

Bloka formas optimizācija

Alexander Janushevskis, Riga Technical University, Anatolijs Melnikovs, Riga Technical University

Kopsavilkums. Šajā darbā tiek piedāvāta jauna metodika dohta betona bloka formas optimizācijai, izmantojot metamodeļus globālo polinomiālo aproksimāciju veidā. Metodika paredz komerciālās CAD programmatūras SolidWorks, kā arī RTU izstrādātās programmas EDAOpt eksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai un optimizācijai pielietošanu. Metodika ir izklāstīta uz praktiska piemēra bāzes. Tiek meklēta dohta betona bloka forma, izvērtējot materiālu izlietojumu no stiprības un siltumizolācijas viedokļiem. Kā bloka termomodelis kalpo viens bloks, kurā ievērtēta bloka materiālu siltumvadāmība un konvekcijas process uz bloka ārējo sienas. Kā bloka stiprību aprakstošie modeļi kalpo viena bloka modelis ar dažādiem robežnoteikumiem un dažāda mūrējuma sienu modeļi. Bloka izgriezuma forma tiek uzdots ar gludu splaina līniju, kuru savukārt definē ar 7 atbalsta punktu palīdzību. Vispirms tiek izplānoti eksperimenti atbalsta punktu izvietojumam. Tālāk tiek veikti datoreksperimenti ar GEM programmatūru. Iegūto atbilstošu rezultāti tiek aproksimēti un tālāk izmantoti optimizācijai. Optimizācijas rezultātā tiek iegūta alternatīva bloka izgriezuma forma, kas salīdzinot ar eksistējošo dod ~8% materiāla ietaupījuma. Salīdzinot ar homogenizācijas metodi, izstrādātā metodika ļauj būtiski samazināt nepieciešamos skaitļošanas resursus.

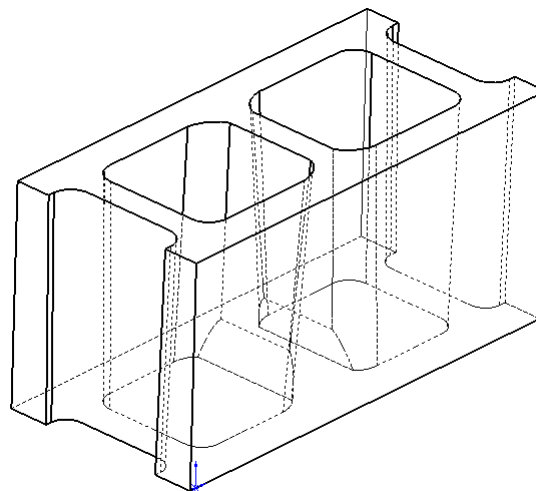
Atslēgas vārdi: eksperimentu plānošana, formas optimizācija, metamodelis.

I. IEVADS

Mūsdienās celtniecībā plaši izmanto dohtus betona blokus (1. att.). Tie tiek izgatavoti no portlandcements, ūdens un atbilstošiem pildmateriāliem ar vibropresēšanas metodi [1]. Pētīt dažādas betona receptūras un pilnveidojot tehnoloģisko procesu [2], ir iespēja uzlabot bloka nepieciešamās īpašības. Par vienu no alternatīviem dohta betona bloka uzlabošanas risinājumiem var uzskatīt tā iekšējās izgriezuma formas optimizāciju. Prakse rāda, ka, projektējot dohtu formu, ir nepieciešams ievērot ne tikai betona bloka stiprību, bet arī tā siltumizolējošās īpašības [3]. Ņemot vērā pieejamos izejmateriālus un Latvijas meteoroloģiskos laika apstākļus, ir iespējams izprojektēt blokus, kuri ir vispiemērotākie vietējai celtniecībai.

No materiāla izlietojuma viedokļa optimālas konstrukcijas parasti ir pilnīgi noslogotas konstrukcijas, proti tādas, kurās viss materiāls ir noslogots ar lietderīgo slodzi. Lai iegūtu šādas konstrukcijas tiek veikta topoloģijas optimizācija, izmantojot tā saukto homogenizācijas metodi [4, 5, 6]. Konstrukcijas forma tiek modificēta, balstoties uz iegūtajām sprieguma vērtībām galīgajos elementos (GE). Konstrukcija tiek iteratīvi mainīta, atmetot mazāk noslogotos elementus. Tātad tiek pēfīts optimālais izotropa materiāla izvietojums konstrukcijā. Ja galīgā elementa stāvoklis ir 1, tad elements ir, ja - 0, tad elementa nav. Elementa stāvoklis ir atkarīgs no tā, kādā

attiecībā tajā ir materiāls un tukšums, proti, jo mazāk materiāla, jo mazāks ir elementa stingums un jo mazāki spriegumi. Pēc noteiktas robežvērtības sasniegšanas elementa stāvoklis tiek pieņemts par 0. Lai iegūtu pēc iespējas gludākus risinājumus atmetamo elementu skaitam jābūt stipri ierobežotam, pretējā gadījumā, atmetot daudz elementu, var rasties pārrāvumi konstrukcijā un modelis kļūst singulārs. Vienā iterācijā atmet ap 1% elementu. Kā kritērijs parasti kalpo bezizmēra lielums PI (Performance Index) - efektivitātes rādītājs, kas, piemēram optimizējot materiāla izlietojumu, ir maksimālo spriegumu konstrukcijā un sākotnējā konstrukcijas tilpuma reizinājuma attiecība pret šo lielumu reizinājuma vērtību tekošajā iterācijā. Kā ierobežojumi var kalpot konstrukcijas stingums, deformācijas, pārvietojumi, spriegumi, pašsvārstību frekvences u.c. Bez tam var tikt uzlikts aizliegums mainīt noteiktu konstrukcijas apgabalu (freezing), kā arī simetrijas piespiedu realizēšana un elementu apvienošana grupās, lai pēc iespējas vienmērīgāk tiktu noņemts vai pievienots materiāls.



1. att. Columbia Kivi bloka forma

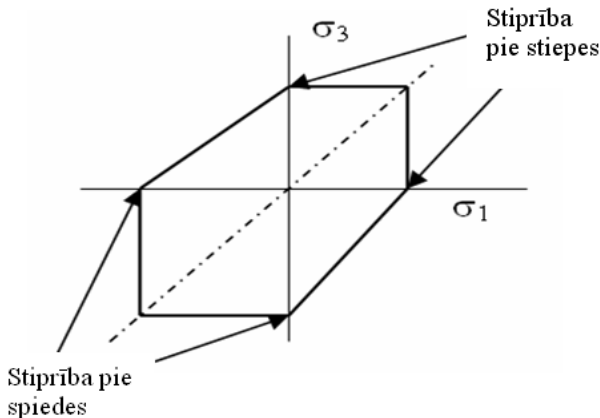
Komerčiālās programmatūras Genesis [7] versija 7.5, kurā homogenizācijas metode ir realizēta, atļauj formulēt līdz pat 2,5 miljoniem optimizācijas parametru. Tas dod iespēju atrast sarežģītu objektu (automobiļu virsbūvju, raķešu korpusu u.tml.) optimālo topoloģiju. Metode dod ļoti efektīvus risinājumus čaulveida objektiem no metāla loksniem. Taču cietu ķermeņu gadījumā metodes galvenais trūkums ir bieži vien tehnoloģiski grūti realizējamās robainas objekta formas iegūšana un milzīgais darbietilpīgums.

