

Određivanje karakterističnog opterećenja snijegom

Ksenija Zaninović, Marjana Gajić-Čapka, Boris Androić, Ivica Džeba, Darko Dujmović

Ključne riječi

tipična gustoća snijega, maksimalna visina snijega, karakteristično opterećenje snijegom, snježne klimatske zone

K. Zaninović, M. Gajić-Čapka, B. Androić, I. Džeba, D. Dujmović

Pregledni rad

Određivanje karakterističnog opterećenja snijegom

Opisana su istraživanja karakteristika snježnog režima, obavljena u skladu s preporukama europske norme za opterećenje snijegom ENV 1991-2-3:1995 te s meteorološkom praksom. Pomoću podataka o sadržaju vode u snijegu i visine snježnog pokrivača određeno je karakteristično opterećenje snijegom, tj. opterećenje koje se može očekivati jednom u 50 godina. Analizom promjena dobivenih vrijednosti procjena s nadmorskom visinom definirane su četiri snježne klimatske zone u Hrvatskoj.

Key words

typical snow density, maximum snow height, typical snow load, snow-related climatic zones

K. Zaninović, M. Gajić-Čapka, B. Androić, I. Džeba, D. Dujmović

Subject review

Determination of a typical snow load

The study of snow regimen characteristics, conducted in accordance with the European standard for snow load ENV 1991-2-3:1995 and in keeping with meteorological practice, is described. Typical snow load, i.e. load that can be expected once in 50 years, was defined on the basis of information on the water content in snow and on the height of snow cover. Four snow-related climatic zones in Croatia were determined based on analyses of changes registered at various altitudes.

Mots clés

densité typique de neige, hauteur maximale de neige, charge caractéristique de neige, zone climatique de neige

K. Zaninović, M. Gajić-Čapka, B. Androić, I. Džeba, D. Dujmović

Ouvrage de synthèse

Détermination de la charge caractéristique de neige

Les études portant sur les caractéristiques du régime de neige, faites conformément aux recommandations de la norme européenne pour la charge de neige ENV 1991-2-3:1995, et en conformité avec la pratique météorologique, sont décrites. La charge typique de neige, c'est-à-dire la charge dont on peut s'attendre une fois tous les cinquante ans, a été déterminée sur la base des informations sur la quantité d'eau dans la neige et sur la hauteur de la neige. Quatre zones climatiques de neige ont été définies pour Croatie par l'analyse des variations des paramètres estimés en fonction de l'altitude.

Ключевые слова:

типичная плотность снега, максимальная высота снега, характеристическая нагрузка снегом, снеговые климатические зоны

K. Занинович, М. Гаич-Чапка, Б. Андрич, И. Джеба, Д. Дуймович

Обзорная работ

Определение характеристической нагрузки снегом

В работе описаны исследования характеристик снегового режима, осуществленные в соответствии с рекомендациями европейской нормы по нагрузке снегом ENV 1991-2-3:1995 и с метеорологической практикой. С помощью данных о содержании воды в снеге и высоты снежного покрова определена характеристическая нагрузка снегом т.е. нагрузка, ожидаемая раз в пятьдесят (50) лет. Анализом изменений полученных значений оценок с высотой над уровнем моря определены четыре снеговые климатические зоны в Хорватии.

Schlüsselworte:

typische Schneedichte, grösste Schneehöhe, charakteristische Schneebelastung, Schnee-Klimazonen

K. Zaninović, M. Gajić-Čapka, B. Androić, I. Džeba, D. Dujmović

Übersichtsarbeit

Bestimmung der charakteristischen Schneebelastung

Beschrieben sind Ermittlungen der Charakteristiken des Schneeregimes, durchgeführt im Einklang mit der ENV 1991-2-3:1995, betreffend die Schneebelastung, sowie nach der meteorologischen Praxis. Mit Hilfe der Angaben über den Wassergehalt im Schnee und dessen Höhe bestimmte man die charakteristische Schneebelastung, d.h. die Belastung die einmal in 50 Jahren erwartet werden kann. Auf Grund einer Analyse der Änderungen der gewonnenen Werte, abhängig von der Höhe über dem Meeresspiegel, definierte man vier Schnee-Klimazonen in Kroatien.

Autori: Mr. sc. **Ksenija Zaninović**, dipl. ing. fiz.; dr. sc. **Marjana Gajić-Čapka**, dipl. ing. fiz., Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb; prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Ivica Džeba**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Darko Dujmović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

1 Uvod

Snijeg u mnogim europskim područjima jedno je od važnijih djelovanja na konstrukciju. To djelovanje ima izrazito promjenjiv, nepredvidiv i specifičan karakter, što jako varira ovisno o klimatskim uvjetima pojedinih geografskih regija. Ovisno o geografskim i visinskim područjima snijeg se zadržava kraće ili dulje vrijeme, a ponegdje gotovo trajno. Različitosti pojave snijega imat će utjecaja na način statističke obrade izmjerenih podataka.

Konstrukcije krovova s malom vlastitom težinom posebno su ugrožene snijegom koji je velik dio ukupnog opterećenja. Pojava snijega većeg opterećenja od usvojenog u proračunu može dovesti do oštećenja ili čak rušenja konstrukcije. Opterećenje snijegom odnosno djelovanje snijega na konstrukciju zavisi od klimatskih uvjeta: vanjske temperature zraka, učestalosti i intenziteta kiše, izloženosti konstrukcije suncu, snježnog nanosa od vjetra, oblika krova, zagrijavanja krova zbog grijanja zgrade, načina topljenja snijega itd. Stoga za određivanje opterećenja snijegom pri dokazu sigurnosti konstrukcije treba točno uzeti u obzir regionalne klimatske prilike. Da bi se odredilo opterećenje snijegom na konstrukciju potrebna su mnogobrojna mjerenja različitih parametara koja se provode na meteorološkim postajama. Općenito se može reći da se određivanje računskog opterećenja snijegom na konstrukciju za pojedina područja može provesti u četiri koraka.

Prvo se odredi opterećenje snijegom na tlu. Pri tome su visina i gustoća snježnog pokrivača dvije slučajne veličine. Velike razlike postoje između "vlažnog" i "suhog" snijega i snijega koji se kraće ili dulje zadržava na tlu. Iz izmjerene visine snijega i empirijski izračunane gustoće mogu se dobiti vrlo nepouzdana rezultati opterećenja. Pouzdanija je metoda dobivanja vrijednosti težine ekvivalentnoga vodenog stupca dobivenog iz otapanja snježnih slojeva. Nažalost, takvi klimatološki parametri ponekad nedostaju ili pak nisu sustavno mjereni.

U drugom se koraku za određivanje karakterističnog opterećenja snijegom na tlu s_k (kN/m^2) primjenjuju kriteriji iz matematičke teorije vjerojatnosti. Definiira se prosječni povratno razdoblje izražen u godinama, pa se na taj način daje izričaj određene vjerojatnosti s kojom u jednoj godini neće biti prekoračeno karakteristično opterećenje snijegom na tlu.

Treći je korak određivanje zona različitih opterećenja snijegom za područje koje se analizira. Pojedine zone opterećenja snijegom određuju se prema vertikalnim gradijentima opterećenja snijegom odnosno njihovoj ovisnosti o nadmorskoj visini.

Četvrti korak promatra dobivene vrijednosti s_k na krovu. Ovaj je snijeg, iz različitih razloga, drugačijih karakte-

ristika od snijega na tlu. Uzima se u obzir izloženost krova snježnom pokrivaču i različite mogućnosti topljenja snijega s obzirom na zagrijavanje krova od grijanja zgrade i izloženost djelovanju sunca. Također se uzima u obzir mogućnost gomilanja snijega na nepovoljnim mjestima krova. Za različite oblike krovova uvode se koeficijenti oblika opterećenja krova snijegom.

2 Dosadašnja neujednačena razina sigurnosti s obzirom na opterećenje snijegom

2.1 Uzroci rušenja

Dosadašnje norme propisivale su opterećenje snijegom koje se nije temeljilo na klimatskim karakteristikama područja Hrvatske, već je uglavnom bilo preuzeto iz norma srednjoeuropskih zemalja (Njemačka). Te vrijednosti mogu se značajno razlikovati od onih koje se pojavljuju na području Hrvatske, tako da su se dobivale vrlo neujednačene sigurnosti. Konstrukcije su bile ili nesigurne ili pak neekonomične. Nepouzdana određivanje opterećenja snijegom naročito je utjecalo na lagane konstrukcije kod kojih je vlastita težina relativno mala u odnosu prema opterećenju snijegom.

Prema podacima navedenim u [1] za pojave velikih snježnih oborina 1990. godine u jednoj su se francuskoj regiji srušili mnogi krovovi. U 85% slučajeva radilo se o čeličnim konstrukcijama dok su u 15% slučajeva u pitanju bile drvene konstrukcije. Analize provedene u Njemačkoj i Francuskoj dale su ove podatke o uzrocima rušenja krovova od opterećenja snijegom:

- razina sigurnosti laganih konstrukcija smanjena je u odnosu na one teže
- loš projekt (odnosi se naročito na dimenzioniranje tlačnih elementa)
- slaba kvaliteta izvedenih radova
- neadekvatno proračunsko opterećenje zbog zanemarivanja lokalnog gomilanja, zanemarivanje pojave kiše nakon padanja snijega, nisu uzete u obzir pojave iznimno velikog snijega
- loše održavanje konstrukcija.

2.2 Troškovi nastali zbog rušenja krovova

Obično je vrlo teško dobiti točne podatke o troškovima koji su nastali kao posljedica rušenja krovova zbog opterećenja snijegom. Razlog je u činjenici da su izvori takvih podataka vrlo različiti izvođači radova, osiguravajuća društva, državne institucije itd. Prema samo nekim navodima u [1] može se ustanoviti da je uz pojavu snježnih oborina uzrokom rušenja krovova bila i kiša koja je pala na snježni pokrivač. Primjeri takvih troškova prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Troškovi kao posljedica rušenja krovova zbog snijega

Datum događaja	Zona	Vrsta građevine	Cijena (mil. FF)	Oborina
11.-12./1./81.	Ande	poljoprivredna poslovna		55 cm snijega + 50 mm kiše
11.-12./1./81.	Pyrenees orientales	staklenici 230 - srušeno 240 - oštećeno	215	11 cm snijega + 71 mm kiše
30.-31./1./86.	Pyrenees orientales	staklenici 91 - srušeno 110 - oštećeno	115	10 cm snijega + 110 mm kiše

3 Snijeg na tlu

3.1 Klimatske podloge za određivanje opterećenja snijegom

Početne norme u Europi za određivanje opterećenja snijegom DIN 1055, dio 5 iz 1936. godine preporučivale su vrijednost $0,75 \text{ kN/m}^2$ što je većina zemalja brzo prihvatila. To je bio tipičan primjer determinističkog pristupa određivanju opterećenja. Iskustvo je pokazalo da je takvo opterećenje bilo nepouzdanost, što su kasnije statističke analize i potvrdile.

