

RIGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte

Materiālu un konstrukciju

institūts

**Genādijs Šahmenko**

**PĒTĪJUMI BETONA SASTĀVU  
PROJEKTĒŠANĀ UN OPTIMIZĀCIJĀ  
PLASTISKIEM MAISĪJUMIEM**

Būvzinātņu nozare, Būvmateriālu un būvtehnoloģijas apakšnozare (P-06)

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs

Dr.sc.ing., docents

**Juris Biršs**

Rīga 2004

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Pašlaik būvniecības apjomi Latvijā arvien turpina pieaugt. Statistiskie pētījumi liecina, ka 2004. gadā apgrozījums būvniecībā sasniedzis aptuveni 550 miljonu latu, turklāt investīciju ieguldījumi tuvinājās 75%. Turpinot palielināties būvniecības apjomiem un tempam, praktiskā darbība apsteidz kvalitātes nodrošinājumu, un iemesls tam ir nepietiekami attīstīta zinātniski pētnieciskā darbība. Lai īstenotu moderno būvniecības tehnoloģiju ieviešanu ražošanā, labi jāpārzina vietējo būvmateriālu īpašības un izmantošanas iespējas, iesaistot šajā darbā mūsu valsts un ārzemju zinātnisko potenciālu.

Šis darbs pilnībā veltīts betona sastāvu optimizācijas jautājumiem, kā arī jaunu, perspektīvu metodiku izstrādē. Pēdējos piecpadsmit gados, mainoties politiskajai un ekonomiskajai situācijai Latvijā, notikušas būtiskas pārmaiņas arī betona industrijā. Betona industrijas restrukturizācija novērojama arī visā pasaulē. Kā rezultāts tam arvien straujāk paplašinās betona pielietošanas jomas un betona produkcijas klāsts, pieaug prasības šā materiāla fizikāli mehāniskajām īpašībām, ilgmūžībai un kvalitātei. Arvien plašāk būvniecībā tiek izmantoti jauni, speciāli betona veidi, tādi kā augstās stiprības betons, sūkņējamais un pašblīvējošais betons.

Jaunajiem betona veidiem atšķirībā no parastā betona ir specifiskās prasības, tie ir jutīgi pret tehnoloģisko faktoru (īpaši sastāva) izmaiņām. Tas prasa jaunu pieeju betona sastāvu projektēšanas jautājumos. Tirgus ekonomikas apstākļos aktuāli kļūst izvēlēties izejvielas tā, lai tiktu iegūta maksimālā ekonomija, tajā pašā laikā nodrošinot nepieciešamās, pēc iespējas labākas īpašības kā svaigam, tā arī sacietējušam betonam (t. i., jāatrod kompromiss starp betona cenu un tā īpašībām).

Šo iemeslu dēļ tagad ir akūta vajadzība pēc jaunas, vienotas un mobilas pieejas betona sastāva projektēšanas un optimizācijas jautājumos.

Šajā darbā galvenā uzmanība pievērsta atsevišķiem aktuālākajiem jautājumiem, kuriem ir vislielākā nozīme plastisko maisījumu optimālo sastāvu iegūšanai.

- Kā darba vadlīniju var atzīmēt pildvielu granulometriskās īpašības un to ietekmes izpēti, jo tieši pildvielas aizņem lielāko daļu no betona tilpuma un liela nozīme ir to pakojumam. Pārejas periodā ir aktuāli jautājumi, kas saistīti ar pāreju no agrāk lietotajiem standartiem (GOST) uz jauniem Eiropas standartiem (EN), kuru prasības jāievēro sastāvu projektēšanas stadijā.
- Viens no svarīgākajiem faktoriem ir ūdens, jo tam ir ļoti liela loma betona maisījumā: no vienas puses ūdens piešķir maisījumam noteiktu konsistenci, no otras puses ūdens/cementa attiecība nosaka betona stiprību un ilgmūžību. Nepieciešamais ūdens daudzums betona maisījumā savukārt ir cieši saistīts ar

pildvielu ģeometriskajam īpašībām. Līdz ar to sistēmas pildvielu ģeometriskas īpašības - ūdens izpētē ir faktori, kas nosaka nozīmīgāko virzienu betona tehnoloģijā.

- Minētas problēmas jārisina kompleksā ar betona sastāva optimizāciju, jo šodien nepieciešami efektīvi paņēmieni, kas dotu iespēju izvēlēties vispiemērotākās izejvielas un noteikt optimālo betona sastāvu no materiālu ekonomijas un kvalitātes viedokļa.

Darbā apkopoti un sistematizēti pētījumu rezultāti un praktiskā pieredze, kas iegūta pēdējo 10 gadu laikā, strādājot ar betonu sastāviem Rīgas Tehniskās universitātes Būvmateriālu laboratorijā.

### **Darba mērķis**

Izstrādāt betona sastāva projektēšanas metodiku plastiskajiem maisījumiem, kas būtu balstīta uz pildvielu granulometrisko īpašību izmantošanu kā galveno dominējošo faktoru, un piedāvāt optimālā sastāva noteikšanas paņēmienus, izmantojot daudzskrūņu optimizācijas elementus.

### **Pētījumu uzdevumi**

- Izstrādāt metodiku granulometrisko sastāvu pārrēķināšanai uz atšķirīgu sietu sistēmu, kurai ir sieti ar citu acu formu un izmēriem.
- Izstrādāt universāli pielietojamu metodiku un algoritmu pildvielu optimālā sastāva aprēķināšanai daudzkomponentu maisījumiem. Veikt izstrādāto metožu praktisko izvērtēšanu dažādiem betona veidiem.
- Savstarpēji salīdzināt divkomponentu maisījuma noteikšanas rezultātus, kas iegūti ar dažādām metodēm. Izveidot Latvijā pieejamo pildvielu datu bāzi.
- Piedāvāt universālu (viena lieluma) parametru, kas racionāli raksturotu pildvielu, ņemot vērā tās granulometrisko sastāvu un daļiņu formu. Ar izvēlēto parametra palīdzību jānosaka nepieciešamo ūdens daudzumu, ņemot vērā betona konsistenci.
- Izstrādāt aprēķinu shēmu betona sastāvu projektēšanai ar granulācijas skaitļa metodi, ievērojot mūsdienu prasības plastiskiem betoniem.
- Izstrādāt betona sastāvu daudzskrūņu optimizācijas shēmu dažādu tehnoloģisku uzdevumu risināšanai, piedāvāt metodiku betona sastāvu kompleksai novērtēšanai.

