Зүрх судасны системийн хялбаршуулсан загвар

С.Баттулга[1], Т.Ахыт[1]

[1]АШУҮИС. Био-АС
Цахим хаяг: battulga@mnums.edu.mn, Утас: 99118258

Түлхүүр үг:
Зүрх судасны систем (ЗСС)
Виртуаль эрхтэн систем
Симуляци
Динамик загвар
Математик загвар

Товч утга:
Зүрхний судас, цусны эргэлтийн тогтолцоонд тохирсон математикийн энгийн загварт тулгуурлан зүрх судасны үйл ажиллагааны янз бүрийн өөрчлөлтүүдийг (зүрхний агшилтын тоо, даралт, судасны уян харимхай чанар гэх мэт) судлах, хооронд нь харьцуулах боломжтой сургалтанд ашиглах хэрэглээний программ зохиоход судалгааны зорилго оршино. Эрүүл болон эмгэг эрхтэн системүүдийн үйл ажиллагаа нь тодорхой хуулиар явагддаг. Энэ нь янз бүрийн хялбаршуулалтын үр дүнд энгийн ойлгомжтой математик загвар болдог, мөн илүү нарийвчлан загварчлах боломжтой. Эмнэлзүйн хичээлүүдэд тодорхой тооны тохиолдлууд (case) ашиглагдсаар байна. Виртуаль программ сургалтанд нэвтэрснээр ЗСС-ийн ихэнх боломжит тохиолдлууд дахь үзүүлэлтүүдийн өөрчлөлт, урьдчилсан дүгнэлтийг хийсвэрээр төсөөлөх, эмчилгээ, оношлогооны төлөвлөгөөг хийсвэр боловч оновчтой гаргах чадвар, дадлыг эдийн засгийн хэмнэлттэй, ёс зүйн зөрчилгүйгээр суралцагч эзэмших боломжийг бүрдүүлж байна. Шинээр тогтоогдох лавламж хэмжээ, био тооцоололыг их дээд сургуулиудын сургалт, Монгол улсын бүх шатны эмнэлгүүдэд хэрэглэгдэх лавламж болгон ашиглах боломжтой юм.

Үндэслэл: Зүрхний судас, цусны эргэлтийн тогтолцоонд тохирсон математикийн энгийн загварт тулгуурлан зүрх судасны үйл ажиллагааны янз бүрийн өөрчлөлтүүдийг (зүрхний агшилтын тоо, даралт, судасны уян харимхай чанар гэх мэт) судлах, хооронд нь харьцуулах боломжтой сургалтанд ашиглах хэрэглээний программ зохиоход судалгааны зорилго оршино.

Бодит байдал дээр хүний биеийн ачаалал нь ихэвчлэн цусны даралт хэт өөрчлөгдөх хэлбэрээр илэрдэг бөгөөд ачаалал авах тухайн цаг үеийн цусны эргэлтийн эсэргүүцэл, өөрчлөлт, нэг минут тутамд биеэр урсах цусны гүйдэл, зүрхний агшилтын тоо, цохилох хүч мөн артерийн цусны даралт зэргийг голчлон их, бага хэмжээгээр хялбаршуулан судлах болно. “Энгийн”, “Хялбаршуулсан”, “Нарийвчилсан” гэсэн 3 өөр виртуаль ЗСС зохиосноос энд хялбаршуулсан загварыг танилцуулж байна.

Анагаахын шинжлэх ухаан болон практикт өвчтөн тус бүрт зориулсан оновчтой, бие даасан эмчилгээний тактикаар эмчийг автоматаар хангах шаардлага байсаар байна. Эмч цаг ямагт хариуцлагатай шийдвэр гаргадаг. Ихэнх тохиолдолд энэ нь өвчтөний ЗСС-тэй холбоотой байдаг. Энэхүү асуудлыг шийдвэрлэх зорилгоор зүрхний өвчтөнүүдийг оношлох, эмчлэхэд зориулсан автоматчилагдсан мэдээллийн системүүдийг боловсруулсаар байгаа билээ. Эдгээр мэдээллийн системийн үндэс нь ЗСС-ний математик загварыг бүрдүүлдэг.