Mūsu pieeja ir sekojoša: pēc iespējas plašāk izmantot vienkāršotus augstas kvalitātes metamodeļus, kas neprasi tik milzīgus risināšanas resursus un izmantotu esošo GEM,

aprosimācijai un optimizācijai programmatūrā. Darbā izstrādājamā metodika paredz atbalsta punktu, kas kalpo gludu formu iegūšanai ar NURBS [8], plānošanu. Tālāk ar GEM tiek rēķinātas nepieciešamās sistēmas atbildes. Tad, izmantojot šīs atbildes, tiek būvēti metamodeļi, kuriem tiek meklēti ekstrēmumi. Tādā veidā tiek atrastas tikai tehnoloģiski viegli realizējamas gludas formas. Negludas formas netiek analizētas un ir izslēgtas no meklēšanas procesa. Rezultātā būtiski samazinās resursu patēriņš. Izstrādājamā metodika balstās uz secīgu CAD/CAE līdzekļu - SolidWorks [9, 10, 11] un EDAOpt [12] programmatūru izmantošanu. Līdz ar to formas optimizācija ir praktiski realizējama bez super jaudīgu skaitļotāju tīkla izmantošanas.

II. IZMANTOTĀIS STIPRĪBAS KRITĒRIJS

Šajā darbā tiks analizēta betona bloku stiprība. Tā kā betona īpašības atbilst trauslam materiālam, kuram ir dažāda izturība spiedē un stiepē, tad ir jāizmanto Mora-Kulona kritērijs. Programmatūra CosmosWorks [10] ļauj definēt dažāda veida materiālus un to stiprības kritērijus. Trauslam materiālam nav izteiktas tecēšanas robežas, bet svarīga ir stiprības robeža pie stiepes. Drošības koeficients (*FOS*) pēc Mora-Kulona kritērija tiek definēts, kā parādīts 2. attēlā [11]. *FOS* koeficients būs lielāks par 1, ja stiepes un spiedes spriegumu vērtības neiziet no figūras iekšējā laukuma.



2. att. Mora-Kulona ekvivalentā sprieguma kritērijs

Saskaņā ar šo kritēriju drošības koeficienta atkarību no σ_1 un σ_3 var izteikt sekojošā veidā:

$$\begin{aligned} FOS &= (\sigma_1 / \sigma_{ST} + \sigma_3 / -\sigma_S)^{-1}, \text{ ja } \sigma_1 \geq 0; \sigma_3 \leq 0, \\ FOS &= \sigma_{ST} / \sigma_1, \text{ ja } \sigma_1 > 0; \sigma_3 > 0, \\ FOS &= \sigma_S / \sigma_3, \text{ ja } \sigma_1 < 0; \sigma_3 < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

kur σ_{ST} - stiprība pie stiepes
 σ_S - stiprība pie spiedes,
 σ_1, σ_3 - galvenie spriegumi konstrukcijā.

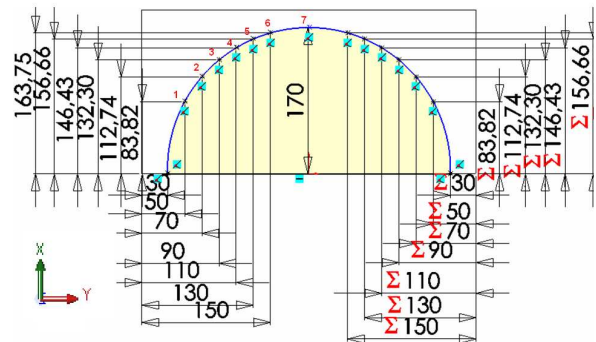
III OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA NOSTĀDNE

Bloka izgriezuma formas optimizācijas uzdevums tiek parametrizēts, izvēloties noteiktu skaitu NURBS atbalsta

punktu. Optimizācija tiek veikta ievērojot svarīgākos kritērijus. Mūsu gadījumā tika risināti sekojoši nelineārās programmēšanas uzdevumi: 1) maksimizēt bloka minimālo drošības koeficientu pie ierobežojuma uz mūra iekšējās sienas minimālo vidējo temperatūru, 2) maksimizēt bloka iekšējās sienas vidējo temperatūru, 3) minimizēt bloka masu, 4) maksimizēt bloka minimālo drošības koeficientu. Par sienas vidējo temperatūru tika pieņemts vidējais aritmētiskais no temperatūras vērtībām visos mezgla punktos, kas izvietoti uz bloka iekšējās sienas.

IV. BLOKA IZGRIEZUMA FORMAS DEFINĒŠANA

Bloks ir veidots no betona čaulas, kurā iepildīta termoizolējoša masa, piemēram, ekovate. Tā telpiskais ģeometriskais modelis izveidots ar CAD programmatūru SolidWorks [9]. Betona bloka gabarīti ir pieņemti vienādi ar 390x190x190 mm.



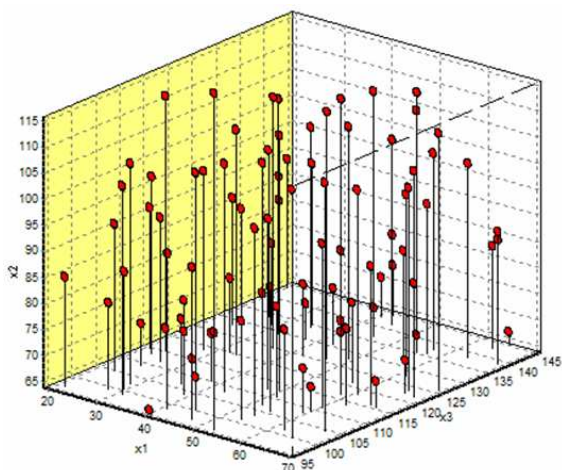
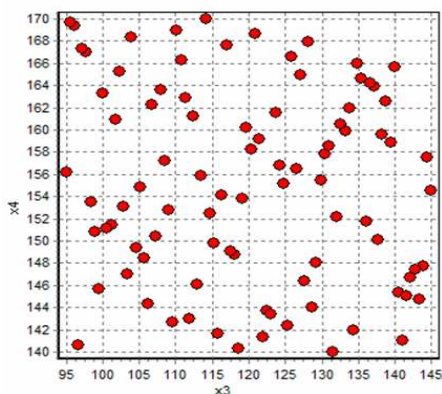
3. att. Izgriezuma bāzes formas izmēri

Sākumā ir pieņemts, ka izgriezumam ir nošķelta cilindra forma. Izgriezums izveidots ar „extrude cut” iezīmi no plakanas figūras, kuras izmēri ir parādīti 3. attēlā. Forma ir uzdots ar 7 atbalsta punktu koordinātām, kuri tiek izmantoti NURBS splainu līnijas veidošanai. Atbalsta punktu koordinātes *Y* šim objektam ir pieņemtas konstantas un optimizācijas uzdevumā netiek mainītas, bet *X* koordinātes ir iespējams mainīt noteiktos intervālos, veidojot dažāda veida izgriezumus. Šīs septiņas mainīgās atbalsta punktu koordinātes ir mūsu optimizācijas parametri.