Pokazalo se da je računsko opterećenje snijegom od $0,75 \text{ kN/m}^2$ u velikom broju regija premalo. Pristupilo se skupljanju i obradi izmjerenih podataka. Uvodi se novo promjenjivo djelovanje na konstrukcije uz suvremeni pristup teorije sigurnosti na kojoj se temelje europske norme. Međutim, pri određivanju karakterističnih vrijednosti opterećenja snijegom s_k na tlu, ne mogu se izbjeći sve nepouzdanosti koje mogu biti vezane uz statističku analizu ili primijenjeni model djelovanja. Te nepouzdanosti su:

- statistička nepouzdanost
 - ⇒ tehnika mjerenja
 - ⇒ lokacija mjerne postaje
- nepouzdanost modela
 - ⇒ pretvaranje visine snježnog pokrivača u opterećenje snijegom
 - ⇒ odabir raspodjele, probabilistički model
 - ⇒ određivanje povratno razdoblje
 - ⇒ podjela na području prema opterećenju snijegom.

Statističke nepouzdanosti proizlaze uglavnom iz različitosti postupka mjerenja i razmještaja meteoroloških postaja. Potrebno je istaknuti da za određivanje s_k manji utjecaj imaju statističke nepouzdanosti od onih zbog usvojenoga matematičkog modela. Podaci mjerenja oborine postoje za različite nacionalne meteorološke stanice već duže vrijeme, ali se nije razlikovala kiša od snijega. Tek 1983. godine WMO (*World Meteorological Organisation*)

dao je smjernice za instrumente i metode mjerenja [2]. Međutim, svi podaci potrebni za određivanje opterećenja snijegom ne pripadaju standardnim mjerenjima, pa su stoga ti podaci ponekad nepotpuni. Mjerenje ekvivalentnog stupca vode od otopljenog sloja snijega pouzdanije je od opterećenja dobivenog od izmjerene visine snijega i procijenjene njegove gustoće. Ipak, još uvijek se pretežno određivanje s_k temelji na ovom drugom načinu jer za to postoje na raspolaganju dugogodišnji podaci mjerenja. Pri transformaciji izmjerenih visina snijega u opterećenje potrebno je odrediti prosječnu gustoću koja zavisi od: visine snježnog pokrivača, temperature zraka, vjetrovitosti, izloženosti suncu, vlažnosti zraka, paloj kiši na sloj snijega i vremenu zadržavanja snijega na tlu.

Za sada ne postoji fizikalni model kojim bi se moglo izračunati opterećenje snijegom na temelju gustoće dobivene u ovisnosti svim navedenim meteorološkim uvjetima. Zato se valja prilagoditi izmjerenim podacima, a to su visine snježnog pokrivača, a s pomoću empirijskih izraza procijeniti gustoću i transformirati visine snježnog pokrivača u opterećenje snijegom. Tako na primjer JCSS (*Joint Committee on Structural Safety*) daje sljedeću preporuku [3]:

$$\rho = 3 - 2 \cdot \exp(-1,5 \cdot d) \quad (1)$$

gdje je ρ - prosječna vrijednost gustoće, d - visina snježnog pokrivača u metrima.

U radu [4] Gränzer predlaže izraz:

$$\rho = \frac{\rho_e \cdot \mu}{d} \ln \left[1 + \frac{\rho_0}{\rho_e} \left(\exp \frac{d}{\mu} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

gdje je

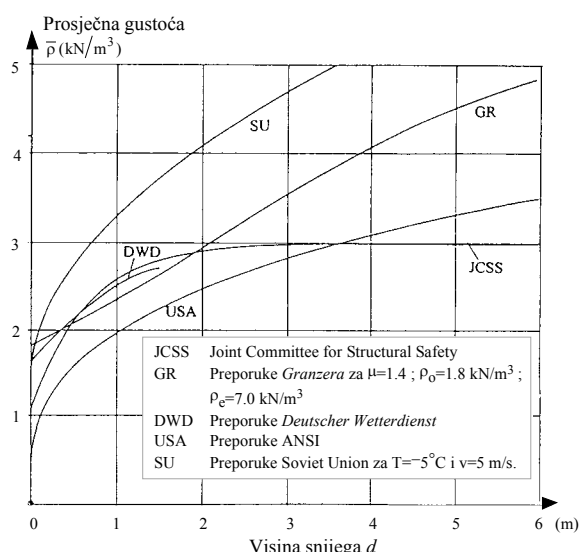
- ρ - srednja gustoća (kN/m^3)
- ρ_e - najveća gustoća (kN/m^3)
- ρ_0 - najmanja gustoća (kN/m^3)
- d - visina snježnog pokrivača (m)
- μ - faktor "mjerila" za visinu (m).

Na slici 1. prikazane su prosječne vrijednosti gustoće snježnog pokrivača ovisno o visini snijega prema različitim prijedlozima.

U tablici 2. navedene su prosječne gustoće snijega prema ENV 1991-2-3:1995 [5].

Tablica 2. Prosječne gustoće snijega

Vrsta snijega	Gustoća [kN/m^3]
Novi snijeg	1.0
Snijeg koji leži više sati ili dana	2.0
Stari snijeg (leži više tjedana ili mjeseci)	2.5 - 3.5
Vlažni snijeg	4.0



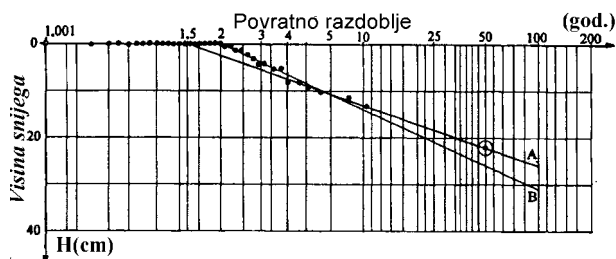
Slika 1. Prosječne vrijednosti gustoće snježnog pokrivača ovisno njegovoj visini

3.2 Statistička analiza

Postupak statističke analize podataka o snijegu temelji se na podacima s meteoroloških postaja. Izmjerene podatke potrebno je kontrolirati, kako bi u daljnju statističku obradu ušli pouzdani podaci. Posebno su važna svakodnevna mjerenja na temelju kojih se određuju apsolutni godišnji maksimumi. Skup ekstremnih vrijednosti podvrgava se nekoj razdiobi prikladnoj za ekstremne vrijednosti. Ako se opterećenje snijegom dobiva preračunavanjem izmjerenih visina snježnog pokrivača, onda se takva konverzija radi prije početka statističke obrade. Ako se radi obrnuto, dobivaju se manje pouzdani podaci. Smatra se da je potrebno raspolagati meteorološkim podacima za razdoblje 40 - 50 godina te da se ne bi smjelo raditi s nizovima kraćim od 20 godina. Obično se za funkciju gustoće odabire Gumbelova ili Jenkinsonova razdioba [6], [7], a neki autori navode da su za analizu snježnog pokrivača prikladne lognormalna i Frechétova razdioba [8]. Prema nekim prijedlozima [9] za planinska se područja za koeficijent varijacije može uzeti vrijednost $V \cong 0,3$, dok je primjereno za područja uz more uzeti $V \cong 1,0$. Veći koeficijent varijacije znači i veće računsko opterećenje snijegom. Ne preporučuje se koeficijent varijacije opterećenja snijegom preuzeti iz literature, nego bi se on trebao temeljiti na statističkoj analizi promatrane regije.

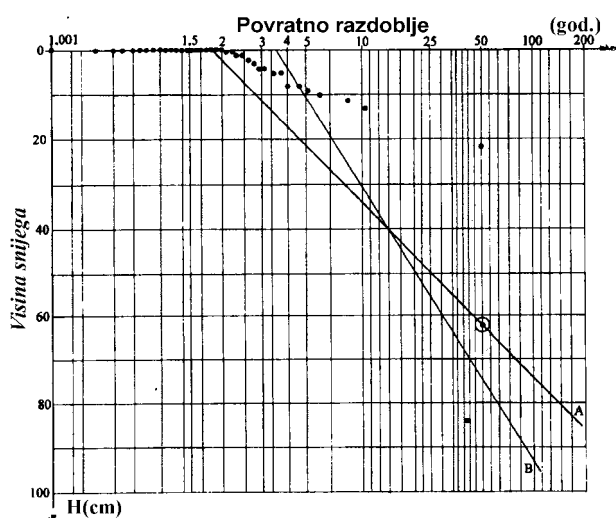
U statističkoj obradi podataka vezanoj uz određivanje opterećenja snijegom vrlo se često pojavljuju specifični problemi. Takvi su problemi vezani uz činjenicu da za neko područje postoje zime bez snijega, zatim dolaze zime s relativno oskudnim snježnim oborinama, a onda jedne zime padne neuobičajeno veliki snijeg. Ovisno o regionalnim karakteristikama pojave snijega postoje

možnosti različitih statističkih obrada koje su prikazane na slikama 2. i 3.



- Gumbelova raspodjela (linija A)
- binomna raspodjela (linija B prilagođena samo za "snježne" zime)

Slika 2. Analiza bez uzimanja u obzir iznimno velikog snijega



- Gumbelova raspodjela (linija A)
- binomna raspodjela (linija B prilagođena samo za "snježne" zime)

Slika 3. Analiza uključujući iznimno veliki snijeg

3.3 Karakteristično opterećenje snijegom s_k

Karakteristično opterećenje snijegom na tlu s_k (kN/m^2) prema preporukama ENV 1991-2-3:1995 jest ono čija vjerojatnost pojave iznosi 98%, a vjerojatnost prekoračenja 2% u jednoj godini, odnosno ono opterećenje snijegom koje se može očekivati jednom u 50 godina. Ako se za raspodjelu odabere Gumbelova funkcija onda se može napisati

$$s_k = \frac{-\ln[-\ln(0.98)]}{\alpha} + u \quad (3)$$

gdje je u parametar položaja (kN/m^2), a α parametar osipanja (kN/m^2 , $\alpha > 0$).

Prema normi ENV 1991-2-3:1995, opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema izrazu

$$s = s_k \cdot \mu_i \cdot C_0 \cdot C_t \quad (4)$$

gdje je

s_k - karakteristično opterećenje snijegom na tlu

μ_i - koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu

C_0 - koeficijent izloženosti (uglavnom $C_0 = 1$)

C_t - temperaturni koeficijent zbog zagrijavanja zgrade (uglavnom $C_t = 1$).

