

Elīna Barone

MODUĻVEIDA ĒKU LOŽU IZTURĪGU SIENU KONSTRUKCIJU APRĒĶINA METODOLOĢIJA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte

Ilgspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Elīna Barone

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģiju” doktorante

MODUĻVEIDA ĒKU LOŽU IZTURĪGU SIENU KONSTRUCIJU APRĒĶINA METODOLOĢIJA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. sc. ing.*

MĀRTIŅŠ VILNĪTIS

asociētā profesore *Dr. sc. ing.*

BAIBA GAUJĒNA

RTU Izdevniecība

Rīga 2026

Barone, E. Moduļveida ēku ložu izturīgu sienu konstrukciju aprēķina metodoloģija. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 57 lpp.

Publicēts saskaņā ar būvniecības un transporta inženierzinātnes nozares promocijas padomes "RTU P-06" 2026. gada 30. aprīļa lēmumu Nr. 04030-9.6/6.

Šis darbs izstrādāts ar:

- Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programmu DOK.BIF/20, DOK.BIF/21 atbalstu;
- Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 "Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās" atbalstu.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Vāka attēla autore – Elīna Barone.

<https://doi.org/10.7250/9789934373343>
ISBN 978-9934-37-334-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 18. septembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 453. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Korjajins,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Ing. Tomáš Vymazal*, Ph.D.
Brno Tehniskā universitāte, Čehija

Dr. sc. ing. Jolanta Pranckevičienė,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Elīna Barone (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir darba vispārīgs raksturojums, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 52 attēli, 28 tabulas, kopā 114 lappuses. Literatūras sarakstā ir 116 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne.....	5
Promocijas darba mērķis	7
Promocijas darba uzdevumi	7
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	7
Pētījuma metodoloģiskais pamats	8
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums	8
Izmantotie rīki un iekārtas	9
Pētījuma ierobežojumi.....	10
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes	10
Promocijas darba struktūra.....	11
Promocijas darba rezultātu aprobācija	12
Publikāciju saraksts	12
PROMOCIJAS DARBA SATURS.....	13
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	13
2. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS	17
2.1. Koksnes pirmreizējās ballistiskās pārbaudes	17
2.2. Aprēķina metodoloģijas eksperimentālais un teorētiskais pamatojums.....	19
2.2.1. CLT eksperimentālā un teorētiskā izpēte	20
CLT galīgo elementu analīze.....	24
2.2.2. Saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte	27
2.3. Kopsavilkums.....	31
3. METODOLOĢIJA BALLISTISKĀS PRETESTĪBAS NOVĒRTĒŠANAI.....	32
4. METODOLOĢIJAS PIELĀGOŠANA.....	36
5. PĒTĪJUMI DAUDZSLĀŅU SIENU BALLISTIKĀ	38
CLT sienu ar siltumizolāciju eksperimentālā un teorētiskā izpēte	38
UHMWPE-saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte	41
Ballistisko sienu salīdzinājums	45
SECINĀJUMI	48
IETEIKUMI TĀLĀJIEM PĒTĪJUMIEM.....	50
LITERATŪRAS SARAKSTS	51

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Nestabilā globālā drošības situācija rada jaunu tirgus pieprasījumu pēc ārējo draudu drošiem risinājumiem. Vislabāk, ja tās ir ātri un viegli samontējamas, moduļveida pārvietojamas dzīvojamās un nedzīvojamās mājas. Ilgstošas karantīnas apstākļos tās nodrošinātu komfortu lietotājiem, pielāgojoties vides apstākļiem pat attālos pasaules reģionos, vienlaikus uzturot vides saglabāšanas, ilgtspējas un aizsardzības tendenci. Karu un nemieru, dabas katastrofu gadījumos cilvēki ir spiesti uzturēties pie valstu robežām dzīvošanai nepiemērotos apstākļos [1]. Pagaidu izmitināšanai vajadzētu piedāvāt īslaicīga patvēruma ēkas, kur iemītniekiem tiek nodrošinātas pamatvajadzības un dzīvībai droši apstākļi. Optimāli, ka šīs ēkas būtu viegli uzbūvējamas, vajadzības gadījumā pārvietojamas, kā arī ballistiski aizsargātas. Tieši ēku ārējās norobežojošās konstrukcijas parasti nodrošina aizsardzību tajās esošajām dzīvām būtnēm un objektiem [2]. Tomēr pietrūkst informācijas un pētījumu, kuros būtu ziņojumi par ballistisku būvmateriālu sienu integrēšanu norobežojošajās konstrukcijās. Iespējams, ka informācijas pieeja ir ierobežota nozares specifikas dēļ. Latvija sūta uz Ukrainu vietēji ražotas koka karkasa moduļu mājas karā cietušajām, bez pajumtes palikušajām Ukrainas daudzbērnu ģimenēm. Vienas mājas platība ir 55 m² un tā salikta no divām saskrūvējamām daļām ar iespēju nepieciešamības gadījumā tās pārvietot [3]. Ēkas konstrukcijas netiek aprīkotas ar papildu bruņojumu. Būtu lietderīgi ēkā izveidot drošības istabu (*safe room*) vai vismaz integrēt ballistisko sienu, tādā veidā nodrošinot iedzīvotājiem arī psiholoģisko komfortu, nevis tikai fizisku aizsardzību. Šādās starptautiskajās operācijās bieži vien ir nepieciešama aizsargelementu transportēšana lielos attālumos, un tad konstrukciju svārs kļūst par kritisku parametru, arī situācijās, piemēram, ēku rekonstrukcijās, kad nav pieļaujams palielināt slodzi uz nesošajām konstrukcijām. Tas ierobežo tradicionālo tērauda vai betona konstrukciju izmantošanu, un galvenais izaicinājums ir izveidot konstrukcijas, kurām ir pietiekami maza masa, lai tās varētu transportēt, bet vienlaikus tās būtu pietiekami stipras, lai maksimāli mazinātu ballistiskos draudus [4]. Koka konstrukciju izmantošana ēku būvniecībā kļūst arvien izplatītāka, un koka karkasa konstrukcijas lieto gan jaunu ēku būvniecībā, gan esošo ēku modernizācijā. Arī koka karkasa konstrukciju projektēšanu var automatizēt, tādējādi samazinot būvniecības un projektēšanas procesu laiku [5]. Par pārvietojamas moduļveida ēkas karkasu tiek izvēlēts koks tā relatīvi vieglā svara, pieejamības un to ērti nomaināmo elementu dēļ. Tāpēc īpaši aktuāla ir tēma par moduļu un pagaidu ēkām, kas paredzētas cilvēkiem, kuri iztur īsāku vai garāku karantīnas laiku, kas ir viegli pārvietojamas un montējamas, tādā veidā samazinot transportēšanas izdevumus, arī dzīvojamās ātri uzstādāmas, operatīvi reaģējot uz patvēruma nepieciešamību, kas var būtiski ietekmēt cilvēku veselību un dzīvību. Necauršaujamas sienu konstrukcijas bieži tiek būvētas sabiedriskās ēkās, piemēram, bankās, ieroču veikalos, šautuvēs, vēstniecībās, militārajās iestādēs, policijas iecirkņos, īslaicīgās aizturēšanas kamerās (kur skaņas izolācija, ugunsdrošība un ballistika ir būtiski aspekti), viesnīcās, slimnīcās un cietumos. Arī Eiropas Parlamenta un Padomes regula (ES) Nr. 305/2011 [6] nosaka būtiskas prasības ēkām, kas ietver ēkas drošību to lietotājiem. Būtu perspektīvi ballistiski drošas sienas veidot arī skolās, jo ne tik tālu no mums – Igaunijā un Somijā – ir notikuši terorakti skolās. 2014. gadā Vīlandē (Igaunija) skolēns pirmdienas pēcpusdienā skolā nāvējoši sašāvis skolotāju [7].

Tēmas aktualitāti pastiprina karš un konflikti starp valstīm, un dabas, kā arī cilvēku izraisītas katastrofas (HES uzspriecināšana), kas izraisa plašas diskusijas un trauksmi. Viens no trauksmes mazināšanas veidiem ir globāla un individuāla preventīva aizsardzība, kas tai pat laikā rada papildu draudus, piemēram, ASV ieroču glabāšanas atļauju skaits pārsniedz valsts iedzīvotāju skaitu. Teroristiska veida notikumi ne tikai apdraud cilvēku drošību, bet var radīt arī ilgtermiņa sekas turpmākajām paaudzēm, ieskaitot ekosistēmu un infrastruktūru.

Daudzu pasaules valstu finansiālie resursi un investīcijas aizsardzības sektoram tieši pēdējos gados ir būtiski palielinājušās. Ballistiskā aizsardzība joprojām ir viena no svarīgākajām pētniecības un attīstības jomām civilajā un militārajā jomā. Atbilstoša ēku un būvju aizsardzības projektēšana ir sarežģīta daudzo tehnisko prasību dēļ. Neatkarīgi no paredzamā kalpošanas laika unikāls parametrs visu militāro objektu būvniecībā ir specifiskācija, kas saistīta ar ēkas aizsardzību – konstrukcijai piemītošo spēju nodrošināt drošību un aizsardzību un ierastos apstākļus ēkas iekšpusē esošajiem cilvēkiem un iekārtām [8], [9], [10]. Tāpēc relatīvi triecienizturīgām civilām ēkām sienu pastiprināšana ir būtiska. Tradicionālajās sprādziendrošajās sienās parasti izmanto augstas stiprības betonu vai arī tās ir aprīkotas ar tērauda plāksnēm, lai panāktu sienu ballistisku pastiprināšanu. Šāda metode ir pietiekami sarežģīta, tā ir dārga un būtiski palielina konstrukcijas svaru. Vēl jāņem vērā tas, ka konstrukciju bojājumu rezultātā remonts prasa ievērojamus laika resursus [11]. Šī iemesla dēļ šajā promocijas darbā ir ierosināts izmantot kokmateriālu, kura blīvums ir līdz piecām reizēm mazāks nekā betonam. Kokmateriālam ballistiska trieciena gadījumā piemīt liela mehāniskā izturība, izslēdzot tūlītēju sabrukšanu, lielas deformācijas un plaisas. Salīdzinoši viegls ir arī īpaši augstas molekulasmasas polietilēna *UHMWPE* materiāls, kas savienots ar laminētu saplāksni. Saplāksnis savienojumā ar polietilēnu kā kompozītmateriāls vēl nav plaši izmantots, un tas izraisa zinātnieku interesi par jaunu materiālu izmantošanu, taču tas ir pieejams tirgū, tai skaitā ballistiskās aizsardzības vajadzībām. Plātņu savienojumi ir vājās vietas ložu draudiem. Būvdarbi, piemēram, elektroinstalācijas, santehnikas un ventilācijas lūkas, var mazināt ložu necaurlaidīgo sienu efektivitāti. RTU profesors A. Borodīņecs ar zinātnisko grupu ir pētījuši ložu drošību un mikroklimatu neklasificētās ēkās [10], [12]–[16], kā arī to, kā ventilācijas kanāli paneļa iekšpusē ietekmē sienas ballistiku [9]. Līdz ar šaujamieroču attīstību cilvēki ir domājuši par to, kā pasargāt sevi no lodēm, izmantojot dažādus šķēršļus. Sākumā cilvēki izmantoja materiālus, kas bija vieglāk pieejami. Interesanti, ka kā ložu necaurlaidīgas barjeras tika ieteiktas ar ūdeni pildītas pudeles un mitru avīžu kaudzes [17], [18]. Kopumā ballistisko aizsargmateriālu izpētē ir vērojama liela attīstība [18], [19]. Viens no vismodernākajiem koksnes materiāliem ir nanoceluloze, kurai arī tiek piedēvētas īpašas ballistiskās īpašības [20].

Līdz šim nav plaši publiski pieejami zinātniski pētījumi par koka kompozītmateriālu saliekamo paneļu konstruktīviem optimāliem risinājumiem pārvietojamām ēkām ārkārtēju trieciena slodžu gadījumā, kā arī nav atklāta šo pētījumu metodoloģija. Šāda pētījuma virziena attīstība varētu dot būtisku ieguldījumu gan teorētiskā terminālās ballistikas zinātnē, gan praktiskos risinājumus, lai veicinātu gan zinātnes, gan tirgus attīstību ballistiskās aizsardzības jomā. Metodoloģijas lietošana ļautu izstrādāt precīzākus modeļus un teorijas, lai uzlabotu ballistisko eksperimentu simulācijas. Jauni praktiski risinājumi ballistisko sienu modeļos veicinātu jaunus aizsardzības veidus un sniegtu augstāku aizsardzības līmeni esošajās militārās un civilās aizsardzības struktūrās.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba **mērķis** ir izstrādāt aprēķina metodoloģiju moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta.

Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu darba mērķi, tika izvirzīti definēti vairāki **uzdevumi**.

1. Apskatīt teorētiski ballistikas nozares literatūras bāzi, apskatot un salīdzinot zinātnisko metodoloģiju citos zinātniskajos darbos, definēt secinājumus.
2. Izveidot metodoloģijas teorētisku un eksperimentālu pamatojumu:
 - a) veikt koksnes pirmreizējās ballistikās pārbaudes, izdarīt secinājumus eksperimenta tālākai sekmīgai ieviešanai.
 - b) veikt pētījumus par koksnes ballistisko pretestību *CLT* un saplāksnim; realizēt *CLT* paneļu testus matemātiskajā modelī, izmantojot galīgo elementu metodi;
 - c) noteikt mērķa materiāla šķietamo dinamisko stiprību *CLT* un saplākšņa materiāliem katrai aizsardzības klasei, kas ļautu pēc Ponceleta formulas aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu (jeb minimālo sienas biezumu) citam ierocim ar lodes masu līdz 8,0 g un lodes sākuma ātrumu līdz 400 m/s, veidojot tendenci ieročiem ar lodes masu līdz 15,6 g un lodes sākuma ātrumu līdz 440 m/s.
3. Izveidot metodoloģiju, kas īpaši piemērota līmētu kokmateriālu sienu ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm.
4. Veikt izstrādātās metodoloģijas validāciju, izveidojot praktisku piemēru lodes caursišanas dziļuma pārejai no BR2 klases līdz BR4.
5. Paplašināt pētījumu ar daudzslāņu sienu ballistiku:
 - a) pielāgot aprēķinu metodiku daudzslāņu *CLT* sienām ar siltumizolāciju un adīto aramīda šķiedru audumu un sienai saplāksnis-*UHMWPE*, izmantojot iegūtos eksperimentālos datus;
 - b) salīdzināt perspektīvākās ballistikās sienu konstrukcijas ēkām, par būtiskiem faktoriem pieņemot ne tikai ložu drošumu, bet arī sienas svaru, cenu un siltumpretestību.
6. Izstrādāt priekšlikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu par kokmateriālu ballistiku papildināšanai.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna aprēķina metodoloģija moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta.

Pētījumu rezultātā ir noteiktas no materiālu īpašībām atkarīgas konstantes *CLT* un saplākšņa materiāliem, kas ļauj aprēķināt lodes caursišanas vidējo dziļumu jebkuram rokas ierocim ar lodes masu līdz 15,6 g un ātrumu 440 m/s (BR1 līdz BR4 aizsardzības klases).

Atšķirībā no esošajām ballistikās prognozēšanas metodoloģijām šajā promocijas darbā izstrādātā metodoloģija ir vienkāršāka un piemērota līmētu koka elementu ballistisko īpašību noteikšanai.

Zinātnisko novitāti pierāda tas, ka:

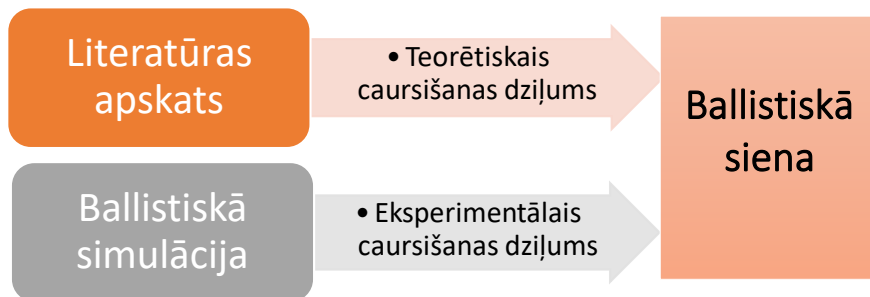
- rezultāti ir izmantojami praktiskiem mērķiem;

- rezultātu apraksti sniegti publikācijās un starptautiskās konferencēs;
- ir sadarbība ar Latvijas koka būvniecības klasteri.

Pētījuma metodoloģiskais pamats

Promocijas darbā pārstāvētās jomas ir ballistika, būvinženierzinātne un materiālzinātne, mehānika (trieciena dinamika un skaitliskā modelēšana), drošība un aizsardzība.

Darbs sastāv no literatūras pārskata un literatūrā atrodamo formulu analīzes, teorētiskā caursišanas dziļuma izpēti un aprēķina formulām, toties eksperimentālais caursišanas dziļums tiek iegūts ballistiskās simulācijās jeb testos. Vizuāli darba metodoloģija attēlots 1. attēlā.



1. att. Darba metodoloģijas shēma.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Izstrādātā un darbā aprobētā metodoloģija ļauj precīzi prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālus ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ēku projektēšanas laiku.

Darba praktiskajā daļā aprēķini veikti, izmantojot eksperimentāli noteiktus materiāla parametrus. Par eksperimentālo klasifikācijas līmeni ir izvēlēta BR2 aizsardzības klase, pēc kuras datiem rezultātu analogija pāriet uz pārējām klasēm, ņemot vērā katras klases trieciena kinētisko enerģiju, ko nosaka standartizēti lielumi lodes masai un sākuma maksimālajam ātrumam.

Piedāvātā metodoloģija ļauj prognozēt līmētas koksnes sienas biezumu BR1, BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Šīm klasēm noteikti no materiāla atkarīgi parametri, tādā veidā egles *CLT* un bērza saplākšņa ballistisko raksturojumu datubāzei pievienojot jaunus parametrus.

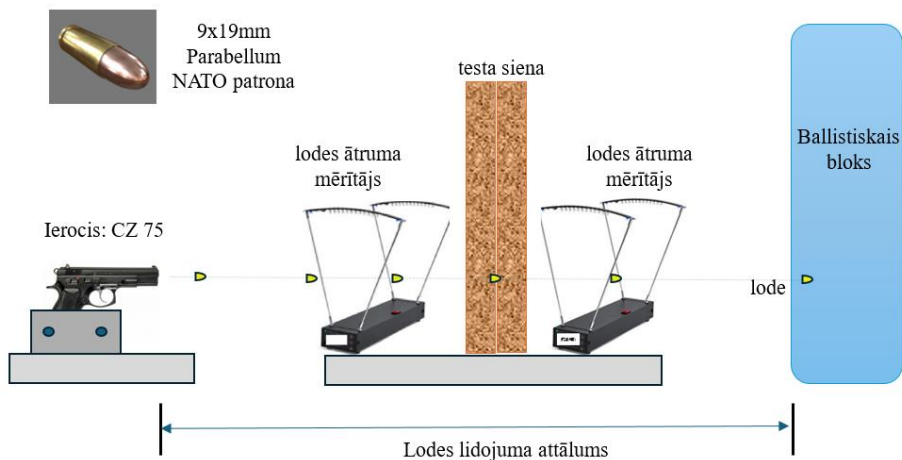
Jaunā aprēķina metodoloģija sniegs nozīmīgu ieguldījumu ilgtspējīgas būvniecības nozarē, sniedzot lielāku skaidrību par kokmateriālu lietojumu ēku sienu ballistisko funkciju nodrošināšanai. Terminālās ballistikas jomas attīstība var veicināt progresu gan teorētiskajā zinātnē, gan praktiskos risinājumos, lai veicinātu zinātnes un tirgus mijiedarbību. Nozares tālāka attīstība varētu ļaut izstrādāt precīzākus modeļus un teorijas, lai uzlabotu ballistisko eksperimentu simulācijas. Praktiski risinājumi ballistisko sienu modeļos veicinātu jaunus aizsardzības veidus un sniegtu augstāku aizsardzības līmeni esošajās militārās un civilās aizsardzības struktūrās.

Izmantotie rīki un iekārtas

Eksperimentos izmantotie rokas ieroči ir CZ 75 (ražo uzņēmums “ČZUB” Čehijas republikā) un Glock 17 (Glock sērija, Austrija) pusautomātiskās rokas pistoles. 9 mm x19 mm kalibra *Parabellum FMJ* (metāla apvalka lodes). Šo ieroču lādiņš izšaušanas brīdī rada 157–162 dB lielu troksni, tāpēc darba drošības komplektā neatņemama sastāvdaļa ir trokšņa ierobežošanas palīgierīces jeb austiņas, kā arī papildus ausu aizbāžņi (pēc nepieciešamības). Šaušanas leņķis (lādiņa ass leņķis attiecībā pret šķēršļa virsmu) bija 90 grādi, lai gan tas varēja nedaudz mainīties sakarā ar to, ka šāvējs bija nevis specializēta iekārta, bet cilvēks (profesionālis). Eksperiments šajā promocijas darbā tiek limitēts, izmantojot slīpgaļa (*ogive*) formas *Parabellum* lodes. Ieroča un tā parametru izvēle ir pamatota ar to, ka CZ 75 un Glock 17 ir standartizēti zemas-vidējas kinētiskās enerģijas avoti. Šo ieroču izmantošana samazina eksperimentālo mainīgo skaitu, nodrošina mērījumu atkārtojamību, ieroča izmantošana ir raksturīga urbanizētai videi, kas pietuvina eksperimentu reāliem apstākļiem.

Ložu ātruma mērīšanai tika izmantoti divas N/P firmas “Slingshot” Speed tester hronogrāfa ierīces ar mērījumu kļūdu $\leq 1\%$ un precizitāti $\pm 0,1$ m/s (EN 1063 standarts nepieprasa precizitāti, mazāku par 1 m/s). Šie ātruma mērītāji jeb velosimetri tika novietoti pirms un pēc mērķa materiāla, maksimāli tuvu sienas paraugam.

Eksperimenta darbības shēma attēlota 2. attēlā. Lodes lidojuma attālums ir 8–9 metri no ieroča stobra līdz paraugam lodes iesprūšanas rezultātā vai līdz ballistikajam blokam jeb lodes uztvērējam lodes caursišanas gadījumā.



2. att. Eksperimenta darbības shēma.

Caursišanas garumi tika mērīti ar tērauda stieplīti un rokas lineālu, un kļūdas precizitāte ir ± 1 mm (mazākās iedaļas vērtība) līdz lodes aizmugurējai daļai.

CLT un saplākšņu eksperimentos izmantotā ieroča CZ 75 izšautās lodes ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija no 327,3 m/s līdz 345,8 m/s. Ātrums atbilst *NIJ standard-0108.01* standartam, kur 9 mm lodes sākuma ātrumam jābūt (332 ± 12) m/s, bet nesakrīt ar *EN 1063* standarta tabulu (1.1. tab.), kur tie ir diapazonā no (360 ± 10) m/s līdz (440 ± 10) m/s. Lodes ātrums tika mērīts šaušanas 8–9 metru attālumā no ieroča pirms materiāla caursišanas. Pēc fizikas likumiem tik relatīvi liela ātruma samazināšanās 8–9 metru attālumā ir niecīga. Līdz ar to ierīces fiksēto ātrumu pirms materiāla var pieņemt vienādu ar lodes sākuma ātrumu. Šo

starpību var ietekmēt patronas šaujampulvera daudzums un ieroča markas izvēle, kam šajos testos bija gadījuma raksturs. ASV normatīvā *NIJ standard-0108.01* ir detalizētāka informācija par ieroču piemērotību aizsardzības klasēm, iekļaujot stobra garuma parametrus.

Valodas formulējumu uzlabošanai un atsevišķu teikumu redakcijai tika izmantots mākslīgā intelekta valodas modelis *ChatGPT (OpenAI, GPT-5 versija, 2025)*. Modelis netika izmantots jaunu zinātnisku secinājumu ģenerēšanai, bet tikai teksta stilistikas un valodas uzlabošanai. Autore ir veikusi visu satura pārbaudi un atbild par tā precizitāti.

Pētījuma ierobežojumi

Piedāvātā metodoloģija ir piemērojama BR1 un BR2 aizsardzības klasēm, kas nosaka ierosinātās lodes sākuma ātrumu no 330 m/s līdz 400 m/s un lodes masu no 2,5 g līdz 8,0 g ar tendenci līdz 450 m/s un lodes masu līdz 15,7 g.

Šī pētījuma ierobežojumi bija divi rokas ieroči un viens patronas tips atbilstoši aizsardzības klasei BR2 saskaņā ar *EN 1063* un *EN 10522/10523*, izmantojot slīpgaļa jeb *ogive* formas *Parabellum* lodes. Iemesls – tirgus pieejamība un biežs pielietojums attiecīgajā jomā.

Metodoloģijas piemērojamība nav eksperimentāli pārbaudīta citām koksnes sugām, bet vērtēta tikai bērza saplākšņa un egles *CLT* materiālu gadījumā.