Хэрэглээний математикийн салбарт хүний эрхтэн тогтолцоог загварчлах судалгааны ажил олноор хийгдсээр ирсэн. Эд, эрхтэний үйл ажиллагааг төлөөлж чадахуйц математик загвараа компьютерт симуляцлаж виртуаль эрхтэн систем бүтээснээр эмнэлзүйн зарим хичээлийг бодит байдалд ойртуулах, илүү өгөөжтэй байлгах ёс зүй, эдийн засгийн шаардлага байсаар байна.

Виртуаль эрхтэн системийн оролтын өгөгдөлөөс шалтгаалсан үр дүн бодит хүний эрүүл болон зонхилон тохиолдох өвчний үеийн эмнэлзүйн шинж тэмдгүүдтэй тохирч байгаа эсэхийг харьцуулан судлах шаардлагатай.

Виртуаль эрхтэн систем дээр эрүүл болон зонхилон тохиолдох өвчний үеийн эмнэлзүйн шинж тэмдгийг илэрхийлэх симуляци программ зохиож сургалтанд хэрэглэх арга, технологи боловсруулах, даралт, зүрхний цахилгаан бичлэгийн гэх мэт төхөөрөмж үйлдвэрлэлийн өмнөх технологийн судалгаа хийх хэрэгцээтэй байна.

Зорилго: Эмнэлзүйн хичээлд ашиглах математик загвар дээр үндэслэсэн зүрх судасны эрхтэн системийн виртуаль орчин бүрдүүлэх.

Зорилт:

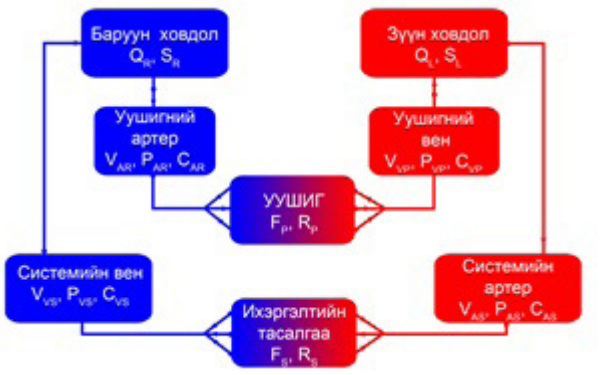
1. Хүний цусны эргэлтийн эрхтэн системийн үйл ажиллагаанд нөлөөлөх хүчин зүйлсийг систем динамикийн аргаар судлах:
2. Хүний цусны эргэлтийн эрхтэн системийн үйл ажиллагааны математик загварыг байгуулж, уг загварыг өндөр нарийвчлалтайгаар ажиллуулах, тооцон бодох математикийн арга, алгоритмыг боловсруулах
3. Математик загвараа алгоритмын дагуу программчилж сургалтыг бодит байдалд ойртуулхуйц виртуаль цусны эргэлтийн систем бүтээх
4. Виртуаль эрхтэн системүүдийн оролтын өгөгдлөөс шалтгаалсан гаралтын үр дүнгүүд бодит хүний эрүүл болон зонхилон тохиолдох өвчний үеийн эмнэлзүйн шинж тэмдгүүдтэй тохирч байгаа эсэхийг харьцуулан судалж тогтоох

Судалгааны ажлын материал, арга зүй:

ЗСС-ийн математик загвар: Энэхүү судалгаанд их, бага хоёр эргэлтийн том, жижиг артерийн судаснуудыг эргэлт тус бүр дээр нь нэг нэг судас хэмээн нэгтгэж үзэхэд л хангалттай бөгөөд том жижиг венийн судсыг мөн адил нэгтгэж, тараагуурцар, хялгасан судас зэргийг захын хэсгийн судас гэвэд эргэлт тус бүр дээр нь нэгтгэн нэг судас хэмээн авч үзэх болно. Их, бага эргэлтийн артерийг мөн бас венийг нэгтгэн цаашид тасалгаа гэж (их эргэлтийн артерийн/ венийн тасалгаа; уушигний артерийн/венийн тасалгаа гэх мэт) нэрлэх болно. Цусны даралт, эзэлхүүн, судасны хананы уян харимхай чанар зэргийн дундаж хэмжээнүүдийг зүрхний олон янзын цохилт-хэмнэлийн үед (агшилт, тэлэлт) тасалгаа тус бүр дээр нь авч үзнэ.

