

Pēteris Druķis

EKSPLUATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Pēteris Druķis

Doktora studiju programmas “Būvzinātne” doktorants

**EKSPLUATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU
DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
asociētā profesore *Dr. sc. ing.*
LĪGA GAILE

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Druķis, P. Eksploatācijā esošu ēku drošuma vērtēšanas metodoloģija. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 45 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes RTU “P-06” 2022. gada 20. maija lēmumu, protokols Nr. P-2.

<https://doi.org/10.7250/9789934228209>
ISBN 978-9934-22-820-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 7. oktobrī plkst. 14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6 A, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Jānis Kaminskis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Ph. D.* *Hans Holger Hundborg Koss*,
Dānijas Tehniskā universitāte, Dānija

Asociētais profesors *Ph. D.* *Robertas Zavalis*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Pēteris Druķis (paraksts)

Datums: 08.09.2022

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 60 attēlu, 50 tabulas, kopā 135 lappuses. Literatūras sarakstā ir 83 nosaukumi.

SATURS

SATURS.....	4
1. IEVADS	5
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne.....	5
Promocijas darba mērķis	7
Promocijas darba uzdevumi	7
Promocijas darba zinātniskā novitāte	8
Promocijas darba praktiskais lietojums.....	8
Pētījuma rezultāti.....	9
Pētījuma ierobežojumi.....	9
Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats	10
Rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs.....	11
Promocijas darba autora zinātniskās publikācijas	11
2. LITERATŪRAS APSKATS.....	12
3. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS	13
3.1. Eksploatācijā esošo ēku kvalitatīvā novērtējuma analīze.....	13
3.2. Esošo būvju vērtēšanas prakse Eiropā	19
3.3. Uz dažādu normatīvo bāzu projektēto konstrukciju drošuma noteikšana	20
4. EKSPLOATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU KOPĒJĀ DROŠUMA LĪMEŅA NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA.....	26
4.1. Vispārīgi	26
4.2. Kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējums	27
5. ĒKAS DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJAS PRAKTISKAIS LIETOJUMS (<i>CASE STUDY</i>)	34
5.1. Konstruktīvo elementu drošuma novērtējuma kopsavilkums	34
5.2. Ēkas drošuma rezultātu kalibrēšana ar matemātisko simulāciju	36
6. IETEIKUMI METODOLOĢIJAS PRAKTISKAI IEVIEŠANAI	42
6.1. Publisko ēku tehniskās apsekošanas	42
6.2. Vienotas platformas izveide tehniskajā apsekošanā iegūtajiem datiem.....	42
7. SECINĀJUMI	44

1. IEVADS

Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne

Saskaņā ar Eiropas Komisijas 2016. gada ziņojumu par ēku energoefektivitātes problemātiku 2010. gadā Eiropā > 30 % ēku bija vecākas par 50 gadiem. Šodien šis īpatsvars ir vēl lielāks. Atbilstoši normatīviem, saskaņā ar kurām šīs ēkas tika projektētas, to lietošanas resurss ir iztecējis. Pastāv dažādi viedokļi, vai to ekspluatācija būtu jāpārtrauc, jo tās rada apdraudējumu sabiedrībai un videi, vai arī ir būtu pieļaujama šo ēku tālāka izmantošana. Šajā ziņojumā ir arī dati par to, ka 70 % ēku, kurās sabiedrība uzturēsies 2050. gadā, ir uzceltas un tiek lietotas jau pirms 2010. gada.

Ir pieejami arī dati, ka attiecībā uz projektēšanas un būvniecības darbiem jaunbūvju apjomam Eiropas Savienībā ir tendence samazināties un arvien lielāku īpatsvaru ieņem darbs ar esošajām būvēm (to pārbūve vai atjaunošana).

Tādējādi var secināt, ka nākotnes inženieriem būs jāstrādā nevis tikai ar jaunu ēku izbūvi, bet arī ar esošo ēku uzturēšanu. Saistībā ar to ir aktuāli vairāki jautājumi.

1. Kāds ir ekspluatācijā esošo ēku drošuma līmenis.

Saskaņā ar esošo nozares praksi ekspluatācijā esošās ēkas, ja tās tiek pareizi ekspluatētas, tiek uzskatītas par drošām cilvēkiem un videi. Tomēr sakarā ar tehnoloģisko progresu, kā arī ar normatīvo aktu izmaiņām, kas zināmā mērā ir saistītas arī ar dažādu valstu integrāciju vienotā ģeopolitiskā telpā, gan īpašnieku, gan apkalpojošo personu uzdevumi ēku lietošanā kļūst arvien sarežģītāki.

Ekspluatācijā esošās ēkas ir projektētas atbilstoši tā laika drošuma līmenim, kad tās tika būvētas, savukārt šodienas prasībām atbilstošais un sagaidāmais drošuma līmenis ir augstāks. Tam klāt ir nākušas arī jaunas prasības (energoefektivitāte, ilgtspēja un vides resursu taupīšana, sociālās prasības), kuru nodrošināšana ēkas īpašniekiem prasa papildu resursus. Tādēļ ēku konstrukciju drošumam šodienas apstākļos tiek pievērsta īpaša uzmanība. Īpaši tas attiecas uz sabiedriski nozīmīgām jeb publiskām ēkām atbilstoši normatīvu prasībām.

Dažādām ēkām atkarībā no to būvniecības laikmeta, piemēram, Latvijā, drošuma līmenis ir atšķirīgs. Ņemot vērā, ka ēkas lietotāji galvenokārt rēķinās ar vienādu drošuma līmeni, var rasties situācijas, kas izraisa nelaimes gadījumus tikai tādēļ, ka ēka nenodrošina to drošuma līmeni, ko tās lietotājs sagaida. Lai arī lielākā daļa Latvijas ēku ir būvētas pirms vairāk nekā 30 gadiem, kad spēkā bija tā laika padomju būvnormatīvi, vai pat vēl agrāk, ir arī ēkas, kas ir izbūvētas laika posmā no 1990. līdz 2010. gadam saskaņā ar nacionālajiem būvnormatīviem, kā arī ēkas, kas tapušas pēdējo gadu laikā, kad Latvijā jau ir spēkā Eiropas Savienības būvnormatīvi un standarti, t. sk. Eirokodeksi.

2. Ko darīt ar ēkām, kuru konstrukciju projektētais lietošanas laiks ir beidzies.

Šis jautājums sabiedrībā kļuvis aktuāls pēdējās divās dekādēs. Meklējot atbildi uz šo jautājumu, rodas nākamie: vai šādas ēkas būtu jānojauc; vai to konstrukcijas būtu jāmaina; ja nē, kurš uzņemsies atbildību par to drošību turpmākajā kalpošanas laikā; kādam jābūt ēkas

drošuma līmenim pēc tās renovācijas (atjaunošanas) vai pārbūves; uz kādu termiņu būtu pagarināms ēkas lietošanas resurss; kurš par to atbild.

Līdzšinējais normatīvais būvju regulējums galvenokārt attiecas uz jaunu konstrukciju projektēšanu un būvniecību, tajos nav iestrādātas ekspluatācijas prasības esošo konstrukciju novērtējumam un drošumam. Konstrukciju normatīvi ir izstrādāti ar pieņēmumu, ka konstrukcijas kalpos noteiktu termiņu, taču tajos nav noteiktas prasības, kā rīkoties ar konstrukcijām pēc šī termiņa beigām. Vai konstrukcijas, kurām ir beidzies termiņš, kādam tās ir projektētas, būtu uzskatāmas par nedrošām un to lietošana būtu jāpārtrauc. Ja nē, tad kāds ir to turpmākais lietošanas termiņš. Īpaši aktuāli šis jautājums ir gadījumos, kad tiek veikta daļēja ēkas pārbūve vai atjaunošana un tiek apvienotas jaunās konstrukcijas ar jau esošajām konstrukcijām. Rodas jautājumi: vai jauno konstrukciju projektētājs vai būvnieks uzņemas atbildību arī par vecajām konstrukcijām; vai jauno konstrukciju prognozētais lietošanas laiks būtu attiecināms arī uz esošajām konstrukcijām.

3. Vai un kā novērtēt esošo konstrukciju drošuma līmeni.

Starp projektēšanu un novērtēšanu ir būtiskas atšķirības. Projekta nenoteiktības rodas no jauno konstrukciju paredzētajiem slodžu un pretestības raksturotājiem. Šīs nenoteiktības reprezentē izkliedi visdažādāko konstrukciju raksturotājiem dēļ tajos izmantoto materiālu kvalitātes neviendabīguma, atšķirīgajām būvniecības tehnoloģijām un specifisko slodžu sadalījumu konkrētajā objektā. Konservatīvs projekts neradīs ievērojamu konstrukciju sadārdzināšanos, turpretī konservatīvs novērtējums var radīt nevajadzīgus un dārgus remontus vai pārbūves vai arī nonākt otrā galējībā – neatklāt būtiskus trūkumus ēkas lietošanā, kas var izraisīt traģiskas sekas.

Iepriekšminētie trīs jautājumi ir aktuāli šodienas būvzinieņu un būvniecības nozares profesionāļu, tostarp arī būvzinātnes pārstāvju, vidū. Eiropas Komisijas pētniecības centrs (*Joint Research Centre*) 2015. gadā nāca klajā ar speciālu zinātnes un politikas ziņojumu (*Science un Policy Report*) par aktivitātēm normatīvajā regulējumā un pētniecībā saistībā ar ekspluatācijā esošo konstrukciju novērtējumu, kurā izcelta problemātika un izaicinājumi attiecībā uz esošo būvju konstrukcijām.

Latvijā šī jautājuma problemātika īpaši saasinājās pēc 2013. gada Zolitūdes notikumiem. Jaunajos ēku būvnoteikumos visiem publisko ēku īpašniekiem ir uzdots ne vēlāk kā līdz 2019. gadam ar intervālu turpmāk reizi 10 gados veikt ēkas tehnisko apsekošanu ar mērķi identificēt, vai tās atbilst būtiskajām prasībām, tostarp mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām. Taču – kā praktiski novērtēt ekspluatācijā esošu konstrukciju drošumu. Ko darīt ar konstrukcijām, kas projektētas pēc iepriekšējiem normatīviem, taču šodien industrija strādā pēc citām normatīvajām prasībām. Vai tās būtu jāpārvērtē un jāatjauno atbilstoši šodienas prasībām un drošuma līmenim. Kādas ir jaunākās tendences pasaulē, vai tās ir piemērojamas arī Latvijas apstākļiem. Šie jautājumi ir promocijas darbā veikto pētījumu pamatā.

Pētījuma autors uzskata par svarīgu noteikt skaidras un šodienas zināšanām par konstrukciju uzvedības raksturu atbilstošas tehniskās prasības un metodoloģiju attiecībā uz esošo ēku konstrukciju drošuma vērtēšanu. Ņemot vērā, ka Eiropas Standartizācijas institūta *CEN* atbildīgā standartizācijas tehniskā komiteja strādā pie papildinājumiem konstrukciju projektēšanas normatīvos (*EN*), lai noteiktu vienotu kārtību attiecībā uz ēku pārbūvi un

atjaunošanu pēc 2022. gada, ir svarīgi saprast esošo ēku drošuma līmeni, t. sk. radot vienotu metodisko bāzi, kā noteikt būvju drošumu, ņemot vērā Latvijas tehniskos, ekonomiskos un sociālos aspektus.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma noteikšanai, balstītu ēkas kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvajā vērtējumā, ņemot vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī iespējamā sabrukuma sekas.

Promocijas darba uzdevumi

Lai īstenotu darba mērķi, noteikti vairāki uzdevumi.

1. Izstrādāt metodoloģijas teorētisko pamatojumu:

- a) veikt aktuālo pētījumu analīzi par esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas metodēm un modeļiem;
- b) veikt esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas prakses analīzi Eiropas dalībvalstīs;
- c) veikt ekspluatācijā esošo publisko ēku konstrukciju tehniskā stāvokļa kvalitatīva novērtējuma analīzi un tā ietekmējošo faktoru sintēzi uz Latvijā pieejamo datu pamata;
- d) izstrādāt metodi, kas ļauj noteikt teorētiskos drošuma līmeņus dažādiem konstrukciju elementiem, t. sk. projektētiem ārpus Eirokodeksu metodoloģijas ietvara, un veikt metodikas praktiskā lietojuma piemēru izstrādi.

2. Izstrādāt metodoloģiju ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma noteikšanai, kas balstīta ēkas kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvajā vērtējumā, ņemot vērā nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī iespējamā sabrukuma sekas.

3. Veikt izstrādātās metodoloģijas validāciju:

- a) analizēt ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšanas metodoloģiju, veicot rezultātu novērtējumu būtisko parametru izmaiņu gadījumā un robežgadījumos;
- b) veikt iegūto rezultātu salīdzinājumu ar citām, alternatīvām metodēm;
- c) izstrādāt praktiskus piemērus attiecībā uz ekspluatācijā esošo ēku kvantitatīvu drošuma vērtēšanu, lietojot izstrādāto metodoloģiju.

4. Sniegt ieteikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna metodoloģija ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma kvantitatīvai novērtēšanai, izmantojot praktiski iegūstamu informāciju par atsevišķo konstrukciju drošuma raksturotājiem. Metodoloģija balstīta ēkas kopējā drošības indeksa ieviešanā, kas globāli raksturo ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti.

Promocijas darbā papildus piedāvātas vairākas jaunas metodes, kas izmantotas izstrādātajā metodoloģijā:

- 1) jauna metode, balstīta riska pārvaldības principos, ēku iedalīšanai kategorijās, izmantojot vizuāli konstatējamus bojājumus un nepilnības, tādējādi kvalitatīvi ļaujot identificēt lielākos riska objektus valsts publisko ēku fondā;
- 2) jauna metode, balstīta Eirokodeksos definētajos drošuma konceptos, kas ir piemērota ekspluatācijā esošo ēku nesošo komponentu drošuma novērtēšanai, kā arī vispārēji dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai;
- 3) izstrādāta “nosacītā tilpuma” metode svāra koeficientu noteikšanai, kas ļauj ņemt vērā ēkas komponentu (kopņu, saišu, kolonnu, plātņu utt.) individuālo nozīmi kopējā ēkas konstrukciju mehāniskās izturības, stabilitātes nodrošināšanā. Iegūti nosacītā ietekmes koeficienta W (svāra koeficienta) diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Piedāvāti jauni parametri – globālais ēkas drošuma indekss A un relatīvais globālais ēkas drošuma indekss $AGRI$, kas raksturo jaunas vai ekspluatācijā esošas ēkas tehnisko stāvokli un ļauj kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni.

Atšķirībā no pieejamām drošuma līmeņa vērtēšanas metodēm, kas balstītas specifiskās zināšanās par varbūtības un sistēmas teorijas algoritmu praktisku lietošanu, šajā promocijas darbā izstrādātā metodoloģija ir mazāk komplicēta, tādējādi nodrošinot to, ka to spēs lietot tie inženiertehniskie speciālisti, kas ikdienā veic ēku inženiertehniskās apsekošanas/izpētes. Izstrādātā metode nodrošina arī vienotu rezultātu atspoguļošanu, kas nodrošina to, ka iegūtie rezultāti dažādām ēkām ir savstarpēji salīdzināmi, kas savienojumā ar vienotu uzskaites sistēmu nozares speciālistiem un politikas veidotājiem ļauj veikt nepieciešamos plānotos pasākumus drošuma līmeņa uzraudzībai un objektīvu lēmumu pieņemšanu.

Promocijas darba praktiskais lietojums

Izmantojot jauno ekspluatācijā esošo ēku drošuma novērtēšanas metodoloģiju, visas ar ēkas drošumu saistītās puses (ēkas īpašniekam, arhitektiem, būvkonstruktoriem, būvvaldēm un citām ieinteresētajām pusēm) var saņemt ar skaitlisko vērtību raksturotu informāciju par apsekoto ēku drošuma līmeni. Tas ļauj ērti un kvalificēti identificēt riska līmeni attiecībā uz ēkas turpmāko lietošanu un savlaicīgi reaģēt, lai izstrādātu adekvātus risinājumus konstrukciju drošuma nodrošināšanai saskaņā ar spēkā esošo normatīvu prasībām. Lai arī jaunā metode izstrādāta, balstoties datos, kas iegūti no publisko ēku apsekošanas un datu apstrādes, tā ir izmantojama arī citu ēku, piemēram, dzīvojamu un rūpniecisko ēku drošuma klasificēšanai un to konstrukciju drošuma vērtēšanai.