### **Darba zinātniskā novitāte**

- Izstrādāta metodika, kas dod iespēju savstarpēji pārrēķināt pildvielas granulometriskos sastāvu no vienas sietu sistēmas uz jebkuru citu.
- Piedāvāti parametri pildvielu ideālās granulometrijas vienādojumam (pakāpe  $n$  un līknes sākumpunkts  $X_0$ ), ar kuriem var noteikt granulometriskos sastāvus dažādiem betona veidiem.
- Plastisko betonu maisījumu projektēšanā piedāvāts izmantot universālu parametru - granulācijas skaitli, kas ar vienu skaitli raksturo pildvielas adsorbcijas spēju un nosaka sakarību starp pildvielas ģeometriskajām īpašībām un betona sastāvu.
- Izstrādāta betona sastāvu projektēšanas un optimizācijas shēma, kas, izmantojot daudzskrūņu optimizācijas elementus, dod iespēju izvēlēties racionālāko sastāvu un atrast kompromisa risinājumu starp betona cenu un tā īpašībām.
- Piedāvāti optimizācijas rezultātu grafiskās interpretācijas varianti un betona etalonsastāva koncepcija, kas dod iespēju izvērtēt salīdzināmos betona sastāvus pēc ekonomiskuma un kvalitātes kritērijiem.

### **Darba praktiskā vērtība**

Izstrādāta praktiskā lietošanā ērta betona sastāvu projektēšanas un optimizācijas metodika, kas dod iespēju ar datora palīdzību operatīvi noteikt optimālo betona sastāvu un ievērojami samazina sastāva izstrādes laiku. Izveidota dažādu Latvijā pieejamo pildvielu datu bāze.

### **Aizstāvēšanai tiek izvirzīti šādi pētījumu rezultāti**

- Pildvielu granulometriskā sastāva pārrēķināšanas metodika no vienas sietu sistēmas uz jebkuru citu sietu sistēmu.
- Pildvielu granulometrijas vienādojuma parametri, kas nosaka vēlamo pildvielas sastāvu dažādiem betona veidiem.
- Betona pildvielas sastāva aprēķināšanas metodika ar analītisku mazāko kvadrātu metodi un skaitlisko metodi.
- Granulācijas koeficienta un granulācijas skaitļa koncepcija plastiskiem maisījumiem un betona sastāva projektēšanas metode, kuras galvenais faktors ir pildvielu granulometriskās īpašības.
- Izstrādātā betona sastāvu daudzskrūņu (kompromisa) optimizācijas shēma dažādiem optimizācijas variantiem.
- Betona etalonsastāva koncepcija.

### **Darba sastāvs un apjoms**

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfiskā saraksta. Darba apjoms: 149 lappuses, 43 attēli, 21 tabula, literatūras saraksts, kas satur 123 nosaukumus, 5 pielikumi.

### **Darba aprobācija un publikācijas**

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti šādās starptautiskajās konferencēs:

- 2. starptautiskais PhD simpozījs būvniecībā, (Budapešta, 1998. g. augusts).
- 6. starptautiskā konference "Jaunie būvmateriāli, konstrukcijas un tehnoloģijas" (Viļņa, 1999. g. maijs).
- 7. starptautiskā konference "Jaunie būvmateriāli, konstrukcijas un tehnoloģijas" (Viļņa, 2001. g. maijs).
- RTU 42. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2001. g. oktobris)
- 12. kompozītmateriālu mehānikas starptautiskā konference (Rīga, 2002. g. jūnijs).
- RTU 43. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2002. g. oktobris).
- RTU 44. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2003. g. oktobris).
- Baltijas valstu silikātu materiālu konference (Rīga, 2004. g. maijs).

Pētījumu problēmas un rezultāti ziņoti un apspriesti visās Latvijas Betona savienības gadskārtējās zinātniski tehniskajās konferencēs laika periodā no 1997. līdz 2004. gadam.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 9 publikācijās (sk. 20. Ipp.).

Veikto pētījumu jomā ir iegūts Latvijas Republikas patents Nr. LV 11681 B "Izejvielu maisījums vieglā betona izgatavošanai" (publ. 20.06.1997.)

## DARBA SATURS

**Pirmajā nodaļā** aprakstīta pašreizējā situācija betona sastāvu projektēšanas un optimizācijas jautājumos, izskatītas esošās aprēķinu metodes un dots apkopojums par dažādu metožu un parametru priekšrocībām un trūkumiem.

Pildvielām ir liela nozīme betona struktūrā, jo tās aizņem 60...80% no materiāla tilpuma. Pildvielu īpašības, kuras jāņem vērā, projektējot betona sastāvu, var nosacīti sadalīt divās grupās: materiāla fizikālās īpašības un daļiņu ģeometriskās (vizuālās) īpašības - daļiņu forma, virsmas faktūra un granulometriskais sastāvs.

Ģeometriskās īpašības nodrošina daļiņu pakojumu, ietekmē maisījuma konsistenci un cementa patēriņu. Granulometriskais sastāvs ir viens no svarīgākajām ģeometriskām īpašībām, kas nosaka dažādu izmēru daļiņu relatīvo saturu. To var definēt kā sakarību starp standarta sietu acu izmēriem  $X(I)$ , mm un pildvielu kopējo daudzumu, kas izgājušas cauri  $Y(I)$ , %. Praksē granulometrisko sastāvu nosaka, izsijājot pildvielas porciju caur standarta sietiem ar dažādiem acu izmēriem. Var atzīmēt, ka pašreiz izmanto dažādu sistēmu sietus, kam ir atšķirīga acu gradācija. Veicot literatūras analīzi, ir konstatēts, ka praksē trūkst metodikas, kas dotu iespēju pārrēķināt granulometrisko sastāvu no vienas sietu sistēmas uz citu un saskaņot apaļas formas un kvadrātveida acu sietu atvērumus.

Pildvielu sastāva aprēķinu rezultātā nepieciešams iegūt tādu pildvielu granulometrisko sastāvu, kas nodrošina blīvu daļiņu pakojumu un dod iespēju sasniegt vajadzīgās betona īpašības. Optimālā granulometriskā sastāva noteikšanai tiek izmantotas ideālās granulometriskās līknes.

Pazīstamākā ir Fulera ideālā līkne, kuru jau gandrīz pirms 100 gadiem piedāvāja Fulers un Tompsons. Pēc būtības Fulera līkne ir apgriezta parabola un vispārīgā gadījumā to var aprakstīt ar šādu funkciju:

$$Y_T(I) = \sqrt{D(I)/D_{\max}} = (D(I) / D_{\max})^{0.5},$$

kur:  $D(I)$  - daļiņas izmērs, mm;

$Y_T(I)$  - teorētiskais (ideālais) daļiņu daudzums, kuru caurmērs ir mazāks par  $D(I)$ ;

$D_{\max}$  - rupjākās pildvielas maksimālais izmērs (līknes galapunkts), mm.