3.4 Povratno razdoblje i uporabni vijek konstrukcije

Vrlo je važno razlikovati pojmove kao što su: povratno razdoblje i uporabni vijek konstrukcije. Na tablici 3. prikazani su uporabni vjekovi za konstrukcije pojedinih klasa [10].

Tablica 3. Uporabni vijek konstrukcija

Klasa	Zahtijevani uporabni vijek [godine]	Primjer
1.	[1 - 5]	privremene konstrukcije
2.	[25]	konstrukcijski elementi koji se mogu zamijeniti
3.	[50]	građevine visokogradnje i slične
4.	[100]	monumentalne građevine, mostovi i ostale građevine

Opterećenje snijegom definirano je u normama samo za klase 3. i 4. iz tablice 3. Tako na primjer za klasu 3. stvarna vrijednost da će s_k biti premašen za povratno razdoblje od 50 godina i usvojeni uporabni vijek od 50 godina može se lagano izračunati i iznosi 63%. Povratno razdoblje od 50 godina na kojem se temelji određivanje s_k samo je nominalno. Uzimajući u obzir parcijalni faktor na strani djelovanja, realno povratno razdoblje je dulje. Neprihvatljivo je uzeti opterećenje snijegom na privremene konstrukcije iz tablice 3., klasa 1., koje je manje od vrijednosti za klasu 3. Zadaća teorije sigurnosti jest izbjegavanje gubitaka života i materijalnih dobara, što znači da treba prihvaćati rizike koji su najmanja ali još uvijek normom prihvatljivi. To je razlog da se za klasu 1. konstrukcija ne preporučuje smanjiti opterećenje snijegom. Smanjenje razine sigurnosti može se argumentirano opravdati samo ako otkazivanje konstrukcije daje mala oštećenja, i ako su male posljedice tog otkazivanja, te ako se predviđaju djelotvorni pregledi konstrukcije. Neke druge norme ili dokumenti prilagodbe ENV nacionaloj normi NAD (*National Application Document*) predviđaju povratno razdoblje različito od 50 godina. Tako se na primjer u Njemačkoj povratno razdoblje uzima 20 godina, a u Norveškoj se usvaja 5 godina. Da bi se takve norme prilagodile normi ENV, potrebno je vrijednosti s_k uskladiti s obzirom na povratno razdoblje od

50 godina. Za povratno razdoblje od n -godina i Gumbelovu raspodjelu vrijedi:

$$s_k = s_n \cdot \left[\frac{(1 + 2.5923 \cdot V)}{1 - V \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot [\ln(-\ln(1 - P_n)) + \gamma]} \right] \quad (5)$$

gdje je

s_k - karakteristično opterećenje snijegom na tlu uz povratno razdoblje od 50 godina (kN/m²)

s_n - opterećenje snijegom na tlu uz povratno razdoblje od n godina

P_n - godišnja vjerojatnost prekoračenja (odgovara otprilike $1/n$ ako je n pripadno povratno razdoblje u godinama)

V - koeficijent varijacije

$\gamma = 0,57722$ – Eulerova konstanta.

U izrazu (5) utjecaj koeficijenta varijacije opterećenja snijegom nije velik tako da se u nedostatku drugih podataka može usvojiti $V \cong 0,5$. U tom slučaju izraz (5) može se napisati ovako:

$$s_k = \frac{s_n}{0,3375 - 0,1698 \cdot \ln[-\ln(1 - P_n)]} \quad (6)$$

Ako nacionalne norme dopuštaju, mogu se vjerojatnosti prekoračenja opterećenja snijegom na tlu proračunati:

- za konstrukcije za koje se smatra da mogu preuzeti veći rizik prekoračenja
- za konstrukcije kod kojih je potrebna viša razina sigurnost od uobičajene.

Također, može se predvidjeti preračunavanje opterećenja snijegom na tlu za druga povratna razdoblja ako je dana odgovarajuća funkcija raspodjele i postoje odgovarajući zahtjevi u NAD-u.

4 Djelovanje snijega na konstrukciju

4.1 Koeficijent oblika za različite tipove krovova

Dosta preporuka u normi ENV 1991-2-3 s obzirom na snijeg koji djeluje na konstrukciju, odnosno za koji se predviđa da će se pojaviti na krovu, preuzete su od ISO 4355 od 1981. godine [11]. Ali, neki koeficijenti navedeni u ISO normi ne mogu biti direktno usvojeni i u europskoj normi jer su dobiveni istraživanjima u područjima koja su klimatski različita od europskih. To je razlog da je prije izdavanja valjanih norma EN potrebno definirati i provesti europski istraživački program za određivanje snježnih zona u Europi. Na taj će se način bolje moći ukloniti nepouzdanosti u određivanju opterećenja snijegom na krovu.

Nepouzdanosti pri određivanju djelovanja snijega na konstrukciju su:

- Statistička nepouzdanost
 - ⇒ prikupljanje podataka
 - ⇒ tehnika mjerenja
 - ⇒ tip krova
- Nepouzdanost modela
 - ⇒ pretvaranje visine snježnog pokrivača u opterećenje
 - ⇒ odabir raspodjele ili modela za faktor konverzije ili za opterećenje snijegom na krovu
 - ⇒ model opterećenja za različite tipove krovova.

Već sada se može utvrditi da nedostaju europska istraživanja o parametrima koji definiraju snijeg na krovu, a koja se temelje na probabilističkom pristupu. Iz literature se vidi da su takva istraživanja započela u SAD-u, Kanadi i sjevernoj Europi. Koeficijenti oblika za različite tipove krovova mogu se vidjeti u glavi 7. ENV norme [5].

4.2 Koeficijenti izloženosti i temperaturnog djelovanja

Vrijednosti koeficijenta izloženosti krova klimatskim uvjetima naročito su detaljno istraženi u radovima [12] i [13]. Preporučene vrijednosti mogu se vidjeti u tablici 4.

Tablica 4. Koeficijenti izloženosti okolnim uvjetima

	Krovovi		
	Zaštićeni *	Poluizloženi *	Izloženi vjetru *
Lutes (1970.) (Kanada)	0,9	0,6	0,3
American National Standard (1972.)	0,8	-	0,6
O'Rourke, Koch, Redfield (1983.)	0,78	0,59	0,53

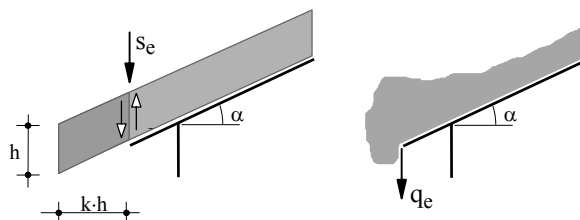
* Definicije nisu harmonizirane različitosti istraživanja

Vrijednosti iz tablice 4. ne mogu biti direktno usvojene za europske regije, pa se u ENV 1991-2-3 u pomanjkanju točnijih podataka predlaže $C_0 = 1$. U budućnosti bi trebalo ustanoviti točnije vrijednosti i uzeti u obzir činjenicu da izraz bude lako prihvatljiv za inženjersku praksu.

Koeficijent temperaturnog djelovanja ovisi o toplinskim karakteristikama krova odnosno o mogućnosti prolaza topline kroz krov. Topljenje snijega na krovu ovisi o njegovu obliku i o uvjetima grijanja u zgradi. Ova dva parametra znatno utječu na visinu i gustoću snježnog pokrivača na krovu. Prema [11] ovaj koeficijent trebao bi biti za negrijanu zgradu 0,70, a za grijanu 0,55. Čekaajući rezultate istraživanja u Europi ENV norma predlaže kao prijelazno rješenje koeficijent temperaturnog djelovanja $C_t = 1$.

4.3 Dijelovi krova s prepustom

Pri dimenzioniranju dijelova krova s prepustom potrebno je dodatno uzeti u obzir snijeg koji je na prepustu (slika 4.).



Slika 4. Snijeg na prepustu krova

S obzirom na oznake dane na slici 4. može se postaviti zahtjev da sila trenja $c \cdot h$ mora biti veća od gravitacijske sile ovješnog snijega, tako da se može napisati:

$$c \cdot h \geq k \cdot h^2 \cdot \gamma \quad \text{što daje } k = \frac{c}{h \cdot \rho} \quad (7)$$

Uz zamjenu $\eta_i \cdot s_k = \rho \cdot h$

gdje su:

s_e - opterećenje snijegom po metru širine prepusta (kN/m)

μ_i - koeficijenti oblika opterećenja snijegom za odgovarajući oblik krova

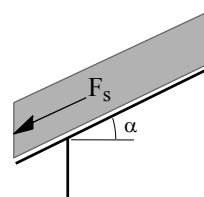
s_k - opterećenje snijegom na tlu (kN/m²)

k - koeficijent koji uzima u obzir nepravilni oblik snijega određen pojedinim normama ovisno o klimi i vrsti pokrova

ρ - gustoća snijega koja se za ovaj proračun dogovoreno može usvojiti 3 kN/m³.

Postavlja se pitanje odabira koeficijenta k s obzirom da ENV norma preporučuje $0 \leq k \leq 2,5$. Tako primjerice u Francuskoj preporučuje $k = 4$ za $\rho = 2 \text{ kN/m}^3$ ili $k = 8$ za $\rho = 4 \text{ kN/m}^3$. U Italiji preporučuje se usvojiti $k = 1$. S obzirom na sličnost klime, u nedostatku detaljnih istraživanja, u Hrvatskoj se može preporučiti $k = 1$.

Što se tiče dimenzioniranja snjegobrana na krovu može se statički sustav prikazati na slici 5.



Slika 5. Opterećenje snijegom za dimenzioniranje snjegobrana

Za dimenzioniranje snjegobrana na krovu (slika 5.), uz pretpostavku da između snijega i krova nema trenja, može se napisati da je sila:

$$F_s = s \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

sa

$s = \mu_i \cdot s_k$ opterećenje snijegom na krovu (kN/m²),

b - tlocrtni razmak između snjegobrana i vrha krova,

α - nagib krova,

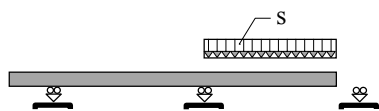
μ_i - koeficijenti oblika opterećenja snijegom za odgovarajući oblik krova.

