OSNOVE PRORAČUNA I DJELOVANJA NA KONSTRUKCIJE

SADRŽAJ

1 OSNOVE PRORAČUNA KONSTRUKCIJA 2
2 DJELOVANJA NA KONSTRUKCIJE 6
2.1 Klasifikacija djelovanja 7
2.2 Vlastita težina 8
2.3 Uporabna opterećenja zgrada 10
2.4 Opterećenje snijegom 11
2.5 Opterećenje vjetrom 16
2.6 Toplinska djelovanja 21
2.7 Potresno djelovanje 25
2.7.1 Osnovni pojmovi 25
2.7.2 Proračun seizmičkih sila 26
3 KOMBINACIJE OPTEREĆENJA 31
4 LITERATURA 34

Zagreb, 2007

1 OSNOVE PRORAČUNA KONSTRUKCIJA

Konstrukcija mora biti planirana, projektirana i izvedena na način da tijekom predviđenog vijeka trajanja uz zadovoljavajući stupanj pouzdanosti i na ekonomičan način:

- ostane uporabiva za predviđenu namjenu
- bude u stanju podnijeti sva predvidiva djelovanja i učinke tijekom izvedbe i uporabe

Proračun i izvedba konstrukcije moraju biti takvi da se ona ne može oštetiti zbog požara, eksplozije, udara ili ljudske greške nerazmjerno uzroku (mora se ostvarivati razmjernost uzroka i posljedice).

Proračunske situacije opisuju okolnosti u kojima konstrukcija ispunjava svoju ulogu a moraju biti dovoljno zahtjevne i tako varirane da obuhvate sve uvjete koji se mogu očekivati tijekom izvedbe i uporabe konstrukcije. Proračunske situacije dijele se na:

- Stalne situacije – svi uvjeti uobičajene uporabe
- Prolazne situacije – povremeni uvjeti, npr. tijekom izvedbe ili popravka
- Izvanredne situacije – iznimni uvjeti ili požar, eksplozija, udar
- Seizmičke situacije – potres

Proračunski uporabni vijek je pretpostavljeno razdoblje korištenja konstrukcije uz održavanje, ali bez velikih popravaka. Podjela prema proračunskom uporabnom vijeku:

Klasa	Uporabni vijek	Primjer
1	10 g	Privremene konstrukcije
2	10-25 g	Zamjenjivi dijelovi konstrukcije
3	15-30 g	Poljoprivredne i slične konstrukcije
4	50 g	Konstrukcije zgrada
5	100 g	Spomeničke konstrukcije, inženjerske konstrukcije, mostovi

Tablica 1.1

Trajnost konstrukcije je njena sposobnost da tijekom svog proračunskoga uporabnog vijeka ostane sposobna za uporabu uz odgovarajuće održavanje. Treba biti projektirana ili zaštićena tako da se u periodu između uzastopnih pregleda značajno ne pogorša njena uporabljivost. U proračunu treba predvidjeti pristup kritičnim dijelovima za pregled izbjegavajući zahtjevna rasklapanja ili onesposobljavanja konstrukcije.

Sigurnost neke nosive konstrukcije protiv otkazivanja nosivosti općenito je uvjetovana time da njena otpornost **R** bude veća od ekstremnog djelovanja **S**, koje će na nju djelovati u vijeku njenog trajanja. Kriterij za određivanje sigurnosti nosive konstrukcije može se iskazati na sljedeći način:

$$\mathbf{R>S} \qquad (1.1)$$

Zona sigurnosti ili veličina stanja nosivosti definirana je kao razlika između otpornosti i djelovanja na konstrukciju:

$$\mathbf{Z=R-S} \qquad (1.2)$$

U pristupima sigurnosti građevina razlikujemo dva osnovna pristupa: determinističko i probabilističko poimanje sigurnosti.

Deterministično poimanje sigurnosti koristilo se u prvim metodama proračuna (metoda dopuštenih napona). Pretpostavlja sigurnu konstrukciju, kada su naprezanja od vanjskog opterećenja manja od propisanih dopuštenih naprezanja. Dopuštena naprezanja vezana su s faktorom sigurnosti uz određene granične veličine (npr. granica popuštanja, čvrstoća).

Međutim i veličina otpornosti (**R**) i veličina djelovanja na konstrukciju (**S**) su i same funkcije nekih drugih veličina tzv. baznih varijabli:

R=R(fc,fy, E, I, W, A...)

S=S(g, q, w, s...)

U deterministočkom postupku sve ove veličine tretiramo kao određene (determinirane) vrijednosti, koje su nam dane propisima, a u probabilističkom pristupu se sve veličine baznih varijabli tretiraju kao slučajne veličine.

Probabilističko poimanje sigurnosti temelji se na pretpostavci da ne postoji potpuno sigurna konstrukcija. Svaka konstrukcija odnosno element konstrukcije ima neku vjerojatnost otkazivanja nosivosti. Za proračun je potrebno sve varijable statistički obraditi i koristiti ih u obliku funkcija određene raspodijele vjerojatnosti. U probabilističkom pristupu dokaz sigurnosti, obzirom na parametre kojima se ulazi u proračun, danas se može provesti na četiri nivoa:

- dokaz sigurnosti na razini IV. Dokaz sigurnosti na ovoj razini podrazumijeva proračun konstrukcija s određenom funkcijom cilja, koja srednje vrijednosti troškova svodi na najmanju moguću mjeru, uzimajući u obzir i moguće štete uslijed otkazivanja nosivosti konstrukcije. Primjena metoda proračuna na ovoj razini, danas se koristi samo kao pomoćno sredstvo u istraživanjima.
- dokaz sigurnosti na razini III. To je najviša razina u kojoj se dokaz dostatne nosivosti zasniva na primjeni teorije vjerojatnosti i to tako da se u proračun uključuju stvarne funkcije distribucije svih slučajnih veličina i zatim preko višestruke integracije provjerava koja je vjerojatnost otkazivanja nosivosti postignuta.
- dokaz sigurnosti na razini II. Metoda drugog momenta i prvog reda. To je simplificirani postupak, koji omogućava izbjegavanje višestruke integracije. Sastoji se u tome da se od statističkih podataka slučajnih veličina, koje ulaze u jednadžbe graničnog stanja, izračunavaju samo srednja vrijednost i standardna devijacija (to je metoda drugog momenta). Za samu raspodjelu usvoje se već poznate, po mogućnosti jednostavne zakonitosti (najčešće lognormalna). Linearizacijom izraza za jednadžbu graničnog stanja (metoda I reda) izračuna se indeks sigurnosti. Indeks sigurnosti je zapravo inverzna funkcija vjerojatnosti otkazivanja nosivosti, ali u ovoj metodi nivo-a II njega se usvaja kao mjeru za stupanj sigurnosti. Indeks sigurnosti definiran je izrazom: $\beta = \frac{m_z}{\sigma_z}$
- dokaz sigurnosti na razini I. Semiprobabilistički pristup. To je formalno deterministička metoda u postupku identično s dosadašnjim dokazom nosivosti pomoću graničnih stanja. Jedino se unaprijed determinirani parametri u jednadžbama graničnog stanja utvrđuju probabilističkom i statističkom metodom. $S_d < R_d$

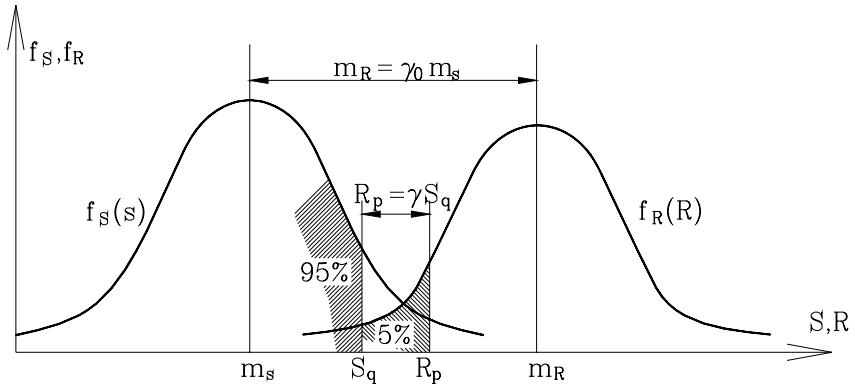
U postupcima razine II koristi se parametar koji daje alternativnu mjeru stupnja sigurnosti, tzv. indeks pouzdanosti β, koji je povezan s vjerojatnošću otkazivanja nosivosti p_f preko izraza $p_f=\Phi(-\beta)$, gdje je Φ funkcija normalne raspodjele.

p_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
β	1.28	2.32	3.09	3.72	4.27	4.75	5.20	5.62	5.99

Tablica 1.2 Odnos indeksa pouzdanosti β i vjerojatnosti otkazivanja nosivosti p_f.

U **semiprobabilističkom** pristupu sigurnosti pojedine dominantne veličine statistički se obrađuju i determiniraju, a dalje se postupa kao u deterministčkom konceptu.

Ako sada S i R predstavimo kao funkcije djelovanja i funkcije otpornosti konstrukcije, s funkcijama raspodijele f_s i f_R, onda su S_q i R_p karakteristične vrijednosti funkcije djelovanja i otpornosti konstrukcije, a m_S i m_R srednje vrijednosti funkcije djelovanja i funkcije otpornosti. Za vrijednosti djelovanja uzimamo 95% fraktilu, odnosno vrijednost djelovanja će u 95% slučajeva biti manja od S_q, a za vrijednost otpornosti uzimamo 5% fraktilu odnosno vrijednosti otpornosti će samo u 5% slučajeva biti manje od R_p.



Slika 1.1 Probabilistički pristup sigurnosti

Sigurnost je ovdje definirana globalnim koeficijentom sigurnosti $\gamma_0=m_R/m_S$. Ali uzevši u obzir fraktile 95% i 5%, odnosno karakteristične vrijednosti djelovanja i otpornosti vrijedi globalni faktor sigurnosti $\gamma=R_p/S_q$. Veličine R_p i S_q se mogu smatrati deterministčkim vrijednostima u semiprobabilističkom poimanju sigurnosti.

Granična stanja su stanja izvan kojih konstrukcija više ne zadovoljava projektom predviđene zahtjeve. Razlikuju se:

- granična stanja nosivosti – GSN (eng. ULS) i
- granična stanja uporabljivosti – GSU (eng. SLS).

Metoda dopuštenih naprezanja:

$$S \le \frac{R}{\gamma} \tag{1.3}$$

Gdje je S-vanjski utjecaj, a R- otpornost. Dosadašnja metoda graničnih stanja prebacila je koeficijent sigurnosti na drugu stranu ove nejednadžbe.

$$\gamma \cdot S \le R \tag{1.4}$$

Globalni koeficijent sigurnosti u novom propisu rastavlja se na parcijalne koeficijente sigurnosti za djelovanja γ_S i parcijalne koeficijente sigurnosti za otpornost γ_R:

$$\gamma = \gamma_R \cdot \gamma_S \tag{1.5}$$

$$\gamma_R \cdot \gamma_S \cdot S \le R \qquad (1.6)$$

Konstrukcija je sigurna ako vrijedi:

$$\gamma_S \cdot S \le \frac{R}{\gamma_R} \qquad (1.7)$$

Osnove novog postupka proračuna konstrukcija sadržane su u europskoj normi EN 1990, glavnom eurokodu u sklopu usklađene grupe europskih normi za projektiranje konstrukcija -Structural Eurocodes.

Metoda graničnih stanja je semiprobabilistička metoda u kojoj se po zakonima vjerojatnosti određuju reprezentativne vrijednosti za djelovanje i karakteristične vrijednosti za otpornost materijala. Tim se vrijednostima pridružuju parcijalni koeficijenti sigurnosti pa se dobivaju računske vrijednosti. Metoda je slična deterministočkoj metodi s tom razlikom da se pojedine veličine određuju probabilističkim postupcima.