Ideālie granulometriskie sastāvi var būt uzdoti arī tabulas veidā vai grafiski kā intervāls starp divām līknēm.

Betona projektēšanā jāizvērtina pildvielu optimālās proporcijas, kas nodrošina sastāvu, maksimāli tuvinātu ideālajai līknei. Var atzīmēt Holandes pildvielu sastāva noteikšanas grafisko metodi, kas tika lietota stingru betona maisījumu sastāvu projektēšanā. Holandes metodes ideju attīstījis J.Biršs, izstrādājot analītiskās smaguma centra un mazāko kvadrātu aprēķinu metodes.

Jāatzīmē, ka eksistējošas aprēķinu metodes pēc ideālajam līknēm neparedz izmantot skaitlisko kritēriju, kas nosaka reālās granulometrijas atbilstību ideālajai līknei. Tāpat ir aktuāli pilnveidot pildvielu sastāva aprēķinu metodes, lai tās varētu izmantot arī mūsdienu plastisko betonu veidiem (sūknējamajiem, pašblīvējošajiem betoniem utt.)

Apkopojot literatūras informāciju par sastāva projektēšanas metodēm, var secināt, ka plastiskiem betona maisījumiem noteicošie sastāva projektēšanas principi ir absolūto tilpumu princips, ūdens/cementa attiecības likums un konsistences princips, pēc kura ūdens daudzums ir atkarīgs galvenokārt no maisījuma konsistences un pildvielu rupjuma.

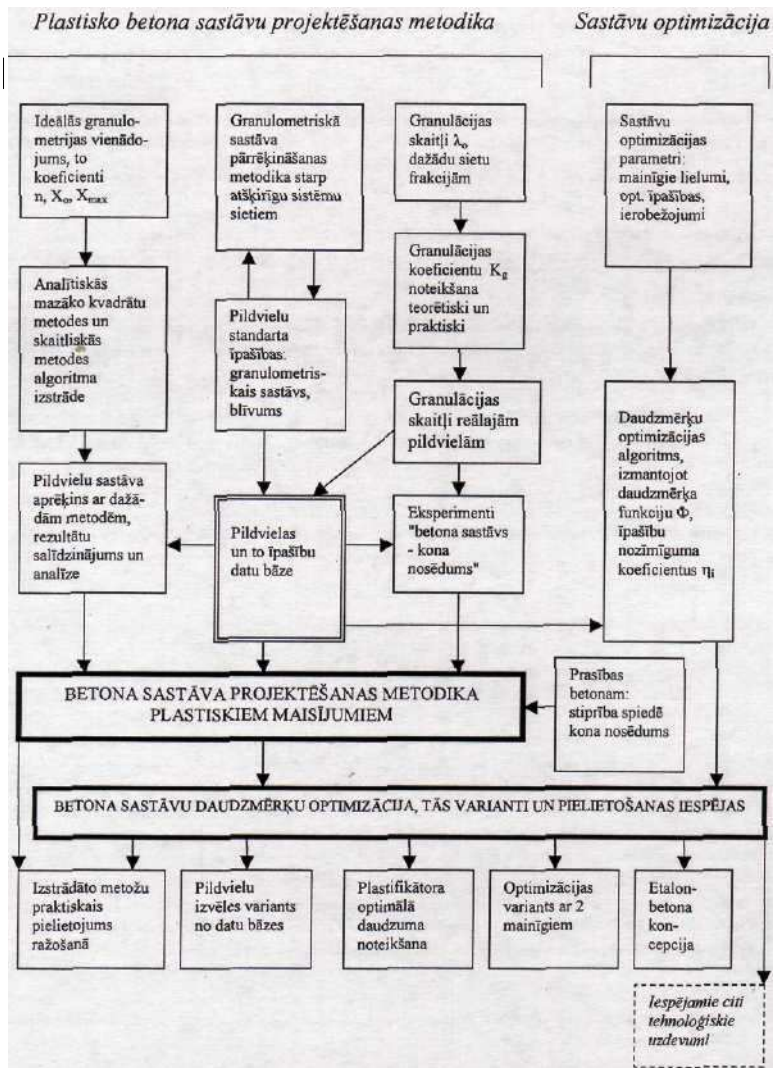
Konstatēts, ka betona sastāva projektēšanā viens no jutīgākajiem faktoriem ir ūdens daudzums. Ūdens pārklāj pildvielu daļiņas noteikta biezuma kārtā, tādēļ pildvielu ģeometriskajām īpašībām ir liela nozīme. Izmanto vairākus parametrus, kas raksturo pildvielu adsorbcijas spēju (daļiņu virsmas forma, īpatnējā virsma utt.). Ir pierādīts, ka adsorbētās ūdens kārtas biezums ir atkarīgs no daļiņu izmēra (smalkākai daļiņai ir plānāka ūdens kārtiņa). Šis nosacījums tiek ievērots ar parametru granulācijas skaitlis, kas vispilnīgāk raksturo pildvielu ūdens adsorbcijas īpašības un nosaka minimālo ūdens daudzumu daļiņu samitrināšanai. Betona sastāva projektēšanas metodi, kuras pamatā bija granulācijas skaitlis, 70..80-tajos gados plaši lietoja betona triecientehnoloģijai. Jāatzīmē, ka granulācijas skaitļa metode bija izstrādāta stingriem betona maisījumiem, tāpēc nepieciešams pilnveidot granulācijas skaitļa metodi un piemērot to plastiskiem maisījumiem.

Apskatot informāciju par betona optimizāciju, ir secināts, ka nav vienotas pieejas betona maisījuma optimizācijas jautājumos un joprojām ir grūti atrast praktiskai lietošanai gatavas shēmas un metodes. Daudzmērķu (kompromisa) optimizācija ir veiksmīgākā optimizācijas metode, kas var tikt piemērota betona maisījumiem. Daudzmērķu optimizācijas paņēmienus 90-tajos gados kompozītmateriālu īpašību izpētei izmantoja A.Kregers, G.Teters, J.Melnbārdis un M. Rektiņš. Optimālā risinājuma noteikšana veikta ar integrālās mērķu funkcijas O palīdzību, kas ar vienu skaitli ievēro vairākas pētījuma objekta īpašības, kā arī šo īpašību nozīmīgumu.

Tādējādi nozīmēti un izvēlēti galvenie pētījumu virzieni, kuriem ir vislielākā ietekme plastisko maisījumu optimālo sastāvu iegūšanā:

- pildvielu granulometrisku īpašību izpēte;
- pildvielu ideālās līknes un pildvielu sastāva aprēķināšanas metodikas izstrāde;
- ūdens faktora izpēte un sastāva projektēšanas metodikas izstrāde, kas ievēro sakarību starp pildvielu ģeometriskajām īpašībām un betona sastāvu;
- sastāvu daudzmērķu optimizācijas variantu izstrāde un aprobācija.