4.4 Opterećenje snijegom na mostovima

Opterećenje snijegom obično nije važno za mostove. Neke norme to opterećenje ne uzimaju u obzir. Eurokod razlikuje tipove mostova (otvoreni ili natkriveni), a uz to razlikuje radi li se o opterećenju snijegom za montaže ili za fazu uporabe Eurokod 3, dio 2, u točki 2.3.2.1.3. o opterećenju snijegom navodi:

- Opterećenje snijegom treba odrediti ovisno lokaciji mosta.
- Ako se jamči svakodnevno čišćenje snijega, opterećenje snijegom s očišćenih površina može se smanjiti na 30% reprezentativne vrijednosti navedene u ENV 1991-2-1. Za čišćenje snijega treba osigurati provizorije u skladu sa zahtjevima sigurnosti.
- Za dokaz statičke ravnoteže, opterećenje snijegom na pasivnim dijelovima reducirat će se 50%, osim ako provizoriji za čišćenje zahtijevaju drugačija sniženja.
- Opterećenje snijegom i promjenjivo djelovanje ne djeluju istodobno.

Predviđaju se dva računaska stanja, i to ona za montaže ili za uporabe mosta. U fazi montaže treba predvidjeti da ne dođe do gubitka ravnoteže zbog krajnjega graničnog stanja. Djelovanje snijegom postavlja se na najnepovoljniji položaj (slika 6.).



Slika 6. Primjer nepovoljnog položaja pri opterećenju snijegom

Određivanje opterećenja snijegom na most provodi se prema istom principu kao za krovnu konstrukciju (ENV 1991-2-3, točka 7., slike 7.2. ili 7.3.). Raspodjela opterećenja uzima se kao za čišćenje snijega koje organiziraju ljudi ili se ono uzima kao da je raspodjela nastala zbog djelovanja vjetrova. Opterećenje snijegom na most iznosi:

$$s = 0,5 \cdot \mu_1 \cdot s_k = 0,5 \cdot 0,8 \cdot s_k = 0,4 \cdot s_k \quad (12)$$

Može se pretpostaviti da je montaža mosta prolazna situacija, dakle njegovo trajanje manje je od 5 godina. S obzirom na to da se dopušta redukcija s_k uzimajući u obzir povratno razdoblje od 5 godina (umjesto 50 godina) dobiva se:

$$s_n = [0,3375 - 0,1698 \ln(-\ln(1-P_n))] s_k \quad (13)$$

Ako se $P_n = 0,20$ uvrsti u (13), dobiva se:

$$s_n = 0,59 s_k \quad (14)$$

Konačno se može napisati da vrijednost opterećenja snijegom na most iznosi:

$$s = 0,4 s_n = 0,4 \cdot 0,59 \cdot s_k \cong 0,25 \cdot s_k \quad (15)$$

Dakle, za dokaz sigurnosti mosta u fazi montaže može se uzeti 25% karakterističnog opterećenja snijegom na tlu. Ta vrijednost predložena je u normi ENV 1991-2-3, točka 5.4.

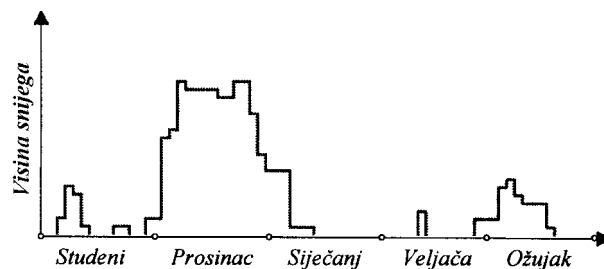
Za razdoblje uporabe mosta vrijedi:

- Za mostove koji nisu natkriveni može se općenito reći da opterećenje snijegom i promjenjivo djelovanje ne djeluju istodobno.
- Za natkrivene se mostove može pretpostavljati da su oba djelovanja istodobna.

Kod nepokretnih mostova općenito je s_k manje od promjenjivog djelovanja i ono nema većeg utjecaja, dok kod mostova koji su pokretni taj utjecaj treba uzeti u obzir i predvidjeti ga u projektnom zadatku.

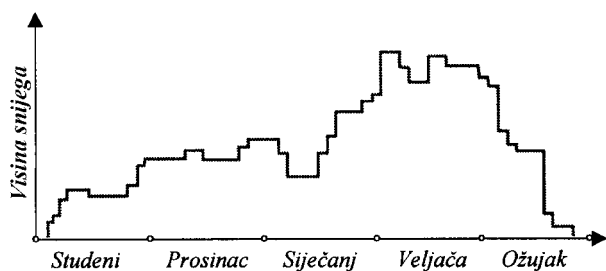
4.5 Jednokratne ili višekratne pojave snijega

Opterećenje snijegom može se promatrati kao događaj koji se pojavi i za kratko vrijeme otopi i onda se može ponovno pojaviti. Takva javljanja snijega nazivaju se jednokratnom pojavom snijega (slika 7.).



Slika 7. Jednokratne pojave snijega

Može se dogoditi da se u duljem vremenskom razmaku snijeg nagomila tako da ne dolazi do njegovog topljenja. U tom razmaku nema vremenskih intervala bez pojave snijega. To se naziva višekratnom pojavom snijega (slika 8.).



Slika 8. Višekratne pojave snijega

Važno je napomenuti da se određivanje koeficijenta oblika opterećenja snijegom koji je predložen u ENV 1991-2-3 (Annex B) temelji na klimi pri kojoj se može pretpostaviti da je pojava snijega događaj jednokratne pojave uz relativno veliku brzinu vjetra.

5 Računske situacije i granična stanja

5.1 Krajnje granično stanje

Prema ENV 1991-1 predviđaju se računski stanja za koje se smatra da su u vezi s djelovanjem snijega:

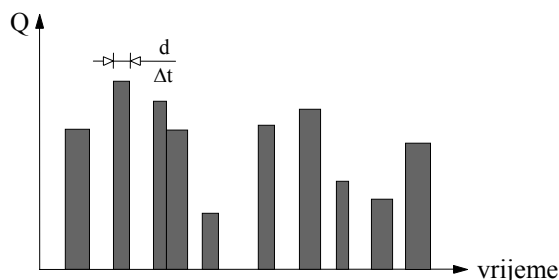
- Stalna stanja koja se odnose na uvjete normalne uporabe.
- Povremena stanja koja se odnose na privremene uvjete konstrukcije.
- Izvanredna stanja koja se odnose na iznimne uvjete kojima je konstrukcija izložena.

U normi se djelovanja definiraju kao: stalna, povremena (djelovanje snijega itd.) i izvanredna (eksplozija itd.). Za posebna klimatska područja nacionalne norme mogu djelovanje snijega svrstati u izvanredna djelovanja. Treba istaknuti činjenicu da je iz aspekta teorije sigurnosti bitnije odabrati odgovarajuće računsko stanje u kojem se nalazi snijeg, nego istraživati "točan" parcijalni faktor na strani djelovanja. Takav je problem opisan u postupku "stvaranje slika opasnosti" (*hazard scenario*) [14]. Smatra se da takva slika opasnosti treba obično pokrivati sljedeća stanja:

- kombinaciju visokog snijega na krovu i horizontalnog ubrzanja od potresa.
- takve posebne uvjete izloženosti vjetru da je jednolika raspodjela snijega rijetka a snježni nanosi su dominantni.
- veliko opterećenje snijegom po krovu za konstrukcije bez zidova (otvorene); visoki snježni pokrivač se zbraja sa horizontalnim djelovanjem vjetra što može uzrokovati otkazivanje konstrukcije.
- takvih opterećenja snijegom na krovove s više razina i posebnih oblika da se može pojaviti lokalno gomilanje snijega.

Ponekad je odabir takvih slučajeva prepušten inženjeru u praksi što predstavlja teškoću jer za to nedostaju norme. Neke norme u tom su pogledu doradene, npr. SIA gdje se u projektu mogu propisati mjere za povećanje razine sigurnosti [15].

S obzirom na vrijeme trajanja djelovanja na konstrukciju, ponekad mogu biti na raspolaganju statistički podaci prema pojednostavljenom modelu [16] (slika 9.).



Slika 9. Primjer pojednostavljenog modela promjene djelovanja u vremenu

U skladu s tim pojednostavljenim modelom elementarni intervali vremena Δt uzimaju se različito za pojedina djelovanja. Za snijeg se može uzeti elementarni interval od 1 tjedna.

Za promjenjivo djelovanje obično se pretpostavlja Gumbelova razdioba:

$$F_Q(x) = \exp \left[- \exp \left\{ -0.577 - \left(\frac{\pi}{\sqrt{6}} \right) \frac{(x - \mu_Q)}{\sigma_Q} \right\} \right] \quad (16)$$

gdje su μ_Q i σ_Q srednja vrijednost i standardna devijacija za povratno razdoblje od 50 godina. Oznaka za karakterističnu vrijednost općenito promjenjivog djelovanja je Q_k . Za snijeg karakteristična vrijednost Q_k temelji se, prema ENV normi, na povratno razdoblje od 50 godina pa se može napisati:

$$F_Q(Q_k) = (1 - 0,02)^{50} \cong 1/e = 0,37 \quad (17)$$

Kombiniranjem izraza (16) i (17) dobiva se:

$$Q_k = \mu_Q - 0,45 \sigma_Q = 1 - 0,45 V_Q \quad (18)$$

gdje je V_Q koeficijent varijacije opterećenja snijegom.

Općenito, računski vrijednost promjenjivog djelovanja Q_d jest:

$$F_Q(Q_d) = \Phi(-\alpha_E \beta) \quad (19)$$

gdje je

$\Phi(\cdot)$ - standardna normalna raspodjela

α_E - faktor senzibiliteta varijable djelovanja prema FORM-u (*First Order Reliability Method*)

β - indeks sigurnosti, tj. operativna vrijednost vjerojatnosti otkazivanja.