Piedāvātajā metodoloģijā nav ietverti tādi mainīgie faktori kā leņķa un šaušanas attāluma ietekme, kas var ietekmēt rezultātu ticamību un lietojumu praksē. Pētījums neietver sienu paneļu sastiprinājumu montāžas detaļas un to izmaksas, savienojumu, kas ir vajākā vieta konstrukcijā, dažādību un to ballistikās pretestības ietekmi, pēkšņas lodes ātruma izmaiņas (nejauši šķēršļi lodes ceļā), lodes izmēru un gala formu variācijas un arī rikošeta iespējamību, kā arī šķembu izplatību. Eksperimenta laikā telpās esošā temperatūra izvēlēta nejauši – vienreiz +6–7 °C janvārī, citreiz +19 °C (maijā). Standarts nosaka testēšanas iekštelpu temperatūru +18 ± 5 °C

Aprēķinus ir būtiski vienkāršot, tāpēc tika pieņemts, ka: 1) lode iespiešanās brīdī materiālā nav deformējusies; 2) lādiņa kinētiskā enerģija tiek izmantota tikai mērķa deformācijai; 3) no daudziem faktoriem, kas ietekmē lodes caursišanas spēju, galvenie un nozīmīgākie: ir a) lādiņa masa, ātrums saduršanās brīdī un lādiņa galviņas gala forma; b) mērķa pretestības spēju raksturojums [21].

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Izstrādāta aprēķinu metodoloģija moduļveida sienu konstrukciju ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Izstrādātā metodoloģija ļauj ar augstu precizitāti prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna mēroga eksperimenta veikšanas, tā samazinot finansiālos ieguldījumus, drošības riskus un paaugstinot ložudrošu ēku projektēšanas laiku.
- Noteikti empīriski parametri (šķietamā dinamiskā pretestība R_t), kas ļauj prognozēt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu *CLT* materiālam pie mainīgu lodes ātruma (330–400 m/s) un lodes masas (2,5–8,0 g) parametru gadījumā BR1 un BR2 aizsardzības klases ietvaros. Parādīta grafiska tendence jaudīgāku ieroču spējai BR3 un BR4 klasēm.

- Noteikti empīriski parametri, kas ļauj prognozēt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu **saplākšņa** materiālam pie mainīgu lodes ātruma (330–400 m/s) un lodes masas (2,5–8,0 g) parametru gadījumā BR1 un BR2 aizsardzības klases ietvaros. Parādīta grafiska tendence jaudīgāku ieroču spējai BR3 un BR4 klasēm.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbā ir piecas nodaļas – literatūras apskats, pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums, metodoloģija ballistikās pretestības novērtēšanai, eksperimenti metodoloģijas aprobācijai un pētījumi daudzslāņu sienu ballistikā.

Promocijas darba izstrādes gaitā veikta citu zinātnisku pētījumu un informācijas līdzekļu plaša analīze par ballistikas zinātni, plašāk lietotajiem ballistikajiem materiāliem, iekļaujot koksnes cietību, ko mēra ar Janka cietību, kas korelē ar materiāla spēku pretoties trieciena slodzei. Sniegts pārskats par ieroču un kalibru iedalījumu, analizēti dažādi uz ballistiku attiecināmie standarti, veikts to īss salīdzinājums. Literatūras analīzē iekļauta būtiska informācija par aizsardzības klasēm, lodes gala formas ietekmi uz mērķi, rikošetu iespējamību, lādiņa darbību mērķa materiālā un plašāk par lodes caursišanas spēju un aprēķinu formulām, kā arī par līmes ietekmi uz ballistisko rezultātu, apskatīta un salīdzināta metodoloģija citos zinātniskajos darbos un pētījumos. Pētījuma teorētiskajā un eksperimentālajā pamatojumā veikti un analizēti preliminārie un reālie koksnes ballistiskie testi – pētījumi par *CLT* un **saplākšņa** modeļiem, lai atrastu optimālāko risinājumu BR2 klases ballistikai sienai, matemātiskais modelējums, izmantojot galīgo elementu metodi. Darbā iekļauta parametru optimizācijas analīze. Metodoloģija ballistikās pretestības novērtēšanai parādīts paņēmieni kopums līmētu kokmateriālu sienu ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci BR3 un BR4 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta. Pētījums paplašināts ar daudzslāņu sienu ballistikajiem pētījumiem par *CLT* un **saplākšņa** darbību slāņainā konstrukcijā, lai pielāgotu aprēķina metodoloģija papildinošo materiālu ballistikās pretestības noteikšanai vai prognozēšanai, kā arī veikts astoņu ballistisko sienu salīdzinājums, lai sagrupētu jau zināmās un arī autores pētītās ballistikās barjeras to spēju robežās. Izstrādāti priekšlikumus metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu par kokmateriālu ballistiku papildināšanai.

Pētījuma noslēgumā apkopoti galvenie secinājumi.

Darba apjoms ir 115 lappuses, tajā ir 52 attēli, 28 tabulas, 55 formulas, izmantoti 116 literatūras avoti. Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti prezentēti un apspriesti trīs starptautiskās konferencēs:

1. **Barone, E.**, Vetra, R., Gaujena, B., Vilnītis, M. Ordinary gypsum plasterboard, and *Knauf Torro* gypsum plasterboard bullet-proofing. 2022, RTU IMST, Sept 28–30, Riga, Latvia <https://imst.rtu.lv/wp-content/uploads/sites/59/2022/12/IMST-PROGRAMMA-2022-web-1-1.pdf> (autores ieguldījums 70 %)
2. **Barone, E.**, Gaujena, B., Vilnītis, M. Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes, 30th International Baltic Conference, Materials Engineering and Modern Manufacturing, Oct 19–20, 2023, Kauņa, Lietuva (autores ieguldījums 80 %)
3. **Barone, E.**, Hamenoks, D., Gaujena, B., Vilnītis, M. Plywood wall for bulletproof modular buildings. 2025, RTU IMST, Sept 10–12, Riga, Latvia (autores ieguldījums 80 %)

Publikāciju saraksts

Scopus datubāzē indeksētas piecas publikācijas:

1. Borodiņecs, A., Geikins, A., **Barone, E.**, Jačņevs, V., Prozuments, A. Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct. Buildings, 2022, Vol. 12, No. 1, Article number 30. ISSN 2075-5309. Pieejams: doi:10.3390/buildings12010030 (autores ieguldījums 10 %)
2. **Barone, E.**, Vetra, R., Gaujena, B., & Vilnītis, M. Ordinary gypsum plasterboard and *Knauf Torro* gypsum plasterboard bullet-proofing. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2423(1). Pieejams: doi:10.1088/1742-6596/2423/1/012016 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2423/1/012016> (autores ieguldījums 70 %)
3. **Barone, E.**, Veļičko, E., Gaujēna, B., Vilnītis, M. Plywood Panel with UHMW Polyethylene Board Ballistic Resistance. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 2023, Vol. 32, No. 1, 233.–243.lpp. ISSN 2029-9990. e-ISSN 2335-2000. Pieejams: doi:10.5755/j01.sace.32.1.32822. (autores ieguldījums 80 %)
4. **Barone, E.**, Gaujena, B., Vilnītis, M. Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes, Advances in Science and Technology, 2023, 134 AST, pp. 29–40 (autores ieguldījums 90 %)
5. **Barone, E.**, Griņēvičs, I., Gaujēna, B., Vilnītis, M. CLT Wall for Bullet-Safe Temporary Buildings. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 2025, Vol. 37, No. 1, 97. –108.lpp. <https://sace.ktu.lt/index.php/DAS/article/view/38395> <https://doi.org/10.5755/j01.sace.37.1.38395> (autores ieguldījums 70 %)

Web of Science datubāzē indeksēta viena publikācija:

6. **Barone, E.**, Gaujena, B., Videmanis, J. Projectile Penetration Depth into Wood-Based Frame of Unclassified Buildings. Far East Journal of Mechanical Engineering and Physics, 2022, Vol. 3, pages 11-20. e-ISSN 2229-4511. Pieejams: doi:10.17654/2229451122002 <http://www.pphmj.com/abstract/14445.htm> (autores ieguldījums 70 %)

PROMOCIJAS DARBA SATURS

1. LITERATŪRAS APSKATS

Laikā, kad aktualizējas drošības un aizsardzības jautājums, ložudrošas ēku sienu konstrukcijas kalpo kā fizisks un psiholoģisks vairogs. Analizējot pieejamo literatūru par ballistiku un potenciāli lietojamiem būvmateriāliem bruņota uzbrukuma gadījumā, nākas secināt, ka kokmateriālam ir savas perspektīvas un trūkumi, salīdzinot ar citiem materiāliem, īpaši tēraudu un betonu, kas tiek plaši lietots aizsardzības nolūkos. Līmētas koksnes izgatavošanas tehnoloģija palielina materiāla cietību un tā pretošanos trieciena slodzei.

Ballistika ir zinātne par šāviņu lidojuma laikā. Termins “ložudrošs” (*bulletproof*) ir relatīvi maldinošs, jo neviens materiāls nav simtprocentīgi necauršaujams. Ballistika iedalās trīs zinātniskajos virzienos [8]. [22]: iekšējā ballistika; ārējā ballistika; terminālā ballistika – pēta šāviņa uzvedību un sekas pēc tam, kad tas trāpa mērķī [8].

Ieroču izmēri un to dažādās masas, vairāku diametru un formu ložu raidītie ātrumi variē no 360 m/s līdz 820 m/s, tāpēc pētījuma apgabals noteikti ir jāierobežo jeb jānosaka eksperimentālie limiti. Turklāt eksperimenta rezultātus ietekmē lodes raidīšanas leņķis un iespējamās neprecizitātes (rikošets, gaisa pretestība u. tml.). Testēšanas apstākļus pilnībā vai daļēji nosaka šādi standarti *EN 1063*, *EN 1522/ DIN EN 1522*; *EN 1523/DIN EN 1523*; *BS 5051*; *UL 752*; *ASTM F1233-08*; *NIJ Standard-0108.01*; dokuments *UFC 4-023-07*.

Par pamata aizsardzības līmeņiem promocijas darbā ir ņemts standarts *EN 1063* “Ballistiski izturīgu aizsargmateriālu standarti” (*Standards for ballistic resistant protective materials*), kas ir Eiropas Standartizācijas komitejas izveidots drošības stiklojuma standarts, lai mērītu ložu necaurlaidīga stikla pretestību. Tas parasti tiek lietots kopā ar *EN 1522*. Standarti iedala materiāla pretestību konkrētajiem ieroču veidiem un atbilstošajām lodēm klasēs, kā arī nosaka testēšanas apstākļus. Standarts ir domāts ložu necaurlaidīgajam stiklam, kas nav tuvs koksnei vai pētījumā izmantotajiem citiem materiāliem, tomēr šis ir viens no retajiem pieejamajiem dokumentiem, kas darbojas Eiropas zonas ietvaros, un pamatojoties uz to, varētu veidot citu būvmateriālu ballistiskās pretestības noteikumu kopu [23].

1.1. tabula

Ieroču ballistiskās pretestības klašu iedalījums pēc standarta *EN 1063* 1. tabulas [23]

Klase <i>EN 1063</i>	Ieroča veids	Kalibrs	Patronas veids	Masa (g)	Testa apstākļi	
					Attālums (m)	Lodes ātrums (m/s)
BR1	pistole	22 LR	L/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10
BR2	rokas pistole	9 mm <i>Luger</i>	(1) FJ/RN/SC	8,0 ± 0,1	5 ± 0,5	400 ± 10
BR3	rokas pistole	357 <i>Magnum</i>	(1) FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
BR4	rokas pistole	357 <i>Magnum</i>	(1) FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5 ± 0,5	430 ± 10
	rokas pistole	.44 <i>Rem. Mag.</i>	(2) FJ/FN/SC	15,6 ± 0,1	5 ± 0,5	440 ± 10
BR5	šautene	5.56 × 45	(2) FJ PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
BR6	šautene	5.56 × 45	(2) FJ PB/SCP1	4,0 ± 0,1	10 ± 0,5	950 ± 10
	šautene	7.62 × 51	(1) FJ/PB/SC	9,5 ± 0,1	10 ± 0,5	830 ± 10
BR7	šautene	7.62 × 51	(2) FJ/PB/HC1	9,8 ± 0,1	10 ± 0,5	820 ± 10

Lai ieročus sagrupētu pēc iedarbības spēka, tos grupē vairākās klasēs. *EN 1063* un *DIN EN 1522/23* standartā izšķir klases no BR1 līdz BR7 (1.1. tab.). Augstāka klase pieprasa augstākas konstrukcijas prasības mērķim, to aizsardzības klašu numerācija ir pieauguša pretestībai. Ja paraugs atbilst konkrētas klases prasībām, tad tas atbilst arī iepriekšējai zemākai klasei. Pirmās četras klases BR1–BR4 ietver rokas pistoles, sporta šautenes un revolveri, kas spēj dot lodei sākuma ātrumu no 360 m/s līdz 440 m/s, kas ir vairāk nekā 1500 km/h. Tās atšķiras ar kalibra tipu, kādu siena/mērķis spēj izturēt. BR5–BR7 ietver šautenes, kas ir lieljaudas ieroči, piemēram amerikāņu *M16* vai *NATO G36* un *G3*, un piešķir lādiņam ātrumu no 820 m/s līdz 950 m/s, kas ir vairāk nekā 3000 km/h. Šie ieroči ir efektīvi un precīzi lielā attālumā. *EN 1063* standarts nosaka testēšanas kārtību. Paraugi pirms testēšanas 12 stundas jātur konstantos apstākļos ar gaisa temperatūru $+18 \pm 5$ °C. Testēšanas temperatūra sakrīt ar glabāšanas temperatūras diapazonu. Mērķa materiāla izmērs ir (500 ± 5) mm $\times$ (500 ± 5) mm un ir paredzēts, ka lodes tiek mērķētas vienādmalu trīsstūra stūros ar attālumu $L=120$ mm cita no cita, lai tās savstarpēji neietekmētu katras lodes performanci. Tests tiek izpildīts ar automātisko šauteni.

Lai apstādinātu lielā ātrumā lidojošu lodi, ir nepieciešams aizsargvairogs jeb šķērslis, kas izgatavots no materiāla, kas spēj uzņemt un absorbēt lielu daudzumu kinētiskās enerģijas. Lodes darbība (tās inerces spēks [24]) materiālā ir atkarīgs no lodes raksturlielumiem un no mērķa materiāla īpašībām – tā struktūras sarežģītības, slāņainības, austu vai adītu šķiedru veida, blīvuma, cietības un izturības liela trieciena gadījumā. *CLT* un saplāksnis tiek veidoti krusteniski salīmējot vairākas mazākas koksnes kārtas perpendikulāri citu citai, tādā veidā saglabājot kokmateriāla labās īpašības, bet uzlabojot tā vājās vietas – izturību pret plaisām, stiprību – un samazinot anizotropiju. Līme nodrošina slāņu saķeri un ietekmē ne tika mehāniskās, bet arī gala-materiāla ballistikās īpašības. Līmes ballistikās īpašības ir atkarīgas no līmes enerģijas absorbcijas spējas, saķeres starp slāņiem un plastiskuma un deformācijas spējas. Līme nav galvenais faktors ballistikās pretestības prognozēšanā, tomēr tā tieši ietekmē kokmateriāla mehāniskās īpašības, kas korelē ar lodes triecienizturību [62], [63].

Lai gan koka ballistikās īpašības ir pētītas jau trīs gadsimtus, joprojām nav atrasts apmierinošs risinājums, kā nodrošināt pietiekamu izturību pret ballistiskiem draudiem [25]. Sprāgstvielu testos plaši tiek izmantoti koka mērķi, lai testēšanas laikā nodrošinātu drošību un standartizāciju [24]. Tomēr standarta aizsargmodeļos esot pārvērtēts koka biezums šāviņa apstādināšanai [25]. Koksnes materiālu caursites dziļums ir saistīts ar koksnes fizikālajām īpašībām [26], [27]. Kokmateriāla nepilnības (piemēram, anizotropiskums) ietekmē tā mehāniskās īpašības, tostarp šāviņa darbību. Reizēm arī lodes uzvedība kokmateriālos ir neprognozējama, jo kokmateriālos ir relatīvi daudz redzamu un neredzamu zaru, kas samazina koksnes stiprības un izturības prognozējamību [26], [28], [29], [30], īpaši egles un priedes sugām [26]. *CLT* kompozītmateriālu īpašības kombinācijā ar koka paneļu spēju absorbēt enerģiju ir perspektīvs virziens to izmantot pagaidu militārajās konstrukcijās. *CLT* materiālu priekšrocības ir laba siltumnoturība, skaņas izolācija, materiāla relatīvi mazais svars, paneļi ir ātri un viegli montējami, piemēroti apdarei gan ēkas iekšpusē, gan ārpusē un tiem ir lielāka izturība pret graužējiem perpendikulāro šķiedru dēļ. Patlaban koksne nav pietiekami novērtēta, lai izstrādātu aizsargsistēmu, ko var izmantot kā aizsargdetonācijas ekrānu, jo tās stiprība ir zema, salīdzinot ar tērauda un betona stiprību. [8]

Caursīšanas formulu aprēķini atrodami, sākot no 18. gadsimta. Zināmākās un lietotākās ir de Marra, Eulera-Robinsa, Ponceleta, un Resāla formulas. Formulu noteikšana ir laikietilpīga,

turklāt formulu precizitātei piemīt gadījuma raksturs, tāpēc empīriski vai daļēji empīriski modeļi [30] dod efektīvu un ātru rezultātu analīzi. Ponceleta formula ir ērti izmantojama, lai aprēķinātu lodes caursišanas dziļumu. Tā ietver no mērķa materiāla īpašībām atkarīgus parametrus, kas nav vai tikai daļēji atrodami zinātniskajā literatūrā, tāpēc tā nav pilnīga, kā arī tā neļauj aprēķināt slāņainu materiālu caursišanas dziļumu, tai skaitā *CLT*. Tāpēc nepieciešami papildinājumi jeb šo parametrus noteikšana mērķa materiāliem.

Ponceleta modelis (1.1., 1.2. formulas) nozīmē, ka koksnes izturību pret iespiešanos var risināt, izmantojot vairākas fizikāli interpretējamās sastāvdaļas [8], [26], [31], [32].

$$m_p \frac{dv}{dt} = F = -\beta - \alpha v^2, \quad (1.1.)$$

kur m_p – šāviņa masa, kg;

v – lādiņa ātrums noteiktā laikā t , m/s;

β – parametrs, kurā dominē materiāla izturība, $(\text{kg} \times \text{m})/\text{s}^2$;

α – materiāla iekšējo spriegumu koeficients, kg/m ;

F – spēks, ar kādu lādiņš pārvar attālumu, N.

Ponceleta vienādojumā tiek pieņemts, ka penetratoram jeb lodei tās kustībā nenotiek ievērojams masas zudums, tātad $m = \text{const}$. Šis pieņēmums ne vienmēr ir precīzs, jo trieciena laikā var notikt lodes izplešanās, saspiešanās (*mushrooming*), sadalīšanās un sairšana.

Šāviņa iespiešanās dziļums P ir atkarīgs no lādiņa palēnināšanās mērķī un lādiņa ātruma.

1.2. vienādojuma integrālis dod rezultējošo caursišanas garumu P kā sākotnējā trieciena ātruma (v_i) funkciju:

$$P = \frac{m_p}{2\alpha} \ln \left(1 + \frac{\alpha v_i^2}{\beta} \right). \quad (1.2.)$$

Eksperimentālie lodes iespiešanās dziļuma dati analizēti, izmantojot Ponceleta (*Poncelet*) modeli (1.2. formula), kas lielā mērā balstās Ņūtona 2. likumā $F = m \times a$.

Mērķa materiāla šķietamo dinamisko stiprību aprēķina pēc formulas

$$R_t = \frac{\beta}{A}, \quad (1.3.)$$

kur A – lodes priekšējā gala laukums. Dinamiskā stiprību korelē ar mērķa materiāla stiprību bīdē un Janka cietību [26], [28], [33], [34].

Par kokmateriālu ballistiku ir veikti pētījumi ASV – Dr. K. Sanborn, Marco T. Lo Ricco, Nīderlandē – L. Koene, F. Broekhuis, G. Willemsen, zinātnieki Austrālijā [18], Vācijā [22], Vjetnamā [24], [35], Brazīlijā [35] un citur. Latvijā šajā nozarē ir ierobežots pētījumu skaits vai arī šādai informācijai ir ierobežota piekļuve nozares specifikas dēļ. Tāpēc promocijas darba pētījumā kā mērķa materiāls tiek izvēlēts kokmateriāls kā ilgtspējīgs būvmateriāls tā vēl līdz galam neizpētīto ballistisko īpašību dēļ. Aizsardzības klases BR2 izvēle sakrīt ar praktisko lietojumu un atbilstību reālam incidentam civilās iestādēs. BR2 klase prognozējoši ir piemērota, lai atklātu materiāla ballistiskās priekšrocības un trūkumus, vienlaikus izpildot eksperimentus pieejamā šautuvē, iztiekot bez lielas masas paraugiem, lai rezultāti būtu salīdzināmi, atkarājami un nodrošinātu metodoloģijas pārskatāmību.

Ballistikas zinātnieku (Dr. K. Sanborn, Marco T. Lo Ricco, L. Koene, F. Broekhuis, G. Willemsen) pētījumos izmantota eksperimentāla pieeja un datu analīze ar precīzu mērījumu kontroli un teorētisko modeļu validāciju. Pētījumos izmantoti atšķirīgi materiāli un iekārtas, testēšanas pieejas, mērīšanas tehnikas, datu analīzes metodes, teorētisko modeļu validācijas. L. Koene vadītās ballistikas pētnieku grupas (ar kolēģiem F. Broekhuis, G. Willemsen [26], [33], [34]) metodoloģija balstās eksperimentālā pieejā ar kvantitatīvu datu analīzi, izmantojot

fizikālus un mehāniskus modeļus. Galvenie etapi ir mērķu paraugu sagatavošana un to fizikālo īpašību klasifikācija; eksperimentālā gaita (šaušana) un caursišanas dziļuma noteikšana; datu apstrāde ar formulu modeļiem; salīdzinājums ar citiem koksnes materiāliem empīrisku sakarību noteikšanai. Savukārt *Sanborn* (2018) [8] disertācijas metodoloģija ir daudzslāņaina – tā apvieno eksperimentālos testus, empīrisku modelēšanu, analītisku aprēķinu metodes un daudzfaktoru lēmumu pieņemšanas pieeju.

Apkopojot šo darbu pētījumu metodoloģijas, var secināt, ka visos ziņojumos atklāts, ka izmantota eksperimentāla pieeja un datu analīze ar precīzu mērījumu kontroli un teorētisko modeļu validāciju. **Tomēr šajos darbos nav** izstrādāta līmētu konstrukciju specifika BR1 līdz BR4 aizsardzības klases lodēm atbilstoši Eiropas noteiktajiem standartiem (*EN 1063*), pārbaudītas biežumu variācijas *CLT* un saplākšņa paneļiem un to reakcija uz lodi, nav ietverts ātruma samazinājums un enerģijas absorbcijas spēja, empīriskā un teorētiskā sasaiste ar Ponceleta modeli, *CLT* paneļu eksperimentālie rezultāti izmantoti Ponceleta formulas validācijai un optimizācijai, nosakot *CLT* materiāla šķietamo dinamisko stiprību pēc empīriskas metodes, skaitliskā modelēšana ar galīgo elementu metodi, nav iekļauta parametru optimizācijas analīze un nav atrodama integrācija ar tādiem papildmateriāliem kā *Kevlar* un minerālvate, *UHMWPE*.

Teorētisko un eksperimentālo pētījumu rezultāti apliecina nepieciešamību pēc jaunas zinātniskas metodoloģijas līmētu koka sienu konstrukciju ballistikās pretestības noteikšanai. Līdz šim pieejamie pētījumi nav veikti Latvijā. *CLT* pētījumos nav ņemta vērā slāņu pretložu ietekme, turklāt masīvkoksnes un saplākšņa pētījumi nav pielāgoti Eiropas standartiem (*EN 1063*), kas nosaka prasības pēc septiņām aizsardzības klasēm.

Jaunas metodoloģijas nepieciešamību parāda arī eksperimentāla un teorētiska salīdzinājuma trūkums. Iepriekšējos darbos ir izmantoti Ponceleta un Eulera-Robinsa formulu teorētiskie modeļi, tomēr pietrūkst to validācija ar eksperimentu rezultātiem. Nav atklāti visi formulas parametri, piemēram, šķietamā dinamiskā stiprība, kas ļautu precīzāk noteikt lodes caursišanas dziļumu. Pētījumos par koksnes ballistisko pretestību, nav ietvertas tādas sadaļas kā optimizācija un skaitliskā modelēšana, izmantojot galīgo elementu metožu rīkus. Ne visos zinātniskajos darbos ir minēts, ka aizsardzības klasi varētu uzlabot, izmantojot papildu materiālus, piemēram, aramīdu, augsta blīvuma polietilēnu, nav minēta siltumizolācijas ietekme ballistikas efektivitātes paaugstināšanai.

Pirmreizējo ballistisko eksperimentu rezultāti pierāda, ka ballistikā izturība ir atkarīga no izmantotā materiāla veida, mitruma, slāņa biezuma. Tādēļ ir nepieciešama metodoloģija, kas ļautu noteikt optimālo sienas biežumu pie dažādām aizsardzības klasēm, balstoties *EN 1063* standartā.

Apkopojot iepriekšminēto, var secināt, ka jaunas teorētiskas un eksperimentālas metodoloģijas izstrāde nodrošinātu zinātniski pamatotu veidu, kā novērtēt līmētu koka konstrukciju ballistisko pretestību, sniedzot ieguldījumu gan ballistisko materiālu zinātnes, gan būvzinātnes attīstībā.