Izgriezuma labās puses izmēri (3. att.) ir sasaistīti ar kreisās puses izmēriem tā, ka vienmēr tiek veidota simetriska figūra. Lai izmantotu atbildes virsmu metodi [12], ir nepieciešams izveidot eksperimenta plānu, kurš nosaka atbalsta punktu mainīgās koordinātes. Tiek definēti sekojoši 7 koordinātu variēšanas diapazoni milimetros:

$$\begin{aligned} 64 &< X_1 < 125 \\ 94 &< X_2 < 150 \\ 115 &< X_3 < 160 \\ 133 &< X_4 < 166 \\ 147 &< X_5 < 170 \\ 156 &< X_6 < 170 \\ 162 &< X_7 < 175 \end{aligned} \quad (2)$$

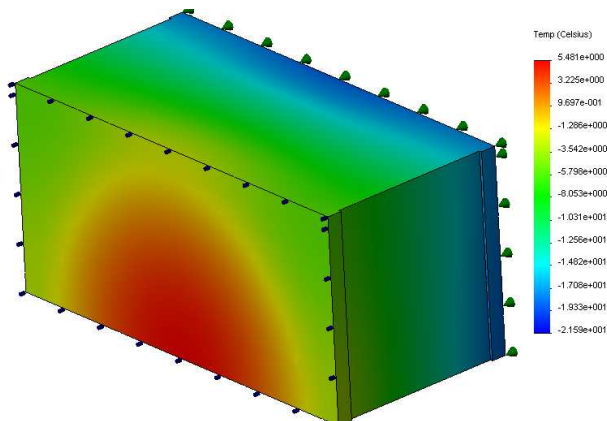
Ar programmatūru EDAOpt tika izveidots D-optimālais Latīņu Hiperkuba eksperimentu plāns 7 mainīgajiem 90 punktos. Ģenerētā plāna dažas projekcijas ir parādītas 4. attēlā.



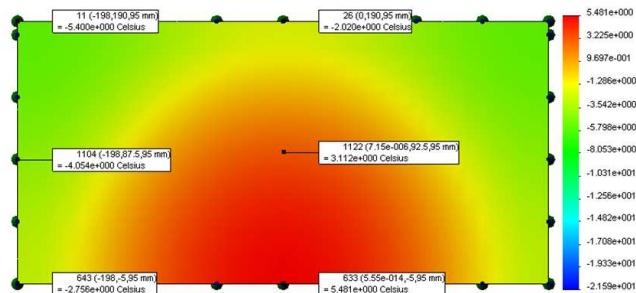
4. att. Eksperimentu plāna projekcijas x_3 - x_4 un x_1 - x_2 - x_3

V. STACIONĀRAIS BLOKA TERMO APRĒĶINS

Termo aprēķini tiek veikti ar CosmosWorks programmatūru un tiek analizēts viens bloks. Tiek pētīti 90 iekšējā izgriezuma formas gadījumi, kuri izveidoti saskaņā ar iepriekš apskatīto eksperimentu plānu. Aprēķinos tiek ievērota siltumvadāmība objekta materiālos un konvekcija [13] uz bloka ārējās virsmas,



5. att. Izveidotais bloka termomodelis



6. att. Bloka iekšējās sānu virsmas temperatūra uzdotos mezgla punktos

bet netiek ņemta vērā siltuma pāreja radiācijas starojuma dēļ, kā arī konvekcija uz bloka iekšējās virsmas. Visos 90 gadījumos ir izpētīti bloka siltumizolācijas raksturojumi. Bloka 3D modelim uz iekšējās puses tiek pielikts 5 W siltuma avots (sk. attēlu 5), kurš darbojas pa visu iekšējās skaldnes virsmu. Ir pieņemts, ka bloka otra puse kontaktējas ar āra gaisu, kura temperatūra ir -20°C , respektīvi, bloka ārējā siena zaudē siltumu gaisa konvekcijas dēļ (konvekcijas koeficients $25 \text{ W/m}^2\text{K}$). Uzdotas sekojošas parametru vērtības ekovatei: blīvums - 40 kg/m^3 , siltumvadītspēja - 0.038 W/mK un betonam: blīvums - 2.4 t/m^3 , siltumvadītspēja - 0.53 W/mK .

Tiek rēķināts stacionārs termouzdevums un noteikta temperatūra visos mezgla punktos uz bloka iekšējās virsmas (sk. 6. att.) un aprēķināta tās vidējā vērtība. Tiek pieņemts, ka jo augstāka šī vērtība tiek iegūta, jo labākas siltumizolācijas īpašības ir blokam.

VI. ATBILŽU APROKSIMĀCIJA UN BLOKA IZGRIEZUMA FORMAS OPTIMIZĀCIJA

Optimizācijas uzdevuma risināšanai un aproksimācijai tiek lietota RTU izstrādātā programmatūra EDAOpt [12], kurā tiek ievadīti ar CosmosWorks iegūtie aprēķinu rezultāti. Lai izveidotu metamodeļus, tiek saskaņā ar eksperimenta plānu izmantoti ar CosmosWorks veiktie termoaprēķini (sk. p. 5) un bloka stiprības aprēķini. Tātad pirms optimizācijas veikšanas ir nepieciešams izveidot rezultātu aproksimāciju. Izvēlēsimies tādas aproksimācijas, kurām, Sigma Cross kļūda [12] būtu

Functions Yt.	Masa	VidTemp	Tmax
Sigma Cross	0.047593	0.174771	0.186473
Sigma Cross%	9.33%	9.86%	9.42%
Sigma	0.025723	0.094596	0.103230
Sigma%	5.044862	5.334694	5.214758
Sigma0	0.033879	0.125139	0.135962
Sigma0%	6.644476	7.057137	6.868242
MeanExpValue	16.296345	13.190206	25.468529
StDev of Exp	0.509880	1.773227	1.979576
Exp. Range	2.086020	7.531700	8.370000
MaxError	-0.065435	0.204460	0.235522
Bad Point No.	13	58	58
Max Rel Error	0.40%	1.68%	0.88%
BadRelPointNo.	13	40	58
No.ofActualExp	85	84	85

7. att. Aproksimēto funkciju precizitātes rādītāji

minimāla. Šajā gadījumā izvēlējamies globālo kvadrātisko aproksimāciju. Iegūto aproksimāciju precizitātes rādītāji parādīti 7. attēlā, kur ir redzams, ka vidējās temperatūras vērtība tiek aproksimēta ar 9.86% Sigma Cross.