Ņemot vērā to, ka būvkonstrukciju nozarē plaši tiek lietoti Eirokodeksā praktizētie termini un raksturlielumi, autors iesaka turpmāk ēkas atbilstību mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām izteikt nevis nolietojuma procentos (%), bet gan būvzinātnē atpazīstamā raksturotāja – ēkas drošumā, kā mērvienību lietojot ēkas kopējo drošuma indeksu, kas noteikts atbilstoši promocijas darbā piedāvātajai metodei.

Lai sasniegtu šo mērķi Latvijā, definētas nepieciešamās aktivitātes:

a) atbildīgā standartizācijas tehniskā komiteja *LVS/STK30* izstrādā piemērojamo standartu sarakstu, ko piemēro *LBN405* būvnormatīvu prasību izpildei; šajā sarakstā nepieciešams iekļaut tos nacionālos, Eiropas un starptautiskos standartus, kas piemērojami konstrukciju tehniskajai izpētei un drošuma vērtēšanai;

b) paralēli *LVS/STK30* izstrādā nacionālo standartu atbilstoši šajā promocijas darbā sniegtajiem ieteikumiem un metodoloģijai, pēc tā apstiprināšanas nacionālā standarta statusā to iekļauj a) punktā minētajā sarakstā.

Pētījuma rezultātā izstrādātā metode paver ceļu arī attiecībā uz ēkas drošuma līmeņa monitorēšanu, tostarp mašīnmācīšanās algoritmu iesaisti, lai atvieglotu un uzlabotu kopējā drošuma līmeņa nodrošināšanu ēku ekspluatācijā.

Pētījuma rezultāti

1. Pētījums par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā.
2. Metode, kas balstīta riska pārvaldības principos, ēku iedalīšanai kategorijās kvalitatīvai identificēšanai, kā arī sabiedrības informēšanai par riska objektiem valsts publisko ēku fondā, izmantojot vizuāli konstatējamus konstrukciju bojājumus un nepilnības.
3. Metode, balstīta Eirokodeksos definētajā drošuma konceptā, kas ir piemērota ekspluatācijā esošo ēku nesošo komponentu drošuma novērtēšanai, kā arī vispārīgi dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai.
4. Metodoloģija ekspluatācijā esošo ēku kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai, izmantojot praktiski iegūstamu informāciju par atsevišķo konstrukciju drošuma raksturotājiem un ēkas kopējā drošības indeksa ieviešana, kas ņem vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī tā iespējamā sabrukuma sekas.
5. Nosacītā ietekmes koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Pētījuma ierobežojumi

Piedāvātā ēkas drošuma novērtējuma metodoloģija ir piemērojama ēkām, kurām konstrukciju nestspēju nodrošina tipveida nesošās konstrukcijas – sienas, pārsedes, rīģeļi, kolonnas, kopnes un sijas, kas izgatavotas no dzelzsbetona, koka vai metāla. Rūpnieciski izgatavotām tipveida konstrukcijām ir pieejami objektīvi dati par konstrukciju sākotnējo stāvokli un nosakāms konstrukcijas degradācijas (nolietojuma) līmenis ar zemu rezultātu

izkliedi. Savukārt individuāli izgatavotu konstrukciju gadījumos izkļiedes robežas var būt lielākas nekā noteikts izgatavošanas dokumentācijā, kā arī piemērotu testēšanas metožu izvēle ir ierobežota. Tādēļ būtu jāturpina pētījumi attiecībā uz metodoloģijas pielāgošanu individuāli izgatavotu konstrukciju gadījumos.

Metode ir ierobežota arī ar Eirokodeksos noteiktajiem drošuma nodrošināšanas pieņēmumiem – gan attiecībā uz slodžu un nestspējas modeļiem, kā arī definētajām nenoteiktībām un izkļiežu sadalījumiem.

Normatīvajā līmenī nav noteikts, kāds ir sagaidāmais drošuma līmenis ekspluatācijā esošo ēku konstrukcijām, tāpēc izstrādātā metodoloģija ir vairāk piemērota datu par ēkas drošuma līmeni ievākšanai un savstarpējai salīdzināšanai. Ir valstis, kurās esošo ēku konstrukciju drošums (drošuma indekss), salīdzinot ar projektējamo ēku konstrukcijām, ekonomisku apsvērumu dēļ ir samazināts par 1,5, kas 50 gadu intervālam attiecīgi ir robežās no 1,8–2,8 jeb sabrukšanas varbūtība P_f ir robežās no $3,6 \times 10^{-2}$ līdz $2,6 \times 10^{-3}$.

Nepieciešami papildu pētījumi attiecībā uz ēku kopējās stabilitātes kritērijiem jeb ēkas apgāšanās draudiem ģeotehnisku apsvērumu dēļ. Esošajā ēkas drošuma vērtējumā stabilitātes kritēriji netiek ņemti vērā.

Ēkas kopējo vērtējumu iespējams papildināt arī ar citu būtisko prasību vērtējumu, piemēram, izturību pret ugunsdrošību, nekaitīguma prasībām, akustiku, energoefektivitāti un ilgtspējas kritērijiem. Tomēr tas būtu darāms atsevišķi, un šos kritērijus nevajadzētu iekļaut ēkas drošuma raksturotājā, jo piedāvātā metodoloģija to neparedz.

Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats

Pētījuma teorētisko bāzi veido būvmehānikas un būvkonstrukciju nozares metodes, matemātiskā analīze, matemātiskā statistika, varbūtību teorija, sistēmu teorija.

Promocijas darbā izmantotas vairākas pētniecības metodes:

- kvalitatīvā metode izmantota, veicot tiešos novērojumus par būvniecības un ēku ekspluatācijas procesiem Latvijā, un dokumentu analīze, uz to pamata veikts pētījums par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā;
- analīze un indukcija izmantota, izstrādājot jauno metodoloģiju ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai;
- kvantitatīvā metode izmantota skaitliskos eksperimentos un simulācijās.

Pētījumā izmantotā programmatūra:

- simulāciju veikšanai – atvērta koda programma *Python 3*;
- konstrukciju aprēķiniem – komerciālā programma *Dlubal RFM 5.12*.

Rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs

1. 12th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Technical university, Vilnius, Lithuania, 26.05.–27.05.2016.
2. 11th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, Rezekne Academy of technology, Rezekne, Latvia, 15.06.–17.06.2017.
3. 58. DAfStb-Jahrestagung 2017: “Concrete – keep thinking” and Symposium “Existing structures” (Kaiserlautern Technical university), Kaiserlautern, Germany, 19.09.–21.09.2017.
4. 3rd International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, Riga Technical University, Riga, Latvia, 28.09.–29.09.2017.
5. 13th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius Technical university, Vilnius, Lithuania, 17.05.–18.05.2019.

Promocijas darba autora zinātniskās publikācijas

1. Druķis, P., Gaile, L., Pakrastiņš, L.: **Inspection of Public Buildings Based on Risk Assessment**. In: Procedia Engineering. **172**, 247–255 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.106>. (Publicēts SCOPUS).
2. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Case study of structural reliability of existing building**. In: Vide. Tehnoloģija. Resursi – Environment, Technology, Resources. **3**, 47–52 (2017). <https://doi.org/10.17770/etr2017vol3.2615>. (Publicēts SCOPUS).
3. Druķis, P., Gaile, L., Valtere, K., Pakrastiņš, L., Goremikins, V.: **Study of structural reliability of existing concrete structures**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **251**, (2017). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012087>. (Publicēts SCOPUS).
4. Druķis, P., Gaile, L., Goremikins, V.: **Structural reliability assessment of existing precast concrete building**. Case study. In: The proceedings of the 13th international conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (MBMST 2019) (2019). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.015>.
5. Alekseytsev A.V., Druķis P.: **Optimization steel of structures for buildings with variable desing safety level**. In: Magazine of Civil Engineering, Publisher: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ISSN:2071-4726E-ISSN:2071-0305 (2020), Scopus CiteScore 2018 – 2.75).

2. LITERATŪRAS APSKATS

Promocijas darba izstrādes gaitā veikta ievērojama citu pētījumu analīze par drošuma tēmu. Analizēti avoti par drošuma teorijas attīstību un tās lietošanu saistībā ar konstrukciju drošumu. Sniegts ieskats par publikācijām attiecībā uz konstrukciju drošuma konceptu un konstrukciju robežstāvokļiem, kā arī mainīgajiem lielumiem un nenoteiktībām, kas raksturo konstrukciju drošumu. Ievērojama publikāciju apskate veikta par konstruktīvo elementu galveno drošuma kvantitatīvo raksturotāju – drošuma indeksu β , kas tiek lietots kā kvantitatīvs mērs bojājumu iestāšanās varbūtībai noteiktā laika periodā. Analizēti arī avoti par drošuma sistēmām, to modelēšanas metodēm, kā arī slodžu un materiāli modelēšanu, bojājumu analīzi. Atsevišķa apakšnodaļa veltīta arī publikācijām par kompleksu sistēmu idealizācijas paņēmieniem drošuma vērtēšanas kontekstā, kā arī standartiem attiecībā uz konstrukciju drošuma vērtēšanu. Minētas arī galvenās atziņas no publikācijām par sabiedrībai akceptējamiem riskiem. Atsevišķi literatūras avotu izpētē veltīta apakšnodaļa par publikācijām ēku konstrukciju drošuma un tiltu konstrukciju drošuma vērtēšanā.

Kopā veikta 79 publikāciju apskate un galvenie secinājumi, kas apkopoti darba 2.8. nodaļā, ir šādi:

- 1) drošuma populārākā mērvienība, ko visplašāk lieto industrija un zinātne attiecībā uz drošuma raksturošanu, ir drošuma indekss;
- 2) vērtēšanas algoritmi kļūst komplicētāki, tomēr lietošanas metodes kļūst vienkāršākas, un īpaši svarīga ir rezultātu saprotamība, lasāmība un reproducējamība;
- 3) arvien pieaugoša nozīme ir ekonomiskiem, sociāliem un vides aspektiem, izdarot secinājumus par ēkām un to konstrukciju elementiem;
- 4) lēmumu pieņemšanā būtiska nozīme ir informācijas pieejamībai un tās ticamībai;
- 5) šobrīd pasaulē attiecībā uz ēkām dominē Eirokodeksos noteiktie drošuma līmeņi, tomēr ir atbalstāma arī starptautisko un nacionālo standartu izmantošana;
- 6) lēmumu pieņemšanā ir svarīga risku analīze, tomēr to diferenciacija atkarībā no sekām ir svarīga visos līmeņos;
- 7) būtiska loma ekspluatācijā esošo ēku drošuma novērtēšanā ir materiālu nolietojumam;
- 8) ēkas drošuma novērtēšanā un arī turpmākās ekspluatācijas prognozēšanā ir svarīgi ņemt vērā laika faktoru;
- 9) ēku drošuma datiem ir svarīga vienota platforma, ja ir vēlēšanās attīstīt nākotnes tehnoloģijas drošuma monitorēšanā (piemēram, izmantojot mākslīgo intelektu);
- 10) ēku izbūvē un lietošanā pār jebkuriem citiem apsvērumiem prevelē cilvēku drošība.

3. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS

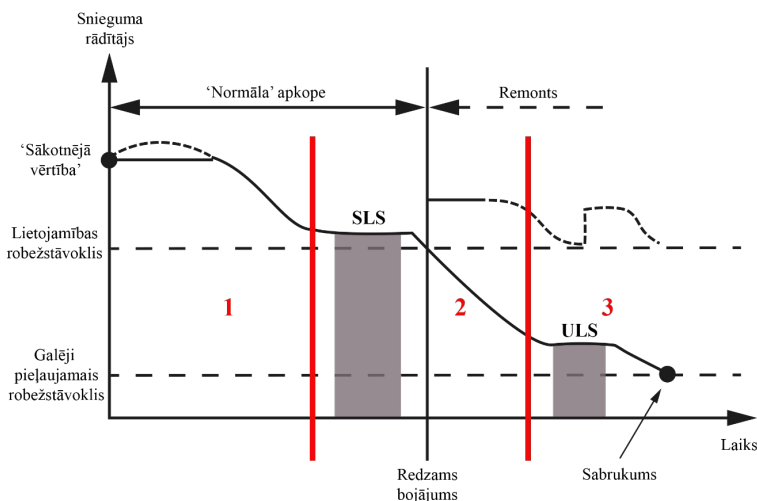
Promocijas darba gaitā veikti vairāki pētījumi ar mērķi izstrādāt metodoloģiju ēku drošuma kvantitatīvai vērtēšanai, ko darba autors turmāk rekomendē ieviest ēku tehniskās apsekošanas praksē:

- veikta ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju tehniskā stāvokļa kvalitatīva novērtējuma analīze un to ietekmējošo faktoru sintēze, pamatojoties uz Latvijā pieejamiem datiem;
- veikta esošo ēku konstrukciju drošuma novērtēšanas prakses analīze Eiropas dalībvalstīs;
- noteikti teorētiskie drošuma līmeņi dažādiem konstrukciju elementiem, t. sk. projektētiem ārpus Eirokodeksu metodoloģijas ietvara.

Balstoties šajos pētījumos, ir gūts teorētiskais pamatojums metodoloģijas izstrādei ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa noteikšanai.

3.1. Ekspluatācijā esošo ēku kvalitatīvā novērtējuma analīze

Sākot pētījumu, tika konstatēts, ka Latvijā nav pieejamu objektīvu apkopotu datu par ēku konstrukcijām un to drošumu. Tādēļ promocijas darba gaitā izstrādāta metode, kas balstās uz vizuāli konstatējamo bojājumu un nepilnību izmantošanu ēku konstrukciju klasificēšanai trijās riska kategorijās – no 1 līdz 3, kur kategorijas ir izvēlētas pēc vispārējiem konstrukciju degradācijas pamatprincipiem un to robežstāvokļiem (3.1. att.).



3.1. att. Ēkas konstrukciju klasifikācija pēc to degradācijas.

Metode piedāvā iegūto datu apstrādi atbilstoši riska pārvaldības principiem. Uz riska grafika vertikālās ass tiek izvietotas iespējamās sekas notikuma gadījumā, uz horizontālās ass – notikuma iespējamība (bojājuma pakāpe jeb riska koeficients). Izmantojot šādu principu, ir

iespējams novērtēt un iedalīt būves pēc bojājuma pakāpes un būves nozīmības (seku klases), lai identificētu riskus un to ietekmi uz ēkas ekspluatācijas drošību.

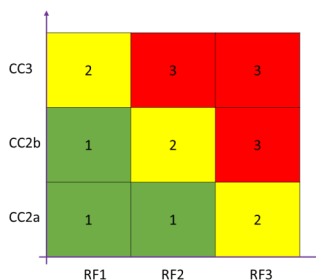
Veicot ēkas tehnisko apsekošanu, bojātās ēkas konstrukcijas tiek klasificētas skalā no RF1 līdz RF3, izmantojot klasificēšanas kritērijus, kas apkopoti 3.1. tabulā (detalizētāk skatīt promocijas darbā).

3.1. tabula

Ēkas bojājumu klasifikācija mehāniskai stiprībai un stabilitātei

Riska koeficients	Pārbaudes rezultāts
RF1	Konstatēti nelieli mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas nerada būtisku risku ēkas lietotāju veselībai un/vai dzīvībai vai videi.
RF2	Konstatēti mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas rada būtisku risku ēkas lietotāju veselībai un/vai dzīvībai vai videi.
RF3	Konstatēti būtiski mehāniskās stiprības un stabilitātes prasību pārkāpumi, kas rada nepieļaujamu risku ēkas lietotāju veselībai un/vai dzīvībai vai videi.

Pamatojoties uz veikto bojājumu klasifikāciju un piešķirot katrai apsekojamajai ēkai sabrukšanas seku klasi atbilstoši Eirokodu metodoloģijai (CC), tiek iegūts šāds vērtējums:



3.2. att. Riska klasificēšanas princips.