Jaunās metodoloģijas atšķirības:

- eksperimentu sasaiste ar Eiropas standartiem;
- materiāla dažādu biežumu ballistikā analīze;
- rezultātu validācija galīgo elementu programmā;
- parametru optimizācija.

2. PĒTĪJUMA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS

Lai izveidotu promocijas darba metodoloģiju, promocijas darba eksperimentālajā daļā izveidoti empīriski modeļi un veikta datu analīze, lai izpētītu kokmateriālu pretestību un uzvedību ārēja trieciena ietekmē.

2.1. Koksnes pirmreizējās ballistikās pārbaudes

Pētījuma sākuma daļā apskatīta šāviņu iedarbība uz koksnes izstrādājuma paneļiem, kas būtu piemēroti moduļveida ēkām, kas atrodas ballistiski jutīgās vietās (armijas štābi, kazarmas, bēgļu patversmes). Tika pārbaudīta kokmateriālu ballistikā izturība – egles šķērslīmēta kokmateriāla (*CLT*) un bērza saplākšņa caursišanas dziļums – dažāda biezuma paraugiem. Lodes caursišanas teorētiskajam aprēķinam izmantots Ponceleta modelis, kas atbilst eksperimentālajiem rezultātiem. Eksperimenta rezultātā ēkas sienām iesaka izmantot 84 mm saplākšņa paneli un kombinēto paneli, savukārt neiesaka izmantot pārējos eksperimentā testētos materiālus – *CLT* līdz 120 mm un saplāksni, kas mazāks par 84 mm. Tika apstiprināts, ka testa parauga/sienu biezuma izvēle jāveic, pamatojoties uz teorētiskiem aprēķiniem.

Eksperimentā pārbaudīta dažādu koksnes izstrādājumu ballistikā izturība (caursišanas dziļums):

- *CLT* materiāla paraugi, ražoti uzņēmumā SIA “*CLT Profi*” (Latvija). Tā mitruma saturs ir $12 \pm 2 \%$. Egles, klase C24.
- Saplākšņa paraugi, izgatavoti no *LF-CPR/CE-DoP-01* – Riga® bērza saplākšņa (AS “Latvijas Finieris”) bez virsmas pārklājuma, līmēta ar fenolformaldehīda līmi. Tas tiek izmantots nesošajās būvkonstrukcijās.

Šie materiāli tika izvēlēti, ņemot vērā to lielo lietojamo Ziemeļvalstu reģionā. Koka šķiedras virziens netika ņemts vērā. Pirmajā eksperimentā tika izmantots BR2 aizsardzības klases ierocis – *Glock 17* pistoli, 9 mm × 19 mm, pilnībā apvalkota lode (FJM), kurai raksturīgs stabils lidojums. *CLT* paraugu biezums un slāņu skaits norādīts 2.1. tabulā.

2.1. tabula

CLT paraugu biezumi un slāņi

Paraugs	Materiāls	Biezums, mm	Slāņi	Līmes veids
C60	egles <i>CLT</i>	60	20-20-20 mm	karbamīda formaldehīds
C80	egles <i>CLT</i>	80	30-20-30 mm	
C100	egles <i>CLT</i>	100	20-20-20-20-20 mm	
C130	egles <i>CLT</i>	130	30-20-30-20-30 mm	
P1	bērza saplāksnis	28	19	fenolformaldehīds
P2	bērza saplāksnis	56	19 × 2	
P3	bērza saplāksnis	84	19 × 3	

Eksperimentā izmantotie ieroči atbilst BR2 drošības līmenim, kas nosaka lodes masu un ātrumu atbilstoši tehniskajai informācijai. Tādējādi pistolei *Glock 17* lodes sākuma ātrums ir 345 m/s, lodes masa 8,0 g. Ar šāviņu, kura šaušanas leņķis bija 90°, tika šauts no 5 metru attāluma, kas ir *EN 1063* standartā noteiktais testēšanas attālums, kas ne vienmēr atbilst reāla

apdraudējuma situācijai. Eksperiments tika organizēts šautuvē Rīgā. Iekšējā gaisa temperatūra svārstījās no +19 °C līdz +21 °C. Šaušanas precizitāte bija atkarīga no profesionāla šāvēja.

Tikai trīsšļāņu P3 paraugā *Glock 17* lode, iespiedusies starp otro un trešo saplākšņa plātni, apstājās. To noteikti ietekmē arī nobīdes virsmas pretestība. Tātad iespīšanās jeb caursīšanas dziļums P ir 56–84 mm diapazonā. Plānākiem paraugi P1 un P2 lodes izgāja tiem cauri.

Lodes caursāva visus *CLT* paraugus, tātad lodes iespīšanās dziļums pārsniedz 130 mm *CLT* mērķa biezumu.

Lodes iespīšanās dziļuma P teorētiskās vērtības ir aprēķinātas pēc 1.8. formulas un apkopotas 2.2. tabulā. Izmantotais ierocis (pistole *Glock 17*), lodes masa 8 g, šāviņa ātrums attiecīgi 400 m/s.

Egles *CLT* parametri α un β ir ņemti no [26] *Duglas* egles parametriem ($\alpha = 0,013 \text{ kg/m}$ un $\beta = 2300 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$). Teorētiskais caursīšanas dziļuma P aprēķins *CLT* paraugam:

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 0,0028 \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{\frac{0,0028 \text{ kg}}{m} \times (400 \text{ m/s})^2}{1500 \text{ kg} \times \text{m/s}^2} \right) = 0,198 \text{ m}. \quad (2.1)$$

Bērza saplākšņa caursīšanas dziļums tika iegūts vidēji no citiem lapu kokiem (zema vērtība $\alpha = 1 \times 10^{-13} \text{ kg/m}$ un salīdzinoši liela vērtības $\beta = 9000 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$), kas tiek pamatots ar to, ka publikācijā [26] norādītās *Merbau* koksnes blīvums ir tuvāks bērza blīvumam.

$$P = \frac{0,008 \text{ kg}}{2 \times 1 \times 10^{-13} \text{ kg/m}} \ln \left(1 + \frac{1 \times 10^{-13} \text{ kg/m} \times (400 \text{ m/s})^2}{9000 \text{ kg} \times \text{m/s}^2} \right) = 0,071 \text{ m}. \quad (2.2)$$

Teorētiskie aprēķini (2.2. tab.), kas tika veikti pēc eksperimentālajiem aprēķiniem, apstiprināja praktiskajos testos (šaušanā) iegūtos caursīšanas dziļuma rezultātus.

2.2. tabula

Eksperimentālie lielumi un teorētiskie aprēķini caursīšanas dziļumam P

Parauga Nr.	Eksperimentālie caursīšanas dziļumi P , m	Teorētiskie aprēķini caursīšanas dziļumam P , m
	Testa parauga biezums, m	<i>Glock 17</i> $m=8 \text{ g}$ $v_0=400 \text{ m/s}$
C100	0,100*	0,198
C130	0,130*	
P1	0,027*	0,071
P2	0,056*	
P3	0,084 – apstājās starp 2. un 3. saplākšni	

* Lode izgāja cauri mērķa paraugam.

Izmantojot *Poncelet* modeli, aprēķini parādīja, ka lielākā daļa izvēlētie materiālu biezumi nav piemēroti ložu pretestībai. Tikai P3 paraugs izturēja pistoles *Glock 17* pretestību (pielīdzināta BR2 aizsardzības klasei).

CLT līdz 130 mm un saplākšnis, kas mazāks par 54 mm, nav ieteicams sienu ballistikās pretestības nodrošināšanai. Turpmākajos pētījumos ieteicams veikt eksperimentus ar lielāka biezuma *CLT* un saplākšņa sienu konstrukcijām.

2.2. Aprēķina metodoloģijas eksperimentālais un teorētiskais pamatojums

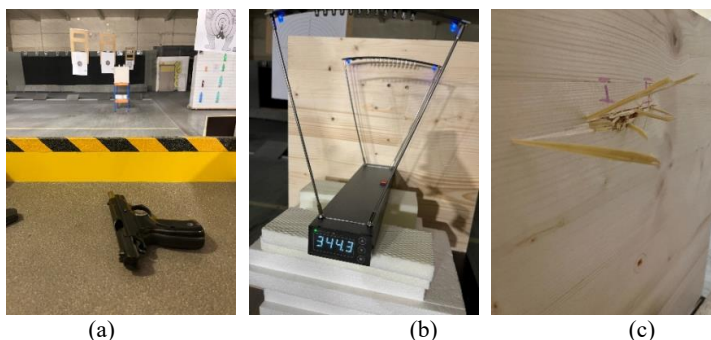
Lai izveidotu aprēķina metodoloģiju, pamatojoties uz iepriekšējiem secinājumiem tika testētas dažāda biezuma *CLT* un bērza saplākšņa sienas, noteikta šo koksnes kompozītmateriālu spēja absorbēt lodes kinētisko enerģiju un noteikts minimālais sienas biezums, kas nodrošina aizsardzību saskaņā ar *EN 1063* standarta BR1, BR2 klasēm, veidojot tendenci BR3 un BR4 klasēm. Eksperimentā izmantoto materiālu paraugu mitrums pirms testēšanas bija *CLT* – 5,3 %, saplākšnis – 5 %. Zems koksnes mitrums ietekmē ballistisko veiktspēju, radot mazāku spēju plastiski deformēties un augstāku elastības moduli, koksne ir trauslāka, tajā vieglāk veidojas plaisas, un caursišanas dziļums ir lielāks nekā mitrākā koksnē. Tātad eksperimenta apstākļi parāda sliktāko iespējamo gadījumu. Eksperimentā izmantoto līmēto kokmateriālu parametru (fizikālās īpašības un ģeometrija) salīdzinājums apkopots 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Testēšanas materiālu parametri				
Materiāls	Blīvums, kg/m ³	Mitruma saturs, %	Līmes veids	Paraugu biezumi, mm
<i>CLT</i>	461,7	5,3	karbamīda formaldehīds	80, 100, 140, 150, 240, 260
Bērza saplākšnis	669,9	5,0	fenola formaldehīds	27, 54, 81 (1, 2, 3 plātnes)

Šī pētījuma ierobežojums bija viens rokas ierocis un viens patronas tips. Eksperimentā izmantotais ierocis *CZ 75* (2.1. att. a), masa 0,77 kg, 9 mm × 19 mm kalibrs *Parabellum FJM*. Ieroča un tā parametru izvēle ir pamatota ar to, ka *CZ 75* ir standartizēts zemas-vidējas kinētiskās enerģijas avots. Šī ieroča izmantošana nodrošina atkārtotamību, tas raksturīgs urbanizētai videi, tāpēc pietuvina eksperimentu reāliem apstākļiem.

Ātruma mērīšanai tika izmantoti divas *N/P* firmas “*Slingshot*” *Speed tester* hronogrāfa ierīces (2.4. att. b) ar mērījumu kļūdu ≤1% un precizitāti 0,1 m/s. Velosimetri tika novietoti pirms un pēc mērķa materiāla, maksimāli tuvu sienas paraugam. Caursišanas garumi tika mērīti ar tērauda stieplīti un lineālu. Kļūdas precizitāte ir ± 1 mm līdz lodes aizmugurējai daļai. Šaušanas attālums 8,315 m un 9 m (eksperiments notika divos etapos). Standarts nosaka paraugu izmērus (500 ± 5) mm × (500 ± 5) mm. Tests atbilst BR2 klasei pēc *EN 1063* vai 1. klasei pēc *UL752*, ko nosaka izmantotās *Parabellum* patronas. Uz katru sienu tika veikti 3–5 šāvienī.



2.1. att. Izmantotais ierocis *CZ 75* (a), ātruma mērīšanas velosimetri ballistiskajai pārbaudei (b), lodes izeja (c).

Eksperimentā, atšķirībā no citiem ballistiskiem pētījumiem (*M. T. Lo Ricco, M. K. Weaver, C. Adam Senalik, J. Henjum, and J. Cattelino, "Ballistic testing of cross-laminated timber layups to further develop protective panels," L. Koene and F. R. Broekhuis, "Bullet penetration into wooden targets," K. Sanborn, B. Riser, R. Gentry, and L. Stewart, "Ballistic performance of enhanced cross-laminated timber (ECLT)"*), tika izmantots nosacīti konstants lodes ieiešanas ātrums. Ieroča CZ 75 izšautās lodes vidējais ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija 341,8 m/s, mērīts piecos mērījumos. Otrā eksperimenta etapā lodes vidējais ātrums pirms lodes ielidošanas paraugā bija 339,7 m/s. Tas atbilst *NIJ standard-0108.01* standartam, kur 9 mm lodes sākuma ātrumam jābūt (332 ± 12 m/s), bet nesakrīt ar *EN 1063* standarta tabulu (1.1. tab.), kur tas ir diapazonā no (360 ± 10) m/s līdz (440 ± 10) m/s.

2.2.1. CLT eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Par pētījuma objektu tika ņemti CLT sienas, ar praktisku testēšanas diapazonu biezumos no 80 mm līdz 260 mm (2.4. tab.). Pētījumā izmantoti Latvijā ražoti CLT paneļi. CLT eksperimentāli noteiktais blīvums ir 461,7 kg/m³.

2.4. tabula

CLT paraugu biezumi un slāņi

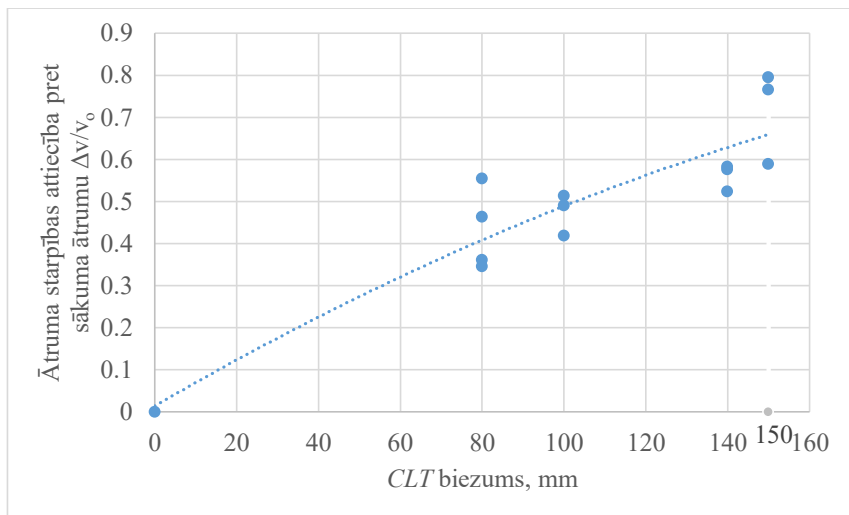
Parauga Nr.	Biezums, mm	Slāņi, mm	Līmes veids
C80	80	30-20-30	karbamīda formaldehīds
C100	100	20-20-20-20-20	
C140	140	40-20-20-20-40	
C150	150	30-30-30-30-30	
C240	240	40-40-20-40-20-40-40	
C260	260	40-40-30-40-30-40-40	

Par pētījuma objektu sākumā tika ņemti C80, C100, C140 paraugi, pa kuriem tika šauts 3–5 reizes, un mērot lodes ātrumu pirms un pēc lodes iziešanas caur materiālu. Ātrumu starpība parāda, cik metrus sekundē materiāls “atņem lodei”.

- C140 parauga maksimālais ielidošanas ātrums bija 345,8 m/s, izlidošanas ātrums 164,8 m/s, mazākais ātruma samazinājums 181 m/s.
- C100 parauga vidējais ielidošanas ātrums bija 339,9 m/s, izlidošanas ātrums 197,6 m/s, mazākais ātruma samazinājums 142,3 m/s.
- C80 parauga maksimālais ielidošanas ātrums bija 339,9 m/s, izlidošanas ātrums 252,4 m/s, mazākais ātruma samazinājums 87,5 m/s.

Var pieņemt, ka lodes caursišanas dziļums ir lineāri atkarīgs no materiāla biezuma un aprēķināt materiāla 1 mm spēju samazināt lodes pretestību, izsakot to metros sekundē. Jāņem vērā, ka koksne ir anizotropa un CLT ir slāņains materiāls, iekļaujot līmes kārtu starp CLT daļiņām. Rezultāti parāda, ka CLT materiāla 1 milimetra spēja apturēt lodi ir mazākais 1,1 m/s uz 1 mm, kas iegūts C80, bet vidējais 1,61 m/s uz 1 mm. Slāņu skaits C140 un C100 paraugiem neatšķiras, bet atšķiras ārējo slāņu biezums. Jāsecina, ka slāņu skaits un biezums ir būtisks kritērijs. Redzams, ka vidēji lodes absorbē ātrumu vienādi, neatkarīgi no slāņu skaita un biezuma.

2.2. attēlā redzama CLT materiāla absorbētās ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma.



2.2. att. *CLT* materiāla absorbētā ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma. Zilā līnija – tendence.

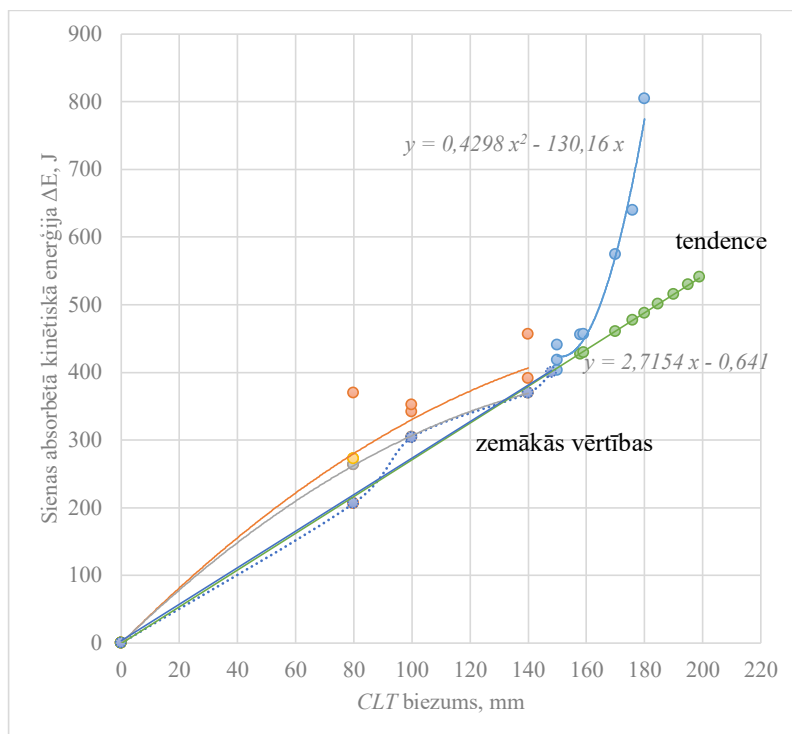
Ekspērimētā pārbaudot C240 sienas paraugu, lodes maksimālais caursišanas dziļums bija 154 mm, C260 bija 159 mm, savukārt C150 sienai divas lodes izgāja cauri, bet trīs lodes veidoja caursišanas dziļumu maksimāli 105 mm. Šie rezultāti sakrīt ar secinājumu par garantēto *CLT* biezumu, kas nepieļauj lodes caurīšanu. 2.5. tabulā apkopoti eksperimenta dati, kur Δv , m/s ir mazākā ātruma izmaiņa (enerģijas samazināšanās), ko konkrētā siena samazina.

2.5. tabula

CLT paneļu šaušanas rezultātu apkopojums

Parauga Nr.	Maksimālie (iekavās – vidējie) rādītāji caursišanas dziļumam P, mm	Minimālā (iekavās – vidējā) ātrumu starpība Δv , m/s	Minimālā (iekavās – vidējā) ātrumu starpība Δv uz 1 mm, (m/s)/mm
C80	Cauršauts	87,5 (128,9)	1,29 (1,611)
C100	Cauršauts	142,3 (161,0)	1,42 (1,610)
C140	Cauršauts	181,0 (225,9)	1,09 (1,614)
C150	145,0 (105,0)	Apstādināta lode	-
C240	154,0 (122,5)	Apstādināta lode	-
C260	159,0 (145,5)	Apstādināta lode	-

CLT bloki absorbē noteiktu daudzumu lodes kinētiskās enerģijas, kas noteikta pēc 1.53. formulas. Kinētiskās enerģijas daudzums atkarībā no *CLT* bloku biezuma parādīts 2.3. attēlā, ja lodes masa ir 8 g. Grafīkam ir līknes raksturs. Pēc 2.3. attēlā redzamās līknes var prognozēt katra biezuma *CLT* materiāla absorbēto kinētisko enerģiju.



2.3. att. Eksperimentāli iegūtais CLT paneļu absorbētās lodes kinētiskā enerģijas daudzums atkarībā no materiāla biezuma. Punkti un līkne oranžā krāsā – eksperimentālie dati. Punkti zilā krāsā – zemākās vērtības un tendence. Punkti zaļā krāsā – lineāra tendence.

150 mm biezs CLT sienas materiālu varētu izmantot kā V50 ballistisko robežtestu, jo C150 bija paraugs, kurā lodes gan izgāja cauri, gan apstājās.

Tālāk parādīta šķietamās dinamiskās stiprības R_t aprēķināšana BR2 aizsardzības klasei:

- 1) Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātrums

$$\Delta v = v_r - v_0 = 345,8 - 164,8 = 181 \text{ m/s (C140).} \quad (2.3)$$

- 2) Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātruma kvadrāts

$$v_r^2 - v_0^2 = 345,8^2 - 164,8^2 = 92418,6 \text{ m}^2/\text{s}^2. \quad (2.4)$$

- 3) Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas (1.53. formula) tiek aprēķināta lodes absorbētā enerģija

$$E_{\text{kin}} = \frac{0,008 \text{ kg} \times 92418,6 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2} = 369,7 \text{ J.} \quad (2.5)$$

- 4) Tiek izveidots grafiks absorbētās enerģijas atkarību no mērķa biezuma BR1, BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci aizsardzības klasēm BR3 un BR4 (2.3. att.).
- 5) No grafika tiek nolasīts katra materiāla biezums (kas būtu vienāds ar minimālo caursīšanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klasei nepieciešamās enerģijas (2.6. att.) BR2 klasei $P = 176 \text{ mm}$.
- 6) Izmantojot Ponceleta formulu (1.8. formula), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β . Formulā ietverta arī lodes masa, ātrums un α – materiāla iekšējo spriegumu koeficients, kas ir vienāds ar mērķa blīvuma ρ , lodes formas koeficients C un lodes šķērsriezuma laukuma A reizinājums, kg/m.

$$\alpha = \rho \times C_m \times A = \frac{461,7 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 0,342 \times 6,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,0100 \text{ kg/m}, \quad (2.6)$$

kur lodes laukums A, m², ja lodes diametrs ir 9 mm:

$$A = \pi \times \frac{d^2}{4} = \pi \times \frac{0,009 \text{ m}^2}{4} = 6,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (2.7)$$

Materiāla stiprības parametru β iegūst izsakot to no 1.8. formulas:

$$\beta = \frac{\frac{\alpha \times v_0^2}{2 \times P \times \alpha}}{e^{\frac{2 \times P \times \alpha}{m}} - 1} = \frac{\frac{0,0100 \text{ kg/m} \times (400 \text{ m/s})^2}{2 \times 0,176 \text{ m} \times 0,0100 \text{ kg/m}}}{e^{\frac{2 \times 0,176 \text{ m} \times 0,0100 \text{ kg/m}}{0,008 \text{ kg}}} - 1} = 2892 \text{ kg} \times \text{m/s}^2. \quad (2.8)$$

- 7) Aprēķina šķietamo dinamisko stiprību R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķēsgriezuma laukumu A, formula (1.10. formula).

$$R_t = \frac{\beta}{A} = \frac{2892 \text{ kg} \times \text{m/s}^2}{6,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 45,48 \text{ MPa} \quad (2.9)$$

Absolūtā kļūda aprēķināta no iesaistīto lielumu mazākās iedaļas vērtībām.

Pārējām aizsardzības klasēm aprēķini parādīti 2.6. tabulā.

2.6. tabula

Lodes un CLT raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klases saskaņā ar EN1063	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	Masa	Sākuma ātrums	Kinētiskā enerģija	Formas koef.	Diametrs	Šķēsgriezuma laukums	Bļivums	Iekšējo spriegumu koeficients	Cauršanās dziļums	Stiprības parametrs	Šķietamā dinamiskā stiprība	Absolūtā kļūda
	m , g	v_0 , m/s	E , J	C	d , mm	A , m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P , mm	β , kg×m/s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	$2,46 \times 10^{-5}$	461,7	0,0039	60	2565	104,19	1,04
BR2	8,0	400	640	0,342	9,0	$6,36 \times 10^{-5}$	461,7	0,0100	176	2892	45,48	0,45
BR3	10,2	430	943	0,34	9,0	$6,36 \times 10^{-5}$	461,7	0,0100	185	4245	66,76	0,65
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	$9,33 \times 10^{-5}$	461,7	0,0127	199	6425	68,89	0,68

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem par patērēto kinētisko enerģiju konkrētām CLT materiāla biezumam, no grafika (2.3. att.) tika nolasīts CLT minimāli nepieciešamais biezums (2.6. tab.) katrai aizsardzības klasei (pēc EN 1063). Tas bija attiecīgi BR1 līdz BR4 klasēm 60 mm, 176 mm, 185 mm un 199 mm. Iegūtie sienas biezumi jeb caursišanas dziļumi drošības nolūkos tiek noapaļoti uz augšu līdz 1 mm, bet, ņemot vērā to, ka izstrādātājiem parasti ir standarta CLT biezums, tad tie tiktu noapaļoti uz drošāko pusi, attiecīgi 60 mm, 180 mm, 200 mm. Parametrs α jeb materiāla iekšējo spriegumu koeficients ir $0,0039 \text{ kg/m} \div 0,0127 \text{ kg/m}$. Izmantojot Poncelet formulu, tika iegūti materiāla stiprības parametri β katrai aizsardzības klasei, kas nav konstants lielums, jo ir atkarīgs no lodes šķēsgriezuma laukuma. Ložu sākuma ātrums un lodes masa ir noteikti pēc EN 1063 standarta. Sākuma ātrums BR2 klasei atšķiras no eksperimentāli pētītā maksimālā 345,1 m/s.