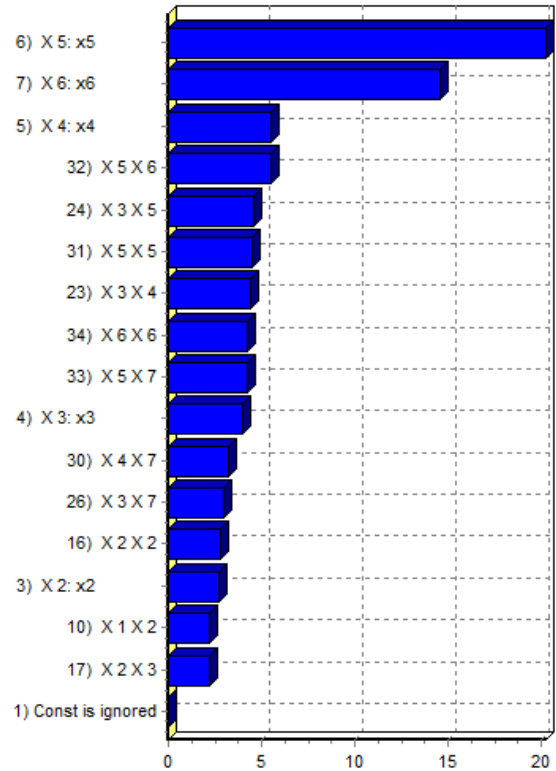
Globālās kvadrātiskās aproksimācijas koeficientu ietekmi uz vidējo temperatūru var novērot 8. attēlā, kur parādītas faktoru koeficientu vērtības, kuru ietekme uz vidējo temperatūru ir lielāka par 2%. Ir redzams, ka atbalsta punkti, kuri atrodas tuvāk doba bloka centram (X7, X6), vairāk ietekmē bloka siltumizolējošās īpašības. Koordinātes nozīmīgums pakāpeniski samazinās, tuvojoties bloka sāniem. X1 un X2 ietekme uz siltumvadību ir mazāka par 2%. Tāpēc, meklējot bloku ar labāku siltumizolāciju, ir nepieciešams labāk izpētīt bloka centrālo daļu – paplašināt šo koordinātu pieļaujamās robežas.

Analoģiski tiek atrasta atbalsta punktu koordinātu ietekme uz doba bloka masu (9. att.). Ir redzams, ka bloka masu galvenokārt ietekmē X5 un X6. Pārējo faktoru ietekme ir būtiski mazāka.

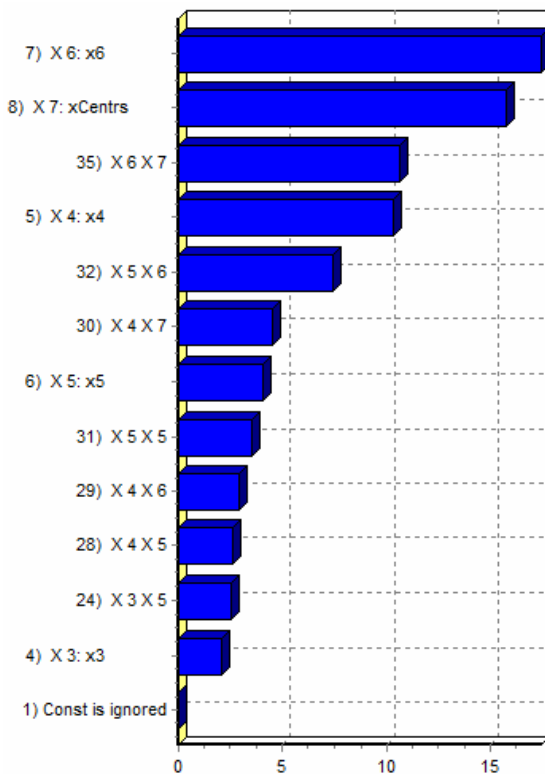
Atbalsta punktu koordinātu ietekme uz bloka minimālo drošības koeficientu parādīta 10. attēlā. Redzams, ka X5 faktora nozīmīgums ir lielāks gan Min FOS, gan iepriekš apskatītajā bloka masas aproksimācijas gadījumā.

Izmantojot dažādus kritērijus, tika atrastas bloka izgriezuma formas (sk. 11. att.). Ar 1. numuru parādīta izgriezuma forma, kurai minimālais drošības koeficients ir maksimāls. Optimizējot metamodeli, iegūtā vērtība atšķiras no GEM modeļa iegūtās vērtības par 33%.

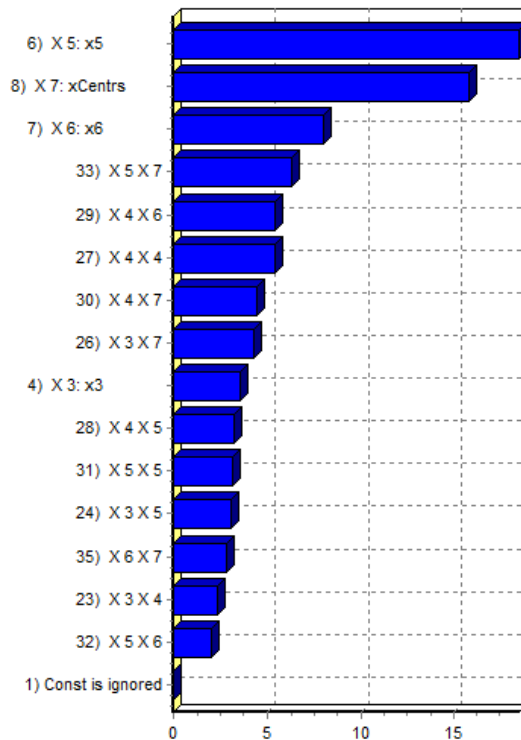
Otrajā variantā apskatīts analoģisks kritērijs. Tikai ir pielikts viens papildus ierobežojums, proti, ka vidējai



9. att. Bloka masas aproksimācijas atkarība no atbalsta punktu koordinātēm







8. att. Temperatūras aproksimācijas atkarība no atbalsta punktu koordinātēm



10. att. Min FOS aproksimācijas atkarība no atbalsta punktu koordinātēm

temperatūrai uz bloka iekšējās sienas jābūt vismaz 20°C. Šajā gadījumā kļūda ir par 17% mazāka.

Trešajā variantā kritērijs ir maksimālā vidējā temperatūra. Te aprēķini parādīja labu sakrītību ar GE metodi. Minimālās masas kritērija variantā un maksimālās T_{vid.} variantā tiek

Nr	Kritērijs	Krit.v. Aprox	Krit.v. GEM	Kļūda %	Iegūtā forma
1	Maksimālais FOS:	1.465	1.1	33	
2	Max FOS pie Tvid ne mazākas par 20°C	1.3438	1.16209 20.382°C	15.8	
3	Max Tvid	22.465	22.942	2.1	
4	MinMasa	14.06	14.13114	5	

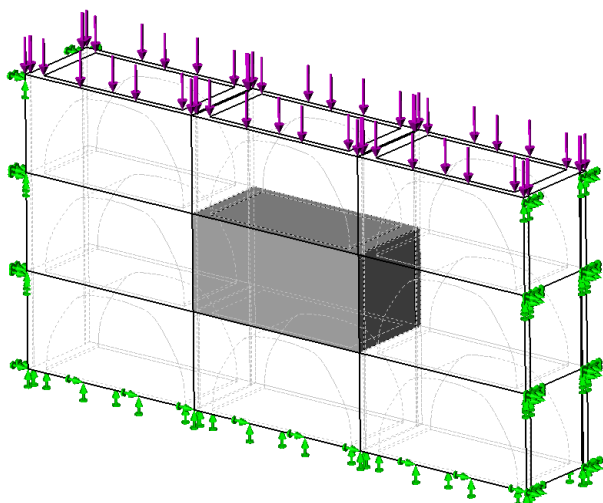
11. att. Iegūtās izgriezumu formas pie dažādiem optimizācijas kritērijiem

atrasta forma, kurai ir maksimāls izgriezums, kas neapšaubāmi ir pilnīgi loģisks rezultāts.