GSN (ULS) – granična stanja nosivosti – stanja koja mogu izazvati rušenje konstrukcije (stanja netom prije rušenja konstrukcije) ili dovode konstrukciju u stanje mehanizma. Tu spadaju:

- gubitak ravnoteže konstrukcije ili njezina elementa promatranih kao kruto tijelo
- granično stanje sloma ili prekomjerne deformacije kritičnog presjeka
- gubitak ravnoteže zbog velikog deformiranja(teorija II. reda)
- granično stanje sloma uzrokovano zamorom
- transformacija konstrukcije u mehanizam

Granično stanje sloma:

$$S_d \le R_d \qquad (1.8)$$

S_d - proračunska vrijednost djelovanja
R_d - proračunska vrijednost nosivosti (svojstva materijala)

Granično stanje statičke ravnoteže ili velikih pomaka konstrukcije:

$$E_{d,dst} \le E_{d,stb} \qquad (1.9)$$

$E_{d,dst}$ - proračunska vrijednost destabilizirajućeg djelovanja
$E_{d,stb}$ - proračunska vrijednost stabilizirajućeg djelovanja

GSU (SLS) – granična stanja uporabljivosti – podređena su mjerodavnim kriterijima za normalnu upotrebu:

- granično stanje naprezanja
- granično stanje trajnosti (ograničenje širina pukotina)
- granično stanje deformiranja (ograničenje progiba)
- granično stanje vibracija

Granično stanje uporabljivosti:

$$E_d \le C_d \qquad (1.10)$$

E_d - proračunska vrijednost djelovanja
C_d - granična računska vrijednost bitnog kriterija uporabljivosti (deformacija, vibracija, naprezanje)

2 DJELOVANJA NA KONSTRUKCIJE

U sklopu europske norme EN 1991 nalaze se dijelovi koji opisuju pojedina djelovanja na konstrukcije kao vlastitu težinu, požar, snijeg, vjetar, temperaturu, djelovanja za vrijeme izvođenja, udar, eksplozije, pritisak zemlje i vode, led, valovi. Norma EN 1991 – 2 – odnosi se u potpunosti na mostove opisujući prometna djelovanja na mostove.

Hrvatska prednorma HRN ENV 1991 - *djelovanje:*

- HRN ENV 1991 – 2 – 1 – Vlastita težina i uporabna opterećenja
- HRN ENV 1991 – 2 – 2 – Požarno djelovanje
- HRN ENV 1991 – 2 – 3 – Snijeg
- HRN ENV 1991 – 2 – 4 – Vjetar
- HRN ENV 1991 – 2 – 5 – Toplinska djelovanja
- HRN ENV 1991 – 2 – 6 – Djelovanja pri izvedbi
- HRN ENV 1991 – 2 – 7 – Izvanredna djelovanja uzrokovana udarom ili eksplozijom
- HRN ENV 1991 – 3 – Prometna opterećenja mostova
- HRN ENV 1991 – 4 – Djelovanja na silose i spremnike tekućina
- HRN ENV 1991 – 5 – Djelovanja od kranova i strojeva

U odnosu na dosadašnje propise za opterećenja odnosno djelovanja Eurokod 1 je daleko složeniji i razrađeniji. Djelovanja na konstrukcije nastaju općenito uslijed nekog događaja koji može podrazumijevati građenje, padanje snijega na građevinu, prolaz vozila preko mosta, promjenu temperature okoliša ili pojavu potresa ili požara. Na konstrukciji, djelovanja izazivaju učinke djelovanja, odnosno odziv konstrukcije. Djelovanja mogu biti neovisna (djelovanje snijega na tlo) ili ovisna o samoj konstrukciji (djelovanje snijega na pokrov).

Osnovni podaci o djelovanjima, na osnovi kojih se dolazi do potrebnih numeričkih vrijednosti, mogu se dobiti promatranjem (opterećenja snijegom i vjetrom), proračunom prema zakonima fizike (vlastita težina), izborom (maksimalna težina vozila na mostu) i procjenom (izvanredna djelovanja). Podaci o djelovanjima, dobiveni promatranjem ili prema zakonima fizike obrađuju se statističkim metodama. U ovisnosti od usvojene fraktile razlikuju se: nazovistalna vrijednost, česta vrijednost, vrijednost djelovanja u kombinaciji, posebno prevladavajućeg djelovanja i karakteristična vrijednost djelovanja. Podaci dobiveni izborom ili procjenom općenito se ne izražavaju statističkim veličinama već se uvodi nazivna vrijednost djelovanja.

Numeričke vrijednosti djelovanja sadrže odgovarajuće nepouzdanosti pri određivanju. Osnovni uzroci su velika promjenljivost samog djelovanja (brzina vjetra), nesavršenost modela djelovanja, posebno pri statističkoj obradi malog broja podataka te nepoznavanje budućeg razvoja industrije (vozila i oprema). Prema tome osnovna svojstva djelovanja su vjerojatnost pojave, promjenljivost u vremenu i prostoru i druge nepouzdanosti stohastičkog ili nestohastičkog karaktera.

2.1 Klasifikacija djelovanja

Djelovanja se klasificiraju:
Prema promjenljivosti tijekom vremena

- stalna djelovanja G (vlastita težina, nepokretna oprema (dodatno stalno), pritisak tla, pritisak vode, prednapinjanje, slijeganje oslonaca, deformacije uslijed načina izgradnje konstrukcije)
- promjenljiva djelovanja Q (uporabno opterećenje, opterećenje snijegom i opterećenje vjetrom, djelovanje temperature, opterećenje ledom, promjena razine površine vode, opterećenje valovima)
- izvanredna djelovanja A (eksplozije, udar vozila, potres, požar, slijeganje i klizanje terena).

Stalna opterećenja su ona za koje se smatra da će vjerojatno djelovati na konstrukciju u cijelom vijeku trajanja, ili imati promjenu intenziteta ali su te promjene zanemarive u odnosu na srednju vrijednost.
Promjenjiva opterećenja su ona za koje je vjerojatno da će djelovati tijekom zadane proračunske situacije te da će imati promjenu intenziteta tijekom vremena.
Izvanredna opterećenja su općenito kratkog vremena trajanja, a vjerojatnost njihovog nastupanja u planiranom vijeku trajanja je mala.

Prema mogućnosti promjene položaja u prostoru

- nepomična (vlastita težina)
- slobodna djelovanja (pomična uporabna opterećenja, vjetar, snijeg)

Prema svojoj prirodi i/ili odzivu konstrukcije

- statička djelovanja – koja ne izazivaju značajno ubrzanje konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata
- dinamička djelovanja – koja izazivaju značajno ubrzanje konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata

Vlastita težina konstrukcije (ili njenih dijelova ili opreme) može se prikazati pomoću jedne karakteristične vrijednosti (G_k), uzevši u obzir da je promjenljivost mala, a proračunava se na osnovi nazivnih izmjera i karakterističnih prostornih težina. Kada promjenljivost nije mala i kada je poznata statistička razdioba, koriste se dvije vrijednosti, gornja ($G_{k,sup}$) i donja vrijednost ($G_{k,inf}$). Gornja vrijednost ima predviđenu vjerojatnost da neće biti premašena, a donja vjerojatnost da ne padne ispod predviđene vrijednosti.

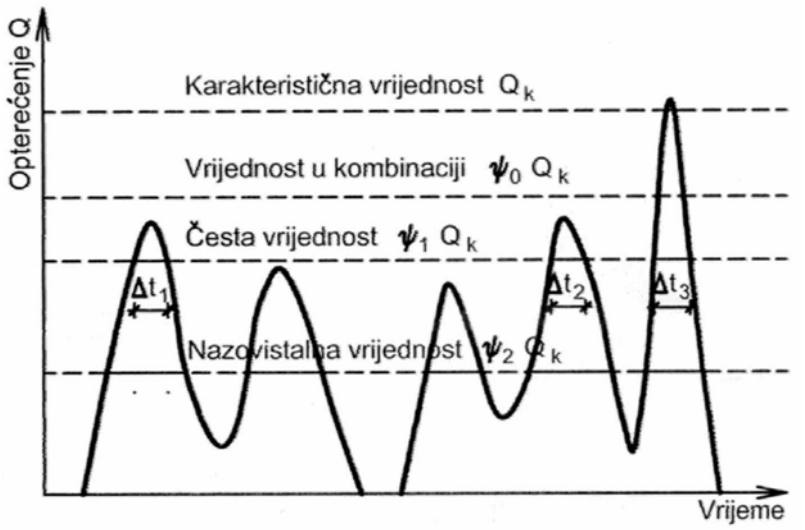
Promjenjivo djelovanje ima četiri reprezentativne vrijednosti:

- karakteristična vrijednost (Q_k)
- vrijednost u kombinaciji ($\psi_0 Q_k$)
- česta vrijednost ($\psi_1 Q_k$)
- nazovistalna vrijednost ($\psi_2 Q_k$)

Vrijednost u kombinaciji ($\psi_0 Q_k$) uzima u obzir smanjenu vjerojatnost istovremenog djelovanja više promjenljivih neovisnih opterećenja s njihovom najnepovoljnijom vrijednošću. Koristi se za provjeru graničnog stanja nosivosti i nepovratnog graničnog stanja uporabljivosti. Ova kombinacija je vrlo rijetka, u vijeku trajanja konstrukcije događa se jedanput ili nijedanput.

Česta vrijednost ($\psi_1 Q_k$) koristi se za provjeru graničnog stanja nosivosti uzimajući u obzir izvanredna djelovanja i za povratna granična stanja. Ovakva česta kombinacija događa se npr. jedanput godišnje.

Nazovistalna vrijednost ($\psi_2 Q_k$) također se koristi za provjeru graničnog stanja nosivosti uzimajući u obzir izvanredna djelovanja te za povratna granična stanja uporabljivosti. Nazovistalna kombinacija događa se npr. jedan put tjedno.



Slika 2.1

2.2 Vlastita težina

Vlastita težina građevinskih elemenata razvrstava se kao stalno djelovanje te kao nepomično djelovanje. Proračunava se na temelju prostornih težina i nazivnih dimenzija.

Težina nepomičnih strojeva, elektroopreme, obloge ubraja se u vlastitu težinu isto kao i težina zemlje, izolacije ili zastora. Oprema kojoj položaj nije točno definiran u vrijeme projektiranja ili primjerice pomični pregradni zidovi mogu se modelirati jednoliko raspoređenim opterećenjem. Vrijednosti zamjenskog kontinuiranog opterećenja najbolje se procjenjuju na temelju iskustva, razumnim pristupom projektanta. Minimalna vrijednost od 1,0 kN/m^2 koristi se za prostorije s uobičajenim pregradnim zidovima i visinama katova.

Za određivanje vlastite težine nekonstrukcijskih dijelova mostova mora se utvrditi gornja (i ukoliko je mjerodavna donja) granica nazivne vrijednosti svih dijelova, uzimajući u obzir mogućnosti početnog odstupanja i promjena tijekom vremena, koje su rezultat:

- nužnosti spajanja slojeva na mostu i na susjednom kolniku
- odstupanja kota gornjih površina kolničke ploče od projektiranih kota
- dodavanja novih slojeva i/ili razvodnih cjevovoda i, ukoliko je potrebno, druge opreme, poslije izvođenja mosta.

Da bi se iz nazivnih vrijednosti odredile karakteristične vrijednosti hidroizolacijskih i drugih slojeva za mostove, ukoliko nije drukčije propisano, treba usvojiti da je odstupanje ukupne debljine od nazivne vrijednosti jednako $\pm$20%, ako je naknadno izvedeni sloj uključen u

nazivnu vrijednost, a +40% i –20% ako takav sloj nije uključen. Ukoliko je prije proračuna izvršeno potpuno i detaljno istraživanje u cilju određivanja nazivne težine instalacijskih razvodnih kanala, treba usvojiti da je gornja karakteristična težina +20% veća od maksimalne nazivne vrijednosti određene istraživanjem. U nedostatku takvog istraživanja, gornja vrijednost se mora odrediti kao maksimalna vrijednost u dužem periodu, procijenjena na osnovi lokacije i vjerojatnih budućih potreba.

Za čelične konstrukcije, karakterističnu vlastitu težinu treba odrediti kao umnožak zbroja nazivnih težina pojedinih elemenata i koeficijenta 1,1, da bi se uzeli u obzir limovi i spojna sredstva u čvorovima.