Izmantojot 1.10.formulu, tiek noteikta materiāla šķietamā dinamiskā stiprība R_t , MPa, kas ir unikāla tieši katram mērķa materiālam. Tātad empīriskā ceļā iegūtā CLT šķietami dinamiskā stiprība atbilstoši BR1, BR2 aizsardzības klasēm ir 100,24 MPa, 45,48 MPa, tendence BR3, BR4 klasēm ir 66,70 MPa un 68,93 MPa, kas ļauj ar Ponceleta formulas palīdzību aprēķināt CLT jebkura potenciālo biezumu lodes (ne)caursišanai.

Šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehnisko datu literatūras dati *CLT* materiāla ballistikās veikspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem.

Ponceleta modeļa parametru optimizācija ($\alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$; $\beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu nosacīto ekstrēmu 140,1 mm, ar augstu modeļa ticamību (aproximācijas kļūda 0,028 %). Lodes pretestību *CLT* materiālā būtiski ietekmē ārējo slāņu biezums un kopējais slāņu strukturālais izvietojums, ne tikai kopējais paneļa biezums, kas jāņem vērā, projektējot *CLT* ballistikos paneļus.

***CLT* galīgo elementu analīze**

Eksperiments tika teorētiski pārbaudīts, izmantojot *Ansys Workbench* programmatūru *ANSYS 2023R2* un *Explicit Dynamics* galīgo elementu risināšanas moduli, līdzīgi kā *LS-Dyna* lieto liela trieciena ātruma īsa laika sadursmju modelēšanā. Galīgo elementu metodē konstrukcija tiek sadalīta diskrētos jeb galīgos elementos, kam ir vienkārša ģeometriskā forma. Galīgo elementu modelis tika skaitliski modelēts, lai pārbaudītu iegūtos rezultātus. Šāda eksperimentāla simulācija nodrošina lielāku izpratni par materiāla deformācijām, spriegumiem un lodes un materiāla mijiedarbību [36].

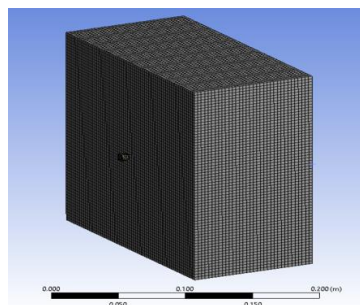
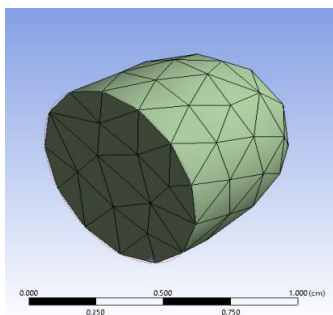
Parauga ģenerēšanai tika izmantotas *CLT* plāksnes. Ēku drošības jautājumā lielākajā daļā ballistisko pētījumu tiek ņemts vērā tikai normāles triecieni, kur leņķis starp šāviņa ātruma vektoru un šāviņa normālo vektoru ir nulle, jo tas dod visdziļāko lodes ieuršanās dziļumu.

Izmantotie materiāli:

- Svins (NATO 9 mm *Parabellum* tipa lodei).
- *CLT* materiāls tiek definēts manuāli, izmantojot *CLT* zināmos parametrus, jo tas nav pieejams *ANSYS* materiālu bibliotēkā. Modelēšana ar koksni arī citiem zinātniekiem šķiet izaicinoša [26].
- *CLT* līmes materiāls netiek specifiski norādīts, jo tā ietekme uz materiāla viendabīgumu ir minimāla, kā arī tas apgrūtinātu procesa simulāciju līmes slāņa vietā mazo režģa izmēru dēļ. Līmes slāņa biezums ir gandrīz neievērojams attiecībā pret pārējā materiāla biezumu.

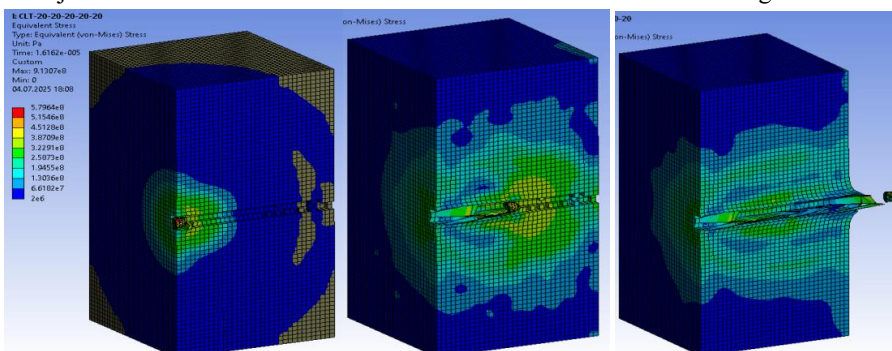
Kad materiāli ir definēti un izvēlēti, tiek izveidots lodes un *CLT* bloka ģeometriskie objekti *Ansys Design Modeler* vidē (2.13. att.). Objekti tiek veidoti kā cietā tipa (*solid*) objekti. Lode tiek veidota vienkāršotā formā, lai saglabātu vēlāk nepieciešamā režģa elementu kvalitāti, ņemot vērā NATO *Parabellum* 9 mm lodes dimensijas.

Datorsimulācijas modelēšanas metode izmanto galīgo elementu režģi, kas nepieciešams procesa simulācijas nodrošināšanai. *CLT* plāksnes režģa izveidei tiek lietota Hex tipa galīgo elementu metode (kubi ar izmēriem $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$). Respektīvi, visas *CLT* plāksnes tiek aizstātas ar maziem 2 mm izmēra kubiem, kur kopējais skaits tika izvēlēts tā, lai iegūtu stabilu modeļa konvergenci jeb tas ir kompromiss starp solvera (*Autodyn*) darbības laiku un kvalitāti. Savukārt, 9 mm lodei tiek lietots trijstūra piramīdu galīgo elementu režģis, kas ir vairāk piemērots lodes ovālās formas veidošanai. Lodes režģa kvalitāte tās formas dēļ tika vairākkārt pārskatīta, lai novērstu ļoti mazu režģa elementu klātbūtni, kas būtiski ietekmē risinājuma atrašanās (t.i. simulācijas) laiku. Kopējais elementu skaits tika izvēlēts virs 150 000, kā labākais kompromiss starp procesa simulācijas laiku un precizitāti. Lodes un *CLT* plāksnes galīgo elementu režģis *Ansys* vidē redzams 2.4. attēlā.



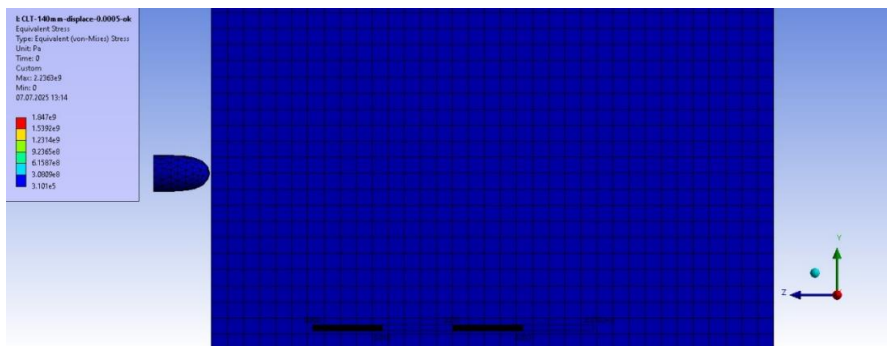
2.4. att. Lodes un CLT plāksnes galīgo elementu režģis *Ansys* vidē.

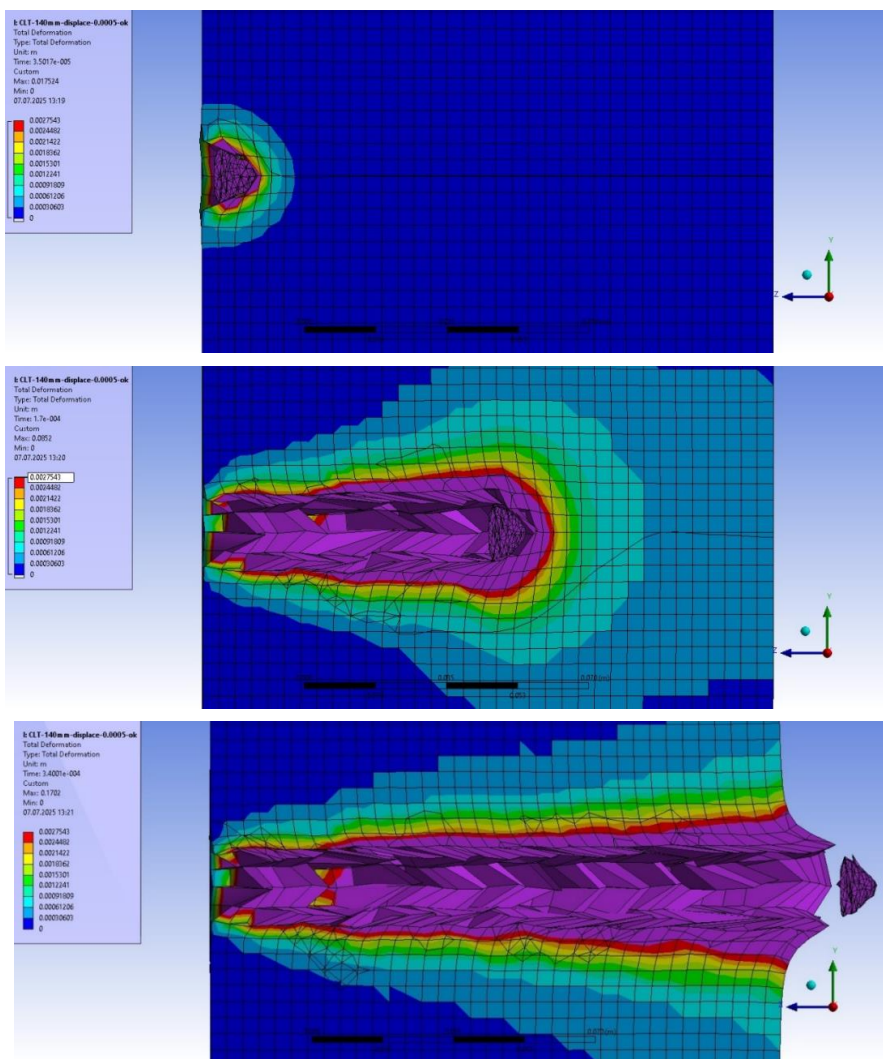
Modelis iesākumā netiek pakļauts sākotnējiem stresiem vai deformēts. Vairums *Ansys* analīzes nosacījumi tiek atstāti negrozīti. Manuāli norādīts ir simulācijas laiks 0,0004 sekundes un lodes sākuma lidojuma ātrums 345 m/s. Tiek fiksēts CLT plākšņu atbalsts (*Fixed Support*) visās sānu sienās. Lidojuma laikā lode tiek arī iegriezta, kā tas notiek realitātē, jo ieroča stobrā pēc noklusējuma ir vītne. Tas nodrošina lodei taisnu lidojuma trajektoriju. Simulācijas rezultātos, kā interesējošie lielumi tiek apskatītai materiāla elastīgā deformācija (*Equivalent Elastic Strain*) un ekvivalentais spriegums (*Equivalent von-Mises Stress*). Tika simulēta 9 mm lodes mijiedarbība ar C100 un C140 materiāliem. 2.5.–2.7. attēlā redzami iegūtie rezultāti.



2.5. att. Lodes un CLT materiāla ekvivalentais spriegums C100 materiālā (šķērsgriezums).

Lode ieurbjas CLT materiālā un iziet tam cauri atstājot lodes ceļu.





2.6. att. Lodes iebūšanās C140 materiālā un tā caursīšana. Redzams, ka lode ir deformēta.

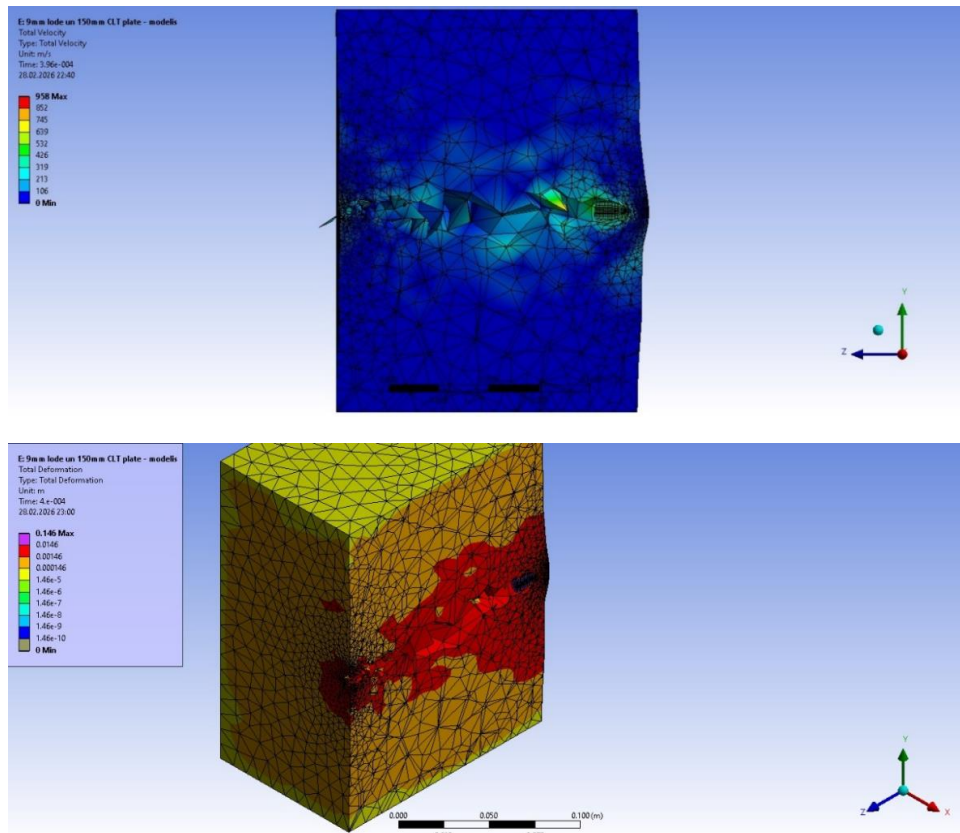
Simulācijas rezultāti dod ieskatu slodzēs, kādām ir pakļauts *CLT* materiāls, kad tajā iebūjas lode. C100 paraugam lode iziet cauri, kā tas tika novērots eksperimentāli. Lai arī lodes ieejas izmērs ir mazs, tās trieciens materiāla vietā izraisa ievērojamu šoka vilni pār ievērojamu pārējo materiāla daļu, kas vairākkārtīgi pārsniedz lodes izmēru. Lodes ceļā ir arī visai ievērojama materiāla destrukcija un galīgo (režģa) elementu izkropļojums. Lodei izejot no materiāla, tā bojājums ir izvirzīts izejas virzienā, kas sakrīt ar eksperimentāli novēroto.

C140 materiālam lode iziet cauri. Lai arī lodes ieejas izmērs ir mazs, tās trieciens materiāla vietā izraisa šoka vilni pār ievērojamu materiāla daļu, kas vairākkārtīgi pārsniedz lodes izmēru. Spriežot pēc simulācijas rezultāta, *CLT* materiāls šāda trieciena rezultātā tiek bojāts vairāk nekā lodes ieejas laukuma zonā, tāpēc blakus sekojošu ložu kūlis iespējams spētu aizklāt arvien tālāk.

Secinājums ir tāds, ka 9 mm lodī ne 100 mm, ne 140 mm *CLT* no 8 m šāvienu attāluma nespēj aizturēt. Tas sakrīt ar eksperimentāliem rezultātiem. Šos paneļus varētu izmantot kombinācijās ar citiem materiāliem (speciālo ģipša plāksni *Torro*, *UHMWPE* vai citiem)

pārvietojamu ēku norobežojošo sienu vajadzībām, kur pastāv risks, kad pret tām varētu tikt atklāta uguns ar šāda tipa lodēm. Tika secināts, ka ar skaitlisko modeli var pietiekami precīzi (90 %) prognozēt *CLT* materiāla uzvedību lodes ietekmē.

2.7. attēlā redzama lodes darbība *C150* materiālā. Lode apstājas tieši pirms izejas 146 mm dziļumā, kas sakrīt ar eksperimenta datiem.



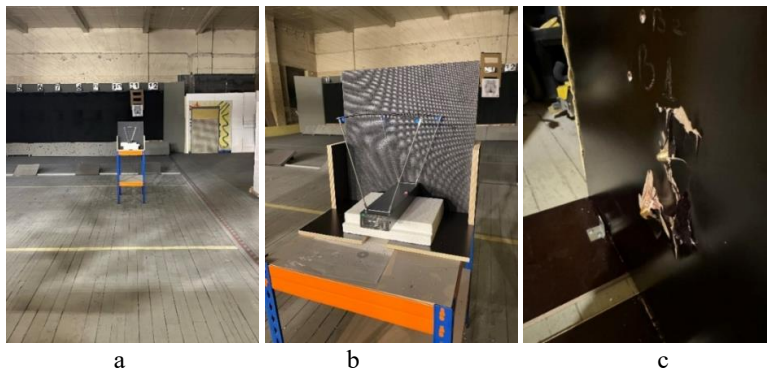
2.7. att. Lodes ieuršanās *C150* materiālā un tā caursīšana. Redzama materiāla deformēšanās. *C150* materiālā lode apstājas tieši pirms izejas.

Paraugu modelēšana *Ansys Workbench* programmatūrā atkārtoja eksperimentu rezultātus. Tikai minimāli 150 mm bieza *CLT* siena spēj apstādināt lodi.

2.2.2. Saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Eksperimentāli šautuvē tika testēts 27 mm biezs laminēts vienas plātnes bērza LF-CPR/CE-DoP-01 – Riga ® AS “Latvijas Finieris” ražots saplākšnis (19 finiera kārtas, līme – formaldehīds), saliktas divas un trīs vienkārši savienotas plātnes. Lai arī saplākšņa pārbaudes tika daļēji veiktas preliminārajos eksperimentos, tomēr tagad uzmanība tiek pievērsta velosimetra rādījumiem. Pētījuma uzdevums – noteikt atlikušo (*residual*) lodes ātrumu, lādiņam izejot no mērķa materiāla, vai lodes apstāšanās vietu un atbilstošo caursīšanas dziļumu gadījumā, ja saplākšņa ballistikā pretestība pārvar lodes kinētisko enerģiju. Saplākšņa reālais

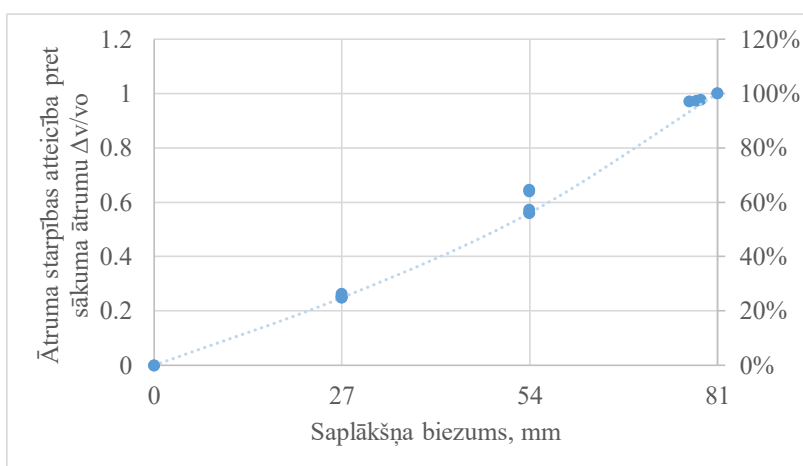
blīvums ir 770 kg/m^3 , mitrums 5,0 %. Paraugu izmēri ir kvadrāta formā $(500 \pm 5) \text{ mm} \times (500 \pm 5) \text{ mm}$, kā to nosaka *EN 1063* standarts. Testējamie paraugi tika brīvi iestiprināti rāmī, lai nepieļautu ballistiskā trieciena papildus ietekmi (izkustēšanos) uz mērķa materiālu. Eksperimenta telpas apstākļi sakrita ar 2.2. apakšnodaļā aprakstītajiem apstākļiem (temperatūra $+10,4 \text{ }^\circ\text{C}$, mitrums 72 %), jo eksperimenti notika secīgi.



2.8. att. Eksperiments šautuvē (a), ātruma mērītājs jeb velosimētrs novietots pirms parauga (b), lodes iestrēgšana trešajā saplākšņa plātnē (c).

2.8. attēlā redzama eksperimenta norise šautuvē. 2.8. a attēlā redzams šaušanas attālums līdz mērķa paraugam (8,315 metri), un 2.8. b attēlā redzams ātruma mērītājs jeb velosimētrs materiālā ieejošās lodes ātruma noteikšanai, 2.8. c attēlā – ložu deformētais saplākšnis. Deformācijas ir relatīvi nelielas. Plaisas vērojamas galvenokārt laminētajā ārējā slānī. Saplākšnim veidojas neregulāras formas šķembas krustenisko slāņu dēļ. Koksne parasti lūzt gar šķiedru, šķiedru virzienā. Šķembas izplatās no lodes iziešanas punkta uz āru lodes ceļa virzienā, visbiežāk ārpusē veidojot nelīdzenu lūzuma “konusu”, kas ir viegli saskatāms.

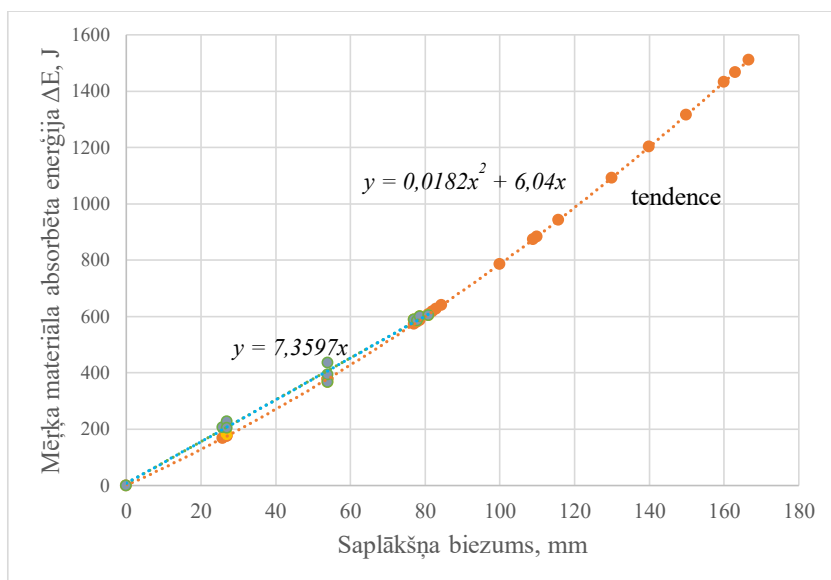
Viena saplākšņa plātne samazināja lodes ātrumu vidēji par 85,8 m/s, kas ir nepilni 25 % no lodes sākuma ātruma 345,1 m/s un tikai 32 % no nepieciešamās kinētiskās enerģijas, lai atbilstu BR2 klasei. Lode izgāja plāksnei cauri, kas bija vērojams arī pirmreizējās pārbaudēs.



2.9. att. Saplākšņa materiāla absorbētās ātruma starpības pret lodes sākuma ātrumu attiecība atkarībā no materiāla biezuma.

Divas kopā saliktas plātnes samazināja lodes ātrumu vidēji 204,4 m/s, kas ir 57 % no ātruma 339,7 m/s, ar kādu lode iedarbojās uz materiālu pirms caursišanas, un 59 % no slāpējamās enerģijas (BR2 klase). Tas arī bija paredzams, jo pirmā testa rezultāti un aprēķini (2.1. apakšodaļa) parādīja viennozīmīgu divu plākšņu nespēju pretoties lodei. 2.9. attēlā redzami testēšanas rezultāti.

Eksperimentāli pārbaudot trīs plātnes jeb $3 \times 27 \text{ mm} = 81 \text{ mm}$ saplāksni, lodes iestrēga trešajā plāksnē, kā redzams 2.8. c attēlā, radot caursišanas dziļumu 79 mm, kas ir 72 % no nepieciešamās kinētiskās enerģijas (lodes masa ir 8 g). Tā kā lodes sākuma ātrums nesakrīt ar maksimāli novērtēto BR2 aizsardzības klasei, tad pēc empīriskiem datiem (2.10. attēla grafiks) tika noteikts, ka 84,5 mm biezs saplāksnis garantēti atbilstu BR2 aizsardzības klasei. Grafikā var novērot otrās pakāpes polinoma sakarības. Kvadrātiskā locekļa klātbūtne rāda, ka, palielinoties saplākšņa biezumam, lodes ātruma zudums pieaug arvien straujāk jeb materiāls absorbē arvien vairāk trieciena impulsa.