Sada se može napisati računski vrijednost promjenjivog djelovanja:

$$Q_d = \mu_Q - 0,45 \cdot \sigma_Q - 0,78 \cdot \sigma_Q \cdot \ln[-\ln \Phi(-\alpha_E \cdot \beta)] \quad (20)$$

Ako se uvrsti $\beta = 3,8$ i $\alpha_E = -0,7 \Rightarrow$

$\Rightarrow \Phi(-\alpha_E \cdot \beta) = \Phi(2,66) = 0,996$, dobiva se prema izrazu (20) sljedeće:

$$Q_d = \mu_Q + 3,86 \sigma_Q = 1 + 3,86 V_Q \quad (21)$$

U slučaju nepouzdanosti modela učinka opterećenja snijegom $\Theta_d/\Theta_{nom} = 1,05$ može se izračunati parcijalni faktor za djelovanje snijega:

$$\gamma_Q = \frac{\Theta_d \cdot Q_d}{\Theta_{nom} \cdot Q_k} = 1,05 \cdot \left(\frac{1 + 3,86 V_Q}{1 - 0,45 V_Q} \right) \quad (22)$$

Ako bi se za odabrani uporabni vijek konstrukcije od 50 godina usvojile različite vrijednosti koeficijenta varijacije opterećenja snijegom, u ovom slučaju uzetih iz [16], mogu se izračunati odgovarajući parcijalni faktori prema izrazu (22):

- snijeg (kontinentalna klima – redovite snježne oborine)
 $V_Q = 0,15 \Rightarrow \gamma_Q = 1,77$
- snijeg (klima uz more – povremene snježne oborine)
 $V_Q = 0,30 \Rightarrow \gamma_Q = 2,67$

Dobiveni rezultati upućuju na vrlo veliki oprez pri usvajanju računskog opterećenja snijegom. Parcijalni faktor u EC1 za snijeg jest $\gamma_Q = 1,50$. S obzirom na dobivene veće parcijalne faktore $\gamma_Q = 1,77$ i $\gamma_Q = 2,67$ proizlazi da je stvarni indeks sigurnosti β niži od zahtjevanog indeksa sigurnosti $\beta = 3,8$ (za $T = 50$ godina).

Za ψ -koeficijent, ENV 1991-1:1994 daje za djelovanje snijegom sljedeće “uokvirene” vrijednosti:

$$\psi_0 = [0,6] \quad \psi_1 = [0,2] \quad \psi_2 = [0].$$

Te se vrijednosti mogu primijeniti kao privremeno rješenje i za Hrvatsku, uz napomenu da bi točnije vrijednosti trebalo dobiti daljnjim istraživanjima.

Pojedine zemlje do usklađivanja ENV i pretvorbe u EN predlažu:

Italija	$\psi_0 = [0,7]$	$\psi_1 = [0,2]$	$\psi_2 = [0]$,
Njemačka	$\psi_0 = [0,5]$	-	-
Francuska	$\psi_0 = [0,77]$	$\psi_1 = [0,15]$	$\psi_2 = [0]$,
Švicarska	$\psi_0 = [0,8]$	ψ_1 i ψ_2 dobiva se iz <i>hazarda</i> .	

5.2 Granično stanje uporabivosti

S obzirom na dokaz sigurnosti za granično stanje uporabivosti potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- funkcionalnost konstrukcije i njezinih elemenata
- udobnost ljudi
- vanjski izgled konstrukcije i njenih dijelova.

Dokaz sigurnosti za ovo granično stanje provodi se slično kao i za krajnje granično stanje što se tiče mjerodavnih kombinacija djelovanja dok se za parcijalne faktore uzimaju drugačije vrijednosti. Reprezentativne vrijednosti opterećenja snijegom ovise o raspršenosti snijega, ali i o trajanju snježnog pokrivača. Oba ova parametra jako su promjenjiva ovisno o klimi u različitim klimatskim područjima. Na malim nadmorskim visinama, Mediteranu i umjerenim područjima snijeg se zadržava na tlu od nekoliko sati do nekoliko dana, a koeficijent varijacije je velik. U hladnim klimama snijeg na tlu može se zadržati i nekoliko mjeseci. Stoga se može očekivati da su velike razlike u reprezentativnim vrijednostima opterećenja snijegom na tlu rezultat različitosti pojedinih klimatskih područja. Za sada takvih ispitivanja nema za europske regije, a iznimka je Švicarska. SIA 160 predviđa za dokaz graničnog stanja uporabivosti pri opterećenju snijegom vrijednosti za kratko i dugo trajanje snijega.

6 Klimatske podloge za Republiku Hrvatsku

6.1 Podaci

Parametri pojave snijega i snježnog pokrivača mjere se u Hrvatskoj u mreži meteoroloških postaja koja je ustrojena u skladu s propisima Svjetske meteorološke organizacije. Broj parametara koji se mjere na nekoj postaji ovisi o kategoriji meteorološke postaje. Podaci o visini snježnog pokrivača u 30-godišnjem razdoblju (1961.-1990.), koje Svjetska meteorološka organizacija preporučuje kao referentno razdoblje za prikaz klime našeg vremena, postoje za 134 postaje u Hrvatskoj. Oni su iskorišteni za određivanje karakterističnog opterećenja snijegom u Hrvatskoj.

Osim podataka o visini snježnog pokrivača, za izračunavanje opterećenja snijegom potrebna je i gustoća snježnog pokrivača. Kako je već rečeno, u nedostatku mjerenih podataka, ova se veličina često procjenjivala različitim metodama. U Hrvatskoj se na 18 meteoroloških postaja, smještenih u nizinskom i planinskom dijelu zemlje, mjeri sadržaj vode u snijegu, s pomoću kojeg se određuje gustoća snježnog pokrivača. Sadržaj vode u snijegu mjeri se svaki peti dan u mjesecu te u dane kada padne barem 10 cm novoga snijega. Visina snježnog pokrivača, mjeri se na zaklonjenom mjestu na kojem nema zaluha snijega i koje nije izloženo direktnom sunčevu zračenju. Uzorak se uzima iz čitavog sloja snježnog pokrivača i kad se snijeg otopi izmjeri se količina vode. Izražava se u mm kao i količina oborine. Gustoća snježnog pokrivača nije u svim slojevima jednaka. Donji su slojevi obično gušći jer su nabijeni od težine snijega viših slojeva. Snježni pokrivač mijenja karakteristike ovisno i o temperaturi zraka, vjetru, vlažnosti zraka, kiši koja padne na njega, izloženosti insolaciji. Svi ti utjecaji mogu znatno povećati

gustoću snježnog pokrivača, pa je vrlo važno da se za određivanje sadržaja vode u snijegu uzima uzorak iz čitavog sloja snijega. Za određivanje tipične gustoće snježnog pokrivača korišteni su podaci iz razdoblja 1961-1990. Na nekim postajama nizovi nisu bili potpuni, a podaci s dvije postaje su znatno odstupali od svih ostalih podataka i bili nerealni, pa nisu uzeti u proračun. Tako su konačno za određivanje gustoće snježnog pokrivača korišteni podaci iz 16 postaja.

6.2 Metoda

U europskim prednormama ENV 1991-2-3:1995 – “Temelj projektiranja i djelovanja na građevine – Djelovanje na građevine – Opterećenje snijegom” definirano je karakteristično opterećenje snijegom na tlu s_k kao opterećenje koje se javlja s vjerojatnošću premašaja od 0,02 odnosno jednom u razdoblju od 50 godina. Opterećenje snijegom određuje se s pomoću podataka o gustoći i visini snježnog pokrivača koji se posebno analiziraju. Podacima o sadržaju vode u snijegu određena je tipična gustoća snježnog pokrivača za različita područja Hrvatske. Nakon toga određena je očekivana najveća visina snježnog pokrivača za 50-godišnje povratno razdoblje prema Jenkinsonovoj metodi. Na temelju procijenjenih maksimalnih visina određene su snježne zone u Hrvatskoj. Opterećenje snijegom u tako dobivenim snježnim zonama računa se s pomoću tipične gustoće i procijenjenih najvećih visina snježnog pokrivača.

Procjene najvećih visina snježnog pokrivača izračunane su generaliziranom razdiobom ekstremnih vrijednosti (GEV razdioba) prema Jenkinsonu koji je prvi primijenio za meteorološke podatke, a zatim drugi [6], [17], [18], [19], [20]. Jenkinson je dao opći oblik troparameterske razdiobe ekstrema koji zadovoljava postulat stabilnosti:

$$P(x) = \exp[-e^{-y(x)}] \quad (23)$$

gdje je $P(x)$ vjerojatnost da je godišnji ekstrem najviše jednak x , a $y(x)$ je reducirana varijanta:

$$y = -\ln \ln \frac{1}{P(x)} \quad (24)$$

Jenkinsonovo opće rješenje postulata stabilnosti ima oblik:

$$x = x_0 + \alpha \frac{1 - e^{-ky}}{k} \quad (25)$$

Veličina x_0 je vrijednost koja se može očekivati jednom godišnje uz $y=0$, α je nagib x , y krivulje u točki $x = x_0$, $y = 0$ i k je parametar zakrivljenosti.

Opće rješenje uključuje sva tri tipa graničnih slučajeva koje su utvrdili Fisher i Tippet [21], a koji su određeni uz pomoć vrijednosti parametra k .

U slučaju $k > 0$ krivulja (25) teži konačnoj vrijednosti

$$x_{\max} = x_0 + \frac{\alpha}{k}$$

U slučaju $k = 0$ krivulja (25) ima oblik pravca $x = x_0 + \alpha y$ i teži beskonačnosti. Razdioba ekstrema tada se naziva Gumbelovom razdiobom.

U slučaju $k < 0$ krivulja (25) nema gornje granice, a donja

$$\text{asimptota jest } x_{\min} = x_0 - \frac{\alpha}{k}.$$

Povratno razdoblje $T(x)$ definirano je kao srednji vremenski razmak koji proteče između dva premašaja vrijednosti x i može se pisati kao:

$$\frac{1}{T} = 1 - P(x) \quad (26)$$

iz čega se dobiva:

$$y = -\ln \ln \frac{T}{T-1} \quad (27)$$

Veza između procijenjenoga ekstrema x i pripadnog povratnog razdoblja T dano je izrazom:

$$x = x_0 + \alpha \frac{1 - \{\ln[T/(T-1)]\}^k}{k} \quad (28)$$

Procjene parametara izračunane su metodom najveće vjerojatnosti iz uzoraka najvećih visina snježnog pokrivača izmjerenih godišnjih najvećih vrijednosti.