Хүснэгт 1. Зүрх судасны эрхтэн системийн параметрүүд

Параметр	Тайлбар
Q_l,Q_r	Зүрхний минутын багтаамж= зүүн, баруун ховдлоос 1мин.д шахах цусны нийт хэмжээ
S_l, S_r	Зүүн, баруун ховдлын агшилт (зүрх агших үеийн хүч)
V_{as}, V_{vs},	Цусны эзэлхүүний дундаж- тасалгаа тус бүр дээр
V_{ap}, V_{vp}	*as-их эргэлтийн артери, vs-их эргэлтийн вени, ap-уушигний артери, vp-уушигний вени*
C_{as}, C_{vs}, C_{ap}, C_{vp}	Судасны хананы уян харимхай чанар-тасалгаа тус бүр дээр
P_{as}, P_{vs} P_{ap}, P_{vp}	Цусны даралт-тасалгаа тус бүр дээр
F_s, F_p	Их эргэлт, бага эргэлтийн захын хэсгийн цусны гүйдэл (systemic, pulmonary)
R_s, R_p	Их эргэлт, бага эргэлтийн захын хэсгийн цусны гүйдлийн эсэргүүцэл (systemic, pulmonary)
$C_{diast,l}$, $C_{diast,r}$ $C_{syst,l}$, $C_{syst,r}$	Ховдолын уян харимхай чанар (diastol, systol)
H	Цохилтын тоо 1 мин-д
V_{str}	Цусны агшилтын багтаамж = нэг удаагийн агшилтаар шахах цусны эзэлхүүн
V_0	Бүх эргэлтийн цусны нийт эзэлхүүн



Зураг 1. Зүрхний цусны эргэлтийн системийг харуулсан диаграмм

Цаашдаа бид системийн тэнцвэртэй байдлыг үндэс болгон үзэх бөгөөд энэ нь захын хэсгээр гүйх цусны урсгал нь ховдлоос нэг минутанд шахах цусны хэмжээтэй тэнцүү гэсэн үг юм.[1]

Хялбаршуулсан загварын математик тайлбар: Захын хэсгүүдийг цусны гүйдлийг эсэргүүцэх судас гэж ойлгох хэрэгтэй. Энд Ом-ын хуулийг ашиглаж болох ба энэ нь цусны гүйдэл нь зэргэлдээх судасны даралтын ялгавартай пропорциональ, харин эсэргүүцэлтэй нь урвуу пропорциональ байна.

$$(1)\ F_s = \frac{1}{Rs}(P_{as} - P_{vs}) \qquad F_p = \frac{1}{Rp}(P_{ap} - P_{vp})$$

Артерийн болон венийн судаснуудыг нэгтгэн тус бүртээ тасалгаа хэмээсэн ба бүгд тодорхой хэмжээний уян харимхай чанартай байна. Тасалгаа тус бүрийн эзэлхүүн, даралт хоёр мөн судасны хананы уян харимхай чанар, эзэлхүүн хоёрын хооронд тодорхой уялдаа холбоо байгааг шугаман гэж үзлээ.[2]

$V_{as} = c_{as} P_{as}$, $V_{vs} = c_{vs} P_{vs}$, $V_{ap} = c_{ap} P_{ap}$, $V_{vp} = c_{vp} P_{vp}$

Бүх л судасны харимхай чанар $\mathbf{c_{as}}$, $\mathbf{c_{vs}}$, $\mathbf{c_{ap}}$, $\mathbf{c_{vp}}$ дараа нь бас cdiast, r (зүрхний тэлэх үед ховдлын уян харимхай байдал) нь дээр тайлбарласнаар судасны хананы уян чанарыг тодорхойлох бөгөөд эхний ээлжинд тогтвортой гэж үзэв. Харин дараа нь бодит байдал дээр тохиолддог шиг $\mathbf{c_{vs}}$ өөрчлөгдөнө. Бусад уян харимхай байдлын хэмжээсүүд бидний энэ загварт нэг их нөлөөлөхгүй учраас тогтвортойгоор нь хадгалж үлдэнэ.