Materijal	Zapreminska težina (kN/m^3)
Meko drvo –četinari	6.00
Tvrdo drvo –lišćari	8.00
Puni zidni elementi od pečene gline	16.00 –18.00
Šuplji zidni elementi sa više od 25 % šupljina	8.20 –13.50
Perforirani zidni elementi	11.50 –14.50
Vapneno –silikatni zidni element	17.00
Ćerpić	16.00
Šamotni zidni elementi	18.50
Silikatni zidni elementi	18.00
Fasadni zidni elementi	18.00
Stakleni zidni elementi	8.70
Vapneni mort	12.00 –16.00
Produžni mort	17.50 –18.00
Cementni mort	21.00
Gipsani mort	14.00 –18.00
Žbuka od vapna i cementa	19.00
Perlit beton	3.50 –7.0
Plino-beton za toplinsku izolaciju	3.00 –6.00
Beton od pijeska i šljunka	22.5 –24.0
Pjeno-beton	6.00 –15.00
Zidovi od produžnog morta i opeke	15.00 –19.00
Zidovi od šupljih zidnih elemenata	11.50 –14.50
Asfalt	22.00
Bitumen	10.00 –14.00
Katran	11.00 –14.00
Keramičke pločice	24.00
Staklo	25.00
Armirano staklo	27.00
Gumeni pod	18.00
PVC podne pločice	16.00
Težina polunabijenog pijeska	18.00 –22.00
Težina polunabijenog šljunka	16.00 –18.00
Šperploča	7.50 –8.50
Iverica	4.50 –6.50

Tablica 2.1 Zapreminske težine

Krovovi: pokrovi s podrožnicama, rogovima i oplatom	Površinska težina (kN/m^2)
Dvostruki biber crijep	0.90
Kupa kanalica)	1.10
Salonitne ploče	0.25
Valoviti lim	0.25-0.40

Tablica 2.2 Težine pokrova

2.3 Uporabna opterećenja zgrada

Uporabna opterećenja se uglavnom svrstavaju u promjenljiva i slobodna. Uporabno opterećenje u zgradama je ono koje proizlazi iz samog korištenja i uglavnom je modelirano jednoliko raspoređenim opterećenjem. Karakteristične vrijednosti ove vrste opterećenja dane su u ovisnosti o namjeni zgrade, odnosno prostorije. U nekim slučajevima važna su i koncentrirana uporabna opterećenja i to sama ili u kombinaciji s kontinuiranim opterećenjem.

Prostorije u zgradama ovisno o namjeni svrstane su u pet osnovnih razreda i neke podrazrede s odgovarajućim karakterističnim opterećenjem. Krovovi koji su pristupačni projektiraju se na istu razinu uporabnog opterećenja kao i podovi zgrada, dok se krovovi za posebne namjene (slijetanje helikoptera), garaže, i površine s prometnim opterećenjem promatraju odvojeno.

Koncentrirano opterećenje Q_k djeluje na bilo kojoj točki poda, balkona ili stubišta ili na kvadratičnoj površini, stranice 50 mm.

A	Stambene prostorije, odjeljenja u bolnicama, hotelske sobe
B	Uredi
C	Površine na kojima je moguće okupljanje ljudi (5 podrazreda prema vjerojatnoj gustoći okupljanja i gužve)
D	Prodajne površine
E	Površine za skladištenje

Tablica 2.3 Razredi površina u zgradama

Opterećene	q_k [kN/m^2]	Q_k [kN]
A - općenito	2,0	2,0
- stubišta	3,0	2,0
- balkoni	4,0	2,0
B	3,0	2,0
C - C1	3,0	4,0
- C2	4,0	4,0
- C3	5,0	4,0
- C4	5,0	7,0
- C5	5,0	4,0
D - D1	5,0	4,0
- D2	5,0	7,0
E	6,0	7,0

Tablica 2.4 Uporabna opterećenja u zgradama

Uporabna opterećenja mostova – prometna opterećenja obrađuju se u posebnom drugom dijelu Eurokoda 1.

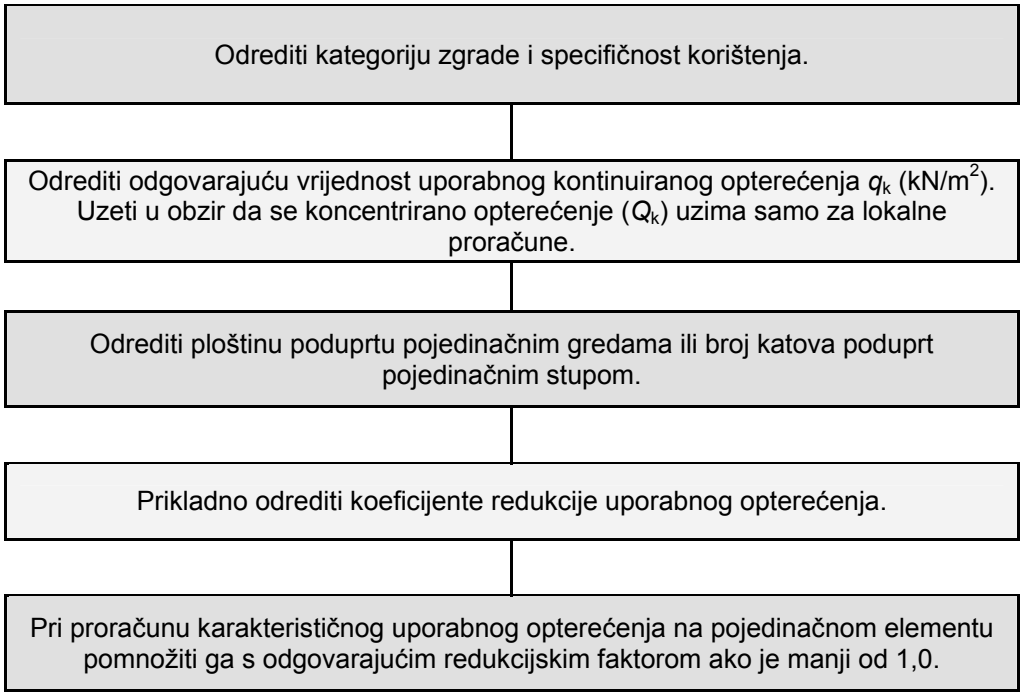
Karakteristične vrijednosti uporabnog opterećenja sastoje se od dugotrajnih, srednjotrajnih i kratkotrajnih komponenti. U praksi, općenito, nije potrebno razlikovanje među ovim komponentama osim kad je materijal osjetljiv na djelovanja ovisna o vremenu. Npr. beton je podložan puzanju, pa se stoga trajanje opterećenja mora uzeti u obzir pri projektiranju konstrukcija u kojima se beton koristi.

Uporabna opterećenja konstrukcijskih elemenata koji podupiru velike podne površine reduciraju se odgovarajućim faktorima α ovisnim o površini poduprtoj gredom, ili broju katova koji su poduprti stupom.

Za grede: $\alpha_A = 5\psi_o/7 + 10m^2/A$ (2.1)
gdje je A površina poduprta gredom u m^2.

Za stupove: $\alpha_n = \{2 + (n-2)\psi_0\}/n$ (2.2)
gdje je n broj poduprtih katova.

Koeficijent ψ_0 je koeficijent kombinacije definiran u prvom dijelu, Osnove proračuna.



Slika 2.2 Dijagram toka za određivanje vrijednosti uporabnog opterećenja u zgradama

2.4 Opterećenje snijegom

Opterećenje snijegom je promjenljivo slobodno djelovanje. Ovaj dio eurokoda daje podrobne odredbe za proračun opterećenja snijegom na krovove, ali isključuje sljedeće slučajeve djelovanja:

- lokacije iznad 1500 m nadmorske visine
- udarna opterećenja od snijega koji klizi niz krov ili pada s višeg krova
- dodatna opterećenja od vjetra uslijed nagomilavanja leda
- lokacije na kojima je snijeg prisutan cijele godine
- bočno opterećenje od snijega izazvano smetovima
- povećanje opterećenja uslijed padanja jake kiše na snijeg.

Opterećenja snijegom proračunavaju se na osnovi karakterističnog opterećenja s_k, koje odgovara jednolikom snijegu koji je napadao pri mirnim vremenskim uvjetima na ravno tlo. Ova se vrijednost prilagođava ovisno o obliku krova i utjecaju vjetra na raspodjelu snijega.

Opterećenje od snijega na krov određuje se izrazom:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \qquad (2.3)$$

gdje su:

- s_k : karakteristična vrijednost opterećenja od snijega na tlo (kN/m^2)
- μ_i : koeficijent oblika opterećenja od snijega
- C_e : koeficijent izloženosti, koji obično ima vrijednost 1,0
- C_t : toplinski koeficijent, koji obično ima vrijednost 1,0

Opterećenje od snijega djeluje vertikalno i odnosi se na horizontalnu projekciju površine krova te se odnosi na snijeg koji je prirodno napadao.
Opterećenje snijegom na tlo zavisi od geografskog položaja i nadmorske visine lokacije koja se razmatra i dano je na nacionalnoj osnovi u obliku karata s odgovarajućim geografskom lokacijom. Tipična mapa karakterističnog opterećenja snijegom na tlo s_k dana je na slici.



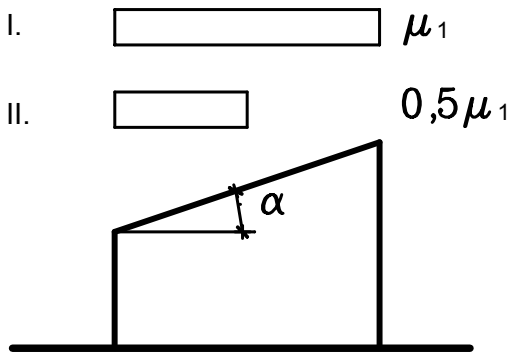
Slika 2.3 Karta opterećenja snijegom u Hrvatskoj

Učinak geometrije krova uzima se u obzir koeficijentom oblika opterećenja snijegom μ_i. Uobičajene geometrije krovova su jednostrešni, dvostrešni, višestrešni i valjkasti krovovi.

Nadmorska visina do (m)	I. područje	II. područje	III. područje	IV. područje
100	1,10	1,10	0,45	0,35
200	1,30	1,40	0,80	0,50
300	1,55	1,75	1,20	0,70
400	1,80	2,20	1,65	0,90
500	2,05	2,65	2,15	1,15
600	2,35	3,15	2,70	2,70
700	2,65	3,70	3,30	3,30
800	2,95	4,25	3,95	3,95
900	3,25	4,90	4,65	4,65
1000	3,60	5,55	5,40	5.40
1100	3,95	6,25	6,20	6,20
1200	4,30	7,00	7,05	7,05
1300	--	7,80	7,95	7,95
1400	--	8,65	8,90	8,90
1500	--	9,50	9,90	9,90
1600	--	10,40	10,95	10,95
1700	--	11,40	12,05	12,05
1800	--	--	13,20	13,20

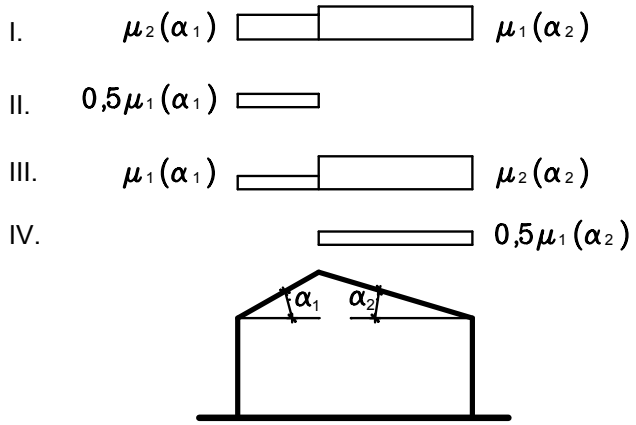
Tablica 2.5 Karakteristične vrijednosti opterećenja snijegom s_k na različitim nadmorskim visinama u pojedinim zonama

Za jednostrešne krovove treba uzeti u obzir dva slučaja opterećenja, jedno u kojem se puno opterećenje snijegom primjenjuje na čitavoj površini krova, i drugo u kojem se pola vrijednosti opterećenja snijegom primjenjuje na najnepovoljnijoj polovici krova. Drugi slučaj će rijetko biti kritičan.

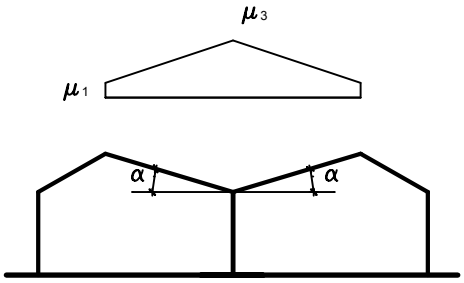


Slika 2.4 Koeficijenti oblika opterećenja od snijega – jednostrešni krovovi

Tipične vrijednosti koeficijenta opterećenja snijegom dane su na slici i u tablici za dvostrešne krovove.