Saskaņā ar 3.2. attēlu tiek izdarīts secinājums par ekspluatācijā esošas ēkas riska vērtējumu no skalā no 1 līdz 3, kur:

- “1” – labs stāvoklis / drošs; konstatēti nelieli defekti, kas neapdraud ēkas drošību. Jāpievērš uzmanība apkopes laikā;
- “2” – slikts stāvoklis / drošība jāuzlabo; konstatēti trūkumi, kas rada draudus ēkas drošībai; jānovērš bojājumi;
- “3” – bīstams stāvoklis / nedrošs; atklāti bojājumi, kas rada nopietnus draudus ēkas drošībai; ēkas vai tās daļas ekspluatācija nekavējoties jāpārtrauc.

Gadījumā, ja ēkai pēc tās apsekošanas nav konstatēti bojājumi konstrukcijās, tad neatkarīgi no seku klases ēkai tiek sniegts vērtējums “0” – teicams stāvoklis / drošs; defekti nav identificēti; nekāda darbība nav nepieciešama.

Sadarbībā ar Būvniecības valsts kontroles biroju (BVKB) laikā no 2016. gada janvāra līdz 2017. gada decembrim šī metode tika izmantota, birojam īstenojot Būvniecības likumā noteikto funkciju par publisko ēku ekspluatācijas kontroli.

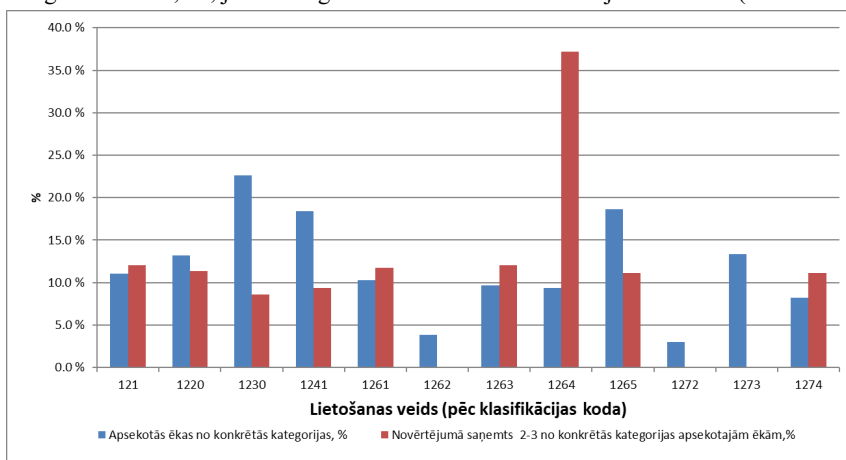
3.2. tabula

Publisko ēku kopējais skaits Latvijā, kurās uzturas vairāk nekā 100 cilvēku un ar platību virs 1000 m² (BVKB piekritisgās) un apseko to ēku skaits pēc kvalitatīvās vērtēšanas metodes

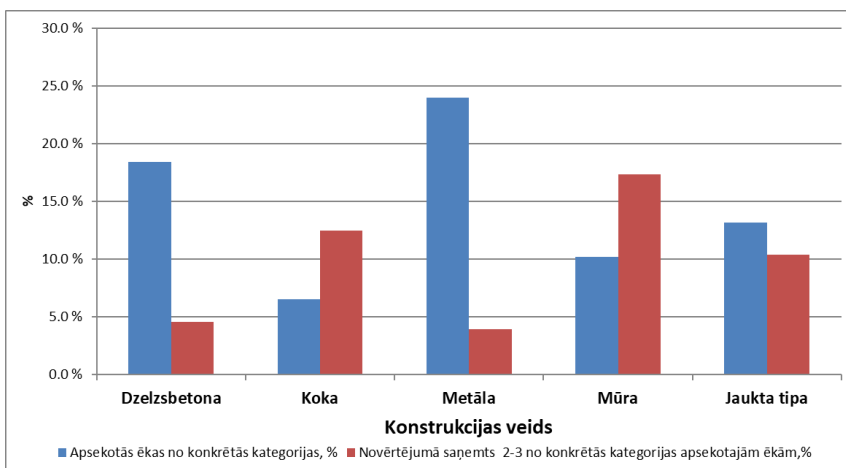
Ēkas lietošanas veids pēc būvju klasifikācijas	Klasifi. kods	Kop. ēku skaits	BVKB ēkas	Īpat-svars, %	Apsek. ēkas	Īpat-svars, %
Viesnīcu ēkas	121	5 452	525	6,5	127	19,5
Biroju ēkas	1220	7 125	1602	20,5	215	10,5
Vairumtirdzniecības un mazumtirdzniecības ēkas	1230	8 116	874	11,2	249	22,1
Sakaru ēkas, stacijas un ar tiem saistītās ēkas	1241	2 608	174	2,2	27	12,3
Garāžu ēkas	1242	11 569	0	0	0	0
Ražošanas ēkas	125	50 307	0	0	0	0
Ēkas izklaides pasākumiem	1261	1 198	331	7,5	2	0,3
Muzeji un bibliotēkas	1262	562	105	1,3	18	14
Skolas, universitātes un zinātniskajai pētniecībai paredzētās ēkas	1263	3 800	1972	23,3	766	32,8
Ārstniecības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas	1264	1 341	461	5,2	117	22,3
Sporta ēkas	1265	1 041	338	4,1	64	15,5
Lauksaimniecību ēkas	1271	84 300	0	0	0	0
Kulta ēkas	1272	1297	67	8,9	20	2,2
Kultūrvēsturiski objekti	1273	49	15	0,4	1	2,6
Citas, neklasificētas ēkas	1274	828 857	551	9	17	1,9
Kopā		1 007 622	7 015	0,7	883	12,6

Veicot datu analīzi apsekotajām ēkām, netika atrasta korelācija starp apsekojamo ēku skaitu konkrētā kategorijā un vērtējuma rezultātu diapazonā 2–3 pēc lietošanas veida vai reģiona. Lai arī atsevišķi vienā kategorijā – ārstniecības vai veselības aprūpes iestāžu ēkas, atklāto bojājumu īpatsvars ir augstāks, salīdzinot ar citiem ēku lietošanas veidiem, tomēr analizējot dziļāk iemeslus, šāda situācija skaidrojama ar nepietiekamu tehnisko uzurēšanu, neveltot pienācīgus resursus savlaicīgai konstrukciju apkopei. Kopumā ēkām pēc lietošanas veida vai reģiona korelācijas koeficients ir robežās no 0,07 līdz 0,09, tādējādi var secināt, ka ēkas tehnisko stāvokli Latvijā neietekmē tas, kādam mērķim un kur tā tiek lietota.

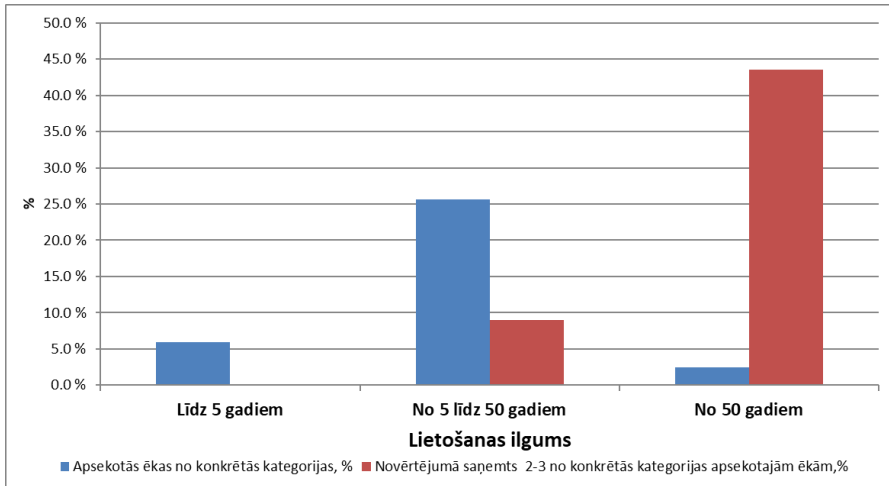
Atšķirīgi dati tika konstatēti attiecībā uz ēkas vecumu un ēkas konstrukciju materiālu. Šeit ir redzama zināma korelācija, un iegūtie rezultāti uzrāda, ka drošuma līmenis ir zemāks ēkām virs 50 gadu vecuma, un, ja tās ir izgatavotas no mūra konstrukcijām vai koka (3.3.–3.6. att.)



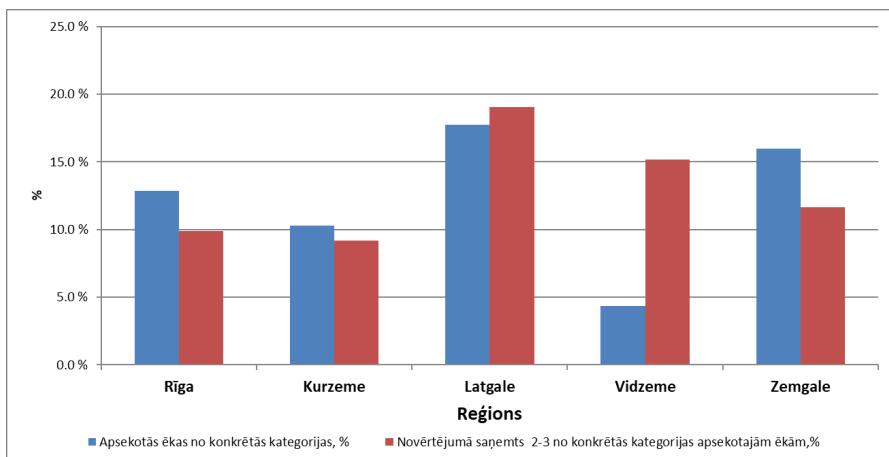
3.3. att. Vērtējumu 2–3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc lietošanas veida.



3.4. att. Vērtējumu 2–3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc konstrukciju veida.



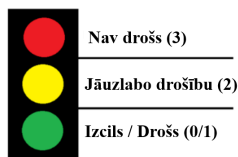
3.5. att. Vērtējumu 2–3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc ēkas vecuma.



3.6. att. Vērtējumu 2–3 saņēmušās ēkas procentuāli pēc reģiona.

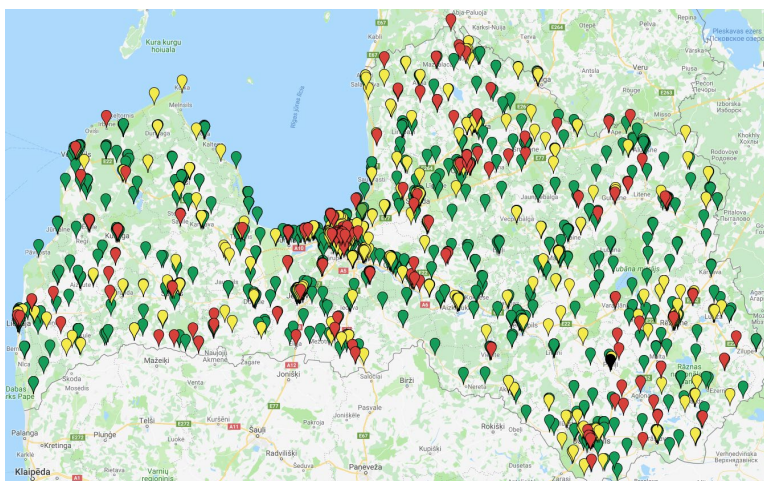
3.1.3. Rezultātu publiskošana sabiedrībai

Sadarbībā ar BVKB tika nolemts arī tas, ka ir svarīgi operatīvi informēt sabiedrību par sabiedrisko ēku drošību. Šim nolūkam tika izstrādāta interaktīvā karte (3.8. att.), kur atspoguļotas visas veiktās pārbaudes, izmantojot informatīvo luksoforu (3.7. att.).



3.7. att. Informatīvais luksofors.

Interaktīvās kartes pamatā ir “Google Map”, un tā lietotājiem ļauj interaktīvi lasīt sīkāku informāciju par veiktajām pārbaudēm, kas veiktas konkrētajai ēkai, pārbaudes kopējo rezultātu un būves atrašanās vietu. 2020. gada augustā fiksēti vairāk nekā 93 000 unikālu skatījumu, kas liecina par sniegtās informācijas aktualitāti.



3.8. att. Interaktīvā pārbaudu rezultātu karte.

Ekspluatācijā esošo ēku kvalitatīvā novērtējuma analīze ļauj masveidā indikatīvi novērtēt ēku stāvokli, balstoties uz vizuālo vērtējumu, kā arī informēt sabiedrību par riskiem saistībā ar ēku drošību. Metode ir laika ziņā efektīva, vienkārša lietošanai, viegli pārskatāma, sabiedrībai un ieinteresētajām personām saprotama. Novērtējums skalā no 0 līdz 3 ir piemērots kopējā ēku tehniskā stāvokļa raksturošanai.

Piedāvātā metode prezentēta starptautiskā konferencē Viļņā 2016. gadā un atspoguļota zinātniskajā publikācijā [75]. Jāatzīmē, ka šī metode tika ieviesta praksē BVKB darbā no 2016. gada un pēc šiem principiem vērtēšana tiek īstenota joprojām.

Ņemot vērā iegūtos apsekošanas rezultātus, var secināt, ka publisko ēku jomā būtiski ir pievērst uzmanību ēkas nesošajām konstrukcijām un to vecumam. Ēkām, kurām ir sniegts vērtējums 2–3, ir jāveic to konstrukciju detalizēta izpēte. Kā viena no metodēm šādai detalizētai izpētei tiek piedāvāta promocijas darba gaitā izstrādātā metodoloģija, kas ļauj noteikt gan atsevišķo ēku konstruktīvo elementu drošumu, gan kopējo ēkas konstrukciju drošuma līmeni (skat. 4. nodaļu).

3.2. Esošo būvju vērtēšanas prakse Eiropā

Darba gaitā veikts pētījums ar mērķi izanalizēt Eiropas Savienības dalībvalstīs pastāvošo praksi attiecībā uz būvju konstrukciju drošuma vērtēšanu, lai atklātu citu valstu pieredzi un atziņas par drošuma vērtēšanas praksi. Pētījums balstīts publikācijā [2] pieejamo datu analīzē.

Atšķirības starp dalībvalstīm pastāv attiecībā uz šādiem kritērijiem:

- uzraudzības objektu – ēku un inženierbūvju dažādība;
- normatīvo regulējumu (vērtēšana ir obligāta vai brīvprātīga);
- vērtēšanas regularitāti (vērtēšana ir ar noteiktu laika intervālu vai pie noteiktām darbībām ar būvi, piemēram, mainoties ēkas īpašniekam, mainot lietošanas veidu, pēc negadījumiem (zemestrīces, transporta izraisīti bojājumi, terorakti) vai pirms pārbūves vai atjaunošanas darbiem utt.);
- vērtēšanas saturu (metodoloģija) – vai tā ir vispārēja vizuāla pārbaude vai detalizētāka pārbaude, t. sk. instrumentāla;
- pieļaujamo (akceptējamo) drošuma līmeni (sabrukšanas varbūtības līmenis; zemāks vai līdzvērtīgs jaunbūvēm).

Atšķirības veido gan pastāvošās tradīcijas, gan profesionālo nozaru (būvnieku, būvju īpašnieku u. c.) un akadēmiskās vides (izpētes, publikācijas) aktivitātes. Aktivitātes visvairāk ietekmē notikušie negadījumi ar būvēm, ejot bojā ievērojamam skaitam cilvēku. Pēc šādām traģēdijām parasti sabiedrība pieprasa aktivitātes, lai negadījumi neatkārtotos, un tas būvniecības nozarei liek meklēt risinājumus.

Saistībā ar šo jautājumu pēdējās desmitgadēs ir tapušas vairākas publikācijas par konstrukciju vērtēšanu, kurās tiek atsevišķi runāts arī par konstrukciju drošumu. Šī tēma ir īpaši aktuāla pēdējos gados, kad saskaņā ar dažādu ziņojumu palīdzību politikas veidotāji sāk uzsvērt nepieciešamību pievērsties esošo būvju atjaunošanas svarīgumam, tostarp attiecībā arī uz konstrukcijām.