6.3 Analiza rezultata

Radi dobivanja što pouzdanije procjene tipične gustoće, gustoća snježnog pokrivača određena je iz raspoloživih podataka na više načina. Najprije su određeni srednjak i medijan gustoće iz svih izmjerenih podataka na svim postajama. Budući da su u ovom slučaju najzanimljivije situacije s najvećim opterećenjem, određena je srednja gustoća i medijan za 20% slučajeva s najvećim opterećenjem svake zime [22]. Tipična gustoća za sve postaje određena je kao srednjak iz te četiri veličine [23]. Dobiveni rezultati pokazuju da se mogu izdvojiti dva područja s različitim tipičnim gustoćama – to je nizinsko područje Hrvatske sjeverno od Save i Kupe s tipičnom gustoćom oko 190 kg/m³ i planinsko područje Like i Gorskog kotara s gustoćom oko 240 kg/m³. S porastom nadmorske visine, karakteristika snježnog pokrivača se mijenja. Na većim se nadmorskim visinama snijeg dulje zadržava na tlu [24], [25] i podložan je raznim utjecaji-

ma koji mu povećavaju gustoću, kao što su temperatura zraka, kiša koja padne na snježni pokrivač i slično. U nizinskom dijelu Hrvatske jedina visinska postaja s mjerenjem sadržaja vode u snijegu Sljeme (1007 m) ima tipičnu gustoću 244 kg/m^3 , dok postaja Zavižan (1594 m) na Velebitu ima tipičnu gustoću 377 kg/m^3 . Uzimajući u obzir i razliku u nadmorskim visinama, snježni pokrivač na Velebitu gušći je od onoga u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Razlog je u položaju Velebita uz more i direktnoj izloženosti vlažnim maritimnim zračnim masama, zbog čega je snijeg bogatiji vodom od onog u kontinentalnim dijelovima Hrvatske. Stoga je bilo logično ova dva područja definirati kao dvije zone s različitim karakteristikama snježnog pokrivača. Zona I (nizinski dio Hrvatske sjeverno od Save i Kupe) obuhvaća postaje Osijek, Slavonski Brod, Daruvar, Bjelovar, Varaždin, Zagreb-Maksimir i Sljeme. Zona II, planinski dio Hrvatske, obuhvaća područja Banije, Korduna, Gorskog kotara i Like i njoj pripadaju postaje Ogulin, Skrad, Fužine, Lokve, Parg, Vrelo Ličanke, Ličko Lešće, Gospić i Zavižan. Kao zona III određeno je obalno područje Hrvatske. Za zone I i II istražene su regresijske veze između tipične gustoće snijega i nadmorske visine. U obje se zone pokazalo da su ti odnosi najbolje definirani linearnim jednadžbama:

$$\text{Zona I } \rho = 170,5 + 0,0723h \quad r = 0,93 \quad (\text{slika 12.a}) \quad (29)$$

$$\text{Zona II } \rho = 131,3 + 0,1435h \quad r = 0,89 \quad (\text{slika 12.b}) \quad (30)$$

gdje su

ρ – gustoća snježnog pokrivača (kg/m^3)

h – nadmorska visina (m)

r – koeficijent korelacije.

U zonama I i II razlikuju se i bazni potencijal gustoće snijega (gustoća koju bi snijeg imao na nadmorskoj visini 0 m) i gradijenti porasta gustoće s visinom. Na prvi je pogled nelogično da je bazni potencijal gustoće u planinskom dijelu Hrvatske manji od onog u kontinentalnim

nizinskim krajevima. Međutim, u tom području gustoća raste s visinom dvostruko brže nego u nizinskom dijelu. Tako je već na visini od 500 m, na kojoj se otprilike nalaze mjesta u Lici, gustoća je jednaka kao i u nizinskom području na toj visini, dok je na većim visinama gustoća snijega veća nego u nizinskom dijelu Hrvatske, što je i normalno zbog blizine mora.

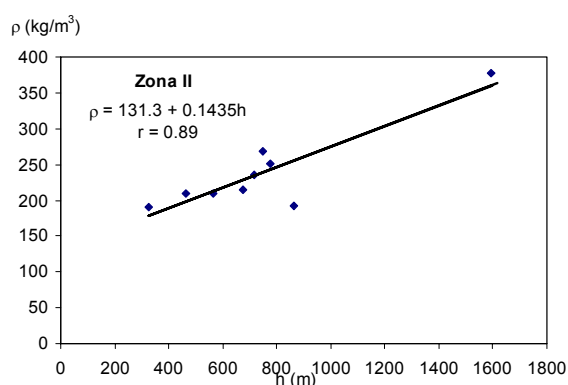
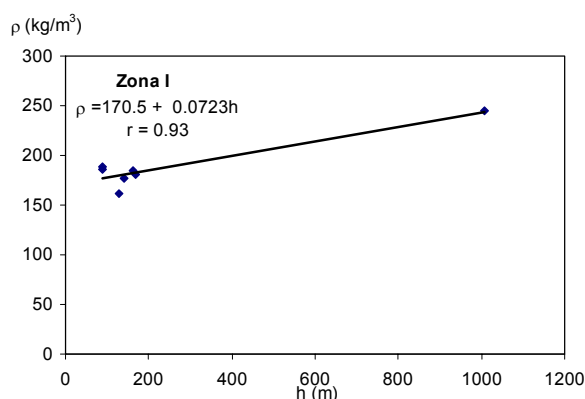
Budući da se na obali ne mjeri sadržaj vode u snijegu, gustoća snježnog pokrivača je procijenjena. Za gustoću na visini 0 m uzeta je srednja vrijednost gustoća u zonama I i II također na visini 0 m, dok je druga točka definirana gustoćom snijega na visinskoj meteorološkoj postaji Zavižan na Velebitu. Na taj je način dobivena relacija:

$$\text{zona III } \rho = 150,9 + 0,1417h \quad (31)$$

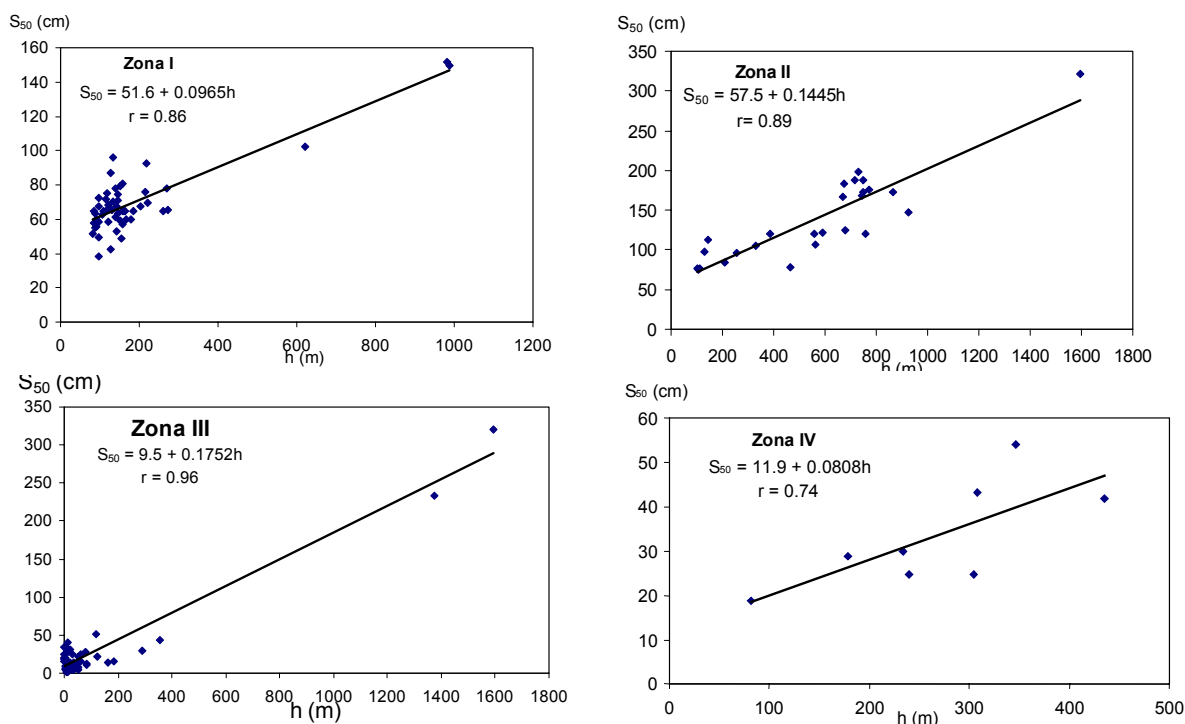
S pomoću relacija (29), (30) i (31) može se odrediti tipična gustoća snijega na različitim visinama u zonama I, II i III i s tako dobivenim gustoćama ulazi se dalje u proračun opterećenja snijegom.

Očekivana najveća visina snježnog pokrivača za 50-godišnji povratni period određena je Jenkinsonovom metodom za procjenu ekstrema za postaje u unutrašnjosti Hrvatske. Međutim, za postaje na obali, gdje godinama uopće nema snijega, javlja se slučaj kao na slici 11. Pridruživanje Jenkinsonove razdiobe takvom nizu podataka daje nerealne rezultate, pa je u takvim slučajevima maksimalna visina za 50-godišnje povratno razdoblje određena kao 98-postotni postotak empiričke razdiobe čestina.

Proučavajući postojeće prirodne zakonitosti porasta visine snježnog pokrivača s visinom, određene su klimatske zone unutar kojih vrijede isti vertikalni gradijenti promjene maksimalne visine snježnog pokrivača s visinom. Čvrstoća odnosa između dobivenih izraza i mjerenih podataka ispitana je koeficijentima korelacije, a korigiranje granica zona nastavljeno je sve dotle dok nije postignut zadovoljavajući visoki koeficijent korelacije. Za svaku je zonu ispitano kakva krivulja najbolje izražava



Slika 10. Vertikalni gradijenti tipične gustoće snježnog pokrivača, razdoblje 1961.-1990.



Slika 11. Vertikalni gradijenti očekivanih maksimalnih visina snježnog pokrivača za 50-godišnji povratno razdoblje

vezu maksimalne visine snježnog pokrivača i visine, a ispitivane su linearna, logaritamska, eksponencijalna i krivulja potencije. Na taj su način izdvojene četiri snježne zone (slika 12.):

Zona I Nizinski dio Hrvatske sjeverno od Save i Kupe, ukupno 52 postaje.

Zona II Planinski dio Hrvatske, koji obuhvaća područje Banije, Korduna, Gorskog kotara i Like, 27 postaja. Sa zonom I graniči na Savi i Kupi, sa zonom II na vršnim dijelovima Velebita, a sa zonom IV u dolini Zrmanje.

Zona III Priobalno područje, Istra i otoci, 48 postaja,

Zona IV Zaleđe Dalmacije – Ravni kotari, dolina Krke i zaleđe Biokova, 8 postaja.

U svim je zonama ustanovljeno da linearne veze najbolje opisuju promjene maksimalne visine snježnog pokrivača za 50-godišnje povratno razdoblje s nadmorskom visinom (slika 11.):

Zona I	$S_{50} = 51,6 + 0,0965 h$	$r = 0,86$
Zona II	$S_{50} = 57,5 + 0,1445 h$	$r = 0,89$
Zona III	$S_{50} = 9,5 + 0,1752 h$	$r = 0,96$
Zona IV	$S_{50} = 11,9 + 0,0808 h$	$r = 0,74$

gdje je

S_{50} – očekivana maksimalna visina snježnog pokrivača (cm) za povratni period od 50 godina,

h – nadmorska visina (m),

r – koeficijent korelacije.