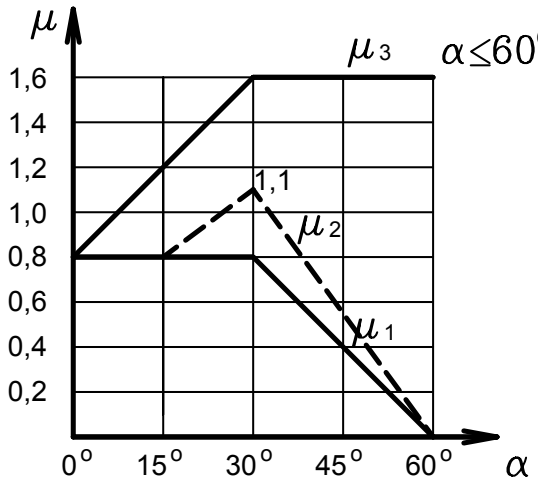
Slika 2.5 Koeficijenti oblika opterećenja od snijega – dvostrešni krovovi



Slika 2.6 Koeficijenti oblika opterećenja od snijega – višestrešni krovovi

Kut nagiba krova	$0° \le \alpha \le 15°$	$15° \le \alpha \le 30°$	$30° \le \alpha \le 60°$	$\alpha \ge 60°$
Koeficijent oblika μ_1	0,8	0,8	0,8(60 - α)/30	0,0
Koeficijent oblika μ_2	0,8	0,8 + 0,6(α–15)/30	1,1(60 - α)/30	0,0
Koeficijent oblika μ_3	0,8 + 0,8α/30	0,8 + 0,8α/30	1.6	-

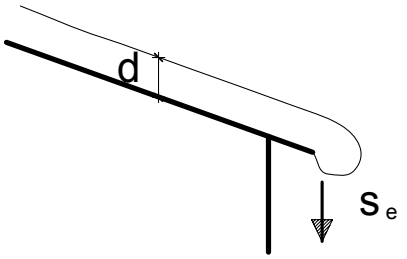
Tablica 2.6 Koeficijenti oblika opterećenja od snijega prema HRN ENV 1991-2-3



Slika 2.7 Koeficijenti oblika μ_i

Krovovi s naglom promjenom visine moraju se proračunati na mogućnost klizanja snijega s višeg nivoa.

U proračunu onih dijelova krova koji su konzolno prepušteni preko zidova, mora se uzeti u obzir snijeg koji visi preko ruba krova, kao dodatak opterećenja na tom dijelu krova. Ova vrijednost neovisna je o duljini konzole.



Slika 2.8 Snijeg na konzolnim prijepustima krova

$$s_e = k \cdot s^2 / \gamma \qquad (2.4)$$

γ: gustoća snijega, ovdje 3 kN/m3
s: najteži slučaj opterećenja bez nanosa za odgovarajući tip krova
k: koeficijent kojim se uzima u obzir nepravilan oblik snijega (preporučuje se k = 3/d uz k $\leq$ d γ)
d: debljina sloja snijega na krovu u metrima

U određenim uvjetima snijeg može skliznuti s kosog ili zakrivljenog krova i tako izazvati silu uslijed klizajuće mase. Sila klizajuće mase snijega na snjegobrane računa se prema slljedećem izrazu:

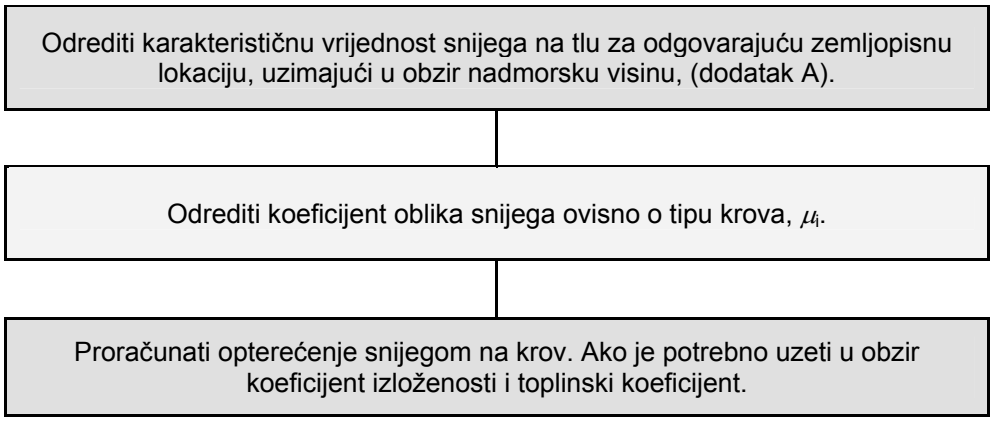
$$F_s = sb\sin\alpha \qquad (2.5)$$

Gdje su:

s: opterećenje snijegom koje odgovara površini krova s kojeg bi snijeg mogao kliznuti
b: horizontalni razmak snjegobrana na krovu
α: nagib krova, mjeren od horizontale

Da bi se uzeo utjecaj oštrog vjetra koeficijent izloženosti može se uzeti manji od 1,0, a da bi se uzeo u obzir utjecaj gubitka topline kroz krov toplinski koeficijent može se uzeti manji od 1,0.

Dijagram toka za određivanje opterećenja snijegom je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 2.9 Dijagram toka za određivanje vrijednosti opterećenja snijegom

Kada su klimatski uvjeti i trajanje procesa izgradnje takvi da je opravdano uzeti opterećenje od snijega za proračunski dokaz statičke ravnoteže za vrijeme izvođenja, ovo se opterećenje razmatra kao da se sastoji od nesimetrične raspodjele snijega, smještene u najnepovoljniji položaj. Za ovaj proračunski dokaz, mora se pretpostaviti da su opterećenja od snijega 25% karakterističnog opterećenja snijega na tlo.

2.5 Opterećenje vjetrom

Vjetar je promjenljivo slobodno djelovanje. Ovisno o osjetljivosti na dinamičku uzbudu primjenjuju se dva postupka za proračun opterećenja vjetrom:

- pojednostavnjeni postupak primjenjuje se za konstrukcije koje su neosjetljive na dinamičku uzbudu te za proračun dinamički umjereno osjetljivih konstrukcija, primjenom dinamičkog koeficijenta c_d.
- detaljni postupak se primjenjuje za konstrukcije za koje se očekuje da su osjetljive na dinamičku uzbudu i kod kojih je vrijednost dinamičkog koeficijenta veća od 1,2.

Pojednostavnjeni postupak se može koristiti za:
- zgrade i dimnjake visine manje od 200 m,
- cestovne i željezničke mostove najvećeg raspona manjeg od 200 m te za pješačke mostove najvećeg raspona manjeg od 30 m.

Ovdje je prikazan samo pojednostavnjen proračun i to za stalne konstrukcije. Privremene konstrukcije mogu se proračunati na manje opterećenje vjetra.

Pojednostavnjeni proračun znači da se djelovanje vjetra uzima kao zamjenjujuće statičko opterećenje. Za zgrade tlakovi vjetra djeluju okomito na površine zgrade, a za mostove proračunavaju se sile vjetra u svim horizontalnim smjerovima.

Tlak vjetra na zgrade

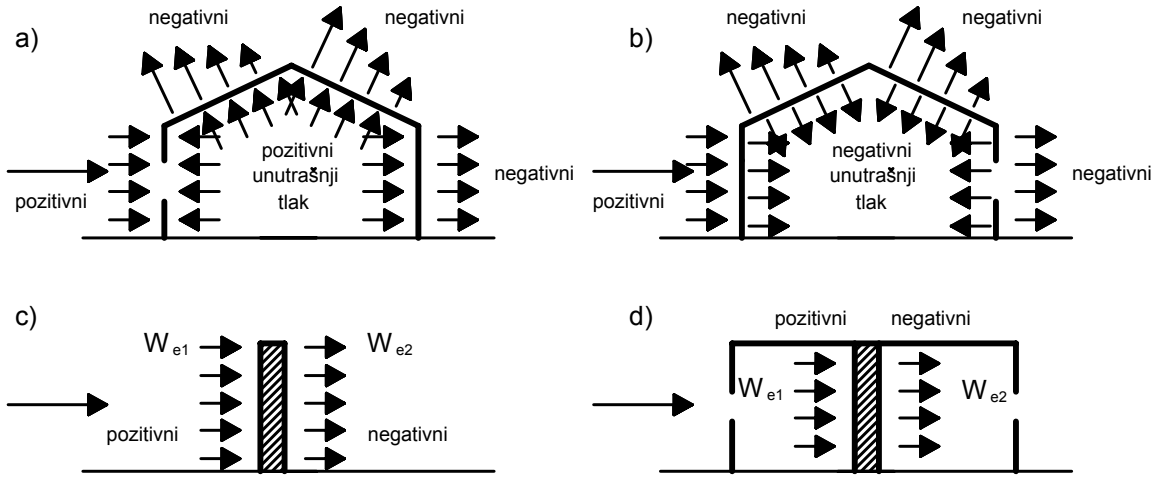
Tlak vjetra na vanjske površine w_e te tlak vjetra na unutrašnje površine proračunava se po izrazima:

$$w_e = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_{pe} \text{ - vanjski tlak} \quad (2.6)$$

$$w_i = q_{ref} \cdot c_e(z_i) \cdot c_{pi} \text{ - unutarnji tlak} \quad (2.7)$$

gdje su:
q_{ref} : poredbeni tlak srednje brzine vjetra
$c_e(z_e)$, $c_e(z_i)$: koeficijenti izloženosti
c_{pe} i c_{pi}: koeficijenti vanjskog i untrašnjeg tlaka

Neto pritisak na površinu je algebarski zbroj unutarnjeg i vanjskog pritiska.



Slika 2.10 Tlakovi vjetra na površine

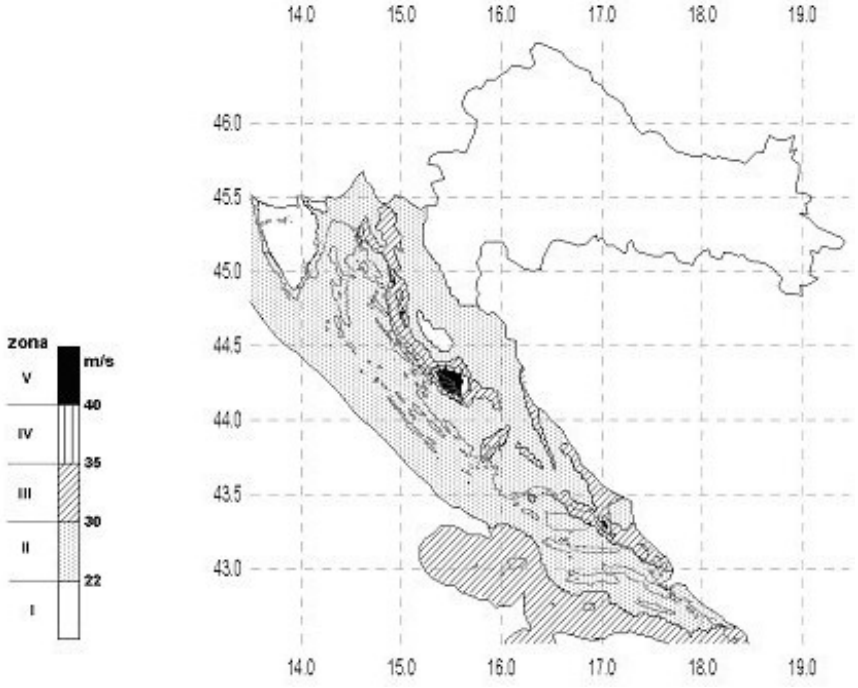
Objašnjenje pojedinih članova ovog izraza dano je u nastavku.

Poredbeni tlak srednje brzine vjetra određuje se izrazom:

$$q_{ref} = \frac{\rho}{2} v_{ref}^2 \qquad (2.8)$$

- v_{ref}: poredbena brzina vjetra, određuje se iz vjetrovnih karti
- ρ: gustoća zraka (1,25 kg/m^3)

Poredbena brzina vjetra određuje se prema osnovnoj vrijednosti poredbene brzine vjetra $v_{ref,0}$ koja je prikazane u zemljovidu Hrvatske za područja opterećenja vjetrom.
Zbog lakšeg korištenja zemljovida Hrvatska je podijeljena na 10 regija, a svakoj pripada određeno područje ili područja opterećenja vjetrom.



Slika 2.11 Zemljovid Hrvatske s osnovnim poredbenim brzinama vjetra

Područje	vref,10min (m/s)
I.	22,0
II.	30,0
III.	35,0
IV.	40,0
V.	50,0

Tablica 2.7 Poredbena srednja 10-minutna brzina vjetra

Koeficijent izloženosti $c_e(z)$ uzima u obzir učinke hrapavosti terena (tablica), topografije i visine iznad tla, na srednju brzinu vjetra i turbulenciju.