1. attēlā apkopota pētījuma shēma, kas dod kopējo priekšstatu par pētījuma objektu un mērķi.



1. att. Pētījumu shēma



Otrā nodaļa ir veltīta jaunu metožu izstrādei pildvielu sastāvu noteikšanai un aprēķināšanai. Aprakstīta pildvielu īpašību izpētes metodika, kas izmantota darbā.

Veikti praktiskie salīdzināšanas eksperimenti, kad vienas un tās pašas pildvielas tika izsijātas cauri sietu komplektiem ar dažādu acu gradāciju. Salīdzināti iegūtie granulometriskie sastāvi, kā arī veikts granulometrisku sastāvu pārrēķins, izmantojot lineāras, logaritmiskas un inversas paraboliskas interpolācijas metodes. Sastāvu pārrēķināšanā ieviests apaļas formas un kvadrātveida sietu acu pārejas koeficients. Statistiski apstrādājot rezultātus, noteikts, ka pietiekami precīzus rezultātus var iegūt ar lineāro interpolāciju. Noteikts, ka vairākfrakciju pildvielām vidējā kvadrātiskā novirze  $S$  starp teorētiskiem un eksperimentāliem rezultātiem ir mazāka par 2.1 %. Pildvielām, kurām pamatā ir viena frakcija, pārrēķināšanas metode nav piemērojama. Salīdzināti pildvielu smalkuma moduļi, kas iegūti pēc Eiropas standarta EN un GOST sietiem. Moduļu attiecības  $FM^{EN} / FM^{GOST}$  smalkai pildvielai vidēji ir 1.08, bet rupjai pildvielai - 1.02.

Analizētas ideālās granulometriskās līknes, kas sastopamas literatūrā, un veikta to grafiskā salīdzināšana ar Fulera ideālajām līknēm. Praktiskai lietošanai izvēlēti modificēto Fulera līkņu vienādojumi ar mainīgiem parametriem  $X_0$ , (līknes sākumpunkts) un  $n$  (pakāpe). Noteiktas parametru vērtības stingram betona maisījumam, sūknējamam betona maisījumam un pašblīvējošam betona maisījumam.

Pildvielu sastāva noteikšanai izmantota šāda shēma:

Dotas  $N$  pildvielas ar zināmu granulometrisku sastāvu

$$Y(1,I); Y(2,I); \dots; Y(J,I); \dots; Y(N,I),$$

kur:  $N$  - pildvielu skaits;

$J$  - pildvielu kārtas numurs,  $I$  - sietu kārtas numurs.

Nepieciešams noteikt pildvielu proporcijas  $K(J)$ , kas nodrošina reālās granulometriskās līknes  $Y(I)$  maksimālu tuvošanos ideālajai līknei  $YT(I)$ . Reālās

$$Y(I) = \sum_{J=1}^N K(J) \cdot Y(J,I).$$

Uzdevums tika risināts, izmantojot mazāko kvadrātu principu, t. i., minimizējot noviržu kvadrātu summu starp ideālo līkni un reālo līkni:

līknes vienādojums ir šāds:

$$\sum_{I=1}^M (YT(I) - Y(I))^2 = \min,$$

kur:  $M$  - sietu skaits.

Izskatīti aprēķinu gadījumi, kad ideālās līknes galapunkts  $X_{max}$  ir fiksēts (ideālā granulometrija ir iepriekš uzdota) un  $X_{max}$  ir peldošs (t. i., atkarīgs no pildvielas maksimālā rupjuma). Variantam, ja ideālā līkne ir iepriekš uzdota un izejas komponentu skaits nav ierobežots, iegūta šāda vienādojumu sistēma (matricas veida):

$$\begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{cccc}
 A(1,1) & A(1,2) & \dots & A(1,N-1) \\
 A(2,1) & A(2,2) & \dots & A(2,N-1) \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 A(N-1,1) & A(N-1,2) & \dots & A(N-1,N-1)
 \end{array} \right| \times \left| \begin{array}{c}
 K(1) \\
 K(2) \\
 \dots \\
 K(N-1)
 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c}
 B(1) \\
 B(2) \\
 \dots \\
 B(N-1)
 \end{array} \right| \\
 \text{(koeficientu pie nezināmajiem} \quad \text{nezināmo lo-} \quad \text{(brīvo koefi-} \\
 \text{locekļiem matrica)} \quad \text{cekļu matrica} \quad \text{cientu matrica)
 \end{array}$$

Noteikts, ka, vienādojumu sistēmā koeficienti mainās pēc vienkāršas loģiskās likumsakarības. Iegūtas formulas koeficientu noteikšanai (aprēķins viegli realizējams ar datoru):

$$\begin{aligned}
 A(R,S) &= \sum_{I=1}^M (Y(N,I) - Y(S,I)) (Y(N,I) - Y(R,I)); \\
 B(R) &= \sum_{I=1}^M (Y(N,I) - Y(T,I)) (Y(N,I) - Y(R,I)),
 \end{aligned}$$

kur: R - vienādojuma (rindiņas) numurs, S - locekļa (stabiņa) numurs.

Izstrādāta arī skaitliskā mazāko kvadrātu metode. Metodes princips ir mehāniski sašķirot visas iespējamās pildvielu proporciju kombinācijas, izvēlēties sastāvu, kuram noviržu kvadrātu summa starp reālo un ideālo līkni ir minimālā. Skaitliskā metode paredz daudz vairāk skaitlisko operāciju salīdzinājumā ar analītisko metodi, līdz ar to aprēķinu laiks ar mūsdienu datoru var būt lielāks par 20 minūtēm. Analizēti skaitļošanas apjomi atkarībā no aprēķinu soļa un komponentu skaita un noteiktas robežas, kad jāizmanto divpakāpju skaitliskā metode. Izstrādātas shēmas, algoritmi un programmas Visual Basic valodā pildvielu sastāvu aprēķināšanai maisījumiem līdz 5 komponentiem ar analītisko metodi un skaitlisko metodi.

Pieckomponentu pildvielu maisījuma noteikšanas skaitliskie piemēri (sk. 2. un 3. art. un 1. tab.) liecina par to, ka analītiskajai metodei var būt nenoteikti rezultāti, ja doti nestandarta sastāva izejmateriāli, īpaši tad, ja granulometriskās līknes pārklājas (sk. 3. att.). Skaitliskā metode ir stabilāka un salīdzinājumā ar analītisko metodi dod iespēju realizēt plašākas sastāva projektēšanas iespējas. Rezultāti, kas iegāti ar skaitlisko un analītisko metodēm, atšķiras ne vairāk kā par 1 %. Lai novērtētu, cik labi reālā granulometriskā līkne atbilst ideālai, piedāvāts izmantot skaitlisko kritēriju S - vidējo kvadrātisko novirzi starp ideālo līkni un reālo līkni.