Зүрхний ховдол нь тодорхой цусны гүйдлийг бий болгож байдаг шахах эрхтэн юм. Зүрхний цусны эргэлтийн системийг тэнцвэртэй байлгах зүүн, баруун ховдлын нэг минутанд шахах цусны хэмжээ Q_l, Q_S нь их, бага эргэлтийн нэг минутанд урсах цусны хэмжээтэй F_S, F_p тэнцүү байх ёстойг эхэлж мөрдөнө.

$$(3)\quad Q_l = HV_{str,\,l}\ ,\quad Q_s = HV_{str,\,r}$$

Үүнд: Н нь зүрхний агшилтын багтаамж $V_{str.l}$ $V_{str.r}$ нь зүүн баруун ховдлын цусны агшилтын багтаамж бөгөөд энэ нь нэг удаагийн цохилтоор шахах цусны эзэлхүүн гэсэн үг юм.

Цусны агшилтын багтаамжийг зүрх агших үеийн (ховдлын цусаа шахах процесс) төгсгөл болон зүрх тэлэх үеийн (ховдлын цусаар дүүрэх процесс) төгсгөл хоёрын цусны эзэлхүүний ялгааг олж тодорхойлно. Аль ч тохиолдолд ховдлуудыг бас уян харимхай ханатай судаснууд гэж ойлгох хэрэгтэй.

- Ховдолд залгаатай венийн даралт P_v (P_{vp} нь зүүн ховдлын, P_{vs} нь баруун ховдлын) нь зүрх тэлэх үед ховдлыг цусаар дүүргэнэ. Ховдол дахь цусны даралт залгаатай байх венийн даралтыг P_{vs}, P_{vp} гүйцэхэд энэ дүүргэх процесс дуусна. Тэгэхээр зүрх тэлэх үеийн төгсгөлд ховдлын цусны эзэлхүүн нь:

$$VD = c_{diast}P_v$$

- Зүрх тэлэх процесс болгоны араас зүрх агших процесс явагдана. Ховдол дахь цусны даралт түүний эсрэг шахах артерийн даралт хүртэл буурахад зүрх агших үеийн цус шахах процесс дуусна. Тэгэхээр зүрх агших үеийн төгсгөлд ховдлын цусны эзэлхүүн нь:

$$VS = c_{syst}P_a$$

Цусны агшилтын багтаамж нь тэгэхээр

$$V_{str} = V_D - V_S = c_{diast}\,P_v - c_{syst}\,P_a$$

Зүрх агших үед ховдол нь зүрх тэлэх үеэс харьцангуй илүү хатуу байх тул csyst = 0 гэе. Ингэснээр:

$$V_{str} = c_{diast}\,P_v$$

Улмаар зүүн, баруун ховдол тус бүр шууд дараах байдлаар:

$$(4)\quad V_{str,\,l} = c_{diast,\,l}\,P_{vp}\ ,\quad V_{str,\,r} = c_{diast,\,r}\,P_{vs}$$

Зүрхний минутын багтаамж эцэст нь (3), (4)-р тэгшитгэлээс:

$$(5)\quad Q_l = c_{diast,\,l}\,HP_{vp}\ ,\quad Q_r = c_{diast,\,r}\,HP_{vs}$$

Урьд нь дурьдаж байснаар зүрхний цусны эргэлтийн системийн тэнцвэртэй байдал чухал ба энэ нь захын хэсгээр (их, бага аль аль эргэлтэндээ) нэг минутанд урсах цусны гүйдэл зүрхний минутын багтаамжтай (зүүн ховдолдоо ч, баруун ховдолдоо ч) тэнцүү байх ёстой гэсэн үг6. Ингэхээр:

$$(6)\quad Q_r = Q_l = F_s = F_p = :F \text{ ба } V_{str,l} = V_{str,\,r} = V_{str}$$

Дараагийн тэгшитгэл нь зүрхний цусны бүх эргэлтийн цусны нийт эзэлхүүн V0-г илэрхийлнэ.