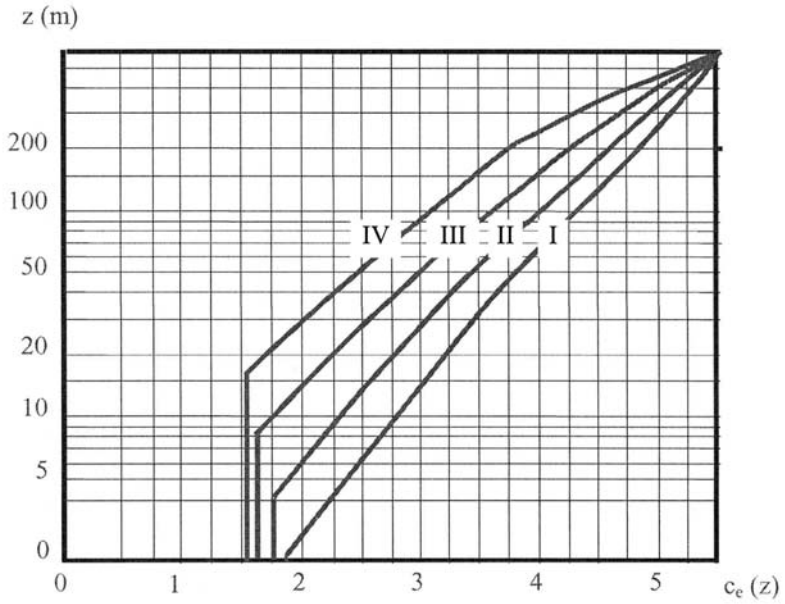
$$c_e(z) = c_r^2(z) \cdot c_t^2(z) \cdot [1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z)] \qquad (2.9)$$

- g: udarni koeficijent
- $I_v(z)$: intenzitet turbulencije
- k_r: koeficijent terena (zemljišta)
- $c_r(z)$: koeficijent hrapavosti
- $c_t(z)$: koeficijent topografije

	Kategorije zemljišta	k_r	z_o[m]	z_{min}[m]
I.	Otvoreno more ili jezero, s najmanje 5 km otvorene površine u smjeru vjetra I ravnica bez prepreka	0,17	0,01	2
II.	Ograđeno poljoprivredno zemljište s gospodarskim zgradama, kućama ili drvećem	0,19	0.05	4
III.	Predgrađa ili industrijska područja i stalne šume	0,22	0,3	8
IV.	Gradska područja u kojima je najmanje 15% površine prekriveno zgradama čija je srednja visina veća od 15 m	0,24	1	16

Tablica 2.8 Kategorije zemljišta i odgovarajući parametri

Veličine z_0 i z_{min} se koriste za određivanje keoficijenta hrapavosti.
Za ravne terene koeficijent izloženosti se može odrediti iz slike vezano uz visinu i kategoriju terena. Teren se uglavnom smatra ravnim, osim za lokacije blizu izdvojenih brežuljaka i strmih nagiba.



Slika 2.12 Koeficijenti izloženosti kao funkcija visine z iznad tla, za kategorije hrapavosti terena I do IV, kada je c_t=1.

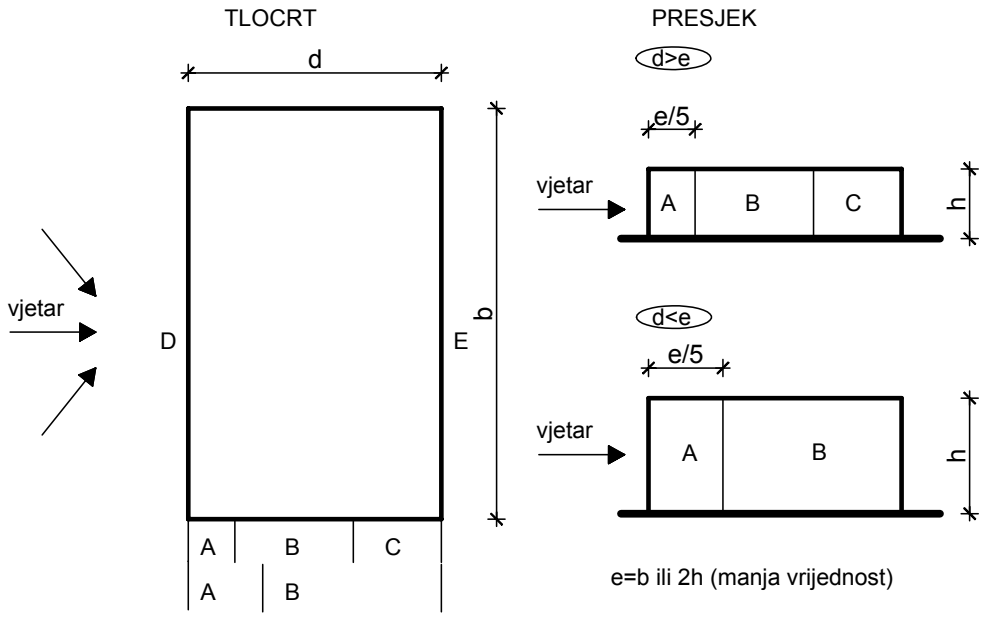
Koeficijenti vanjskog i unutrašnjeg tlaka

Koeficijenti vanjskog tlaka c_{pe} za zgrade i njihove pojedine dijelove ovise o veličini opterećene površine A i dani su za opterećene površine od $1m^2$ i $10m^2$ u odgovarajućim tablicama kao vrijednosti $c_{pe,1}$ i $c_{pe,10}$. Za površine veličine između 1 i 10 m^2 koeficijenti se dobivaju linearnom interpolacijom.

Koeficijenti tlaka, vanjski i unutrašnji, primjenjuju se kako bi se odredio raspored vanjskog i unutarnjeg tlaka i dani su u tablicama za:

- vertikalne zidove zgrada pravokutnog tlocrta,
- ravne krovove,
- jednostrešne krovove,
- dvostrešne krovove,
- višestrešne krovove,
- svodove i kupole.

Tipični prikaz dan je za vertikalne zidove zgrada pravokutnog tlocrta na slici gdje je vidljiva podjela po područjima i u tablici za različita područja i za različite odnose d/h.

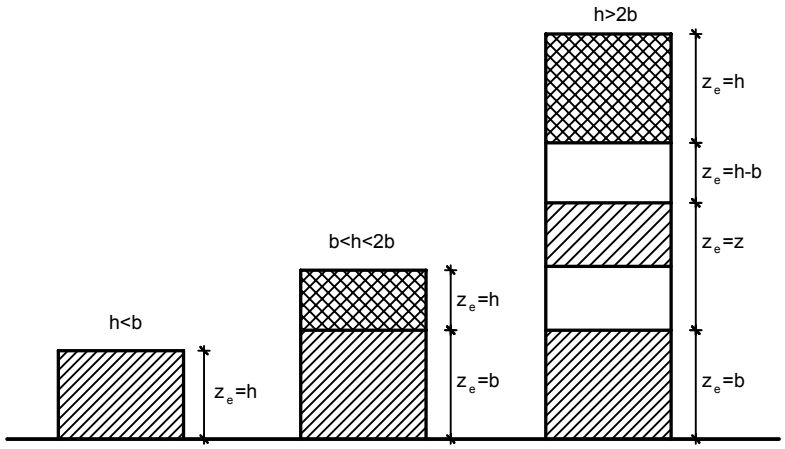


Slika 2.13 Koeficijenti vanjskog tlaka za vertikalne zidove zgrada s pravokutnim tlocrtom

Zone	A		B		C		D		E	
d/h	$C_{pe.10}$	$C_{pe.1}$	$C_{pe.10}$	$C_{pe.1}$	$C_{pe.10}$	$C_{pe.1}$	$C_{pe.10}$	$C_{pe.1}$	$C_{pe.10}$	$C_{pe.1}$
≤ 1	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,8	+1,0	-0,3	
≥ 4	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,6	+1,0	-0,3	

Tablica 2.9 Koeficijenti vanjskog tlaka za vertikalne zidove zgrada s pravokutnim tlocrtom po područjima

Poredbena visina z_e za zidove zgrada pravokutnog tlocrta daje se ovisno o odnosu visine i širine zgrade h/b.



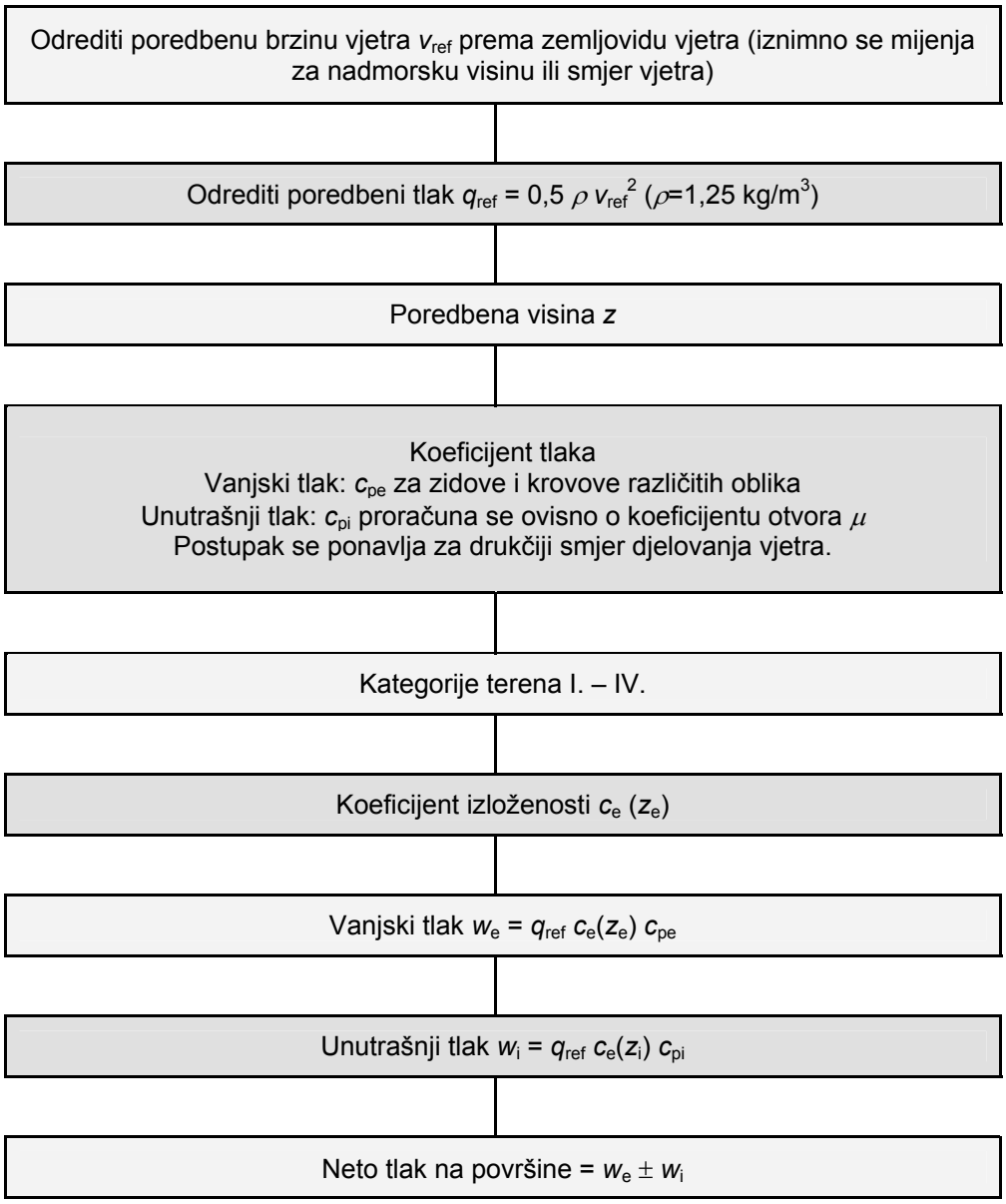
Slika 2.14 Poredbena visina z_e u ovisnosti od h i b

Za zgrade bez unutrašnjih pregrada koeficijenti unutrašnjeg tlaka vezani su uz koeficijent otvora μ koji se definira kao omjer sume površina otvora na zavjetrenoj strani i stranama paralelno djelovanju vjetra i sume površina otvora na svim stranama, strani izloženoj vjetru, zavjetrenoj strani i stranama paralelno djelovanju vjetra.

U slučaju ravnomjernog rasporeda otvora, za zgrade približno kvadratnog tlocrta, mora se koristiti vrijednost c_{pi}=-0,25.

Za zatvorene zgrade s unutrašnjim pregradama ekstremne vrijednosti su c_{pi} = 0,8, ili c_{pi} = -0,5.

Proces određivanja opterećenja vjetrom na zgrade prikazan je na dijagramu.