Diemžēl iegūtā 33% kļūda FOS gadījumā nav pieņemama. To var izskaidrot ar bloka stiprības aprēķina modeļa nepilnību, proti, ar idealizēto robežnoteikumu neatbilstību reālajam bloka sloojumam. Tāpēc bloka stiprības aprēķinu veikšanai modelis tiek pilnveidots, proti, viena bloka vietā tiek apskatīts mūris, kurā iemūrēti 9 bloki.

VII. MŪRA APRĒĶINU MODEĻA IZVEIDE STIPRĪBAS PĀRBAUDEI

Kā parādīja iepriekšējie aprēķini, izveidotajam betona bloka modelim ir nepieciešams veikt uzlabojumus. Pirmkārt, ir nepieciešams samazināt idealizēto robežnoteikumu ietekmi uz iegūtajiem rezultātiem. Tāpēc aprēķiniem tiek izmantoti 9 vienādi bloki, kas veido mūri (sk. 12. att.).



12. att. Bloku sienas aprēķinu modelis

Modificējot viena bloka izgriezuma formu, izmaiņas atspoguļojas arī visos pārējos blokos. Pie liela saplānoto eksperimentu skaita tas ievērojami saīsina jaunas formas modeļa sagatavošanas laiku. Pieņemts, ka mūrējot tiek veidota gaisa šķirkārta, līdz ar to bloku mijiedarbība notiek pa attiecīgo skaldņu perimetru 20 mm platās joslās. Uz mūra apakšējās un sānu skaldnēm robežnoteikumi arī pielikti joslās pa 20 mm, proti, pārvietojumi uz šīm joslām pielīdzināti

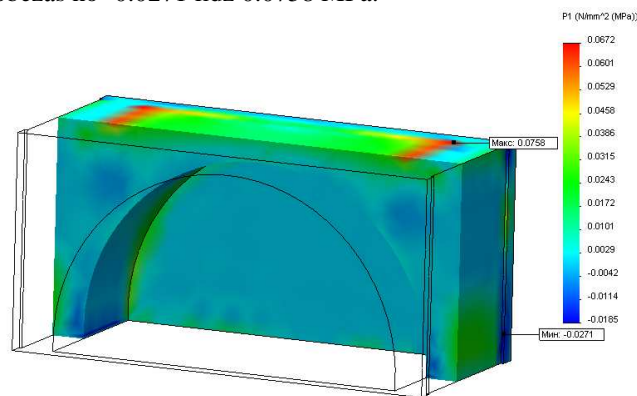
nullei. Lai izvairītos no lielu spriegumu parādīšanās efekta augšējo šķautņu tuvumā uz mūra sānu skaldnēm, tiek atstātas 15 mm brīvas joslas no mūra augšas. Vispirms tiek risināts stiprības uzdevums pie mūra statiska slojuma. Konstantā slodze ir vienmērīgi pielikta uz mūra augšējās daļas pa 20 mm joslām, kuras atbilst bloku mūrējumam ar gaisa šķirkārta. Stiprības rādītāji tika analizēti mūra centrā izvietotajam blokam, bet pārējie bloki aprēķinu shēmā kalpo, lai mazinātu idealizēto robežnoteikumu ietekmi uz rezultātiem.

Tika pieņemts, ka mūra bloku un šuvju materiāls ir ar vienādām īpašībām. Aprēķiniem izmantoti parastā betona raksturojumi pēc 28 diennakšu cietēšanas, kuru skaitliskās vērtības ņemtas no rokasgrāmatas [14]. CosmosWorks programmā tika definēti sekojoši parametri: elastības modulis $E_X = 21000$ MPa, Puasona koeficients $\nu_{XY} = 0.2$, bīdes modulis $G_{XY} = 90407$ MPa, materiāla blīvums $\rho = 2400$ kg/m³, stiprības robeža pie stiepes $\sigma_{ST} = 2.1$ MPa, stiprības robeža pie spiedes $\sigma_S = 21$ MPa.

Statisko aprēķinu precizitāti ietekmē tīkla kvalitāte, ko var palielināt ar h un p adaptīvajām metodēm [10]. Tās veido tīkla GE mazākus par iestatīto globālo elementa izmēru ķermeņa apgabalos ar lielāku iespējamo kļūdu. H- adaptīvā tīklojuma gadījumā SolidWorks programma pati atrod apgabalus, kuros nepieciešams smalcināt tīklojumu. Ir iespēja uzdot no 2 līdz 5 rēķināšanas cikliem. Tas nozīmē, ka programma atbilstošo skaitu reizes pārrēķina uzdevumu, lai uzlabotu rezultātu precizitāti. Izmantojot p-adaptīvo metodi, ir iespēja definēt papildus parametru: GE minimālo un maksimālo aproksimācijas polinoma kārtu.

VIII. MŪRA CENTRĀLĀ BLOKA GALVENO SPIEGUMU ANALĪZE

Izmantojot iepriekš izveidoto aprēķinu modeli (sk. 12. att.), tiek izrēķināti 1. un 3. galvenie spriegumi. 13. attēlā ir redzams, ka bloka materiālā 1. galvenais spriegums mainās robežās no -0.0271 līdz 0.0758 MPa.



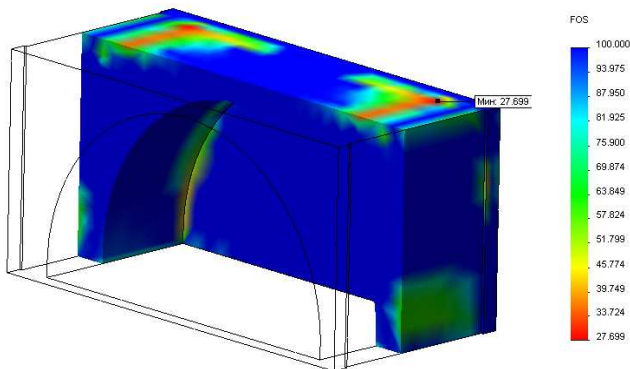
13. att. 1. Galvenais spriegums σ_1

Bloka lielākajā materiāla daļā σ_1 vērtības ir negatīvas, bet stiepes spriegumi prevalē bloka augšdaļas zonā virs izgriezuma velles, proti, maksimālā vērtība tiek sasniegta uz bloka augšējās virsmas. Mūsu gadījumā tā ir potenciāli bīstama zona, jo analizējamais materiāls ir betons, kura robežizturība stiepē ir daudzārt mazāka par robežizturību spiedē.

IX. MŪRA CENTRĀLĀ BLOKA DROŠĪBAS KOEFICIENTS FOS UN TĀ OPTIMIZĀCIJAS REZULTĀTI

Visos 90 eksperimenta plāna punktos tika atrasts drošības koeficients FOS pēc Mora-Kulona kritērija. Sākumā atrasts drošības koeficienta vērtību sadalījums bāzes izgriezuma formai. 14. attēlā ir parādīta puse no mūra centrālā bloka.