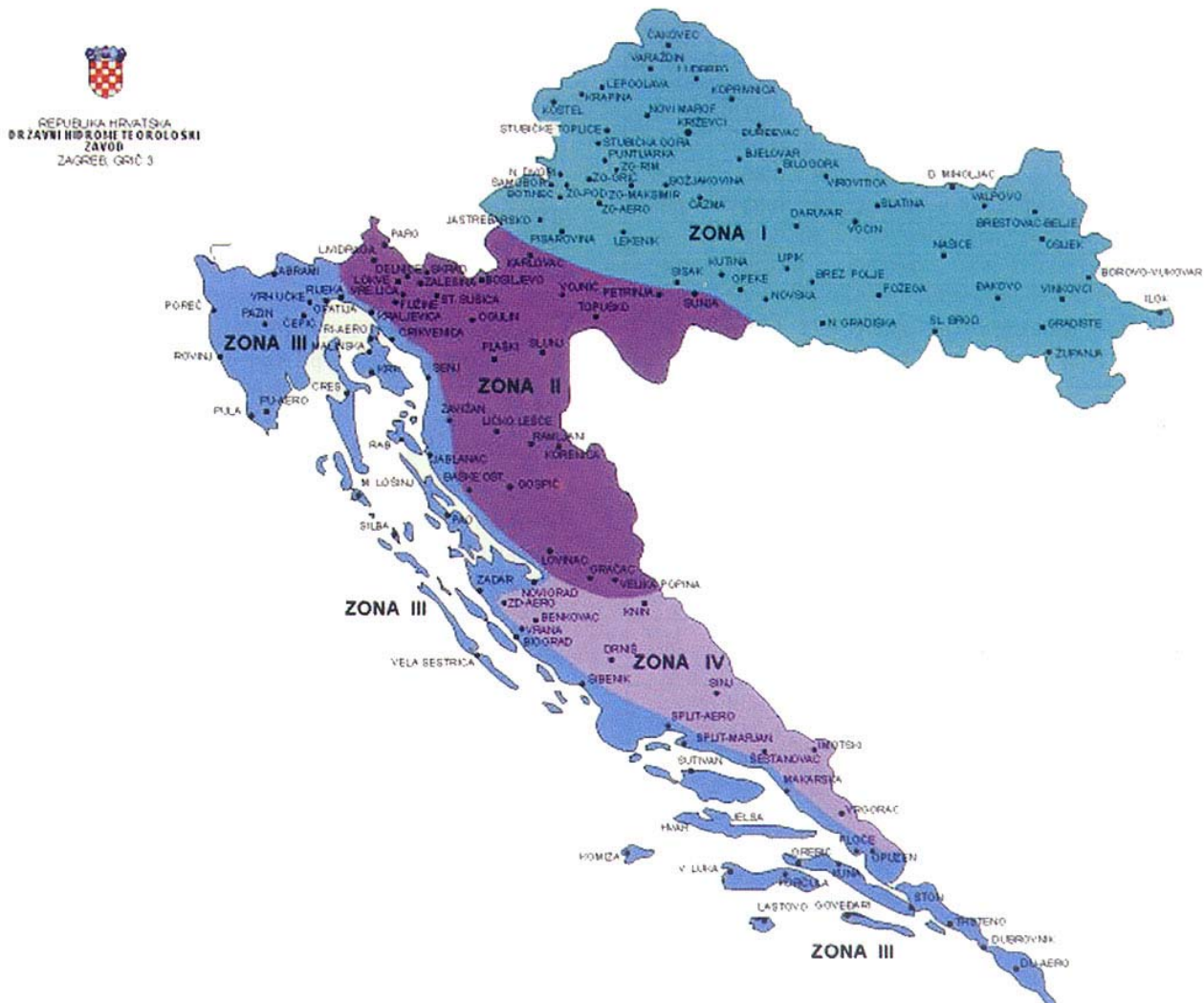
Očekivana najveća visina snježnog pokrivača na nadmorskoj visini 0 m u nizinskom i planinskom dijelu Hrvatske razlikuju se vrlo malo (6 cm). Međutim, u planinskom se dijelu Hrvatske maksimalna visina snježnog pokrivača s visinom mijenja znatno brže (15 cm/100 m) nego u nizinskom dijelu (10 cm/100 m), pa su na visinama od 500 - 900 m, na kojima se nalazi većina mjesta u drugoj zoni, očekivane najveće visine snježnog pokrivača mnogo više (30 - 40 cm) negoli na istim visinama u nizinskom kontinentalnom dijelu Hrvatske.

Čitavo planinsko područje Hrvatske svrstano je u jednu snježnu zonu. Pritom je potrebno istaknuti da se u Gorskom kotaru mogu očekivati otprilike 20% veće visine snježnog pokrivača nego što pokazuje proračun. Na pojedinih lokacijama visine snježnog pokrivača mogu i znatno premašiti procijenjene vrijednosti. Jedna od takvih lokacija jest Lividraga podaci koje nisu uzeti u proračun vertikalnih gradijenata jer znatno odstupaju od ostalih postaja pa uvelike mijenja sliku dobivenih ovisnosti visina snijega s nadmorskom visinom. Prema dobivenim vezama na nadmorskoj visini od 929 m na kojoj se nalazi Lividraga u 50-godišnjem povratnom razdoblju u moglo bi se očekivati 192 cm snijega. Međutim, proračun pokazuje da se u Lividragi u tom razdoblju može očekivati čak 320 cm snijega, dok je najveća do sada zabilježena visina snježnog pokrivača u Lividragi iznosila 270 cm. Lividraga je inače poznata i po ekstremno visokim količinama oborine, pa takve visine snijega ne iznenađuju.

Obala i priobalno područje podijeljeni su u dvije klimatske snježne zone. Zona III odnosi se na uski obalni pojas i

otoke. Jedine dvije visinske postaje s pomoću kojih su se mogli odrediti gradijenti su Zavižan i vrh Učke, dok postaja na Biokovu nema dulji niz mjerenja parametara snijega. Stoga se nije moglo odrediti je li snježni režim u južnoj Dalmaciji različit od onoga na sjevernom i srednjem Jadranu. Međutim, s obzirom na to da opterećenje snijegom nije veći problem na obali, dobiveni rezultati mogu biti primijenjeni za cijelu obalu. Jadransko je zaleđe definirano kao posebna zona. Iako ne postoje podaci Mosora i Biokova, koji bi bili neophodni za računanje gradijenata do većih nadmorskih visina, uporabljeni su podaci 8 postaja u tom području, od kojih je Imotski sa 435 m na najvećoj nadmorskoj visini. Zbog toga ovi proračuni za zonu IV ne mogu biti primijenjeni na veće nadmorske visine, pa su i u tablicama navedeni samo podaci za visine do 500 m.

Na temelju podataka s postaja koje su mjerile sadržaj vode u snijegu, ispitane su korelacijske veze između opterećenja snijegom i visine snježnog pokrivača te između opterećenja snijegom i gustoće. Pokazalo se je da je ovisnost opterećenja o visini snježnog pokrivača mnogo veća nego ovisnost o gustoći snijega (tablica 5.). To, naravno, ne znači da gustoća manje utječe na opterećenje, već se ovakvi odnosi dobivaju zato što su varijacije gustoće mnogo manje od varijacija visine snježnog pokrivača. U skladu s tim različit je i utjecaj varijacija gustoće i visine snježnog pokrivača na varijacije opterećenja snijegom. Stoga je opravdano zone karakterističnog opterećenja odrediti na temelju prije utvrđenih zona očekivanih maksimalnih visina snježnog pokrivača (slika 12.). Množenjem očekivanih maksimalnih visina za 50-godišnje povratno razdoblje s tipičnim gustoćama dobivaju se očekivana naj-



Slika 12. Klimatske zone karakterističnog opterećenja snijegom S_k za razdoblje 1961.-1990.

veća opterećenja za 50-godišnje povratno razdoblje, odnosno karakteristična opterećenja snijegom za četiri zone u Hrvatskoj (tablica 6.). Ovdje je potrebno napomenuti da se zone I i II za gustoće i visine snježnog pokrivača poklapaju, dok zona III tipičnih gustoća pokriva zone III i IV očekivanih maksimalnih visina snježnog pokrivača.

Tablica 5. Koeficijenti korelacije između opterećenja snijegom i visine snježnog pokrivača (r_1), te opterećenja snijegom i sadržaja vode u snijegu (r_2)

Mjerna postaja	Broj parova	r_1	r_2
Osijek	169	0,71	0,35
Slavonski Brod	230	0,78	0,48
Daruvar	213	0,64	0,50
Bjelovar	159	0,75	0,39
Varaždin	273	0,83	0,47
Zagreb-Maksimir	139	0,79	0,53
Sljeme	1328	0,91	0,43
Ogulin	660	0,80	0,25
Skrad	718	0,83	0,41
Fužine	116	0,66	0,30
Lokve	444	0,83	0,36
Parg	1469	0,80	0,45
Vrelo Ličanke	245	0,86	0,37
Ličko Lešće	247	0,68	0,48
Gospić	729	0,72	0,55
Zavižan	2907	0,94	0,40

Tablica 6. Karakteristična opterećenja snijegom (s_k) u zonama na različitim nadmorskim visinama

Nadmorska visina [m]	s_k [kN/m ²]			
	I	II	III	IV
0	0,88	0,75	0,14	0,18
100	1,09	1,05	0,45	0,33
200	1,31	1,38	0,80	0,50
300	1,55	1,76	1,20	0,70
400	1,80	2,18	1,65	0,92
500	2,06	2,63	2,15	1,16
600	2,34	3,13	2,70	
700	2,63	3,68	3,30	
800	2,94	4,26	3,95	
900	3,26	4,88	4,65	
1000	3,60	5,55	5,40	
1100	3,94	6,26	6,20	
1200	4,31	7,01	7,05	
1300		7,80	7,95	
1400		8,63	8,90	
1500		9,50	9,90	
1600		10,42	10,94	
1700		11,38	12,04	

Budući da se promjene gustoće i maksimalne visine snijega po visini mijenjanju linearno, promjene izvedene veličine karakterističnog opterećenja s visinom su polinomi drugog stupnja:

$$\text{Zona I} \quad s_k = 0,88 + 0,002 h + 0,0000007 h^2$$

$$\text{Zona II} \quad s_k = 0,76 + 0,0027 h + 0,000002 h^2$$

$$\text{Zona III} \quad s_k = 0,14 + 0,0028 h + 0,000002 h^2$$

$$\text{Zona IV} \quad s_k = 0,18 + 0,0014 h + 0,000001 h^2$$

Sudeći prema visokim koeficijentima korelacije, promjene karakterističnog opterećenja s visinom vrlo precizno opisuju i linearne veze. Međutim, linearni odnosi u zonama I i II daju negativne vrijednosti opterećenja na razini mora. To u zoni II i ne bi predstavljalo problem jer takve se visine u tom području i ne pojavljuju. U zoni III, priobalnom dijelu Hrvatske, takva rješenja onemogućuju uporabu linearnih relacija, jer daju nerealne rezultate na malim nadmorskim visinama koja su na ovim područjima sigurno najzanimljivija za izgradnju. Na slici 12. prikazane su klimatske zone karakterističnog opterećenja snijegom u Hrvatskoj.