Slika 2.15 Dijagram toka za određivanje vrijednosti opterećenja vjetrom na zgrade

2.6 Toplinska djelovanja

Toplinska djelovanja su promjenljiva slobodna djelovanja, a uz to i neizravna djelovanja.

Raspodjela temperature po presjeku na svakom elementu dovodi do deformiranja elementa, a kada je ona spriječena dolazi do pojave deformacija i naprezanja. Elemente

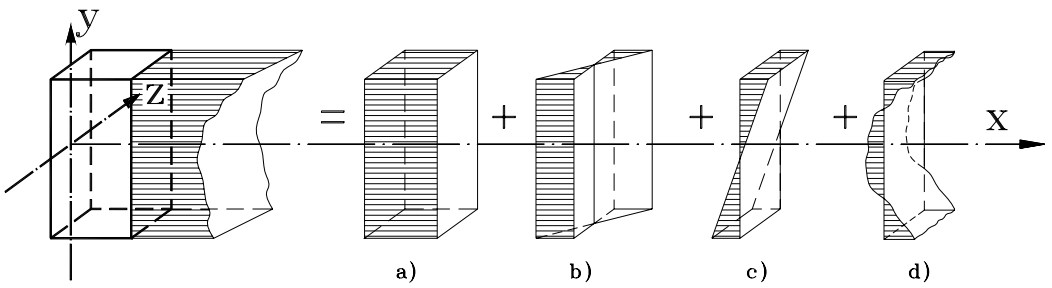
nosive konstrukcije treba projektirati kako se ta naprezanja ne bi premašila, a što se postiže ili obuhvaćanjem toplinskih učinaka u proračunu ili predviđanjem razdjelnica.

Veličina toplinskih ovisna je o klimatskim uvjetima (dnevne i sezonske promjene temperature u zraku, sunčano zračenje), položaju građevine, njenoj sveukupnoj masi, završnoj obradi (obloge), a kod zgrada i o grijanju, provjetravanju i toplinskoj izolaciji.

Raspodjela temperature između pojedinih konstrukcijskih elemenata može se raščlaniti u četiri osnovne komponente:

a) jednolika komponenta temperature ΔT_N
b) linearno promjenljiva temperaturna komponenta u odnosu na os z-z, ΔT_{Mz}
c) linearno promjenljiva temperaturna komponenta u odnosu na os y-y, ΔT_{My}
d) nelinearna raspodjela temperature, ΔT_E.

Ovo daje samouravnotežena naprezanja koja ne daju reznu silu na elemente. Deformacije i naprezanja što iz njih proistječu, ovisna su o geometriji i rubnim uvjetima promatranog elementa, te fizikalnim svojstvima uporabljenog gradiva.



Slika 2.16 Osnovne komponente temperaturne raspodjele

Temperaturne promjene u zgradama

Ovaj dio norme obrađuje samo toplinska djelovanja koja su rezultat promjena temperature zraka u hladu i sunčevog zračenja te daje upute za sva pitanja i pojedinosti koje se moraju razmotriti za svaku pojedinu konstrukciju. Pojedinosti se odnose na:

- toplinska djelovanja koja su rezultat nepovoljnog unutarnjeg grijanja, industrijskih procesa, učinaka unutarnje opreme te
- ponašanje konstrukcije i njene obloge koje ovisi o vrsti konstrukcije, primijenjenoj oblozi i očekivanom vremenskom zapisu unutarnje i vanjske temperature.

Elemente nosivih konstrukcija treba provjeriti kako toplinske promjene ne bi uzrokovale prekoračenje graničnih stanja, a što se postiže ili obuhvaćanjem toplinskih učinaka u proračunu ili predviđanjem razdjelnica.

Za elemente obloge proračunska duljina između razdjelnica određuje se prema svojstvima materijala. Materijali obloge moraju biti pričvršćeni za konstrukciju tako da omoguće razlike u pomacima između različitih komponenata.

Temperaturne raspodjele određuju se za europske države uzimajući u obzir izloženost dnevnim promjenama sunčeva zračenja i dnevni raspon temperature zraka u hladu.

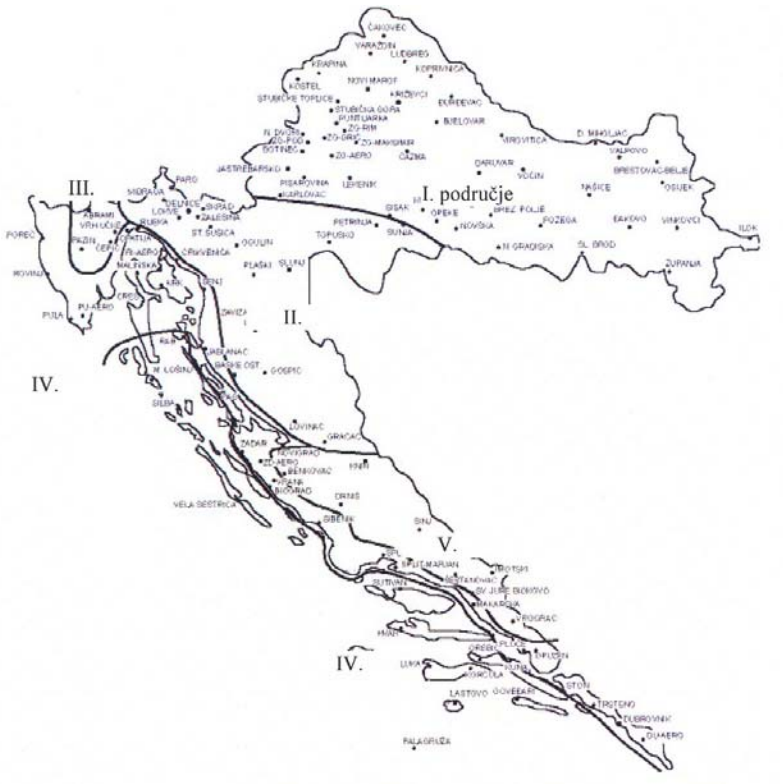
Nacionalni dokument za primjenu u sklopu norme HRN ENV 1991-2-5 sadrži zemljovide Hrvatske s pripadnim najvišim I najnižim temperaturama zraka u ovisnosti o nadmorskoj visini.



Slika 2.17 Zemljovid Hrvatske s najvišim temperaturama zraka

Nadmorska visina do (m)	I. područje	II. područje	III. područje	IV. područje
100	39	38	42	39
400	36	36	39	39
800	33	34	36	39
1200	30	32	34	--
1600	28	30	31	--

Tablica 2.10 Promjena najviše temperature $T_{max,50}$ s nadmorskom visinom



Slika 2.18 Zemljovid Hrvatske s najnižim temperaturama zraka

Nadmorska visina do (m)	I. područje	II. područje	III. područje	IV. područje	V. područje
100	-26	-26	-17	-10	-16
400	-23	-26	-19	-13	-18
800	-20	-26	-21	-17	-19
1200	-17	-26	-23	-20	-21
1600	---	-26	-24	-24	-23
>1600	---	-26	---	-26	-24

Tablica 2.11 Promjena najniže temperature $T_{min,50}$ s nadmorskom visinom

Toplinska djelovanja na konstrukcijski element prema EN 1991-1-5 određuju se korištenjem sljedećih komponenti:

a) jednolika temperaturna komponenta je razlika prosječne temperature elementa T i njegove početne temperature To

$$\Delta T_u = T - T_o \qquad (2.10)$$

b) Linearno promjenljiva temperaturna komponenta dana razlikom između temperature na vanjskoj i unutrašnjoj površini poprečnog presjeka, ili na površinama pojedinih slojeva: ΔT_M

c) Temperaturna razlika različitih dijelova konstrukcije dana kao razlika prosječnih temperatura ovih dijelova: ΔT_p

2.7 Potresno djelovanje

2.7.1 Osnovni pojmovi

Potres (engl. *earthquake*) je prirodna pojava prouzročena iznenadnim oslobađanjem energije u zemljinoj kori i dijelu gornjega plašta koja se očituje kao potresanje tla.

Potresna opasnost (engl. *earthquake hazard*) je fizikalna pojava pridružena potresu koja može biti uzrokom nepovoljnih učinaka na ljude i imovinu. Izražava se kao vjerojatnost pojave potresa određene jakosti na određenom području u određenom vremenu tj. p_1=p(I, A, t).

Potresna oštetljivost (engl. *vulnerability*) je količina štete prouzročena danim stupnjem opasnosti izražena kao dio vrijednosti oštećenog predmeta tj. p_2=p(%-tak vrijednosti u kn)

Potresni rizik (engl. *earthquake risk*) je vjerojatnost da će društvene ili ekonomske posljedice potresa premašiti određenu vrijednost na mjestu gradnje ("lokaciji građevine") ili na određenom području tijekom određenog razdoblja. Izražava se u novčanoj vrijednosti ili u broju žrtava potresa (poginulih i ranjenih).

Potresni rizik = potresna opasnost x potresna oštetljivost

$p_3 = p\ (I, A, t, Vr) = p_1 \times p_2$

Seizmologija je prirodna znanost koja proučava potrese.

Seizmičnost je učestalost pojave potresa na određenom području.

Žarište potresa (hipocentar, ognjište) je zamišljena točka ili područje u unutrašnjosti Zemlje gdje je nastao potres.

Epicentar je projekcija žarišta na površini Zemlje.

Dubina žarišta je udaljenost od epicentra do žarišta.

Magnituda potresa je kvantitativna mjera jakosti potresa izražena oslobođenom energijom, neovisno o mjestu opažanja.

Rasjed je slabo mjesto u zemljinoj kori na kojem su slojevi stijene raspucali i kliznuli.

Izoseista je crta koja povezuje točke na zemljinoj površini na kojoj je intenzitet potresa jednak.

Akcelerogram- zapis potresa, zavisnost ubrzanja (cm/s^2) o vremenu.

Spektar potresa je obrađeni zapis potresa. To je grafički prikaz kojemu je na osi ordinata omjer spektralnog ubrzanja i najvećeg ubrzanja tla, a na osi apscisa period vibracije tla u sekundama.

Potresni valovi- u trenutku iznenadnog pomaka na rasjedu dolazi do oslobađanja energije, a kroz stijensku masu prostiru se u okolinu potresni valovi. Oni mogu biti prostorni (u unutrašnjosti Zemlje) i površinski (na njezinoj površini).

Potresi su posljedica stalne dinamike u unutrašnjosti Zemlje, javljaju se u zonama dodira različitih geoloških struktura, od kojih su najveće tektonske ploče. Prema **teoriji tektonskih ploča** zemljina kora i gornji dio plašta nisu cjeloviti već razlomljeni i sastoje se od 15 ploča debljine 50-150 km koje se međusobno pomiču kao kruta tijela. Zbog pomaka dolazi na granicama ploča i u njihovoj blizini do velikih sila i naprezanja, a u trenutku kad se iscrpi nosivost materijala dolazi do naglih pomaka koji su uzrok potresima. Karta epicentara potresa dobro se poklapa s granicama tektonskih ploča. I same tektonske ploče imaju unutar sebe pukotina i rasjeda, razlomljene su na manje dijelove između kojih dolazi također do potresa.

Mjerenje potresa
Vibracije tla mjere se instrumentima. Ako se njima mjeri ubrzanje, nazivamo ih akcelerometri, ako se mjeri brzina gibanja, nazivamo ih velosimetri, a ako se mjere pomaci, to su seizmometri. Najstariji su seizmografi koji rade na principu njihala.

2.7.2 Proračun seizmičkih sila

Potres se razmatra kao fenomen velike količine energije i veoma je kratkog trajanja. Seizmičko djelovanje određuje se preko računskog ubrzanja tla a_g koje odgovara povratnom periodu potresa od 475 godina. Računsko ubrzanje tla ovisi o stupnju seizmičkog rizika i određuje se na temelju odgovarajućih seizmoloških ispitivanja lokacije građevine ili prema usvojenim vrijednostima za seizmička područja državnog teritorija. Računska ubrzanja tla daju se državnim propisima.