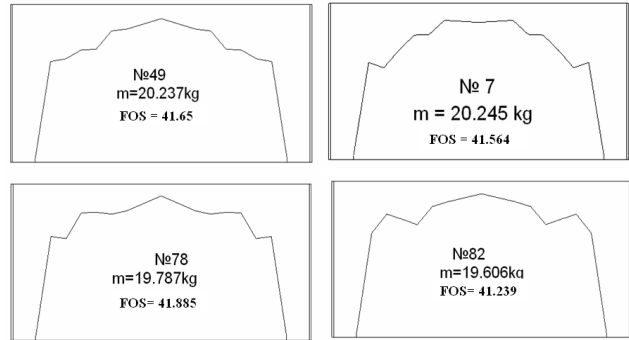
Koeficienta FOS vērtību sadalījums ir līdzīgs σ_1 vērtību izkārtojumam 13. attēlā. Vidējās bloka daļas drošības koeficients ir lielāks par 90, kā arī ir citas mazāk noslogotas vietas. Tāpēc ir iespēja palielināt izgriezuma formu, samazinot betona masas patēriņu. Mazākā FOS vērtība ir 27.7 un tā atrodas apgabalā, kur izbeidzas kontakts ar augstāk izvietoto bloku.



14. att. Drošības koeficienta FOS vērtību sadalījums centrālajam blokam ar bāzes formu

№	FOS	№	FOS	№	FOS
1	36.73	31	38.571	61	36.21
2	38.704	32	40.534	62	35.993
3	37.403	33	40.342	63	39.857
4	39.482	34	35.156	64	35.91
5	39.552	35	36.699	65	36.436
6	37.651	36	39.549	66	39.166
7	41.564	37	36.12	67	39.173
8	37.992	38	37.089	68	35.281
9	39.089	39	38.852	69	35.413
10	35.234	40	37.606	70	40.856
11	34.282	41	40.441	71	37.869
12	37.811	42	35.89	72	37.24
13	40.788	43	36.169	73	35.81
14	35.564	44	40.673	74	34.111
15	39.772	45	38.479	75	34.55
16	38.453	46	35.965	76	40.690
17	40.427	47	36.496	77	38.492
18	36.463	48	38.642	78	41.885
19	36.079	49	41.65	79	38.285
20	38.527	50	40.592	80	38.321
21	39.296	51	39.279	81	35.629
22	35.114	52	37.182	82	41.239
23	38.696	53	37.413	83	40.666
24	38.104	54	33.904	84	36.203
25	36.335	55	37.042	85	35.028
26	34.677	56	38.46	86	38.827
27	35.326	57	40.54	87	40.503
28	40.705	58	37.614	88	35.619
29	40.329	59	36.064	89	37.517
30	36.372	60	40.72	90	40.147

15. att. Aprēķinātās koeficienta FOS vērtības



16. att. Bloku iekšējā izgriezuma atbalsta punktu izvietojumi ar lielākajām minimālo FOS vērtībām

Aprēķināsim koeficienta FOS vērtības saskaņā ar eksperimenta plānu visiem 90 gadījumiem. Rezultāti apkopoti 15. attēlā. Tika iegūtas minimālās koeficienta FOS vērtības diapazonā 34 - 42.

Četras formas ar vislielāko minimālo drošības koeficientu ir parādītas ar trekniem burtiem. Aprēķini parādīja, ka visos gadījumos bīstamākā vieta atrodas apmēram vienā un tai pašā apgabalā līdzīgi kā bāzes blokam.

Bloka izgriezuma atbalsta punktu izvietojumi ar lielākajām drošības koeficientu vērtībām ir parādīti 16. attēlā. Katram blokam ar SolidWorks ir precīzi noteikta masa. Analizējot iegūtos datus, ir atrasts, ka bloka masa atkarībā no izgriezuma formas mainās diapazonā no 19.503 līdz 21.138 kg vai 1.635 kg robežās.

Iegūtie rezultāti tiek izmantoti, lai izveidotu bloka metamodeli programmatūrā EDAOpt. Izmantojot aproksimācijas, tika atrasts optimums kritērijam: maksimālais minimālais drošības koeficients $FOS = 42.51$. 17. attēlā redzamas iegūtās izgriezuma formas atbalsta punktu koordinātes. Tās tika izmantotas, lai sarēķinātu bloka ar optimālo izgriezuma formu rādītājus ar GEM programmatūru Cosmos, izmantojot uzlaboto mūra modeli (sk. p. 7). Šoreiz atšķirībā no p. 6 rezultātiem GEM aprēķini parādīja negaidīti

Indices No	Min	Type	Max	Criterion=	-42.511925
1)X1:	64	0	125	1)X1=	125
2)X2:	94	0	150	2)X2=	143.16381
3)X3:	115	0	160	3)X3=	160
4)X4:	133	0	166	4)X4=	166
5)X5:	147	0	170	5)X5=	170
6)X6:	156	0	173	6)X6=	159.72918
7)X7:	162	0	175	7)X7=	175
8)Y1: Mizes	0	0	0	8)Y1=	0.18494217
9)Y2: URES	0	0	0	9)Y2=	1.5468359
10)Y3: ESTR	0	0	0	10)Y3=	5.2100792
11)Y4: FOS	0	0	0	11)Y4=	41.511925
12)Y5: P1min	0	0	0	12)Y5=	-0.024066791
13)Y6: P1max	0	0	0	13)Y6=	0.049916471
14)Y7: P3Min	0	0	0	14)Y7=	-0.2087049
15)Y8: P3max	0	0	0	15)Y8=	0.014591639
16)Y9: Masa	0	2	19	16)Y9=	18.999998

17. att. Ar EDAOpt atrastais optimums pie kritērija maksimālais min FOS

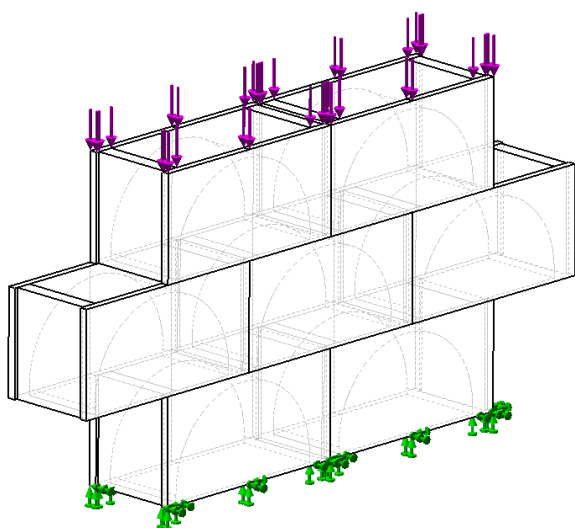
labu sakritību ar izveidoto metamodeli ($FOS = 42.33$). Iegūtā aprēķinu kļūda ir 0.43%.

X. MŪRĒŠANAS TEHNOĻIJAI ATBILSTOŠS APRĒĶINU MODELIS

Tālāk precizēsīm bloka modeli stiprības aprēķinu veikšanai. 18. attēlā parādīts sienas mūrējums, kas veikts ar Columbia Kivi blokiem. Redzams, ka bloki tiek sastiprināti ar mūrjavu joslās, pie kam starp bloku kārtām šķērsvirzienā mūrjava netiek lietota, lai nepasliktinātu sienas siltumizolējošās īpašības. Šādai mūrēšanas tehnoloģijai atbilstošais aprēķinu modelis parādīts 19. attēlā, kurā 7 bloki salikti kopā ar nobīdi un atbalstīti no apakšas pa 30 mm joslām, kuri imitē saķeri ar mūrjavas šuvi. Starp blokiem izveidotas 30 mm platas vertikālas šuves. No augšas uz nākamās kārtas atbalsta virsmu mūrī ir pielikts vienmērīgi izkliedēts 6000 N liels normālais spēks. Sākumā mūrī tiek veidots no blokiem, kuriem ir bāzes izgriezuma forma. Kā parādīja aprēķini, rezultāti šai gadījumā ir atšķirīgi no iepriekš apskatītās mūra shēmas ar precīzi viens virs otra saliktiem blokiem.