2015. gadā publicēts dokuments [2], kurā apkopots normatīvo dokumentu saraksts attiecībā uz būvju drošuma vērtēšanu 12 Eiropas Savienības valstīs – Kiprā, Čehijā, Dānijā, Francijā, Vācijā, Grieķijā, Īrijā, Itālijā, Holandē, Spānijā, Šveicē un Apvienotajā Karalistē. Dokumentā nav iekļauta Latvijas prakse. Tieši šis fakts šķita interesants, lai salīdzinātu minētā pētījuma datus ar Latvijas praksi. Galvenie secinājumi ir, ka:

1) drošuma vērtēšana ir obligāta un galvenokārt atbilstoša nacionālajiem (nevis starptautiskajiem) standartiem;

2) vērtēšanā tiek izmantotas gan kvalitatīvās vērtēšanas metodes, gan kvantitatīvās, lielākajā daļā gadījumu izmantojot abu metožu apvienojumu;

3) piecās valstīs konstrukciju drošuma indekss tiek izmantots kā drošuma raksturotājs, tomēr dažādi interpretējot drošuma līmenī lietošanā esošām konstrukcijām, salīdzinot ar jaunām, savukārt pārējās astoņās valstīs kā drošuma mērvienība ir noteikti citi raksturotāji (dažādi koeficienti, bojājumu pazīmes u. tml.), un nav korelācijas rezultātām ar būves lietošanas resursu;

4) Latvija ir vienīgā valsts, salīdzinot ar pārējām 12, kurā netiek mērīts drošums, bet tiek sniegts vērtējums par ēkas nolietojumu.

3.3. Uz dažādu normatīvo bāzu projektēto konstrukciju drošuma noteikšana

3.3.1. Metodes teorētiskais pamatojums

Lai īstenotu mērķi par ēkas kopējo konstrukciju drošuma līmeņa noteikšanas metodoloģiju, viens no uzdevumiem bija izstrādāt metodi, ar kuras palīdzību noteikt atsevišķo konstrukciju elementu drošuma līmeni (drošuma indeksu β). Drošuma indeksa β noteikšana atsevišķiem konstrukciju elementiem tiek meklēta ar iterācijas palīdzību, atrodot tā β_0 vērtība, kas ir tuvākā, lai nodrošinātu šādu nosacījuma izpildi:

$$U = (\gamma_G E_{G,k} + \gamma_Q E_{Q,k}) / \gamma_R R_k \rightarrow 1, \quad (3.1.)$$

kur attiecīgi: materiāliem

$$\gamma_R = \frac{\exp(-1,645V_R)}{\exp(-\alpha_R \beta_d V_R)} \quad (3.2.)$$

pastāvīgajām slodzēm

$$\gamma_G = 1 / (1 + 0,7\beta_d V_G) \quad (3.3.)$$

mainīgajām slodzēm

$$\gamma_Q = \frac{1 - V_Q(0,45 + 0,78 \cdot \ln(-\ln(\Phi^{-1}(\alpha_G \beta))))}{1 - V_Q(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98)))} \quad (3.4.)$$

γ – attiecīgie iedarbju un materiālu pretestības daļējie koeficienti;

V – attiecīgo iedarbju un materiālu pretestības variācijas koeficienti;

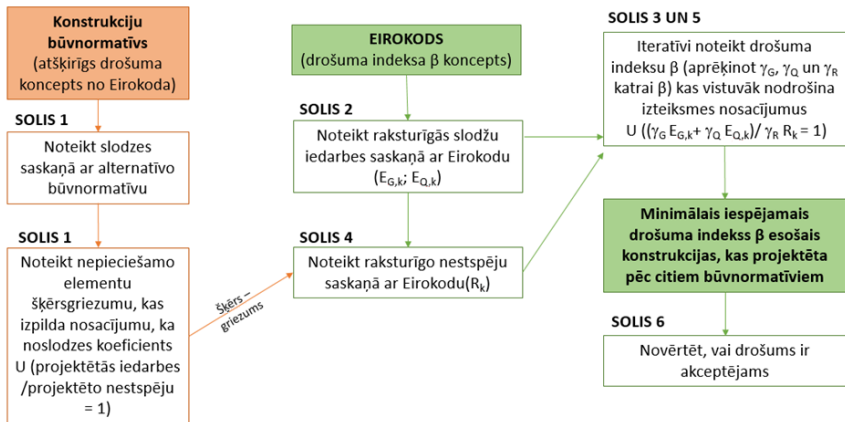
α – attiecīgie iedarbju un materiālu jutības koeficienti;

Φ^{-1} – standartizēta normālā sadalījuma kumulatīvā sadalījuma funkcija;

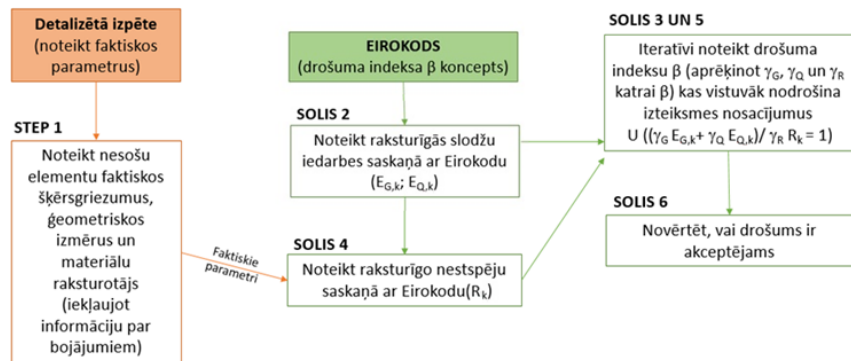
β – drošuma indekss jeb konstrukcijas sabrukšanas varbūtības raksturotājs;

U – konstrukciju noslodzes koeficients.

Drošuma indeksa β noteikšanas principiālās blokshēmas redzamas 3.9. un 3.10. attēlā. Lai izvēlētos 3.9. vai 3.10. attēlā redzamo blokshēmu, inženierim jāveic objektā apsekošana uz vietas un jāsalīdzina dokumentācijā pieejamie dati ar objektā konstatēto situāciju. Pieļaujama nestspējas raksturotāju samazināšana, izmantojot vizuālajā apskatē konstatēto faktisko izstrādājumu tehnisko stāvokli.



3.9. att. Drošuma indeksa noteikšanas principiālā blokshēma izstrādājumiem, kuriem ir iespējams noteikt faktiskos raksturotājus no dokumentācijas.



3.10. att. Drošuma indeksa noteikšanas principiālā blokshēma izstrādājumiem, kuriem nav iespējams noteikt faktiskos raksturotājus no dokumentācijas.

3.3.2. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais lietojums (case study). Tērauda kopne un sija

Iepriekš aprakstītās metodes praktiskā lietojuma izpēte veikta ekspluatācijā esošai ēkai Liepājā, Latvijā, kā arī izpētīts gadījums, ja tā pati ēka atrastos Rīgā, Latvijā. Individuālā drošuma indeksa β noteikšanai izvēlēta tērauda jumta kopne un pārseguma sija. Zināms, ka vērojamas atšķirības dažādu normatīvo sistēmu lietderīgo slodžu vērtībās, īpaši tas attiecas uz klimatiskajām slodzēm.

Promocijas darbā var iepazīties ar detalizētu rezultātu izvedumu praktiskajiem piemēriem, tālāk tekstā sniegts izpētes rezultātu kopsavilkums.

3.3. tabula

Kopnes augšējās joslas elementu drošuma indekss spiedē un liecē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~ 100 % noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	<i>SNiP</i>	Eirokodekss	<i>SNiP</i>	Eirokodekss s	<i>SNiP</i>	Eirokodekss s
β		3,8		2,6		3,2
γ_Q		1,30		0,90		1,09
γ_G		1,27		1,18		1,22
γ_R		1,12		1,04		1,08
Iekšējie spēki	$N_d = 388$ kN $M_d = 4,89$ kN·m	$N_{Ed} =$ 546,9 kN $M_{s,Ed} =$ 6,9 kN·m $M_{h,Ed} =$ 8,6 kN·m	$N_d =$ 388 kN $M_d =$ 4,89 kN·m	$N_{Ed} =$ 418,1 kN $M_{s,Ed} =$ 5,3 kNm $M_{h,Ed} =$ 6,6 kN·m	$N_d =$ 483 kN $M_d =$ 6,08 kN·m	$N_{Ed} =$ 478,4 kN $M_{s,Ed} =$ 6,0 kN·m $M_{h,Ed} =$ 7,5 kN·m
Noslodzes koeficients U	68 %	98 %	98 %	100 %	95 %	99 %
Šķērsgriezums	□160 × 160 × 4		□130 × 130 × 4		□150 × 150 × 4	

3.4. tabula

Kopnes apakšējās joslas elementu drošuma indekss stiepē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~ 100 % noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	<i>SNiP</i>	Eirokodekss	<i>SNiP</i>	Eirokodekss	<i>SNiP</i>	Eirokodekss
β		4,3		2,5		3,2
γ_Q		1,50		0,87		1,09
γ_G		1,30		1,18		1,22
γ_R		1,15		1,03		1,08
Iekšējie spēki	$N_d =$ 401,9 kN	$N_{Ed} =$ 633,2 kN	$N_d =$ 401,9 kN	$N_{Ed} =$ 424,2 kN	$N_d =$ 500 kN	$N_{Ed} =$ 496,3 kN
Noslodzes koeficients U	59 %	99,2 %	95 %	98 %	96 %	97,5 %
Šķērsgriezums	□140 × 140 × 4		□90 × 90 × 4		□90 × 90 × 5	

3.5. tabula

Kopnes režģa diagonālelementa drošuma indekss spiedē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~ 100 % noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss
β		3.3		2.8		3.3
γ_Q		1.12		0.96		1.12
γ_G		1.23		1.20		1.23
γ_R		1.08		1.05		1.08
Iekšējie spēki	$N_d = 99,2 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 125,2 \text{ kN}$	$N_d = 99,2 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 111,9 \text{ kN}$	$N_d = 123,4 \text{ kN}$	$N_{Ed} = 125,2 \text{ kN}$
Noslodzes koeficients U	81 %	98 %	95 %	98 %	100 %	97,5 %
Šķērsgriezums	$\square 80 \times 80 \times 3$		$\square 80 \times 80 \times 2,5$		$\square 80 \times 80 \times 3$	

3.6. tabula

Jumta pārseguma sijas drošuma indekss liecē

Pilsēta	Pie faktiskās noslodzes		Pie teorētiskās ~ 100 % noslodzes			
	Liepāja		Liepāja		Rīga	
Standarts	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss s	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss s	<i>SNiP</i>	Eiropkodekss s
β		3.5		2.7		3.5
γ_Q		1.19		0.93		1.19
γ_G		1.25		1.19		1.25
γ_R		1.10		1.04		1.10
Iekšējie spēki	$M_d = 589 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{Ed} = 777,5 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_d = 589 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{Ed} = 650 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_d = 732 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{Ed} = 777 \text{ kN}\cdot\text{m}$
Noslodzes koeficients U	80 %	99 %	100 %	98 %	99 %	99 %
Šķērsgriezums s	IPE600		IPE550		IPE600	

Iepriekš noteiktos drošuma indeksus β iespējams salīdzināt ar mērķa drošuma indeksiem no seku klasēm atbilstoši EN1990 ($\beta = 3,8$ attiecīgajai RC2 klases ēkai 50 gadu references periodam). Liepājā jumta kopņu stieptajam elementam drošības līmeņa starpība ir 34 %, ko varētu uzskatīt par ievērojamu, jo attiecīgā sabrukuma varbūtība palielināsies no 0,0072 % līdz 0,62 %.

Aprēķinātie elementu drošuma indeksi β analizētajiem elementiem ar Eiropkodeksa aprēķina iedarbēm un elementu nestspējām pie faktiskās noslodzes svārstās no 4,3 līdz 3,3. Aprēķinātie

elementu drošuma indeksi β analizētajiem elementiem ar lietderības koeficientu $U_{100} = 100\%$ atbilstoši padomju būvnormatīvu sistēmas *SNiP* aprēķina slodzēm un elementu nestspējām Liepājas pilsētā svārstās no 2,5 līdz 2,8, Rīgā no 3,2 līdz 3,5.

3.3.3. Drošuma indeksa β noteikšanas praktiskais lietojums (*case study*). Dzelzsbetona paneļi

Dažādu normatīvo sistēmu mainīgo slodžu vērtībās uz pārsegumiem, kā arī saliekamajiem dzelzsbetona elementiem pašā nestspēju aprēķinu metodikā ir vērojamas atšķirības, tāpēc par pētījuma objektu izvēlētas piecas tipveida dobumotas saliekamās dzelzsbetona plātnes atbilstoši produktu katalogam. Aprēķins veikts piecām dažādām ēkām.

Promocijas darbā var iepazīties ar detalizētu rezultātu izvedumu praktiskajiem piemēriem, tālāk tekstā sniegts izpētes rezultātu kopsavilkums.

25 analizēto gadījumu izpētes rezultāti pie 100% noslodzes (pieci dažādi paneļi, pieci ēkas lietojuma veidi) apkopoti 3.7. tabulā.

3.7. tabula

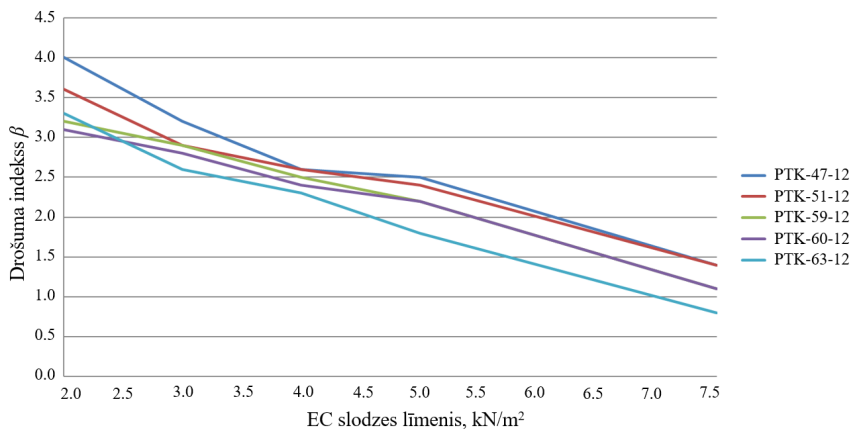
Dobumoto saliekamo pārseguma paneļu drošuma indekss

		(PTK-47-12)		(PTK-51-12)		(PTK-59-12)		(PTK-60-12)		(PTK-63-12)	
		$L = 4,7\text{ m}$		$L = 5,1\text{ m}$		$L = 5,9\text{ m}$		$L = 6,0\text{ m}$		$L = 6,3\text{ m}$	
		SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC	SNiP	EC
Dzīvojamās ēkas		4Ø10		4Ø10		2Ø10&2Ø12		2Ø10&2Ø12		6Ø10	
	β	–	4,0	–	3,6	–	3,2	–	3,1	–	3,3
	U	71 %	100 %	84 %	100 %	94 %	99 %	97 %	99 %	88 %	100 %
Biroju ēkas		4Ø10		4Ø10		6Ø10		6Ø10		2Ø10&3Ø12	
	β	–	3,2	–	2,9	–	2,9	–	2,8	–	2,6
	U	82 %	98 %	97 %	100 %	89 %	100 %	92 %	100 %	97 %	99 %
Viesnīcu ēkas		4Ø10		2Ø10&2Ø12		7Ø10		7Ø10		2Ø10&4Ø12	
	β	–	2,6	–	2,6	–	2,5	–	2,4	–	2,3
	U	97 %	98 %	95 %	100 %	92 %	99 %	95 %	98 %	95 %	100 %
Mazum-tirdzniecības ēkas		2Ø10&2Ø12		6Ø10		2Ø10&4Ø12		8Ø10		9Ø10	
	β	–	2,5	–	2,4	–	2,2	–	2,2	–	1,8
	U	94 %	100 %	92 %	99 %	98 %	100 %	98 %	100 %	98 %	99 %
Noliktavu ēkas		2Ø10&2Ø12		6Ø10		2Ø10&4Ø12		2Ø10&4Ø12		9Ø10	
	β	–	1,4	–	1,4	–	1,1	–	1,1	–	0,8
	U	90 %	99 %	88 %	99 %	94 %	99 %	97 %	100 %	93 %	99 %

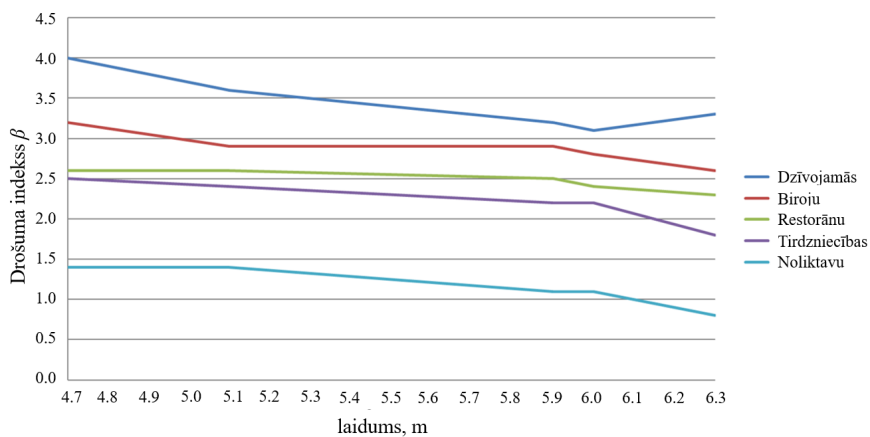
Pārseguma paneļu drošuma indekss β atkarībā no paneļu tipa un lietojuma veida svārstās robežās no 4,0 līdz 3,1 dzīvojamajām ēkām, no 2,5 līdz 0,8 tirdzniecības un noliktavu ēkām.