2.10. att. Saplākšņa materiāla absorbētā enerģija atkarībā no materiāla biezuma. Zaļā krāsā – eksperimentu rezultāti. Oranžā taisne – ekstrapolēta tendence.

Tātad rezultāti sakrīt ar teorētiskajiem – 81 mm biezs saplāksnis aptur lodi, kuras ieiešanas ātrums ir 340,5 m/s. Taču ir jāņem vērā dažādi aizsardzības kritēriji – pēc viena aizsardzības kritērija šāds saplākšņa biezums nodrošina lodes apturēšanu, savukārt pēc cita – nenodrošina. Ņemot vērā, ka BR2 klases maksimālais lodes sākuma ātrums ir 400 m/s un lodes masa ir 8,0 grami, kas veido 640 J enerģijas, ir nepieciešams 87 mm biezs saplāksnis, lai apturētu lodi. Ja jebkura saplākšņa biezuma plātne, kas mazāka par 87 mm, savieno ar, piemēram, *Kevlar* slāņu plātne, *UHMWPE*, speciālā ģipša plāksnēm vai starp plātnēm ir gaisa spraugas, tad no grafika var nolasīt šī slāņa potenciālo enerģijas absorbēšanas spēju. Grafiku turpinājuma tendenci biežākiem saplākšņa paraugiem var iegūt ar ekstrapolācijas palīdzību.

Zinātniskajā pētījumā zinātnieki *Koene* un *Willemsen* [57] pēc *Ponceleta* formulas, kad mērķa materiālam saplāksnim Janka cietība ir 5,01 kN, mitrums 12,7 % un blīvums 682 kg/m³, pie iestatītā saplākšņa iekšējā sprieguma koeficienta $\alpha = (0,0167 \pm 0,0040) \text{ kg/m}$ un materiāla

stiprības parametra $\beta = (5053 \pm 200) \text{ kg} \times \text{m/s}^2$, var iegūt caursišanas dziļumu $P = (77,7 \pm 23,4) \text{ mm}$. Absolutā kļūda iegūta netiešās kļūdas aprēķina ceļā. Šī novirze ir 30 % liela. Līdz ar to P iespējamais diapazons ir $(54,3 \text{ mm} \div 101,1 \text{ mm})$, kas ir ļoti plašs rezultātu intervāls. Tāpēc būtu lietderīgi atrast šos formulas parametrus precīzākam caursišanas dziļumam.

Pamatojoties uz iegūtajiem datiem par patērēto kinētisko enerģiju konkrētam saplākšņa biezumam, no grafika (2.10. att.) tika nolasīts minimāli nepieciešamais biezums (2.10. tab.) katrai aizsardzības klasei (pēc *EN 1063*). Tas bija attiecīgi BR1 ÷ BR4 klasēm 26 mm, 85 mm, 122 mm un 167 mm. Izmantojot Ponceleta formulu, tika iegūti materiāla stiprības parametri β katrai aizsardzības klasei. Dotais ložu sākuma ātrums un lodes masa ir noteikta pēc *EN 1063* standarta. Sākuma ātrums BR2 klasei atšķiras no eksperimentāli pētītā maksimālā 345,1 m/s. Redzams, ka lodes masai ir būtiska nozīme caursišanas dziļuma noteikšanai. Iegūtajiem caursišanas dziļumiem būtu jāpiemēro arī drošības kritērijs, palielinot saplākšņa slāņu skaitu.

Izmantojot 1.10. formulu, tiek noteikta materiāla šķietamā dinamiskā stiprība R_t , MPa. Tātad empīriskā ceļā ir iegūta bērza saplākšņa šķietami dinamiskā stiprība atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm ir 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa, kas ļauj ar Ponceleta formulas palīdzību aprēķināt jebkura biezuma saplākšņa lodes caursišanas dziļumu. BR1 ir vājāka (mazjaudas pistole), tāpēc tā šķietamā dinamiskā pretestība ir krasi atšķirīga.

Aprēķina rezultāti apkopoti 2.10. tabulā.

2.10. tabula

Lodes un saplākšņa raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klase	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	m , g	v_0 , m/s	E , J	C	d , mm	A , m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P , mm	β , kg $\times$ m/s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	$2,46 \times 10^{-5}$	770	0,0067	26	6082	238,46	1,04
BR2	8,0	400	640	0,342	9,0	$6,36 \times 10^{-5}$	770	0,0167	84,5	6313	99,29	0,45
BR3	10,2	430	943	0,34	9,0	$6,36 \times 10^{-5}$	770	0,0167	122	6284	98,84	0,65
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	$9,33 \times 10^{-5}$	770	0,0212	167	7167	76,85	0,68

Šie šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehnisko datu literatūras dati saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem.

Pēc *UFC* standarta piedāvātās formulas, šeit 1.51. formula, pielīdzinot bērza saplākšņa cietību 2205 lbf (9,828 kN), caursišanas dziļums BR2 aizsardzības klasei tika noteikts 82,4 mm, kas ir nedaudz mazāk nekā noteikts eksperimentāli 84,5 mm. Lai arī prognoze ir 3 % robežās, tomēr šī formula ir vairāk paredzēta tērauda mērķiem.

Ponceleta modeļa parametru optimizācija ($\alpha = 0,0153 \text{ kg/m}$; $\beta = 5874 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu nosacīto ekstrēmu 80,5 mm, ar augstu modeļa ticamību (aproximācijas kļūda 0,011 %). Optimizācija *Ponceleta* formulai parādīja nosacīto ekstrēmu.

Pētījuma rezultāti apstiprina, ka bērza saplākšnis ir nosacīti prognozējams, modelējams un kvantitatīvi raksturojams ballistisks materiāls, kura pretložu aizsardzību var matemātiski aprakstīt un izmantot praktisku sienu konstrukciju projektēšanā.

2.3. Kopsavilkums

1. Salīdzinot eksperimentālos rezultātus ar *Ponceleta* formulas teorētiskajiem, tika secināts, ka ir jāprecizē no materiāla atkarīgie parametri. Atrastie parametri palīdzētu noteikt maksimālo caursišanas dziļumu jeb minimālo sienas biezumu *CLT* un bērsa saplākšņa materiāliem cita ieroča lodes ātruma un lodes masas gadījumā: BR1–BR4 aizsardzības klase; 330–450 m/s, 2,5–15,7 g. Egles *CLT* un bērsa saplākšņa ballistisko raksturojumu datubāzei tiek pievienoti jauni parametri.

2. Eksperimentālo datu apstrāde. Eksperimentāli noteikts, ka **CLT paneļiem**:

- eksperimentālie dati parādīja, ka atbilstoši *EN 1063* minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 – 60 mm, BR2 – 180 mm (176 mm), BR3 un BR4 – 200 mm (185 mm un 199 mm);
- precizēti eksperimentā iegūtie *Ponceleta* formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *CLT* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 100,24 MPa, 45,48 MPa, 66,70 MPa un 68,93 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *CLT* paneļu ballistiskās veiktspējas modelēšanā;
- skaitliskā modelēšana (*Ansys Explicit Dynamics*) sprieguma analīze parādīja, ka lode caursit 100 mm un 140 mm *CLT* un apstājas pirms 150 mm, kas saskan ar eksperimentu.

Saplākšņa paraugiem:

- mazākais saplākšņa biezuma, lai aizturētu aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 26 mm, BR2 – 85 mm, BR3 – 122 mm, BR4 – 167 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti *Ponceleta* formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta bērsa saplākšņa šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko literatūru un izmantojami saplākšņa ballistiskās veiktspējas modelēšanā.
3. Empīrisko datu lietojums aizsardzības klašu noteikšanai. Pamatojoties uz *EN 1063*, noteikts minimālais ložudrošais biezums katram materiālam (2.11. tab.):

2.11. tabula

Materiālu minimālo biezumu salīdzinājums savā starpā un starp klasēm

Aizsardzības klase	Lodes masa (<i>EN 1063</i>), g	Ātrums, m/s	<i>CLT</i> min. biezums, mm	Saplākšņa min. biezums, mm	Biezuma atšķirība, %
BR1	2,6	360	60	26	57
BR2	8,0	400	176 (~180)	85	52
BR3	10,2	430	185 (~200)	122	34
BR4	15,6	440	199 (~200)	167	16

BR1 un BR2 aizsardzības klasēm bērsa saplākšnis uzrāda par 54% augstāku ballistisko efektivitāti nekā *CLT*. Savukārt BR1 līdz BR4 klasēm – par 40 %. Tā kā atšķirība efektivitātē samazinās, tad jāsecina, ka būtu jāveic papildu pētījumi tieši BR3 un BR4 klasēm, lai precizāk noteiktu minimālo materiāla biezumu un tiktu pierādīta šī vai cita tendence. Tas nodrošina teorētisko un eksperimentālo pamatu metodoloģijas izveidei par minimālo sienas biezumu.

4. Racionālo parametru noteikšana jeb optimizācija BR2 klasei:

CLT materiālam (α , β) $\alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$ $\beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$

Nosacītais optimālais caursišanas dziļums $P = 140,1 \text{ mm}$.

Saplākšņa materiālam $\alpha = 0,0167 \text{ kg/m}$ $\beta = 5874 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$

Nosacītais optimālais caursišanas dziļums $P = 80,5 \text{ mm}$.

3. METODOLOĢIJA BALLISTISKĀS PRETESTĪBAS NOVĒRTĒŠANAI

Lai nodrošinātu pētījuma validitāti un atbilstību mērījumu standartiem, izstrādāta pētījuma metodoloģija. Vispārīgajā ballistikas eksperimenta metodoloģijā svarīgākie posmi ir pētījuma koncepta izstrāde, pamatojoties uz teorētiskās literatūras analīzi, eksperimentālo datu iegūšana, rezultātu analīze, verifikācija un datu pielāgošana datu aprobācijai.

Metodoloģijas kopsavilkums veikts, balstoties apskatītajā zinātniskajā literatūrā, īpaši ņemti vērā *K. Sanborn*, *L. Koene* un *M. T. Lo Ricco* zinātniskie darbi. Metodoloģijas sistēmā izmantota kvalitatīvā metode, kurā izklāstīti pieci punkti, kas parāda pētījuma veikšanas soļus – kāds ir minimāli nepieciešamais sienas biezums *CLT* un bērsa saplākšņa sienai atkarībā no nepieciešamās aizsardzības klases BR1 un BR2 saskaņā ar *EN 1063* standartu.

Vispārīgā metodoloģija eksperimentālam darbam tiek iedalīta piecos posmos:

1. daļa ir teorētiskā daļa, kas ietver literatūras analīzi par esošajām ložu drošajām sienām, zinātniskiem atklājumiem, salīdzinājumu, un to teorētisko modeļu pielāgošanu.

2. daļa ir eksperimentālā daļa, kas ietver mērķa materiāla izvēli (mērķa materiāla koka suga, blīvums, biezums, šķiedru orientācija, mitruma saturs, cietība, līmēto materiālu slāņu skaits, slāņu biezums, līmes veids), paraugu sagatavošanu standartu izmērā, ieroču un munīcijas izvēli atkarībā no eksperimenta mērķa, testa apstākļu definēšanu (šaušanas modeļa izkārtojums, stenda izvietojums, stenda balsti, ložu uztveršanas siena, šāvienu skaits), tehnisko nodrošinājumu (lodes ātruma mērījumi, izmantojot hronogrāfu jeb velosimetru sākuma ātruma un izejošā ātruma noteikšanai pirms un pēc parauga, liela ātruma fiksēšanas kameras, kas dokumentē lodes un mērķa triecienu, deformāciju, fragmentāciju). Caursišanas dziļuma mērīšanai un lodes deformēšanās (fragmentu skaits, izmērs, trāpījumu skaits), kanāla diametra, šķembu noteikšanai tiek izmantota radiogrāfijas un vizualizācijas metode. Papildu aprīkojums: lāzerskenēšana, akustiskie impulsu sensori un mērījumu veikšana, kā arī drošības nodrošinājums (sertificēta šautuve, personāla un eksperimenta dalībnieku drošības instrukcija, legāla munīcija, šaušanas atļaujas). Testēšanas apstākļus pilnībā vai daļēji nosaka ballistikie standarti *EN 1063*, *EN 1522/DIN EN 1522*; *EN 1523/DIN EN 1523*; *BS 5051*; *UL 752*; *ASTM F1233-08*; *NIJ Standard-0108.01*; dokuments *UFC 4-023-07*.

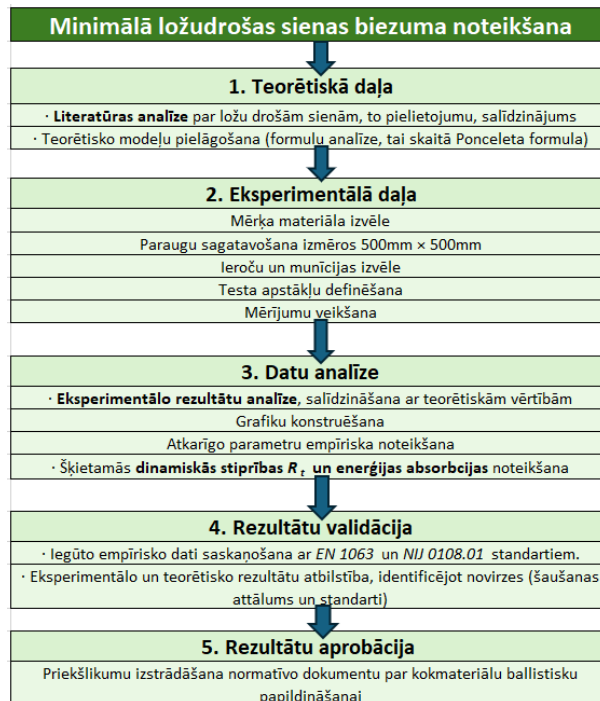
3. daļa ir eksperimentālo datu analīze (ātrums, enerģija), kas ataino testa rezultātus, un tie tiek salīdzināti ar teorētiskajām vērtībām, konstruēti grafiki, empīriskā ceļā noteikti atkarīgie parametri. Noteiktas vidējās vērtības, ticamības intervāli.

4. daļā notiek rezultātu validācija – pārbaude, vai iegūtie dati saskan ar standartiem un teorētiskajiem modeļiem, identificējot atkāpes no reglamenta.

5. daļa ir rezultātu aprobācija – priekšlikumu izstrādāšana normatīvo dokumentu papildināšanai ballistikas jomā.

Metodoloģijas algoritma shēma redzama 3.1. attēlā.

Tālāk aprakstīts ballistikas jomas tiešāks metodoloģijas izklāsts, kurā parādīts, kā praktiski piemērot ballistikas eksperimentus caursišanas dziļuma un parametru noteikšanai, esošie ierobežojumi un pieņēmumi. Metodoloģija balstās materiālu mehānisko īpašību analīzē, trieciena kinētiskās enerģijas starpībā un empīriskā sakarībā starp koksnes blīvumu, lādiņa parametriem un trieciena izraisīto caursaušanas dziļumu. Lai pārbaudītu metodoloģijas precizitāti, tika veikta eksperimentālo rezultātu salīdzināšana ar *EN 1063* standartā noteiktajām robežvērtībām aizsardzības klasēm BR1 un BR2 un izteikta tendence BR3, BR4 klasēm.



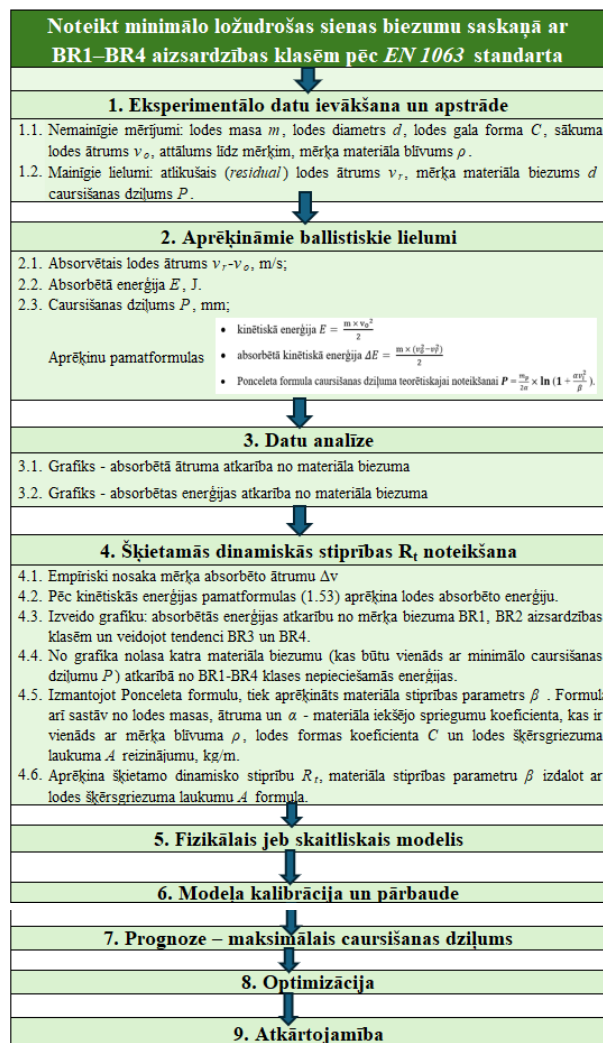
3.1. att. Metodoloģijas vispārīgais algoritms.

Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt nepieciešamo koksnies sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālos ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ložudrošu ēku projektēšanas laiku. Šajā darbā redzama integrētā eksperimentāli-analītiskā un skaitliskā pieeja *CLT* un saplākšņa paneļu ballistiskās izturības izpēte, kas dod reālu eksperimentālo datus sasaisti ar teorētiskiem un skaitliskiem modeļiem.

Metodoloģijas praktiskajā daļā aprēķini veikti, izmantojot eksperimentāli noteiktus materiāla parametrus. Par eksperimentālo klasifikācijas bāzi ir izvēlēta tuvināta BR2 aizsardzības klase, pēc kuras datiem tiek pāriets uz pārējām klasēm, ņemot vērā citas klases trieciena kinētisko enerģiju, ko nosaka lodes masas un sākuma maksimālā ātruma standartizēti lielumi. Iegūtie aprēķinu rezultāti ir salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem metodoloģijas precizitātes validācijai. Salīdzinājums pierāda, ka piedāvātā metodoloģija ļauj ar pietiekamu ticamību prognozēt līmētas koksnies sienas biezumu aizsardzības klasēm BR1 un BR2 un tendenci BR3, BR4 klasēm pēc *EN 1063* standarta.

3.2. attēlā dots metodoloģijas grafisks attēlojums.

Metodoloģija apvieno eksperimentāli iegūtos datus ar teorētisko modelēšanu, izmantojot Ponceleta formulu, absorbēto enerģiju un galīgo elementu metodi. Tālāk uzskaitīti metodoloģijas posmi (eksperimentālo datus iegūšana, aprēķināmie ballistikas lielumi, datu analīze, šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode, fizikālais jeb skaitliskais modelis, modeļa kalibrācija un pārbaude, prognoze, optimizācija, atkārtojamība) un detalizētāks to skaidrojums.



3.2. att. Metodoloģijas grafisks attēlojums.

1. Eksperimentālo datu iegūšana.

1.1. Vispirms tiek noteikti nemainīgie lielumi un mērījumi: lodes masa m , lodes diametrs, lodes gala forma C , lodes sākuma ātrums v_0 , attālums līdz mērķim, mērķa materiāla blīvums ρ .

1.2. Mainīgie lielumi: mērķa materiāla biezums, atlikušais (*residual*) lodes ātrums v_r pēc tam, kad lode ir izgājusi no mērķa parauga, lodes caursišanas dziļums P .

1.3. Skaitliskā vienība tiek noteikta starptautiskajā SI mērvienību sistēmā (kg, m, s, J)

1.4. Katrs lodes trāpījums tiek atzīmēts uz mērķa parauga un fiksēts fotogrāfijā.

1.5. Izmērīts lodes ātrums pirms un pēc trieciena mērķa materiālā.

2. Aprēķināmie ballistikas lielumi.

2.1. Absorbētais lodes ātrums Δv , m/s - atlikušā ātruma un sākuma ātruma starpība;

2.2. Absorbētā kinētiskā enerģija ΔE , J tiek iegūta no atlikušā ātruma kvadrāta un sākuma ātruma kvadrāta starpības un masas reizinājuma puses.

2.3. Caursišanas dziļums P , mm tiek izmērīts ar nelokāmu stieplīti un rokas lineālu;

2.4. Fizikālā modelēšana jeb aprēķinu pamatformulas:

- kinētiskā enerģija $E = \frac{m \times v_0^2}{2}$
- absorbētā kinētiskā enerģija $\Delta E = \frac{m \times (v_0^2 - v_r^2)}{2}$
- Ponceleta formula caursišanas dziļuma teorētiskajai noteikšanai $P = \frac{m_p}{2\alpha} \times \ln \left(1 + \frac{\alpha v^2}{\beta} \right)$.

3. Datu analīze.

3.1. Izveidotas tabulas un grafiki ar iegūtajiem datiem.

3.2. Aprakstīti novērojumi, tendences un prognozes par ietekmējošiem faktoriem.

4. Šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode.

4.1. Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātrums $\Delta v = v_r - v_0$.

4.2. Eksperimentu ceļā tiek noteikts mērķa absorbētais ātruma kvadrāts $v_r^2 - v_0^2$.

4.3. Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas (1.53. formula) tiek aprēķināta lodes absorbētā enerģija.

4.4. Izveidots grafiks absorbētās enerģijas atkarība no mērķa biezuma BR1, BR2 aizsardzības klasēm, veidojot tendenci aizsardzības klasēm BR3 un BR4.

4.5. No grafika tiek nolasīts katra materiāla biezums (kas būtu vienāds ar minimālo caursišanas dziļumu P) atkarībā no BR1–BR4 klasei nepieciešamās enerģijas.

4.6. Izmantojot Ponceleta formulu (1.8. formula), tiek aprēķināts materiāla stiprības parametrs β .

4.7. Tiek aprēķināta šķietamā dinamiskā stiprība R_t , materiāla stiprības parametru β izdalot ar lodes šķērsgriezuma laukumu A (1.10. formula).

5. Skaitliskais modelis tiek veidots ar galīgo elementu metodes palīdzību, izmantojot *Ansys Workbench* programmatūru *ANSYS 2023R2* un *Explicit Dynamics* galīgo elementu risināšanas moduli, līdzīgi kā *LS-Dyna*, liela trieciena ātruma īsa laika sadursmju modelēšanā.

6. Modeļa kalibrācija un pārbaude. Eksperimentāli iegūto caursišanas dziļumu salīdzinājums ar teorētiski noteiktajiem.

7. Prognoze – maksimālais caursišanas dziļums.

8. Optimizācijas uzdevuma atrisināšana, kas ļauj noteikt optimālo caursišanas dziļumu un modelēt robežvērtības, kas padara darbu metodoloģiski pārāku un praktiski lietojamāku.

9. Atkārtotamība. Atkārtojumu skaits ir 3–5 šāvienī.

Šaušanu un drošības pārraudzību šautuvē veic kompetentas personas. Pirms šaušanas notiek stobra un munīcijas pārbaude un atbilstība drošības standartiem. Šaušanas zonā atrodas tikai šāvējs. Lodes ceļa telpa tiek nodalīta. Novērotāji lieto trokšņa slāpētājus (austiņas).

Atšķirībā no citiem starptautiskiem pētījumiem šī metodoloģija ir uzlabota, jo tā sniedz eksperimentāli pārbaudītus, praktiski izmantojamus datus un rezultātus *CLT* un saplākšņa ballistisku sienu konstrukciju projektēšanai un parāda teorētisku un skaitlisku modeļu validāciju ar empīriskajiem rezultātiem. Tādējādi darba zinātniskā aktualitāte parādās metodoloģijas praktiskajā lietojamībā, integritātē un eksperimentāli – skaitliskajā precizitātē, kas kopā ļauj prognozēt un optimizēt līmētu kokmateriālu aizsargkonstrukciju reakciju dažādos aizsardzības līmeņos. Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt līmēta kokmateriāla paneļu ballistisko veiktspēju, kas ir izmantojama aizsargsienu projektēšanā.

4. METODOLOĢIJAS PIELĀGOŠANA

Tālāk parādīts praktisks piemērs ar izejas datiem un ballistisku risinājumu kokmateriālu sienas izmantošanai.

Izejas dati

Itālijas pilsētā Varnā tiek projektēts policijas iecirknis, izmantojot *CLT* kokmateriālus. Pasūtītājs iecirkņa telpās izvēlas konkrētas ballistiski aizsargātas sienas, piemēram, īslaicīgas izolācijas istabā. Atbildīgais inženieris piedāvā 140 mm *CLT* un 27 mm saplākšņa paneļu kombināciju. Vai šāda siena būs ballistiski izturīga? Un – vai ir svarīga materiālu secība, kādā aizsargsiena ir ar lielāku vai mazāku ballistisko pretestību?

