zemljotresa S po pojedinim stubovima vrši se srazmerno krutostima na pomeranje

$$S_i = S \times k_i / k$$

Za proračun efekata drugoga reda pri dejstvu vetra više ne pomaže ni postupak 'prosečne vitkosti stubova istoga sprata', razlikuju se visine kao i konturni uslovi stubova. Problem se može rešiti primenom 'približnog P-Δ postupka' za analizu pomerljivih okvira, videti BAB, knjiga 2, strana 243 /2/.

4.5.6 Okviri kao osnovni elementi konstrukcije

U slučaju nepravilnih osnova, često je preglednije i jasnije da se kao *osnovni element konstrukcije* hale usvoji kompletan okvir stubova i greda u istoj ravni. Takav koncept koriste i tradicionalni softveri kao što je 'TABS', na primer.



Slika 4.38 - Koncentrisane opruge kao zamena za okvire

Konfiguracija stubova jednog okvira može da bude proizvoljna, kao na slici 4.37. Jedini uslov je da su vrhovi stubova vezani za krutu konstrukciju krova na istoj koti - da krov leži u jednoj horizontalnoj ravni. Za svaki od 11 okvira 1-8, A-C prema slici 4.38, na prethodno prikazani način može da se odredi *krutost okvira 'i' na pomeranje k_i* (kN/m) u njegovoj ravni. Sa poznatim pojedinačnim krutostima, okviri mogu da se izbace i da se zamene sa po jednom *elastičnom oprugom* u ravni krova, čija je krutost jednaka krutosti okvira k_i , slika 4.28. Za položaj opruge bitno je da se nalazi u ravni odgovarajućeg okvira, u bilo kojoj tački na datom pravcu. Prema slici 4.38, ukupna krutost opruga u X-pravcu iznosi

$$k_x = k_A + k_B + k_C$$

dok je ukupna krutost opruga u Y-

pravcu

$$k_y = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8$$

Položaj centra krutosti definisan je uobičajenim izrazima

$$x_{CK} = \frac{\sum k_{yi} x_i}{\sum k_{yi}} = \frac{\sum k_{yi} x_i}{k_y}$$

$$y_{CK} = \frac{\sum k_{xi} y_i}{\sum k_{xi}} = \frac{\sum k_{xi} y_i}{k_x}$$

Sa poznatim pojedinačnim krutostima opruga, kao i ukupnim krutostima u X/Y pravcu, dalja analiza je u svemu analogna analizi prikazanoj u Primeru 3, kao da je svaka od opruga prizemni AB zid odgovarajuće krutosti. Rezultat analize je naprezanje pojedinih opruga - okvira. Raspodela naprezanja okvira na pojedine stubove okvira vrši se na već prikazani način, prema krutostima pojedinih stubova.

5 Ilustracije ponašanja okvira pri zemljotresu

Primer oštećenja jedne montažne hale u izgradnji prikazan je na slici 4.39. Uočljivo je krivljenje stubova, razvoj oštećenja - plastičnih zglobova u dnu stubova, kao i oštećenja veza stubova i rigli-nosača krova.



Slika 4.39 - Oštećenja hale u izgradnji (Turska 1999.)



Slika 4.40 - Oštećenje veze stuba i grede

Za montažne konstrukcije hala tipično je oštećenje veze stubova i glavnih krovnih nosača, slika 4.40, često i veza rožnjača i glavnih krovnih nosača. U ekstremnom slučaju može da dođe do kidanja veza i pada horizontalnih elemenata konstrukcije, slika 4.41.



Slika 4.41 - Pad horizontalnih konstrukcija zbog kidanja veza sa okvirima (SAD 1994.)



Slika 4.42 - Detalj povijenog fasadnog okvira nakon pada tavanica (SAD 1994.)

Na slici 4.42 prikazan je detalj fasadnog okvira označenog strelicom na slici 4.41. Nakon kidanja veza i propadanja tavanica, prvobitno vertikalni fasadni okvir se dramatično povio ka unutrašnjosti objekta. Na stubovima prizemlja uočljive su naglašene prsline-pukotine, ali konstrukcija deluje 'žilavo', mada je neupotrebljiva. Zahtev da tavanice budu krute nije samo radi 'elegantne' analize, krute tavanice koje pouzdano povezuju sve vertikalne noseće elemente su osnovni preduslov pouzdanog ponašanja konstrukcija pri zemljotresu.