Drošuma indeksa β mērķa vērtība atbilstoši Eirokodeksam projektētai ēkai ar kalpošanas laiku 50 gadu un *RC2* drošuma klasi ir 3,8. Zemākas mērķa drošuma indeksa β vērtības ir noteiktas *ISO 13822*. Ēkām ar vidējo seku klasi un periodu 50 gadu ir 2,5.

Drošuma indeksa β izmaiņas atkarībā no raksturīgajām mainīgajām slodzēm uz pārsegumu un atkarībā no paneļu laiduma apkopotas attiecīgi 3.11. un 3.12. attēlā.



3.11. att. Drošuma indeksa izmaiņas pie 100 % noslodzes atkarībā no raksturīgās mainīgas slodzes vērtības.



3.12. att. Drošuma indeksa izmaiņas pie 100 % noslodzes atkarībā no paneļu laiduma.

Lūzumi grafikos skaidrojami ar to, ka konstruktīvo apsvērumu dēļ, aprēķinus veicot saskaņā ar SNiP sistēmu, ne vienmēr iespējams noslodzes koeficientu U_{100} iegūt tieši 100 %. Redzams, ka apskatītajos intervālos drošuma indeksa samazinājums ir straujāks, palielinoties mainīgai slodzei uz pārsegumu nekā palielinoties paneļa laidumam. Tādējādi var secināt, ka atšķirībām aprēķina procedūrās starp apskatītajiem normatīviem ir mazāka ietekme uz elementa drošumu nekā definētās dažādās mainīgo slodžu vērtības.

4. EKSPLUATĀCIJĀ ESOŠU ĒKU KOPĒJĀ DROŠUMA LĪMEŅA NOTEIKŠANAS METODOLOĢIJA

4.1. Vispārīgi

Balstoties uz iepriekšējās nodaļās veikto pētījumu analīzi, veiktajiem apsekojumiem un rezultātiem, šajā nodaļā sniegts kopsavikums par ekspluatācijā esošu ēku kopējā drošuma līmeņa noteikšanas metodoloģiju, kas balstīta uz ēkas kopēja drošības indeksa ieviešanu, tādējādi globāli raksturojot ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti.

Metodoloģija iedalāma trīs posmos, un tās koncepts atspoguļots blokshēmā (4.1. att.):

1. posms (1.–3. solis)

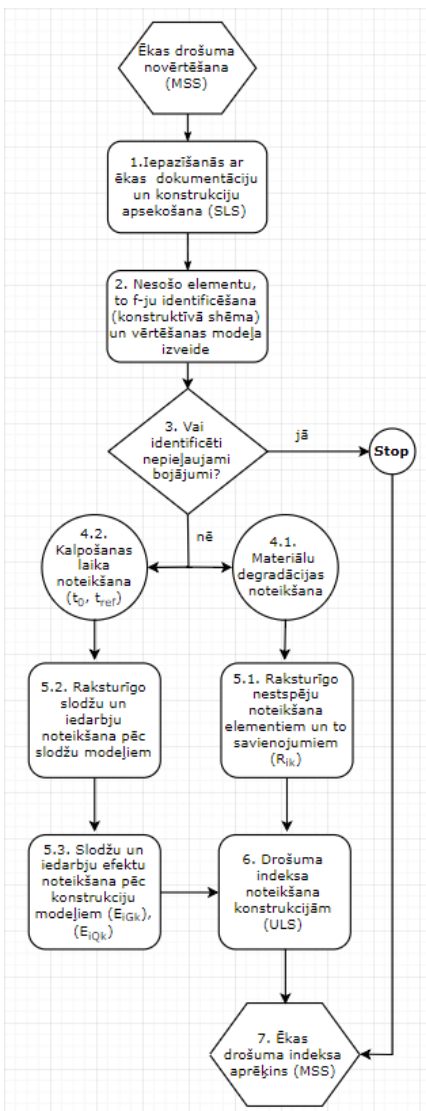
Šajā posmā tiek veikta vispārēja ēkas tehniskā apsekošana, vizuāli identificējot bojātās konstrukcijas un sniedzot informāciju par konstrukciju materiālu, lietošanas apstākļiem, konstrukciju bojājuma raksturu, kā arī iespējamā sabrukuma riska līmeni. Šī posma teorētiskais izklāsts – 3.1. nodaļā.

2. posms (4.–6. solis)

Ēkas konstrukciju tehniskā izpēte. Tās uzdevums ir iegūt objektīvu informāciju, kas noderīga turpmākajiem aprēķiniem. Šajā posmā tiek izveidots ēkas raksturojošais konstruktīvais modelis, izpētīti visi ierobežojumi un pieņēmumi gan materiālu, gan iedarbju pusē, kā arī noteikti atsevišķu ēkas konstrukciju elementu drošuma indeksi β .

3. posms (7. solis)

Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana



4.1. att. Ēkas drošuma līmeņa noteikšanas principiālā blokshēma.

4.2. Kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējums

Pēc rūpīgas 1. un 2. posma izpildes un attiecīgās informācijas iegūšanas var sākt metodoloģijas 3. posmu – visas ēkas drošuma līmeņa novērtēšanu.

Šī posma aktivitātes iedalāmās divos apakšposmos:

- kopējais ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa novērtējums, izmantojot individuālos drošuma indeksus un konstrukciju elementu ietekmes koeficientus;
- ieteicamo priekšlikumu analīze, lai apsvērtu, vai un cik daudz uzlabojumu būtu jāveic, lai sasniegtu efektīvu kopējo mehāniskās stiprības un stabilitātes līmeni.

4.2.1. Ēkas kopējā drošuma līmeņa noteikšana

Promocijas darbā izstrādātā metodoloģija kopējā drošuma līmeņa izmaiņu kvantitatīvam novērtējumam, kas ir piemērota praktiskai ieviešanai, ņem vērā šādu ēku konstrukciju parametru un to raksturojumu ietekmi uz visas ēkas drošumu:

- ēkas nesošo konstrukciju komponentu (kopņu, saišu, kolonu, plātņu utt.) sadalījumu pa tipiem un to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā;
- avārijas gadījumā iespējamo nosacīto ēkas sabrukuma tilpuma daļu;
- iespējamā sabrukuma sekas.

Ņemot vērā to, ka atsevišķo elementu sabrukumu scenāriju varbūtība un sabrukuma sekas korelē arī visas ēkas sabrukšanas varbūtību un sekām, kā arī to, ka parametru vidējie lielumi ir objektīvi un raksturo parādību kopumā, promocijas darbā kopējā drošuma raksturošanai tiek piedāvāts izmantot parametru (indeksu), kas ir datu kopas svērtā ģeometriskā vidējā vērtība:

$$\left(\prod_{i=1}^n X_i^{w_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (4.1.)$$

kur X_i – atsevišķs elements no elementu kopas;

w_i – elementa X ietekmes koeficients.

Aizvietojojot elementu X_i izlases paraugā ar konstrukcijas komponentes drošuma indeksu β un elementa svaru w ar nosacīto ietekmes koeficientu W , kas ņem vērā iepriekš aprakstītos efektus, iegūst vienādojumu parametram Λ , kas raksturo visas ēkas kopējo mehānisko izturību un stabilitāti, kas turpmāk tiek saukts par **globālo ēkas drošuma indeksu**.

$$\Lambda = \left(\prod_{i=1}^n \beta_i^{W_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n W_i} = e^{\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \beta_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}, \quad (4.2.)$$

kur konstruktīvā elementa vai komponentes drošuma indeksa (Eirokodeksa drošuma koncepcijas izpratnē) datu kopa ir $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$;

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ ir konstruktīvā elementa nosacītais ietekmes koeficients.

Atkarībā no metodes lietojuma mērķa var pieņemt aprēķinātās individuālo elementu un komponentu vērtības vai arī ierobežot ar maksimālajām vērtībām, kas vienādas ar mērķa drošuma indeksu β atbilstoši ēkas seku klasei (2.2.–2.6. tab.).

Izanalizējot dažādu statistisko vidējo lielumu īpašības, konstatēts, ka vidējais svērtais ģeometriskais lielums ir atbilstošākais parametrs minētās parādības raksturošanai, jo ir maz jutīgs uz datu kopas izlecošajām vai galējām vērtībām (*outliers*), vienmēr ir mazāks par vidējo aritmētisko vērtību, kā arī vislabāk piemērots datu kopai, kas var tikt eksponenciāli sakārtota.

Parametrs, kas raksturo ēkas kopējās mehāniskās izturības un stabilitātes izmaiņu neatkarīgi no ēkas seku klases, var tikt aprēķināts kā relatīvais lielums, kas turpmāk tiek saukts par **globālo ēkas relatīvo drošuma indeksu** Λ_{GRI} :

$$\Lambda_{GRI} = \frac{CC_{\beta} - \Lambda}{CC_{\beta}} 100\%, \quad (4.3.)$$

kur CC_{β} – mērķa drošuma indekss β atbilstoši ēkas seku klasei;

Λ – globālais ēkas drošuma indekss.

Gadījumā, ja visu individuālo komponentu drošuma indeksi β ir vienādi ar mērķa drošuma indeksu CC_{β} atbilstoši ēkas seku klasei, globālais ēkas drošuma indekss Λ sakrīt ar mērķa drošuma indeksu CC_{β} individuālai komponentei, t. i., $\Lambda_{GRI} = 0\%$, un ēkas konstrukcijas globālais drošuma līmenis var tikt uzskatīts par vienādu ar atbilstošo sabrukuma varbūtību jaunai konstrukcijai.

Saskaņā ar atsevišķu konstrukciju drošuma ekspertu viedokli [35] cilvēku drošības aspektu dēļ individuālās komponentes drošuma indeksu β nevajadzētu pieļaut zemāku par 1,5. Globālais ēkas drošuma indekss Λ šādu vērtību var sasniegt tikai tad, ja visu individuālo komponentu drošuma indeksi β sasniedz šo vērtību vai arī daļai tā ir zemāka, kas nav pieļaujams. Tādējādi, iespējams definēt globālo ēkas relatīvo drošuma indeksu Λ_{GRI} , kas atbilstu konstrukcijai esošajai avārijas stāvoklī.

Pārējās Λ_{GRI} starpvērtības praktiski var tikt izmantotas šādu efektu novērtēšanai:

- savstarpējo novērtējumu starp vairākiem ēku nesošo konstrukciju tipiem jutīgumu uz degradācijas riskiem;
- dažādu nesošo konstrukciju pastiprinājuma risinājumu ietekmi uz ēkas kopējās drošības līmeņa izmaiņām;
- salīdzināt ēku savstarpējos drošuma līmeņus.

Katra atsevišķā elementa ietekmi kopējā drošuma novērtēšanā ņem vērā ar aprēķināto komponentes drošuma indeksu β , bet elementa sasaisti un nozīmi sistēmā, kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, ņem vērā ar nosacīto ietekmes koeficientu W .

4.2.2. Nosacītā tilpuma metode svāra koeficientu W noteikšanai

Promocija darbā piedāvāta metode konstruktīvā elementa vai komponentes nosacītā ietekmes koeficienta W noteikšanai, kas ļauj praktiski ņemt vērā komponentes individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā. Katra

elementa nosacītā ietekmes koeficienta W vērtību apgabals ir $[0; 1]$ un ir atkarīgs no nosacīta ēkas sabrukuma apjoma avārijas gadījumā.

Kā jau minēts 2.5. nodaļā, reālu konstruktīvo sistēmu analīze ir ļoti sarežģīts uzdevums. Sabrukuma apjomi kāda atsevišķa elementa sabrukuma gadījumā ir tieši atkarīgi no visas ēkas konstruktīvās shēmas (statiski noteicama vai nenoteicama konstrukcija, elements saslēgts ar citiem elementiem nosacītā virknē vai paralēlslēgumā, atsevišķie elementi izveido komponenti (piemēram, kopni, rāmi utt.), kas savukārt kopējā konstruktīvajā shēma var tikt iesaistīti dažādi).

Lai metode kopējā ēkas konstrukcijas drošuma līmeņa izmaiņu novērtējumam būtu veiksmīgi realizējama praksē reāliem objektiem, izstrādāta metode vieglākai sabrukuma apjoma novērtēšanai.

Gandrīz visu tipisko ēku tilpumu ir iespējams nosacīti iedalīt kubos vai paralēlskalduos (tilpuma vienībās), kuru izmēri atspoguļo raksturīgo konstrukciju laidumu un/vai soli ēkā. Daudzstāvu karkasa ēkām rekomendēts pieņemt paralēlskaldu divas malas aptuveni vienādas ar mazāko kolonnu soli plānā, savukārt augstumu vienādu ar stāva augstumu, ja tas nav divas reizes lielāks par abu pārējo malu izmēriem. Industriālajās ēkās ar izteikti mazāku konstrukciju soli vienā virzienā visus izmērus nosacītajam tilpumiņam pieņemt aptuveni vienādus ar šo soli. Kuba vai paralēlskaldu malu izmēra izvēle ir atkarīga no konkrētās ēkas.

Tad viss ēkas tilpums raksturojās ar summāro tilpuma vienību skaitu:

$$V = \sum v, \quad (4.4.)$$

kur $v = a \cdot b \cdot c = 1$ – nosacītais kubs vai paralēlskalnis (tilpuma vienība).

Tiek novērtēts arī tilpuma vienību skaits apskatāmā elementa sabrukuma gadījumā:

$$V_i = \sum v_i, \quad (4.5.)$$

kur $v_i = a \cdot b \cdot c = 1$ – nosacītais kubs vai paralēlskalnis (tilpuma vienība), kas attiecas uz konkrētā elementa sabrukuma sekām.

Ēkas nesošā karkasa elementus iedala raksturīgos tipos (piemēram, pārseguma sijas, malējās kolonnas 1. stāvā, vidējās kolonnas 1. stāvā, diafragmas utt.), kur atsevišķa elementa sabrukuma gadījumā provizoriski realizētos vienāds skaits sabrukušo kubiņu V_i . Ja viena konstruktīvā tipa ietvaros ir konstatēti būtiski atšķirīgi individuālie drošuma indeksi β , tad tos uztver par atšķirīgiem tiptiem.