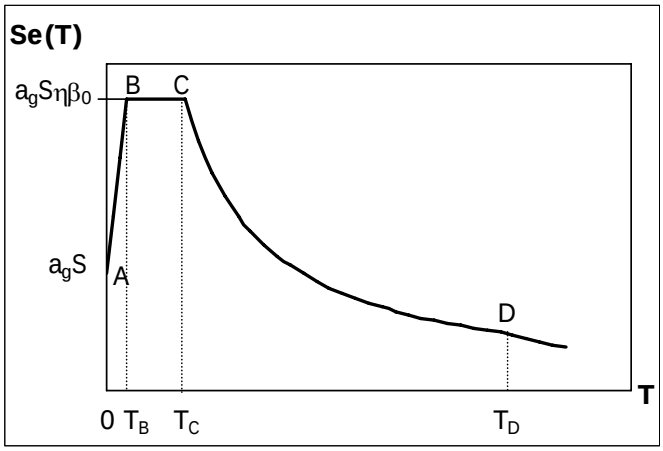
Područje intenziteta	VII	VIII	IX	X
Računsko ubrzanje tla	0,1g	0,2g	0,3g	Prema posebnim istraživanjima

Tablica 2.12 Računsko ubrzanje tla za različita seizmička područja

Područja sa ubrzanjem $a_g \leq 0.05$ su područja malog inteziteta. U slučaju $a_g \leq 0.02$ proračun na potres nije potreban. Statičke seizmičke sile izvedene su iz inercijalnih sila. Inercijalne sile odgovaraju osnovnom vlastitom periodu konstrukcije.

Seizmičko djelovanje obično se predstavlja sa tri komponente (gibanje točke opisuje s dvije horizontalne i jednom vertikalnom komponentom). Primjenom metode spektralnog odgovora građevina se može analizirati odvojeno za oscilacije u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru. Površinsko seizmičko gibanje promatrane točke tla može se predstaviti pomoću spektra odziva, spektra snage ili vremenskog odziva tla.

Za određivanje jedne komponente seizmičkog djelovanja obično se koristi spektar seizmičkog ubrzanja tla u jednom translatacijskom smjeru. **Elastični spektar odgovora** (ubrzanja) definira se analitički i kvalitativno prema slici:



Slika 2.19 Elastični spektar odgovora

Potresno gibanje se opisuje preko elastičnog spektra odziva. Pri proračunu se uvodi korekcijski faktor prigušenja. Izrazi za elastični spektar:

$0 \leqslant T \leqslant T_B$ $\quad S_e(T) = a_g S\left(1 + \frac{T}{T_B}(\eta\beta_0 - 1)\right)$ (2.11)

$T_B \leqslant T \leqslant T_C$ $\quad S_e(T) = a_g \eta S \beta_0$ (2.12)

$T_C \leqslant T \leqslant T_D$ $\quad S_e(T) = a_g \eta S \beta_0 \left(\frac{T_C}{T}\right)^{k1}$ (2.13)

$T_D \leqslant T$ $\quad S_e(T) = a_g \eta S \beta_0 \left(\frac{T_C}{T_D}\right)^{k1} \left(\frac{T_D}{T}\right)^{k2}$ (2.14)

$S_e(T)$ -ordinata spektra odgovora u jedinici ubrzanja tla
a_g -osnovno računsko ubrzanje tla
S -modificirani faktor tla
T -osnovni period osciliranja linearnog sustava
T_B, T_C -granice intervala konstantnog spektralnog ubrzanja
T_D -granica koja definira početak područja spektra s konstantnim pomacima
β_0 -faktor spektralnog ubrzanja
k_1, k_2 -eksponenti koji utječu na oblik spektra odgovora za $T \geq T_C$
η -korekcijski faktor prigušenja (=1 za viskozno prigušenje 5%)

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \geq 0.7 \quad (2.15)$$

ξ - vrijednost viskoznog prigušenja dana u postocima koja je obično pretpostavljena sa 5%, a ako nije dana je propisima za različite materijale

Vidljivo je da se spektar ubrzanja modificira sukladno kategorijima tla za koje su dani svi potrebni parametri u tablici 2.13.

kategorija tla	S	β_0	k_1	k_2	T_B	T_C	T_D
A	1,0	2,5	1,0	2,0	0,10	0,40	3,0
B	1,0	2,5	1,0	2,0	0,15	0,60	3,0
C	0,9	2,5	1,0	2,0	0,20	0,80	3,0

Tablica 2.13 Seizmički parametri za kategorije tla

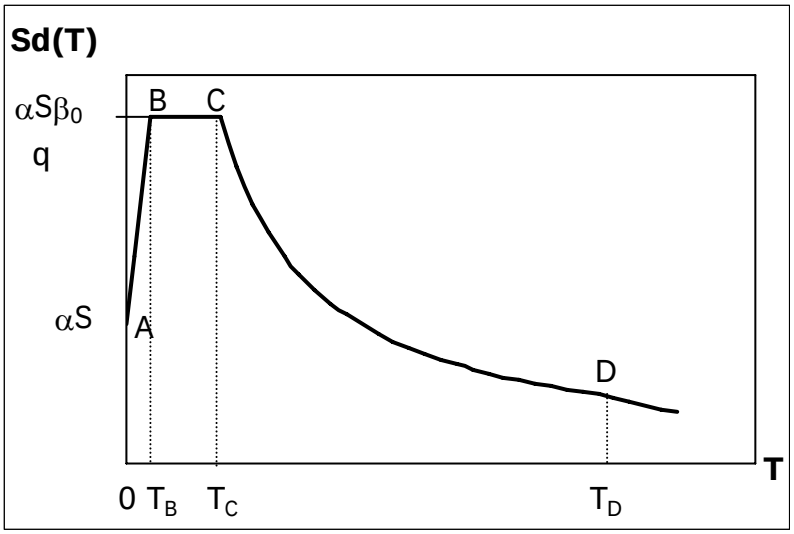
Utjecaji potresa na konstrukciju ovise i o vrsti tla na kojem se konstrukcija gradi. Prema EC8 razlikuju se tri vrsta tla i to: Klasa A, klasaB i klasa C. Svaka klasa ima svoju poklasu.

A_1-čvrsta stijena ili formacija meke stijene koja se prostire široko i duboko pod uvjetom da nije raspucana u ravnini temeljenja.
A_2-sloj dobro zbijenog šljunka s malim sadržajem gline i mulja.
A_3-kruta, dobro konsolidirana glina
B_1-tlo koje se može usvojiti kao pouzdano na osnovu mahaničkih karakteristika ili čvrsta stijena
B_2-srednje gusti zrnati pijesak ili šljunak
B_3-srednje čvrsta glina koja je dobro konsolidirana
C_1-rastreseni nepovezani pijesak sa ili bez međuslojeva gline ili mulja
C_2-glinovita ili muljevita tla

Horizontalna seizmička aktivnost se opisuje kroz dvije ortogonalne komponente promatrano neovisno, a prezentirane za isti spektar odziva.
Za vertikalnu seizmičku aktivnost dopušta se koristiti isti spektar odziva kao i za horizontalno gibanje, ali reduciran faktorom ε_1.

$T \leq 0{,}15s$ $\quad \varepsilon_1 = 0{,}7$
$0{,}15s < T < 0{,}5s$ $\quad \varepsilon_1 = (11/14)-(4/7)\ T$
$0{,}5s \leq T$ $\quad \varepsilon_1 = 0{,}5$

Da bi se izbjegla opsežna nelinearna analiza sustava, uzima se u obzir mogućnost disipacije energije konstrukcije preko duktilnosti njenih elemenata (i drugih nelinearnih efekata) te se koristi linearna analiza koja se zasniva na računskom spektru odgovora koji je reduciran u odnosu na elastični spektar.
Dakle, duktilne konstrukcije mogu se proračunavati uporabom elastolinearnog modela konstrukcije i reduciranog računskog spektra odgovora. Računski spektar odgovora dobiva se iz elastičnog njegovom redukcijom uz pomoć faktora ponašanja q u kombinaciji s modificiranim eksponentima k_{d1} i k_{d2} koji ovdje iznose k_{d1} = 2/3 i k_{d2} = 5/3. Računski spektar je još i normaliziran u odnosu na ubrzanje gravitacije g pa je definiran prema slijedećim izrazima ili slici 2.20:



Slika 2.20 Računski spektar odgovora

Računski spektar odziva se dobiva iz elastičnog tako da mu se vrijednost η zamijeni recipročnom vrijednošću faktora ponašanja q. Faktor ponašanja predstavlja duktilnost konstrukcije. Izrazi za računski spektar:

$0 \leqslant T \leqslant T_B$ $\quad S_d(T) = \alpha S\left(1 + \frac{T}{T_B}\left(\frac{1}{q}\beta_0 - 1\right)\right)$ (2.16)

$T_B \leqslant T \leqslant T_C$ $\quad S_d(T) = \alpha \frac{1}{q} S\beta_0$ (2.17)

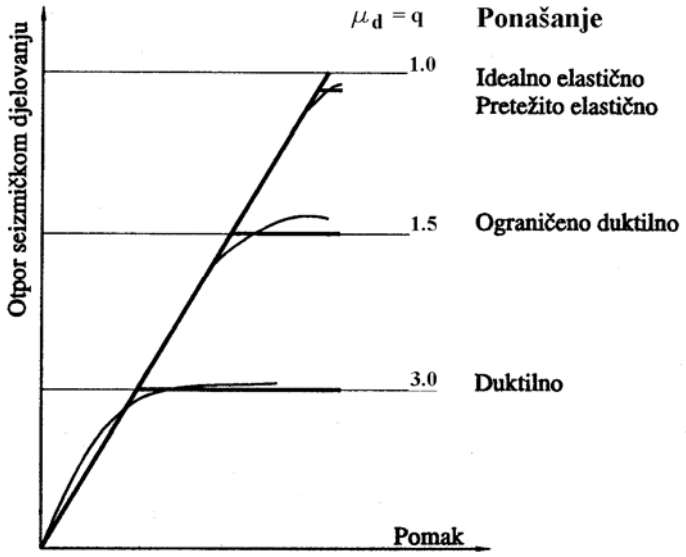
$T_C \leqslant T \leqslant T_D$ $\quad S_d(T) = \alpha \frac{1}{q} S\beta_0 \left(\frac{T_C}{T}\right)^{kd1}$; $S_d \geq 0{,}2\alpha$ (2.18)

$T_D \leqslant T$ $\quad S_d(T) = \alpha \frac{1}{q} S\beta_0 \left(\frac{T_C}{T_D}\right)^{kd1} \left(\frac{T_D}{T}\right)^{kd2}$; $S_d \geq 0{,}2\alpha$ (2.19)

$\alpha = \frac{a_g}{g}$ -odnos računskog ubrzanja tla i gravitacionog ubrzanja.

q-faktor ponašanja

Faktor ponašanja odražava duktilnost konstrukcije, odnosno njenu sposobnost da prihvaća reducirane seizmičke sile bez krhkih lomova u postelastičnom području deformiranja. Sadrži u sebi podatak o vrsti elementa, vrsti gradiva i duktilnosti. Općenito se određuje prema slici 2.21.



Slika 2.21 Seizmičko ponašanje vezano uz faktor ponašanja

U slučajevima visoke seizmičnosti nastoji se postići što racionalnija građevina pa je poželjno građevinu projektirati za duktilno ponašanje. To se postiže konstrukcijskim i drugim mjerama koje osiguravaju da se takvo ponašanje može i ostvariti.

Eurocode 8 dopušta nepovratne deformacije u području plastičnih zglobova.

Duktilni elementi	Postelastično ponašanje	
	Ograničeno duktilno	Duktilno
Armiranobetonski stupovi		
Vertikalni stup, savijanje	1,5	3,5
Nagnuti štap, savijanje	1,2	2,0
Kratki jaki stup	1,0	1,0
Čelični stup		
Vertikalni stup, savijanje	1,5	3,0
Nagnuti štap, savijanje	1,2	2,0
Normalno podupiranje, stup	1,5	2,5
Ekscentrično podupiranje, stup		3,5
Upornjaci	1,0	1,0
Lukovi	1,2	2,0

Tablica 2.14 Faktor ponašanja q – maksimalne vrijednosti

Faktor ponašanja q može se uzeti prema tablici ako je bezdimenzionalna uzdužna sila $\eta_k = \frac{N_c}{f_c A_c} \le 0.3$. U slučaju $0.3 \le \eta_k \le 0.6$ vrijednosti q se reduciraju.

Za $\eta_k \le 0.3 \qquad q = q_0$

Za $0.3 \le \eta_k \le 0.6 \qquad q = q_0 - \left(\frac{\eta_k}{0.3} - 1\right)(q_0 - 1)$

Kada η_k prelazi vrijednost 0.6 ne dozvoljavaju se plastični zglobovi.

Vrijednosti u tablici se mogu primjenjivati samo za pristupačne plastične zglobove. Ako nisu pristupačni za pregled mora se vrijednost q podijeliti sa 1,4 pri tome da ne bude manji od 1,0. Duktilni stupovi koji su predviđeni za disipaciju seizmičke energije a kod kojih plastični zglobovi nisu pristupačni imaju vrijednost q=2,5 za vertikalne stupove i 1,5 za kose.. Kod stupova na kojima su elastomeri računa se sa q=1,0.