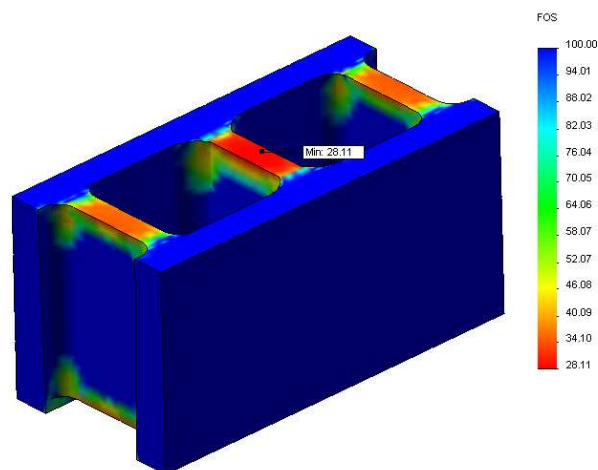


18. att. Mūrī no Columbia Kivi blokiem



19. att. Aprēķinu modelis ar nobīdītiem blokiem

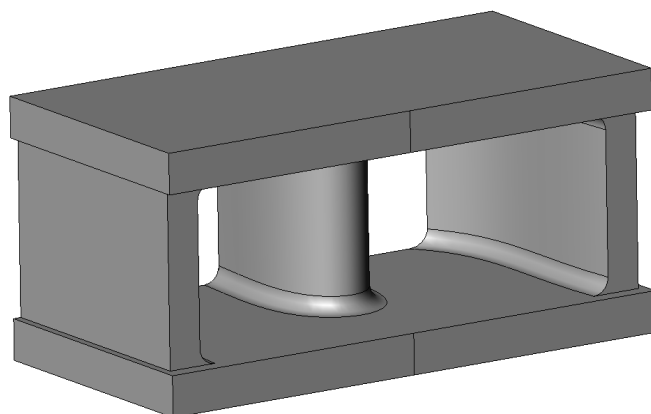
Izmantojot Columbia Kivi 190x190x390 B dobta bloka rasējumus, tika izveidots tā precīzs 3D modelis ar bloka masu - 19.6 kg. 20. attēlā ir parādīts FOS koeficienta vērtību sadalījums centrālajam mūra blokam. Minimālais $FOS = 28.11$



20. att. FOS koeficienta vērtību sadalījums centrālajam blokam Columbia Kivi mūrī

atrodas bloka centrālajā daļā. Ir redzams, ka vairāk tiek noslogotas bloka starpsienas, kur vistīcāmāk parādās bīstamie stiepes spriegumi. Bloka malas, kas uzņem slodzi, ir aptuveni 2 reizes drošākas.

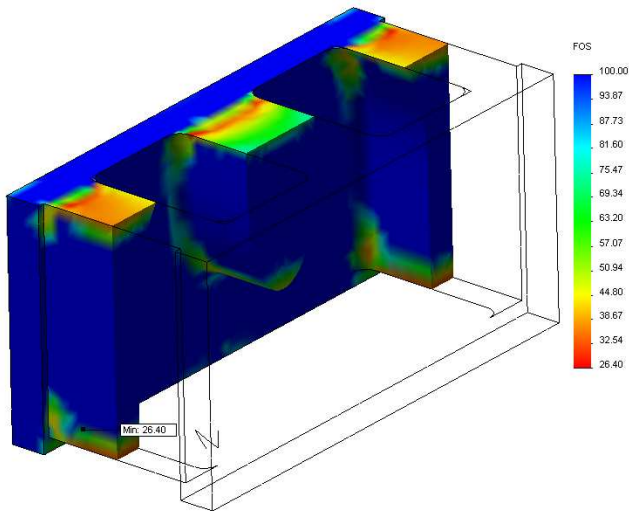
Tagad, izmantojot augstāk aprakstīto metodiku, atkārtojam bloka izgriezuma formas optimizāciju. Rezultātā iegūstam formu, kas parādīta 21. attēlā.



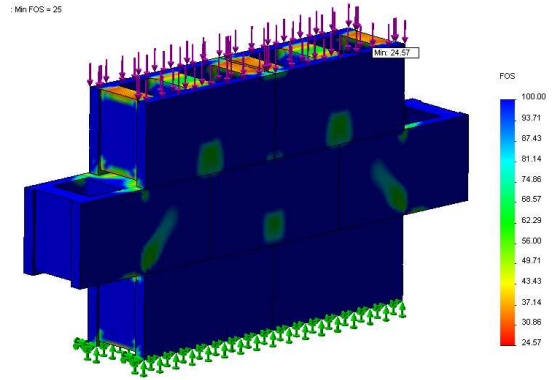
21. att. Bloks ar alternatīvo izgriezuma formu

FOS koeficienta vērtību sadalījums centrālajam blokam parādīts 22. attēlā. Iegūtais bloks varētu būt konkurētspējīgs ar analogiska izmēra Columbia Kivi bloku, jo tā masa ir par ~8% mazāka. Metodikas pielietojums dod rezultātu, kas prasa komentāru. Bloks, uzņemot slodzi mūrī, deformējas veidojot mucveidīgu ārējo sienu formu (sk. 23. att.). Vidējās bloka šķērssienas uzdevums ir pretoties šādām deformācijām. Faktiski atrastā šķērssienas forma ir veiksmīgs kompromiss starp tās platumu un augstumu.

Visbeidzot dažas piebildes par modeļu adekvātumu. Modelējot ir dabiska vēlme maksimāli vienkāršot aprēķina objektu. Piemēram mūsu gadījumā, varētu būt vēlme izmantot objekta simetriju un aplūkot 24. attēlā parādīto bloka ceturtdaļu. Taču kā parāda p. 5 iegūtie rezultāti, šāda pieeja ne vienmēr dod gaidīto.



22. att. FOS koeficienta sadalījums alternatīvajam blokam



25. att. FOS vērtību sadalījums alternatīvo bloku sienā

Ja aplūkojam 25. attēlā parādīto FOS vērtību sadalījumu mūrī, tad redzam, ka vājā vieta bloka apakšdaļas vidū ir adekvāti novērojama tikai mūra centrālajam blokam, kamēr apakšējās rindas blokos tā vispār nav ieraugāma.