Ar skaitlisko metodi veikti sastāvu aprēķini dažādiem ideālas granulometrijas tiptiem, kas paredzēti stingram betonam, sūknējamam betonam un pašblīvējošam betonam (sk. 2. tab.). Rezultāti liecina par to, ka, izmantojot vienādus izejmateriālus dažādās proporcijās, var iegūt pildvielu maisījumus dažādiem betoniem.

Veikta metožu rezultātu salīdzināšana dažādu tipu divkomponentu maisījumiem. Konstatēts, ka caurmērā vidējā kvadrātiskā novirze starp pildvielu ideālo un aprēķināto līkni ir vismazākā izstrādātajai analītiskai un skaitliskai metodei

(6.5%), bet apskatītajam eksistējošam Holandes, analītiskai un laužas līnijas metodēm attiecīgi ir 7.9, 11.9 un 7.7 %.

Divkomponentu maisījumam kā alternatīvs variants piedāvāts lietot smalkuma moduļa metodi, kas ir vienkārša lietošanā, pat neizmantojot skaitļošanas tehniku. Piedāvāts pildvielu smalkuma moduļu noteikšanai ievērot arī papildus sietus (5.6 un 11.2 mm). Tas ļauj paaugstināt smalkuma moduļa metodes precizitāti un sasniegt analītisko un smalkuma moduļa metožu rezultātu atšķirību ne lielāku par 2.6 %.

Betona projektēšanas un optimizācijas procesā ir svarīga operatīva pieeja informācijai par dažādiem izejmateriāliem. Šim mērķim izveidota dažādu Latvijā pieejamo pildvielu daru bāze, kas ietver galvenos pildvielu rādītājus. Dati apkopoti Excel tabulās, ka arī visas pildvielas tiek kolekcionētas atsevišķos traukos speciālā plauktā.

## 1. tabula

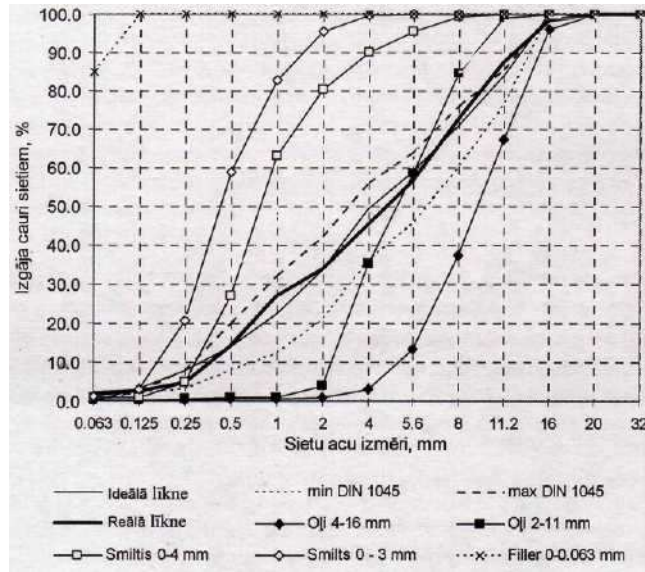
Pieckomponentu maisījuma noteikšanas rezultāti

Izejas komponenti	1. piemērs		2. piemērs	
	Skaitliski	Analītiski	Skaitliski	Analītiski
Oļi 4-16 mm	0.370	0.365	0.440	0.480
Oļi 2-11 mm	0.240	0.247	0.060	-0.037
Smilts 0-4 mm	0.310	0.312	0.000	-0.225
Smilts 0-3 mm	0.060	0.055	-	-
Smilts 0-5 mm	-	-	0.480	0.771
Filler 0-0.063 mm	0.020	0.021	0.002	0.012
S,%	2.78	2.79	1.51	-
Aprēķinu laiks, s	43	<1	43	<1
				Nav rezultāta

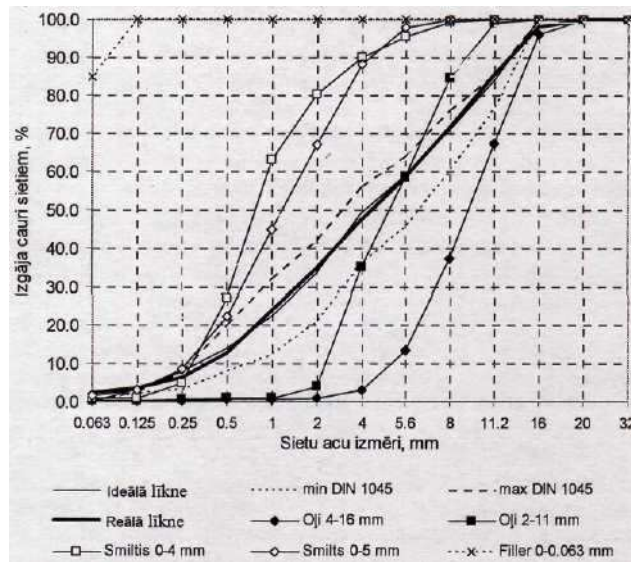
## 2. tabula

Pildvielu maisījumu noteikšanas rezultāti dažādiem betonu tipiem

Betona tips, kona nosēd urma klase, (kompon. skaits)	Vienād. parametri		Pildvielu proporcijas, %				S, %
	$X_0$	n	Sķ...5-16 mm (142)	Smiltis 0-1 mm (48)	Izsijās 2-5 mm (159)	Dolomīta milti (13)	
Pusstingrs mais. S1 (2 kompon.)	0.063	0.52	60.0	40.0	-	-	7.82
Pusstingrs mais. S1 (3 kompon.)	0.063	0.43	49.0	25.0	26.0	-	2.42
Sūkņējmais S2...S3 (3 komp.)	0.063	0.43	44.0	29.0	26.0	1.0	2.41
SCC (4 komponenti)	0.027	0.29	34.0	36.0	23.0	7.0	2.27



2. att. Granulometriskas līknes 1. piemēram



3. att. Granulometriskas līknes 2. piemēram

**Trešajā nodaļā** veikta ūdens faktora izpēte plastiskiem betona maisījumiem.

Lai precīzāk ievērotu pildvielu daļiņu virsmas formu, piedāvāts izmantot speciālu parametru - granulācijas koeficientu. Tas nosaka daļiņas virsmas laukuma attiecību pret sfēras virsmas laukumu, kurai ir tāds pats tilpums:

$$K_g = S / S_o,$$

kur: S - reālā ķermeņa virsma;  
S<sub>o</sub> - ekvivalenta tilpuma sfēras virsma.