Ietekmes koeficientu vērtības piešķir proporcionāli sabrukušo kubiņu skaitam, apskatot konkrēta tipa reprezentatīvo elementa sabrukuma scenāriju un pieņemot, ka maksimālajam sabrukuma apjomam ēkā ietekmes koeficients $W = 1$. Tādējādi konstrukcijas mehāniskai izturībai un stabilitātei nozīmīgāko konstruktīvo elementu degradācija vai pastiprināšana veidos lielāku ietekmi uz globālo drošuma novērtējumu nekā maznozīmīgāki elementi, kas konstrukcijā ir vairāk (pēc skaita).

Tad individuālās komponentes svāra koeficientu W_i nosaka pēc sakarības:

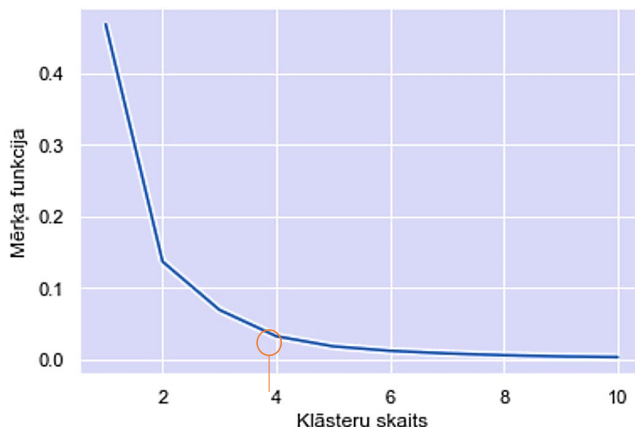
$$W_i = \frac{V_i}{V} \leq 1, \quad (4.6.)$$

kur V_i – novērtētais tilpuma vienību skaits apskatāmā elementa sabrukuma gadījumā;
 V – visas ēkas nosacītais tilpums, vienību skaits.

Ar mērķi noteikt katram ēkas tipam raksturīgos koeficienta W diapazonus veikta tipveida ēkas komponentu nosacīto ietekmes koeficientu W_i apstrāde ar klāsterizācijas metodi (*Clustering*). Izmantots K vērtības (*K-means*) algoritms, kas klasificē attiecīgo datu kopumu, izmantojot noteiktu skaitu klāsteru un minimizē mērķa funkciju:

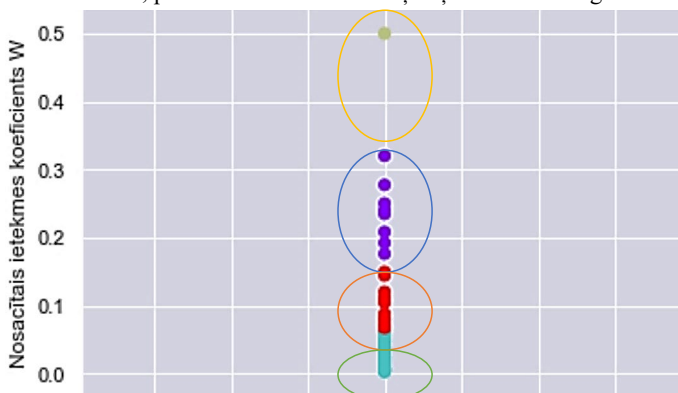
$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in W_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_{kj})^2, \quad (4.7.)$$

kur W_k – svara koeficientu kopa k -tajā klāsterī;
 \bar{x}_{kj} – k -tā klāsterā j -tais klāsterā centra mainīgais.



4.2. att. Optimālā klāsteru skaita noteikšana daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu.

Optimālai klāsteru skaita atrašanai izmantota “elkoņa metode” (“*Elbow method*”) jeb atrasts tāds klāsteru skaits, pie kura K vērtības izmaiņa kļūst maznozīmīga.



4.3. att. Nosacītā ietekmes koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu (K vērtība = 0,032).

Koeficienta W diapazoni daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu

Vieta un ietekmes apraksts	Elementa iespējamā funkcija	Piemērs	W_i Diapazons
Elements pārsvarā nosacītā aktīvajā vai pasīvajā paralēlslēgumā (pašsabrūkums vai laiduma vai divu laidumu sabrukums vienā stāva līmenī)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un vertikālo slodžu pārveidāšanā	Perimetrālās saites/rīģeļi ēkas īsākajā virzienā	0–0,06
	Elements nodrošina citu elementu noturību (gadījumā, ja elementam nav citu funkciju, piem. saites)	Perimetrālās saites, pašnesošas fasādes elementi	
	Elements uzņem pamatā vertikālās slodzes	Starpstāvu rīģeļi, visas augšējo stāvu kolonnas, kāpņu laidī, pārseguma plātnes	
Elements, kas atbalsta citus elementus, laiduma vai divu laidumu sabrukums vairāku stāvu līmenī (bet ne vairāk kā ēkas augstums/2) (daļējs ēkas sabrukums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu pārveidāšanā	Perimetrālās saites/rīģeļi ēkas garākajā virzienā	0,06–0,15
	Elements uzņem pamatā vertikālās slodzes	Visas kolonnas, kas neietilpst pārējos diapazonos	
Elements nosacītā virknes slēgumā (ēkas vai ēkas daļas vispārējs sabrukums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu pārveidāšanā	Vertikālās stinguma diafragmas, vertikālās saišu sistēmas, stinguma kodoli, ja horizontālo iedarbju daļa, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā, ir mazāka par pusi no kopējām horizontālām iedarbēm)	0,15–0,5
	Elements pamatā uzņem vertikālās slodzes (V/L)	Visas pirmā stāva kolonnas un visas to stāvu kolonnas, kas atrodas diapazonā ēkas augstums/3	
Elements nosacītā virknes slēgumā attiecībā uz horizontālo iedarbju uzņemšanu (ēkas vai ēkas daļas vispārējs sabrukums)	Elements nodrošina ēkas kopējo noturību, piedalās horizontālo un/vai vertikālo slodžu (horizontālo iedarbju daļa, ko stinguma elements uzņem apskatāmajā virzienā ir vismaz puse no kopējām horizontālām iedarbēm)	Vertikālās stinguma diafragmas, vertikālās saišu sistēmas, stinguma kodoli	0,5–1

* precīzāku vērtību ieteikts aprēķināt saskaņā ar promocijas darbā piedāvāto nosacītā tilpuma metodi.

4.2.3. Skaitliskais eksperiments un rezultātu analīze

Ar mērķi novērtēt globālā drošuma indeksa Λ diapazonu un jutīgumu pie dažādiem atsevišķo elementu bojājuma scenārijiem, kas ņemts vērā, mainot drošuma indeksu β , pētījumā veikts skaitliskais eksperiments, izmantojot *Monte Carlo* simulāciju metodi.

Komponenšu tipi ar lielāku ietekmi ēkas kopējā drošuma nodrošināšanā parasti ir mazāk (pēc skaita). Daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu šī attiecība pētījumā ir aptuveni 0,1 : 0,4 : 0,6 : 1, kur pirmais skaitlis attiecas uz nozīmīgiem elementiem, pēdējais – attiecīgi uz maznozīmīgākiem elementiem kopējā drošuma kontekstā. Piemēram, ēkas kopējo noturību nodrošina mazāks elementu skaits pa tiptiem, nekā elementi, kas uzņem lokālas slodzes (plātnes, fasāžu elementi, rīņģeļi, stati utt.). Šī attiecība iekļauta simulācijas iestatījumos, visi izejas dati apkopoti 4.2. tabulā.

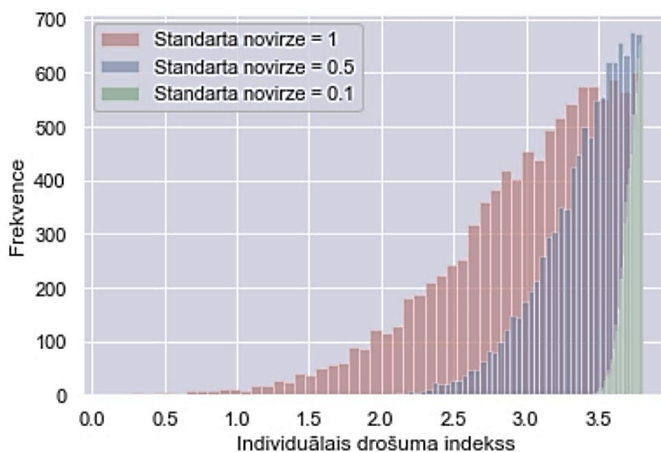
4.2. tabula

Skaitliskā eksperimenta izejas dati un nosacījumi

Mainīgā nosaukums vai nosacījums	Vērtība vai diapazons	Piezīmes
Simulāciju skaits	15 000	Skaits atbilst gadījumam, kad globālā drošuma indeksa Λ vidējā vērtība nemainās divas zīmes aiz komata, palielinot simulāciju skaitu
Nosacītā ietekmes koeficienta W_i izvēle	Nejaušas izvēles mainīgais diapazonā (no vienmērīga sadalījuma)	Diapazoni saskaņā ar 4.1. tabulu
Elementu individuālais drošuma indekss β	Nejaušas izvēles mainīgais diapazonā 0 līdz 3,8 no normālsadalījuma ar vidējo vērtību 3,8 (kas atbilst CC2 klases β mērķa vērtībai) un standartnovirzi diapazonā 0,1 līdz 5,9	Modelē elementa drošuma līmeni, t. sk. iespējamo degradāciju
Ēkas komponentu tipu skaits	Attiecība 0,1 : 0,4 : 0,6 : 1, kur 1 – attiecīgi mazāk nozīmīgi elementi drošuma kontekstā	Iespējamie elementu tipi konkrētam diapazonam apkopoti 4.1. tabulā

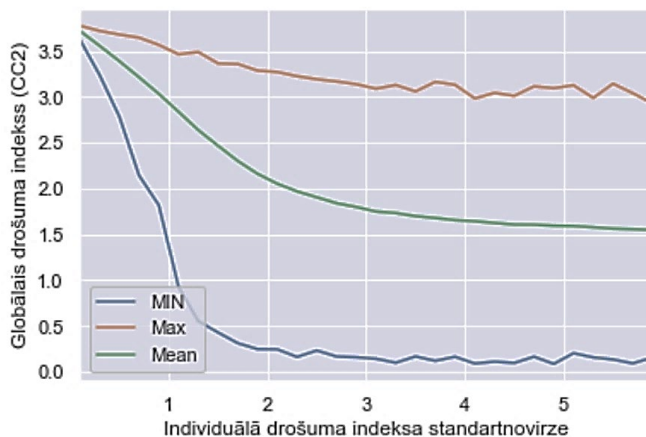
Piezīme. Ēkas komponentes individuālā drošuma indeksa maksimālā vērtība β atbilst sabrukuma varbūtībai $P_f = 10^{-4}$, simulācijas apakšējā vērtība atbilst sabrukuma varbūtībai $P_f = 0,5$.

Skaitliskā eksperimenta rezultātu grafiskais attēlojums redzams 4.5. attēlā. Uz vertikālās ass – simulācijās aprēķinātais globālais drošuma indekss Λ , uz horizontālās – ass elementu individuālā drošuma indeksa β normālsadalījuma standarta novirze. Ja standarta novirze tuvojas 0, tad visu ēkas komponentu drošuma indekss ir vismaz 3,8, kas atbilst mērķa drošuma indeksam jaunai konstrukcijai. Standarta novirzei palielinoties, palielinās to elementu tipu skaits, kuriem konstatēti mazāki drošuma indeksi konstrukcijas degradācijas vai pārslodzes dēļ. Individuālo drošuma indeksu β sadalījuma piemēri redzami 4.4. attēlā.



4.4. att. Individuālo drošuma indeksu β nejaušas izvēles piemēri simulācijai ($n = 15000$, ēkas seku klase CC2).

Rezultātu grafiskā attēlojumā (4.5. att.) augšējā un apakšējā līkne ierobežo globālā drošuma indeksa Λ iespējamo diapazonu daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu, vidējā līkne ir globālā drošuma indeksa Λ vidējās vērtības sakarība.



4.5. att. Globālā drošuma indeksa Λ vērtību diapazons atkarībā no ēkas elementu individuālo drošuma līmeņu sadalījuma (daudzstāvu karkasa ēkām ar regulāru kolonnu tīklu).

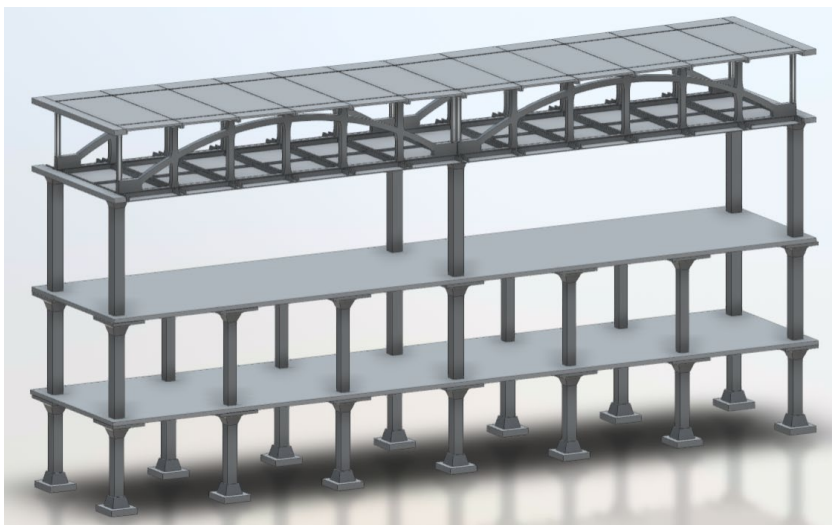
Iegūtie rezultāti parāda, ka globālā drošuma indeksa Λ vērtība ir jutīgākā individuālo drošuma indeksu β normālsadalījuma standartnovirzes diapazonā no 0 līdz 2, kas sakrīt ar iespējamiem bojājumu sadalījumiem reālajās ēkās. Nākamajā nodaļā, kur objektam dabā veikts novērtējums saskaņā ar promocijas darbā izstrādāto metodoloģiju, elementu drošības indeksu standartnovirze iekļaujas šajā diapazonā un ir 0,6.

5. ĒKAS DROŠUMA VĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJAS PRAKTISKAIS LIETOJUMS (*CASE STUDY*)

Par objektu, kurā izmantota promocijas darbā izstrādātā metodoloģija, izvēlēta sabiedriska ēka Valmierā. Ar detalizētajiem vērtēšanas rezultātiem iespējams iepazīties pilnajā promocijas darba versijā.

5.1. Konstruktīvo elementu drošuma novērtējuma kopsavilkums

Saskaņā ar izpētēm, kas veiktas metodoloģijas pirmajā un otrajā posmā, noskaidrots, ka vērtējumam par ēkas kopējo mehānisko stiprību un stabilitāti var kalpot ēkas viena no sekcijām (5.1. att.), kuras vidējais rāmis uzskatāms par reprezentējošo konstrukciju konstruktīvo elementu nosacīto ietekmes koeficientu W noteikšanai.



5.1. att. Ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti raksturojošās sekcijas un rāmju konstruktīvā 3D shēma.

Par nosacīto tilpuma vienību tiek pieņemts paralēlskaldnis ar šādām dimensijām:

- sānu mala a = rāmju solis = 6 m;
- sānu mala b = kolonnu solis rāmja šķērsvirzienā = 6 m;
- augstums c = pirmā stāva augstums = 4,8 m.