XI. SECINĀJUMI

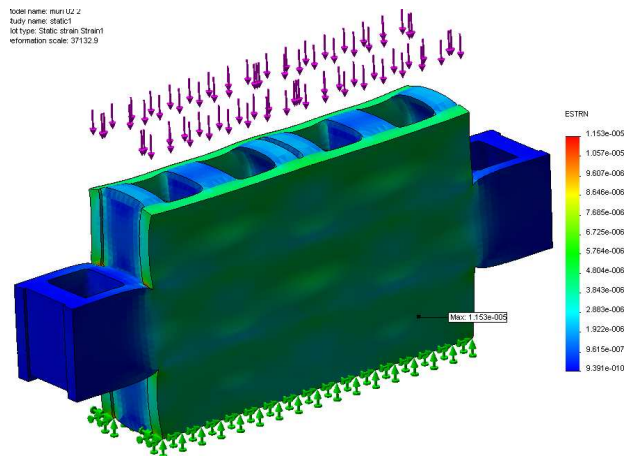
Darbā veiktie aprēķini liecina, ka izstrādātā aprēķinu metodika ir darbaspējīga un resursus taupoša un tai ir tālākas attīstības perspektīvas. Formulējot formas optimizācijas uzdevumu sākotnēji jācenšas izstrādāt pēc iespējas detalizētāku modeli, kas adekvāti apraksta objekta uzvedību. Pielietojot izstrādāto metodiku, detalizētā modeļa atbildes jāiegūst ierobežotu skaitu reižu tikai veicot aprēķinus saskaņā ar eksperimentu plānu. Optimizējot tiek lietoti relatīvi ātrdarbīgie metamodeļi un kopējais darba patēriņš ir pilnīgi pieņemams. Atrastās optimālās dobo bloku formas nevar uzskatīt par galīgo rezultātu. Nepieciešami tālāki papildus pētījumi, kas ņemtu vērā detalizētus reālos ekspluatācijas nosacījumus.

PATEICĪBAS

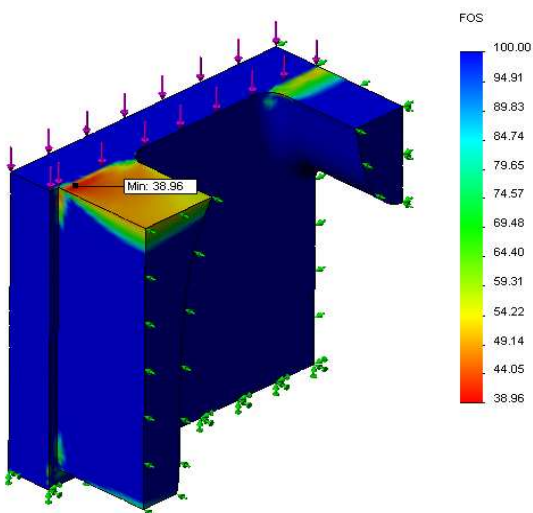
Šis darbs ir daļēji atbalstīts un veikts RTU projekta Nr. FLPP 2009/45 un LZP granta projekta Nr. 09.1267 ietvaros.

LITERATŪRA

1. **Dvorkin, L., Dvorkin, O.** *Basics of Concrete Science*. St-Petersburg, 2006. 692 p.
2. **Januševskis, A., Auziņš, J., Kovaļskis, A., Melņikovs, A., Ozoliņš, O.** Development of Geometrical and Computational Model of Vibro Impact Press. *Scientific Proceedings of RTU: Transport and Engineering. Mechanics*. Series 6. Vol. 28. Riga: Riga Technical University, 2008, p. 63-77.
3. **Невилль, А. М.** *Свойства бетона*. Стройиздат, 1972. 345 с.
4. **Bendsoe, M. P., Sigmund, O.** *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*. Springer. 2004. 370 p.
5. **Arora, J. S.** *Introduction to Optimum Design*. 2nd edition. Elsevier. 2004. 700 p.
6. **Vanderplaats, G. N.** *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design.- with Applications*. 4th Edition, Vanderplaats Research & Development, Inc. Colorado Springs, CO, 2004. 377 p.
7. *Genesis User's Manual, Version 7.5*. Vanderplaats Research & Development, Inc. Colorado Springs, CO, 2007.
8. **Saxena, A., Sahay, B.** *Computer Aided Engineering Design*. Springer. 2005. 393 p.
9. *SolidWorks Office - Essentials: Parts and Assemblies (Volume 1, 2)*, Concord, MA, 2004. 524 p.



23. att. Alternatīvā bloka sienas deformācijas



24. att. Bloka ceturtdaļas modelis

10. **Kurowski, P.** *Engineering Analysis with COSMOS- Works 2007*. Schroff Development Corporation, 2007. 263 p.
 11. **Алямовский, А.А.** *SolidWorks/ CosmosWorks 2006-2007 Инженерный анализ методом конечных элементов*. Москва: ДМК, 2007. 783 с.
 12. **Auziņš, J., Januševiskis, A.** *Eksperimentu plānošana un analīze*. Rīga. 2007. 256 lpp.
 13. **Lienhard, J. H.** *A Heat transfer Textbook*. Phlogiston Press, 2008. 762 p.
 14. **Kreith F.** *Mechanical Engineering Handbook*. 1999. 2466 p.
- Alexander Janushevskis, Dr.sc.eng.**, assoc. professor, Head of Laboratory, Riga Technical University, Machine and Mechanism Dynamics Research Laboratory. Address: 6 Ezermalas Street, Rīga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746. E - mail: janush@latnet.lv
- Anatolijs Melnikovs, M.sc.eng.**, Postgraduate Student, Riga Technical University, Institute of Mechanics. Address: 6 Ezermalas Street, Rīga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746. E - mail: marshallm-80@inbox.lv

Alexander Janushevskis, Anatolijs Melnikovs. Shape Optimization of Block

In this work, it is proposed a new method for the optimization of hollow block shape by using the metamodelling technique. The method is based on using the commercial CAD software SolidWorks as well as the original code EDAOpt developed in RTU for design of experiments, approximation and optimization. The method is discussed on basis of practical problem. The hollow block shape is searched with consideration of material consumption for strength and thermo insulation. Single block is used for thermal model which take into account heat conduction of block materials and convection process on block external wall. Single block model with different boundary conditions and wall models with different stacking are used for strength calculations. Internal cutout shape of block is defined by smooth spline line that is given by 7 control points. At the beginning, disposition of control points are planned. Further computer experiments with finite element software are implemented. The obtained responses are approximated and then used for optimization. As result of optimization an alternative cutout shape is obtained which save ~8% of block material. In comparison with method of homogenization, the developed method essentially decreases necessary computation resources.

Александр Янушевскис, Анатолий Мельников. Оптимизация формы блока

В работе предложена новая методика оптимизации формы пустотелого блока, использующая метамодели в виде глобальных полиномиальных аппроксимаций. Методика предусматривает применение коммерческого САД пакета программ SolidWorks, а также оригинальной разработанной в РТУ программы EDAOpt для планирования экспериментов, аппроксимации и оптимизации. Методика обсуждается на базе практического примера. Ищется форма пустотелого бетонного блока, учитывая расход материала с точки зрения прочности и теплоизоляции. В качестве термомодели служит одинарный блок, который учитывает теплопроводность материалов блока и конвекционный процесс на наружной стенке блока. В качестве прочностных моделей служит модель одинарного блока с различными граничными условиями и модели стен различной кладки. Форма внутреннего выреза блока задается гладкой сплайновой линией, которую в свою очередь определяют с помощью 7 опорных точек. Сначала планируется эксперимент для расположения опорных точек. Далее осуществляется компьютерный эксперимент с конечно элементной программой. Полученные отклики аппроксимируются и далее используются для оптимизации. В результате оптимизации получена альтернативная форма выреза блока, дающая по сравнению с существующей ~8% экономию материала. По сравнению с методом гомогенизации разработанная методика существенно снижает необходимые вычислительные ресурсы.