Papildu dati

Zināms, ka policistu ieroči ir .44 *Remington Magnum* ieroči jeb BR4 klases pēc *EN 1063* standarta. Tas nozīmē, ka, atšķirībā no promocijas darba eksperimentālās daļas, kurā izmantota BR2 klase (lodes masa 8 g, lodes sākuma ātrums 340 m/s), šajā gadījumā lodes masa ir 15,6 g un lodes sākuma ātrums 440 m/s. Lodes masas un sākuma ātruma salīdzinājums starp klasēm apkopots 4.1. tabulā. Šajā gadījumā ir jāaizsargājas pret gandrīz divas reizes smagāku lādiņu un par 99 m/s lielāku lodes sākuma ātrumu, kas veido par 870 džouliem jeb 2,36 reizes lielāku sākuma kinētisko enerģiju. Lai gan siltumizolācijas materiālu integrēšana sienu konstrukcijās palielina sistēmas kopējo ballistisko pretestību, tipiski ekspluatācijā lietotā slāņu biezuma gadījumā šī ietekme ir sekundāra. Detalizēta šī faktora izpēte prasītu atsevišķu eksperimentālu pieeju, kas pārsniedz šī promocijas darba pētījuma ietvaru.

4.1. tabula

Lodes masas un sākuma ātruma salīdzinājums starp klasēm

	Lodes masa <i>m</i> , g	Lodes sākuma ātrums <i>v₀</i> , m/s	Sākuma kinētiskā enerģija <i>E</i> , J
BR2	8	400 ± 10	640
BR4	15,6	440 ± 10	1510
Starpība	7,6	99	870
Palielinājums, reizes	1,95	1,29	2,36

Jautājums – vai iegūtie dati palīdz aprēķināt *CLT* un saplākšņa sienas minimālo biezumu, lai siena spētu pretoties nejaušai vai tīšai lodei?

Problēmas risinājums:

1) **Pirmais risinājums** – 140 mm *CLT* un 27 mm saplākšņa paneļu kombinācija.

Pēc iegūtajiem eksperimentālajiem datiem lodei 27 mm biezs saplāksnis aiztur 204 J kinētiskās enerģijas, savukārt 140 mm biezs *CLT* garantēti absorbē 370 J. Līdz ar to 27 mm biezs saplāksnis + *CLT* 140 mm aiztur tikai 574 J. Tas pasaka, ka izvēlētais risinājums aizturētu tikai 38 % no nepieciešamās enerģijas, redzams 4.2. tabulā.

Pirmā risinājuma apskats

Materiāls	Biezums, mm	Aizturētā enerģija pēc empīriskajiem datiem ΔE , J	Procenti no nepieciešamās 1511 J aizturētās enerģijas
<i>CLT</i>	140	370	24,5 %
Saplāksnis	27	204	13,5 %
Summā	167	574	38 %

2) **Otrais risinājums** – kāda būtu optimālākā *CLT* un saplākšņa kombinācija?

Pēc Ponceleta formulas un darbā noteiktajiem empīriskajiem rezultātiem tiek noteikts, ka 180 mm *CLT* + trīs plāksnes jeb 81 mm saplākšņa aiztur 1374 J lielu enerģiju, kas vēl ir nepietiekama, kā redzams 4.3. tabulā.

4.3. tabula

Otrā risinājuma apskats

Materiāls	Biezums, mm	Aizturētā enerģija pēc empīriskajiem datiem ΔE , J	Procenti no nepieciešamās 1511 J aizturētās enerģijas
<i>CLT</i>	180	770	50,1 %
Saplāksnis	81 (3 × 27)	604	40,0 %
Summā	261	1374	90,1 %

<i>CLT</i>	200	1511	100 %
Saplāksnis	167 (~6 × 28)	1511	100 %

Pēc aprēķiniem ir skaidrs, ka lietderīgi ir apsvērt iespēju izmantot 200 mm biezu *CLT* sienu vai 167 mm saplāksni, bez to kombinācijas, lai aizsargsiena spētu apturēt BR4 aizsardzības klases spēcīgākos ieročus.

3) **Trešais risinājums** – izmantot 180 mm biezu *CLT* paneli un pastiprināt to ar *Knauf Torro* vai *Knauf Diamant* plātnēm.

180 mm *CLT* šādā gadījumā aizsargātu tikai 770 enerģijas vienības jeb 50,1 % no visas nepieciešamās enerģijas. Tātad pilnīgi noteikti nepieciešamas papildu ballistikas plāksnes, lai nodrošinātu ēkas lietotāju fizisku un psiholoģisku komfortu. Vairāk informācijas par *Knauf Torro* vai *Knauf Diamant* plātnēm autores darbā E. Barone, R. Vetra, B. Gaujena, and M. Vilnitis, “*Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing*” [37], kurā aprakstīts, ka 28 mm *Torro* ģipškartona plāksne vien spēj absorbēt 9 mm lodi un absorbēt sākotnējo ātrumu 338 m/s. Ballistikas standartu ražotājs *Knauf Torro* plāksni ir testējis ar .44 *Remington Magnum* (ātrums 430–450 m/s), apstiprinot EN 1063 standartā noteikto BR4 rādītāju.

5. PĒTĪJUMI DAUDZSLĀŅU SIENU BALLISTIKĀ

Iepriekš izstrādātā metodoloģiju ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt pamatodus secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistikās pretestības raksturlielumiem. Metodoloģija balstās atsevišķu slāņu enerģijas absorbcijas noteikšanā un enerģijas bilances lietošanā. Piedāvātas kompozītmateriāla aizsardzības risinājumi, piemēram, daudzslāņu sienas *CLT-Kevlar*-siltumizolācija un saplāksnis-*UHMWPE* potenciāli uzlabotu moduļveida ēku konstrukciju ballistisko izturību un samazinātu ēkas svaru. Analīze parāda, ka metodoloģijas lietošana ir precīzāka tādām sienām, kas sastāv no diviem dažādiem slāņiem, nevis trīs un vairāk. Divu materiālu gadījumā enerģijas starpības metode precīzāk parāda parauga ballistisko parametru iegūšanu, jo samazinās savstarpējās ietekmes un kumulatīvās kļūdas efekts. Eksperimentāli testētas *CLT* un saplākšņa sienu konstrukcijas un noslēgumā teorētiski salīdzinātas astoņas ballistikās sienas, ņemot vērā trīs 3 aspektus – cenu, siltumcaurlaidību un svaru.

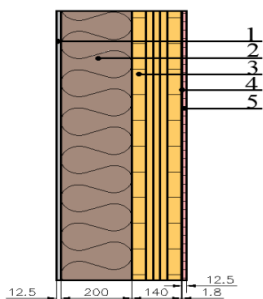
CLT sienu ar siltumizolāciju eksperimentālā un teorētiskā izpēte

Pētījumā tika testētas *CLT* sienas, kuru 140 mm biezums aiztur 58 % no nepieciešamās BR2 aizsardzības klases kinētiskās enerģijas. Viena siena (A, A2, B, B2) ar aramīda auduma (*Kevlar*) slāni katreiz citā pusē *CLT* paraugam un bez aramīda slāņa kā references siena (paraugšs C, C2). Sienas konstrukcijai par pamatu tika izmantots SIA “*CLT Profi*” (Latvija) tirgū piedāvātais sienas sastāvs, kura standartā ir 80 mm biezs *CLT* bloks, bet ballistiskiem mērķiem tas eksperimentā tiek aizvietots ar 140 mm biezu *CLT* bloku. Izmantotā līme ir karbamīda formaldehīds. Sienas panelis parasti vēl ir papildināts ar tvaika barjeras plēvi un apdares materiālu, kam ballistikā pretestība ir neievērojama, tāpēc tas eksperimentā netika lietots. Kā ballistisks papildinājums tika pievienots aramīda austais *Kevlar* divos slāņos divās variācijās – starp *CLT* un ugunsdrošo ģipša plāksni (A paraugs) un starp siltumizolāciju un *CLT* (B paraugs). Šaušana notika no abām pusēm *CLT* sienai, pārbaudot, cik un vai *CLT* slānis aptur lodi. Testējamās sienas siltumvadītspēja ir $U = 0,154 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$. Pēc teorētiskiem aprēķiniem minerālvates biezums varēja būt arī mazāks, t.i., 150 mm, lai tiktu izpildītas LBN 002-19 prasības par apdzīvojamu ēku sienu siltumcaurlaidības maksimālajām vērtībām. Sienas sastāvs pa slāņiem A sienai (*Kevlar* audums starp *CLT* un ugunsdrošo ģipša plāksni), slāņu biezums, esošais blīvums (mērīti un nosvērti paraugi) un salīdzinoši teorētiskais blīvums apkopots 5.1. tabulā un 5.1. attēlā. *CLT* materiāls tiek pieņemts kā C24 klases masīvkoksne pēc ražotāja datiem. Pētījumu apstākļi sakrīt ar 2. nodaļā minētajiem.

5.1. tabula

CLT sienas sastāvs A paraugam, siltumvadītspēja $U = 0,154 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$

Nr.	Sienas sastāvs	Biezums, mm	Aprēķinātais blīvums, kg/m ³	Ražotāja noteiktais blīvums, kg/m ³
1	Ģipša plāksnes pelēkas <i>Knauf mini GKB</i>	12,5	641,6	641,0
2	Minerālvate <i>Knauf Insulation Ekoboard</i>	200	13,9	13,8
3	<i>CLT, CLT Profi</i>	140	461,7	420 (C24 klase)
4	<i>Kevlar</i> audums $\times 2$	$2 \times 0,9$	217,8	222,2
5	Ģipša plāksnes (ugunsdrošas) <i>Knauf red GKF</i>	12,5	829,8	800

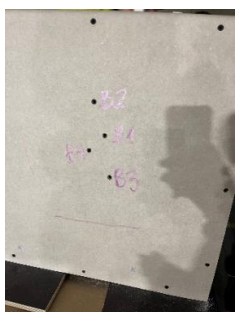


5.1. att. CLT sienas (A paraugs) kārtu shematisks attēlojums (skatīt kopā ar 5.1. tab.) un fotouzņēmums, sānskats (atzīme sarkanā krāsā ir koka rāmis ģipša plāksnes stiprināšanai).

Parastajai ģipša plāksnei ir maza ballistiskā pretestība [37]. Tā tiek izmantota CLT sienās kā uguns aizsardzības slānis, ko pieprasa daļa Eiropas valstu normatīvi par ugunsdrošību koka ēkās. Izmantotais Kevlar audums ir adīts (divu pavedienu adījums), nevis austs. Izvēle tika izdarīta atkarībā no tirgus pieejamības. Adītais Kevlar audums tiek izmantots kā papildu aizsardzība abrazīvai videi, piemēram, sportistu apģērbā tādos sporta veidos kā motosports.

Rezultāti parādīja, ka, šaujot A paraugā virzienā (5.2. a att.) no ārpuses (sākot no pelēkās ģipša plāksnes) lodes palika CLT materiālā maksimāli 127 mm dziļumā. Lodes noteicošais caursišanas dziļums ir nevis vidējais no pieciem, bet maksimālais, jo tieši maksimālais lodes caursišanas dziļums materiālā ir bīstamākais civilajiem ēkas/sienas lietotājiem. Kevlar audums pilnībā neapturēja lodes, kā tas bija iecerēts, tās izurbās cauri audumam un iestrēga CLT.

Divas no četrām lodēm parauga B siena absorbēja, bet otras divas nespēja apturēt. Caurejošo divu ložu maksimālais atlikušais (*residual*) ātrums bija 57,1 m/s un tika noteikts, ka siena spēj samazināt lodes ātrumu par 289,3 m/s, skaitot no lodes maksimālā ātruma pirms ieiešanas paraugā 345,8 m/s. Necaurejošo ložu caursišanas maksimālais dziļums sienā ir 343,3 mm (12,5 mm + 200 mm + 1,8 mm + 129 mm). Lodes iestrēga CLT materiālā maksimāli 129 mm dziļumā, nesasniedzot Kevlar audumu slāni. Sienas šaušanas pretējā virzienā (B2 paraugam) datu nav.



(a)



(b)



(c)

5.2. att. CLT sienu paraugi pēc eksperimenta.

Salīdzinot A un B paraugus, var secināt, ka Kevlar audums rada papildus pretestību, jo caursišanas dziļums A paraugā ir mazāks nekā B paraugā, un A paraugs apturēja visas četras lodes. Ļoti iespējams, tas ir saistīts ar to, ka lodei jāpārvar vēl papildus viena plakne, lai

turpinātu kustību. Lai gan eksperimentālais tests parādīja, ka, ja lodi izšauj tikai caur $2 \times 0,9$ mm *Kevlar* audumu, tas samazina ātrumu tikai par 5 m/s (5.2. b att.). Tikai vēlāk teorijā tika atrasts pētījums, ka maza skaita *Kevlar* auduma slāņi nav efektīvi, lai apturētu šāviņus, bet drīzāk liek šāviņiem turpināt kustību tālāk [konkrētajā gadījumā – ballistikajā gēlā]. Ja ir palielināts slāņu skaits (12 slāņi), tika novērots, ka lode tiek bremsēta un šāviņa iespiešanās dziļums materiālā samazinās [38]. References sienai C bez *Kevlar* auduma slāņa lode gāja cauri abos virzienos, tās maksimālais atlikušais ātrums pēc iziešanas no sienas bija 43,5 m/s, tātad siena samazina ātrumu par 296,3 m/s, kas ir līdzīgi gadījumam, ja *Kevlar* audums ir sienā. Tāpēc var secināt, ka adītajam *Kevlar* audumam nav ļoti lielas ietekmes uz ballistisko pretestību tā struktūras dēļ. Nākamajā pētījumā būtu jāveic ballistiskais eksperiments ar austu (nevis adītu) *Kevlar* audumu, kura šķiedras saskaņā ar teoriju labāk uztver un izkļiedē lodes kinētisko enerģiju pa šķiedras garumu.

Šaujot no otras sienas puses, kad priekšā ir ugunsdrošā ģipša plāksne, rezultāti ir citādi. Nesimetriskai slāņainai sienai ir būtiski, no kuras materiāla puses tiek šauts. A2 paraugs ir identisks A paraugam, šaujot otrā virzienā. Ugunsdrošā ģipša plāksne ar papildu stikla šķiedrām un *CLT* 140 mm siena apstādināja lodi, tā maksimāli ieurbās 76,5 mm dziļumā jeb tikai 64 mm *CLT* materiālā. Tas nozīmē, ka ugunsdrošajai ģipša plāksnei *Knauf Red* (ugunsreakcijas klase A2-s1,d0) ir salīdzinoši liela ballistiskā pretestība. References sienā C2 otra virziena atlikušais ātrums lodei pēc iziešanas no parauga bija 22,0 m/s, ātrumu starpība ir 317,9 m/s. Sienas caursišanas dziļums pārsniedza sienas biezumu 365 mm, lai gan tika izšauta tikai viena lode.

5.2. tabula

CLT trīs sienu šaušanas rezultātu analīze

Lodes virziens	Paraugšs	Nr.	Lielumi			Absorbētā enerģija	<i>CLT</i> absorbē	Vate + ģipša plāksne + <i>Kevlar</i>
			E_o J	E_r J	$\Delta v/v_o$, m/s	ΔE J	ΔE J	ΔE J
vate- <i>CLT</i>	<i>Kevlar</i> starp siltumizolāciju un <i>CLT</i>	A	478	0	1,00	478	344	134
<i>CLT</i> -vate	otrā virzienā	A2	478	0	1,00	478	173	305
vate- <i>CLT</i>	<i>Kevlar</i> starp <i>CLT</i> un ugunsdrošā ģipša plāksni	B_1a	476	0	1,00	476	350	118
		B_1b	467	12,9	1,00	454		69
<i>CLT</i> -vate	otrā virzienā	B2	-	-	-	-		
vate- <i>CLT</i>	References siena bez <i>Kevlar</i>	C_1a	461	12,81	0,83	448		79
vate- <i>CLT</i>		C_1b	462	3,672	0,91	458		81
<i>CLT</i> -vate	otrā virzienā	C2	462	2	0,94	460		97

5.2. tabulā parādīta rezultātu analīze, balstoties iepriekš eksperimentāli iegūtajā rezultātā, ka 140 mm *CLT* (C140) materiāla absorbē 380 J kinētiskās enerģijas. Lai noteiktu pārējo slāņu nozīmi enerģijas disipācijā, no kopējās sienas parauga absorbētās enerģijas tika atņemta *CLT* slāņa apslāpētā enerģija.

Izmantojot iepriekš iegūto grafiku (2.9. att.), tiek iegūta absorbētā enerģija. A, A2 un B paraugos lode apstājās, tāpēc analizējams ir dažāda caursišanas dziļums *CLT* materiālā. Ņemot vērā to, ka lode šiem paraugiem izgāja cauri, iegūtie lielumi no analīzes ir izslēdzami.

B, C_1a, C_1b un C2 paraugiem lode neizgāja cauri. Tie pēc aprēķiniem parāda, ka minerālvates + ģipša plāksnes + *Kevlar* kopā absorbē 69–81 J enerģiju, kas ir salīdzinoši mazs enerģijas intervāls. No autores pētījuma *Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing* zināms, ka viena ģipša plāksne absorbē nelielu kinētiskās enerģijas daudzumu, kā arī tas, ka *Kevlar* divu slāņu ietekme nav statistiski nozīmīga, tāpēc rodas priekšstats par tieši 200 mm minerālvates ballistisko pretestību.

Aprēķinot absorbēto kinētisko enerģiju B, C un C2 paraugiem, tā redzami nesasniedz robežu 640 J, kas atbilstu BR2 klases līmenim.

Rezultāti parādīja, ka 140 mm *CLT* kompozītsiena ar 200 mm minerālvates izolāciju un *Kevlar* slāni starp izolācijas slāni ir pietiekami, lai apturētu lodi, ja tā izšauta ar ātrumu līdz 341,6 m/s. Bet tā nenodrošina BR2 līmeņa aizsardzību, jo kinētiskā enerģija nesasniedz BR2 prasītos 640 J. Lodes apturēšanas spēja atšķirās atkarībā no šaušanas virziena un slāņu secības. *CLT* slānis ir galvenais enerģijas absorbētājs, jo lodes iestrēga tieši *CLT* materiālā. Aprēķini parāda, ka minerālvates + ģipša plāksnes + *Kevlar* kopā absorbē 69–81 J kinētisko enerģiju. Ugunsdrošības (ģipša plāksnes) un siltumizolācijas slāņi nevar tikt uzskatīti par nozīmīgu ballistisko aizsargvairogu. Lai *CLT* daudzslāņu siena sasniegtu BR2 aizsardzības līmeni, nepieciešams uzlabot sastāvu, tajā skaitā: palielināts *CLT* biezumu (>140 mm), efektīvāku šķiedru slāni (austs *Kevlar* ≥ 12 kārtas vai *UHMWPE*). Iepriekš izstrādātā metodoloģiju ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistiskās pretestības raksturlielumiem.

***UHMWPE*-saplākšņa eksperimentālā un teorētiskā izpēte**

Šajā pētījumā paplašināti saplākšņa pētījumi ar saliktajām saplākšņa-*UHMWPE* sienām – lai pielāgotu aprēķina metodoloģija papildinošo materiālu ballistiskās pretestības noteikšanai vai prognozēšanai. Izstrādāti slodzi nesoši un nenesoši ēku sienu paneļi, kas izgatavoti, izmantojot *UHMWPE* plātnes dažādās konfigurācijās ar bērza saplākšni. Eksperimenta gaitā tika pierādīts, ka paneļu ballistisko reakciju ietekmē materiālu izvietojums panelī. Eksperimentā tika testēti arī atsevišķi *UHMWPE* paneļi dažādā biezumā, lai veiktu materiāla bojājumu monitoringu. Tika apskatīti iespējami materiāla bojājumi un paneļa ballistiskā izturība atkarībā no paneļu fasādes materiāla. Šos slodzi nesošos vai nenesošos ēku paneļus paredzēts izmantot gan atsevišķi, gan kompleksai aizsardzībai pret mazkalibra šāviņiem vai sprādziena šķembām, aizsargājoties no tiešas vai nejaušas lodes.

Konkrētie saplākšņa biezums un marka tika izvēlēti tāpēc, ka tie ir salīdzinoši plaši izmantoti, kā arī pietiekami biezi, ar augstu stiprību un cietību (blīvums 670 kg/m³), lai prognozētu 9 mm kalibra lodes aizturēšanu. Materiāls darbojas kā lodes sapīšanās “tīkls” kompozītā, lodei deformējoties, un nodrošinot būtiskus enerģijas zudumus šāviņam, izkļiedējot tā enerģiju lielākā platībā un tādējādi samazinot tā spēju turpināt kustību. Abu materiālu termiskās izplešanās koeficienti nav līdzīgi – *UHMWPE* (blīvums 930 kg/m³) materiālam $\alpha = 2 \times 10^{-6}$ K [39], bet saplākšnim (ja temperatūra ir 20 °C, relatīvais mitrums 65 %) $\alpha = 28\text{--}31 \times 10^{-6}$ K.

Eksperiments notika kontrolētos apstākļos Rīgas šautuvē. Gaisa temperatūra eksperimenta laikā bija +5,1–7,0 °C (janvārī), relatīvais mitrums 65–70 %. Ar lodēm šāva pus-profesionāls šāvējs, tādējādi pietuvinot situāciju realitātei.

Pētījuma ierobežojums bija izmantot *UHMWPE* materiālu tikai vienā slānī, jo *UHMWPE* materiāls nav ekonomiski visizdevīgākais. Nākotnes uzdevums ir izmantot pārstrādātu *UHMWPE* materiālu, tādējādi samazinot paneļu izmaksas un palielinot ilgtspēju. Vispirms eksperimentā tika testēti atsevišķi *UHMWPE* paneļi un laminētais saplākšņa materiāls, lai novērtētu ballistiskos bojājumus katrā no tiem. [116]

Paraugi tika testēti ar lodes trieciena ātrumu 345 m/s, izmantojot teorētiski nedeformējamu lodi ar tērauda apvalku, šaujot no 10 metru attāluma. Lodes diametrs 9 mm un masa 8 g. Pamatojoties uz veiktajiem aprēķiniem, tika aprēķināta trieciena enerģija jeb kinētiskā enerģija, kas tiek izmantota, lai novērtētu šāviņa radītos bojājumus. Ja šāviņš izlido cauri mērķim ar atlikušo enerģiju, kas ir tuvu nullei, tiek uzskatīts, ka materiāls ir sasniedzis savu ballistisko robežu [8], [40], [41].

Pēc kinētiskās enerģijas pamatformulas tiek noteikta lodes iedotā enerģija. Šis panelis absorbē 476 J enerģijas, kas ir 74 % no BR2 aizsardzības klases uzstādītās enerģijas.

$$E_{kin} = \frac{0,008kg \times (345m/s)^2}{2} = 476,1 J.$$

Materiāli atsevišķi lodes neapturēja, tāpēc eksperimenta otrajā daļā tika pārbaudītas materiālu kombinācijas. Tika izveidoti nesoši un nenesoši ēku sienu paneļi, izmantojot *UHMWPE* dažādās kombinācijās ar bērza saplākšni. Šīs kombinācijas apkopotas 5.3. tabulā.

5.3. tabula

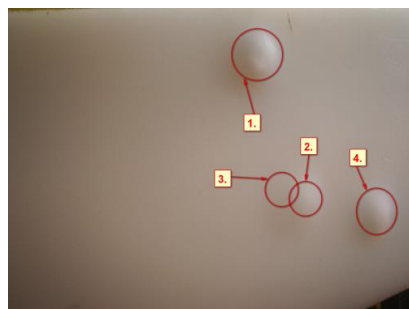
Saplākšņa-polietilēna plātņu ložu pretestība

Paneļa Nr.	Pozīcija	Materiāls	Lādiņš	Vai lode izgāja cauri?	Materiāls, kurā lode apstājās	Eksperimentāli izmērītais caursišanas dziļums, mm
1_1	priekšā	20 mm <i>UHMWPE</i>		jā	–	>53
	aizmugurē	32 mm saplākšnis				
1_2	priekšā	32 mm saplākšnis	9 mm	nē	<i>UHMWPE</i>	53 ± 1
	aizmugurē	20 mm <i>UHMWPE</i>	<i>Luger</i>			
2_1	priekšā	20 mm <i>UHMWPE</i>	<i>FJM</i>	nē	saplākšnis, 2. slānis	61 ± 1
	aizmugurē	2 x 32 mm saplākšnis				
2_2	priekšā	2 x 32 mm saplākšnis		nē	<i>UHMWPE</i>	74 ± 1
	aizmugurē	20 mm <i>UHMWPE</i>				

Panelis Nr. 1_1. Lode caursāva abus materiālus. Rezultātā saplākšnim adhezīvajā slānī atslāpojas 11 krusteniski līmētās bērza saplākšņa loksnes, no tām trešajā slānī no plātnes malas bija radīti bojājumi koka finiera slānī. Tika veikti divi kontrolšāviņi, lodes netika aizturētas.

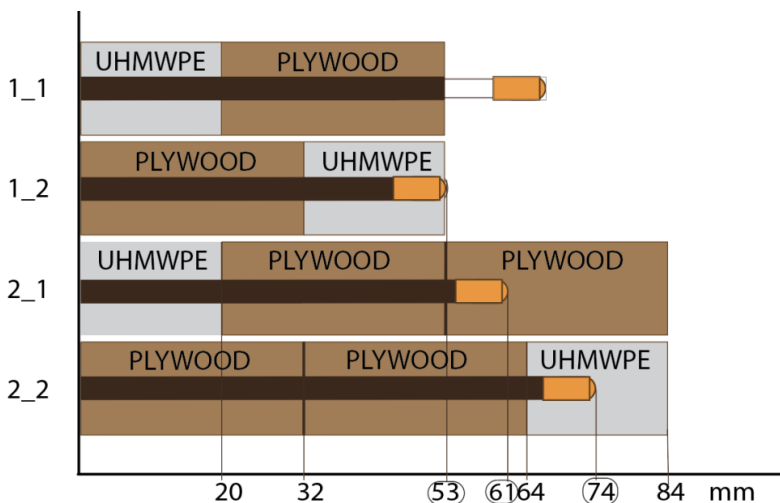


5.3. att. 1_2 paraugs. Saplāksnis-
UHMWPE [116].