Visa rāmja nosacītais sabrukuma tilpums ir:

$$V = 2a \cdot 6b \cdot (0,75a + 2c + 1,6c) = 52,2 \text{ vienības.}$$

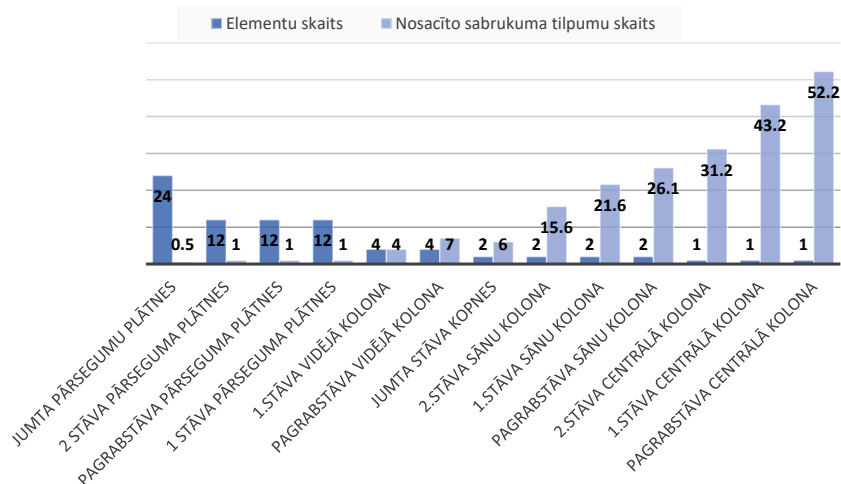
Pēc attiecīgiem aprēķiniem iegūtie atsevišķie elementu drošuma raksturotāji un svara koeficienti apkopoti 5.1. tabulā. Tabulā redzamais elementu skaits un nosacītais sabrukuma tilpums attiecas uz apjomu, sabrūkot vidējam šķērsrāmim.

Ēkas konstruktīvo elementu drošuma raksturotāji un nosacītā svāra koeficienti

Konstruktīvais elements	Elementu skaits	Nosacītais sabrukuma tilpums	Ietekmes koeficients W	Drošuma indekss β	Sabrukuma varbūtība P_f
Pagrabstāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva sānu kolona	2	26,1	0,5	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva vidējā kolona	4	7	0,13	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Pagrabstāva centrālā kolona	1	52,2	1,00	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
1. stāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	3,6	$1,6 \times 10^{-4}$
1. stāva sānu kolona	2	21,6	0,41	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
1. stāva vidējā kolona	4	4	0,08	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
1. stāva centrālā kolona	1	43,2	0,83	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
2. stāva pārseguma plātnes	12	1	0,02	1,2	$1,2 \times 10^{-1}$
2. stāva sānu kolona	2	15,6	0,3	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
2. stāva centrālā kolona	1	31,2	0,6	3,2	$6,9 \times 10^{-4}$
Jumta pārsegumu plātnes	24	0,5	0,01	2,8	$2,6 \times 10^{-3}$
Jumta stāva kopnes	2	6	0,11	3,8*	$1,9 \times 10^{-8}$

* projektētās jumta kopnes paredzētas 12 m šķērsrāmju solim, tāpēc saskaņā ar aprēķinu drošuma indekss $\beta = 5,5$. Taču viens elementa tips ar augstāku drošuma līmeni, kam nosacītais sabrukuma tilpums ir neliels, nepaceļ visas ēkas drošuma līmeni, tāpēc tālākos aprēķinos pieņemts, ka $\beta = 3,8$ kā jaunam elementam.

5.2. attēla grafikā redzams, ka ēkās parasti nozīmīgākie elementi drošuma kontekstā ir mazāk (pēc skaita). Piedāvātā metode svarojuma koeficientu noteikšanai to ņem vērā.



5.2. att. Pieņemto reprezentējošo elementu un sabrukušo tilpumu skaits ēkā (attiecas uz vienu sabrukušu šķērsrāmi).

4.2. izteiksmē ievietojot attiecīgos drošuma indeksus un nosacītos ietekmes koeficientus, noteikts globālo drošuma indekss jeb ēkas mehāniskās stiprības un stabilitātes raksturotājs:

$$\Lambda = 3,03.$$

Parametrs, kas raksturo ēkas kopējās mehāniskās izturības un stabilitātes izmaiņu, – ēkas relatīvais drošuma indekss – saskaņā ar 4.3. izteiksmi:

$$\Lambda_{GRI} = \frac{CC_{\beta} - \Lambda}{CC_{\beta}} 100 \% = \frac{3,8 - 3,03}{3,8} 100 \% = 20,2 \%,$$

kur CC_{β} – mērķa drošuma indekss β atbilstoši ēkas seku klasei CC2;

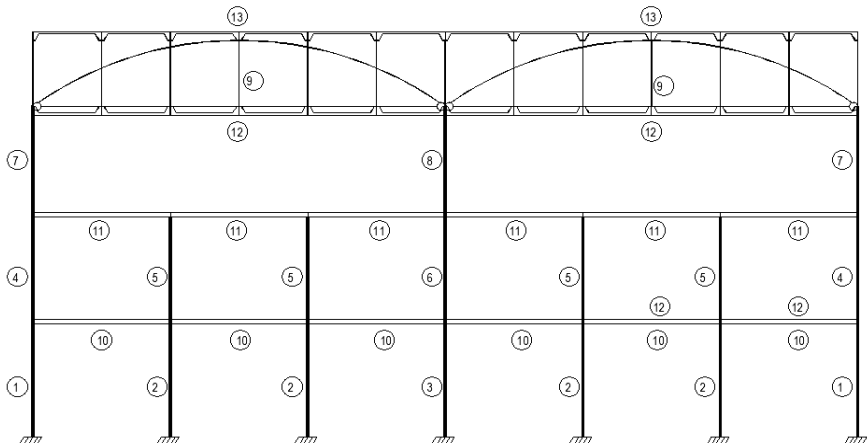
Λ – globālais ēkas drošuma indekss.

5.2. Ēkas drošuma rezultātu kalibrēšana ar matemātisko simulāciju

Kā minēts 2. nodaļas literatūras apskatā, ekspluatācijā esošu konstrukciju sistēmu drošuma (sabrukuma varbūtību) noteikšanas augstākais jeb 5. līmeņa novērtējums tiek izmantotas matemātiskās modelēšanas metodes, simulējot konstrukcijas sabrukšanas varbūtību ar Monte Karlo metodi. Lai salīdzinātu iepriekšējā nodaļā iegūtos rezultātus ar matemātiskās modelēšanas varbūtības rezultātiem, šajā nodaļā veikta tās pašas Valmieras ēkas drošuma modelēšana ar Monte Karlo metodi, izmantojot atvērtā koda programmu *Python 3*.

5.2.1. Konstrukcijas sistēmas definēšana un robežstāvokļi

Tiek prognozēta sabrukšanas varbūtība konstrukciju sistēmai, kas redzama 5.3. attēlā.



5.3. att. Ēkas mehānisko stiprību un stabilitāti raksturojošās sekcijas un rāmju konstruktīvā shēma.

Lai modelētu daudzkomponentu sistēmas bojājumus, ir jāzina atsevišķu komponentu bojājumu varbūtības. Kā jau minēts literatūras apskatā, pastāv divu veidu konstrukciju sistēmas – virknes konstrukciju sistēma un paralēlā konstrukciju sistēma. Nav precīzi nosakāms, kāda konstrukciju sistēma ir Valmieras ēkai, tādēļ tiek pieņemti abi iespējamie varianti. Šo gadījumu iespējamie bojājumu sistēmu scenāriji atkarībā no konstrukciju sistēmas apkopoti 5.2. un 5.3. tabulā. Tabulu kreisajā pusē ir attēlots elements, kas sabrūk, savukārt labajā pusē – norādīti elementi, kas sabrūk, sabrūkot kreisās puses elementam. Piemēram, sabrūkot 2. stāva malējai kolonnai (7. poz.) paralēlajā sistēmā, tā izraisīs vienas jumta kopnes sabrukumu, sešu 2. stāva griestu plātņu sabrukumu un sešu griestu plātņu sabrukumu (5.2. tab.).

5.2. tabula

Elementu sabrukums un skaits paralēlās sistēmas scenārijā

Nr.	Sabrūkošais elements	β	Atkarīgais elements un to skaits												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0. st. malējā kolonna	2,8	S			1			1		1	1	1	6	6
2	0. st. vidējā kolonna	2,8		S		1					2	2			
3	0. st. centrālā kolonna	2,8			S		1		1	2	2	2	12	12	
4	1. st. malējā kolonna	3,2				S		1	1		1	6	6		
5	1. st. vidējā kolonna	3,2					S				2				
6	1. st. centrālā kolonna	3,2						S	1	2		2	12	12	
7	2. st. malējā kolonna	3,2							S	1			6	6	
8	2. st. centrālā kolonna	3,2								S	2		12	12	
9	Jumta kopne	5,5									S		6	6	
10	0. st. plātne	2,8										S			
11	1. st. plātne	3,6											S		
12	2. st. griestu plātnes	1,2												S	
13	Jumta plātnes	2,8													S

Savukārt, sabrūkot tai pašai 2. stāva malējai kolonai (7. poz.) virknes sistēmā, tā izraisīs gan vienas jumta kopnes sabrukumu, sešu 2. stāva griestu plātņu sabrukumu un sešu griestu plātņu sabrukumu, kā arī pagrabstāva vienu malējo kolonu un divas vidējās kolonas, 1. stāva malējo kolonu un divas vidējās kolonas, kā arī trīs pagrabstāva pārseguma un trīs 1. stāva pārseguma paneļu sabrukumu (5.3. tab.).

5.3. tabula

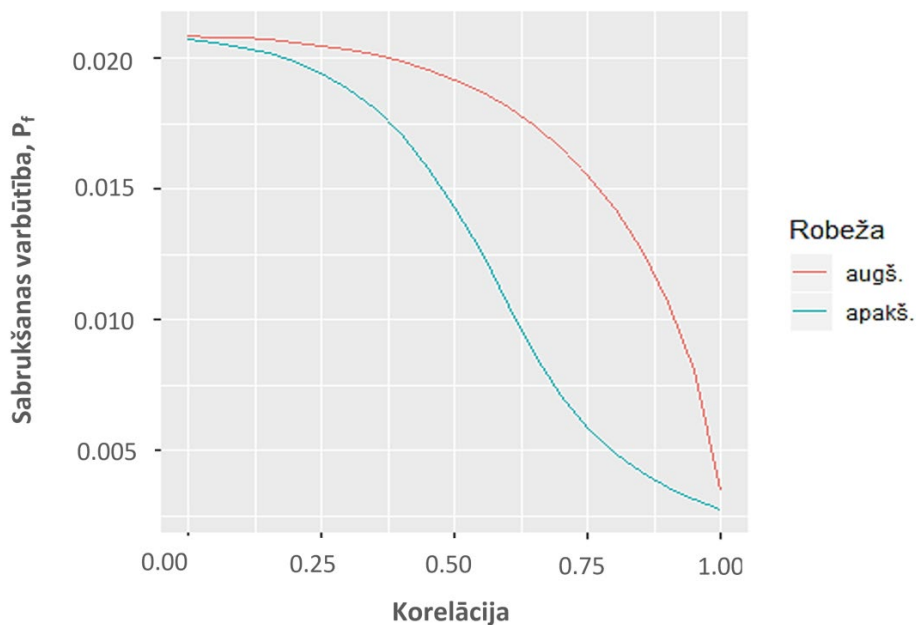
Elementu sabrukums un skaits virknes sistēmas scenārijā

Nr.	Sabrūkošais elements	β	Atkarīgais elements un to skaits													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	0. st. malējā kolonna	2,8	S	2			1	2		1		1	3	3	6	6
2	0. st. vidējā kolonna	2,8		S				1					2	2		
3	0. st. centrālā kolonna	2,8	2	4	S	2	4	1	2	1	2	6	6	12	12	
4	1. st. malējā kolonna	3,2	1	2			S	2		1		1	3	3	6	6
5	1. st. vidējā kolonna	3,2		1				S					2	2		
6	1. st. centrālā kolonna	3,2	2	4	1	2	4	S	2	1	2	6	6	12	12	
7	2. st. malējā kolonna	3,2	1	2			1	2		S		1	3	3	6	6
8	2. st. centrālā kolonna	3,2	2	4	1	2	4	1	2	S	2	6	6	12	12	
9	Jumta kopne	5,5	1	2			1	2		1		S	3	3	6	6
10	0. st. plātne	2,8											S			
11	1. st. plātne	3,6										1	S			
12	2. st. griestu plātne	1,2										1	1	S		
13	Jumta plātne	2,8										1	1	1	S	

5.2.2. Pirmās kārtas tuvinājums

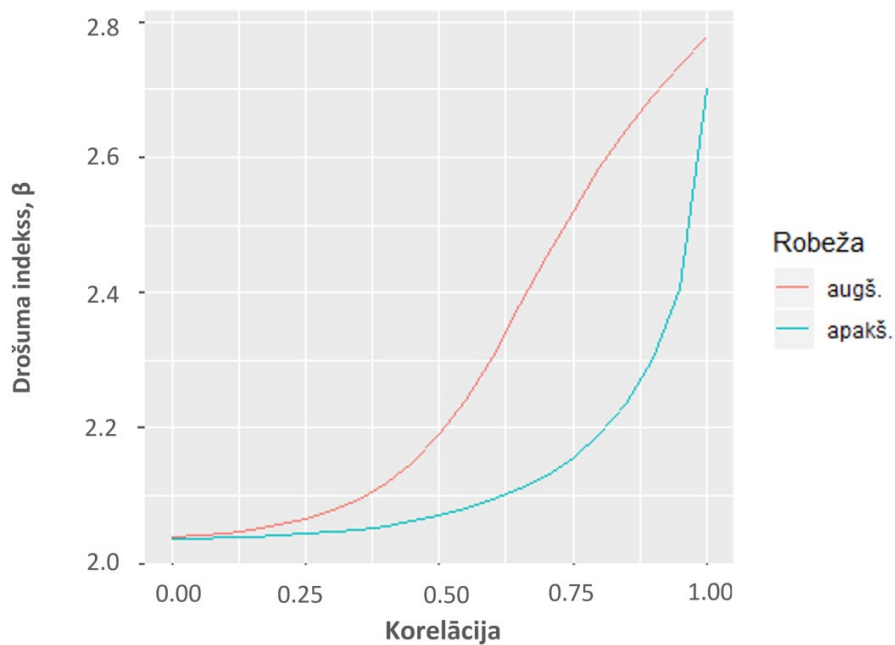
Šobrīd pieejamajās publikācijās interesējoša sistēma nav aprakstīta nejausu mainīgo lielumu un robežstāvokļu funkciju izteiksmē. Rezultātā nav iespējams skaidri noteikt korelācijas struktūru starp robežstāvokļiem. Tādējādi pirmās kārtas simulācijām šobrīd tiek izvēlēts nelabvēlīgākais scenārijs jeb virknes sabrukuma sistēma. Šajā gadījumā tiek prognozēts plašāks bojājumu apjoms un to varbūtības robežas, kurās tiek ņemta vērā jebkura iespējamā korelācijas struktūra starp noteiktiem robežlielumiem. Sistēma sastāv no individuāliem elementiem, kur katram ir sava sabrukšanas varbūtība. Tiek definēti galējie robežstāvokļi – sistēmas nosacījumi, kas atbilst konkrētam bojājumam. Virknes sistēmā robežstāvokļi tiek uzdoti ar funkciju $\mathbf{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, $g_i \in R^p$, kas definēti pamata nejausiem mainīgiem lielumiem $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_p\}$. Šie nejausie mainīgie atbilst spēkiem, pretestībām, slodzēm utt. Robežstāvokļi ir definēti kā X vērtības, pie kurām $g_i(\mathbf{X}) < 0$.

Piemērojot 2.42. izteiksmi konkrētajam gadījumam (skat promocijas darba izvērsto redakciju), tiek iegūts sabrukšanas varbūtības intervāls $\leq P(\mathbf{F}): \#\#$ [FORM] **0,020717 - 0,003467**.



5.4. att. Sabrukšanas varbūtības robežas *FORM* simulācijā.

Sabrukšanas varbūtību var izteikt arī drošuma indeksa β intervālā: ## [1] 2,039158 - 2,7.



5.5. att. Drošuma indeksa β robežas *FORM* simulācijā.

5.2.3. Otrās kārtas tuvinājums

Pieņemot, ka Valmieras ēkas konstrukcija atbilst paralēlās konstrukcijas sistēmai, tika izmantota verifikācija ar otrās kārtas tuvinājumu, lai noteiktu robežstāvokļu robežas. Šajā gadījumā nepieciešams aprēķināt varbūtības $P(F_i \cap F_j)$, ko atrod, izmantojot 2.39. izteiksmi (skat promocijas darba izvērsto redakciju).