Veikts granulācijas koeficientu teorētiskais aprēķins dažādiem ģeometriskajiem ķermeņiem un eksperimentālā to noteikšana reāliem pildvielu graudiem, izmantojot nokrāsošanas metodi. Noapaļotām pildvielu daļiņām granulācijas koeficienta vērtības svārstās robežās 1.07...1.27, šķautņainām - 1.37...1.48. Iegūtie eksperimentālie dati iekļaujas teorētisko rezultātu intervālā.

Pildvielu granulācijas skaitlis tiek definēts kā minimālais ūdens daudzums daļiņu virsmas samitrināšanai (litros uz 100 l pildvielas pēc absolūtā tilpuma). Granulācijas skaitļu noteikšanu piedāvāts veikt pēc formulām:

$$\lambda(J) = \lambda_o(J) \times K_g,$$

kur:  $\lambda(J)$  - granulācijas skaitlis reālai pildvielai;  
 $\lambda_o(J)$  - granulācijas skaitlis pildvielai ar apaļām daļiņām.

$$\lambda_o(J) = \sum_{i=1}^M Q(J, I) \cdot \lambda_o(I) / 100,$$

kur: Q(J, I) - atsevišķo frakciju procentuālais saturs dotajai pildvielai, %;  
 $\lambda_o(I)$  - atsevišķo frakciju granulācijas skaitlis pildvielai ar apaļām daļiņām.

$$\lambda = \sum_{j=1}^N \lambda(J) \cdot K(J),$$

kur:  $\lambda$  - pildvielu maisījuma granulācijas skaitlis.

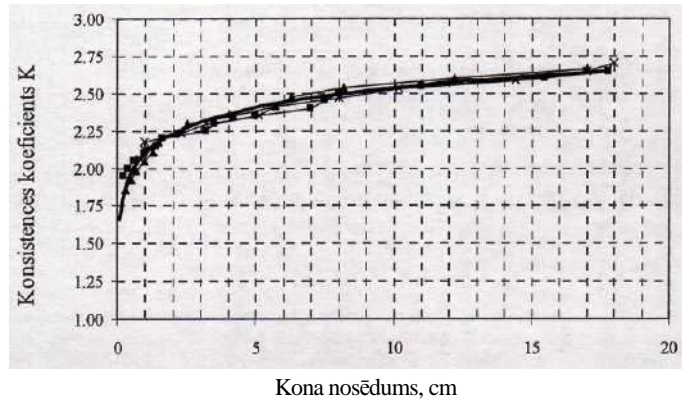
Veikti pētījumi sakarības noteikšanai starp betona sastāvu un kona nosēdumu. Piedāvāta šāda pamatformula ūdens daudzuma noteikšanai plastiskiem maisījumiem (litros uz 100 l pildvielas pēc absolūtā tilpuma):

$$W^{100} = \lambda \times K$$

kur: K - konsistences koeficients, kas ir atkarīgs no kona nosēduma.

Iegūta empīriskā sakarība (sk. 4. att.) starp kona nosēdumu KN un konsistences koeficientu:  $K = 0.19 \lg(KN) + 2.1$ .

Atzīmēts, ka mūsdienu plastiskiem betona maisījumiem ir svarīgi ievērot smalko daļiņu saturu. Apkopotas prasības smalko daļiņu daudzumam dažādiem betona veidiem. Darbā izmantota precizēta ūdens/cementa attiecības noteikšanas metodika, kas ievēro cementa klasifikāciju pēc Eiropas standarta

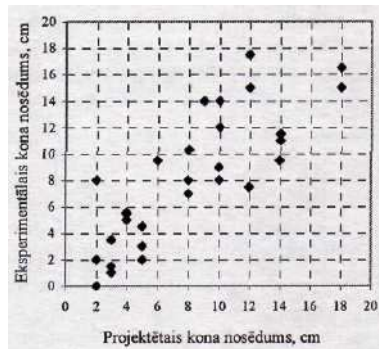


4. att. Sakarība starp kona nosēdumu un konsistences koeficientu

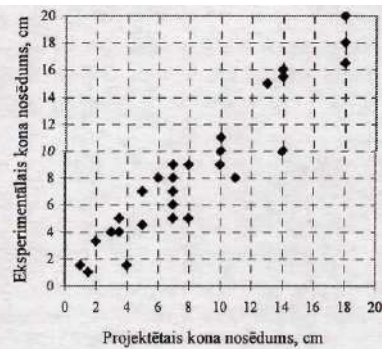
Izstrādāta betona sastāva aprēķināšanas metodika, kas ietver pildvielu sastāva aprēķināšanu pēc ideālām līknēm, izmanto granulācijas skaitļa principus un ievēro precizēšanas korekcijas ūdens/cementa attiecībai un smalko daļiņu saturam.

Salīdzinot projektēto kona nosēdumu ar eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem, granulācijas metodei ir mazākas atšķirības starp teorētiskajiem un eksperimentālajiem rezultātiem. Korelācijas koeficienti ir attiecīgi 0.84 standarta metodei un 0.94 granulācijas skaitļa metodei (sk. 5. att.).

a)



b)



5. att. Korelācijas sakarības starp teorētisko (projektējamo) un reālo kona nosēdumu

- a) standarta metodei (korelācijas koeficients 0.84),
- b) granulācijas skaitļa metodei (korelācijas koeficients 0.94).

**Ceturtais nodaļas** ir veltīta betona sastāvu optimizācijas jautājumiem.

Piedāvāta šāda betona sastāvu daudzņēmēju optimizācijas shēma

- Optimizācijas uzdevuma definēšana, parametru noteikšana, iespējamo izejmateriālu izvēle no datu bāzes.
- Eksperimenta plāna noteikšana n sastāviem.
- Betona n sastāvu teorētiskais aprēķins, ņemot vērā mainīgos izejas parametrus. Katram teorētiskajam sastāvam piemīt savas optimizējamās īpašības.
- Optimāla risinājuma noteikšana ar integrālās mērķu funkcijas <E> palīdzību:

$$\Phi = \left( \sum_{i=1}^{n_y} \eta_i \Phi_i^{-2} \right)^{-1/2},$$

kur:  $\Phi_i$  - dotas optimizējamās īpašības lokālais kritērijs,  
 $0 \leq \Phi_i \leq 1$ ; tiek pieņemts, ka  $\Phi_i = 0$ , ja īpašībai ir viszemākais rādītājs, un  $\Phi_i = 1$ , ja īpašībai ir vislabākais (vēlamais) rādītājs dotajā diapazonā;  
 $\eta_i$  - optimizējamo īpašību nozīmīguma koeficients,  $0 \leq \eta_i \leq 1$ .