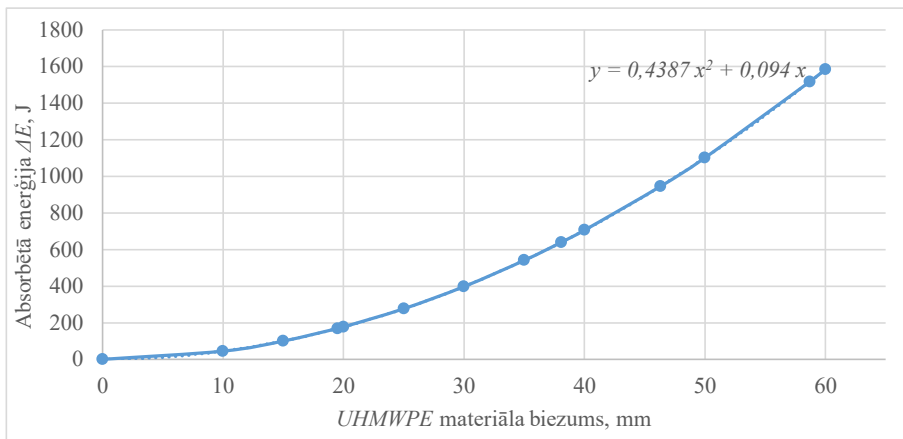
5.4. att. 1_2 paraugs. Saplāksnis-
UHMWPE, PE izspiešanās [116].

Panelis Nr. 1_2. No rokas pistoles tika izdarīti četri šāvieni. Plāksne apturēja lodi ar pirmo šāvienu (5.3. att.). Lodes cauršāva saplāksni, bet *UHMWPE* lodi apturēja. Polietilēnā tika konstatētas lokālas deformācijas, kas sakrita ar lodes trajektoriju. Pēc PE paneļa izspiešanas (5.4. att.) viduspunktā tika konstatēts materiāla sabiezējums, ko, iespējams, izraisīja straujas iekšējās temperatūras svārstības. Tā kā *UHMWPE* materiāla kušanas temperatūra ir 130 °C, īslaicīgs trieciens šādā temperatūrā neizraisa paliekošu deformāciju [116]. Maksimālais eksperimentāli izmērītais iespiešanās dziļums bija 53 mm. 2_1 paraugā lode iespiedās otrajā saplākšņa plāksnē. Eksperimentāli tika izmērīts 61 mm liels caursišanas dziļums. Bija redzams, ka lode caururbusi polietilēna un saplākšņa pirmo slāni, bet iesprūduši otrajā saplākšņa slānī. Ballistiskais eksperiments atklāja, ka polietilēna slāņa izvietojums ietekmē ballistisko reakciju. 2_2 parauga plāksne apturēja lodi. Lode tika izšauta cauri diviem saplākšņa slāņiem un apstājās polietilēnā. Eksperimentāli tika izmērīts 74 mm liels caursišanas dziļums. Polietilēnā netika konstatēta lokāla fasādes deformācija. 5.5. attēlā shematiski attēlota plākšņu šķērsriezuma imitācija.



5.5. att. Eksperimentālais lodes caursišanas dziļums (mm) katrai plākšņu kombinācijai.

Analizējot iegūtos caursišanas dziļumus un izmantojot jau zināmos, eksperimentos iepriekš iegūtos ballistikos datus par saplākšņa materiālu, tika veikts *UHMWPE* materiāla ložu pretestības aprēķins, iegūstot grafiku (5.6. att.) un otrās pakāpes polinoma sakarību, kas parāda materiāla spēju pretoties lodei atkarībā no *UHMWPE* plāksnes biezuma.



5.6. att. Absorbētās enerģijas daudzums atkarībā no *UHMWPE* biezuma.

Grafikā var redzēt, ka BR1 un BR2 aizsardzības klases sasniegšanai *UHMWPE* vajag būt attiecīgi 19,5 mm (noapaļojot 20 mm) un 38,1 mm (noapaļojot 40 mm) biezam.

Izmantojot izstrādāto metodoloģiju, var noteikt šķietamo dinamisko stiprību R_t arī *UHMWPE* materiālam. Aprēķinu rezultāti apkopoti 5.4. tabulā. Šīs šķietami dinamiskās stiprības ir lielumi, ar ko tiktu papildināti tehniskie dati saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas noteikšanai. Iegūtie dati prognozētu apstākļus, sagatavojoties citam eksperimentam vai reālajiem apstākļiem.

5.4. tabula

Lodes un saplākšņa raksturlielumi katrai aizsardzības klasei

Aizsardzības klases saskaņā ar EN1063	Lodes raksturlielumi						Materiāla raksturlielumi					
	Masa	Sākuma ātrums	Kinētiskā enerģija	Formas koef.	Diametrs	Šķēsgriezu ma laukums	Blīvums	Iekšējo spriegumu koeficients	Caursišanas dziļums	Stiprības parametrs	Šķietamā dinamiskā stiprība	Absolūtā kļūda
	m , g	v_0 , m/s	E , J	C	d , mm	A , m ²	ρ , kg/m ³	α , kg/m	P , mm	β , kg × m/s ²	R_t , MPa	ΔR_t , MPa
BR1	2,6	360	168	0,34	5,7	2,46E-05	930	0,0081	20	29	1,15	0,01
BR2	8,0	400	640	0,30	9,0	6,36E-05	930	0,0177	40	537	8,44	0,08
BR3	10,2	430	943	0,30	9,0	6,36E-05	930	0,0177	46	1059	16,65	0,17
BR4	15,6	440	1510	0,30	10,9	9,33E-05	930	0,0260	59	3127	33,53	0,34

Polietilēna un saplākšņa paneļi pareizā kārtībā izturēja vieglās pistoles šāviņu frontālos triecienus, izmantojot *Glock 17* ieroča 9 mm kalibra *Luger* lodes. Labākā secība attiecībā uz lodes pretestību bija 32 mm bieza viena saplākšņa plātne un 20 mm *UHMWPE*. Lodes apstājās

polietilēnā. *UHMWPE* cietība apvienojumā ar saplāksni nodrošina lodes triecienizturību, ja lodes sākotnējais ātrums ir līdz 345 m/s. Šīs plātnes var izmantot kā ložu necaurlaidīgas sienas.

UHMW polietilēns sāk kust pēc lodes sākotnējās enerģijas saņemšanas. Kušanas process nozīmē, ka kinētiskā enerģija ir pietiekama, lai polietilēnu uzsildītu līdz 130 °C.

Pēc šāvienu ir iespējams vizuāli atjaunot paneli, izmantojot dažādas iespējas, piemēram, paaugstinātu temperatūru, sakausējot *UHMWPE* materiālu. Alternatīvi bojāto vietu var aizstāt ar stiprāku materiālu (piemēram, metāla stieni). To var izdarīt nekavējoties, lai nebūtu atvērtu kanālu nākamajam šāvienam.

Nākamais eksperiments būtu saplākšņa un *UHMWPE* plātņu biezuma variēšana (saplākšņa biezumu īpaši varētu samazināt testos ar 2_1 un 2_2 paneļiem), lai pārlicinātos, ka tiek izmantots minimālais iespējamais biezums, lai iegūtu maksimāli vieglu sienu, kā arī kombinācijā ar citiem ballistiskiem materiāliem, piemēram, aramīda šķiedru plātni [9].

Paneļos, kas veidoti no vairākiem materiāliem ar dažādām fizikālajām īpašībām, būtiska ir katra materiāla atrašanās vieta (secība) saliktā paneļa struktūrā. Materiālu secība var būtiski ietekmēt paneļa spēju izturēt ballistiskās slodzes. Laminēta saplākšņa un *UHMWPE* paraugi atsevišķi nerasniedza BR2 klases prasīto ballistisko robežu, turpretī paraugi, kur saplāksnis bija ārpusē (vismaz 32 mm) – *UHMWPE* iekšpusē (20 mm) uzrādīja labākus rezultātus nekā pretējā secībā. Šie paneļi var būt daļa no sienām dažādās patvertnēs, piemēram, armijas štābos, un drošajās istabās, jo to blīvums ir salīdzinoši neliels.

Mazākais *UHMWPE* biezums, lai aizturētu *EN 1063* standarta aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju, ir BR1 – 20 mm, BR2 – 38 mm, tendence: BR3 – 46 mm; BR4 – 59 mm. Precizēti eksperimentā iegūtie Ponceleta formulas parametri. Pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *UHMWPE* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 1,15 MPa, 8,44 MPa, tendence: 16,65 MPa un 33,53 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *UHMWPE* materiāla ballistiskās veiktspējas modelēšanā. Tomēr šie rezultāti būtu eksperimentāli jāpārbauda, lai pārlicinātos, vai šī metode ir izmantojama arī ārpus koksnes līmētiem elementiem.

Ballistisko sienu salīdzinājums

Pētījumā teorētiski tiek salīdzinātas zināmākās un biežāk lietotamās, kā arī BR2 klasi notestējušas ballistiski vienlīdz efektīvas astoņas sienu konstrukcijas (5.7. att.), kas ietver vienu vai vairākus materiālu slāņus. Šī salīdzinājuma mērķis ir analizēt ložu necaurlaidīgas sienas un noskaidrot labāko (izdevīgāko), sliktāko (neizdevīgāko) vienā kategorijā un vidēji labāko kopumā, izvirzot labākās pēc trim papildu aspektiem – cena, siltumcaurlaidība un svars. Šis apskats palīdzētu būvfirmām, aizsardzības iestādēm, sabiedriskas nozīmes ēku pārvaldītājiem izvēlēties piemērotu ballistisko materiālu paaugstināta riska ēku sienām, kā arī – tam, lai parādītu, ka tradicionālajiem materiāliem nav tikai priekšrocības, bet arī būtiski trūkumi.



5.7. att. Astoņas aplūkotās ballistikās sienas.
[9], [20], [37], [42],[44]

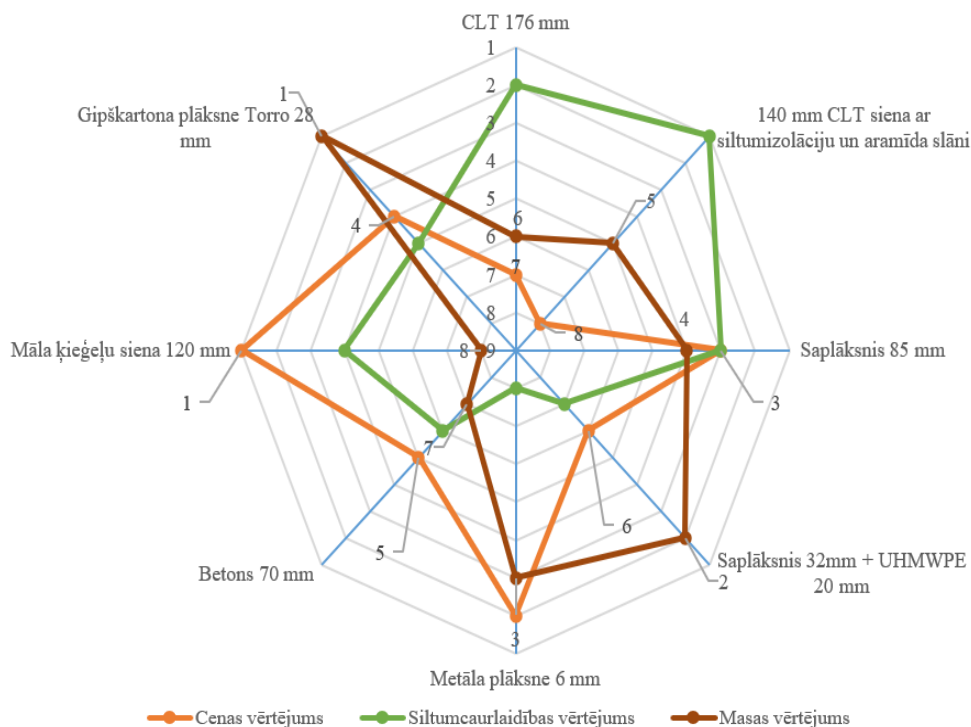
Ēkas lietotāji ir pilnībā ballistiski aizsargāti pret tīšu vai nejaušu lodi tad, ja materiāls lodi absorbē un tā neiziet cauri sienai. Šīs sienas pārsvarā ir ložudrošas gan no ārpuses, gan no iekšpuses, neatkarīgi no tā, no kuras puses notiek uzbrukums. Ballistikā aizsardzība lielā mērā ir atkarīga no šaušanas leņķa un attāluma [5]. Tomēr šajā pētījumā nav ietverti tādi mainīgie faktori kā leņķa un šaušanas attāluma (standarta laboratorijas eksperimentos tie ir 5 m līdz mērķim) ietekme, kā arī ir noteiktas eksperimenta robežas. Pētījums neietver materiāla montāžas detaļas un izmaksas, savienojumu dažādību, savienojumu ballistisko pretestību, pēkšņas lodes ātruma izmaiņas (nejauši šķēršļi lodes ceļā), lodes izmērus, lodes gala formu un arī rikošeta iespējamību, kā arī šķembu izplatību. Šo astoņu sienu materiālu biezums nodrošina 9 mm *Glock 17* lodes minimālo ballistisko pretestību, kas konstatēta citu pētnieku teorētiskajā literatūrā vai autores iepriekšējos pētījumos. To klase pēc *EN 1063* standarta ballistiski izturīgiem aizsargmateriāliem ir BR2 [37], kas paskaidro, ka tas aiztur lodes ātrumu līdz 400 m/s. Materiāla biezums varētu mainīties (palielināties) atkarībā no jaudīgāka ieroča iespējamā lietojuma.

Pētījumā tiek ņemti vērā četri kritēriji (sienas biezums, cena, siltumcaurlaidība un masa uz vienu kvadrātmetru), pamatojoties uz materiāla ballistisko spēju. Kategorijas – cena, siltuma caurlaidība un sienas masa uz platības vienību – tiek vērtētas punktu sistēmā no 1 līdz 8. Cenas vērtējumā ar atzīmi “1” ir vērtēts lētākās sienas risinājums, ar “8” – dārgākais. Siltumcaurlaidības vērtējumā ar “1” novērtēts siltākais risinājums, ar “8” – siltuma neuzturoša siena. Masas vērtējumā ar atzīmi “1” novērtēta vieglākā siena, ar “8” – smagākā siena. Materiālu cena aprēķināta kā 50 m² ēkas platības 80 m² sienai, pamatojoties uz moduļveida ēku kritēriju, ja sienas augstums ir 2,7 m. [5], [10], [13] Montāžas izdevumi šajā cenā nav iekļauti. Siltumcaurlaidību nosaka lieluma lambdas (siltuma vadītspējas) attiecība pret sienas biezumu. Sienas ārējās un iekšējās virsmas siltuma pretestības vērtība netiek ņemta vērā. Sienas materiāla masu tiek aprēķināta, pamatojoties uz katra slāņa blīvumu un biezumu. 5.8. attēlā ir parādīti

izpētes rezultāti, izmantojot daudzkritēriju novērtēšanas rīku jeb radara diagrammas formātu, kas ilustrētā veidā grafiski parāda iegūtos salīdzināmos rezultātus.

Radara veida diagrammā materiāls, kas aptver lielāku laukumu, kopumā ir izdevīgākais risinājums. Ekonomiski izdevīgākā (lētākā) ir 120 mm māla ķieģeļu siena, turpretim dārgākā siena ir 140 mm *CLT* siena ar siltumizolāciju un aramīda slāni tās tehnoloģiskās ražošanas sarežģītības dēļ, bet tā ir augstvērtīgākā siltuma (ne)caurlaidības ziņā. Vislielākie siltuma zudumi ir 6 mm metāla plāksnei bez pievienotas siltumizolācijas. Visvieglākās ballistikās sienas ir 28 mm ģipškartona plāksnes *Torro*, savukārt vissmagākā ir 120 mm māla ķieģeļu siena augstā blīvuma un biezuma dēļ.

Kopsummā visvērtīgākais un ieteicamākais sienas materiāls ir saplāksnis 85 mm biežumā un *Knauf Torro* 28 mm plātne, lai gan saplāksnis nebija vislabākais nevienā no jomām, tomēr saglabāja optimālu vērtējumu katrā kategorijā. Vismazāk rekomendējamā šajā vērtējumā ir tradicionālā betona siena tās lielās masas un relatīvi zemo siltumtehniko īpašību dēļ, tomēr, pieliekot siltumizolāciju, šo mīnusu iespējams novērst. Visas šīs astoņas sienas ir izmantojamas kā ballistiski paneļi koka karkasa moduļveida ēkai, kas ne vienmēr paredzēta ilgstošai lietošanai.



5.8. att. Radara diagramma, kas grafiski parāda labāko materiālu atkarībā no izmantošanas mērķa un ekspluatācijas vēlmēm (izvēlēties lētāko, siltāko vai vieglāko materiālu), kur 1 ir labākais rezultāts; 8 ir sliktākais.

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Pētījums atklāj aprēķina metodoloģiju moduļveida ēku ložu izturīgu sienu konstrukcijām.

Promocijas darba rezultātā iegūtie secinājumi

1. Jaunas metodoloģijas nepieciešamību parāda eksperimentālā un teorētiskā salīdzinājuma trūkums. Citiem zinātniskiem darbiem ir izmantoti Ponceleta un Eulera-Robinsa formulu teorētiskie modeļi, tomēr pietrūkst to validācijas ar eksperimentu rezultātiem. Nav atklāti visi formulas parametri, piemēram, šķietamā dinamiskā stiprība, kas ir būtisks lielums lodes caursišanas dziļuma teorētiskā aprēķināšanā.
2. Pirmreizējās ballistikās pārbaudēs teorētiskie iespēšanās dziļuma aprēķini ar Ponceleta formulu uzrādīja atbilstību eksperimentālajiem datiem. Līdz ar to testa parauga/sienas biezuma izvēle tika apstiprināta, pamatojoties uz teorētiskajiem aprēķiniem.
3. Aprēķina metodoloģija moduļveida ēku ložu izturīgas sienas konstrukcijas ballistikās pretestības prognozēšanai BR1 un BR2 aizsardzības klasēm pēc *EN 1063* standarta balstīta uz materiāla mehānisko īpašību analīzi, trieciena enerģijas starpību un empīrisku sakarību starp koksnes blīvumu un lādiņa parametriem un izraisīto caursaušanas dziļumu. Metodoloģijas posmi: eksperimentālo datu iegūšana, aprēķināmie ballistikas lielumi, datu analīze, šķietamās dinamiskās stiprības R_t noteikšanas metode, fizikālais jeb skaitliskais modelis, modeļa kalibrācija un pārbaude, prognoze, optimizācija, atkārtotamība.
4. Pēc autores ieviestās metodes noteikta mērķa materiāla šķietamā dinamiskā stiprība *CLT* un saplākšņa materiāliem BR1 un BR2 aizsardzības klasei, kas ļauj aprēķināt lodes caursišanas maksimālo dziļumu (jeb minimālo sienas biezumu) ierocim ar lodes masu līdz 8,0 g un ātrumu līdz 400 m/s, kā arī veidot tendenci BR3 un BR4 aizsardzības klasei ar lodes masu līdz 15,6 g un ātrumu līdz 440 m/s.
5. Aprēķina metodoloģijas izstrādāšanai tika veikta iegūto eksperimentālo datu analīze ar *EN 1063* standarta noteiktajām robežvērtībām aizsardzības klasēm BR1, BR2, kā arī tendencei BR3 un BR4.

Rezultāti

- Līmētas koksnes ballistikā pretestība nav lineāra; to iespējams modelēt, izmantojot Ponceleta formulu, polinomu grafikus un empīriski iegūtos parametrus.
- BR1 un BR2 aizsardzības klasēm bērza saplāksnis uzrāda par 54% augstāku ballistisko efektivitāti nekā *CLT*. BR1 līdz BR4 klasēm – par 40 %.
- *CLT* paneļiem:
 - eksperimentālie dati parādīja, ka atbilstoši *EN 1063* klasēm minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 176 mm, ar tendenci BR3 185 mm un BR4 199 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta *CLT* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 100,24 MPa, 45,48 MPa, 66,70 MPa un 68,93 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti saplākšņa materiāla ballistikās veikspējas modelēšanā;
 - skaitliskā modelēšana (*Ansys Explicit Dynamics*) *von Mises* sprieguma analīze parādīja, ka lode ar ātrumu 345 m/s caursit 100 mm un 140 mm *CLT*, bet apstājas 146 mm dziļumā 150 mm biežam *CLT*, kas saskan ar eksperimentu rezultātiem.

- Saplākšņa paraugiem:
 - mazākais saplākšņa biezums, lai aizturētu *EN 1063* standarta aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir BR1 – 26 mm, BR2 – 85 mm, BR3 – 122 mm, BR4 – 167 mm;
 - precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta bērsa saplākšņa šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 238,46 MPa, 99,29 MPa, 98,84 MPa un 76,85 MPa. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti saplākšņa materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā.
 - Pārejot no BR2 uz BR4 aizsardzības klases, pēc empīriski iegūtajiem datiem iegūts, ka nepieciešama 200 mm bieza *CLT* siena vai 167 mm saplākšnis, bez to kombinācijas. Saliekot kopā 180 mm *CLT* un 81 mm saplākšni (trīs loksnes), siena nespēj nodrošināt nepieciešamo enerģijas absorbcijas prasību 1511 J, līdz ar to tieši šo materiālu kombinēšana nav pamatota.
6. Izstrādātā metodoloģija ļauj prognozēt nepieciešamo koksnes sienas biezumu bez pilna procesa eksperimenta veikšanas, tādā veidā samazinot finansiālos ieguldījumus, riska aspektus un paātrinot ložudrošu ēku projektēšanas laiku.
 7. Parametru optimizācijas analīze noteica optimālo caursišanas dziļumu un ekstrēmās robežvērtības. Optimizācijas rezultātu nosacītais ekstrēms *CLT* materiālam ($\alpha = 0,0968 \text{ kg/m}$; $\beta = 3467 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) dod prognozējamo caursišanas dziļumu 140,1 mm, savukārt saplākšnim ($\alpha = 0,0153 \text{ kg/m}$; $\beta = 5874 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$) prognozējamo caursišanas dziļumu dod 80,5 mm, kas saskan ar eksperimentāliem datiem.
 8. Efektīvākas pretložu konstrukcijas var panākt koksni integrējot ar papildmateriāliem (*Kevlar* un minerālvate, *UHMWPE*). Autores ieviesto metodoloģiju var pielāgot arī slāņainu sienu konstrukciju atsevišķu slāņu ballistisko parametru noteikšanai, balstoties uz jau iegūtajiem saplākšņa un *CLT* zināmajos enerģijas absorbcijas raksturotājos.
 9. Precizēti eksperimentā iegūti Ponceleta formulas parametri; pēc autores ieviestās metodes empīriski noteikta arī *UHMWPE* šķietamā dinamiskā stiprība R_t atbilstoši BR1, BR2, BR3, BR4 klasēm: 1,15 MPa, 8,44 MPa, tendence: 16,65 MPa un 33,53 MPa. Mazākais *UHMWPE* biezums, lai aizturētu *EN 1063* standarta aizsardzības klašu maksimālā sākuma radīto kinētisko enerģiju ir, BR1 – 20 mm, BR2 – 38 mm, tendence: BR3 – 46 mm, BR4 – 59 mm. Šie lielumi papildina tehnisko datu literatūru un var tikt izmantoti *UHMWPE* materiāla ballistikās veiktspējas modelēšanā. Tomēr šie rezultāti būtu eksperimentāli jāpārbauda, lai pārliecinātos, vai šī metode ir izmantojama arī ārpus koksnes līmētiem materiāliem.
 10. Iepriekš izstrādātā metodoloģija ļauj veikt kvantitatīvu novērtējumu un formulēt pamatotus secinājumus arī par daudzslāņu konstrukciju ballistikās pretestības raksturlielumiem. Metodoloģija balstās atsevišķu slāņu enerģijas absorbcijas ieguldījuma noteikšanā un enerģijas bilances principu lietošanā. Papildus piedāvātas kompozītmateriāla aizsardzības risinājumi, piemēram, *CLT-Kevlar*-siltumizolācijas un saplākšņa-*UHMWPE* daudzslāņu sienas, kas potenciāli uzlabotu moduļveida ēku konstrukciju ballistisko izturību. Analīze parāda, ka metodoloģijas lietošana ir precīzāka sienām, kas ietver divus dažādus slāņus, nevis trīs un vairāk slāņu sistēmām. Enerģijas starpības metode divu savienoto materiālu

gadījumā precīzāk parāda parauga ballistisko parametru iegūšanu, jo samazinās slāņu skaita savstarpējās ietekmes un kumulatīvās kļūdas efekts.