U kontinentalnom nizinskom dijelu Hrvatske većina gradova smještena je na nadmorskim visinama između 100 i 200 m, pa se karakteristično opterećenje na tom području kreće između 1,10 kN/m² i 1,30 kN/m². Na najvišim vrhovima tog dijela Hrvatske (oko 1100 m) karakteristično opterećenje jest oko 4 kN/m². Koeficijenti varijacije, izračunani procjenom maksimalnih visina snježnog pokrivača za 50-godišnje povratno razdoblje i standardnih devijacija pri tim procjenama su između 0,10 i 0,16, sa srednjom vrijednošću 0,13. Može se pretpostaviti da su i koeficijenti varijacije karakterističnih opterećenja snijegom slični.

U planinskom dijelu Hrvatske, gdje su mjesta i gradovi većinom na nadmorskim visinama između 500 i 900 m karakteristična opterećenja su veća nego na istim visinama u nizinskom dijelu i iznose između 2,60 kN/m² i 4,90 kN/m². Koeficijenti varijacije su u rasponu od 0,07 do 0,20 sa srednjakom 0,12 (tablica 7.).

Zbog malih očekivanih maksimalnih visina snježnog pokrivača karakteristično opterećenje snijegom uz obalu (zona III) jest malo i kreće se, na visinama od 0 do 100 m na kojima se uglavnom nalaze mjesta uz obalu, između 0.15 kN/m² i 0.45 kN/m². Međutim varijabilnost snježnog pokrivača veća je nego u kontinentalnim dijelovima Hrvatske. Budući da očekivane maksimalne visine snježnog pokrivača u ovom području uglavnom nisu mogle biti procijenjene Jenkinsonovom metodom, već s pomoću empiričkih razdioba, koeficijenti varijacije izračunani su iz empiričkih podataka maksimalnih visina snježnog pokrivača, a ne kao za unutrašnjost iz procijenjenih vrijednosti za 50-godišnje povratno razdoblje i pripadnih stan-

dardnih devijacija. Koeficijenti varijacije izračunani su samo za snježne zime, tj. za one zime u kojima se pojavio snježni pokrivač. Zbog vrlo varijabilnog snježnog pokrivača u ovom području, standardna devijacija može višestruko premašiti srednjak pa su se tako koeficijenti varijacije kretali u rasponu od 0,38 do 1,90 sa srednjom vrijednošću od 0,87. Usporedbe radi, ovako izračunani koeficijenti varijacije za prvu i drugu zonu veći su od koeficijenta varijacija za vrijednosti proračunane iz razdiobe i kreću se u granicama od 0,41 do 0,70 sa srednjakom 0,58 u zoni I, odnosno od 0,38 do 0,66 sa srednjakom 0,47 u zoni II (tablica 7.).

Tablica 7. Koeficijenti varijacije (maks., min. i sred.) izračunani s pomoću srednjaka i standardnih devijacija nizova maksimalnih visina snježnog pokrivača u snježnim zimama (1) te procijenjenih maksimalnih visina snježnog pokrivača za 50-godišnji povratni period i pripadnih standardnih devijacija izračunanih prema Jenkinsonovoj razdiobi (2)

Zona	(1)			(2)		
	maks.	min.	sred.	maks.	min.	sred.
I	0,70	0,41	0,58	0,16	0,10	0,13
II	0,66	0,38	0,47	0,20	0,07	0,12
III	1,90	0,38	0,87			
IV	1,19	0,68	0,89			

U dalmatinskom zaleđu na nadmorskim visinama do 500 m karakteristična opterećenja mogu dosegnuti vrijednosti do približno 1,20 kN/m². Kao i za postaje uz

obalu, maksimalne visine snježnog pokrivača za 50-godišnji povratno razdoblje izračunane su iz empiričkih podataka, pa su u skladu s tim i standardne devijacije izračunane samo za empiričke podatke. Koeficijenti varijacije koji se kreću između 0,87 i 1,19 nisu tako veliki kao na obali, ali ipak veći nego u kontinentalnim dijelovima Hrvatske, o čemu pri projektiranju treba voditi računa.

Dobiveni rezultati upućuju da je potrebno provesti daljnja istraživanja vrijednosti navedenih u tablici 7. jer o odabiru koeficijenta varijacije ovisi parcijalni faktor sigurnosti (22).

7 Zaključak

Do sada su se u projektiranju konstrukcija u Hrvatskoj upotrebljavala opterećenja snijegom koja su se temeljila na zastarjelim vrijednostima, dok su se statistički podaci o visini i gustoći snježnog pokrivača analizirali za neke posebne situacije ili na ograničenom području za specifične potrebe [24], [25], [26]. U ovom je radu prvi put opterećenje snijegom određeno na temelju svih raspoloživih podataka o sadržaju vode u snijegu i visini snježnog pokrivača na području Hrvatske u razdoblju 1961.-1990. koje se prema preporukama Svjetske meteorološke organizacije uzima za prikaz klime našeg vremena. Procedura za procjenu karakterističnog opterećenja snijegom u skladu je s preporukama za izradu europskih norma, pa dobiveni rezultati mogu poslužiti kao meteorološka podloga za hrvatske norme za opterećenja snijegom.

LITERATURA

- [1] Ministère de L'Équipement de France-*Neige de Decembre 90 - Analyse des sinistres*
- [2] World Meteorological Organisation (WMO) - *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. WMO N° 8, Geneva, Switzerland, 1983.
- [3] Joint Committee of Structural Safety (JCSS) - *Common unified rules for different types of construction and material*. Published by Comité Euro-international du Béton (CEB) in Bulletin N° 116, 3rd draft, Paris 1976, Annex III.
- [4] Gränzer, M.: *Angabe von Schneelasten geografisch nach Zonen gegliedert, für den Eurocode "Lasten" Teil 7*. (Evaluation of Snow Loads for the Eurocode on Actions Part 7, depending on geographical zones) Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg, Tübingen 1989.
- [5] Eurocode 1 - *Basis of design and actions on structures - Part 2.3: Actions on structures - Snow loads* ENV 1991-2-3: 1995
- [6] Jenkinson, A. F.: *Statistics of extremes, Estimation of Maximum Floods*, World Meteorological Organisation, Geneva, WMO Technical Note N° 98, Chapter 5, 1969.
- [7] Gajić-Čapka, M.: *Short-term Precipitation Maxima in Different Precipitation Climate Zones of Croatia, Yugoslavia*, International Journal Climatologic, N° 11 (1991), 677.-687.
- [8] Thom, H. C. S.: *Distribution of Maximum Annual Water Equivalent of Snow on the Ground*, Monthly Weather Rev., 1966., 94, 265.-271.
- [9] Del Corso, R.; Gränzer, M.; Gulvanessian, H.; Raoul, J.; Sandvik, R.; Sanpaolesi, L.; Stiefel, U.: *New European Code For Snow Loads, Background Document*, Proceedings of Department Structural Engineering, University of Pisa, 1995
- [10] Eurocode 1 - *Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design*, ENV 1991-1, 1994
- [11] International Organization For Standardization - *Bases for Design of Structures - Determination of Snow Loads on Roofs*, ISO 4355, 1981.
- [12] O'Rourke, M.; Kock, P.; Redfield, R.: *Analysis of Roof Snow Load Case Studies*, CRREL Report 83-1, 1983.
- [13] Lutes, O. A.; Schriever, W. R.: *Snow accumulations in Canada, case histories: II*, N.R.C.C. Div. Building Research, Techn. Pp. N° 339, 1971.

- [14] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I.: *Metalne konstrukcije 1*, 1. izdanje, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1994.
- [15] Androić, B.; Džeba, I.; Dujmović, D.: *International Structural Steel Sections - Design Tables According to Eurocode 3*, Chapter 4.6, Ernst&Sohn, A Wiley Company, Berlin, 2000.
- [16] Background Documentation, Eurocode 1 (ENV 1991), Part 1: Basis of design, First Edition, ECCS N° 94, Brussels, 1996.
- [17] Jenkinson, A. F.: *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements*. Quart. J. R. Met. Soc. 87, 1955.158.-171.
- [18] Jenkinson, A. F.: *The Analysis of Meteorological and Other geophysical Extremes* (nepublicirano). Met O. 13, Technical Note No. 1977., 58, 68 str.
- [19] Gumbel, E. J.: *Statistics of extremes*. Columbia Univ. Press, New York, 1958.
- [20] Faragó, T.; Katz, R. W.: *Extremes and Design Values in Climatology*, World Meteorological Organization, WMO/TD-NO. 386, WCAP-14, 1990. pp. 46
- [21] Fisher, R. A.; Tippett, L. H.: *Limiting forms of the largest or smallest members of a sample*, Proc. Cambridge Philos. Soc., 24, 1928, 180.-190.
- [22] Schmidlin, T. W.; D. J. Edgell, M. A. Delaney: *Design Ground Snow Loads for Ohio*, Jour.Appl. Meteor., 1992., 31, 622-627.
- [23] Zaninović, K.: *Climatological Basis for Snow Load Standards*, Proceeding of the 3rd European Conference on Applied Climatology, 16-20 Oct. 2000, Pisa, CD-ROM, Abs. Pos.-5., Book of Abstracts, 266., 2000.
- [24] Kirigin, B.: *Schneeverhältnisse, Dichte und Wasservorrat der Schneedecke an der Station Zavižan (Velebit-Gebirge)*, Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien., 1978., 31, 47/1-47/10
- [25] Gajić-Čapka, M.: *The Snow Regime in the Northern Part of Mount Velebit*, Hrv. meteor. časopis, 1996., 31, 15.-21.
- [26] Gajić-Čapka, M.: *Ekstremne meteorološke prilike na lokaciji nuklearne elektrane*, Energija, 1985., 34., 13.-19.