Što se tiče proračuna u primjeni su:

- linearna dinamička analiza-metoda spektra odziva,
- metoda osnovnog tona,
- alternativne linearne metode (analiza spektralnom snagom i analiza vremenskim redovima),
- nelinearna vremenska analiza.

Proračunski model mosta treba biti takav da primjereno prikaže raspodjelu krutosti i mase, tako da se svi značajniji oblici deformiranja i inercijalnih sila ispravno uzmu u obzir pri analizi seizmičkih utjecaja. Za proračun se koriste višemodalna spektralna analiza (metoda računskog spektra odgovora), pojednostavljena spektralna analiza (metoda osnovnog moda) i neke druge (analiza spektralne snage i analiza vremenskog odziva-time history).

Linearna dinamička analiza (Metoda računskog spektra odgovora) obuhvaća ekstreme dinamičkih odgovora svih važnijih oblika osciliranja, a uz primjenu računskog spektra. Ukupni odgovor se dobiva statističkom metodom kombinacije maksimalnih doprinosa oscilacija. Sve oblike osciliranja koji značajno doprinose ukupnom odzivu konstrukcije valja uzeti u obzir. Zbroj efektivnih modalnih masa, za razmatrane svojstvene oblike, treba

iznositi najmanje 90% ukupne mase konstrukcije. Efektivna modalna masa m_k, koja odgovara svojstvenom obliku k, određena je tako da je posmična sila u bazi F_{bk} za ton k, koja djeluje u pravcu seizmičkih djelovanja, izražena kao:

$$F_{bk} = S_d(T_k)m_k g \tag{2.20}$$

Spektralna analiza koristi ordinate proračunskog spektra u zavisnosti od tla. Koristi se u slučajevima kad je dozvoljena linearna analiza. Promatra se ukupan odziv konstrukcije i svi tonovi koji doprinose seizmičkom odgovoru. Utjecaj tonova se kombinira tako da max vrijednost učinka potresa (rezna sila, pomak) utjecaja E iznosi:

$$E = \sqrt{\sum E_i^2} \tag{2.21}$$

gdje je E_i učinak i-tog modalnog odziva.

Vjerojatni maksimalni učinak seizmičkog djelovanja, zbog istodobne pojave seizmičke aktivnosti uzduž osi x, y, z, može se odrediti uporabom neovisnih maksimalnih učinaka seizmičkog djelovanja E_x , E_y i E_z prema izrazu:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \tag{2.22}$$

Alternativno bit će dovoljno točno rabiti za seizmičko djelovanje najopasniju od slijedećih kombinacija:

$$E_x + 0.3E_y + 0.3E_z \tag{2.23}$$

$$0.3E_x + E_y + 0.3E_z \tag{2.24}$$

$$0.3E_x + 0.3E_y + E_z \tag{2.25}$$

gdje su E_x , E_y , E_z seizmička djelovanja u smjeru x, y, z.

*Granična stanja nosivosti- k*ombinacija za seizmičku proračunsku situaciju:

$$S_d = S_d\left[\sum_j (G_{k,j}) + \gamma_I \cdot A_{Ed} + \sum_{i>1} (\psi_{2i} \cdot Q_{k,i}) + P_k\right] \tag{2.26}$$

3 KOMBINACIJE OPTEREĆENJA

Proračunske vrijednosti djelovanja

Proračunske vrijednosti djelovanja dobivaju se množenjem reprezentativnih vrijednosti parcijalnim koeficijentima sigurnosti γ_F. Parcijalnim faktorima uzima se u obzir:

- mogućnost nepovoljnih odstupanja djelovanja
- mogućnost netočnog modeliranja djelovanja
- nepouzdanost u određivanju učinaka djelovanja

Ovi koeficijenti dio su globalnog koeficijenta sigurnosti koji je nužan pri projektiranju konstrukcija. Veličina ovih koeficijenata ovisi o tome koje se granično stanje promatra i o vrsti djelovanja. Parcijalni koeficijenti dani su u tablicama za tri slučaja. Slučaj A koji predstavlja gubitak statičke ravnoteže koristi se na primjer, kada se uzima u obzir ukupna stabilnost. Slučaj B odnosi se na gubitak nosivosti konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata i najčešće se upotrebljava. Slučaj C vezan je uz gubitak nosivosti tla.

Ovdje su prikazani parcijalni koeficijenti sigurnosti koji se koriste za slučaj B i to za granično stanje nosivosti.

Za granično stanje uporabljivosti parcijalni koeficijenti sigurnosti su 1,0 osim kad je određeno drukčije.

Djelovanje	Vrsta djelovanja		
	Stalno	Promjenljivo	Prednapinjanje
	Parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanja γ_F		
	γ_G	γ_Q	γ_P
Nepovoljno	1,35	1,5	1,0 ili 1,1
Povoljno	1,0	0	1,0 ili 0,9

Tablica 3.1 Osnovne vrijednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za slučaj gubitka nosivosti konstrukcije ili elementa

U načelu je koeficijent sigurnosti γ_G za cijelu konstrukciju stalna vrijednost osim kada stalno opterećenje može različito djelovati (povoljno i nepovoljno). Primjer su nosači s prijepustima.

U takvom slučaju nepovoljan dio stalnog djelovanja treba pomnožiti s parcijalnim koeficijentom $\gamma_{G,Sup}$ = 1,1, a povoljan s $\gamma_{G,inf}$ = 0,9.

Pri ekscentričnom tlaku kada uzdužna sila reducira armaturu dobivenu od savijanja, valja primjenjivati γ_G = 1,0, u kombinacijama opterećenja.

Kombinacije opterećenja

Kada kombinacija opterećenja uključuje više od jednog promjenljivog djelovanja (npr. korisno opterećenje i vjetar) parcijalni koeficijenti sigurnosti vezani uz komponente promjenljivog djelovanja mijenjaju se i svako promjenljivo djelovanje osim onog najdominantnijeg, množi se sa koeficijentom kombinacije ψ. Ako nije jasno koje promjenjivo djelovanje ima najveći utjecaj, sve kombinacije trebaju biti uzete u obzir. Vrijednost koeficijenata kombinacije ovisi o prilikama, vrsti opterećenja, i korištenju zgrade ili općenito konstrukcije.

Promjenjivo djelovanje	Za vrijednost u kombinaciji ψ0	Za čestu vrijednost ψ1	Za nazovi- stalnu vrijednost ψ2
Uporabna opterećenja u zgradama			
domaćinstva, stambene prostorije	0.7	0.5	0.3
uredi	0.7	0.5	0.3
prostori za veće skupove ljudi	0.7	0.7	0.6
trgovina	0.7	0.7	0.6
skladišta	1.0	0.9	0.8
Prometna opterećenja u zgradama			
Težine vozila $\leq$ 30 kN	0.7	0.7	0.6
Težine vozila $\leq$ 160 kN	0.7	0.5	0.3
Krovovi	0.0	0.0	0.0
Opterećenje vjetrom na zgrade	0.6	0.5	0.0
Opterećenje snijegom	0.6	0.2	0.0
Temperatura (ne i požar) u zgradama	0.6	0.5	0.0

Tablica 3.2 Koeficijenti kombinacije

Granična stanja nosivosti

Rijetka proračunska kombinacija:

$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(\gamma_{G,j}\cdot G_{k,j}\right) + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1}\left(\gamma_Q \cdot \psi_{0,i}\cdot Q_{k,i}\right) + \gamma_p \cdot P_k\right] \quad (3.1)$$

Česta proračunska kombinacija:

$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(\gamma_{G,j}\cdot G_{k,j}\right) + \psi_{11} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1}\left(\cdot \psi_{2,i}\cdot Q_{k,i}\right) + A_d + \gamma_p \cdot P_k\right] \quad (3.2)$$

Nazovistalna proračunska situacija:

$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(G_{k,j}\right) + \sum_{i>1}\left(\psi_{2i}\cdot Q_{k,i}\right) + P_k\right] \quad (3.3)$$

Seizmička proračunska situacija:

$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(G_{k,j}\right) + \gamma_I \cdot A_{Ed} + \sum_{i>1}\left(\psi_{2i}\cdot Q_{k,i}\right) + P_k\right] \quad (3.4)$$

- $G_{k,j}$,$Q_{k,i}$: karakteristične veličine za stalno i promjenljivo opterećenje
- $Q_{k,1}$: karakteristična veličina nepovoljnog jedinog ili prevladavajućega promjenljivog djelovanja kad istodobno djeluje više promjenljivih opterećenja
- P_k: karakteristična veličina prednapinjanja
- $\psi_{0,i}$: koeficijenti kombinacije za promjenljiva djelovanja

Granična stanja uporabljivosti

Rijetka kombinacija:
$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(G_{k,j}\right) + Q_{k,1} + \sum_{i>1}\left(\psi_{0,i}\cdot Q_{k,i}\right) + P_k\right] \quad (3.5)$$

Česta kombinacija:
$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(G_{k,j}\right) + \psi_{11}\cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1}\left(\cdot \psi_{2,i}\cdot Q_{k,i}\right) + P_k\right] \quad (3.6)$$

Nazovistalna kombinacija:
$$S_d = S_d\left[\sum_j \left(G_{k,j}\right) + \sum_i\left(\psi_{2i}\cdot Q_{k,i}\right) + P_k\right] \quad (3.7)$$

Pojednostavnjena provjera konstrukcija zgrada

Iz prethodnog poglavlja vidljiv je velik broj mogućih kombinacija, od kojih svaka zahtijeva odvojeno proučavanje i analizu. Na sreću, pojednostavnjeni pristup je moguć za uvjete koji su iz prethodnog iskustva poznati kao kritični, i ovakav pristup trebao bi biti zadovoljavajući pri projektiranju većine zgrada.

HRN ENV 1991-1 uključuje pojednostavnjenje za konstrukcije zgrada u normalnim uvjetima. Pri tome se ukidaju koeficijenti kombinacije ψ i koriste modificirani parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanja. Ovi izrazi uključuju jedno stalno djelovanje, koje općenito podrazumijeva vlastitu težinu. Stalno djelovanje kombinira se s odgovarajućim promjenljivim opterećenjem, uporabnim, snijegom i vjetrom. Za jednostavne podne i

krovne konstrukcije dominantno djelovanje je gravitacijsko (vlastita težina i uporabno opterećenje za podove, vlastita težina i snijeg za krovove), ali za okvirne konstrukcije mora se obavezno uzeti u obzir i dodatno opterećenje vjetrom. Tako su tipične kombinacije opterećenja, za slučajeve gdje su sva djelovanja nepovoljna, dane za:

-granično stanje uporabljivosti:

stalno + uporabno (ili snijeg): $G_k + Q_k$
stalno + uporabno (ili snijeg) + vjetar: $G_k + 0{,}9 \Sigma Q_k$

-granično stanje nosivosti:

stalno + uporabno (ili snijeg): $1{,}35\ G_k + 1{,}5\ Q_k$
stalno + uporabno (ili snijeg) + vjetar: $1{,}35\ G_k + 1{,}35 \Sigma Q_k$

U nekim slučajevima, određena opterećenja mogu imati povoljno djelovanje. Na primjer, stalno opterećenje može pomagati u otpornosti od prevrtanja ili vjetra, i uporabno opterećenje u srednjem rasponu kontinuirane grede može ublažiti savijanje u susjednim rasponima. U ovim slučajevima niža vrijednost (inferiorna – inf) parcijalnog koeficijenta sigurnosti treba se koristiti uz povoljno djelovanje. U praksi, za uvjete koje odgovaraju klasi B, uporabna opterećenja koja su povoljna jednostavno se zanemaruju ($\gamma_{inf} = 0$) dok se za stalna djelovanja otporna na učinke vjetra koristi parcijalni koeficijent 1,0.

4 LITERATURA

[1] Tehnički propis za betonske konstrukcije, NN 101/05
[2] HRN ENV 1991-1 EUROKOD 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 1. dio: Osnove projektiranja, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2005.
[3] HRN ENV 1992-1-1 EUROKOD 2: Projektiranje betonskih konstrukcija – 1.1 dio: Opća pravila i pravila za zgrade, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2004.
[4] Jure Radić i suradnici: Betonske Konstrukcije – Priručnik, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, SECON HNDK, Andris, Zagreb, 2006.
[5] Jure Radić i suradnici: Betonske Konstrukcije – Riješeni primjeri, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Andris, Zagreb, 2006.
[6] Ivan Tomičić: Betonske konstrukcije, DHGK, Zagreb, 1996.