$$(7)\quad V_0 = V_{as} + V_{vs} + V_{ap} + V_{vp} = c_{as}\,P_{as} + c_{vs} + P_{vs} + c_{ap}\,P_{ap} + c_{vp}\,P_{vp}$$

"Энгийн" загварын хувьд зүрхний минутын багтаамжийг тооцсон (5) тэгшитгэлд артерийн даралт, зүрхний агшилтын багтаамжийг тооцоогүй сул талтай ч сургалтад ашиглахад зориулсан цөөн параметртэй. Харин "Хялбаршуулсан" загварт тэлэлт, агшилтын үргэлжлэх хугацааг тооцсоноор симуляцийн үр дүнг эмнэлзүйн тохиолдолуудтай харьцуулан судлах боломжийг олгох давуу талтай.

(5) тэгшитгэлээр зүрхний минутын багтаамж Q_l,Q_r –г загварчлахад зарим нэг нөхцөл байдал тодорхой бус байна.

Учир нь артерийн даралт болон зүрхний агшилтын багтаамжийн аль алийг нь бодолцож зүрхний минутын багтаамжийн шинэ томъёог гаргана. Франк Старлингийн хуулиар:

$$(8)\quad V_{str} = \frac{S}{Pa}\,V_{diast}$$

Энэ нь цусны агшилтын багтаамж зүрхний тэлэлтийн үеийн багтаамжтай пропорциональ гэсэн үг. S гэсэн хүчин зүйлийг ховдлын агшилтын хүч гэж тайлбарлавал энэ нь ховдлын агшилт гэсэн үг. Одоо тэгэхээр td тэлэлтийн үргэлжлэх хугацаа мөн ts агшилтын үргэлжлэх хугацааг тодорхойлбол (секундээр):

$$t_d + t_s = \frac{60}{H}\ \text{(зүрхний цохилтын хугацаа)}$$

Энэхүү судалгаанд чухал хэрэгтэй байх зүрхний агшилтын тооны тухайд бол H.C.Bazett-н гаргасан томъёог ашиглаж болно:

$$t_s = k\sqrt{\frac{60}{H}},$$

энд к = 0,343 гэж орлуулж болно.

$$(9)\ t_d(H) = \sqrt{\frac{60}{H}}\cdot\left(\sqrt{\frac{60}{H}} - k\right),$$

$$(10)\ Q_l = \frac{(1-\alpha_l)c_{diast,l}P_{vp}S_lH}{(1-\alpha_l)P_{as}+\alpha_lS_l},$$

$$(11)\ Q_r = \frac{(1-\alpha_r)c_{diast,r}P_{vs}S_rH}{(1-\alpha_r)P_{ap}+\alpha_rS_r},$$

Ингээд:

$$(12)\ \alpha_l = e^{-\left(c_{diast,l}\cdot R_l\right)^{-1}\cdot t_d(H)},\ \alpha_r = e^{-\left(c_{diast,r}\cdot R_r\right)^{-1}\cdot t_d(H)},$$

Үүнд: R_r, R_l нь зүүн, баруун ховдолд юүлэх цусны эсрэг эсэргүүцлийг тэмдэглэсэн болно.

Шугаман бус тэгшитгэлийн системийг хураангуйлвал:

$$V_0 = V_{as} + V_{vs} + V_{ap} + V_{vp} =$$

$$= c_{as}\,P_{as} + c_{vs}\,P_{vs} + c_{ap}\,P_{ap} + c_{vp}\,P_{vp}$$

$$F_s = \frac{1}{Rs}(P_{as} - P_{vs})$$

$$F_p = \frac{1}{Rp}\,(P_{ap} - P_{vp})$$

$$Q_l = \frac{(1-\alpha_l)c_{diast,l}P_{vp}S_lH}{(1-\alpha_l)P_{as}+\alpha_lS_l},$$

$$Q_r = \frac{(1-\alpha_r)c_{diast,r}P_{vs}S_rH}{(1-\alpha_r)P_{ap}+\alpha_rS_r},$$