11. Paneļos, kas veidoti no vairākiem materiāliem ar dažādām fizikālajām īpašībām, būtiska ir katra materiāla atrašanās vieta (secība) saliktā paneļa struktūrā. Materiālu secība var būtiski ietekmēt paneļa spēju izturēt ballistiskās slodzes.
12. Salīdzinot perspektīvākās ballistiskās sienas, pētījums parādīja, ka finansiāli izdevīgākā ir *Torro* 28 mm siena. No siltumcaurlaidības viedokļa vislabākās ir *CLT* sienas ar 200 mm minerālvates izolāciju, bet vissliktākā – tērauda plāksne (bez siltumizolācijas). Savukārt svara ziņā visvieglākās ballistiskās sienas ir *Knauf Torro* 28 mm plātne, vissmagākās – māla ķieģeļu un betona sienas. Kopsummā visvērtīgākās ir 85 mm saplākšņa un *Knauf Torro* 28 mm plātnes. Šie materiāli koka karkasa konstrukcijās ir ieteicamas kā pagaidu ēku būvkonstrukcijas nejaušas vai mērķtiecīgas apšaudes gadījumā. Vissliktākā kopsummā izrādījās tradicionālā betona siena.
13. Priekšlikumi metodoloģijas praktiskai ieviešanai un normatīvo dokumentu ieviešanai:
 - Ieviest Ponceleta formulu kā galveno aprēķina formulu un definēt šķietamās dinamiskās stiprības R_t vērtības 100,24 MPa, 45,48 MPa *CLT* paraugiem un 238,46 MPa, 99,29 MPa saplākšņa paraugiem atbilstoši BR1 un BR2 klasēm.
 - Ieviest nosacījumu, ka minimālais *CLT* materiāla biezums ir BR1 60 mm, BR2 176 mm un saplākšņa materiāla biezums BR1 26 mm, BR2 85 mm.

IETEIKUMI TĀLĀJIEM PĒTĪJUMIEM

Ballistikas nozares attīstībai aizsargsienų jomā līdzīgu pētījumu sākšanai autore iesaka šādi sagatavoties eksperimentiem:

- testēt paraugus, izmantojot testēšanas šaujamiekārtu, tādā veidā izvairoties no šāvēja gadījuma kļūdām un spējām iespējamām nevajadzīgām kustībām un iegūtu lielāku rezultātu precizitāti;
- testēt *CLT* vienāda biezuma, bet dažādu slāņu līmējumu, lai jau detalizētāk analizētu slāņojuma, kārtu biezumu, skaita un arī līmes ietekmi ballistiskajos rezultātos.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Apollo.lv, "Caur Krieviju bēgošie ukraiņi rindā pie Latvijas robežas gaidīja pat sešas diennaktis." Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.apollo.lv/7622948/caur-krieviju-begosie-ukraini-rinda-pie-latvijas-robezas-gaidija-pat-sesas-diennaktis>.
- [2] U. DoD and E. Warfare Center, "Unified Facilities Criteria (UFC) Design to resist direct fire weapons effects approved for public release," 2008. [Online]. Available: <http://dod.wbdg.org/>.
- [3] LSM.lv_Freidenfelds D, "Uz Čerņihivas apgabalu Ukrainā sūta Latvijā ražotas moduļu mājas," LSM ziņu dienests, Latvia, Sep. 18, 2023. Accessed: Aug. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.lsm.lv/raksts/zinas/latvija/18.09.2023-uz-cernihivas-apgabalu-ukraina-suta-latvija-razotas-modulu-majas.a524393/>.
- [4] T. Borvik, S. Dey, and L. Olovsson, "Penetration of granular materials by small-arms bullets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 75, pp. 123–139, 2015, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.016.
- [5] A. Borodinecs, A. Geikins, E. Barone, V. Jacnevs, and A. Prozuments, "Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct," *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/buildings12010030.
- [6] "Eiropas Parlamenta un Padomes regula Nr. 305/2011," Mar. 2011.
- [7] Postimees.ee, "Skolas darbinieki arestē zēnu, kurš nošāva skolotāju," <https://www.postimees.ee/2969175/opetaja-maha-lasknud-poise-votsid-kinni-kooli-tootajad>, Oct. 28, 2014.
- [8] K. Sanborn, "Exploring cross-laminated timber use for temporary military structures: ballistic considerations," 2018. Accessed: Feb. 22, 2021. [Online]. Available: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/59910>.
- [9] A. Borodinecs, A. Geikins, E. Barone, V. Jacnevs, and A. Prozuments, "Solution of Bullet Proof Wooden Frame Construction Panel with a Built-In Air Duct," *Buildings*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/buildings12010030.
- [10] A. Borodinecs, A. Geikins, and S. Smirnov, "Energy performance of temporary shelters," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/660/1/012017.
- [11] X. Wu, B. Tang, and H. Li, "Research on the effect of UHMWPE cavity protection board on rapid enhancement of wall anti-blast performance," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 647, no. 1, p. 012084, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/647/1/012084.
- [12] A. Prozuments, A. Borodinecs, and J. Zemitis, "Survey based evaluation of indoor environment in an administrative military facility," *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 96–107, 2020, doi: 10.5755/j01.sace.26.2.26079.
- [13] A. Borodinecs, A. Geikins, and A. Prozuments, *Energy consumption and retrofitting potential of Latvian unclassified buildings*, vol. 163. 2020. doi: 10.1007/978-981-32-9868-2_27.
- [14] A. Borodinecs, J. Zemitis, M. Dobelis, M. Kalinka, and A. Geikins, "Development of prefabricated modular retrofitting solution for post-world War II buildings," in *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*, Vilnius Gediminas Technical University Publishing House "Technika," 2017. doi: 10.3846/enviro.2017.252.
- [15] A. Borodinecs, A. Prozuments, J. Zemitis, D. Zajecs, and G. Bebre, "Hydrothermal performance of the external wooded frame wall structure reinforced with ballistic panels," *12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020)*, vol. 172, no. E3S Web Conf., 2020, doi: 10.1051/e3sconf/20201720.
- [16] A. Geikins, A. Borodinecs, G. Daksa, R. Bogdanovics, and D. Zajecs, "Typology of Unclassified Buildings and Specifics of Input Parameters for Energy Audits in Latvia,"

- in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012131.
- [17] J. Wimbiscus, "Finding The Right Material For Your Backyard Ballistics Tests." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.guns.com/news/2017/06/16/think-of-all-the-fun-you-could-have-with-backyard-ballistic-testing-materials>.
 - [18] L. Wang, S. Kanesalingam, R. Nayak, and R. Padhye, "Recent Trends in Ballistic Protection," *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, vol. 3, no. 0, p. 37, 2014, doi: 10.14355/tlist.2014.03.007.
 - [19] M. E. Backman, *Terminal Ballistics*. Naval weapons center China Lake LA, 1976.
 - [20] A. Crispin, "Wood in warfare." Accessed: Jul. 26, 2023. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2012/09/wood-in-warfare/>.
 - [21] J. Melderis, "Principles of construction and operation of weapons and ammunition," Riga, 2008. Accessed: Oct. 15, 2021. [Online]. Available: <http://virsnieki.lv/wp/wp-content/uploads/2016/03/Iero%C4%8Du-un-mun%C4%ABcijas-uzb%C5%ABve-un-darb%C4%ABbas-principi.pdf>.
 - [22] Beat P. Kneubuehl, *Ballistics: Theory and Practice*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
 - [23] M. E. Backman and W. Goldsmith, "The mechanics of penetration of projectiles into targets," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–99, 1978, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90002-2).
 - [24] D. B. Phan Ba and Phan Van Vu, "Determination of the kinetic parameters of the projectile when penetrating the wooden target by finite element methods," *Journal of Military Science and Technology*, vol. 104, no. 104, pp. 164–172, Jun. 2025, doi: 10.54939/1859-1043.j.mst.104.2025.164-172.
 - [25] M. Esaker, G. E. Thermou, and L. Neves, "Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 180, pp. 734–743, 2023, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104722.
 - [26] C. Menna, D. Asprone, G. Caprino, V. Lopresto, and A. Prota, "Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 8, pp. 677–685, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.03.003>.
 - [27] A. B. Dresch, J. Venturini, S. Arcaro, O. R. K. Montedo, and C. P. Bergmann, "Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 7, Part A, pp. 8743–8761, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>.
 - [28] S. D. Kashuba, M. D. Kuzik, and M. A. Hatzinikolas, "Resistance of Exterior Walls to High Velocity Projectiles," 2002.
 - [29] E. Barone, B. Gaujena, and J. Videmanis, "Projectile penetration depth into wood-based frames of unclassified buildings," *Far East Journal of Mathematical Sciences (FJMS)*, pp. 11–20, Jul. 2022, doi: 10.17654/2229451122002.
 - [30] "Torro | Pommel." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.Knauf.de/profi/sortiment/produkte/Torro.html>.
 - [31] E. Barone, R. Vetra, B. Gaujena, and M. Vilnitis, "Ordinary gypsum plasterboard and Knauf Torro gypsum plasterboard bullet-proofing," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2423/1/012016.
 - [32] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. Third edition. | Boca Raton: Taylor & Francis, 2018.: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/B22201.
 - [33] Valmieras fibreglass, "What is glass fibre and its value." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.valmiera-glass.com/lv/produkti/stikla-skiedras-priekšrocības/>.
 - [34] Hesco, "Hesco." Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.hesco.com/>.

- [35] S. Szabo, R. Toth, and Z. Kovacs, "Force protection solutions with HESCO Bastion Concertainer.," *AARMS: Academic & Applied Research in Military Science*, vol. 10, no. 1, pp. 31–59, 2011, Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://rb.gy/mlz4>.
- [36] J. W. Heselden, "Reinforcement and Control Using Concertainers," Bangalore, India: Geosynthetics Asia '97, 1997. Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: https://books.google.lv/books?id=yYFKGHm4yLYC&pg=PA129&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [37] F. A. Soriano-Moranchel, J. M. Sandoval-Pineda, G. J. Gutiérrez-Paredes, U. S. Silva-Rivera, and L. A. Flores-Herrera, "Simulation of bullet fragmentation and penetration in granular media," *Materials*, vol. 13, no. 22, pp. 1–13, Nov. 2020, doi: 10.3390/ma13225243.
- [38] S. J. Hanchak, M. J. Forrestal, E. R. Youngt, and J. Q. Ehrgott~, "Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths," 1992.
- [39] M. H. Zhang, V. P. W. Shim, G. Lu, and C. W. Chew, "Resistance of high-strength concrete to projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 7, pp. 825–841, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009.
- [40] J. T. Gomez and A. Shukla, "Multiple impact penetration of semi-infinite concrete," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 965–979, Nov. 2001, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00029-X.
- [41] Ken J., "Bullet Proofing Walls | Resistant Wall Construction." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://modernsurvivalblog.com/security/bullet-resistant-wall-construction/>.
- [42] J. Awerbuch and S. R. Bodner, "Experimental investigation of normal perforation of projectiles in metallic plates," Pergamon Press, 1974.
- [43] R. A. Nolte and D. L. Selke, "U.S. Patent," US 7661228 B1, Feb. 16, 2010.
- [44] M. T. Lo Ricco, M. K. Weaver, C. Adam Senalik, J. Henjum, and J. Cattelino, "Ballistic testing of cross-laminated timber layups to further develop protective panels," in *13th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2023*, World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2023, pp. 75–83. doi: 10.52202/069179-0010.
- [45] L. Koene and F. R. Broekhuis, "Bullet penetration into wooden targets," in *30th International Symposium on Ballistics, Long Beach, CA*, Sep. 2017, pp. 1905–1916. doi: 10.12783/ballistics2017/16976.
- [46] S. Boatright and G. Garrett, "The effect of knots on the fracture strength of wood - I. A review of methods of assessment," 1979.
- [47] L. Koene, R. Hermsen, and S. D. Brouwer, *Projectile ricochet from wooden targets*, vol. 2. 2013.
- [48] Nardin A., Boström L., and Zaupa F., "The effect of knots on the fracture of wood," Whistler Resort, British Columbia, Canada, 2000.
- [49] M. Hughes, "4 - Plywood and other veneer-based products," in *Wood Composites*, M. P. Ansell, Ed., Woodhead Publishing, 2015, pp. 69–89. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00004-4>.
- [50] S. Turopoljac, Z. Trzun, and M. Vrdoljak, "Analysis of the Pistol Bullet Penetration through a Wooden Barrie," in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, DAAAM International Vienna, 2022, pp. 285–294. doi: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.039.
- [51] D. W. Green, J. Winandy, and D. E. Kretschmann, "Mechanical properties of wood," *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, vol. 113, 1999, Accessed: Jun. 07, 2026. [Online]. Available: <https://research.fs.usda.gov/treearch/7149>.

- [52] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, "Cross laminated timber (CLT): overview and development," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [53] L. Koene and F. R. Broekhuis, "Bullet penetration into medium density fibreboard targets," in *31st International Symposium on Ballistics, Hyderabad, India*, 2019, pp. 1363–1373.
- [54] J. Swinea, K. Sanborn, M. Weaver, M. Lo Ricco, C. A. Senalik, and L. K. Stewart, "Enhanced cross laminated timber (ECLT) for ballistic resistant design," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 189, p. 104931, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104931>.
- [55] J. G. Carrillo, R. A. Gamboa, and P. I. González-Chi, "Performance improvement on aramid/polypropylene composite for high velocity impacts," in *Antec*, 2011, pp. 695–699. Accessed: Jul. 22, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/34399073/Performance_Improvement_on_Aramid_Polypropylene_Composite_for_High_Velocity_Impacts?email_work_card=thumbnail.
- [56] C. Pirvu and L. Deleanu, "Ballistic Testing of Armor Panels Based on Aramid," in *Ballistics*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.78315.
- [57] V. Anand, A. Edwin, D. Justus, K. Prasanna, S. Ramesh, and S. Arun, "Energy absorption and ballistic impact behavior of Kevlar woven fabrics," 2018. [Online]. Available: www.tjprc.org.
- [58] A. Majumdar, B. S. Butola, and A. Srivastava, "An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials," *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 148–153, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.016.
- [59] H. M. Cho, S. Wi, S. J. Chang, and S. Kim, "Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 1353–1363, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.197.
- [60] K. Sanborn, T. R. Gentry, Z. Koch, A. Valkenburg, C. Conley, and L. K. Stewart, "Ballistic performance of cross-laminated timber (CLT)," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 128, pp. 11–23, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.007>.
- [61] L. Koene and G. Willemsen, "Bullet Penetration into Plywood targets," in *33rd International symposium on Ballistics, Belgium*, 2023.
- [62] C. A. Senalik and B. Farber, *Wood handbook wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282.*, vol. Chapter 5. Madison, WI: Forest Products Laboratory, 2021. Accessed: Jan. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/62244>.
- [63] R. J. Ross, "Wood handbook: wood as an engineering material," 2010. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139247795>.
- [64] M. Cao, L. Chen, R. Xu, and Q. Fang, "Effect of the temperature on ballistic performance of UHMWPE laminate with limited thickness," *Compos. Struct.*, vol. 277, p. 114638, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114638.
- [65] J. van Dingenen, "High performance dyneema fibres in composites," *Mater. Des.*, vol. 10, no. 2, pp. 101–104, Mar. 1989, doi: 10.1016/S0261-3069(89)80021-4.
- [66] J. G. Carrillo, R. A. Gamboa, and P. I. González-Chi, "Performance improvement on aramid/polypropylene composite for high velocity impacts," 2011.
- [67] I. G. Crouch, "Critical interfaces in body armour systems," *Defence Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1887–1894, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.DT.2020.11.006.
- [68] D. Firouzi, P. Mudzi, C. Y. Ching, T. H. Farncombe, and P. Ravi Selvaganapathy, "Use of pressure sensitive adhesives to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric," *Compos. Struct.*, vol. 287, p. 115362, May 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115362.
- [69] Z. Ur Rehman, A. K. Niaz, J. Il Song, and B. Heun Koo, "Excellent fire retardant properties of cnf/vmt based lbl coatings deposited on polypropylene and wood-ply," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 2, pp. 1–13, Jan. 2021, doi: 10.3390/POLYM13020303.

- [70] Wood W, "Processing, wear, and mechanical properties of polyethylene composites prepared with pristine and organosilane-treated carbon nanofibers," *Materials Science*, 2012, Accessed: Jul. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/PROCESSING%2C-WEAR%2C-AND-MECHANICAL-PROPERTIES-OF-WITH-Wood/696d10cd6ceb864433bf3ca43886e7d803b8f3c0>.
- [71] S. Karmakar, "Rheological Behaviors of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, pp. 700–707, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00226-1.
- [72] "Dyneema® Composite Fabrics (DCF) and Cuben Fiber Explained | Hyperlite Mountain Gear." Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.hyperlitemountaingear.com/pages/dcf-dyneema-cuben-fiber>.
- [73] J. P. Attwood, B. P. Russell, H. N. G. Wadley, and V. S. Deshpande, "Mechanisms of the penetration of ultra-high molecular weight polyethylene composite beams," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 93, pp. 153–165, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2016.02.010.
- [74] "E-plastena.lv/polietilēns." Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: <https://e-plastena.lv/20-polietilēns-pe#/page-4>.
- [75] V. Tulatorn, S. Ouajai, R. Yeetsorn, and N. Chanunpanich, "Mechanical Behavior Investigation of UHMWPE Composites for Pile Cushion Applications," *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, pp. 1–12, Oct. 2015, doi: 10.14416/J.IJAST.2015.08.001.
- [76] K. Karthikeyan, B. P. Russell, N. A. Fleck, M. O'Masta, H. N. G. Wadley, and V. S. Deshpande, "The soft impact response of composite laminate beams," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 60, pp. 24–36, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2013.04.002.
- [77] R. Stopforth and S. Adali, "Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles," *Defence Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 186–192, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.dt.2018.08.006.
- [78] Engr. Reashad Bin Kabir and Engr. Nasrin Ferdous, "Kevlar-The Super Tough Fiber," *International Journal of Textile Science*, vol. 1, no. 6, pp. 78–83, Jan. 2013, doi: 10.5923/j.textile.20120106.04.
- [79] S. D. Salman, Z. Leman, M. T. H. Sultan, M. R. Ishak, and F. Cardona, "Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors," 2016.
- [80] E. Haro Albuja, J. A. Szpunar, and A. G. Odeshi, "Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 87, pp. 54–65, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.04.007.
- [81] S. Chocron, A. J. Carpenter, N. L. Scott, R. P. Bigger, and K. Warren, "Impact on carbon fiber composite: Ballistic tests, material tests, and computer simulations," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 131, pp. 39–56, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.002.
- [82] M. Heine, "Carbon Fibers," in *Industrial Carbon and Graphite Materials: Raw Materials, Production and Applications: Volume 1 and 2*, vol. 1–2, Wiley, 2021, pp. 603–695. doi: 10.1002/9783527674046.ch11.
- [83] C. Ulven, U. K. Vaidya, and M. V. Hosur, "Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels," *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 143–150, 2003, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00037-0.
- [84] L. Fortified Estate, "How to Bulletproof Walls." Accessed: Jul. 27, 2023. [Online]. Available: <https://fortifiedestate.com/how-to-bulletproof-walls/>.
- [85] K. Weimann, C. Adam, M. Buchert, and J. Sutter, "Environmental evaluation of gypsum plasterboard recycling," *Minerals*, vol. 11, no. 2, pp. 1–13, Feb. 2021, doi: 10.3390/MIN11020101.
- [86] C. Gaião, J. de Brito, and J. Silvestre, "Inspection and Diagnosis of Gypsum Plasterboard Walls," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 25, no. 3, pp. 172–180, Jun. 2011, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000149.

- [87] Y. Zhanga, L. Ma, S. Ren, M. Huang, Y. Wang, and Q. Zhang, "Comparative life cycle assessment between ordinary gypsum plasterboard and functional phase-change gypsum plasterboard," *Materials Science Forum*, vol. 993 MSF, pp. 1473–1480, 2020, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.993.1473.
- [88] C. Baux, Y. Mélinge, C. Lanos, and R. Jauberthie, "Enhanced Gypsum Panels for Fire Protection," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 71–77, Jan. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:1(71).
- [89] A. De Korte and H. J. H. Brouwers, "Thermal conductivity of gypsum plasterboards," in *International Conference in Prague*, Prague: Czech Technical University in Prague, Feb. 2009, pp. 158–163. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/233895675>.
- [90] Knauf, "Knauf." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.Knauf.lv/lv/produkti-un-sistemas/specialas-plaksnes/detail-page-32.html>
- [91] "Damasec Defence Systems | Ring 7023 0093." Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://defence.damasec.com/>.
- [92] DIN EN 1522 standards, *Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance*. Germany, 1999, pp. 1–9.
- [93] Maxim Popenker, "Modern Firearms." Accessed: Nov. 08, 2025. [Online]. Available: <https://modernfirearms.net/en/cartridge/9x39-2/>
- [94] NATO Armed Forces, *TECHNICAL PERFORMANCE SPECIFICATION PROVIDING FOR THE INTERCHANGEABILITY OF 9 mm × 19 AMMUNITION - AOP-4090*. 2020.
- [95] BS EN 1063:2000, *Glass in building. Security glazing. Testing and classification of resistance against bullet attack*. Great Britain, 2000.
- [96] EN-1523, *Windows, Doors, Shutters and Blinds - Bullet Resistance – Test Methods*. Belgium, 1998, pp. 1–18. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.bodyarmornews.com/wp-content/uploads/2013/10/EN-1523.pdf>
- [97] British Standard, *BS 5051-1-1988*.
- [98] UL LLC: UL 752, *Standard for bullet-resisting equipment*. 2005.
- [99] ASTM D905-08, *Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*. American Society of Testing and Materials. 2013.
- [100] U.S. Department of Justice, *NIJ Standart-0108.01 Ballistic Resistant Protective Materials*. 1985.
- [101] N. Engineering and E. Warfare Center, "UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) DESIGN TO RESIST DIRECT FIRE WEAPONS EFFECTS APPROVED FOR PUBLIC RELEASE; DISTRIBUTION UNLIMITED," 2008. [Online]. Available: <http://dod.wbdg.org/>.
- [102] NATO, "Standardization Agreement. Procedures for evaluating the protection levels of logistic and light armoured vehicles for ke and artillery threats," Jan. 2004.
- [103] P. Weinacht, J. Newill, and P. Conroy, "Conceptual Design Approach for Small-Caliber Aeroballistics With Application to 5.56-mm Ammunition," p. 74, Sep. 2005.
- [104] A. S. Aarønaes and H. Nilsson, "Dynamic response of pipe rack steel structures to explosion loads," 2014.
- [105] D. R. Christman and J. W. Gehring, "Analysis of High-Velocity Projectile Penetration Mechanics," *J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. 1579–1587, Mar. 1966, doi: 10.1063/1.1708570.
- [106] J. López-Puente, A. Arias, R. Zaera, and C. Navarro, "The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1–4, pp. 321–336, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014.
- [107] Rosenberg Z and Dekel E, *Terminal ballistics*, 2nd ed., vol. XIV. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

- [108] H. M. Wen, "Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes," *Compos. Struct.*, vol. 49, no. 3, pp. 321–329, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00064-7).
- [109] J. Melderis, *Ieroču un munīcijas unbūves un darbības principi - Latvian [Principles of construction and operation of weapons and ammunition]*. 2008. Accessed: Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://virsnieki.lv/wp-content/uploads/2022/04/Ierocu-un-municijas-uzbuve-un-darbibas-principi.pdf>.
- [110] C. Andres and W. Boughers, "AN ANALYSIS OF V 50 BALLISTIC LIMIT RESULTS ADJUSTING 1ST SHOT VELOCITY, STEP-UP STEP-DOWN INCREMENTS, TRUTH CHARACTERISTICS AND VELOCITY CONTROL DISTRIBUTIONS."
- [111] N. Mohd Yusof, P. Md Tahir, S. H. Lee, M. A. Khan, and R. Mohammad Suffian James, "Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types," *Journal of Wood Science*, vol. 65, no. 1, p. 20, 2019, doi: 10.1186/s10086-019-1799-z.
- [112] C. A. Finch, "Advanced wood adhesives technology. A. Pizzi. Marcel dekker, New York, Basel, 1994. pp. viii + 289, price US\$115.00. ISBN 0-8247-9266-1," *Polym. Int.*, vol. 39, no. 1, p. 78, Jan. 1996, doi: <https://doi.org/10.1002/pi.1996.210390117>.
- [113] R. Rikards and A. Čāte, *Galīgo elementu metode*, vol. 1. Rīgas Tehniskā universitāte, 2001.
- [114] P. Karthick and K. Ramajeyathilagam, "Numerical study on ballistic impact behavior of hybrid composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 59, pp. 995–1003, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.270.
- [115] P. S. Rama Sreekanth and S. Kanagaraj, "Influence of MWCNTs and gamma irradiation on thermal characteristics of medical grade UHMWPE," *Bulletin of Materials Science*, vol. 37, no. 2, pp. 347–356, 2014, doi: 10.1007/S12034-014-0640-Y.
- [116] E. Barone, E. Velicko, B. Gaujena, and M. Vilnitis, "Plywood Panel with UHMW Polyethylene Board Ballistic Resistance," *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 233–243, Jun. 2023, doi: 10.5755/j01.sace.32.1.32822.



Elīna Barone (dzim. Indriksone) dzimusi 1987. gadā Bauskā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi inženierzinātņu bakalaura (2011) un profesionālo maģistra (2013) grādu būvniecībā. 2012. gadā bijusi *Erasmus+* praksē *Fraunhofer* institūtā Drēzdenē, Vācija. Patlaban ir būvmehānikas un būvkonstrukciju docētāja RTU un Rīgas Būvniecības koledžā.

Savu profesionālo karjeru apvieno ar bērnu audzināšanu un sporta aktivitātēm vidējo un garo distanču skriešanā.