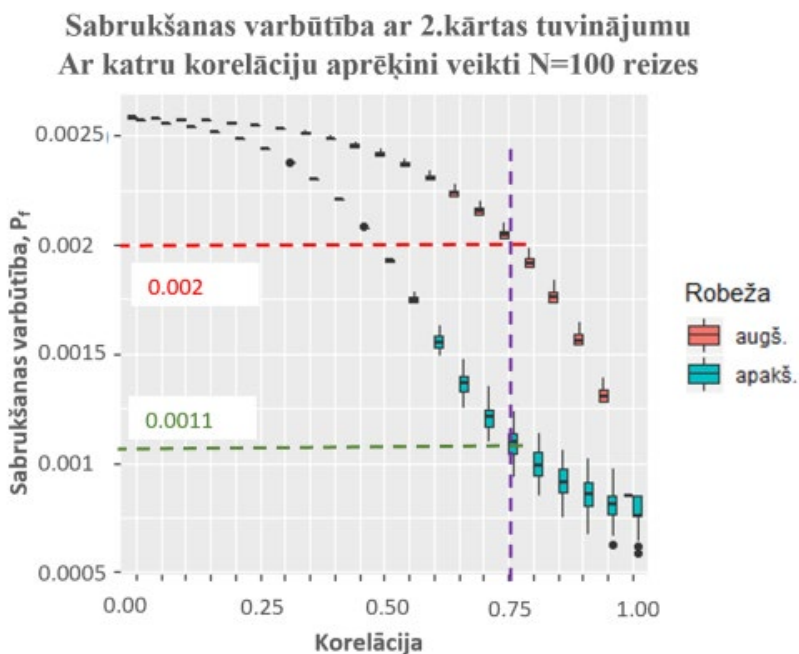
Iegūstam divdimensiju normālā sadalījuma funkciju, ar ko aprēķinām varbūtību, ka vienlaikus iestāsies abi scenāriji. Papildus jāņem vērā “otrās kārtas notikumus”, t. i., scenāriju šķēlumi $P(F_i \cap F_j)$. To var izdarīt, ja zināmas korelācijas starp šiem scenārijiem (stāvokļiem). Ņemot vērā to, ka šāda informācija nav zināma, vienkāršošanas nolūkā tiek pieņemts korelācijas koeficients ρ_{ij} robežās no 0 1, veicot simulācijas aprēķinus ar soli 0,05.

Piemērojot otrās kārtas tuvinājuma 2.39. izteiksmi (skat promocijas darba izvērsto redakciju), otrajā tuvinājumā iegūstam sabrukšanas varbūtības intervālu $\leq P(F)$

[SORM] **0,002674–0,000748,**

kas ir izsakāms arī drošuma indeksa β intervālā:

[SORM] **2,7853–3,1756.**



5.6. att. Sabrukšanas varbūtības robežas *SORM* simulācijā.

Aplūkojot korelācijas grafikus otrajā tuvinājumā (5.6. att.), redzams, ka vislielākā izkliede starp robežstāvokļiem veidojas pie korelācijas 0,75.

Pieņemot, ka korelācija starp elementiem ir zināma (0,75), var iegūt sabrukšanas varbūtības intervālu $\leq P(F)$

[SORM $\rho_{ij} = 0,75$] **0,002674–0,000748**,

kas ir izsakāms arī drošuma indeksa β intervālā:

[SORM $\rho_{ij} = 0,75$] **2,8782–3,0617**.

5.2.4. Rezultātu verifikācija

Salīdzinot pirmās un otrās kārtas tuvinājumos iegūtos rezultātus ar 5.1 apakšnodaļā iegūtajiem rezultātiem, var secināt, ka:

- a) virknes sabrukuma rezultātā lietojot pirmās kārtas tuvinājumu, drošuma līmeņa samazinājums ir robežās 28,95–46,34 %;
- b) paralēlā sabrukuma rezultātā lietojot otrās kārtas tuvinājumu, drošuma līmeņa samazinājums ir robežās 16,43–26,7 %;
- c) paralēlā sabrukuma rezultātā zinot korelāciju starp konstrukciju elementiem, drošuma līmeņa samazinājums ir robežās 19,43–24,26 %.

6. IETEIKUMI METODOLOĢIJAS PRAKTISKAI IEVIEŠANAI

6.1. Publisko ēku tehniskās apsekošanas

2019. gadā Latvijā stājās spēkā normatīvo aktu prasības publiskajām ēkām, kas sasniegušas 10 gadu kopš nodošanas ekspluatācijā, par to, ka ir veicamas tehniskās apsekošanas ar mērķi pārliecināties par ēkas atbilstību mehāniskās stiprības un stabilitātes prasībām.

Saskaņā ar normatīvo regulējumu mehāniskā stiprība un stabilitāte ir Būvniecības likumā uzskatīto būtisko prasību pirmā prasība, un atbilstoši ES pamatnostādnēm šī prasība nozīmē, ka būves jāprojektē un jābūvē tā, lai slodze, kas var iedarboties uz tām būvēšanas un izmantošanas laikā, neizraisītu šādas sekas:

- a) visas būves vai tās atsevišķu daļu sabrukumu;
- b) ievērojamas deformācijas, kas pārsniedz pieļaujamās robežas;
- c) citu būves daļu vai savienojumu, vai uzstādīto iekārtu bojājumus nesošas konstrukcijas deformācijas dēļ;
- d) bojājumu, kas ir neproporcionāls cēlonim, kas to izraisījis.

Vienlaikus Latvijas būvnormatīvā *LBN 405* ir noteikts, ka periodiski būves ekspluatācijas laikā, bet ne retāk kā reizi 10 gados, otrās un trešās grupas publiskai un daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamajai ēkai veicama tehniskā apsekošana. Tās ietvaros tiek veikts attiecīgās ēkas faktiskā tehniskā stāvokļa novērtējums ēkas nesošajām būvkonstrukcijām visā ēkas apjomā attiecībā uz mehānisko stiprību, stabilitāti un lietošanas drošību (krišana, sadursme, apdegums, nāvējošs elektrošoks, eksplozijas radīts ievainojums). Tāpat tiek veikts attiecīgās ēkas būvkonstrukciju un to elementu faktiskā tehniskā stāvokļa ugunsizturības novērtējums, kā arī ugunsdrošībai nozīmīgu inženiertehnisko sistēmu faktiskā tehniskā stāvokļa un darbspējas novērtējums.

Minētais normatīvs attiecas arī uz tiltu, pārvadu, tuneļu un atbalstsienu apsekošanu, sniedzot norādījumus, ka apsekošana jāveic saskaņā ar standartu *LVS 190-11:2009*.

Lai nodrošinātu to, ka arī ēku apsekošana tiek veikta pēc vienotiem principiem un satura, promocijas darba autors uzskata, ka arī ēku apsekošanai ir jāizstrādā nacionālais standarts, kurā tiek iestrādāta šajā promocijas darbā piedāvātā metode, kā novērtēt ēku konstrukciju mehānisko stiprību un stabilitāti, lietojot vienoto drošuma raksturotāju – ēkas kopējo drošuma indeksu. Tas ļaus turpmāk gan ēku lietotājiem, gan īpašniekiem, gan kontrolējošām iestādēm, gan nozares speciālistiem salīdzināt dažādu ēku drošuma līmeni, kā arī redzēt izmaiņas ēkas drošumā atbilstoši veiktajiem vai neveiktajiem uzlabojumiem.

6.2. Vienotas platformas izveide tehniskajā apsekošanā iegūtajiem datiem

Būvniecības valsts kontroles birojs (BVKB) saskaņā ar normatīvo aktu prasībām no 2020. gada sācis visu publisko ēku tehnisko apsekojumu apkopošanu Būvniecības informācijas sistēmā. Tādējādi ir izveidota vienota vide, kurā paralēli likumdevēja vēlmēm par veikto

pārbaudu kontroli var attīstīt nepieciešamo nacionālo informācijas bibliotēku par konstrukcijām un to tehniskajiem raksturotājiem, tostarp drošumu.

Šādas informācijas strukturēta apkopošana ļaus izmantot šos datus gan akadēmiskās vides pētījumiem, gan nozarei, gan likumdevējam un citām ieinteresētām pusēm.

Turklāt ir svarīgi jau šodien domāt par iespējām, kā izmantot tehnoloģijas, lai tās sniedz informāciju par sagaidāmo drošuma līmeni un riskiem šajā sakarā, proti, mākslīgo intelektu. Lai būtu iespējama mākslīgā intelekta ieviešana, tam nepieciešami dati noteiktā kopsakarībā, lai izdarītu secinājumus un pats sevi attīstītu (trenētu). Tāpēc ir ieteicams noteikt, ka par katru drošuma vērtējumu dati ir jāievada vienotajā Būves informācijas sistēmā, ko uztur BVKB, un, izstrādājot mākslīgā intelekta piemērotu algoritmu, būs iespējams prognozēt gan pārbaudīto ēku turpmāko drošumu, gan vēl nepārbaudīto, bet pēc līdzīgām pazīmēm izbūvētu un/vai līdzīgos apstākļus uzturētu drošuma līmeni.

7. SECINĀJUMI

Promocijas darba gaitā izstrādāta noslēgta metodoloģija ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju drošuma līmeņa kvantitatīvai novērtēšanai. Metodoloģija balstīta ēkas globālā konstrukcijas drošuma indeksa (*Global reliability index*) ieviešanā, kas ņem vērā ēkas nesošo elementu un to savienojumu tehnisko stāvokli, to individuālo nozīmi kopējās ēkas konstrukcijas mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā, kā arī tā iespējamā sabrukuma sekas.

Metodoloģijas izstrādes ietvaros izstrādātas vairākas jaunas metodes:

- ēku kvalitatīvā riska klasificēšanas metode ekspluatācijā esošo ēku sākotnējā stāvokļa novērtēšanai;
- metode ekspluatācijā esošu konstrukciju drošuma līmeņa noteikšanai, kas projektētas, balstoties dažādās normatīvajās bāzēs;
- metode, kas raksturo ēkas drošuma līmeni, salīdzinot ar Eirokodos noteikto drošuma līmeni, un ļauj kvantitatīvi monitorēt dažādu ēku kopējo drošuma līmeni.

Promocijas darba gaitā veikti pētījumi arī par publisko ēku stāvokli Latvijā un esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā.

Secinājumi

1. Izstrādātā kvalitatīvā riska klasificēšanas metode padara iespējamu masveidā indikatīvi novērtēt ēku tehnisko stāvokli, balstoties vizuālajā novērtēšanā, kā arī operatīvi informēt sabiedrību un kontrolējošās institūcijas par riskiem saistībā ar ēku drošību.
2. Pētījumā par publisko ēku stāvokli Latvijā 2016. gadā nav atrasta korelācija starp apsekojamo ēku skaitu konkrētā kategorijā un vērtējuma rezultātu skaitu diapazonā 2–3 (konstatētas būtiskas atkāpes no drošuma prasībām), tādējādi secināts, ka ēkas tehnisko stāvokļu iedalījumu ietekmē konkrētās konstrukcijas veids un lietojuma nozīme, nevis apstrādājamo datu kopas apjoms.
3. Pētījumā par esošo būvju vērtēšanas praksi Eiropā secināts, ka nepastāv vienota metodoloģija attiecībā uz ekspluatācijā esošu būvju drošumu un tā vērtēšanu, tomēr vienlaikus visās valstīs drošums kā kritērijs tiek normatīvi regulēts būvju ekspluatācijā, tomēr ar atšķirīgu vērtēšanu un rezultātu interpretāciju.
4. Izstrādātā jaunā metode elementu drošuma indeksa β atrašanai piemērota ekspluatācijā esošo elementu drošuma novērtēšanai konkrētiem objektiem, kā arī vispārēji dažādu būvnormatīvu sistēmu drošuma līmeņu salīdzināšanai, neizmantojot darbietilpīgo un sarežģīto *FORM* simulāciju metodi. Izmantojot izstrādāto metodi, atrasts, ka pētījuma gaitā analizēto konstrukcijas elementu drošuma indekss β ekspluatācijā esošajām jumta pārseguma konstrukcijām atkarībā no spriegumstāvokļa svārstās robežās no 2,5 līdz 2,8 Liepājā un no 3,2 līdz 3,5 Rīgā. Tāpēc tiek rekomendēts pievērst pastiprinātu uzmanību elementiem, kuru noslodze saskaņā ar *SNiP* normatīvu sistēmu tuvojas 100 %. Pastāv risks, ka šādu elementu sabrukuma varbūtība ir neatbilstoša mūsdienu drošuma prasībām Eiropā.
5. Izstrādātajā metodē kopējā drošuma līmeņa izmaiņu kvantitatīvam novērtējumam jaunievēstie parametri – globālais ēkas drošuma indekss Λ un relatīvais globālais ēkas

drošuma indekss Λ_{GRI} – raksturo jaunu vai ekspluatācijā esošu ēku konstrukciju vispārējo drošuma līmeni un ļauj kvantitatīvi salīdzināt dažādu ēku kopējo tehnisko stāvokli. Atšķirībā no pieejamām metodēm, kas balstītas varbūtību teorijā un sistēmās, kopējā drošuma līmeņa raksturošanai izstrādātā metode ir mazāk darbietilpīga, tādējādi piemērota praktiskai lietošanai ēku inženiertehniskās apsekošanas posmā. Noskaidrots, ka globālā drošuma indeksa Λ vērtība ir jutīgāka individuālo drošuma indeksu β normālsadalījuma standartnovirzes diapazonā no 0 līdz 2, kas sakrīt ar iespējamiem bojājumu sadalījumiem reālajās ēkās. Latvijā raksturīgajām ekspluatācijā esošām rūpnieciskām ēkām, kas projektētas PSRS laikos (seku klase CC2), kuru elementu drošuma līmeņu sadalījums ir līdzīgs normālsadalījumam ar standartnovirzi 0,5, iegūtais globālais drošuma indekss var būt robežās no 2,79 līdz 3,68.

6. Izstrādāta jauna metode nosacīto svāra koeficientu noteikšanai. Šie koeficienti ņem vērā katra atsevišķā konstruktīvā elementa sasaisti un nozīmi kopējā konstruktīvajā sistēmā mehāniskās izturības un stabilitātes nodrošināšanā. Saskaņā ar izstrādāto metodi piedāvāti nosacīto svāra koeficientu diapazoni daudzstāva karkasa ēku elementiem ēkās ar regulāru kolonu tīklu. Izmantojot statistisko klasterizācijas metodi secināts, ka šādu ēku konstruktīvos elementus var iedalīt četrās klasēs.
7. Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas praktiskā lietojuma rezultāti uzrāda, ka ekspluatācijā esošās ēkas relatīvais drošuma samazinājums ir $\Lambda_{GRI} = 20,2\%$. Salīdzinot šo rezultātu ar šīs pašas ēkas drošuma līmeni, izmantojot *FORM* un *SORM* simulāciju metodes, ir verificēts, ka piedāvātā jaunā metode nodrošina ekvivalentu drošuma novērtējuma līmeni. Verifikācijas rezultāti pirmajā tuvinājumā (*FORM*) uzrāda drošuma līmeņa samazinājumu robežās 28,95–46,34 %, otrajā tuvinājumā (*SORM*) drošuma līmeņa samazinājums ir robežās 16,43–26,7 %. Savukārt, pieņemot noteiktu korelāciju starp konstrukciju elementiem, pat pie vislielākās robežstāvokļu izkliedes drošuma līmeņa samazinājums otrajā tuvinājumā (*SORM*) ir robežās 19,43–24,26 %.



Pēteris Druķis dzimis 1971. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu mehānikā (1994), maģistra grādu kvalitātes nodrošināšanā un vadībā (1997) un profesionālā maģistra grādu darba aizsardzībā (2006). Līdz 2014. gadam vadījis uzņēmumu AS "Inspecta Latvia", no 2015. līdz 2017. gadam pildījis Būvniecības valsts kontroles biroja direktora pienākumus. No 2018. gada strādā AS "RERE GRUPA" un vada projektēšanas aktivitātes sadarbībā ar Beļģijas un Itālijas partneriem pilnsabiedrībā "BERERIX", īstenojot Rīgas Centrālās stacijas pārbūvi "RailBaltica" projektā.