$$\alpha_l = e^{-\left(c_{diast,l}\cdot R_l\right)^{-1}\cdot t_d(H)},$$

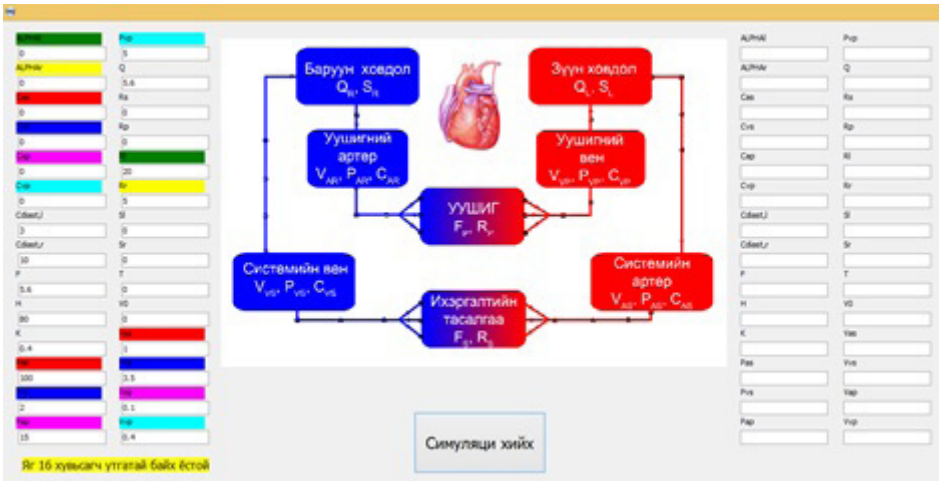
$$\alpha_r = e^{-\left(c_{diast,r}\cdot R_r\right)^{-1}\cdot t_d(H)},$$

$$t_d(H) = \sqrt{\frac{60}{H}}\cdot\left(\sqrt{\frac{60}{H}} - k\right),$$

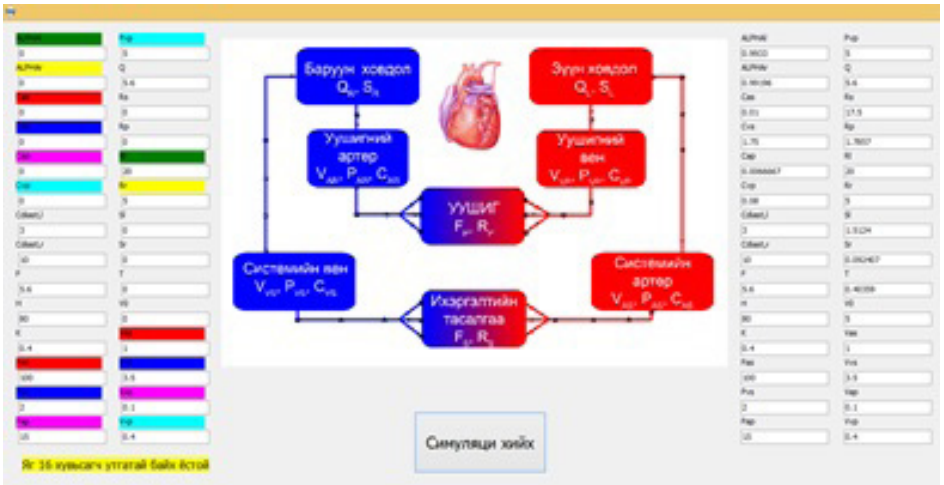
Q_r=Q_l=F_s=F_p=:F.

Үр дүн:

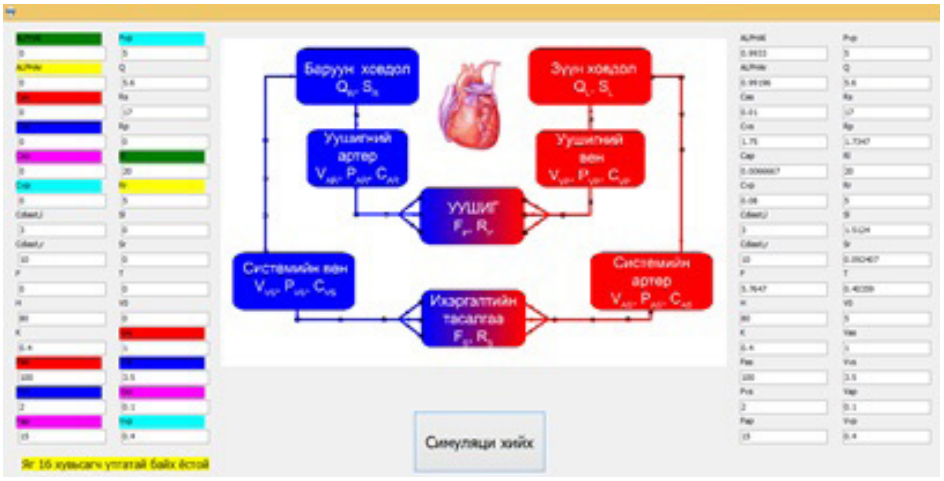
Хялбаршуулсан загварын аппликейшн: Тэгшитгэл 12, хувьсагчийн тоо 28 бүхий шугаман бус тэгшитгэлүүдийн системийг ашиглан симуляци хийх програмыг зохиосон. Хэрэглэгч 16 үзүүлэлтийг гараас оруулж 12 үр дүнг хүлээн авах боломжтой. Гараас оруулах 16 үзүүлэлтийг боломжит хувилбараар нь хэрэглэгч өөрөө сонгодог байхаар зохиосон нь ЗСС-ийн бүх тохиолдол (case)-уудыг үүсгэх, урьдчилан төсөөлөх боломжийг бүрдүүлсэн.



Зураг 2. Хялбаршуулсан загварын ажлын талбар



Зураг 3. Хялбаршуулсан загвар симуляци хийгдсэн байдал



Зураг 4. Хялбаршуулсан загварын зарим үзүүлэлтийг өөрчилсөн байдал

Дүгнэлт: Компьютерт суурилсан симуляцийн болон бусад программ хангамж ашиглан виртуаль эрхтэнийг загварчлах, сургалтанд хэрэглэх боломжийг бүрдүүлсэн.

Шинээр тогтоогдох лавламж хэмжээг их дээд сургуулиудын сургалт, Монгол улсын бүх шатны эмнэлгүүдэд хэрэглэгдэх лавламж болгон ашиглах зөвлөмж боловсруулах өргөн боломж нээгдлээ

Сургалт, эрдэм шинжилгээ, судалгаанд гадаадаас авч ашигладаг өндөр өртөг бүхий программ хангамжийн загвар, кодчилолыг орлож чадахуйц бүтээлийн нэг болсон

Ном зүй:

1. *D. Möller, D. Popovic, G. Thiele: Modeling, simulation and parameter-estimation of the human cardiovascular system. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1983.*
2. *T. Pedley: The Fluid Mechanics of Large Blood Vessels. Cambridge University Press, 1980.*
3. *Maggi Boult, Kate Fitzpatrick, Mary Barnes, Guy Maddern, Robert Fitridge. Developing tools to predict outcomes following cardiovascular surgery // ANZ Journal of Surgery. 81. 2011. 768-773.*
4. *V.Diaz-Zuccarini, A.J. Narracott, G. Burrieschi, C. Zervides, D. Rafiroiu, D. Jones, D.R. Hose, P.V. Lawford. Adaptation and development of software simulation methodologies for cardiovascular engineering: present and future challenges from an end-user perspective //Phylosophical transactions of the Royal Society A. vol. 367 no. 1898. 2009. 2655-2666.*
5. *S. KashifSadiq, Mardo D. Mazzeo, Stefan J. Zasada, Steven Manos, Ileana Stoica, Catherine V. Gale, Simon J. Watson, Paul Kellam, Stefan Brew, Peter V. Coveney. Patient-specific simulation as a basis for clinical decision-making // Phylosophical transactions of the Royal Society A. 366, 2008. 3199 – 3219.*
6. *Thomas Heldt, Ramakrishna Mukkamala, George B. Moody, Roger G. Mark.CVSim: An open-source cardiovascular simulator for teaching and research // The Open Pacing, Electrophysiology & Therapy Journal. 3. 2010. 45-54.*
7. *L. Formaggia, A. Quarteroni, A.Veneziani.Cardiovascular Mathematics. Modeling and simulation of the circulatory system – Springer-Verlag: Series MS&A, Vol. 1, 2009. 522 p.*