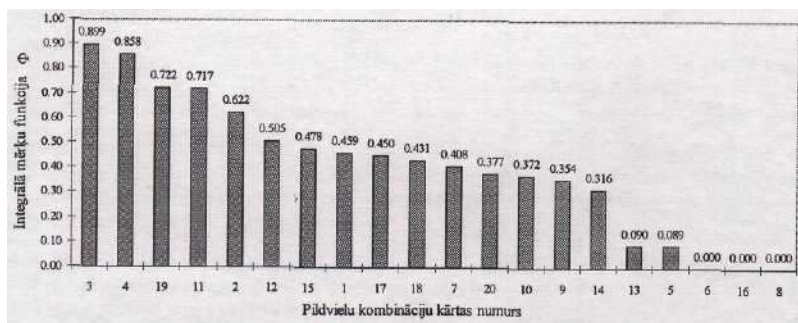
Noteikti optimizācijas parametri: vadāmie (mainīgie) parametri  $X_i$ , optimizējamās īpašības  $y_i$ , kā arī apkopoti ierobežojumi, kas jāņem vērā sastāva projektēšanā.

Lai varētu izpētīt daudzņēmēju optimizācijas iespējas betona maisījumiem, izstrādāti optimizācijas varianti: pildvielu atlases variants no datu bāzes, plastificējošo piedevu izvēle un optimālā daudzuma noteikšana, kā arī daudzņēmēju optimizācija ar diviem mainīgiem parametriem. Veikta tās izmēģināšana ar skaitliskiem piemēriem un rezultātu analīze.

6. attēlā parādīti piemērotāko pildvielu atlases rezultāti. Optimizācijas uzdevumā uzdota 5 veidu smilts un 4 rupjās pildvielas, kombināciju skaits divkomponentu maisījumam ir  $4 \times 5 = 20$ . Aprēķināti 20 betona sastāvi, katram sastāvam noteikti lokālie kritēriji. Šādām optimizējamām īpašībām: ūdens daudzumam  $W$ , cenai  $C$  un vidējai kvadrātiskajai novirzei starp ideālo un reālo granulometrisko līkni  $S$ . Integrālās mērķa funkcijas  $O$  skaitliskās vērtības diagrammā parādītas samazināšanās kārtībā, kas dod iespēju vizuāli redzēt labākos sastāvus. Šajā gadījumā prasības vislabāk apmierina sastāvs Nr. 3, kā alternatīvs var tikt pieņemts 4., 19. un 11. variants.

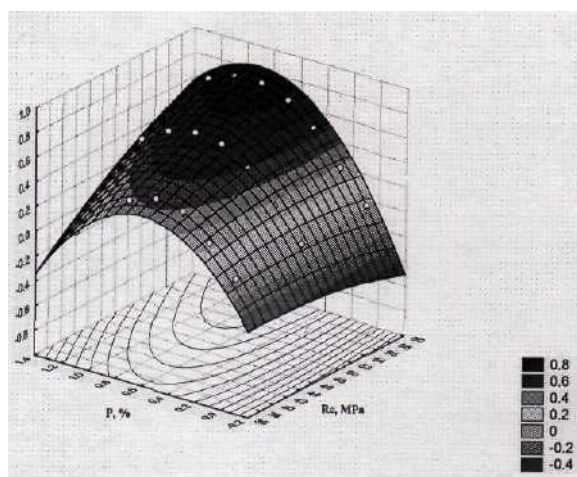
Izstrādāts plastifikaīora iedarbības matemātiskais modelis, kas dod iespēju sastāva aprēķinā ievērot plastifikatora ūdens daudzuma samazināšanas efektu un izmantot modeli sastāvu optimizācijas uzdevumu risināšanai.





6. att. Integrālas mērķa funkcijas dažādiem betona sastāviem

Sastāvu optimizācijas variantā ar diviem mainīgiem lielumiem salīdzinājumā ar vienfaktora optimizācijas uzdevumu var realizēt plašākas iespējas. Rezultātu grafiskā interpretācija trīsdimensiju diagrammās paaugstina rezultātu uzskatāmību. Izmantojot datu apstrādes programmu, ir iespējams iegūt funkcijas polinomu, ar kura palīdzību var precīzāk iegūt optimālo rezultātu un prognozēt optimizējamo funkciju maiņas tendences (sk. 7. art.).

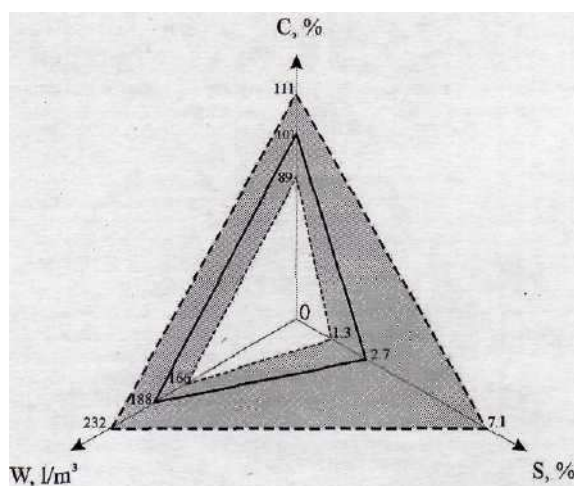


7. att. Optimizējamās funkcijas atkarība no cementa stiprības un plastifikatora daudzuma



Betona sastāva projektēšanas un optimizācijas uzdevumu risināšanai izstrādātas speciālas programmas, izmantojot MS Excel un Visual Basic. Iegūta sistēma, kas sastāv no apakšmoduļiem (apakšprogrammām ideālās liknes noteikšanai, granulometrijas aprēķināšanai, betona sastāvu aprēķināšanai un dažādiem optimizācijas variantiem).

Izveidota etalonbētona koncepcija. Analizējot dažādus betona piedāvājumus un pētījumu rezultātus, iegūti statistiskie dati par dažādu klašu betoniem. Piedāvātā metodika dod iespēju izvērtēt salīdzināmo betona sastāvu pēc ekonomiskuma un kvalitātes kritērijiem. Rezultātu grafiskai interpretācijai izmantota diagramma ar 3 asīm, kurā attiecīgajā mērogā atzīmētas sastāva rādītāji: relatīva cena  $C$  (%), vidējā kvadrātiskā novirze starp ideālo un reālo granulometrisko līkni  $S$  (%) un ūdens daudzums,  $W$  ( $l/m^3$ ). Vizuāli var novērtēt, vai dotā sastāva trīsstūris iekļaujas robežās. Jo tuvāk centram atrodas sastāva rādītāji, jo efektīvāks ir betons (sk. 8. att.).



Apzīmējumi:                    ———— Analizējamais sastāvs;  
                                      - - - - - neefektīvo sastāvu robeža;

8. att. Diagramma betona sastāva novērtēšanai

## SECINĀJUMI

- Izstrādāta metodika pildvielas granulometriskā sastāva pārrēķināšanai no vienas sietu sistēmas uz atšķirīgu sietu sistēmu ar interpolācijas metodi, ievērojot apaļas formas un kvadrātveida sietu acu pārejas koeficientu. Salīdzināti pildvielu granulometriskie sastāvi un novērots, ka vismazākā vidējā kvadrātiskā novirze  $S$  starp teorētiskiem un eksperimentāliem rezultātiem ir sasniedzama vairakfrakciju pildvielām ( $S < 2.1\%$ ). Pildvielām, kurām pamatā ir viena frakcija, metode nav piemērota.
- Izmantojot mazāko kvadrātu principu, izstrādātas universālas pildvielu sastāva aprēķināšanas metodes un algoritmi analītiskajai un skaitliskajai metodei, kas dod iespēju noteikt optimālo sastāvu pildvielu daudzkomponentu maisījumiem. Noteiktas analītiskās un skaitliskās metožu priekšrocības un trūkumi. Secināts, ka analītiskai metodei ir pielietošanas ierobežojumi, bet skaitliskā metode ļauj realizēt plašākas sastāva projektēšanas iespējas. Rezultāti, kas iegūti ar skaitlisko un analītisko metodēm, atšķiras ne vairāk par 1 %.
- Piedāvātie parametri pildvielu ideālās granulometrijas vienādojumam (pakāpe  $n$  un līknes sākumpunkts  $X_0$ ) ļauj modelēt visdažādākās pildvielu ideālās līknes. Izmantojot izstrādāto analītisko un skaitlisko metodi, ir iespējams projektēt pildvielu sastāvus moderniem betona veidiem, sākot ar stingrajiem līdz pašblīvējamiem maisījumiem, kas līdz šim nebija iespējams.
- Izstrādātās analītiskās un skaitliskās metodes dod rezultātus, kas vislabāk atbilst pildvielu ideālajai līknei, salīdzinājumā ar apskatītajām, jau eksistējošām metodēm. Veicot metožu rezultātu salīdzināšanu dažādu tipu divkomponentu maisījumiem konstatēts, ka caurmērā vidējā kvadrātiskā novirze starp pildvielu ideālo un aprēķināto līkni ir vismazākā izstrādātajai analītiskai un skaitliskai metodei (6.5%), bet apskatītajām eksistējošām Holandes, analītiskai un lauztās līnijas metodēm attiecīgi ir 7.9, 11.9 un 7.7 %.
- Plastisko betonu maisījumu projektēšanā tiek piedāvāts izmantot universālu parametru - granulācijas skaitli  $X$ , kas ar vienu lielumu raksturo pildvielu adsorbcijas spēju, vienlaicīgi ņemot vērā granulometriskā sastāvu un daļiņu formu. Atrasta empiriskā sakarība, kas dod iespēju noteikt nepieciešamo ūdens daudzumu betonā, zinot granulācijas skaitli un maisījuma konsistenci (kona nosēdumu).
- Uz granulācijas skaitļa principa izstrādātā betona sastāva projektēšanas metodika plastiskajiem maisījumiem jūtami vienkāršo un precizē betona sastāvu aprēķinu. Granulācijas skaitļa metodei ir mazākas atšķirības betona maisījumu kona nosēduma uzrādījumiem starp projektētajiem un eksperimentālajiem rezultātiem. Korelācijas koeficienti ir attiecīgi 0.84 standarta metodei un 0.94 granulācijas skaitļa metodei.

- Izstrādātas metodes un algoritmi dažādu optimizācijas uzdevumu risināšanai, tajā skaitā pildvielu atlasei no datu bāzes, plastifikatora optimālā daudzuma noteikšanai un cementa tipa izvēlei. Piedāvāto optimizācijas metožu pielietošanas piemēri liecina par to, ka daudzērķu optimizācijas elementus var sekmīgi izmantot dažādu praktisko uzdevumu risināšanā, izstrādājot betona sastāvus. Rezultātu grafiskā interpretācija trīsdimensiju diagrammās paaugstina iegūto rezultātu uzskatāmību un dod iespēju prognozēt optimizējamo funkciju maiņas tendences.
- Izstrādātā etalonbetona koncepcija dod iespēju operatīvi salīdzināt dotā sastāva cenu un galvenos kvalitātes kritērijus ar statistiski vidēja sastāva rādītājiem, kā arī attēlot rezultātus diagrammā.

### PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. G.Shakhmenko, J.Birsh. Concrete mix design and optimization. - Proceedings of the 2nd Int. Svposium in Civil Engineering. Budapest, 1998, pp. 160-167.
2. G.Shakhmenko. Optimal aggregate mix design. - Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference "Modern building materiāls, structures and techniques". Vilnius, May 1999, pp.86-91.
3. G. Šahmenko, J.Biršs. Pildvielu granulometriskā sastāva noteikšanas metožu pilnveidošana. - RTU Zinātniskie raksti. Sērija 2, sējums 1. Rīga, 2000, 118.-125. lpp.
4. G. Šahmenko. Divkomponentu pildvielu maisījuma aprēķins ar smalkuma moduļu metodi. - RTU Zinātniskie raksti. Sērija 2, sējums 1. Rīga, 2000, 126.-131. lpp.
5. G.Shakhmenko. Development of ready-mix concrete technolgv. - Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference "Modern building materiāls, structures and techniques". Vilnius, May 2001, absīract p.39-40, full paper on enclosed CD-ROM.
6. G. Šahmenko. Betonu sastāvu aprēķins ar granulācijas metodi. - RTU Zinātniskie raksti. Sērija 2, sējums 2. Rīga, 2001, 181-190. lpp..
7. G. Šahmenko, V.Zvejnieks, A.Paeglītis, J.Linde. Vieglobetons tiltu konstrukcijām. - RTU Zinātniskie raksti. Sērija 2, sējums 3. Rīga, 2002, 178.-188. lpp.
8. G.Šahmenko, J.Biršs. Application of method of multi-objective optimization for concrete mix design. - RTU Zinātniskie raksti. Sērija 2, sējums 4. Rīga, 2003., 224.-232 lpp.
9. A.Paeglītis, V.Zvejnieks, G.Šahmenko. Light Weight Concrete Application in Latvian Bridges. fib Symposium „ Concrete Structures: the Challenge of Creativity" (France, April 26-28, 2004) - text on CD, 6 lpp.